

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

В.А. Зверев, Е.В. Кривопустиова, Т.В. Точилина

ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ.

Часть 2

**Учебное пособие
для конструкторов оптических систем и приборов**



Санкт-Петербург

2013

Зверев В.А., Е.В. Кривоустова, Т.В. Точилина. ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ. Часть 2. Учебное пособие для конструкторов оптических систем и приборов. – СПб: СПб НИУ ИТМО, 2013. – 248 с.

В оптическом приборостроении достаточно широко применяют кварцевое стекло и кристаллические материалы, цветные и инфракрасные стекла, оптическую керамику, ситаллы и другие оптические материалы. В настоящем учебном пособии дано описание оптических и физико-механических свойств применяемых материалов. Свойства бесцветных оптических стекол описаны в учебном пособии «Оптические материалы. Часть 1».

Учебное пособие предназначено для студентов по направлению подготовки «Оптотехника», а также может быть полезным для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием оптических систем, конструированием оптических приборов и для технологов оптического производства.

Учебное пособие подготовлено на кафедре Прикладной и компьютерной оптики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

Рецензенты: д.т.н., профессор Э.С. Путилин (НИУ ИТМО)
д.т.н., профессор М.Н. Сокольский (НИУ ИТМО)

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области приборостроения и оптотехники для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавриата 200400 «Оптотехника» и специальности 200401 «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения».



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2013
© В.А. Зверев, Е.В. Кривоустова, Т.В. Точилина, 2013

«Свет, как основной вид энергии, используется не только в традиционных областях оптики: в микроскопии, фотографии и т.п.; с его помощью наиболее экономично и эффективно можно решать ряд задач в таких отраслях народного хозяйства, как связь, механическая и химическая технология, энергетика. Для этого необходим, прежде всего, комплекс оптических материалов с разнообразными физико-химическими свойствами».

Академик Г.Т. Петровский. Избранные труды.
Санкт-Петербург, 2008, стр. 69.

1. КВАРЦЕВОЕ СТЕКЛО

Сведения об исследовании свойств кварцевого стекла и о технологических особенностях его производства опубликованы в многочисленных статьях отечественных и зарубежных авторов, ссылки на которые можно найти в изданных в СССР монографиях [1, 2], материал которых принят за основу при составлении этого раздела пособия.

1.1. Краткий исторический очерк

Кварцевое стекло обладает комплексом таких ценнейших свойств, как нечувствительность к термоудару, высокая прозрачность в ультрафиолетовой (УФ), видимой и инфракрасной (ИК) областях спектра, химическая инертность по отношению к агрессивным средам (кислота, соли, расплавы металлов), отличные диэлектрические качества. Поскольку кварцевое стекло однокомпонентно, многие из его важнейших свойств определяются наличием в нем примесей, а также условиями его синтеза. Неповторимое сочетание физико-технических свойств плавленного кремнезема (SiO_2) вот уже более 200 лет привлекает внимание ученых и инженеров всех стран мира. Способы производства кварцевого стекла резко отличаются от методов производства обычного стекла, что обусловлено высокой температурой плавления кварца. Первыми работами, посвященными вопросам природного кристаллического кремнезема, были работы Гейера (Heyer) и Веструмба (A. Westrumb), появление которых относится к 1788–1789 годам. В 1802–1804 годах английский исследователь Хеэ (R. Hare) опубликовал работы, посвященные опытам плавления кварца. Однако первооткрывателем кварцевого стекла принято считать Кларка (E.D. Clarke), который в 1817 году, работая над усовершенствованием стеклодувной горелки, как можно предположить, достиг температур, необходимых для плавления кристаллического кремнезема, о чем и говорится в его опубликованном отчете «Об улучшениях, произведенных в стеклодувной трубке, с дополнительными замечаниями о возрождении металлов из окислов и о плавлении тугоплавких тел (включая кварц) при помощи того же самого инструмента».

Первые исследования кристаллического и плавленного кварца были не замечены и забыты. Такая же судьба постигла работы французского исследователя Гоодина (A. Gaudin), который в 1837 году опубликовал свои результаты по изучению плавленного кварца.

Кварцевое стекло Гоодин получил при расплавлении кусочков кристаллического кварца в пламени гремучего газа (кислородно-водородной смеси). Он показал, что при плавлении кварца получается аморфное вещество, которое не имеет двойного лучепреломления, характерного для кристаллов. Нити, вытянутые из расплавленной капли горного хрусталя были вполне прозрачны, в то время как нити, полученные из расплавленного песка, всегда содержали тончайшие капилляры и имели опалесценцию, типичную для стекломассы, пронизанной газовыми включениями. Эти разновидности плавленного кремнезема впоследствии были названы прозрачным и непрозрачным кварцевым стеклом. Стремясь получить новый драгоценный камень, Гоодин заинтересовался необычным поведением кварца после его плавления и начал всесторонне изучать это вещество. Он, в частности, обратил внимание на то, что нити, изготовленные из кварцевого стекла, обладают исключительно высокой упругостью. Доклады Гоодина попали в архивы Французской академии наук и так же, как более ранние наблюдения, были забыты.

Английский исследователь Шенстоун (W.A. Shenstone) в 1901 году обнаружил работы Гоодина и установил, что именно он провел большой цикл опытов по изучению свойств кварцевого стекла.

Француз Готье (A. Gautier) в 1869 году вновь открывает кварцевое стекло и применяет плавеный кремнезем для изготовления простейших образцов лабораторного оборудования: термометров, капилляров, трубок, показанных им на Международной парижской выставке в 1878 году. В 1886 году братья Коулес (E.H. and A.H. Cowles) предприняли безрезультатную попытку получить плавеный кремнезем в электропечи. Кварцевое стекло стало привлекать внимание исследователей и инженеров лишь после опубликования в 1887 году работ Бойса (C.V. Boys). Бойс впервые предложил способ получения длинных кварцевых нитей толщиной 0,025 мм (выстреливание из лука) и применил эти нити в 1895 году для устройства крутильных весов при измерении сил гравитации.

Сотрудник Интернационального бюро мер и весов Чэппуис (P. Chappuis) в 1899 году методом последовательного наплавления друг на друга тончайших кварцевых нитей изготовил для газового термометра шар диаметром 10 см. Подобный способ применил Шенстоун для изготовления кварцевой трубки. Суть способа состоит в том, что нить толщиной 1 мм, полученную при перетяжке бульки кварцевого стекла, навивают виток к витку на платиновый цилиндр с одновременной сваркой отдельных витков друг с другом с помощью

гремучего газа. Затем платиновую подложку извлекают и получают кварцевую трубку. Примерно таким же способом французский физик Дюфур (G.F. Dufour) в 1900 году изготавливал термометры для измерения температур до 1000°C . Одновременно он проводил исследования восстанавливающего действия водорода на кремнезем.

В этот период времени вопросами изготовления кварцевого стекла занимались такие выдающиеся ученые и инженеры, как Ле Шателье (H.L. Le Chatelier), Виллард (P. Villard), Герэус (W.C. Heraeus), Гершкович (M.Z. Herschkowitsch), а также Дэй (A.L. Day) и Шеферд (E.S. Shepherd). Они не только усовершенствовали методы изготовления кварцевого стекла, но и впервые начали его промышленное производство.

В Англии производство кварцевого стекла было впервые осуществлено фирмой «Силика Синдикат ЛТД» по технологии Шенстоуна с применением различных типов печей для плавки кварцевого стекла. Германская фирма «Зиберт и Кун» приступила к промышленному производству прозрачного кварцевого стекла в 1902 году. Стекло изготавливалось по технологии фирмы «Герэус». Суть технологии Герэуса и Шенстоуна состояла в том, что кусочки прозрачного кристаллического кварца размером 5–7 мм в поперечнике быстро нагревались в факеле гремучего газа. При высокой скорости нагревания поверхность кусочка кварца оплавлялась, что предотвращало попадание воздуха внутрь образца. Случайно не растрескавшиеся при нагревании кусочки кварца превращались в прозрачные «бусы» стекла, которые затем сплавляли друг с другом.

Одновременно с фирмой «Герэус» примерно в 1900 году начинает производить кварцевое стекло германская фирма Шотта в Йене под руководством Гершковича по его технологии, суть которой заключалась в быстром нагревании кусков предварительно нагретого до температуры 560°C кварца, забрасываемого в раскаленный графитовый тигель. Медленное нагревание кристалла кварца до 560°C , как правило, не приводит к его растрескиванию. Если же нагреть образец еще на $10\text{--}13^{\circ}\text{C}$, кварц мгновенно растрескивается вследствие α - β -перехода, протекающего в его структуре при температуре 573°C и образец становится молочно-белым и непрозрачным.

Уже в 1900 году фирма Шотта экспонирует на Международной парижской выставке пластинки прозрачного кварцевого стекла диаметром 40 мм и толщиной 10 мм, полученные методом

Гершковича. Однако метод Гершковича по сравнению с методом Герэуса и Шенстоуна оказался менее выгодным в промышленном отношении и неконкурентоспособным. Поэтому фирма Шотта в дальнейшем прекратила всякие попытки производства кварцевого стекла и возобновила их лишь много лет спустя.

В 1903 году Кент (Н.А. Kent) предложил способ наплавления мелкой крупки кварца на подвижную заготовку из кварцевого стекла с помощью кислородно-водородной смеси. Этот метод, принципиально ничем не отличающийся от предложенного Вернейлем (М.А. Verneuil) способа выращивания синтетического рубина, был применен английской фирмой «Силика Синдикат ЛТД» и рядом фирм других стран для производства кварцевого стекла. Различные варианты метода Кента, как результат усовершенствований путем непринципиальных изменений, находят применение и в наше время.

Высокая стоимость изделий из прозрачного кварцевого стекла заставила искать более дешевые способы его производства. Один из таких способов производства непрозрачного кварцевого стекла был разработан английскими учеными Хаттоном (R.S. Hutton), Боттомлеем (J.F. Bottomley) и Пэйжетом (A. Paget). Разработанный ими способ, сущность которого состоит в том, что кварцевый песок плавится с помощью угольного стержневого электронагревателя, был применен в Англии и в Америке обществом «Термаль Синдикат», в Германии – немецкой фирмой «Тон унд Штейнцойгверк», немецко-английской фирмой «Берлин-Панков», во Франции – фирмой «Кварц э Силика». Различные варианты этого способа применяются и в настоящее время во всех странах мира.

Итак, к началу XX века существовали лишь кустарные способы производства прозрачного и непрозрачного кварцевого стекла, осуществляемого на малых производственных площадях. И, тем не менее, к этому времени со всей определенностью наметились главные направления производства, а, именно, газопламенный и электротермический методы получения кварцевого стекла.

Годин, Готье, Чэппуис, Шенстоун, Герэус, Кент и некоторые другие исследователи и инженеры применяли для получения кварцевого стекла кислородно-водородный факел, в то время как Гершкович, Хаттон, Боттомлей и Пэйжет производили плавку кварца с помощью электрического тока. В 1901–1902 годах для предотвращения восстановительного действия продуктов испарения электродов на кварц Хаттон применил электромагнитный способ

управления вольтовой дугой и получил довольно прозрачные образцы плавленого кварца. Однако в промышленности этот способ не получил применения.

В 1904–1905 годах Мехнер (H. Mehner) создал оригинальную дуговую отражательную печь, в которой дуга располагалась в одном из фокусов отражающей поверхности эллипсоида, при этом поток лучистой энергии, концентрируемый во втором фокусе эллипсоида, разогревал кварц до расплавления. Такое построение печи позволяло избавиться от газовыделений дуги, а также от тигеля, так как озеро расплава возникало на поверхности самой кварцевой шихты. Чтобы избавиться от воздушных пузырьков, Мехнер помещал шихту в герметичный кожух и для повышения температуры расплава вел плавку под давлением. Однако получить беспузырное кварцевое стекло ему не удалось. И, тем не менее, идея Мехнера в несколько измененном виде была возрождена в ФРГ в 1949 году в связи с попытками получения спектрально чистого плавленого кремнезема. Сущность изменения состояла в том, что плавка спектрально чистой кварцевой шихты с помощью сфокусированного лучистого потока производилась в вакууме в прозрачном герметичном сосуде из кварцевого стекла.

Интересно отметить, что еще в 1904 году Бредель (J. Bredel) предложил метод плавки кварца в вакууме, устранявший первопричину образования пузырей – атмосферные газы. В то же время он пытался использовать высокую проницаемость водорода в кварцевое стекло для его обеспыливания. Плавка шихты в этом случае велась в атмосфере водорода. Однако этот способ не нашел промышленного применения. В отличие от предложения Бределя, Дей (A.L. Day) и Шеферд (E.S. Shepherd) в 1906 году предложили в процессе плавки увеличивать давление в печи и за счет сжатия уменьшить размеры газовых пузырьков, содержащихся в стекле. Несмотря на то, что этот метод еще не позволял получить совершенно беспузырное кварцевое стекло, он нашел широкое промышленное применение. Так, в 20-х годах прошлого века в США по методу Дея и Шеферда для остекления солярия было изготовлено 1200 пластинок из прозрачного кварцевого стекла размером $190 \times 190 \times 6$ мм³. Таким образом, с остекления солярия в США началось использование кварцевого стекла в строительстве и архитектуре.

Дальнейшее развитие идеи Бределя, Дея и Шеферда получили в работах немецкого исследователя Гельбергера (H.Z. Helberger), англичанина Берри (E.R. Berry) и других, выполненных в 1914–

1926 годах. Гельбергер и Берри разработали вакуум-компрессионный способ плавки кварцевого стекла, который нашел всеобщее применение. Суть этого способа состоит в том, что кварцевую шихту, загруженную в графитовый или молибденовый тигель, помещают в электропечь и расплавляют в вакууме, создаваемом либо масляными ротационными, либо бустерными насосами. После расплавления кварца в печь нагнетают инертный газ (азот, аргон, углекислота), пока не будет достигнуто избыточное давление в несколько десятков атмосфер. Вакуумные полости – следы от межкусковых пустот – под действием всестороннего сжатия, обусловленного действием компрессирующего газа, захлопываются, и должна получаться практически беспузырная высокопрозрачная стекломасса. Однако потребовались десятилетия напряженной работы, чтобы путем дополнительных усовершенствований достичь требуемого качества вакуум-компрессионного кварцевого стекла.

В 20-х годах прошлого века вакуум-компрессионный метод изготовления кварцевого стекла получил широкое применение в Германии, в США (Дженерал Электрик Компани) и в ряде других стран.

В СССР систематические научные исследования в области кварцевого стекла начали проводиться с 1919 года под руководством М.С. Максименко; в 1920–1922 годах была разработана технология получения непрозрачного плавленого кварца. В 1932 году М.С. Максименко принимал деятельное участие в создании первого в СССР промышленного комплекса по выработке прозрачного и непрозрачного кварцевого стекла на Ленинградском фарфоровом заводе имени М.В. Ломоносова. В 1932–1934 годах на этом заводе был построен цех кварцевого стекла с производственной площадью 1600 м². В 1933 году вступил в действие опытный цех кварцевого стекла, организованный в старых действующих корпусах завода. К декабрю 1933 года новый цех освоил изготовление непрозрачных кварцевых труб диаметром до 200–300 мм (было изготовлено свыше 5000 м непрозрачных кварцевых труб), а также раструбов и фланцев.

Для освоения производства прозрачного кварцевого стекла в 1933 году заводом имени М.В. Ломоносова была использована индукционная печь высокой частоты конструкции германской фирмы «Лоренц». Предназначенная для плавки металлов, печь не была приспособлена для работы с вакуумом. Тогда же, в ноябре 1933 года, в ленинградской Центральной радиолaborатории группой специалистов завода имени М.В. Ломоносова были начаты работы по

получению прозрачного кварцевого стекла с помощью токов частотой 250–300 кГц. Устройство плавильной печи было таким же, как и в предыдущем случае. Однако индуктор помещался не внутри вакуумного колпака, а снаружи его. Мощность печи была равна 35–50 кГц. Именно эти печи после их соответствующей доводки явились первыми советскими кварцеплавильными агрегатами, позволяющими начать выработку прозрачного кварцевого стекла. Способ плавки, который был разработан в этот период времени, позже был назван вакуум-атмосферным. Одновременно было начато освоение безвакуумных и вакуум-компрессионных печей сопротивления, введена в строй кварцевая мастерская, начавшая переработку с помощью кислородно-водородного пламени штабиков, трубок и полосок в изделия сложного профиля, а также был налажен выпуск колб для ртутно-кварцевых ламп и кварцевой химико-лабораторной посуды. Потребность в импорте кварцевой продукции из-за границы резко сократилась. Таким образом, за период 1932–1934 годов в СССР было создано отечественное производство прозрачного и непрозрачного кварцевого стекла.

В 1934 году была опубликована первая в СССР монография С.П. Глаголева «Кварцевое стекло» (Госхимтехиздат, 1934), посвященная описанию свойств плавленного кремнезема, методам его обработки и областям применения. Эта книга содержит наиболее полный обзор работ в области плавленного кремнезема за период с 1849 по 1931 годы. Она сыграла большую роль в подготовке специалистов для кварцевого производства в нашей стране и не потеряла своей исторической ценности.

В монографии [2] сформулированы главные направления, по которым шло развитие науки о плавленном кремнеземе и о технологии его производства за предыдущие 20–25 лет:

- всестороннее комплексное исследование физико-химических свойств плавленного кремнезема и его строения;
- разработка непрерывных способов производства прозрачного кварцевого стекла, изделий из него и автоматизация плавильных и формовочных процессов;
- разработка способов получения крупногабаритных изделий из высокопрозрачного и непрозрачного кварцевого стекла;
- разработка технологии получения спектрально чистого, оптически однородного стекла и изделий из него;

– расширение сферы применения изделий из кварцевого стекла с учетом требований новых отраслей науки и техники, бурно развивающихся в последнее время.

Перечисленные направления развития науки о плавленном кремнеземе и о технологии его производства не утратили своего значения, актуальны и сегодня.

1.2. Природный кварц

1.2.1. Кремнезем. Основные модификации кремнезема

Кварц является одним из наиболее распространенных материалов. Только свободная двуокись кремния составляет около 12% от массы земной коры. Примерно 43% от массы земной коры составляет двуокись кремния, входящая в состав различных горных пород, причем кремнезем может находиться в этих породах как в химически связанном состоянии, так и в виде смеси. Так, например, гранит представляет собой смесь кристаллов кварца, полевых шпатов и слюд с общим содержанием кремнезема до 70%. Таким образом, земная кора более чем на половину, состоит из двуокиси кремния.

Свободный кремнезем встречается в природе также в виде гораздо более редких минералов: в виде тридимита и кристобалита. Тридимит назван так потому, что чаще всего встречается в виде тройников. Кристобалит получил свое название по местности Сан-Кристобал в Мексике, где был впервые обнаружен. Бывали случаи, когда в природе встречались куски плавленного кварца, образовавшиеся в песчаной почве под действием грозových разрядов. Природный плавленный кварц получил название лешательерита в честь выдающегося французского ученого Ле Шателье. Кварц, тридимит и кристобалит представляют собой различные структурные модификации кремнезема. Эти модификации можно получить искусственно при нагревании и охлаждении кварца.

В зависимости от внешнего вида, светопрозрачности и окраски различают несколько разновидностей кристаллов природного кварца, среди которых наиболее известны следующие.

Горный хрусталь. Это чистые прозрачные кристаллы кварца, как правило, бездефектные, не содержащие пузырьков и инородных включений. Плотность горного хрусталя равна 2,655, твердость по Моосу равна 7. Горный хрусталь относится к ограночным самоцветам третьего класса.

Высококачественные кристаллы горного хрусталя в природе встречаются очень редко. Обычно их обнаруживают в так называемых хрусталеносных погребях – в замкнутых полостях, возникших в горных породах под действием тектонических процессов. Кристаллы кварца в таком погребе вырастают в виде друз, т.е. сростков кристаллов различной величины. Редчайшие экземпляры отдельных кристаллов относительно бездефектного кварца достигают размеров 1,5–2 м и из-за большой их научной ценности хранятся в музеях. Обычно друзы хрусталя состоят из кристаллов размером от 3–5 до 30–50 мм и более, массой от нескольких граммов до сотен килограммов.

При периодическом сжатии кварцевой пластинки между ее поверхностями возникает разность потенциалов (пьезоэффект). Под действием приложенного к поверхностям пластинки электрического напряжения (под действием электрического поля) в результате обратного пьезоэффекта пластинка начинает периодически отжиматься и расширяться с частотой приложенного электрического поля. Эти свойства кварца широко используются в различных отраслях промышленности, науки и техники. При этом горный хрусталь является важнейшим сырьем для изготовления пьезокристаллов и ультразвуковых генераторов. Другим важнейшим потребителем бездефектных кристаллов кварца является оптическая промышленность.

В производстве кварцевого стекла используют лишь отходы горного хрусталя, получающиеся после отбора из кристаллов кварца заготовок, пригодных для ювелирных поделок, изготовления пьезопластин и оптических деталей.

Аметист. Это разновидность природного кварца, окрашенная в фиолетовый цвет. Физико-механические свойства аметиста в основном тождественны свойствам бесцветного кварца. При нагревании кристаллов аметиста до температуры 450–600°C фиолетовая окраска выцветает и кристаллы становятся совершенно бесцветными. Восстановить фиолетовую окраску таких кристаллов можно, подвергнув их гамма-облучению (доза $1 \cdot 10^4$ – $1 \cdot 10^5$ Р). Спектры поглощения образцов аметиста до обесцвечивания и после радиационного окрашивания практически тождественны. Эти наблюдения позволили сделать предположение о том, что природа фиолетовой окраски аметиста имеет, видимо, радиационный характер.

Отдельные образцы аметиста под влиянием термообработки могут приобретать ярко-зеленую окраску. Аметист относится к драгоценным камням третьего (иногда второго) класса.

Морион. Это разновидность природного кварца, имеющая черную окраску. Интенсивность окраски у отдельных образцов изменяется от темно-коричневой до антрацитово-черной. При нагревании до 450–600°C кристаллы мориона постепенно обесцвечиваются; черная окраска при этом сначала ослабляется, превращается в желтоватую и, наконец, совершенно исчезает. Природа окраски не выявлена. Морион используется в производстве кварцевого стекла в промышленных масштабах.

Цитрин. Это разновидность кварца, имеющая золотисто-желтую окраску. Природа окраски, вероятно, радиационная. В производстве кварцевого стекла низкосортный цитрин применяют наряду с бесцветными и окрашенными в другие тона разновидностями кварца.

Цитрин относится к драгоценным камням третьего класса.

Дымчатый кварц. Это разновидность природного кварца, окрашенная в пепельно-серый цвет. Пепельно-серая окраска природного дымчатого кварца имеет, очевидно, радиационный характер и возникает при облучении жесткими лучами частично загрязненных кристаллов кварца в природных условиях. В производстве кварцевого стекла дымчатый кварц применяют наряду с бесцветным. Сравнительно редко в природе встречаются кристаллы кварца, окрашенные в салатно-зеленый, изумрудно-зеленый и красный цвета. Красная окраска может быть вызвана железистыми включениями типа гематита. Голубая окраска кварца целиком обусловлена мельчайшими (100–300 мкм) ориентированными включениями иголок рутила (TiO_2). Розовая окраска является следствием суммарного эффекта рассеяния обыкновенного и поляризованного света на включениях рутила. Именно этим вызваны цветовые переходы от голубого кварца к красноватому, наблюдаемые в природе. Путем искусственного введения в структуру примесей кобальта были получены синтетические кристаллы кварца, окрашенные в синий цвет. При введении в решетку кварца ионов серебра, золота и меди могут быть искусственно получены розовые и красные кристаллы.

Наряду с равномерно окрашенными кристаллами кварца в природе встречаются также кристаллы с различной по их объему окраской. Среды таких кристаллов имеют чередующиеся различно окрашенные полосы. Полосы различных оттенков в отдельных случаях следуют друг за другом настолько часто, что пластинка, вырезанная из такого кристалла, напоминает несколько увеличенную дифракционную решетку.

Агат. Это разновидность кварца, имеющая более или менее волокнистую структуру. Твердость этого минерала на много меньше твердости кварца и колеблется в пределах 6–7 по Моосу. Плотность агата равна 2,59–2,63. Агат не растрескивается при температуре 573°C и при длительном нагревании с вольфрамом натрия в районе температур 800–850°C может быть легко переведен в тридимит. В производстве кварцевого стекла агат в качестве сырья не применяют.

Жильный кварц является тесной смесью мелких различно ориентированных кристаллов кварца. Возникшие при тектонических процессах кварцевые новообразования пронизывали изверженные породы, образуя жилы. Выращивание крупных кристаллов затруднялось параллельно протекающими тектоническими процессами, в результате чего шло более или менее беспорядочное выделение кремнекислоты на случайно ориентированных центрах кристаллизации. Такие условия, естественно, приводили к образованию мелких сростков кристаллов, более или менее плотно заполняющих трещины в изверженной и остывающей породе. Жильный кварц может быть использован для производственных нужд лишь в тех случаях, когда он не загрязнен выделившимися одновременно с ним рудными образованиями. Поэтому первичные месторождения жильного кварца менее важны, чем вторичные.

Вторичные месторождения возникают в результате выветривания горных пород и скоплений с помощью воды и ветра в определенных местах пыли, песка и гравия. В таких скоплениях нередко попадают куски кварца очень высокого качества (кварцевая галька). При уплотнении кварцевых песков, возникших в процессе разрушения горных пород, содержащих кварцевые жилы, образуются песчаники и кварциты. Песчаники отличаются от кварцитов степенью связности отдельных зерен. Нередко в одном и том же карьере наблюдаются все степени связности – от песка до прочнейшего кварцита.

Различают два вида кварцитов: зернистый (коренной) и цементированный (цемент-кварцит). В зернистом кварците кремнекислотная связка присутствует исключительно в виде кварца, в то время как в валунном (точнее, цементированном) она имеет вид опала либо халцедона. Месторождения зернистого и цементированного кварцитов совершенно различны. Зернистый кварцит относится к древнейшим девонским, частично силурийским, отложениям. Эти отложения были сдавлены в процессе горообразования. Для зернистого кварцита характерны сильно деформированные и спаянные кварцевые зерна.

Цемент-кварциты образовались из третичных песков, спаянных коллоидальным кремнеземом. Пласт цемент-кварцита ни в вертикальном, ни в горизонтальном направлении не имеет постоянного состава.

Объемы промышленного производства кварцевого стекла в экономически развитых странах значительно выросли, и обеспечение предприятий высококачественным сырьем стало представлять большие затруднения, поскольку природные запасы бездефектного кварца ограничены. Поэтому жильный кварц и зернистые кварциты стали представлять исключительно большой интерес для технологии кварцевого стекла.

Молочно-белый кварц – это часто встречающаяся разновидность кварца. Кристаллы молочно-белого кварца содержат большое количество жидких и газообразных включений. Последние имеют микроскопические размеры и сильно рассеивают свет, вследствие чего кристаллы кажутся белыми и непрозрачными. В отдельных случаях попадаются кристаллы, содержащие единичные сравнительно крупные жидкостно-газовые включения. Плавка кварца сопровождается сильным выделением из него газов. И, тем не менее, ни количество, ни состав газов, содержащихся в кварце, применяемом в производстве кварцевого стекла, зачастую не контролируется, в то время как именно газовые включения являются одним из основных и наиболее распространенных дефектов плавленной двуокиси кремния. Считается само собой разумеющимся, что в твердом прозрачном кварце количество газов настолько незначительно, что их можно не принимать во внимание. Поэтому основное внимание уделяется воздуху, попадающему в трещины при α - β -переходе кварца в процессе его нагревания, т.е. мерам, необходимым для извлечения этого воздуха из межкусковых полостей и трещин.

В связи с тем, что технология обогащения кварца постоянно совершенствуется, молочно-белый кварц находит все более широкое применение в качестве сырья для получения прозрачного кварцевого стекла.

Большое научное и прикладное значение имеют работы по синтезу сверхтяжелых модификаций кремнезема. Начало этому направлению работ было положено американским ученым Коэсом, который в 1953 году получил кристаллы кремнезема с плотностью, равной 3,01. Эти кристаллы были получены при давлении около 35000 бар и температуре порядка 500–800°C. Новая модификация кремнезема была названа коэситом в честь автора этого открытия.

Коэсит более устойчив при высоких давлениях. При нормальных условиях этот минерал метастабилен. Область равновесия между кварцем и коэситом лежит в диапазоне значений $T = 300^\circ\text{C}$, $P = 14500$ бар и $T = 900^\circ\text{C}$, $P = 31500$ бар. Выше граничной равновесной линии коэсит устойчив. В природе аналогичный минерал был обнаружен в кратере Аризонского метеорита.

Наиболее характерным отличительным признаком нового минерала является его повышенная устойчивость по отношению к растворам плавиковой кислоты. Другим важнейшим отличительным признаком коэсита является его высокая устойчивость по отношению к мощным ($1,2 \cdot 10^{20}$ нейтрон/см²) дозам нейтронного излучения. Обычный кварц при нейтронном облучении быстро теряет кристаллические свойства и переходит в аморфное псевдостеклообразное состояние. Не меньший интерес представляют также исследования электрических свойств уплотненных кремнекислородных структур, направленные на создание новых полупроводниковых материалов с необычными свойствами.

Возможность перехода кремнезема при сверхвысоких давлениях в такие модификации, которые будут иметь плотность порядка 4,5–5 г/см³, была высказана на основе ориентировочных расчетов Г.Ф. Мак-Дональдом в 1956 году. Однако впервые синтезировать такую модификацию удалось лишь в 1960–1961 годах. Чистый кварц подвергался сжатию при давлениях свыше 160000 атм и при температуре порядка 1200–1400°C. При этом в испытуемом материале возникали агрегаты кристаллов игольчатой или пластинчатой формы. Размеры отдельных кристаллов достигали 0,5 мм. Полученная модификация кремнезема плотностью 4,35 была названа впоследствии стиповеритом. Новый материал резко

отличается от всех ранее изученных модификаций кремнезема по своей структуре и физико-химическим свойствам.

Американскими учеными были предприняты попытки найти в том же Аризонском метеоритном кратере, где был обнаружен коэсит, еще более тяжелую модификацию кремнезема. Поиски увенчались успехом. Новый минерал в природных условиях был обнаружен американскими учеными во главе с Е.С.Т. Чао (E.S.T. Chao). Нагревание нового минерала при температуре 900°C в течение 6 ч сопровождается переходом в кристобалит.

Зависимость показателя преломления от плотности для всех модификаций кремнезема от кварца до стиповерита выражается линейной функцией: с возрастанием плотности кремнезема линейно возрастает показатель преломления.

Использование кварца в качестве сырья для получения кварцевого стекла строго ограничивается количеством и составом содержащихся в нем примесей. Это обусловлено тем, что высококачественное кварцевое стекло, обладающее полным комплексом тех физико-технических свойств, за которые ценится этот материал, может быть получено лишь из кварца, отвечающего ряду требований.

К кварцу, используемому в промышленном производстве кварцевого стекла, представляют следующие требования:

1. количество инородных твердых и жидких включений, камней, минеральных корок, бесцветных и окрашенных мелкопузырных завес должно быть минимальным; не допускается молочно-белая окраска кусков сырья;
2. сумма примесей в кварцевом сырье не должна превышать 0,01–0,02%.

Таким образом, несмотря на то, что кремнезем является наиболее распространенным минералом, количество сырья, пригодного для получения прозрачного кварцевого стекла, ограничено.

Всемирной известностью пользуются месторождения горного хрусталя Бразилии и Мадагаскара. Высококачественные кристаллы аметиста добываются в Уругвае. Богаты кварцевыми месторождениями Швейцарские Альпы.

В СССР велась промышленная разработка месторождений горного хрусталя, жильного кварца, кварцита, кварцевой гальки.

Кварц входит в состав различных по генезису горных пород; однако, лучшие месторождения, как правило, связаны с пегматитовыми или кварцевыми жилами альпийского типа.

Сопутствующими кварцу минералами чаще всего являются самородное золото, кальцит, пирит, касситерит, халькопирит, турмалин и др. Формирование лучших разновидностей горного хрусталя в природе происходило в гидротермальных условиях при температуре 350–400°С и давлениях, равных сотням атмосфер.

Важное значение приобрела синтетическая двуокись кремния высокой степени чистоты, которая является основным сырьем для получения кварцевых тиглей, предназначенных для выращивания монокристаллов кремния. Промышленное производство искусственного кремнезема, налаженное в наиболее развитых в экономическом отношении странах, способствует резкому расширению сырьевой базы кварцеплавильных предприятий.

1.2.2. Полиморфные превращения кремнезема

Знания полиморфных превращений кремнезема имеют важнейшее технологическое и теоретическое значение. Полиморфные превращения сопровождаются структурными и объемными изменениями. Теоретические изменения объема образцов кремнезема представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Изменение удельного объема кремнезема при его полиморфных превращениях

Модификация	Удельный объем в см ³ /г	Изменение удельного объема в %	
		при одиночных модификационных превращениях	относительно α-кварца
Стиповерит	0,2222	–41,000	–41,00
Коэсит	0,3322	–11,790	–11,79
α-кварц	0,3766	4,940	0
β-кварц	0,3952	9,070	4,94
γ-тридимит	0,4310	0,972	14,40
α-тридимит	0,4350	1,832	15,46
β-тридимит	0,4430	1,127	17,60
α-кристобалит	0,4300	4,195	14,15
β-кристобалит	0,4480	1,003	18,90
Плавленый кварц	0,4525		20,17

В природе кремнезем встречается, как правило, в виде α-кварца. При нагревании кристаллов α-кварца до 573°С они претерпевают полиморфное превращение и практически мгновенно переходят в β-

кварц. При последующем быстром подъеме температуре до 1600–1650°C наблюдается плавление кварца. Если же кристаллы β -кварца подвергнуть длительному нагреванию при температуре порядка 870°C, то можно отметить переход β -кварца в β -тридимит. Происходит так называемая тридимитизация минерала. Образовавшиеся кристаллы тридимита при быстром нагревании до температуры 1650–1670°C переходят в расплав. Однако длительный нагрев β -тридимита при температуре порядка 1470°C приводит к переходу β -тридимита в β -кристобалит. β -кристобалит представляет собой высокотемпературную модификацию кремнезема и вполне устойчив в интервале температур 1470–1713°C. При температуре выше 1713°C кристобалит плавится.

Таким образом, возможны три процесса получения кварцевого стекла:

- быстрое плавление β -кварца при температуре 1600–1630°C;
- быстрое плавление β -тридимита при температуре 1650°C;
- плавление кристобалита при температуре 1713°C.

На практике чаще всего применяют плавление β -кварца. Следовательно, теоретически температура варки кварцевого стекла равна 1600–1630°C, а практически за температуру плавления кварцевой шихты принимают температуру расплавления наиболее высокотемпературной модификации кремнезема, т.е. 1713°C.

При охлаждении кристаллов β -кристобалита ниже температуры, равной 1470°C, наблюдается β - α -переход при температуре порядка 273°C, у тридимита наблюдаются два перехода: β - α при температуре порядка 180°C и α - γ вблизи 125°C.

На идеальной диаграмме – схеме Феннера, представляющей собой зависимость давления паров различных модификаций кремнезема от температуры, полиморфные превращения представлены графически. Диаграмма построена условно, так как изменение крайне малых давлений паров кремнезема в рассматриваемом диапазоне температур практически невозможно.

Сплошные участки кривых на диаграмме соответствуют стабильным модификациям кремнезема, а пунктирные – метастабильным. Точки пересечения кривых соответствуют температурам превращений. Давление паров метастабильной формы больше, чем устойчивой модификации. Теоретические границы превращений кремнезема приведены на диаграмме, представленной на рис. 1.1.

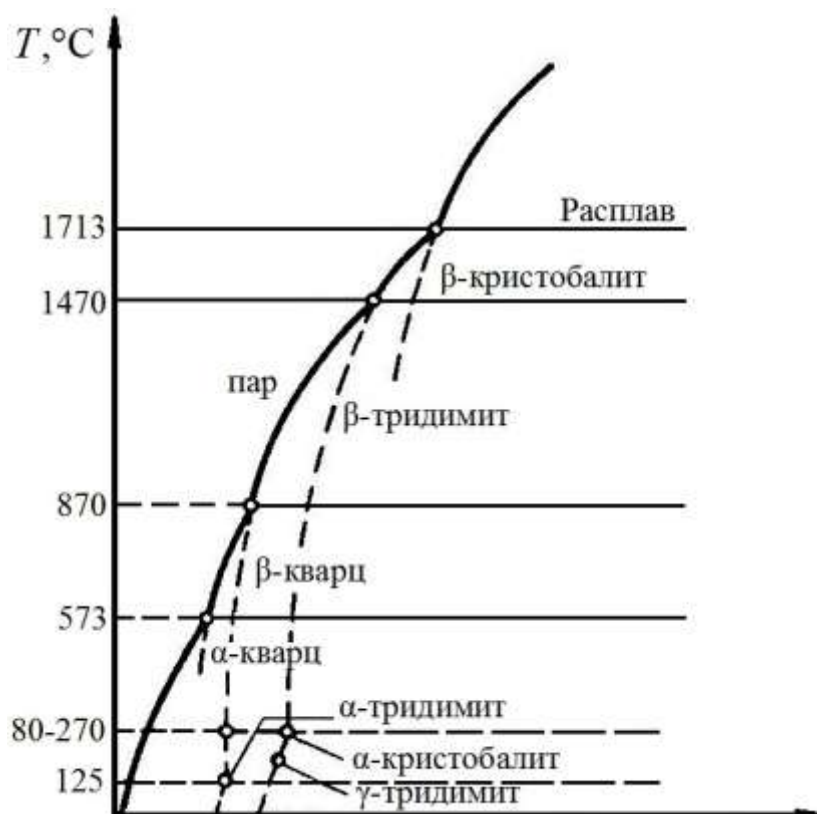
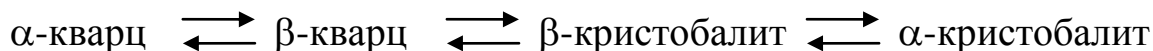


Рис. 1.1. Диаграмма превращений кремнезема по Френелю

Следует заметить, что некоторые исследователи не склонны считать тридимит самостоятельной кристаллической модификацией кремнезема, поскольку при удалении примесных катионов из тридимита с помощью постоянного электрического поля при температуре, равной 1300°C (область стабильности тридимита), он перестраивается в кристобалит. Следовательно, если из диаграммы Феннера тридимит условно исключить, то схема превращений кремнезема несколько упрощается и принимает вид:



Температура превращения β -кварца в β -кристобалит равна 1050°C.

Трудами отечественных и зарубежных исследователей семейство структурных форм кремнезема было дополнено новыми ранее неизвестными модификациями кремнезема: коэситом и стиповеритом.

1.3. Способы получения кварцевого стекла

Способы получения кварцевых стекол сильно отличаются от способов производства разнообразных многокомпонентных технических стекол. Эти различия обусловлены высокой тугоплавкостью кристаллических модификаций диоксида кремния и высокой вязкостью расплава кремнезема. Если вязкость расплава многокомпонентных стекол при температуре варки обычно не превосходит нескольких паскаль·секунд, то вязкость расплава кремнезема при максимальной температуре плавки составляет 10^4 – 10^7 Па·с. Столь высокие вязкости, с одной стороны, исключают применение традиционных приемов стекольной технологии для улучшения качества и однородности стекломассы – осветления и конвективного или механического перемешивания, а с другой – дают возможность получать блоки и диски стекла без применения специальных сосудов (тиглей, ванн и т.п.).

В настоящее время промышленное кварцевое стекло получают следующими принципиально различными способами: электротермическим, газопламенным, плазменным, парофазным. Каждый из этих способов имеет множество вариантов и модификаций.

1.3.1. Электротермический способ

Электротермическим способом получают кварцевое стекло в вакуумных тигельных и стержневых электропечах, а также в тигельных печах в среде быстро диффундирующих газов – He, H₂.

При плавке стекла в тигельных вакуумных электропечах крупку кремнезема засыпают в графитовый тигель, который помещают внутри цилиндрического нагревателя печи сопротивления или индукционной печи. Плавка происходит в вакууме. Величина остаточного давления в печи в начале плавки составляет 0,01–1 Па. На заключительном этапе плавки из-за химического взаимодействия кремнезема с графитом величина давления возрастает и достигает 10^2 – 10^3 Па. Максимальная температура плавки обычно не превышает 1750°C (при более высоких температурах в стекле начинают быстро расти пузыри). Для получения стекла оптического качества с минимальным количеством пузырей в конце плавки в печь подается не взаимодействующий с графитом или молибденом газ (обычно азот) под давлением $(1–2,5) \cdot 10^6$ Па.

В лабораторных условиях кварцевое стекло можно получить плавлением крупки кремнезема в печах с металлической оснасткой (молибден, вольфрам) типа СШВЛ. Чтобы избежать загрязнения крупки летучими оксидами молибдена и вольфрама (MoO_3 , WO_3), образующимися при взаимодействии молибдена и вольфрама с кремнеземом или со следами выделяющейся из кварца воды и натекающего в вакуумную систему кислорода, крупку засыпают в ампулу из кварцевого стекла с узким (2–3 мм) верхним отверстием, которую затем устанавливают в молибденовый тигель. Из-за слабого взаимодействия кремнезема с молибденом остаточное давление в процессе плавки в таких печах сравнительно мало и обычно даже при максимальной температуре плавки не превышает 10^{-3} Па. Повышение температуры во время плавки до 2000°C и выше не приводит к дополнительному образованию и росту пузырей в массе стекла. Этим методом получения стеклообразного кремнезема широко пользуются в практике научно-исследовательских работ.

Плавка в стержневых вакуумных электропечах осуществляется в двух вариантах: в роторных горизонтальных стержневых печах и в вертикальных стержневых печах. При плавке в роторных горизонтальных печах кварцевую крупку засыпают во вращающийся вокруг горизонтальной оси металлический цилиндр и центробежными силами плотно прижимают к его стенкам. В образующуюся центральную полость помещают графитовый стержень, служащий нагревателем. Плавка происходит в вакууме в гарнисажном слое крупки кремнезема (гарнисаж – фр. *garnissage*, укладка, упаковка, наполнение пустот). Наплавленный блок имеет форму толстостенной трубы.

При плавке в вертикальных стержневых электропечах графитовый стержень-нагреватель помещают вдоль оси цилиндрического корпуса печи. На графитовый стержень одевают трубку из кварцевого стекла. Пространство между стенками печи и трубкой засыпают кварцевой крупкой. Плавка проводится в вакууме в гарнисажном слое крупки. В процессе плавки крупка кремнезема изолирована от графита газонепроницаемой оболочкой из плавленого кремнезема, что предотвращает взаимодействие крупки кремнезема с графитом, сопровождающееся образованием газообразных продуктов, способствующих появлению большого количества пузырей.

Таким образом, при электротермическом способе получения стекла плавка может осуществляться как в условиях интенсивного взаимодействия крупки кремнезема с восстановителями (восстановительные условия плавки), сопровождающегося

образованием летучего монооксида кремния, частично растворяющегося в кремнеземе (плавка в тигельных и роторных электропечах с графитовой оснасткой), так и в нейтральных условиях, исключая взаимодействие кремнезема с восстановителем (плавка в ампулах из кварцевого стекла в печах типа СШВЛ, в вертикальных стержневых электропечах).

Дальнейшее развитие электротермический способ получил с заменой вакуума на среду газов (обычно водорода), быстро диффундирующих и хорошо растворяющихся в кремнеземе. Плавка ведется в молибденовых тиглях в печи с металлической оснасткой. Плавка в атмосфере водорода позволяет одновременно производить выработку труб и стержней из кварцевого стекла, т.е. осуществлять непрерывный процесс.

1.3.2. Газопламенный способ

Газопламенный способ наплавления кварцевого стекла основан на методе Вернейля, первоначально предназначенном для выращивания синтетического рубина. Крупка кремнезема с определенной скоростью подается на поверхность расплава кремнезема, разогретую факелом водородно-кислородного пламени. Температура в горячем пятне факела может достигать 2100–2200°C. Плавление частиц кварца в водородно-кислородном пламени протекает со значительно большей скоростью, чем в вакууме, и длится доли секунды. В таких условиях практически полностью исключаются процессы фазового перехода кварц-кристобалит и процессы вскрытия газово-жидких включений, которые могут содержаться в частицах кварца. Попадая на поверхность расплавленного кремнезема, частицы кварца быстро расплавляются, образовавшиеся капельки растекаются по поверхности расплава. На образовавшуюся поверхность попадают новые частицы кварца, которые вновь плавятся и растекаются. Так, слой за слоем идет наплавление кварцевого стекла, при этом газово-жидкие включения, имевшиеся в частицах кварца, образуют в расплаве пузыри.

Плавка осуществляется при минимальной вязкости $\sim 10^4$ Па·с (в зоне горячего пятна факела), при которой возможно медленное растекание стекломассы, но практически полностью исключается процесс конвективного перемешивания. Из-за специфики послойного наплавления газонаплавленное стекло обладает высокой оптической однородностью вдоль оси наплавления и неоднородно в направлении,

перпендикулярном оси наплавления: стекло имеет так называемую слоистую неоднородность.

Для наплавления кварцевого стекла вместо водородно-кислородного пламени можно использовать факел высокочастотной плазмы. В качестве газа-носителя можно использовать азот, аргон и их смеси. Добавляя к газу-носителю кислород, можно варьировать окислительно-восстановительные условия плавки. В качестве сырьевого материала употребляется крупка кварца или кристобалита. Наплавленное стекло и в этом случае характеризуется слоистой неоднородностью.

1.3.3. Синтез из газовой фазы

Для получения особо чистого кварцевого стекла используются летучие соединения кремния и, прежде всего, SiCl_4 . Тетрахлорид кремния – жидкость с плотностью 1480 кг/м^3 и $T_{\text{кип}}=57^\circ\text{C}$. Путем ректификации он легко подвергается очистке, в результате которой содержание примесей в нем может не превышать 10^{-6} – $10^{-7}\%$. Высокотемпературный гидролиз или окисление SiCl_4 позволяет получать кварцевое стекло практически свободное от примесей металлов и твердых включений. Таким образом, существуют два варианта синтеза SiO_2 из летучего тетрахлорида кремния:

– высокотемпературный гидролиз SiCl_4 в факеле водородно-кислородного пламени (или пламени природного газа) по реакции

$$\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{SiO}_2 + 4\text{HCl}; \quad (1.1)$$

– высокотемпературное окисление SiCl_4 кислородом в факеле высокочастотной плазмы по реакции

$$\text{SiCl}_4 + \text{O}_2 = \text{SiO}_2 + 2\text{Cl}_2. \quad (1.2)$$

Образующийся по реакциям (1.1) и (1.2) газообразный кремнезем быстро конденсируется в газовой фазе в виде мельчайших частиц аморфного оксида кремния размером около $0,1 \text{ мкм}$. Частицы увлекаются горячим потоком газа и при омывании им более холодной поверхности наплаваемого блока термофоретическими силами отбрасываются на поверхность расплава и захватываются им. В отличие от газопламенного способа в данном случае наплавление стекла производится из аэрозольных частиц, размер которых намного меньше длины волны видимого света, что дает принципиальную возможность получать стекло, не содержащее мелкозернистой неоднородности и оптически однородное во всех направлениях.

Синтез стекла по реакции (1.1) происходит в атмосфере, содержащей большое количество паров воды. Аэрозольные частицы

SiO_2 легко взаимодействуют с ней, в результате чего наплавленное паросинтетическое стекло содержит большое (~0,5 мол.%) количество групп ОН, обуславливающих интенсивное поглощение ИК-излучения.

Для получения безгидроксильных стекол синтез ведут по реакции (1.2) в факеле высокочастотной плазмы. Эта реакция используется также при получении световодных волокон с сердцевиной из очень чистого, «безводного» стеклообразного кремнезема. Процесс окисления тетрахлорида кремния в этом случае осуществляется внутри трубки из кварцевого стекла («опорной трубки»), локально нагреваемой снаружи, например, пламенем водородно-кислородной горелки (так называемый метод внутреннего парофазного осаждения – метод ВПО, или, иначе, модифицированное химическое осаждение из пара (метод MCVD – modified chemical vapor deposition).

Стекла, содержащие малые количества групп ОН или практически совсем свободные от них, можно получать также и методом высокотемпературного гидролиза SiCl_4 по реакции (1.1). С этой целью процесс получения заготовки стекла проводят в две стадии. Вначале путем проведения процесса по реакции (1.1) при более низкой температуре на холодную подложку осаждают тонкодисперсный аморфный оксид кремния. Затем полученную пористую заготовку нагревают в вакууме или в атмосфере сухого газа при температурах 1400–1500°C. При этом структурная вода удаляется из мелкодисперсных частиц кремнезема, частицы сплавляются, сливаясь друг с другом, образуя сплошной блок стекла (заготовка остекловывается). Таким способом фирма «Корнинг» (США) получает безгидроксильное особо чистое стекло Corning 7943.

В литературных источниках все многообразие прозрачных промышленных кварцевых стекол принято разбивать на четыре типа, в зависимости от способа их получения и содержания примесей (табл. 1.2):

- I тип – безгидроксильные стекла, наплавленные в вакууме;
- II тип – газонаплавленные стекла;
- III тип – особо чистые гидроксилсодержащие стекла, полученные высокотемпературным гидролизом SiCl_4 ;
- IV тип – особо чистые безгидроксильные стекла.

Таблица 1.2. Типы промышленных кварцевых стекол

Тип стекла	Способ производства	Содержание примесей, масс. %	Марки стекол
I	Плавка крупки кремнезема в вакууме	Сумма примесей металлов – до $1 \cdot 10^{-2}$, групп ОН $< 5 \cdot 10^{-4}$	КИ (Россия); 2020, 2030 (Япония); IR-Vitreosil (Англия); Infrasil (ФРГ); Pursil-259, 453 (Франция); GE-105, 106, 114, 125, 201, 204 (США)
II	Плавка кварцевой крупки в водородно-кислородном пламени	Сумма примесей металлов $\leq 1 \cdot 10^{-2}$, групп ОН – $(1,5-6) \cdot 10^{-2}$	КУ, КВ (Россия); 1020, 1030, 1060, 1320, 1330 (Япония); OG-Vitreosil, OH-Vitreosil, Vitreosil-0.55, 0.66, 0.67 (Англия); Herasil, Heralux, Optosil, Homosil, Ultrasil (ФРГ); Pursil optique (Франция); GE-102, 104 (США)
III	Высокотемпературный гидролиз SiCl_4 в водородно-кислородном пламени или в пламени природного газа	Сумма примесей металлов $\leq 1 \cdot 10^{-4}$, групп ОН $\sim 0,2$, хлора – $(1-3) \cdot 10^{-2}$	КУ, КСГ (Россия); 4040 (Япония); Spectrosil (Англия); Suprasil (ФРГ); Tetrasil (Франция); Corning 7940, GE-151, Dynasil (США)
IV	1. Окисление SiCl_4 в высокочастотной плазме. 2. Двустадийный – напыление заготовки методом высоко-температурного гидролиза SiCl_4 и ее остекловывание в сухой атмосфере	Сумма примесей металлов $\leq 1 \cdot 10^{-4}$, групп ОН – $0,4 \cdot 10^{-4}$, хлора – до $6 \cdot 10^{-2}$	КУВИ (Россия); Spectrosil WF (Англия); Suprasil W (ФРГ); Corning 7943 (США)

Такая классификация кварцевых стекол пока еще далека от совершенства. При пользовании ею возникают трудности, связанные с отнесением к тому или иному типу, например, таких стекол, как стекла, наплавленные в среде водорода в электропечах, или стекла, получаемые плавкой кварца в факеле высокочастотной плазмы, и т.п. Однако в большинстве случаев такая классификация удобна – она позволяет ориентироваться во множестве марок промышленных стекол, выпускаемых различными фирмами мира; поэтому она получила широкое распространение в литературе.

1.4. Физико-механические характеристики кварцевого оптического стекла

Важнейшими характеристиками оптического материала являются оптические постоянные: показатель преломления и коэффициент дисперсии. В качестве наиболее вероятного значения показателя преломления кварцевого стекла для зеленой линии ртути в соответствии с [3] следует принять величину $n_e = 1,4601 \pm 4 \cdot 10^{-4}$, а коэффициент дисперсии $\nu_e = 67,76$ при средней дисперсии $n_{F'} - n_{C'} = 0,00679 \pm 4 \cdot 10^{-5}$. Заметим, что значения оптических постоянных получены в результате усреднения значений для стекла различных марок.

В табл. 1.3 приведены значения показателя преломления n_λ кварцевого стекла при длинах волн λ , указанных в нм.

Таблица 1.3. Показатель преломления n_λ кварцевого стекла при длинах волн λ , нм

λ , нм	n_λ	λ , нм	n_λ	λ , нм	n_λ
170,000	(1,615)				
185,000	(1,575)	587,561	1,458464	1395,060	1,445836
200,000	(1,550)	589,262	1,458404	1709,130	1,442057
214,438	1,53372	643,847	1,456704	1813,070	1,440699
280,347	1,494039	656,272	1,456367	2058,100	1,437224
302,150	1,487194	706,519	1,455145	2437,400	1,430954
365,015	1,474539	852,111	1,452465	3243,900	1,413118
404,656	1,469618	1013,980	1,450242	3302,600	1,411535
435,835	1,466623	1082,970	1,449405	3507,000	1,405676
546,074	1,460078	1128,660	1,448869	3706,700	1,399289

Характеристиками, определяющими условия применения кварцевого стекла, являются термооптические и теплофизические

характеристики. Термооптическую постоянную v_λ определяют по формуле [4]

$$v(t, \lambda) = \frac{\beta_{\text{отн}}(t, \lambda)}{n_\lambda - 1} - \alpha(t),$$

где $\beta_{\text{отн}}$ – температурный коэффициент относительного показателя преломления, $^{\circ}\text{C}^{-1}$, $\alpha(t)$ – температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Среднее значение термооптической постоянной в пределах температур от 213 до 293 К (от минус 60 до плюс 20 $^{\circ}\text{C}$) равняется $213 \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-1}$.

Температурные изменения показателя преломления $\beta_{\text{отн}}(t, \lambda)$ при повышении температуры на 1 К (1 $^{\circ}\text{C}$) в интервале температур от 173 до 333 К (от минус 100 до плюс 60 $^{\circ}\text{C}$) должны соответствовать приведенным в табл. 1.4.

Таблица 1.4. Значения коэффициента $\beta_{\text{отн}}(t, \lambda)$

Показатель преломления	Температурный коэффициент $\beta \cdot 10^7$ при температуре в К ($^{\circ}\text{C}$)							
	173 (-100)	203 (-70)	223 (-50)	253 (-20)	283 (+10)	293 (+20)	313 (+40)	333 (+60)
n_C	99	95	95	98	99	100	100	107
n_D	100	96	96	99	101	105	105	108
n_e	101	98	98	100	102	104	107	110
n_F	104	99	100	102	104	106	109	112

Значения температурного коэффициента линейного расширения $\alpha(t)$, среднего для интервала температур от 213 до T_i К (от минус 60 до $T_i^{\circ}\text{C}$), приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5. Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha(t)$

Температура (T_i), К($^{\circ}\text{C}$)	$\alpha \cdot 10^7$, К^{-1}	Температура (T_i), К($^{\circ}\text{C}$)	$\alpha \cdot 10^7$, К^{-1}	Температура (T_i), К($^{\circ}\text{C}$)	$\alpha \cdot 10^7$, К^{-1}
213 (-60)	2,0	573 (+300)	5,9	873 (+600)	5,6
323 (+50)	4,0	623 (+350)	5,8	923 (+650)	5,5
373 (+100)	5,0	673 (+400)	5,8	973 (+700)	5,4
423 (+150)	5,5	723 (+450)	5,8	1023 (+750)	5,3
473 (+200)	5,6	773 (+500)	5,7	1073 (+800)	5,2
523 (+250)	5,7	823 (+550)	5,7		

Удельная теплоемкость кварцевого стекла показана в табл. 1.6.

Таблица 1.6. Удельная теплоемкость при температурах от 273 до 1273 К (от 0 до 1000°С)

Температура, К(°С)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Температура, К(°С)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)
273 (0)	693	623 (350)	1060
293 (20)	728	673 (400)	1090
323 (50)	773	723 (450)	1110
373 (100)	840	773 (500)	1130
423 (150)	899	823 (550)	1140
473 (200)	947	873 (600)	1150
523 (250)	988	1073 (800)	1196
573 (300)	1030	1273 (1000)	1222

Теплопроводность кварцевого стекла представлена в табл. 1.7.

Таблица 1.7. Теплопроводность при температурах от 273 до 673 К (от 0 до 400°С)

Температура, К(°С)	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Температура, К(°С)	Теплопроводность, Вт/(м·К)
273 (0)	1,32	473 (200)	1,61
293 (20)	1,35	523 (250)	1,66
323 (50)	1,42	573 (300)	1,70
373 (100)	1,49	623 (350)	1,74
423 (150)	1,56	673 (400)	1,81

Температура отжига представлена в табл. 1.8.

Таблица 1.8. Температура отжига

Марка стекла	Температура отжига, К(°С)	
	нижняя (соответствует вязкости $10^{13,5}$ Па·с)	верхняя (соответствует вязкости 10^{12} Па·с)
КУ-1	1253 (980)	1353 (1080)
КУ-2	1343 (1070)	1443 (1170)
КВ	1363 (1090)	1453 (1180)

Температура начала деформации (соответствует вязкости 10^{10} Па·с) представлена в табл. 1.9.

Таблица 1.9. Температура начала деформации

Марка стекла	Температура начала деформации, К(°С)
КУ-1	1523 (1250)
КУ-2	1603 (1330)
КВ	1613 (1340)
КИ	1608–1623 (1335–1350)

Температура размягчения (соответствует вязкости $10^{6,6}$ Па·с) представлена в табл. 1.10.

Таблица 1.10. Температура размягчения

Марка стекла	Температура размягчения, К(°С)
КУ-1	1933 (1660)
КУ-2	1993 (1720)
КВ	1973 (1700)
КИ	1993 (1720)

Благодаря малому значению температурного коэффициента линейного расширения кварцевое стекло применяют в качестве материала астрономических зеркал. При этом определяющими возможность такого применения кварцевого стекла являются его механические характеристики:

- предел прочности σ при изгибе, МПа:
при 293 К (20°С) – не менее 39,2;
при 1073 К (800°С) – не менее 68,7;
- предел прочности σ , МПа:
при сжатии – 588,6;
при ударном изгибе – 0,196–0,294;
- модуль упругости (модуль Юнга) $E = 73,6$ ГПа;
- модуль сдвига $G = 31,4$ ГПа;
- коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона) $\mu = 0,17 - 0,19$;
- плотность при 293 К (20°С) $\rho = 2,21 \cdot 10^3$ кг/м³.

1.5. Марки кварцевого оптического стекла

В зависимости от области спектрального пропускания установлены марки стекла, указанные в табл. 1.11.

Таблица 1.11. Марки кварцевого оптического стекла

Обозначение марки стекла	Характеристика
КУ-1	Стекло кварцевое оптическое, прозрачное в УФ- и видимой областях спектра, без полос поглощения в интервале длин волн 170–250 нм, с полосами поглощения в интервалах длин волн 2100–2300 нм и 2600–2800 нм (в соответствии с рис. П.1.1, П.1.6), нелюминесцирующее, радиационно-оптически устойчивое
КУ-2	Стекло кварцевое оптическое, прозрачное в УФ- и видимой областях спектра, со слабой полосой поглощения в интервале длин волн 170–250 нм, с полосой поглощения в интервале 2600–2800 нм (в соответствии с рис. П.1.2, П.1.7)
КВ	Стекло кварцевое оптическое, прозрачное в видимой области спектра, с полосами поглощения в интервалах длин волн 170–250 нм и 2600–2800 нм (в соответствии с рис. П.1.3, П.1.8)
КИ	Стекло кварцевое оптическое, прозрачное в видимой и ИК-областях спектра, без полосы поглощения в интервале длин волн 2600–2800 нм (в соответствии с рис. П.1.4, П.1.9)
КУВИ	Стекло кварцевое оптическое, прозрачное в УФ-, видимой и ИК-областях спектра, со слабыми полосами поглощения в интервалах длин волн 170–250 нм и 320–350 нм, с полосой поглощения в интервале 2600–2800 нм (в соответствии с рис. П.1.5, П.1.10), нелюминесцирующее, радиационно-оптически устойчивое

В соответствии с [3] коэффициент пропускания следует измерять на приборах, указанных в табл. 1.12 или любых других приборах с аналогичными метрологическими характеристиками.

Таблица 1.12. Приборы для измерения коэффициента пропускания кварцевого оптического стекла

Наименование прибора	Обозначение прибора	Рабочий диапазон длин волн, нм
Вакуумный монохроматор	ВМР-2	170–210
Вакуумный спектрофотометр	ВСФ-2МП	120–400
Спектрофотометр	СФ-4А СФ-16 СФ-26 СФ-46	200–1100
Спектрофотометр	СФ-8	1000–2000
Инфракрасный спектрофотометр	ИКС-22	750–4500
	ИКС-29	2400–25000

Измерения (контроль) выполняют на образце или на заготовке в соответствии с техническим описанием и инструкцией по эксплуатации прибора в рабочем направлении образца или заготовки, совпадающем с направлением оси наклона.

Значения коэффициентов пропускания кварцевого стекла τ_λ при различных длинах волн в слое стекла толщиной 1 см, полученные усреднением результатов измерения, приведены в табл. 1.13. Потери на отражение от поверхностей исключены.

Значение показателя поглощения (α_λ), см^{-1} , рассчитывают по формуле

$$\alpha_\lambda = \frac{D_\lambda - D_p}{S},$$

где D_λ – оптическая плотность, измеренная на приборе, имеющем шкалу плотности, или рассчитанная по формуле $D_\lambda = -\lg \tau_\lambda$, где τ_λ – коэффициент пропускания; D_p – поправка на отражение от поверхности измеряемого (контролируемого) образца или заготовки; S – толщина образца, см.

Таблица 1.13. Коэффициенты пропускания τ_λ кварцевого стекла в слое толщиной 1 см

λ , нм	Коэффициент пропускания τ_λ стекла марки				
	КУ-1	КУ-2	КВ	КИ	КУВИ
170	0,630	0,495	–	–	0,565
180	0,900	0,660	–	–	0,845
190	0,940	0,755	–	–	0,915
200	0,960	0,845	–	–	0,935

λ , нм	Коэффициент пропускания τ_λ стекла марки				
	КУ-1	КУ-2	КВ	КИ	КУВИ
210	0,980	0,920	0,030	0,075	0,950
215	0,985	0,940	–	–	0,960
220	0,990	0,950	0,220	0,220	0,970
230	>0,999	0,945	0,565	0,435	0,980
240		0,920	0,540	0,525	0,980
250		0,940	0,715	0,585	0,980
260		0,985	0,920	0,800	0,980
270		0,995	0,995	0,930	0,980
280		>0,999	>0,999	0,990	0,985
300		0,999	>0,999	>0,999	>0,999
325	0,970				
350	0,980				
400	0,990				
500	>0,999				
750					
1000					
1385		0,880	0,960	0,970	>0,999
2000	>0,999	>0,999	>0,999		
2200	0,580	0,900	0,925		
2300	0,880	0,955	0,955		
2380	0,950	0,970	0,970	>0,999	>0,999
2500	0,790	0,930	0,930	>0,999	>0,999
2720	0,000	0,000	0,030	>0,999	0,930
2800	0,000	0,015	0,150	0,955	0,935
2900	0,295	0,720	0,770	0,900	0,910
3000	0,670	0,810	0,810	0,870	0,880
3100	0,785	0,830	0,825	0,850	0,860
3300	0,855	0,860	0,850	0,870	0,875
3750	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180
3910	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
4000	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
4220	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
4300	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070
4400	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Показатели поглощения α_λ при различных длинах волн λ , нм, в слое стекла толщиной 1 см приведены в табл. П.1.1, а поправки на отражение D_p от двух поверхностей при различных длинах волн приведены там же в табл. П.1.2.

1.6. Параметры заготовок и показатели качества кварцевого оптического стекла

Кварцевое оптическое стекло выпускают в заготовках, представляющих собой диски или пластины прямоугольной формы, ограниченные параллельными плоскостями, размерами и массой не более указанных в табл. 1.14.

Таблица 1.14. Параметры заготовок кварцевого оптического стекла

Марка стекла	Диаметр или диагональ, мм	Толщина, мм	Масса, кг
КУ-1	400	50	13,900
КУ-2	1200	100	250,000
КВ	1200	130	325,000
КИ	200	20	1,400
КУВИ	160	30	1,400

Заметим, что диаметр (диагональ) заготовок должна быть не менее 50 мм, а толщина – не менее 8 мм.

Показатели качества кварцевого оптического стекла устанавливаются по согласованию между потребителем и изготовителем, исходя из функционального назначения изделия из стекла. Для стекла каждой марки устанавливают показатели качества, указанные в табл. 1.15.

Таблица 1.15. Показатели качества кварцевого оптического стекла

Марка стекла	Показатели качества	
КУ-1	Показатель поглощения в УФ-области спектра, люминесценция, радиационно-оптическая устойчивость	Оптическая однородность, двулучепреломление, бессвильность, мелкозернистая неоднородность, пузырность, включения
КУ-2	Показатель поглощения в УФ-области спектра, люминесценция	
КВ	Показатель поглощения в видимой области спектра	
КИ	Показатель поглощения в ИК-области спектра	
КУВИ	Показатель поглощения в УФ-, видимой и ИК-областях спектра, люминесценция, радиационно-оптическая устойчивость	

1.7. Требования к качеству кварцевого оптического стекла

В зависимости от значения показателя поглощения стекла в УФ-области спектра установлено пять категорий кварцевого стекла, указанных в табл. 1.16.

Таблица 1.16. Категории кварцевого стекла для УФ-области спектра

Категория стекла	Показатель поглощения α_λ , см^{-1} , не более, для длин волн		
	170 нм	215 нм	240 нм
01	0,20	0,02	0,01
1	0,30	0,04	0,05
2	0,50	0,10	0,05
3	Не нормируется	0,15	0,10
4		0,25	0,27

Значения показателя поглощения стекла в видимой области спектра не более $0,005 \text{ см}^{-1}$.

В зависимости от значения показателя поглощения в ИК-области спектра установлены две категории кварцевого стекла, указанные в табл. 1.17.

Таблица 1.17. Категории кварцевого стекла для ИК-области спектра

Категория стекла	Показатель поглощения α_λ , см^{-1} , не более, в интервале длин волн 2600–2800 нм
1	0,05
2	0,10

По люминесценции, возбуждаемой УФ-излучением, установлены две категории кварцевого стекла, указанные в табл. 1.18.

Таблица 1.18. Категории кварцевого стекла по его люминесценции

Категория стекла	Характеристика люминесценции
1	Люминесценция не допускается
2	Интенсивность люминесценции не должна превышать интенсивности люминесценции контрольного образца, утвержденного в установленном порядке

По оптической однородности кварцевого стекла установлено шесть категорий, представленных в табл. 1.19. Оптическая однородность характеризуется значением отношения угла разрешения φ коллиматорной установки, в параллельный пучок которой введена заготовка стекла, к фактическому углу разрешения φ_0 той же установки. Стекло категорий 1 и 1а дополнительно характеризуется

качеством дифракционного изображения точки в фокусе коллиматорной установки.

Таблица 1.19. Категории оптической однородности кварцевого стекла

Категория стекла	Отношение φ/φ_0 , не более	Качество дифракционного изображения точки	Примечание
1	1,0	Дифракционное изображение точки должно состоять из светлого круглого пятна с концентрически расположенным вокруг него узким светлым кольцом без разрывов и без заметного на глаз отклонения от окружности	Для заготовок, в которых длина хода луча не превышает 20 мм
1a	1,0	Дифракционное изображение точки должно состоять из светлого круглого пятна с концентрически расположенным вокруг него узким светлым кольцом с заметными на глаз разрывами и отклонениями от окружности, допустимыми в соответствии с [3]	Для заготовок, в которых длина хода луча не превышает 30 мм
2	1,0	Не нормируется	Для заготовок, в которых длина хода луча не превышает 60 мм
3	1,1		
4	1,2		
5	1,5		

Заметим, что для заготовок, в которых длина хода луча превышает 60 мм, показатель оптической однородности устанавливается по согласованию между потребителем и изготовителем.

По двулучепреломлению кварцевого стекла установлено пять категорий, указанных в табл. 1.20.

Таблица 1.20. Категории кварцевого стекла по двулучепреломлению

Категория стекла	Двулучепреломление, нм/см, не более
01	10
1	30
2	50
3	70
4	100 (для стекол марки КИ)

По бессвильности кварцевого стекла установлены две категории, определение которых приведено в табл. 1.21.

Таблица 1.21. Категории кварцевого стекла по бессвильности

Категория стекла	Характеристики бессвильности
1	Не допускаются потоки нитевидных свилей, оптическое действие которых превышает оптическое действие контрольного образца свили категории 1 по [5]. Допускаются одиночные нитевидные свили, оптическое действие которых превышает оптическое действие контрольного образца свили категории 1, но не превышает оптическое действие контрольного образца свили категории 2, в количестве не более 5 шт. на 1 кг стекла и общей протяженностью не более одного диаметра или диагонали заготовки
2	Не допускаются потоки нитевидных свилей, оптическое действие которых превышает оптическое действие контрольного образца свили категории 2 по [5]. Допускаются одиночные нитевидные свили, оптическое действие которых превышает оптическое действие контрольного образца свили категории 2, в количестве не более 10 шт. на 1 кг стекла и общей протяженностью не более одного диаметра или диагонали заготовки

Мелкозернистую неоднородность определяют визуальным сравнением теневой картины заготовки и контрольного образца по методу, описанному в [5]. По мелкозернистой неоднородности кварцевого стекла установлено четыре категории, представленные в табл. 1.22.

Таблица 1.22. Категории кварцевого стекла по мелкозернистой неоднородности

Категория стекла	Характеристика мелкозернистой неоднородности
01	Не допускается мелкозернистая неоднородность
1	Не допускается мелкозернистая неоднородность грубее, чем в контрольном образце, установленном для категории 1
2	Не допускается мелкозернистая неоднородность грубее, чем в контрольном образце, установленном для категории 2
3	Не допускается мелкозернистая неоднородность грубее, чем в контрольном образце, установленном для категории 3

По пузырьности кварцевого стекла установлено семь категорий, характеризующихся диаметром наибольшего пузыря, допускаемого в заготовках стекла (табл. 1.23) и семь классов, характеризующихся числом пузырей размером 0,1 мм и более в 1 кг стекла заготовки (табл. 1.24).

За диаметр пузыря неправильной формы принимают среднее арифметическое значение его наибольшего и наименьшего размеров.

Таблица 1.23. Категории кварцевого стекла по пузырьности

Категория пузырьности стекла	01	1	2	3	4	5	6
Диаметр пузыря, мм, не более	Пузыри не допускаются	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	3,0

Таблица 1.24. Классы кварцевого стекла по пузырьности

Класс пузырьности стекла	а	б	в	г	д	е	ж
Число пузырей, шт./кг, не более	80	100	150	400	500	1000	2000

По включениям в кварцевое стекло установлено пять категорий, характеризующихся размером наибольшего включения, допускаемого в заготовке стекла (табл. 1.25), и четыре класса, характеризующиеся числом включений размером более 0,5 мм в 1 кг стекла заготовки (табл. 1.26). За размер включения любой формы принимают среднее арифметическое значение его наибольшего и наименьшего размеров.

Таблица 1.25. Категории кварцевого стекла по включениям

Категория стекла	Размер включений, мм, не более		
	непрозрачных и кристаллических	полупрозрачных	прозрачных
01	Включения не допускаются		
1	0,5	2,0	4,0
2	2,0	4,0	8,0
3	3,0	6,0	13,0
4	5,0	Не нормируются	

Таблица 1.26. Классы кварцевого стекла по включениям

Класс	Среднее число включений в 1 кг стекла, не более		
	непрозрачных и кристаллических	полупрозрачных	прозрачных
а	4	4	4
б	7	7	7
в	11	11	11
г	15	15	15

Заметим, что число включений в заготовке стекла массой менее 1 кг входит в число пузырей заготовки.

Радиационно-оптическая устойчивость кварцевого стекла к воздействию гамма-излучения, характеризуемая изменением оптической плотности на 1 см стекла, облученного на радиационной установке, должна соответствовать указанной в табл. 1.27.

Таблица 1.27. Радиационно-оптическая устойчивость кварцевого оптического стекла

Экспози- ционная доза излучения, Р(Кл/кг)	Изменение оптической плотности ΔD_{λ} , см^{-1} , не более, для длин волн					
	300 нм			540 нм		
	Марка стекла					
	КУ-1	КУВИ	КВ	КУ-1	КУВИ	КВ
10^4 (2,58)	–	–	0,050	–	–	0,005
10^5 ($2,58 \cdot 10^1$)	–	–	0,150	–	–	0,010
10^6 ($2,58 \cdot 10^2$)	0,050	0,070	–	0,005	0,005	–
10^8 ($2,58 \cdot 10^4$)	0,200	0,300	–	0,025	0,030	–

По показателю поглощения в УФ- и ИК-областях спектра, по люминесценции, двулучепреломлению, бессвильности и мелкозернистой неоднородности кварцевое стекло должно изготавливаться любых категорий, не выше указанных в табл. П.1.3. По оптической однородности кварцевое стекло должно изготавливаться в

соответствии с категориями, указанными в табл. П.1.4. По пузырьности стекло следует изготавливать в соответствии с категориями, указанными в табл. П.1.5, и классами, не ниже указанных в табл. П.1.6. По включениям стекло должно изготавливаться в соответствии с категориями и классами, указанными в табл. П.1.5.

В краевой (нерабочей) зоне заготовки шириной, равной 0,05 ее диаметра или диагонали, показатели качества стекла не нормируют.

2. ОПТИЧЕСКИЕ ЦВЕТНЫЕ СТЕКЛА

Цветное оптическое стекло предназначено для изготовления светофильтров с избирательным поглощением светового излучения в широком диапазоне длин волн, которое определяется природой центров окраски, т.е. различными типами электронных переходов.

Полосы поглощения с максимумом в УФ-области спектра обусловлены электронными переходами с переносом зарядов.

В центрах окраски, образованных кристаллами сульфидов, селенидов и сульфоселенидов металлов, положение полос поглощения по спектру определяется как химической природой сульфоселенидов, так и режимом повторной термообработки.

В центрах окраски, образованных редкоземельными и переходными элементами, полосы поглощения располагаются по всему видимому диапазону, захватывая ближнюю УФ- и ИК-области спектра.

В стеклах, содержащих растворенные металлы (медь, серебро, золото), центры окраски формируются при повторной термообработке (наводке) в виде коллоидных частиц размером 20–30 нм. При этом стекла окрашиваются в красный, желтый и пурпурный цвет. Спектр поглощения определяется как собственным избирательным поглощением атомов металла, так и рассеянием света коллоидными частицами.

2.1. Обозначения стекол

Каждому стеклу присвоены марка, состоящая из двух или трех букв и цифр, и код ОКП (Общероссийский классификатор продукции). Первая или две первые буквы являются начальными буквами наименования цвета, а последняя, одинаковая для всех стекол, буква «С» – начальной буквой «Стекло». Цифра в марке стекла обозначает порядковый номер его разработки: чем меньше цифра, тем раньше это стекло было освоено производством в промышленности. Так, например, наименование СС2 означает синее стекло второе, ЖЗС5 – желто-зеленое стекло пятое.

Различают следующие типы цветных оптических стекол: ультрафиолетовые (УФС), синие и фиолетовые (СС и ФС), сине-зеленые (СЗС), зеленые (ЗС), желтые (ЖС), желто-зеленые (ЖЗС), оранжевые (ОС), красные (КС), инфракрасные (ИКС), пурпурные (ПС), нейтральные (НС), темные (ТС) и, наконец, белые стекла (БС) с различной границей пропускания в УФ-области спектра.

Основное свойство цветных стекол характеризуется их спектральными характеристиками.

2.2. Спектральные характеристики цветных оптических стекол

Спектральные характеристики цветных оптических стекол выражаются числовыми значениями показателя поглощения α_λ или оптической плотности D_λ для различных длин волн и спектральными кривыми коэффициента пропускания τ_λ .

2.3. Показатель поглощения

Показатель поглощения α_λ стекла для света длиной волны λ определяется выражением

$$\alpha_\lambda = -\lg \frac{\tau_\lambda}{t},$$

где τ_λ – коэффициент пропускания стекла толщиной t (мм) для монохроматического света длиной волны λ .

2.4. Оптическая плотность

Оптическая плотность D_λ стекла для монохроматического света длиной волны λ связана с показателем поглощения α_λ и коэффициентом пропускания τ_λ выражением

$$D_\lambda = -\lg \tau_\lambda = \alpha_\lambda t.$$

При вычислении оптической плотности светофильтра, кроме поглощения света, необходимо учитывать потери на френелево отражение от поверхности образца стекла и вводить соответствующую поправку. Коэффициент пропускания τ'_λ светофильтра толщиной t (мм) при падении монохроматического света соответствующей длины волны равен:

$$\tau'_\lambda = (1-\rho)^2 \tau_\lambda = (1-\rho)^2 \cdot 10^{-\alpha_\lambda t},$$

где ρ – коэффициент отражения.

Оптическая плотность D'_λ светофильтра для монохроматического света длиной волны λ равна:

$$D'_\lambda = -\lg \tau'_\lambda = D_\lambda + D_{\rho m} = \alpha_\lambda t + D_{\rho m},$$

где $D_{\rho m}$ – поправка на отражение от поверхности образца.

Коэффициент отражения для расчета поправки $D_{\rho m}$ на отражение от поверхностей образца при перпендикулярном падении света определяется формулой Френеля:

$$\rho = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2},$$

где n – показатель преломления стекла ($n = n_\lambda$).

При этом поправка на отражение определяется выражением $D_{\rho m} = -2 \lg(1 - \rho)$.

Спектральные характеристики некоторых марок цветного оптического стекла приведены в табл. 2.1, а соответствующие им кривые пропускания – на рис. 2.1–2.6.

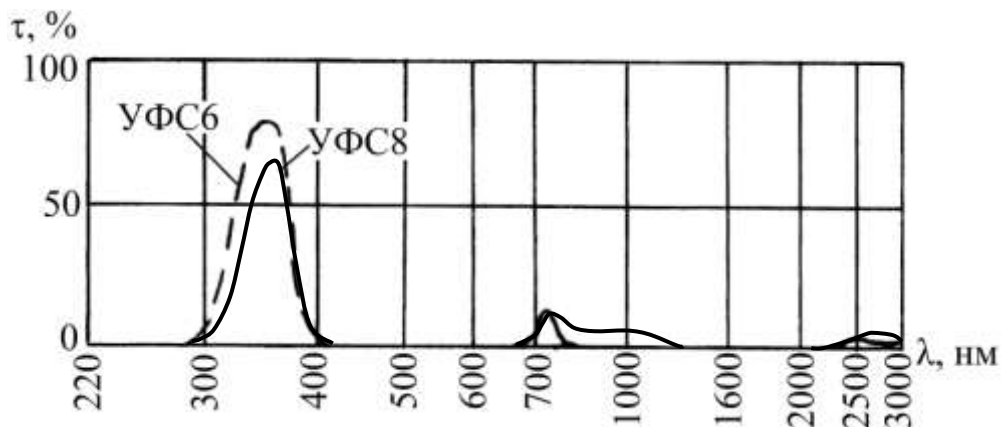


Рис. 2.1. УФС6 и УФС8

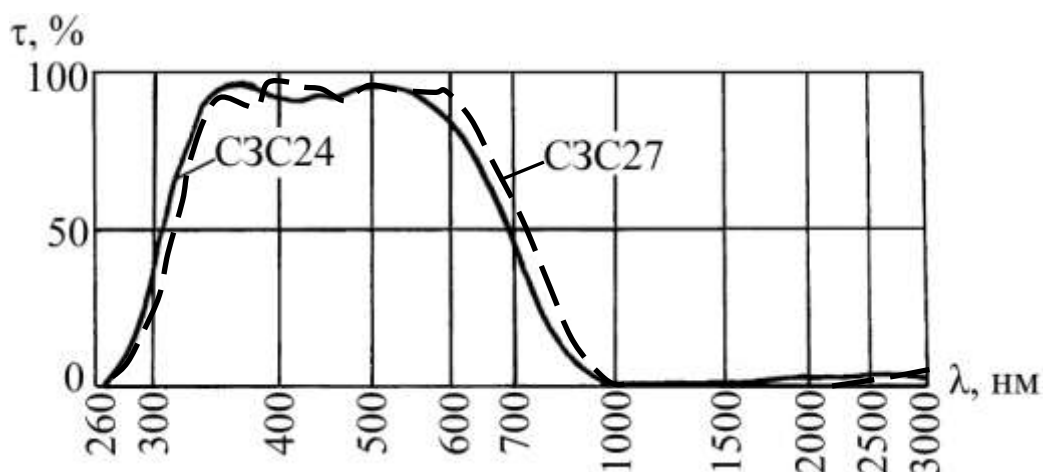


Рис. 2.2. СЗС24 и СЗС27

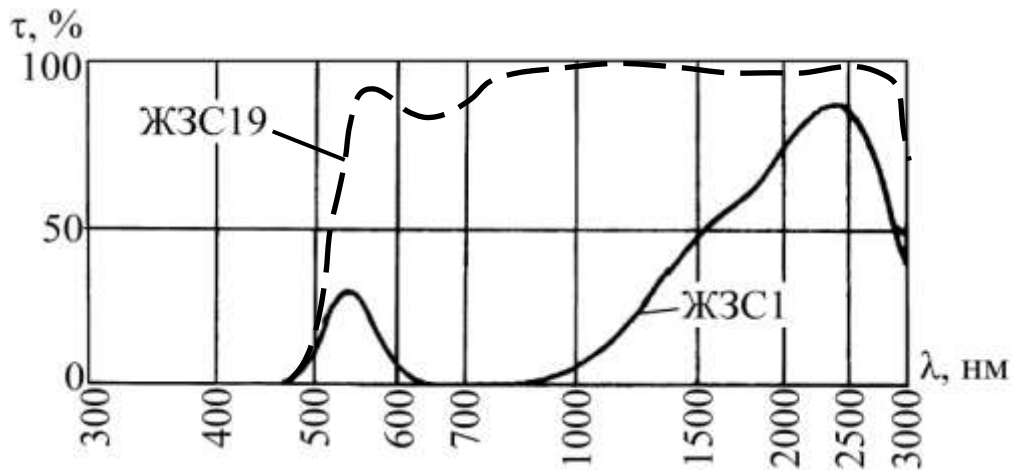


Рис. 2.3. ЖЗС1 и ЖЗС19

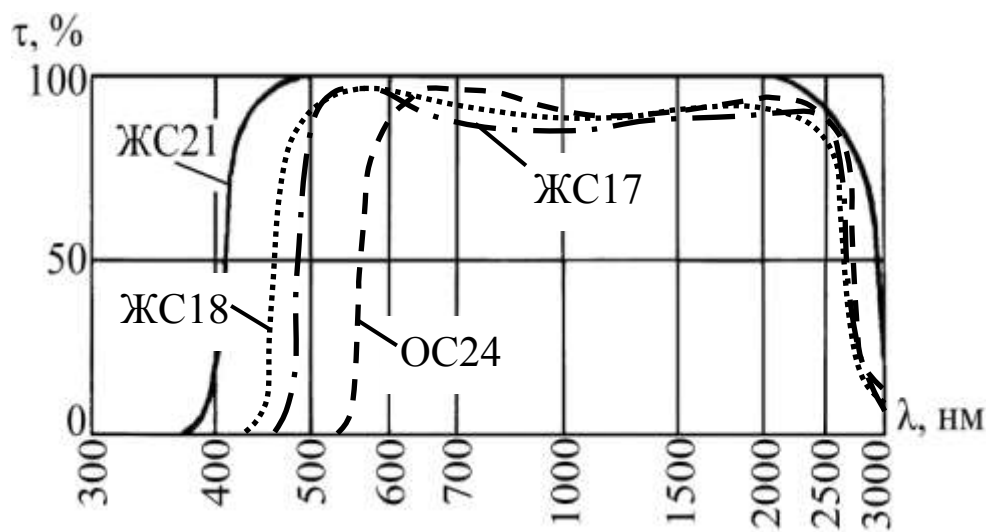


Рис. 2.4. ЖС17, ЖС21, ЖС18 и ОС24

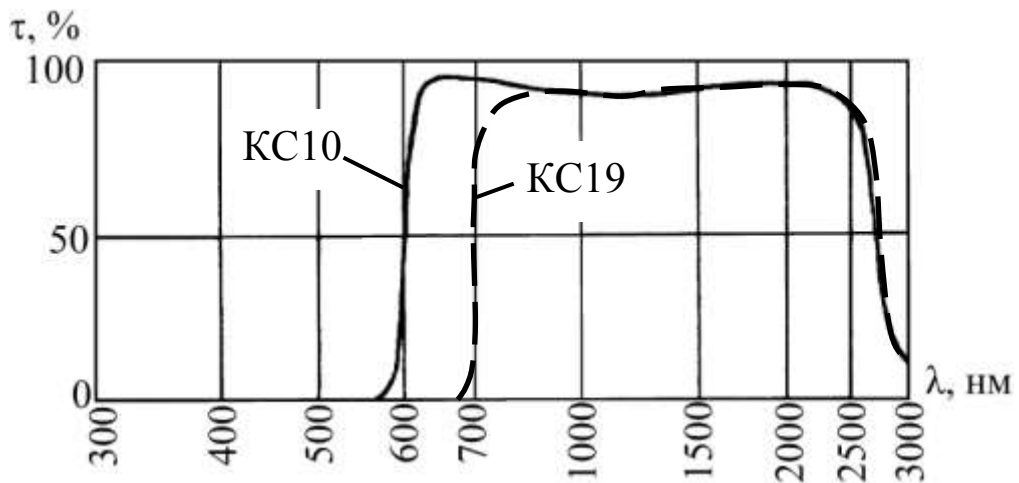


Рис. 2.5. КС10 и КС19

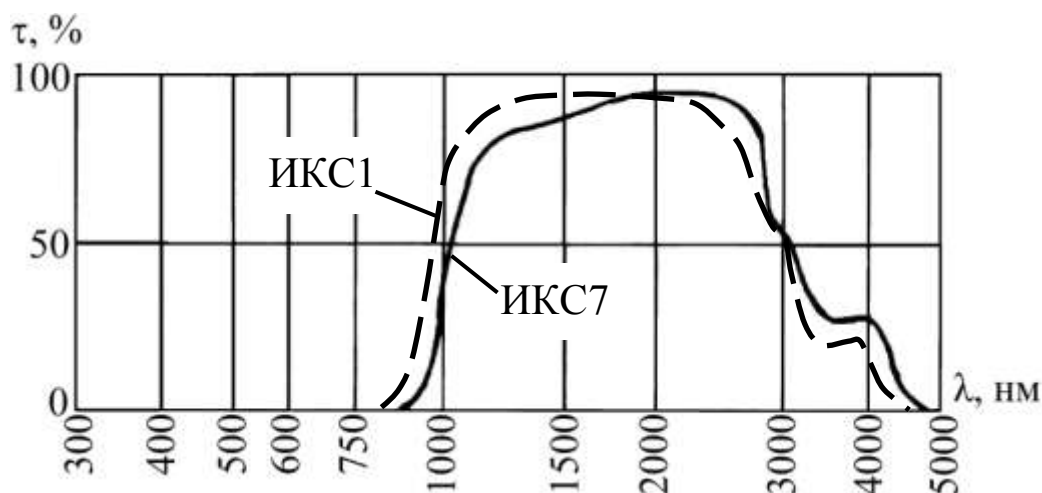


Рис. 2.6. ИКС1 и ИКС7

В табл. 2.1 представлены показатели поглощения стекол в УФ-, видимой и ИК-областях спектра. Спектральные кривые коэффициентов пропускания $\tau(\lambda)$ даны для стекол, имеющих толщину 3 мм, т.е. близкую к наиболее часто используемой рабочей толщине светофильтров. Для большей группы желтых, оранжевых и красных стекол приведены значения не показателей поглощения, а оптической плотности $D(\lambda)$. Это обусловлено тем, что для всех них определяющей величиной является установленное для каждой марки стекла положение границы поглощения $\lambda_{\text{погл}}$, которое по технологическим условиям в данном случае достигнуто при толщине светофильтра, равной 5 мм.

Значения τ_λ и D_λ известных оптических стекол могут отличаться от варки к варке. Допустимые отклонения τ_λ и D_λ от номинальных значений определяются [6] или частными техническими условиями и оговариваются при заказе стекла.

Общий визуальный коэффициент пропускания стекол вычисляется по формуле:

$$\tau = \frac{\int \tau_\lambda I_\lambda V_\lambda d\lambda}{\int I_\lambda V_\lambda d\lambda},$$

где I_λ – функция, характеризующая относительное распределение энергии падающего излучения по спектру; V_λ – относительная видность (спектральная чувствительность глаза); τ_λ – коэффициент пропускания для света данной длины волны λ ; λ – длина волны монохроматического света.

При определении общего коэффициента пропускания готовых светофильтров следует учитывать отражение от полированных поверхностей светофильтра.

Таблица 2.1. Спектральные характеристики коэффициентов пропускания и оптической плотности некоторых марок цветного оптического стекла

λ , нм	УФС6		УФС8		λ , нм	УФС6		УФС8		λ , нм	УФС6		УФС8	
	$\tau(\lambda)$	$\tau(\lambda)$	$\tau(\lambda)$	$\tau(\lambda)$		$\tau(\lambda)$	$\tau(\lambda)$	$\tau(\lambda)$	$\tau(\lambda)$		$\tau(\lambda)$	$\tau(\lambda)$	$\tau(\lambda)$	$\tau(\lambda)$
220	-	-	460	2,300	700	0,900	0,970	1250	1,55	1,050				
230	-	-	470	2,450	710	0,580	0,650	1300	1,55	1,180				
240	-	-	480	2,700	720	0,410	0,470	1350	1,40	1,180				
250	-	>6	490	2,950	730	0,310	0,380	1400	1,40	1,230				
260	>6	4,500			740	0,280	0,330	1450	1,50	1,230				
270	3,100	3,200	500	3,200	750	0,300	0,320							
280	1,750	2,100	510	3,400	760	0,360	0,330							
290	0,920	1,230	520	>6	780	0,470	0,380	1500	1,60	1,310				
			530	>6				1600	1,60	1,310				
300	0,480	0,710	540	>6	800	0,570	0,420	1700	1,55	1,240				
310	0,250	0,420	550	5,800	820	0,670	0,450	1800	1,60	1,240				
320	0,130	0,260	560	5,600	840	0,780	0,460	1900	1,50	1,240				
330	0,074	0,165	570	>6	860	0,860	0,470							
340	0,045	0,110	580	>6	880	0,900	0,470							
350	0,035	0,087	590	>6				2000	1,30	1,200				
360	0,033	0,108			900	0,930	0,470	2100	1,15	1,030				
370	0,047	0,137	600	>6	920	0,940	0,470	2200	0,98	0,930				
380	0,104	0,250	610	>6	940	0,960	0,470	2300	0,85	0,810				
390	0,300	0,510	620	>6	960	0,960	0,480	2400	0,84	0,740				
			630	>6	980	0,970	0,480	2500	0,70	0,590				
400	0,830	0,950	640	>6				2600	0,52	0,520				
410	1,850	1,490	650	>6	1000	0,990	0,500	2700	0,60	0,480				
420	3,200	1,900	660	>6	1050	1,100	0,560	2800	0,63	0,440				
430	4,300	2,200	670	5,000	1100	1,220	0,660	2900	0,57	0,540				
440	5,100	2,300	680	2,900	1150	1,400	0,760	3000	0,53	0,730				
450	5,500	2,300	690	1,650	1200	1,500	0,850							

λ, HM	C3C24		C3C27		λ, HM	C3C24		C3C27		λ, HM	C3C24		C3C27	
	$\tau(\lambda)$		$\tau(\lambda)$			$\tau(\lambda)$		$\tau(\lambda)$			$\tau(\lambda)$		$\tau(\lambda)$	
220	-	-			460	0,012	0,010	700	0,094	0,086	1250	0,970	1,040	
230	>6	-			470	0,011	0,009	710	0,106	0,106	1300	0,970	1,040	
240	>6	-			480	0,009	0,009	720	0,116	0,127	1350	0,970	1,000	
250	4,200	-			490	0,009	0,009	730	0,135	0,147	1400	1,010	0,960	
260	1,840	1,500						740	0,145	0,166	1450	1,010	0,915	
270	0,770	0,870			500	0,009	0,008	750	0,160	0,164				
280	0,400	0,250			510	0,009	0,009	760	0,180	0,203				
290	0,240	0,172			520	0,010	0,010	780	0,220	0,249	1500	0,930	0,868	
					530	0,011	0,010				1600	0,890	0,780	
300	0,140	0,094			540	0,010	0,009	800	0,250	0,296	1700	0,840	0,692	
310	0,077	0,061			550	0,010	0,009	820	0,290	0,353	1800	0,700	0,604	
320	0,041	0,028			560	0,011	0,009	840	0,340	0,410	1900	0,670	0,617	
330	0,022	0,020			570	0,012	0,010	860	0,390	0,471				
340	0,014	0,011			580	0,013	0,011	880	0,440	0,532				
350	0,009	0,007			590	0,016	0,014				2000	0,670	0,630	
360	0,006	0,004						900	0,490	0,595	2100	0,670	0,644	
370	0,004	0,004			600	0,019	0,016	920	0,540	0,658	2200	0,690	0,625	
380	0,004	0,003			610	0,023	0,020	940	0,590	0,704	2300	0,720	0,606	
390	0,006	0,005			620	0,028	0,025	960	0,650	0,750	2400	0,680	0,586	
					630	0,034	0,031	980	0,690	0,800	2500	0,650	0,530	
400	0,009	0,008			640	0,040	0,037				2600	0,580	0,474	
410	0,010	0,010			650	0,047	0,044	1000	0,750	0,850	2700	0,570	0,418	
420	0,011	0,011			660	0,054	0,052	1050	0,840	0,917	2800	0,550	0,401	
430	0,012	0,010			670	0,062	0,061	1100	0,900	0,984	2900	0,650	0,384	
440	0,011	0,010			680	0,072	0,070	1150	0,950	1,010	3000	0,770	0,366	
450	0,011	0,009			690	0,082	0,078	1200	0,960	1,040				

λ, HM	$\tau(\lambda)$		λ, HM		$\tau(\lambda)$		λ, HM		$\tau(\lambda)$		λ, HM		$\tau(\lambda)$	
	ЖЗС1	ЖЗС19	ЖЗС1	ЖЗС19	ЖЗС1	ЖЗС19	ЖЗС1	ЖЗС19	ЖЗС1	ЖЗС19	ЖЗС1	ЖЗС19	ЖЗС1	ЖЗС19
300	-	-	0,180	0,042	750	0,740	0,003	1300	0,180	0,001	0,180	0,001	0,001	
310	-	-	0,170	0,026	760	0,720	0,002	1350	0,160	0,001	0,160	0,001	0,001	
320	-	-	0,180	0,015	780	0,690	0,001	1400	0,140	0,001	0,140	0,001	0,001	
330	-	-	0,200	0,013				1450	0,120	0,001	0,120	0,001	0,001	
340	-	-	0,240	0,010										
350	-	-	0,300	0,011	800	0,670	0,001							
360	-	-	0,370	0,015	820	0,660	0,001	1500	0,110	0,001	0,110	0,001	0,001	
370	-	-			840	0,650	0,001	1600	0,090	0,001	0,090	0,001	0,001	
380	-	-	0,450	0,019	860	0,630	0,001	1700	0,080	0,001	0,080	0,001	0,001	
390	-	-	0,530	0,022	880	0,610	0,001	1800	0,070	0,001	0,070	0,001	0,001	
400	-	-	0,610	0,026				1900	0,060	0,001	0,060	0,001	0,001	
410	>6	-	0,690	0,028										
420	5,000	-	0,750	0,029	900	0,570	0,001							
430	3,300	>6	0,810	0,030	920	0,530	0,001	2000	0,040	0,001	0,040	0,001	0,001	
440	2,500	4,500	0,840	0,027	940	0,500	0,001	2100	0,030	0,001	0,030	0,001	0,001	
450	1,850	2,900	0,840	0,027	960	0,470	0,001	2200	0,020	0,001	0,020	0,001	0,001	
460	1,320	1,870	0,830	0,023	980	0,450	0,001	2300	0,020	0,001	0,020	0,001	0,001	
470	0,950	1,210	0,840	0,019				2400	0,020	0,001	0,020	0,001	0,001	
480	0,710	0,710			1000	0,430	0,001	2500	0,020	0,001	0,020	0,001	0,001	
490	0,510	0,410	0,850	0,020	1050	0,380	0,001	2600	0,030	0,001	0,030	0,001	0,001	
500	0,380	0,230	0,830	0,015	1100	0,330	0,001	2700	0,040	0,002	0,040	0,002	0,002	
510	0,280	0,130	0,810	0,010	1150	0,280	0,001	2800	0,060	0,003	0,060	0,003	0,003	
520	0,220	0,073	0,780	0,009	1200	0,240	0,001	2900	0,090	0,012	0,090	0,012	0,012	
			0,760	0,006	1250	0,210	0,001	3000	0,140	0,062	0,140	0,062	0,062	

λ , нм	λ , нм				λ , нм				λ , нм							
	ЖС17	ЖС21	ЖС18	ОС24	ЖС17	ЖС21	ЖС18	ОС24	ЖС17	ЖС21	ЖС18	ОС24	ЖС17	ЖС21	ЖС18	ОС24
	Оптическая плотность $D(\lambda)$				Оптическая плотность $D(\lambda)$				Оптическая плотность $D(\lambda)$				Оптическая плотность $D(\lambda)$			
320	-	2,220	-	-	560	0,015	0,003	0,021	3,140	950	0,040	-	0,040	-	0,040	0,027
340	-	1,500	-	-	570	0,012	-	0,017	1,150	960	-	0,001	-	0,001	-	-
350	-	1,180	-	-	580	0,010	0,003	0,015	0,305	1000	0,041	0,001	0,041	0,001	0,041	0,030
360	-	0,610	-	-	590	0,010	-	0,015	0,080	1100	-	0,001	-	0,001	-	-
370	-	-	-	-	600	0,010	0,002	0,015	0,050	1200	0,043	0,001	0,043	0,001	0,043	0,025
380	-	0,165	-	-	610	-	-	0,015	0,035	1300	-	0,001	-	0,001	-	-
390	-	-	-	-	620	0,011	0,002	0,015	0,025	1400	0,036	0,001	0,036	0,001	0,036	0,021
400	-	0,050	-	-	640	0,012	0,002	0,015	0,015	1500	-	0,001	-	0,001	-	-
410	-	-	-	-	650	-	0,002	0,015	0,010	1600	0,029	-	0,029	-	0,029	0,020
420	-	0,022	-	-	660	0,013	0,002	0,015	0,008	1800	0,025	0,001	0,025	0,001	0,025	0,020
430	-	-	-	-	680	0,014	0,002	0,015	0,005	2000	0,026	-	0,026	-	0,026	0,023
440	-	0,010	-	-	700	0,015	0,002	0,015	0,005	2100	-	0,001	-	0,001	-	-
450	-	0,008	-	-	720	-	0,002	0,017	0,005	2200	0,033	-	0,033	-	0,033	0,028
460	>10	0,007	-	-	740	-	0,002	0,019	0,007	2400	0,045	0,007	0,045	0,007	0,045	0,035
470	6,300	-	-	-	750	0,020	0,002	-	-	2600	0,130	-	0,130	-	0,130	0,175
480	1,360	0,006	>10	-	760	-	0,001	0,021	0,009	2700	-	0,027	-	0,027	-	-
490	0,320	-	4,500	-	780	-	0,001	0,023	0,012	2800	0,600	-	0,600	-	0,600	0,430
500	0,130	0,005	1,100	-	800	0,025	0,001	0,025	0,015	3000	0,800	0,150	0,800	0,150	0,800	0,800
510	0,080	-	0,320	-	840	-	0,001	-	-							
520	0,054	0,004	0,155	-	850	0,030	-	0,030	0,019							
530	0,035	-	0,075	-	880	-	0,001	-	-							
540	0,025	0,003	0,050	-	900	0,035	-	0,035	0,023							
550	0,018	0,003	0,030	>6	920	-	0,001	-	-							

λ , нм	КС10		КС19		λ , нм	КС10		КС19	
	Оптическая плотность $D(\lambda)$		Оптическая плотность $D(\lambda)$			Оптическая плотность $D(\lambda)$		Оптическая плотность $D(\lambda)$	
500	-	-	-	-	730	0,015	0,050		
510	-	-	-	-	740	0,015	0,045		
520	-	-	-	-	750	0,015	0,040		
530	-	-	-	-	760	0,017	0,038		
540	>10	-	-	-	770	0,017	0,037		
550	9,700	-	-	-	780	0,019	0,036		
560	8,600	-	-	-	790	0,019	0,036		
570	6,700	-	-	-	800	0,023	0,035		
580	3,900	>10	-	-	850	0,026	0,034		
590	1,360	9,900	9,900	9,900	900	0,033	0,033		
600	0,320	9,200	9,200	9,200	950	0,035	0,035		
610	0,110	8,900	8,900	8,900	1000	0,038	0,038		
620	0,050	8,000	8,000	8,000	1200	0,037	0,037		
630	0,028	7,500	7,500	7,500	1400	0,030	0,030		
640	0,021	7,100	7,100	7,100	1600	0,025	0,025		
650	0,018	6,500	6,500	6,500	1800	0,025	0,025		
660	0,017	5,600	5,600	5,600	2000	0,027	0,027		
670	0,016	4,500	4,500	4,500	2200	0,032	0,032		
680	0,016	2,700	2,700	2,700	2400	0,047	0,047		
690	0,016	1,000	1,000	1,000	2600	0,100	0,100		
700	0,015	0,320	0,320	0,320	2800	0,600	0,600		
710	0,015	0,125	0,125	0,125	3000	0,860	0,860		
720	0,015	0,070	0,070	0,070					

$\lambda, \text{ нм}$	ИКС1		ИКС7		$\lambda, \text{ нм}$	ИКС1		ИКС7		$\lambda, \text{ нм}$	ИКС1		ИКС7	
	$\tau(\lambda)$	$\tau(\lambda)$	$\tau(\lambda)$	$\tau(\lambda)$		$\tau(\lambda)$	$\tau(\lambda)$	$\tau(\lambda)$	$\tau(\lambda)$		$\tau(\lambda)$	$\tau(\lambda)$	$\tau(\lambda)$	$\tau(\lambda)$
300	>6	-	720	1,200	5,700	1350	0,011	0,025	3000	0,090	0,090	0,090	0,090	
320	2,500	-	740	1,030	4,600	1400	0,010	0,023	3100	0,100	0,100	0,100	0,105	
340	1,150	-	760	0,860	3,800	1450	0,010	0,022	3200	0,140	0,140	0,140	0,130	
360	0,750	-	780	0,690	3,100	1500	0,010	0,020	3300	0,170	0,170	0,170	0,150	
380	0,700	-				1550	0,010	0,019	3400	0,210	0,210	0,210	0,170	
			800	0,550	2,500	1600	0,010	0,017	3500	0,230	0,230	0,230	0,190	
400	0,900	-	820	0,460	1,950	1650	0,010	0,016	3600	0,240	0,240	0,240	0,190	
420	1,600	-	840	0,390	1,490	1700	0,010	0,015	3700	0,240	0,240	0,240	0,190	
440	2,750	-	860	0,310	1,140	1750	0,010	0,013	3800	0,240	0,240	0,240	0,190	
460	4,100	-	880	0,230	0,870	1800	0,010	0,012	3900	0,200	0,200	0,200	0,180	
480	4,400	-				1850	0,010	0,011						
			900	0,160	0,660	1900	0,010	0,010						
500	4,400	-	920	0,100	0,500	1950	0,010	0,009	4000	0,210	0,210	0,210	0,180	
520	4,100	-	940	0,070	0,370				4100	0,230	0,230	0,230	0,190	
540	3,800	-	960	0,050	0,280	2000	0,011	0,009	4200	0,240	0,240	0,240	0,210	
560	3,300	-	980	0,035	0,220	2100	0,012	0,009	4300	0,320	0,320	0,320	0,260	
580	2,850	-				2200	0,014	0,010	4400	0,400	0,400	0,400	0,350	
			1000	0,030	0,160	2300	0,016	0,011	4500	0,500	0,500	0,500	0,470	
600	2,450	-	1050	0,025	0,084	2400	0,020	0,012	4600	0,650	0,650	0,650	0,650	
620	2,200	-	1100	0,020	0,047	2500	0,024	0,013	4700	0,950	0,950	0,950	0,900	
640	2,000	-	1150	0,017	0,037	2600	0,030	0,014	4800	1,270	1,270	1,270	1,100	
660	1,800	-	1200	0,015	0,031	2700	0,040	0,018	4900	1,650	1,650	1,650	1,270	
680	1,600	-	1250	0,013	0,029	2800	0,052	0,030	5000	1,850	1,850	1,850	1,500	
700	1,360	>6	1300	0,012	0,027	2900	0,070	0,085						

В зависимости от положения светофильтра в оптической системе может возникнуть потребность учета его влияния на габаритные и абберационные характеристики системы. Для этого необходимо знать значения показателя преломления стекла для соответствующих длин волн спектра используемого излучения. В табл. 2.2 приведены значения показателей преломления n_g , n_F , n_e , n_D и n_C для ряда марок наиболее применяемого стекла.

Таблица 2.2. Показатели преломления цветных оптических стекол для разных длин волн

n_{λ} λ , нм	n_g 435,83	n_F 486,13	n_e 546,07	n_D 589,29	n_C 656,27
СС1	1,534	1,529	1,525	1,523	1,520
СС5	1,598	–	–	–	–
СС8	1,535	–	–	–	–
СС9	1,528	1,523	1,519	1,517	1,515
СС16	1,505	1,500	1,497	1,495	1,492
СЗС7	1,525	1,520	1,516	1,514	–
СЗС17	1,528	1,523	1,519	1,517	1,515
СЗС23	1,548	1,543	1,540	1,538	1,535
СЗС21	1,534	1,548	1,545	1,542	–
СЗС22	1,572	1,566	1,562	–	–
СЗС20	1,504	1,500	1,497	1,495	1,492
СЗС24	1,527	1,523	1,520	1,518	1,515
СЗС15	1,539	1,535	1,530	1,528	1,525
СЗС5	1,541	1,536	1,531	1,529	1,526
СЗС16	1,528	1,522	1,519	1,516	1,514
ЗС8	–	1,537	1,533	1,531	1,528
ЖЗС18	–	–	1,539	1,537	1,534
ЖС4	1,657	1,646	1,639	1,635	1,630
ЖС3	–	1,543	1,538	1,536	1,533
ЖС19	–	1,520	1,517	1,515	1,513
ЖС20	–	1,540	1,537	1,535	1,533
ОС13	–	–	1,528	1,524	1,521
ОС14	–	–	–	1,523	1,521
ОС20	1,552	1,547	1,543	1,540	1,538
ОС6	–	1,529	1,525	1,523	1,520
ОС5	–	–	1,525	1,522	1,520
КС15	–	–	–	(1,525)	1,530
ПС7	1,546	1,541	1,536	–	1,531
НС6	1,508	1,504	1,500	1,498	1,496
БС3	1,525	1,521	1,517	1,515	1,513
БС4	1,530	1,525	1,521	1,518	1,516
БС7	1,674	1,663	1,654	1,650	1,644

n_{λ} λ , нм	n_g	n_F	n_e	n_D	n_C
БС8	435,83	486,13	546,07	589,29	656,27
БС12	1,757	1,742	1,730	1,723	1,716
	1,518	1,514	1,510	1,508	1,506

Цветные оптические стекла характеризуются также длиной волны λ_{\max} , соответствующей максимуму пропускания излучения в рабочей части спектра, или длиной волны $\lambda_{\text{пр}}$, характеризующей границу пропускания излучения. За границу пропускания условно принята длина волны, для которой коэффициент пропускания в два раза меньше максимального значения для данного стекла или, что одно и то же, при которой оптическая плотность стекла на 0,3 больше, чем наименьшее ее значение. Величиной $\lambda_{\text{пр}}$ обычно характеризуют стекла, круто срезающие излучение коротковолновой области спектра (стекла марок ЖС, ОС, КС и ИКС).

2.5. Физико-химические свойства цветного оптического стекла

2.5.1. Температурное изменение спектрального поглощения

Светофильтры, изготовленные из цветного оптического стекла, в процессе эксплуатации подвергаются как нагреву, так и охлаждению. При повышении температуры спектральное поглощение изменяется, а при охлаждении, как правило, восстанавливается.

Общим для всех стекол является смещение при нагревании коротковолновой границы и полос поглощения, независимо от того, в каком участке спектра они расположены, в область более длинных волн, размывание полос поглощения и увеличение плотности в минимумах. В некоторых случаях эти изменения настолько велики, что могут резко ухудшить спектральные свойства светофильтров. Так, например, поглощение ИК-излучения стеклом СЗС24 ослабевает в два раза. Полоса поглощения стекла ЗС7 в красной части спектра также ослабевает почти в два раза при одновременном повышении поглощения в минимумах. Граница поглощения желтых, оранжевых и красных стекол при повышении температуры на каждые 100°С смещается на 10–15 нм, что может соответствовать переходу стекла в стекло следующей марки этого типа. Особенно сильно смещается граница поглощения темно-красных стекол марок КС17, КС18, КС19, КС28, КС29 и ИКС970-1. Температурные изменения спектров поглощения следует учитывать при использовании стекол в качестве светофильтров.

2.5.2. Изменение спектрального поглощения известных оптических стекол под влиянием ультрафиолетового излучения

Спектральные свойства стекол, пропускающих УФ-лучи и предназначенных для работы с источниками УФ-излучения, могут изменяться в результате длительного облучения ультрафиолетовым светом. К таким стеклам относятся стекла марок УФС1, УФС5, УФС2, УФС6, ПС11, БС12, БС3, БС4, а также марок СЗС24, ЗС7, СЗС23 и некоторых других. Изменение спектральных характеристик светофильтров, изготовленных из этих стекол, зависит от мощности источника, времени облучения, толщины светофильтров и положения границы пропускания стекла в УФ-области спектра. Чем более короткие волны пропускает стекло, тем в большей степени оно теряет свою прозрачность. Прозрачность стекла можно восстановить почти полностью путем термообработки. Рекомендуемые режимы термообработки светофильтров из стекла марок УФС1, УФС5, УФС2 и УФС6 размером 80×80×5 мм³ приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3. Рекомендуемые режимы термообработки светофильтров для некоторых марок стекол

Марка стекла	Скорость подъема температуры до температуры выдержки, °С/ч	Выдержка		Скорость снижения температуры до 100°С, °С/ч
		температура, °С	время, ч	
УФС1, УФС5	30–40	450	5–10	15–20
УФС2	25–35	400	2–5	15–20
УФС6	30–50	300	2–5	15–20

Примечание: скорость снижения температуры ниже 100°С – инерционная.

2.5.3. Термостойкость стекол

Термостойкость характеризует способность материала выдерживать без разрушения однократные или многократные перепады температур. Термостойкость K находится в сложной зависимости от свойств и состава стекла. Стекла делятся на нетермостойкие ($K < 100^\circ\text{C}$) и термостойкие ($K > 100^\circ\text{C}$). Для оценки термостойкости материала можно применить формулу Шотта–Винкельмана:

$$K = S \frac{\sigma_p}{\alpha E} \sqrt{\frac{\lambda}{c\rho}},$$

где S – константа, учитывающая форму и размер изделия; σ_p – предел прочности на растяжение; $\sqrt{\lambda/c\rho}$ – коэффициент температуропроводности; α – температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР); E – модуль упругости.

Таким образом, чем выше температуропроводность и ниже ТКЛР, тем стекло более термостойко.

Нагревание тела при постоянном давлении вызывает увеличение линейных размеров, а, соответственно, и объема. Термическое расширение характеризуется коэффициентом объемного расширения β и ТКЛР α . На практике принимают ТКЛР, измеренный в диапазоне температур от 20 до 300°C.

2.5.4. Температура отжига

В процессе производства цветного оптического стекла важным этапом является отжиг, который позволяет максимально ослабить остаточные напряжения и привести массу стекла каждой заготовки к единому значению показателя преломления в пределах допустимых отклонений, т.е. получить оптически однородное стекло.

Температурой отжига принято считать температуру, при которой вязкость стекла соответствует 10^{12} Па·с (близка к температуре стеклования). Каждое стекло имеет свою температуру отжига, зависящую от его химического состава.

2.5.5. Оптический коэффициент напряжения

При расчете режимов отжига стекла учитываются его фотоупругие свойства. Фотоупругость стекла выражается оптическим коэффициентом напряжения (ОКН), равным разности приращений показателя преломления стекла для света с колебаниями, параллельными и перпендикулярными действию напряжений при их изменении на 10^{12} Па, т.е. ОКН характеризует двойное лучепреломление, возникающее при напряжении 10^{12} Па. В табл. 2.4 значения ОКН B приведены с точностью до $0,15 \cdot 10^{12}$ Па⁻¹. Коды ОКП марок цветных оптических стекол и характеристики их свойств: плотности ρ (кг/дм³), температурного коэффициента линейного расширения $\alpha \cdot 10^7$ (град⁻¹), температуры отжига T_0 (°C), химической устойчивости (к влажной атмосфере и кислотоустойчивости), оптического коэффициента напряжения $B \cdot 10^{12}$ (Па⁻¹), твердости по сошлифованию H_S относительно твердости стекла К8 и показателя преломления n_e (или n_D , если n_e невозможно изменить) приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4. Физико-химические свойства цветных оптических стекол

Марка стекла	Код ОКП	$n_e(n_D)$	ρ	T_0	$\alpha \cdot 10^7$	H_S	$B \cdot 10^{12}$	Химическая устойчивость	
								к влажной атмосфере	кислотно-устойчивость
УФС1	44 9240 0000	(1,540)	2,84	490	(89)*	0,39	1,80	Д	1
УФС5	44 9240 2000	(1,540)	2,84	480	104	0,40	1,80	Д	2
УФС2	44 9240 1000	(1,557)	2,65	480	93	0,51	1,80	Д	1
УФС6	44 9240 3000	(1,520)	2,58	490	102(92)*	1,05	2,90	А	1
УФС8	44 9240 4000	(1,509)	2,46	540	60	1,11	2,80	А	5
ФС1	44 9241 0000	(1,524)	2,53	520	103	1,11	2,60	В	1
ФС6	44 9241 1000	(1,495)	2,40	600	59	1,05	2,90	А	1
СС2	44 9242 1000	1,522	2,51	520	103	1,14	2,50	Б	1
СС4	44 9242 2000	(1,522)	2,51	520	104	1,14	2,50	Б	1
СС9	44 9242 6000	1,519	2,52	520	103	1,15	2,50	Б	1
СС1	44 9242 0000	1,525	2,51	520	104	1,14	2,50	Б	1
СС8	44 9242 5000	1,522	2,52	500	102(91)*	1,12	2,50	Б	1
СС5	44 9242 3000	1,585	3,25	470	89	0,67	3,10	В	2
СС15	44 9243 0000	1,515	2,48	475	103	0,92	2,90	В	2
СС18	44 9243 3000	1,497	2,50	530	90(83)	0,76	3,75	В	6
СС16	44 9243 1000	1,497	2,50	530	90(83)	0,76	3,75	В	6
СС17	44 9243 2000	1,497	2,50	530	90(83)	0,76	3,75	В	6
С3С7	44 9244 2000	1,516	2,57	460	103	1,04	2,50	В	2
С3С17	44 9244 7000	1,519	2,50	520	101	1,13	2,60	Б	1
С3С8	44 9244 3000	1,519	2,59	450	103	1,04	2,50	В	2

Марка стекла	Код ОКП	$n_e(n_D)$	ρ	T_0	$\alpha \cdot 10^7$	H_S	$B \cdot 10^{12}$	Химическая устойчивость	
								к влажной атмосфере	кислотно-устойчивость
С3С9	44 9244 4000	1,524	2,61	440	103	1,03	2,50	В	2
С3С23	44 9245 1000	1,540	2,84	380	108	0,33	3,20	С	5
С3С21	44 9244 9000	1,545	2,86	380	100	0,30	3,40	С	6
С3С22	44 9245 0000	1,562	2,93	400	100(98)*	0,28	3,20	С	6
С3С20	44 9244 8000	1,497	2,27	420	94	0,68	3,65	В	5
С3С26	44 9245 4000	1,536	2,84	480	92	0,36	1,90	С	2
С3С24	44 9245 2000	1,520	2,55	620	55	0,78	2,70	С	2
С3С25	44 9245 3000	1,517	2,54	620	55	0,76	2,70	С	2
С3С15	44 9244 5000	1,530	2,64	520	99	1,14	2,90	Б	1
С3С5	44 9244 1000	1,531	2,63	520	99	1,13	2,90	В	1
С3С16	44 9244 6000	1,519	2,60	560	67	1,16	3,10	А	1
С3С27	44 9245 5000	1,505	2,44	570	59	0,66	2,20	С	1
3С8	44 9247 0000	1,533	2,83	370	105(99)*	0,33	3,25	Д	6
3С7	44 9246 9000	1,537	2,85	360	72	0,89	3,40	Д	5
3С10	44 9247 1000	1,537	2,83	380	100	0,34	3,25	С	5
3С1	44 9246 5000	1,526	2,52	520	103	1,12	2,50	В	1
3С11	44 9247 2000	1,553	2,83	480	113	0,91	2,80	Б	1
3С3	44 9246 7000	1,525	2,52	520	99	1,09	2,60	Б	2
Ж3С5	44 9248 2000	1,524	2,50	540	102	1,12	2,50	Б	1
Ж3С6	44 9248 3000	1,524	2,50	540	102	1,12	2,50	Б	1

Марка стекла	Код ОКП	$n_e(n_D)$	ρ	T_0	$\alpha \cdot 10^7$	H_S	$B \cdot 10^{12}$	Химическая устойчивость	
								к влажной атмосфере	кислото-устойчивость
ЖЗС18	44 9248 9000	1,539	2,84	390	108	0,35	3,20	С	1
ЖЗС19	44 9249 0000	1,754	4,80	390	83	0,60	1,20	А	6
ЖЗС9	44 9248 4000	1,524	2,50	540	102	1,12	2,60	Б	1
ЖЗС1	44 9248 0000	1,524	2,52	540	102	1,12	2,50	В	1
ЖЗС12	44 9248 6000	1,529	2,53	520	100	1,11	2,65	В	1
ЖЗС17	44 9248 8000	(1,529)	2,53	520	100(93)*	1,10	2,65	В	1
ЖС4	44 9250 1000	1,639	3,69	500	105	0,63	2,70	А	3
ЖС3	44 9250 0000	1,538	2,78	520	104	0,78	2,80	А	5
ЖС19	44 9250 8000	1,517	2,40	560	65	0,75	3,20	В	3
ЖС20	44 9250 9000	1,537	2,82	490	104	0,38	1,75	С	2
ЖС10	44 9250 2000	1,525	2,64	540	102	0,90	3,10	А	2
ЖС11	44 9250 3000	1,525	2,64	540	102	0,90	3,10	Б	2
ЖС12	44 9250 4000	1,525	2,64	540	102	0,90	3,10	Б	2
ЖС16	44 9250 5000	1,525	2,64	540	102	0,90	3,10	Б	2
ЖС17	44 9250 6000	1,525	2,64	540	102	0,90	3,10	Б	2
ЖС18	44 9250 7000	1,525	2,64	540	102(95)*	0,90	3,10	Б	2
ЖС21	44 9251 0000	1,469	2,25	430	34	1,39	3,50	А	1
ОС11	44 9252 8000	1,525	2,64	540	102	0,90	3,50	В	2
ОС12	44 9252 9000	1,525	2,64	540	102	0,90	3,50	В	2
ОС13	44 9253 0000	1,528	2,64	540	102(95)*	0,90	3,50	В	2

Марка стекла	Код ОКП	$n_e(n_D)$	ρ	T_0	$\alpha \cdot 10^7$	H_S	$B \cdot 10^{12}$	Химическая устойчивость	
								к влажной атмосфере	кислотно-устойчивость
OC14	44 9253 1000	(1,523)	2,64	540	102(95)*	0,90	3,50	B	2
OC17	44 9253 2000	1,525	2,64	540	102	0,90	3,40	B	2
OC21	44 9253 5000	1,535	2,74	580	108	0,70	3,60	B	3
OC22	44 9253 6000	1,535	2,74	580	108	0,70	3,60	B	3
OC23-1	44 9253 4000	1,535	2,74	580	108	0,70	3,60	B	3
OC24	44 9253 7000	1,535	2,74	580	108	0,70	3,60	B	3
OC6	44 9252 7000	1,525	2,55	520	104	1,23	2,25	B	1
OC5	44 9252 6000	1,525	2,55	520	104	1,22	2,20	B	1
OC19	44 9253 8000	1,543	2,48	560	70(63)	0,95	2,80	A	4
OC20	44 9253 9000	1,543	2,58	560	75(68)	0,93	2,90	A	4
KC10	44 9254 6000	(1,525)	2,64	540	108	0,90	3,20	B	2
KC11	44 9254 7000	(1,525)	2,64	540	108	0,90	3,20	B	2
KC13	44 9254 8000	(1,525)	2,64	540	108	0,90	3,20	B	2
KC14	44 9254 9000	(1,525)	2,64	540	108	0,90	3,20	B	2
KC15	44 9255 0000	(1,525)	2,64	540	108(95)*	0,90	3,20	B	2
KC17	44 9255 1000	(1,525)	2,64	540	108	0,90	3,20	B	2
KC18	44 9255 2000	(1,525)	2,64	540	108	0,90	3,20	B	2
KC19	44 9255 3000	(1,525)	2,64	540	108	0,90	3,20	B	2
KC21	44 9255 6000	(1,535)	2,74	580	108	0,70	3,60	B	4
KC23	44 9255 7000	(1,535)	2,74	580	108	0,70	3,60	B	4

Марка стекла	Код ОКП	$n_e(n_D)$	ρ	T_0	$\alpha \cdot 10^7$	H_S	$B \cdot 10^{12}$	Химическая устойчивость	
								к влажной атмосфере	кислотно-устойчивость
КС24	44 9255 8000	(1,535)	2,74	580	108	0,70	3,60	В	4
КС25	44 9255 9000	(1,535)	2,74	580	108	0,70	3,60	В	4
КС27	44 9255 4000	(1,530)	2,64	580	106	0,75	3,60	В	4
КС28	44 9255 5000	(1,530)	2,64	580	106	0,75	3,60	В	4
ИКС970-1	44 9258 4000	(1,530)	2,58	540	110	1,21	2,50	В	3
ИКС1	44 9256 5000	(1,525)	2,53	520	99	1,12	2,50	В	1
ИКС3	44 9256 6000	(1,525)	2,53	520	100	1,12	2,50	Б	2
ИКС5	44 9256 7000	(1,533)	2,73	465	100	0,86	3,10	В	2
ИКС6	44 9256 8000	(1,541)	2,74	465	100(93)*	0,86	3,10	В	2
ИКС7	44 9256 9000	(1,556)	2,82	500	99	0,87	3,10	В	2
ПС5	44 9260 0000	1,677	4,09	420	85	0,64	2,10	А	2
ПС14	44 9260 5000	1,479	2,27	410	76	0,70	4,20	В	5
ПС7	44 9260 1000	1,536	2,72	510	98	1,04	2,60	А	1
ПС8	44 9260 2000	1,608	3,56	460	96	0,67	2,75	Б	2
ПС11	44 9260 3000	1,535	2,83	470	104	0,40	1,80	Д	1
ПС13	44 9260 4000	1,594	3,26	460	112	0,70	3,20	В	4
НС1	44 9261 6000	1,523	2,52	520	102	1,16	2,50	Б	1
НС2	44 9261 7000	1,525	2,52	520	100	1,16	2,10	Б	1
НС3	44 9261 8000	1,528	2,52	520	100	1,14	2,60	Б	1
НС6	44 9261 9000	1,500	2,42	490	73(66)*	0,93	3,35	А	5

Марка стекла	Код ОКП	$n_e(n_D)$	ρ	T_0	$\alpha \cdot 10^7$	H_S	$B \cdot 10^{12}$	Химическая устойчивость	
								к влажной атмосфере	кислотно-устойчивость
НС7	44 9262 0000	1,500	2,42	490	73	0,93	3,35	A	5
НС8	44 9262 1000	1,505	2,42	490	73	0,93	3,35	A	5
НС9	44 9262 2000	1,507	2,42	490	72	0,91	3,30	A	5
НС10	44 9262 3000	(1,511)	2,42	490	72	0,91	3,30	A	5
НС11	44 9262 4000	(1,516)	2,43	490	72	0,91	3,30	A	5
НС12	44 9262 5000	(1,529)	2,46	490	72	0,91	3,30	A	3
НС13	44 9262 6000	1,511	2,42	510	72	0,89	3,30	A	5
НС14	44 9262 7000	1,500	2,38	520	53	0,98	3,50	Б	4
ТС6	44 9264 4000	1,528	2,52	520	107	1,14	2,50	В	1
ТС9	44 9264 7000	1,520	2,52	520	91	1,12	2,50	Б	1
ТС10	44 9264 6000	1,525	2,51	510	105	1,14	2,50	A	1
ТС3	44 9264 2000	(1,527)	2,53	520	105	1,08	2,60	В	1
БС3	44 9266 0000	1,517	2,52	540	87	0,96	3,30	A	1
БС4	44 9266 1000	1,521	2,38	480	99	0,89	2,65	Б	1
БС7	44 9266 4000	1,654	3,72	450	85	0,68	2,90	A	2
БС8	44 9266 5000	1,730	4,22	440	88	0,60	2,30	A	2
БС12	44 9266 7000	1,510	2,47	560	81	1,10	2,90	A	1

* в скобках даны значения ТКЛР, измеренные на интерференционном дилагометре типа Физо с точностью $\pm 1 \cdot 10^{-7}$ 1/град

2.5.6. Относительная твердость стекла по сошлифованию

Твердость стекла в значительной мере определяет трудоемкость процесса его обработки. На детали из «мягкого» стекла сложнее получить поверхность требуемой формы с высокой точностью. Кроме того, стекло с малой твердостью больше подвержено царапанию, а это затрудняет получение и сохранение полированной поверхности высокой степени чистоты. Как и многие свойства, твердость стекла зависит от его химического состава. Относительная твердость по сошлифованию определяется отношением объема сошлифованного стекла марки К8 (ВК7 фирмы «Шотт») к объему стекла исследуемой марки, сошлифованного при тех же условиях обработки.

2.5.7. Химическая устойчивость стекол

Химической устойчивостью цветного оптического стекла называют сопротивляемость его полированной поверхности воздействию различных веществ, с которыми оптические детали контактируют в процессе изготовления и в условиях эксплуатации. Между сопротивляемостью стекол воздействию различных разрушающих сред прямой связи нет: стекло может сильно разрушаться от растворов кислот, но быть вполне устойчивым к влажной атмосфере и наоборот.

Устойчивость силикатных стекол к влажной атмосфере определяется при выдержке их в течение от 2 до 20 часов при температуре 50°C и относительной влажности 85%. По устойчивости к влажной атмосфере силикатные стекла подразделяются на группы А, Б, В и Г. Если при выдержке в течение 20 часов изменений на поверхности нет, то стекло относят к группе А; если при выдержке в течение от 5 до 20 часов на поверхности появляется капельный налет, то стекло относят к группе Б. Стекло относят к группе В, если капельный налет появляется при выдержке от 2 до 5 часов. Если капельный налет появляется при выдержке в течение 2 часов, то стекло относят к группе Г.

Устойчивость несиликатных стекол к влажной атмосфере определяются так же, как и для силикатных, но при температуре 60°C. По этому свойству несиликатные стекла подразделяются на следующие группы: группа С (выдержка в течение 20 часов – изменений нет); группа У (выдержка от 5 до 20 часов – наблюдается разрушение); группа Д (выдержка от 2 до 5 часов – наблюдается

разрушение); группа ДД (выдержка менее 2 часов – наблюдается разрушение).

Детали из силикатных стекол групп В и Г и несиликатных стекол групп Д и ДД следует применять после предварительной защиты.

По кислотоустойчивости цветные оптические стекла (силикатные и несиликатные) подразделяются на шесть групп, определяемых стандартным снижением коэффициента отражения стекла на 0,4%: группа 1 – требует травления более 5 часов; группа 2 – требует травления от 1 до 5 часов; группа 3 – требует травления от 0,25 до 1 часа; группа 4 – требует травления в течение 0,25 часа; группа 5 – требует травления 1 час; группа 6 – требует травления менее 0,25 часа. Первые четыре группы стекол подвергаются воздействию раствора 0,1Н уксусной кислоты, а пятая и шестая – воздействию дистиллированной воды. Испытания по определению кислотоустойчивости стекол проводятся при температуре 50°C. Рекомендуются применять цветные оптические стекла первых трех групп.

Основные назначения светофильтров, изготовленных из стекла соответствующей марки, определены в табл. 2.5. Однако, многие светофильтры не могут быть получены путем применения одного стекла. В этом случае светофильтры с наиболее близким к требуемому ходом спектральных кривых пропускания, как правило, можно получить путем сочетания двух или трех цветных стекол. Так, например, светофильтр, приводящий спектральную чувствительность селенового фотоэлемента к спектральной чувствительности глаза, состоит из стекол марок ЖЗС18 и ЗС8 толщиной соответственно 2,1 мм и 1,9 мм и при этом почти точно воспроизводит заданную спектральную кривую.

Таблица 2.5. Основные назначения светофильтров

Марка стекла	Назначение
УФС1	Люминесцентный анализ; выделение области 240–420 нм
УФС5	Люминесцентный анализ; выделение области 250–400 нм
УФС2	Люминесцентный анализ; выделение области 270–380 нм; в комбинации с ЖЗ3 выделение линии ртути 313 нм
УФС6	Люминесцентный анализ; выделение области 310–390 нм; в комбинации с БС7, БС6, БС5 выделение линии ртути 365 нм
УФС8	Люминесцентный анализ; арматура для источников ультрафиолетового света (термически устойчивое); выделение области 320–390 нм
ФС1	Выделение области 330–460 нм

Марка стекла	Назначение
ФС6	Выделение областей 290–460 и 720–1200 нм
СС2	Белый сигнальный для источников света с цветовой температурой 1900–2400 К
СС4	Выделение области 340–470 нм
СС9	Светофильтр дневного света
СС1	Светофильтр дневного света; цветное освещение
СС8	Синий сигнальный; цветное освещение
СС5	Трехцветная проекция; выделение области 370–500 нм
СС15	Ультрафиолетовая микроскопия; выделение области 360–490 нм; в комбинации с ЖС11, ЖС12 выделение линии ртути 436 нм
СС16, СС17, СС18	Светофильтры, повышающие цветовую температуру
СЗС17	Светофильтр дневного света (в комбинации с ПС5 и ПС14)
СЗС7	Поглощение области 580–1200 нм. Цветное освещение
СЗС8	Поглощение области 580–1200 нм
СЗС9	Поглощение области 540–2500 нм
СЗС23	Поглощение области 680–1200 нм; в комбинации со стеклами ОС14, КС10, КС11, КС13 выделение участков спектра в области 580–660 нм
СЗС21	Поглощение области 620–1500 нм; в комбинации со стеклами ОС11, ОС12, ОС13, ОС14 выделение участков спектра в области 520–600 нм
СЗС22	Поглощение области 580–700 нм; в комбинации со стеклами ЖС16, ЖС17, ЖС18 и ОС11 выделение участков спектра в области 480–540 нм
СЗС20	Поглощение области 540–730 нм; выделение области 360–550 нм; в комбинации с ЖС12 или ЖС16 выделение области 460–580 нм
СЗС26	Теплозащитное, не имеющее избирательной окраски; в комбинации с другими стеклами выделяет участки спектра в области 680–800 нм
СЗС24, СЗС27	Теплозащитное; поглощение области 750–3000 нм (и дальше)
СЗС25	Теплозащитное; поглощение области 700–3000 нм (и дальше)
СЗС15	Светофильтр для сенситометрии
СЗС5	Теплозащитное; поглощение области 700–3000 нм (и дальше)
СЗС16	Теплозащитное – термически устойчивое
ЗС8	Приведение кривой спектральной чувствительности селенового фотоэлемента к кривой чувствительности глаза (в комбинации с ЖС18)
ЗС7	Выделение узких участков спектра; в комбинации с ОС13 выделение линии ртутного спектра 578 нм; в комбинации с СЗС22 и ЖС18 – области 510–530 нм

Марка стекла	Назначение
ЗС10	Тройное цветоделение; выделение области 500–600 нм; воспроизведение кривой чувствительности глаза
ЗС1	Трехцветная проекция; выделение области 480–570 нм; фотография
ЗС11	Трехцветная проекция; выделение области 480–570 нм; фотография
ЗС3	Зеленый сигнальный светлый; цветное освещение
ЖЗС19	Ультрафиолетовая микроскопия; поглощение области спектра короче 500 нм
ЖЗС5	Фотография; цветное освещение
ЖЗС6	Фотография; цветное освещение
ЖЗС18	Приведение кривой спектральной чувствительности селенового фотоэлемента к кривой чувствительности глаза (в комбинации с ЗС8); выделение области 520–620 нм
ЖЗС9	Цветное освещение
ЖЗС1	Светофильтр для дальномеров
ЖЗС12	Светофильтр для дальномеров
ЖЗС17	Светофильтр для дальномеров
ЖС4	Поглощение УФ-области спектра
ЖС3	Выделение линии ртутного спектра 313 нм (в комбинации с УФС2)
ЖС19	Люминесцирующие экраны
ЖС20	Выделение области 280–320 нм (в комбинации с УФС5 или УФС2)
ЖС21	Выделение области 400–2800 нм
ЖС10	Поглощение УФ-области спектра (короче 390 нм); в комбинации с ПС13 выделение линии ртутного спектра 405 нм
ЖС11	Поглощение УФ-области спектра (короче 410 нм); в комбинации с СС15 выделение линии ртутного спектра 436 нм
ЖС12	Фотография; в комбинации с СЗС20 выделение участков спектра в области 450–540 нм
ЖС16	Фотография; в комбинации с СЗС21, СЗС22 и СЗС20 выделение участков спектра в области 470–570 нм
ЖС17	Фотография; наблюдательные приборы; в комбинации с СЗС21 и СЗС22 выделение области 480–570 нм
ЖС18	Фотография; в комбинации с СЗС21 и СЗС22 выделение области 480–570 нм
ОС11, ОС21	Фотография; наблюдательные приборы; в комбинации с ПС7 выделение линии ртутного спектра 546 нм
ОС12, ОС22	Фотография; наблюдательные приборы; в комбинации с СЗС21 выделение области 540–570 нм
ОС13, ОС23-1	Фотография; в комбинации с ЗС7 выделение линии ртутного спектра 578 нм
ОС14, ОС24	Фотография; в комбинации с СЗС21 выделение участков спектра в области 580–600 нм
ОС17	Наблюдательные приборы

Марка стекла	Назначение
ОС6	Колориметрия; объективная фотометрия
ОС5	Желтый сигнальный; наблюдательные приборы; цветное освещение
ОС19, ОС20	Светофильтры, понижающие цветовую температуру
КС10	Выделение области спектра от 600 нм; в комбинации с СЗС21 выделение участков спектра в области 600–610 нм
КС11, КС21	Выделение трети спектра; красный сигнальный светлый
КС13, КС23	Трехцветная проекция; красный сигнальный
КС14, КС24	Фотография
КС15, КС25	Светофильтр для оптических пирометров; фотография
КС17, КС27	Выделение области 670–2800 нм
КС18, КС28	Выделение области 680–2800 нм
КС19	Выделение области 700–2800 нм
ИКС1	Выделение области 850–3000 нм
ИКС5	Выделение области 860–3000 нм
ИКС3	Выделение области 900–3000 нм
ИКС6	Выделение области 900–3000 нм
ИКС7	Выделение области 950–3000 нм
ИКС970-1	Выделение области 970–3000 нм
ПС5	Светофильтр дневного света (в комбинации с СЗС17 и ПС14)
ПС14	Светофильтр дневного света (в комбинации с СЗС17 и ПС5)
ПС7	Выделение линии ртутного спектра 546 нм (в комбинации с ОС11 или ОС12); градуировочный светофильтр
ПС8	Колориметрия; поглощение области 500–550 нм
ПС11	Выделение области 240–460 нм; поглощение области 460–660 нм
ПС13	Выделение линии ртутного спектра 405 нм (в комбинации с БС8 или ЖС10)
НС1	Защитные очки от яркого света
НС2	Защитные очки от яркого света
НС3	Защитные очки от яркого света
НС6	Фотометрия, спектрофотометрия
НС7	Фотометрия, спектрофотометрия
НС8	Фотометрия, спектрофотометрия
НС9	Фотометрия, спектрофотометрия
НС10	Фотометрия, спектрофотометрия
НС11	Фотометрия, спектрофотометрия

Марка стекла	Назначение
НС12	Фотометрия, спектрофотометрия
НС13	Ослабление яркости излучения раскаленных предметов при измерении их температуры оптическим пирометром
НС14	Защитные очки от солнечного света
ТС6	Защитные очки от солнечного света
ТС9	Защитные очки от солнечного света
ТС10	Защитные очки от солнечного света
ТС3	Защитные очки при электросварке
БС12	Пропускание УФ-излучения до 240 нм
БС3	Пропускание УФ-излучения до 270 нм
БС4	Пропускание УФ-излучения до 290 нм
БС7	Пропускание УФ-излучения до 360 нм
БС8	Пропускание УФ-излучения до 380 нм

В табл. 2.6 приведены значения оптической плотности светофильтра, составленного из стекол ЗС8 и ЖЗС18, а на рис. 2.7 представлена спектральная кривая пропускания этого светофильтра. Такой светофильтр выпускался промышленностью.

Таблица 2.6. Значения оптической плотности светофильтра, составленного из стекол ЗС8 и ЖЗС18

λ , нм	$D_{\text{задан.}}$	$D_{\text{свет.}}$	λ , нм	$D_{\text{задан.}}$	$D_{\text{свет.}}$
400	3,300	2,740	580	0,176	0,173
410	2,820	2,260	590	0,231	0,224
420	2,340	1,950	600	0,300	0,285
430	1,890	1,710	610	0,380	0,370
440	1,600	1,550	620	0,470	0,453
450	1,420	1,380	630	0,561	0,562
460	1,240	1,250	640	0,650	0,695
470	1,080	1,080	650	0,785	0,815
480	0,915	0,875	660	0,930	0,935
490	0,750	0,685	670	1,030	1,055
500	0,575	0,510	680	1,060	1,155
510	0,385	0,370	690	1,070	1,210
520	0,240	0,255	700	1,120	1,270
530	0,180	0,191	710	1,240	1,310
540	0,140	0,135	720	1,360	1,330
550	0,125	0,107	730	1,540	1,340
560	0,125	0,115	740	1,690	1,340
570	0,140	0,138	750	1,840	1,350

Примечание: в значениях $D_{\text{задан.}}$ и $D_{\text{свет.}}$ учтено отражение от двух поверхностей склеенного светофильтра.

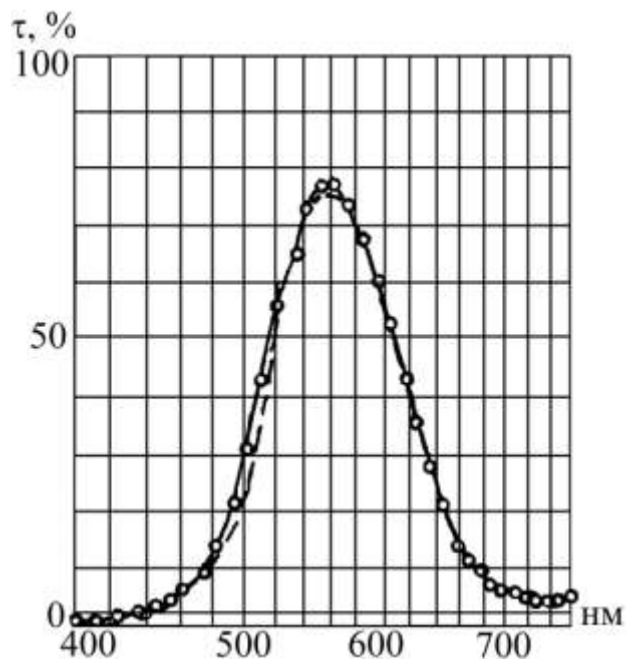


Рис. 2.7. Спектральная кривая пропускания светофильтра, составленного из стекла ЗС8 и ЖЗС18

Цветное оптическое стекло выпускается в заготовках размером (диаметр или длина наибольшей стороны) не более 250 мм, а стекла марок ЖС10–ЖС18, ОС11–ОС24, КС10–КС28 и ИКС970-1 в заготовках размером не более 400 мм.

3. ОРГАНИЧЕСКОЕ (ПОЛИМЕРНОЕ) СТЕКЛО

Полимерные оптические материалы находят широкое применение в различных областях науки и техники. Непрерывно возрастает использование полимеров как заменителей традиционного для оптики силикатного стекла. Ценные физико-механические и оптические свойства полимеров, возможность путем варьирования структуры полимеров получать материалы определенного назначения, а также относительная простота технологии изготовления изделий из них – все это создает перспективу дальнейшего развития оптических полимерных материалов и расширение областей их применения.

Органическое стекло – техническое название полимерных материалов, прозрачных для излучения в видимой области спектра. К числу полимеров, используемых для производства органического стекла, относятся: полиметакрилаты, полиакрилаты, полистирол (ПС), поликарбонаты и другие.

Длительное время понятие «авиационное стекло» и «органическое стекло» были синонимами [7]. Это объясняется тем, что впервые органическое стекло было использовано для остекления летательных аппаратов: для изготовления козырьков, колпаков и других деталей остекления негерметичных кабин самолетов. Повышение скоростей и высоты полетов потребовало создания герметичных кабин, в которых по сечению стекла возникают большие напряжения от избыточного давления внутри кабины, перепады температур и аэродинамических нагрузок, т.е. необходимы были стекла, которые были бы силовым конструкционным материалом. Кроме того, температурный интервал эксплуатации стекол расширился от $\pm 60^{\circ}\text{C}$ до температур от минус 60 до плюс 100°C и выше. Для работы в интервале температур $\pm 60^{\circ}\text{C}$ с середины прошлого века широко применяется пластифицированное полиметилметакрилатное органическое стекло СО-95, а для работы при 100°C и выше потребовались новые более терmostойкие и терmostабильные органические стекла.

3.1. Физико-механические и теплофизические свойства органических стекол

В зависимости от температуры органические стекла, как и другие аморфные полимеры, могут находиться в стеклообразном, высокоэластическом и вязкотекучем состояниях. Температурные

границы основных физических состояний стекол удобно анализировать, используя термомеханические кривые. Известны различные методики получения этих кривых. Для органических стекол наибольшее распространение получил метод измерения деформаций, вызванных периодически действующей нагрузкой, при повышении температуры. По получаемой таким образом зависимости деформаций от температуры (термомеханической кривой) определяют температуры стеклования T_C и текучести T_T . На рис. 3.1 для ряда органических стекол приведены термомеханические кривые. В соответствии с кривой 1 пластифицированного органического стекла СО-95 до точки Б (соответствующей температуре 80°C) стекло находится в твердом (стеклообразном) состоянии. На отрезке Б–В ($90\text{--}105^\circ\text{C}$) деформация (относительное удлинение ε) возрастает, что обусловлено размягчением материала и переходом его в высокоэластическое состояние. При температуре, соответствующей точке Г ($170\text{--}180^\circ\text{C}$), деформация вновь начинает увеличиваться, что соответствует переходу стекла в вязкотекучее состояние.

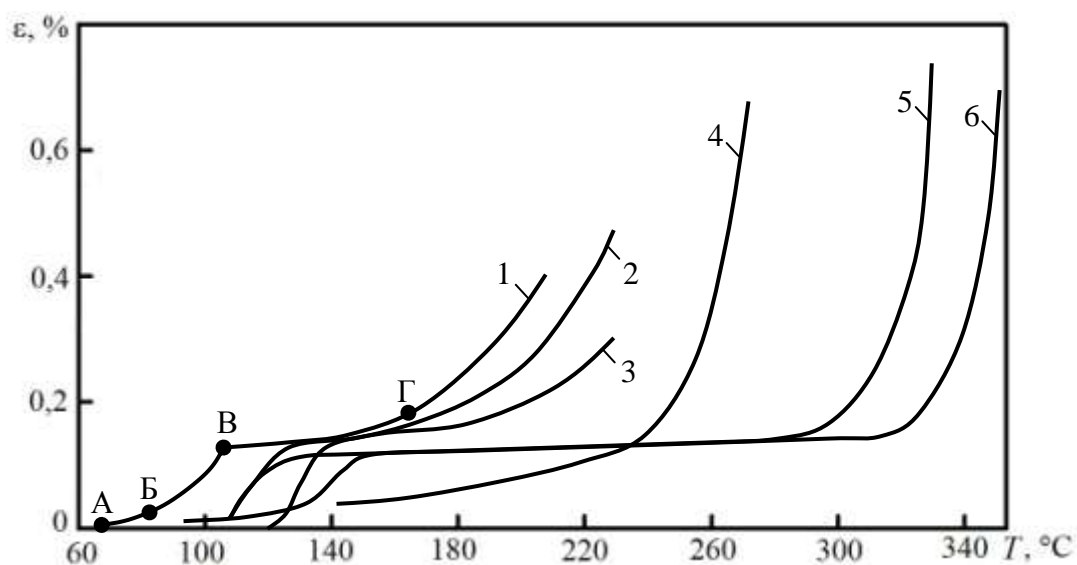


Рис. 3.1. Термомеханические кривые теплостойких (СО-95, СО-120, 2-55, Э-2) и термостабильных (ТСТ-1, Т2-55) органических стекол: 1 – СО-95; 2 – СО-120; 3 – 2-55; 4 – Э-2; 5 – ТСТ-1; 6 – Т2-55

В температурной области, близкой к T_T , для органических стекол характерно развитие деструкционных процессов, сопровождающихся выделением летучих продуктов деструкции. Например, у пластифицированного полиметилметакрилатного (ПММА) органического стекла СО-95 заметное выделение летучих продуктов начинается при 150°C и более высоких температурах. Интенсивность этого процесса резко возрастает в области температур $170\text{--}180^\circ\text{C}$. У

непластифицированного ПММА СО-120 сильное выделение летучих продуктов начинается при 170–185°C, а у термостабилизированных стекол – при 210–230°C. Таким образом, переход органических стекол линейного строения в вязкотекучее состояние сопровождается частичной термодеструкцией, что ограничивает возможности их переработки в этой температурной области. При температурах ниже T_C органические стекла (в отличие от силикатных) при нагружении в определенных условиях способны накапливать большие деформации. Эти деформации, называемые вынужденно-эластическими, являются термически обратимыми.

Использование органических стекол в качестве материала для изготовления силовых элементов остекления требует детального изучения их физико-механических свойств. Основные показатели физико-механических свойств ряда органических стекол представлены в табл. 3.1. Здесь ρ – плотность, кг/м³; T_C – температура стеклования, °C; σ_p – разрушающее напряжение при растяжении, МПа; ε – относительное удлинение при разрыве, %; a – удельная вязкость, кДж/м²; E – модуль упругости при растяжении, МПа; $\sigma_{из}$ – разрушающее напряжение при изгибе, МПа.

Таблица 3.1. Физико-механические свойства органических стекол

Марки	Химическая природа стекла	ρ , кг/м ³	T_C , °C	σ_p , МПа	ε , %	a , кДж/м ²	E , МПа	$\sigma_{из}$, МПа
СО-95	Пластифицированный ПММА	1180	95	77,5	3,5	13	2900	99
СО-120	Непластифицированный ПММА	1200	120	81,5	5	14,5	3050	126,5
2-55	Сополимер ПММА	1200	140	95	3	17,5	3700	136
ТСТ-1	Термостабилизированный ПММА	1200	115	80	3,5	16,5	3300	118
Т2-66	Термостабилизированный сополимер метилметакрилата	1200	133	100	3,5	15	4100	120

Марки	Химическая природа стекла	ρ , кг/м ³	T_c , °C	σ_p , МПа	ε , %	a , кДж/м ²	E , МПа	$\sigma_{из}$, МПа
1-57	Сополимер метилметакрилата	1200	150	100	3,2	16,9	4450	137
Д	Блочный полистирол	1050	100*	42	2	22	2700	95
1Ш-35	Сополимер стирола	–	–	103,5	3	22,5	–	101
АМ-4	Сополимер метилметакрилата	–	–	90	2,5	12,5	4600	129,5
МАМ	То же	–	–	96	3	15	3350	143,5
МС	Сополимер стирола и метилметакрилата	1140	105*	–	1–3	18	2200**	110
МСН	Сополимер стирола с метилметакрилатом и акрилонитрилом	1100	102*	–	1–3	20	2300**	100
СН-25	Сополимер стирола с акрилонитрилом	1040	105*	60	1–2	20	3400**	115
РС-1	Сополимер стирола	–	–	75	2	13,5	3760	108,5
САДп	То же	–	–	114	4	18	4750	121
НБ	Поливинилбутираль	1100	–	28– 59,5	15–25	60– 100	2000– 2200	80– 100
ПЭТФ	Полиэтилентерефталат	1380	–	100– 180	≥50	70–90	290– 380	–

Марки	Химическая природа стекла	ρ , кг/м ³	T_c , °C	σ_p , МПа	ε , %	a , кДж/м ²	E , МПа	$\sigma_{из}$, МПа
ЭС-17	Эпоксидный полимер	–	256*	60	1,8	10,8	3620	–
МАГ-МС-16	Сополимер стирола	–	240*	68,5	2	–	4300	–
ПЦС	То же	–	220	100,5	3,1	–	3700	–
Дифлон	Поликарбонат	1200	150*	60	100	120	2200	100
Э-2	Теплостойкий акрилатный полимер	1200	180	96	5,5	17	3550	–

* теплостойкость по Вика;

** при изгибе.

В отечественной и зарубежной практике получили широкое применение ориентированные органические стекла, полученные методом плоскостного растяжения изотропного материала, переведенного в высокоэластическое состояние. Сопоставление статических свойств стекол, испытанных в сравнимых условиях, убеждают в том, что ориентированные стекла обладают рядом преимуществ по прозрачности, причем с понижением температуры они возрастают.

Обобщенным показателем, характеризующим влияние температуры на физико-механические свойства материала, являются температурные коэффициенты, представляющие собой средние значения изменения различных показателей при изменении температуры на 1°С в различных температурных интервалах. Средние значения изменения разрушающих напряжений при растяжении и изгибе и модуля упругости при растяжении приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Температурные коэффициенты прочностных свойств ПММА органических стекол СО-95, СО-120, 2-55 и 1-57

Интервал температур, °С	σ_p , МПа				$\sigma_{и}$, МПа			
	СО-95	СО-120	2-55	1-57	СО-95	СО-120	2-55	1-57
от -60 до 20	0,51	0,45	0,38	0,08	–	–	–	0,05
20–80	0,93	0,67	0,68	0,60	0,77	0,95	0,67	0,58
80–100	–	1,30	0,79	0,65	–	1,23	1,27	0,55
100–120	–	–	0,95	0,70	–	–	1,75	1,30

Таблица 3.2 (продолжение)

Интервал температур, °С	E , МПа			
	СО-95	СО-120	2-55	1-57
от -60 до 20	32,5	–	–	–
20–30	25,0	17,25	27,2	25,7
80–100	–	44,25	24,0	25,5
100–120	–	–	48,0	24,0

Для оценки надежности деталей остекления необходимы данные о поведении стекол в условиях многократного воздействия напряжений, для чего проводят испытания на статистическую выносливость, характеризующую работоспособность материала в условиях действия высоких переменных напряжений, составляющих $0,9-0,4\sigma_p$, низкой частоты (≈ 10 циклов/мин). Наряду со средним значением статистической выносливости определяют максимальные значения при условии, что коэффициент доверия и вероятность равны и составляют в одном случае 0,9, а в другом – 0,95. На рис. 3.2 приведены типичные данные о статической выносливости пластифицированного органического стекла СО-95 при $T=20^\circ\text{C}$, а в табл. 3.3 – средние значения статистической выносливости при испытании ряда материалов в интервале температур от минус 60 до плюс 80°С. При понижении температуры статистическая выносливость всех стекол возрастает. Испытания при повышенных температурах показывают, что для стекол СО-95, СО-120, 2-55 (Т2-55) предельные рабочие температуры должны составлять 60, 80 и 100°С соответственно.

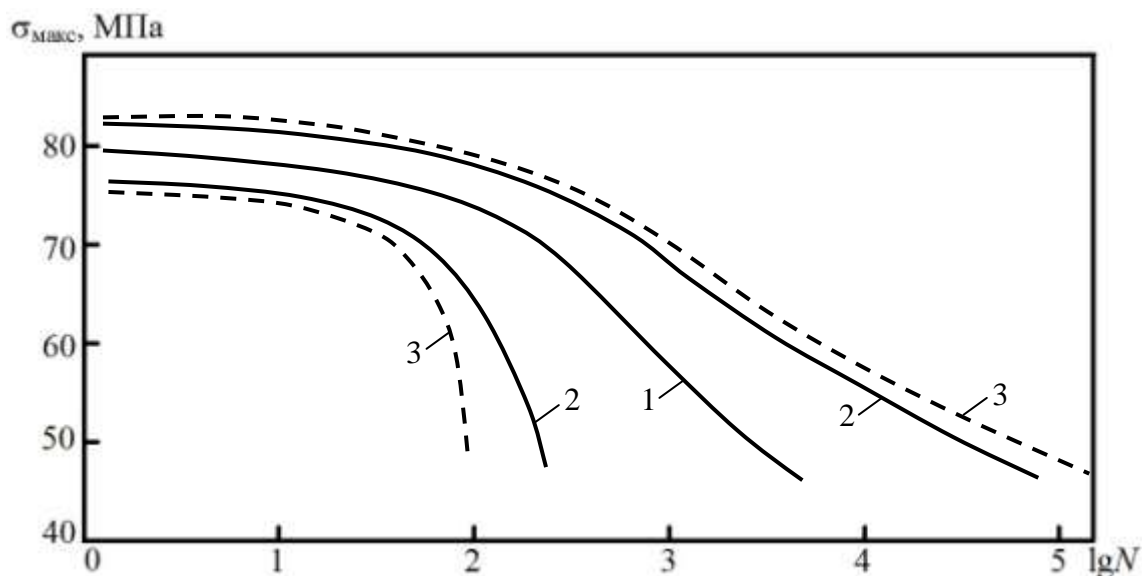


Рис. 3.2. Статистическая выносливость органического стекла СО-95 толщиной 10 мм при 20°С и $\sigma_p=76$ МПа (коэффициент асимметрии цикла 0,1, частота 10 циклов/мин): 1 – среднее значение долговечности; 2 – предельное значение долговечности с вероятностью 0,9; 3 – предельное значение долговечности с вероятностью 0,95

Таблица 3.3. Средние значения статической выносливости органических стекол ($\lg N$ – число циклов до разрушения)

Марка стекла	Температура испытаний, °С	σ , МПа				
		40	50	60	70	80
СО-95	-60	–	3,2*	3,0	2,8	2,3
	20	3,7	3,2	2,6	1,75	–
	60	0,2	–	–	–	–
СО-120	-60	–	3,5*	–	–	–
	20	3,85	3,35	2,75	2,35	–
	60	2,25	–	–	–	–
2-55	20	–	3,8	3,45	2,9	2,4
неориентированное	80	2,6	1,0	–	–	–
ориентированное ($\epsilon=40\%$)	20	–	4,6*	4,0	3,6	3,35
Т2-55						
неориентированное	20	–	3,4	3,1	2,65	2,25
ориентированное ($\epsilon=60\%$)	20	–	–	4,2	3,65	3,3

* значения получены экстраполяцией.

Органические стекла при переработке и эксплуатации подвергаются действию высоких температур, в ряде случаев превышающих температуры их стеклования. Поэтому важной характеристикой является температура, ниже которой они могут

работать при заданном силовом воздействии в течение требуемого времени. Эта характеристика, которую называют теплостойкостью, определяется температурами стеклования, термомеханическими свойствами, термостабильностью, тепло- и температуропроводностью, теплоемкостью и термическим коэффициентом линейного расширения – основными показателями теплофизических свойств. Данные о температурах стеклования и пределах термостабильности органических стекол различных марок приведены на рис. 3.3. Предельная температура термостабильности определяется температурой начала деструкционного процесса в стекле.

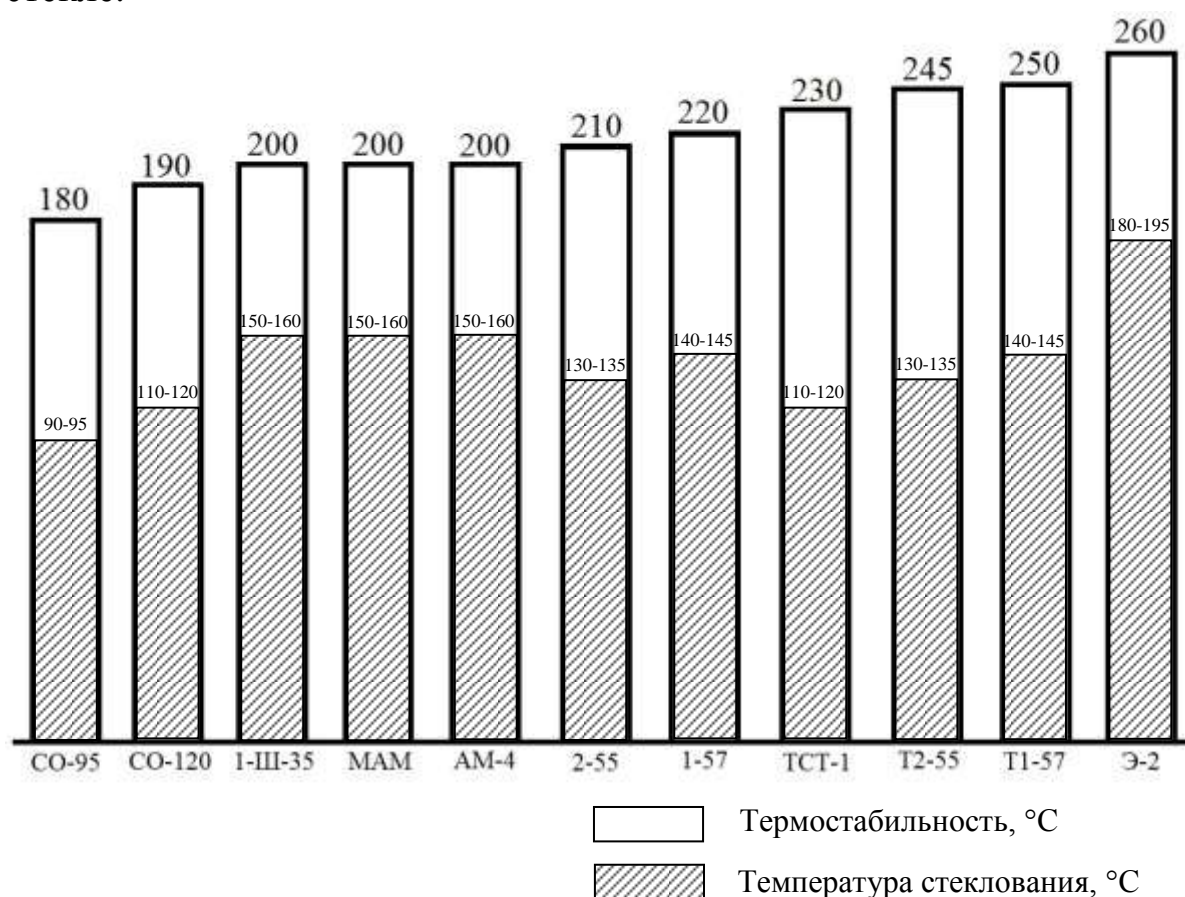


Рис. 3.3. Температуры стеклования и пределов термостабильности органических стекол

Основные показатели теплофизических свойств органических стекол различных марок приведены в табл. 3.4 и табл. 3.5. Из этих данных следует, что все органические стекла являются хорошими теплоизолирующими материалами, что очень важно для авиастроения и, в частности, для поддержания в кабине летательного аппарата физиологически оптимальной для человека температуры.

Таблица 3.4. Теплофизические свойства органических стекол

Марка стекла	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/(м·К)				Температуропроводность ×10 ⁻⁴ , м ² /с			
		20°C	50°C	100°C	120°C	20°C	50°C	100°C	120°C
СО-95	1206	0,183	0,190	0,202	0,206	12,10	10,60	8,61	8,12
СО-120	1100	0,181	0,186	0,192	0,195	8,81	8,11	7,21	6,95
	1189	0,169	0,174	0,180	0,183	10,85	10,10	8,99	8,69
2-55	1200	0,186	0,192	0,206	0,211	9,25	8,73	8,06	7,82
	1180	0,174	0,182	0,194	0,199	9,95	9,37	8,61	8,40
Т2-55	1204	0,180	0,190	0,209	0,217	9,63	9,10	8,14	7,93

Таблица 3.4 (продолжение)

Марка стекла	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость×10 ⁻³ , Дж/(кг·К)			
		20°C	50°C	100°C	120°C
СО-95	1206	1,26	1,49	1,94	2,12
СО-120	1100	1,73	1,93	2,25	2,36
	1189	1,42	1,57	1,82	1,92
2-55	1200	1,69	1,84	2,14	2,26
	1180	1,48	1,66	1,91	2,02
Т2-55	1204	1,57	1,76	2,14	2,28

Таблица 3.5. Термические коэффициенты линейного расширения органических стекол

Марка стекла	$\alpha \cdot 10^6$, 1/°C								
	-40°C	-20°C	0°C	20°C	40°C	60°C	80°C	100°C	120°C
СО-95	64	63	66	71	86	96	125	–	–
СО-120	–	–	–	77	82	86	90	111	–
2-55	40	40	60	69	73	83	84	118	–
Э-2	–	–	–	56	73	83,4	87,6	87	93,8
ТСТ-1	–	–	–	79,5	81,6	83,3	100,4	100,4	100,4
Т2-55	–	–	–	75,6	75,6	75,6	75,6	94,5	98,7

Такие полимеры, как полиметакрилаты, полиакрилаты, ПС, поликарбонаты и другие, имеют линейное строение молекул и поэтому термопластичны, т.е. способны при нагревании переходить в вязкотекучее состояние. В отличие от них полимеры на основе диэтиленгликольбис-аллилкарбоната (ДЭГБАК) обладают пространственным (сетчатым) строением, принадлежат к термореактивным полимерам и не могут перерабатываться литьем под давлением.

Мономерный ДЭГБАК впервые был получен в 1945–1946 годах в США.

ДЭГБАК представляет собой органический сложный эфир в виде бесцветной маслянистой жидкости, характеризующейся низкой летучестью, способной полимеризоваться с образованием неплавкого и нерастворимого полимера [8]. На первой стадии полимеризации ДЭГБАК получают растворимый форполимер, который при дальнейшей полимеризации переходит в полимер пространственно сетчатой структуры. Полимеризацией ДЭГБАК в формах, заполняемых свободной заливкой, можно изготовить изделия разнообразной формы: линзы, пластинки, листы, стержни и другие.

Полимеры и сополимеры на основе ДЭГБАК обладают ценными оптическими свойствами, отличной абразивостойкостью, термостабильностью, высокой ударопрочностью, химической и радиационной стойкостью.

Сополимеризацией ДЭГБАК с метилметакрилатом, акриловой или метакриловой кислотой получены материалы с улучшенными оптическими и механическими свойствами, а сополимеризацией с триаллилизотиоциануратом и трибромфенилакрилатом или с продуктами взаимодействия трио-N-(2-оксиэтил)изоцианурата с аллиловым или металлиловым эфиром хлормуравьиной кислоты – высокопрозрачные теплостойкие и ударопрочные материалы.

При сополимеризации ДЭГБАК с солями моноэфиров итаконовой кислоты получают материалы с показателем преломления более 1,50 и светопропусканием порядка 92%, а при сополимеризации с различным количеством диаллилтерефталата (мономер АW-15) – оптические полимеры с любым показателем преломления в интервале 1,500–1,576.

3.2. Оптические свойства прозрачных полимеров

Оптические свойства органического стекла характеризуются коэффициентом пропускания света в видимой области спектра, спектральными кривыми коэффициента пропускания τ_λ , где τ_λ – коэффициент пропускания стекла толщиной t (мм) для монохроматического света длиной волны λ , светостойкостью, светорассеянием, показателем преломления, оптическим коэффициентом напряжения и оптическими искажениями. Одни из перечисленных показателей определяются только составом стекла (например, показатель преломления), а другие – как составом, так и геометрической формой рабочих поверхностей материала (например, оптические искажения).

Светостойкость определяется снижением коэффициента пропускания света стеклом под действием УФ-излучения.

Светорассеяние в полимерах обусловлено, как и в неорганических стеклах, флуктуациями плотности. Причиной рассеяния могут быть также механические загрязнения, флуктуации состава (например, если используют не гомо-, а сополимеры). Существенное различие полимерных и неорганических стекол заключается в масштабах неоднородностей. Если в неорганических стеклах размеры неоднородностей (точнее, радиус корреляции) составляет единицы или десятки нанометров, т.е. $r \ll \frac{\lambda}{2}$, то в органических стеклах ПММА масштаб неоднородностей составляет 10^2 – 10^3 нм, т.е. $r \gg \lambda$. Соответственно индикатриса рассеяния в первом случае близка к круговой, а во втором – резко ассиметрична таким образом, что рассеяние направлено преимущественно в направлении падающего луча. Та часть рассеянного света, которая попадает на плоскость изображения, создает фон, уменьшающий контраст изображения.

Оптический коэффициент напряжения характеризует эффект возникновения двойного лучепреломления при одноосном растяжении или сжатии образца стекла.

Оптические искажения листового или профилированного стекла, предназначенного для различного рода защитных окон, через которые ведется наблюдение, характеризуются углом отклонения проходящих лучей, формирующих изображение. Угол отклонения – это угол между световым лучом, прошедшим через пластину, и падающим лучом. Вполне очевидно, что отклонение направления прошедших лучей от направления падающих приводит к искажениям (дисторсии) изображения и к его расфокусировке.

Коэффициент пропускания излучения в видимой области спектра для всех промышленных органических стекол (пластифицированный и непластифицированный ПММА, сополимер метилметакрилата, термостабилизированный сополимер метилметакрилата, полиакрилат повышенной теплостойкости, поликарбонат (ПК) и другие) находится в пределах 85–92%. Спектральные характеристики пропускания бесцветного ПММА приведены на рис. 3.4. Для этого материала можно добиться практически идеального светопропускания (92%) в области длин волн от 360 до 2000 нм.

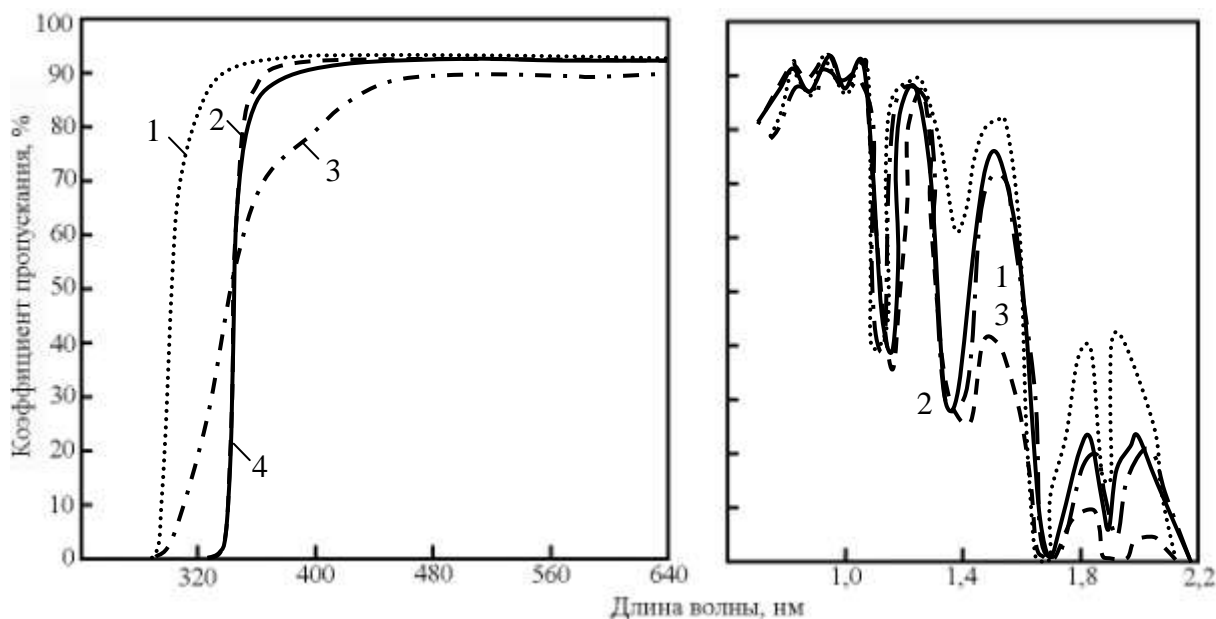


Рис. 3.4. Спектральный коэффициент пропускания органических стекол:
 1 – СО-95; 2 – СО-120; 3 – 2-55; 4 – Э-2

По показателям прозрачности для видимого света все органические стекла можно разделить на прозрачные в блоке и прозрачные только в пленках. Стекла обоих типов хорошо поддаются глубокому и долговечному внутреннему окрашиванию. Наличие большого числа органических красителей, которые вводят в органическое стекло (в ПММА), позволяет изготавливать из него светофильтры для выделения излучения отдельных участков спектра в диапазоне волн от 400 до 750 нм практически неограниченной цветовой гаммы. В настоящее время известно более ста рецептов светофильтров синего, зеленого, желтого, оранжевого, красного и других цветов, выпускаемых в виде листов толщиной от 1 до 16 мм. Светофильтры из органического стекла можно разделить на поглощающие излучение коротковолновой части спектра, на выделяющие излучение отдельных участков спектра и нейтральные светофильтры. Кривые спектрального пропускания некоторых светофильтров из ПММА приведены на рис. 3.5. Пропускание света некоторыми красителями резко меняется с длиной волны, что позволяет использовать их в монохроматорах.

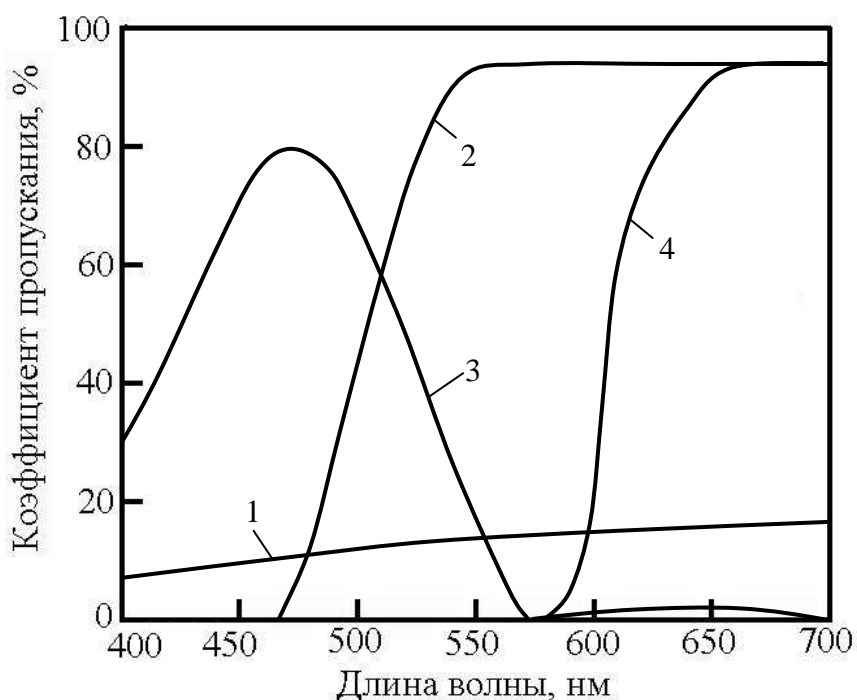


Рис. 3.5. Спектральные коэффициенты пропускания окрашенных органических стекол: 1 – дымчато-серое; 2 – желтое; 3 – голубое; 4 – красное

Технология изготовления окрашенного органического стекла аналогична технологии получения бесцветного органического стекла. К красителям, применяемым для изготовления светофильтров из органического стекла, предъявляются следующие требования: хорошая растворимость в метилметакрилате; стойкость к действию инициаторов полимеризации и повышенных температур (120–130°C); свето- и атмосферостойкость; высокая дисперсность. Наибольшее применение при изготовлении окрашенного ПММА находят жирорастворимые, в меньшей мере – дисперсные и спирторастворимые органические красители. Ассортимент органических красителей, пригодных для окраски органического стекла, включен в каталог органических синтетических красителей.

Полимеры, не содержащие в макромолекуле кратных связей, прозрачны в видимой и УФ-областях спектра. При использовании ПММА для остекления пассажирских самолетов и других летательных аппаратов в органические стекла вводят вещества, поглощающие УФ-лучи, что, как показано на рис. 3.6, изменяет характеристики пропускания стекла. Излучение в интервале длин волн от 290 до 330 нм неблагоприятно влияет на глаза и кожу человека. Полимеры, содержащие хромофорные группы (карбонильную, карбоксильную, нитрильную и др.) поглощают в УФ-

области спектра. Длина волны, при которой происходит поглощение, зависит от типа хромофора.

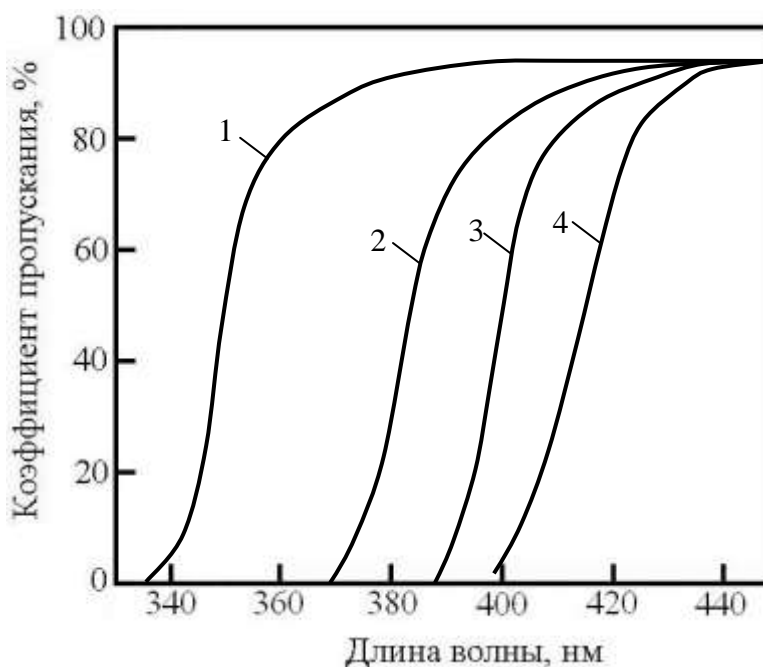


Рис. 3.6. Спектральные коэффициенты пропускания: 1– промышленного ПММА, 2–4 – ПММА с покрытиями, поглощающими УФ-лучи

В ИК-области спектра полимеры обладают поглощением. В ближней и средней ИК-областях (0,76–25,0 мкм) проявляются внутримолекулярные колебания (валентные и деформационные). Поглощение в ближней ИК- и видимой областях спектра, в которую не попадают основные колебания, связано с обертонами и составными частотами. Интенсивность поглощения обертоновых частот колебаний значительно ниже интенсивности основного тона и с увеличением номера обертона падает. Поэтому потери света, связанные с собственным поглощением полимерами в ближней ИК-области, оказываются существенными при использовании образцов большой толщины. При использовании полимеров в волоконных световодах следует учитывать поглощение и в видимой области, связанное с обертонами более высоких порядков.

Наиболее прозрачными для ИК-излучения являются полиолефины. Основное поглощение полиэтилена наблюдается при λ , равном 3,4; 6,9; 13,8 мкм. Другие полиолефины – полиизобутилен и поли-4метилпентен-1 в области спектра от 4 до 6,5 мкм так же, как и полиэтилен, имеют окно прозрачности. К числу полимеров, наиболее прозрачных в длинноволновой ИК-области спектра (25–1000 мкм), относятся полиэтилен и поли-4метилпентен-1.

Данные о спектральном пропускании в УФ-, видимой и ИК-областях спектра промышленных органических стекол представлены в табл. 3.6.

Таблица 3.6. Интегральное и спектральное светопропускание органических стекол

Марка стекла	Коэффициент светопропускания, %	Спектральный коэффициент пропускания, %										
		УФ-область						видимая область				
		при λ , нм										
		300	320	340	360	380	400	750	800	1000	1200	1400
СО-95	90–92	11	53	76	86	88	89	92	90	90	61	60
СО-120	90–92	0	0	11	85	89	90	90	92	92	90	60
ТСТ-1	90–91	0	0	8	32	58	71	89	89	89	87	60
2-55	90–92	0	0	0	67	85	88	90	88	88	82	50
Т2-55	90–92	0	0	0	45	74	80	90	89	90	80	60
Э-2	90–92	1	24	43	58	72	80	90	88	88	87	76

Таблица 3.6 (продолжение)

Марка стекла	Коэффициент светопропускания, %	Спектральный коэффициент пропускания, %							
		ИК-область							
		при λ , нм							
		1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
СО-95	90–92	70	45	49	7	0	2	12	0
СО-120	90–92	69	42	49	5	1	8	20	0
ТСТ-1	90–91	71	47	46	8	2	3	10	1
2-55	90–92	49	25	20	2	0	3	9	0
Т2-55	90–92	49	33	21	3	3	4	9	2
Э-2	90–92	66	60	62	11	0	3	11	2

В качестве оптических сред в основном используются органические светопрозрачные аморфные линейные и сшитые полимеры, а также сополимеры, находящиеся в стеклообразном состоянии. Наиболее важные оптические свойства полимеров – показатель преломления и светопоглощение – определяются их химическим составом и, кроме того, зависят от возможной надмолекулярной организации полимера, которая формируется в зависимости от условий его получения и переработки.

Электронно-микроскопические исследования показали, что блочный ПММА состоит из доменов размером 1–10 мкм с явно выраженным центром и фибриллоподобными образованиями. При полимеризации в форме происходит ориентация доменов, влияющая на оптические свойства полимера. Коэффициент светопоглощения в

блоке ПММА зависит от направления и во взаимно перпендикулярных направлениях может быть равен 0,03–0,05 и 0,01 см⁻¹ соответственно. В ПС и ПК также наблюдались надмолекулярные образования в виде глобул, фибрилл и сферолитов [9].

Показатель преломления часто играет решающую роль при выборе оптического материала и представляет собой одну из основополагающих величин при расчете оптических систем. Он зависит от длины волны света, температуры и давления. Его величина обусловлена химической структурой материала.

Молекулярная рефракция органической молекулы приблизительно равна сумме рефракций составляющих ее атомов (аддитивность молекулярной рефракции). Свойство аддитивности рефракции может быть использовано при создании полимерных оптических материалов с требуемыми значениями показателя преломления. Это достигается путем сополимеризации двух мономеров. Показатель преломления сополимеров в целом изменяется линейно в зависимости от химического состава [10].

С целью увеличения показателя преломления полимеров последние синтезируют на основе мономеров, в молекулу которых входят ароматические кольца, галогены (кроме фтора). Высокий показатель преломления имеют полимеры, содержащие ионы тяжелых металлов (олово, лантан, барий). Синтезированы полимеры, в молекулах которых одновременно присутствуют ароматические кольца и ионы тяжелых металлов. Уменьшение показателя преломления достигается введением фтора в молекулу мономера. Самые низкие показатели преломления ($n_D \leq 1,4$) имеют фторированные полимеры.

Из формулы Лорентц–Лоренца следует, что показатели преломления органических полимеров должны располагаться в относительно узком интервале. Действительно, величины показателей преломления известных полимеров лежат в пределах от 1,36 до 1,7. Показатели преломления полимеров в основном определяются показателями преломления мономеров, на основе которых они получены. Точность, с которой может быть выдержан показатель преломления полимеров, составляет $\pm(0,5-1,0) \cdot 10^{-3}$. Для специальных оптических полимеров она может достигать $\pm 1,0 \cdot 10^{-4}$. Однако получение оптических полимеров с таким отклонением показателя преломления требует использования исключительно чистых

мономеров, тщательной разработки и соблюдения технологического режима полимеризации.

У большинства органических полимеров показатель преломления уменьшается линейно в зависимости от температуры. Изменение показателя преломления полимеров с изменением температуры обычно составляет $(1,0-2,0) \cdot 10^{-4}$ на 1°C , т.е. на порядок больше, чем у силикатного стекла, что является существенным недостатком полимеров как оптической среды.

Показатель преломления стеклообразных полимеров, подобно показателю преломления неорганических стекол плавно снижается по мере увеличения длины волны света. Увеличение дисперсии в сторону коротких длин волн связано с собственным поглощением материалом излучения УФ-области спектра.

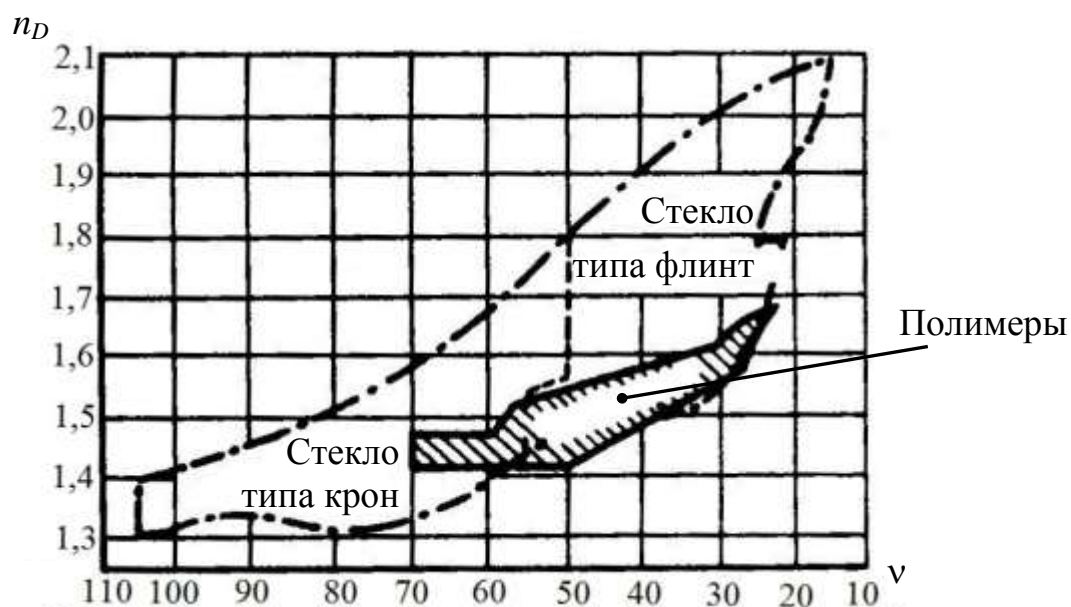


Рис. 3.7. Диаграмма Аббе

Параметрами, определяющими выбор оптического материала в процессе проектирования оптических систем, являются показатель преломления n_λ и коэффициент дисперсии v . В системе координат v, n_λ каждому материалу соответствует точка. Множество известных оптических материалов определяет множество точек. Такое представление параметров оптических материалов получило название диаграммы Аббе. На диаграмме, показанной на рис. 3.7, обозначены границы множества точек, принадлежащих неорганическим стеклам и прозрачным полимерам. Несмотря на то, что на диаграмме приведены данные более чем для сотни полимеров различного химического строения, они занимают малую площадь по сравнению с площадью, занимаемой параметрами неорганических стекол. Среди

органических стекол нет стекла, оптические постоянные n_D и ν которого были бы равны оптическим постоянным типичного бариевого крона или тяжелого флинта. И, тем не менее, существуют такие полимеры, как ПММА и ПС, которые по своим оптическим постоянным соответствуют кронам и флинтам.

Как уже отмечалось, путем сополимеризации соответствующих мономеров можно получить оптический полимер с требуемыми значениями оптических постоянных. Это представляется важным, так как разработчик оптической системы (оптик-конструктор) при расчете оптических систем для коррекции остаточных aberrаций изображения должен иметь возможность выбора полимерных материалов с различными оптическими постоянными.

Из большого числа органических стекол, прозрачных в видимой и ближней ИК-области спектра, лишь немногие используются для изготовления оптических деталей. Чаще всего применяются ПММА, ПС и его сополимеры с метилметакрилатом или акрилонитрилом, ПК, а также полидиэтиленгликольбис-аллилкарбонат (ПДЭГБАК).

В конце прошлого века в США и Японии появились оптические полимеры на основе дициклопентадиена (торговые марки Zeonex (1990 г.), Zeonor (1998 г.), Toray), которые пока имеют ограниченное применение по сравнению, например, с ПММА [11].

Оптические характеристики названных полимеров приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7. Оптические свойства органических стекол

Стекло	Показатель преломления			$-\frac{\partial n}{\partial T}, 10^5/^\circ\text{C}$	Коэффициент дисперсии	Светопропускание в видимой области, %
	n_D	n_C	n_F			
Полиметилметакрилат	1,491	1,488	1,496	8,5–9,0	57,8	82–92 (5 мм)
Полистирол	1,590	1,585	1,604	12,0	30,8	85–90 (2 мм)
Поликарбонат	1,586	1,581	1,598	11,8–14,3	30,3	86 (3 мм)
Сополимер стирола с метилметакрилатом	1,579	1,574	1,592	–	32,2	90 (3 мм)
Сополимер стирола с акрилонитрилом	1,567	1,563	1,578	–	36,0	88 (3 мм)
Полиэтиленгликольбисаллилкарбонат	1,504	1,501	1,510	14,0–14,5	54,3	89–92 (6 мм)
Zeonex	1,530	–	–	–	55,0	92

3.3. Способы изготовления деталей из оптических полимеров

Технологические и эксплуатационные свойства некоторых органических стекол приведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8. Технологические и эксплуатационные свойства органических стекол

Полимер	Плотность, г/см ³	Коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁵ /град	Модуль упругости, 10 ⁴ кг/см ²	Коэффициент теплопроводности, ккал/м·ч·град	Удельная теплоемкость, кал/г·град	Способы изготовления деталей	Максимальная температура эксплуатации деталей, °С
ПММА	1,18–1,20	6,3–7,7	2,9–3,2	0,16–0,18	0,35	Литье под давлением, прессование, шлифование и полирование	60–105
ПС	1,05–1,10	6,3–9,0	2,7–3,1	0,08–0,12	0,30–0,32	Литье под давлением	60–82
ПК	1,17–1,24	6,0–7,0	2,2–2,5	0,17	0,28	Литье под давлением, прессование	121–140
СН	1,04–1,27	7,0–9,5	2,6–3,4	–	–	Литье под давлением	60–96
П4МП1	0,83	11,7	–	0,16	0,52	Литье под давлением, шлифование и полирование	–
ПДЭГБАК	1,32	9,0–11,4	2,0–2,1	0,18	0,55	Полимеризация в форме	60–100

Для изготовления оптических деталей наиболее широко применяют ПММА. Он превосходит другие светопрозрачные полимеры по светопропусканию и атмосферостойкости, обладает высокими механическими показателями, низкой плотностью, легкой перерабатываемостью. По оптическим характеристикам ПММА соответствует кроновым стеклам.

Полиметилметакрилат получают радикальной полимеризацией метилметакрилата – бесцветной прозрачной жидкости с показателем

преломления $n_D^{20} = 1,4146$ при $T=20^\circ\text{C}$. Из листового оптического органического стекла прессованием получают оптические детали (например, линзы Френеля). Его можно подвергать всем видам механической обработки. Для изготовления оптических изделий рекомендуется использовать оргстекла марок СО-120 и СТ-1 (табл. 3.9) на основе непластифицированного полиметилметакрилата с добавкой фенилсалицилата для поглощения УФ-излучения. Температура размягчения не менее 120°C для марки СО-120 и $108\text{--}110^\circ\text{C}$ для СТ-1. Эти материалы выпускаются в виде листов толщиной от 2,5 до 50 мм. Оптическая однородность оргстекло СО-120 и СТ-1 соответствует 3-й–5-й категориям по [12] и зависит от места измерения в листе (блоке).

Таблица 3.9. Свойства органических стекол марок СО-120 и СТ-1

Показатель	СО-120	СТ-1
Показатель преломления	1,4907	1,4905
Коэффициент светопропускания, %	90–92	90–91
Спектральный коэффициент пропускания, %, при длине волны, нм:		
320	0	0
340	11	8
360	85	32
400	90	71
750	90	89
1000	92	89
1200	90	87
1400	60	60
1600	69	71
1800	42	46
2000	49	46
2200	5	8
Оптический коэффициент напряжения	2	–
Содержание остаточного мономера, %, не более	1	1
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа, не менее	78	78
Модуль упругости при растяжении, МПа, не менее	2900	2900
Ударная вязкость, кДж/м ² , не менее	16	15

Промышленностью выпускается суспензионный гранулированный полиметилметакрилат марки «Дакрил» оптического назначения, который перерабатывается в оптические детали литьем под давлением.

Литье под давлением – самый высокопроизводительный метод изготовления оптических деталей. Деталь отливается примерно за три минуты. Полимер в виде гранул загружается в бункер литьевой машины, нагревается выше температуры текучести и впрыскивается в нагретую форму. После заполнения формы может производиться сближение ее половин (подпрессовка), которое, однако, не всегда приводит к повышению точности отливок. Формы с оптическими поверхностями изготавливаются из специальных сортов стали и обычно бывают многогнездными. Из-за усадки отлитая деталь имеет некоторое отступление от формы. Можно воспользоваться рекомендованными методами расчета поправок для радиусов кривизны поверхностей формы [13]. Однако лучшие результаты дает отливка контрольной партии линз с последующей корректировкой формы.

Режим техпроцесса сильно влияет на качество деталей. При переработке ПММА рекомендуется температура 150–240°C в зависимости от марки и партии материала, а также от размеров и конфигурации отливаемых деталей, давление 1500–2000 кг/см² и температура формы 50–92°C. Вследствие ориентации макромолекул в направлении потока детали обладают значительным двойным лучепреломлением. Оптическая разность хода лучей достигает 20–200 нм/см. Напряжения в деталях ПММА уменьшаются длительным отжигом при 80°C.

Основным недостатком ПММА как оптического материала является значительная краевая неоднородность (градиент показателя преломления), объяснимая испарением остаточного мономера и поглощением влаги.

ПС по оптическим характеристикам соответствует флинтovým стеклам. Его получают радикальной полимеризацией стирола – бесцветной прозрачной жидкости со своеобразным запахом и показателем преломления $n_D^{20} = 1,5468$. Существенным недостатком ПС является его малая атмосферостойкость. Под действием прямого солнечного света, влаги и тепла наблюдается сильное пожелтение полимера, уменьшается его прозрачность, снижаются механические характеристики.

Промышленностью выпускаются сополимеры стирола с метилметакрилатом (МС-0) и показателем преломления, равным 1,51–1,57. Сополимеры стирола с акрилонитрилом (САН) обладают повышенными тепло- и атмосферостойкостью, механической прочностью. САН обладают более высокой, чем у ПС, дисперсией,

что облегчает исправление хроматических aberrаций в полимерных объективах.

ПС отливается при 170–230°C и отжигается при 70–78°C.

Недостатком ПММА, ПС и их сополимеров являются низкие теплостойкость и ударопрочность. Значительно лучше эти характеристики у ПК; интервал рабочих температур ПК составляет от минус 120 до плюс (130–140)°C.

ПК представляют собой линейные полиэфиры угольной кислоты. ПК сохраняют стабильность в расплавленном состоянии при температурах до 300°C в течение многих часов и выдерживают кратковременное нагревание до 320°C. При нагревании выше 330°C начинается деструкция ПК, сопровождающаяся изменением цвета полимера и выделением диоксида углерода. Так как небольшое количество воды в расплаве вызывает разложение полимера, то необходима сушка (при температуре не выше 130°C) ПК до тех пор, пока содержание влаги в нем будет менее 0,01%. Переработку ПК из расплава можно осуществлять в интервале температур 240–300°C. Вязкость расплава ПК в этом интервале температур высока по сравнению с вязкостью расплавов ПС и ПММА. Отжиг ПК осуществляют при температуре 120–135°C. Качество оптических изделий, полученных из ПК литьем под давлением, зависит от строгого соблюдения технологического режима его переработки.

Циклические олефиновые полимеры и сополимеры на основе дициклопентадиена (торговые марки Zeonex, Zeonor, Topas) – семейство полимерных оптических материалов, имеющих пониженное двулучепреломление. Изменение структуры заместителей в структурной формуле полимеров и сополимеров позволяет в широких пределах влиять на физико-механические свойства материалов. Эти полимеры характеризуются также высокой текучестью расплава и низким (менее 0,01%) водопоглощением, что делает их пригодными для переработки высокоточным литьем под давлением, экструзией и выдуванием. Материалы используются для изготовления призм, линз, дисков, волноводов, а также для медицинской оптики. Некоторые свойства полимеров Zeonor приведены в табл. 3.10.

Таблица 3.10. Некоторые физико-механические характеристики различных марок полимера Zeonor

Свойство	Zeonor 1020R	Zeonor 1060R	Zeonor 1420 R	Zeonor 1600 R
Плотность, г/см ³	1,01	1,01	1,01	1,01
Водопоглощение, %	Менее 0,01	Менее 0,01	Менее 0,01	Менее 0,01
Пропускание в видимой области, %	92	92	92	92
Показатель преломления	1,53	1,53	1,53	1,53
Термостойкость, °С	101	99	136	161
Модуль упругости, МПа	2100	2100	2100	2100
Разрушающее напряжение, МПа	53	53	61	73
Удлинение при разрыве, %	100	70	20	10
Упругая деформация, МПа	80	76	94	119
Влагоустойчивость, г/см ² за 24 ч	0,23	0,23	0,29	0,26

Для изготовления деталей больших размеров из-за недостаточной мощности литьевых машин и образования утяжин на отлитых деталях метод литья под давлением не применяют. Детали размером более 100 мм часто более целесообразно изготавливать прессованием. Заготовка нагревается выше температуры размягчения полимера и сжимается между матрицей и пуансоном. ПММА обычно прессуют при 105–130°С и давлении 300 кг/см². После этого деталь охлаждают вместе с формой, в результате чего прессование менее производительно, чем литье под давлением. Изготовление прессформ весьма трудоемко, но в каждой форме можно получить 5–6 тысяч деталей.

Прессованием изготавливают растры и фильтры из полиэтилена. На основе частично дегидрогалогенизованных поливинилхлорида (ПВХ), поливинилбромида и поливинилденхлорида, а также полиэтилентерефталата (ПЭТФ) можно изготовить поляризующие свет пленки и листы. Прессованием можно изготовить из ПЭТФ поляризующие свет детали. Фотохромные материалы изготавливаются на основе сополимера винилхлорида с винилацетатом и других полимеров, содержащих производные ртути, титана, кобальта, полиароматические вещества, такие как хризен и коронен, соединения типа $\text{MX}_m\text{O}_n(\text{OR})_p$, где $\text{M}=\text{Ti, Zr, W, Hf, Ta, Cr, V, Nb}$, а X – галоид. Прессованием изготавливают диски из фотохромного полимера на основе ПММА. По чистоте поверхности детали, изготовленные прессованием, значительно уступают отлитым под

давлением. Поэтому иногда перед прессованием заготовки деталей шлифуют и полируют.

Полимеризация в форме с оптическими поверхностями обеспечивает более высокую точность, чем литье под давлением, при столь же высокой чистоте поверхностей, но она редко применяется для изготовления оптических деталей из ПММА из-за низкой производительности этого метода. Полимеризацией метилметакрилата с растворенными в нем красителями можно получить фильтры для излучения в видимой и ближней ИК-областях спектра.

Известными полимерными оптическими материалами являются полимеры и сополимеры на основе ДЭГБАК, который представляет собой органический сложный эфир. ДЭГБАК – бесцветная маслянистая жидкость, характеризующаяся низкой летучестью, с показателем преломления $n_D^{20} = 1,503$. Поскольку в молекуле имеются две активные аллильные группы, при полимеризации этого соединения образуется трехмерная сетка, в результате чего полимер является термореактивным. Полимеризацией ДЭГБАК в формах, заполняемых свободной заливкой, можно изготавливать различные изделия: линзы, пластины, листы, стержни и другие.

Формы для полимеризации обычно делают из стекла или металла, известны патенты на формы из низкомолекулярного полиэтилена или из смеси его с воском, отливаемые по стеклянной мастер-модели, из полиолефинов или полифторуглеводородов, из ПДЭГБАК, эпоксидных и полиэфирных полимеров. Так как при полимеризации происходит значительная усадка объема (для ПДЭГБАК – 12–15%), между половинами формы помещают эластичные прокладки, например, из полиэтилена или из смеси его с полиизобутиленом. Вращением сосуда с полимеризующейся смесью получают параболоидальные зеркала из эпоксидных полимеров и линзы из гелей.

Полимеры и сополимеры ДЭГБАК обладают высокой термостабильностью, химической и радиационной стойкостью. Основным достоинством этого полимера является высокая абразивостойкость, которая в четыре-пять раз превышает абразивостойкость органического стекла на основе ПММА. Основные свойства оптических полимеров приведены в табл. 3.11.

Таблица 3.11. Физико-механические и эксплуатационные свойства оптических полимерных материалов

Показатель	ПММА	ПС	САН	МСО-20	ПК	ДЭГБАК
Плотность, г/см ³	1,18–1,19	1,05–1,10	1,04–1,27	1,14	1,20	1,32
Разрушающее напряжение, МПа: при растяжении при сжатии	70–80 100–120	40–50 80–110	60–70 105–110	50–60 110–120	55–65 75–85	35–42 –
Модуль упругости, МПа	2900	2800	2600	–	2000	2100
Ударная вязкость, кДж/м ²	13–18	16	20	16	20	18–20
Твердость: по шкале Мооса по Роквеллу	2–3 –	2 –	2–3 –	2–3 –	2–3 –	– M95–M100
Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР·10 ⁶), °С ⁻¹	63–77	63–90	70–95	–	60–70	90–114
Теплопроводность, Вт/(см·°С)	0,16–0,18	0,08–0,12	–	–	0,17	0,18
Теплостойкость, °С: по Мартенсу по Вика	87–92 –	70–80 95–100	80–90 105–115	75–80 105	115–127 164–166	60–70 –
Показатель текучести расплава, г/10 мин. Усадка при литье, %	0,5–1,8 0,4–0,6	2,0–8,0 0,9–1,0	1,3–2,0 0,9–1,0	1,0–3,3 0,9–1,0	2,0–3,5 0,7–0,8	– –

Оптическое шлифование и полирование полимеров достаточно трудоемко из-за их низкого модуля упругости, плохой теплопроводности и большого коэффициента линейного расширения. Однако крупногабаритные детали изготавливают только путем механической обработки. При этом точность радиуса кривизны линз составляет $\pm 2\%$, а на различных участках одной поверхности $\pm 0,5\%$. Абразивом при полировании может служить окись олова. Высокая чистота поверхности достигается при использовании замороженных водных суспензий абразивов. Линзы из гидрофильных гелей можно шлифовать и полировать в высушенном виде.

Такие достоинства полимерной оптики, как низкая стоимость, малый вес, высокая ударопрочность, возможность массового изготовления деталей сложной конфигурации с несферическими

поверхностями и монтажными выступами, снижение трудоемкости сборки и т.д., определяют потребность в развитии работ, направленных на создание новых полимерных материалов, обладающих более высокими функциональными и эксплуатационными свойствами, на поиск более совершенных и высокопроизводительных методов их переработки. Разработка новых покрытий и технологий их нанесения позволяет заметно повысить абразивостойкость поверхностей деталей из прозрачных полимеров [14].

Для повышения качества изображения оптическая система должна состоять не менее чем из двух линз. Для уменьшения потерь света на френелево отражение от преломляющих поверхностей линз и повышения надежности их взаимного положения линзы склеивают. Оптические клеи, используемые для прозрачного соединения оптических поверхностей, должны удовлетворять требованиям, которые можно разбить на три группы [15]:

- оптические требования: высокая прозрачность и бесцветность в заданной области спектра; чистота клея; определенный показатель преломления, желательно средний между показателем преломления материалов склеиваемых деталей; достаточная оптическая однородность, отсутствие люминесценции;
- технологические (реологические) требования – оптимальные для принятой технологии склеивания оптических деталей: начальная вязкость клея; жизнеспособность; скорость нарастания вязкости;
- эксплуатационные требования: достаточная механическая прочность; эластичность; сохранение оптических свойств в заданном температурном интервале; стабильность оптических и механических характеристик склеенных сборок в течение многих лет.

За рубежом для склеивания оптических деталей наиболее широко применяются клеи эпоксидные (Аральдит оптический, Эпотек 305 и др.), полиэфирные (Ленз Бонд М62, Стратил 228 и др.), силиконовые (Скурасил, Родорсил), реже полиуретановые клеи и эфиры целлюлозы. Эти клеи, как правило, представляют собой прозрачные жидкости, бесцветные или слабоокрашенные.

В нашей стране также разработана широкая гамма оптических клеев. Наибольшее применение находят карбинольные клеи: бальзамин и бальзамин М, реологические свойства которых наилучшим образом соответствуют сложившейся в нашей стране технологии изготовления оптических деталей и узлов. Эти клеи

позволяют в широких пределах варьировать вязкость в начальный момент склеивания, выбирая оптимальную величину вязкости в зависимости от формы и размера склеиваемых деталей. Благоприятная (экспоненциальная) зависимость вязкости этих клеев от времени облегчает окончательное взаимное юстирование деталей.

При повышенных требованиях к механической прочности склейки, влагостойкости, вибро- и ударопрочности, в частности, для склеивания оптических деталей приборов, предназначенных для эксплуатации в условиях влажных тропиков, широко используются эпоксидные клеи ОК-72ФТ₅ и ОК-72ФТ₁₅. Для склеивания крупногабаритных линз используется полиэфирный клей ОК-90М. Применение клея ММА на основе метилметакрилата вместо бальзамина позволяет значительно расширить интервал рабочих температур, повысить влагостойкость, термоударность, уменьшить деформации склеенных деталей. В то же время клей ММА существенно менее токсичен, чем эпоксидные клеи ОК-72ФТ.

Разработаны оптические клеи для УФ- (УФ-235, УФ-215М) и ИК- (ИК-1М) областей спектра, для склеивания оптических деталей из полимеров (ОК-80), однокомпонентный полимеризующийся клей ООК-1, имеющий практически неограниченную жизнеспособность и полимеризующийся при УФ-облучении. Для точного колерования оптических поверхностей применяются специальные полиэфирные и эпоксидные клеи.

Переход к оптическим методам передачи и обработки информации определил возникновение и развитие градиентной оптики. В связи с этим возник естественный вопрос об оценке возможностей полимеров как оптических материалов для создания градиентных светофокусирующих элементов – граданов.

Полимерные волоконные световоды устойчивы к возникновению динамических нагрузок и радиации, до диаметров 0,1–0,5 мм обладают высокой гибкостью, надежностью при изготовлении волоконно-оптических элементов и их эксплуатации, почти в три раза легче и значительно дешевле неорганических световодов. Их выпускают в виде волокон или гибких жгутов практически неограниченной длины. Из-за недостаточно высокой оптической однородности полимерные оптические волокна используют преимущественно в светопроводящих устройствах и сцинтилляторах. В качестве оптического полимерного материала сердцевины волокна чаще всего применяют акриловые полимеры с $n_D=1,48-1,51$. В этом случае оболочка должна быть из полимера, содержащего не менее

30% фтора. Если сердцевина из ПС, то оболочка может быть изготовлена из ПММА.

В настоящее время известны различные методы получения полимерных селфоков (граданов). Наилучшим пока является метод диффузионного обмена мономеров диффузанта и форполимерной матрицы. Наилучших результатов удастся достигнуть, выбирая в качестве матрицы сетчатый (сшивающийся) полимер, способный сохранять приданную ему форму при малой конверсии (10–50%). Можно также расширить круг полимеров, пригодных для создания граданов, используя в качестве матрицы сополимер линейного полимера со сшивающим агентом (например, сополимер стирола с бифункциональным мономером диметакрилатэтиленгликолем). Мономер-диффузанта должен хорошо совмещаться с матрицей и при этом образовывать с ней гомофазный статистический сополимер.

Известно [16], что наилучшими оптическими характеристиками обладают граданы, распределение показателя преломления в которых близко к закону [17]:

$$n = n_0 \operatorname{sch}(\alpha r) \approx n_0 \left(1 - \frac{\alpha^2 r^2}{2} \right),$$

где n_0 – показатель преломления на оси градана; α – константа распределения; r – расстояние от оси градана.

Управлять профилем распределения показателя преломления можно, проводя диффузию одновременно нескольких сополимеризующихся с матрицей мономеров, обладающих разными атомными рефракциями или разными молекулярными массами [18].

Полимерные граданы по своему оптическому качеству уступают граданам на основе неорганических стекол. Полимерные граданы на основе сшитых полимеров стирола имеют следующие оптические характеристики [9]:

- | | |
|---|------------|
| – градиент показателя преломления | 0,02–0,05; |
| – числовая апертура | 0,25–0,40; |
| – фокальное пятно на полной числовой апертуре | 28–57 мкм; |
| – четвертьволновая длина градиента | 10–100 мм; |
| – диаметр | 5–20 мм. |

В отличие от известных неорганических граданов цикл получения полимерных граданов не превышает 1,5 часа. Граданы на основе сшитых сополимеров стирола обладают высокой радиационной и атмосферостойкостью.

В 1977 году учеными ГОИ им. С.И. Вавилова была предложена новая регистрирующая среда на полимерной основе «реоксан» [19]. В основу создания материала положена реакция сенсibilизированного фотоокисления антраценового соединения. В результате фотопроцесса антраценовое соединение превращается в трансаннулярную перекись, что приводит к изменению поглощения и показателя преломления материала. Изображение записывается как модуляция показателя преломления среды.

«Реоксан» представляет собой полимерную матрицу, содержащую антраценовое соединение и сенсibilизатор. В качестве сенсibilизатора используются органические красители. При выборе полимера-носителя на него накладывались, прежде всего, следующие требования: прозрачность в видимой УФ-областях спектра; высокая оптическая однородность для обеспечения высокого качества «реоксана» как оптического материала; технологичность, инертность по отношению к светочувствительным компонентам материала и достаточно высокая растворимость последних в исходном мономере, так как это является необходимым условием для достижения большого динамического диапазона регистрирующей среды «реоксан».

Из ряда полимеров оптического назначения был выбран полиметилметакрилат. Он обладает высокой прозрачностью, легко полимеризуется и сополимеризуется, а растворимость в нем антраценового компонента достигает 8% (от массы полимера).

Материал «реоксан» получают в виде плоских полимерных дисков диаметром 30–80 мм и толщиной 0,2–3 мм. Для придания материалу механической жесткости в случае применения тонких слоев (меньше 1 мм) его используют на подложках – полированных пластинах из силикатного стекла, прозрачных в рабочей области «реоксана».

Предложенная регистрирующая среда «реоксан» имела следующие воспроизводимые параметры:

- область спектральной чувствительности 440–760 нм;
- величина фотоиндуцированного изменения показателя преломления (Δn) $5 \cdot 10^{-3}$;
- разрешение не менее 500 лин/мм
- величина дифракционной эффективности голограмм на «реоксане» 50–85%;
- экспозиция 1–5 Дж/см²;

- оптическая однородность (поверхностная и объемная) не менее $\lambda/5$ на световом диаметре 20 мм;
- клин света чувствительного слоя меньше 4 угл.мин.;
- средняя молекулярная масса полимера 800 000;
- содержание остаточного мономера меньше 1%;
- микротвердость по Шору 21,6–23 кгс/мм².

Материал «реоксан» не имел аналогов среди существующих отечественных и зарубежных регистрирующих сред и являлся материальной базой развития работ в области оптической голографии с глубокой записью.

4. КРИСТАЛЛЫ И КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

4.1. Кристаллы

Кристаллы (от греч. Krystallos, первоначальное значение – лед) – это твердые тела, обладающие трехмерной периодической атомной структурой и, при равновесных условиях образования, имеющие форму правильных симметричных многогранников, как показано на рис. 4.1 [20]. Каждому химическому веществу, находящемуся при данных термодинамических условиях (температуре, давлении) в кристаллическом состоянии, соответствует определенная атомно-кристаллическая структура. Кристалл, выросший в неравновесных условиях и не имеющий правильной огранки (или потерявший ее в результате обработки), сохраняет основной признак кристаллического состояния – решеточную атомную структуру (кристаллическую решетку) и все определяемые его свойства.

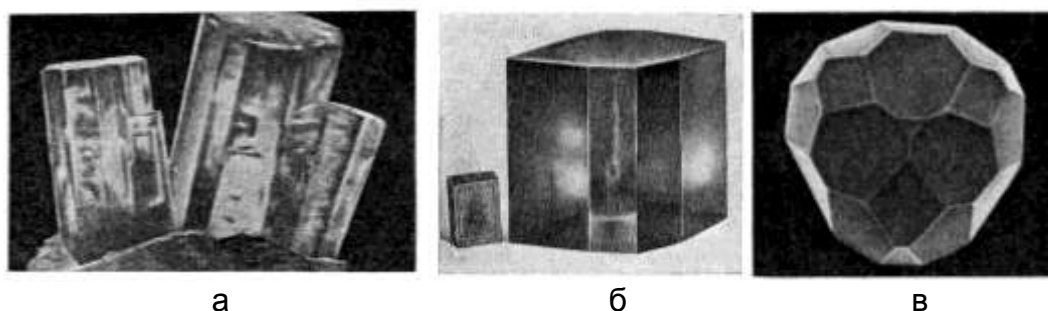


Рис. 4.1. Природные кристаллы турмалина (а); монокристалл сегнетовой соли (б); микромонокристалл германия (в) (увеличение в 4000 раз)

Большинство твердых материалов являются поликристаллическими; они состоят из множества отдельных беспорядочно ориентированных мелких кристаллических зерен (кристаллитов). Таковы, например, многие горные породы, технические металлы и сплавы. Крупные одиночные кристаллы называются монокристаллами.

Кристаллы образуют и растут чаще всего из жидкой фазы – раствора или расплава; возможно получение кристаллов из газовой фазы или при фазовом превращении в твердой фазе. В природе встречаются монокристаллы различных размеров – от громадных (до сотен кг) кристаллов кварца (горного хрусталя), флюорита, полевого шпата – до мелких кристаллов алмаза и других. Для научных и промышленных целей кристаллы выращивают (синтезируют) в лабораториях и на заводах.

Выросшие в равновесных условиях кристаллы имеют форму правильных многогранников той или иной симметрии, грани

кристаллов – плоские, ребра между гранями – прямолинейные, углы между соответствующими гранями кристаллов одного и того же вещества – постоянны. Измерение междугранных углов (гониометрия) позволяет идентифицировать кристаллы.

По характеру симметрии любой кристаллический многогранник принадлежит к одному из 32 классов (или точечных групп симметрии), которые группируют в семь сингоний: триклинную, моноклинную, ромбическую (низшие сингонии), тетрагональную, гексагональную, тригональную (средние сингонии) и кубическую (высшая сингония). Совокупность кристаллографически одинаковых граней (т.е. совмещающихся друг с другом при операциях симметрии данной группы) образуют так называемую простую форму кристалла. Всего существует 47 простых форм кристалла, но в каждом классе могут реализоваться лишь некоторые из них. Кристалл может быть ограничен гранями одной формы (рис. 4.2, а), но чаще комбинацией этих форм (рис. 4.2, б, в).

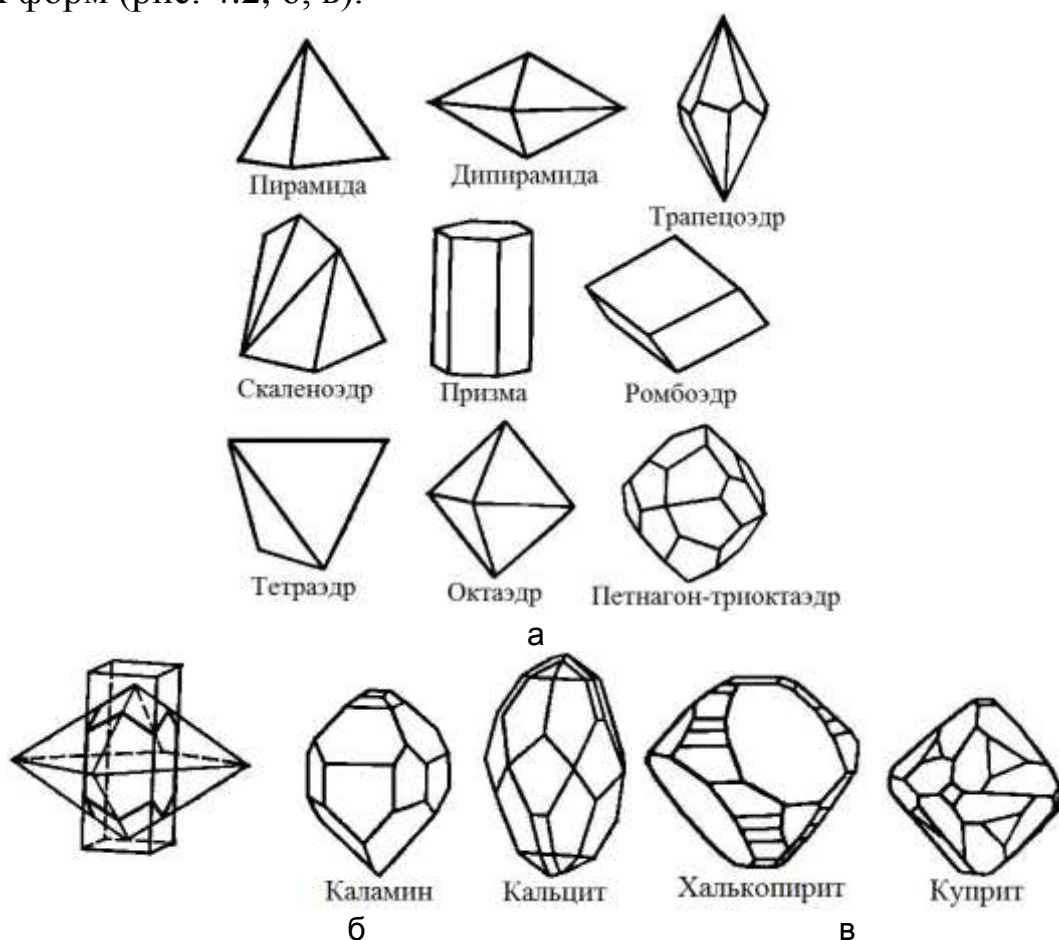


Рис. 4.2. Некоторые простые формы кристаллов (а); комбинации простых форм (б); наблюдаемые огранки кристаллов (в)

Если кристалл принадлежит к классу, содержащему лишь простые оси симметрии (не содержащему плоскостей, центра

симметрии или инверсионных осей), то он может кристаллизоваться в зеркально разных формах – правой и левой (так называемый энантиоморфизм).

Неравновесные условия кристаллизации приводят к различным отклонениям формы кристалла от правильного многогранника – к округлости граней и ребер (вицинали), возникновению пластинчатых, игольчатых, нитевидных, ветвистых (дендритных) кристаллов типа снежинок. Это используется в технике выращивания кристаллов разнообразных форм (дендритных лент Ge, тонких пленок различных полупроводников). Некоторым кристаллам уже в процессе выращивания придается форма требуемого изделия – трубы, стержня, пластинки, колпака и т.п. (рис. 4.3).

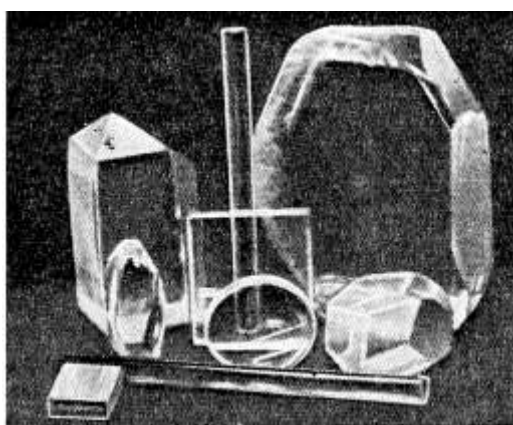


Рис. 4.3. Некоторые технически важные кристаллы и изделия из них: кристаллы кварца, граната, KDP и др., стержни рубина для лазеров, сапфировые пластины

Многие монокристаллы, а также поликристаллические материалы имеют широкое практическое применение. Пьезо- и сегнетоэлектрические кристаллы применяются в радиотехнике. Устройства полупроводниковой электроники (транзисторы, ЭВМ, фотоприемники и т.д.) основаны на полупроводниковых кристаллах (Ge, Si, GaAs и др.) или микросхемах на них. В запоминающих устройствах громадной емкости используются кристаллы магнитоэлектриков и различных типов ферритов. Исключительное значение имеют для квантовой электроники кристаллы рубина, иттериево-алюминиевого граната и другие. В технике управления световыми пучками лучей используют кристаллы, обладающие электрооптическими свойствами. Для измерения слабых изменений температуры применяются пироэлектрические кристаллы, для измерения механических и акустических воздействий – пьезоэлектрики, пьезомагнетики и т.п. Высокие механические свойства сверхтвердых кристаллов (алмаз и др.) используются в

обработке материалов и в бурении; кристаллы рубина, сапфира и др. служат опорными элементами в часах и в других точных приборах.

Синтетические кристаллы – это кристаллы, выращенные искусственно в лабораторных или в заводских условиях. Известно более 100000 синтетических кристаллов неорганических веществ. Некоторые из них не встречаются в природе. В частности, к ним относятся наиболее применяемые кристаллы полупроводников, пьезоэлектриков, а также оптические и оптоэлектрические кристаллы, кристаллы, имитирующие драгоценные камни на основе алюмоиттриевых гранатов (гранатиты) и двуокисей Zr и Hf (фианиты). Номенклатура промышленного производства различных синтетических кристаллов исчисляется тысячами наименований. С другой стороны, из 3000 кристаллов, составляющих многообразие природных минералов, искусственно удается выращивать пока только несколько сотен, из которых для практических применений существенное значение имеют лишь 20–30 (табл. 4.1).

Таблица 4.1. Наиболее распространенные синтетические кристаллы

Название	Химическая формула	Средняя величина кристаллов	Области применения
Кварц	SiO_2	от 1 до 15 кг, 300×200×150 мм	Пьезоэлектрические преобразователи, ювелирные изделия, оптические приборы
Корунд Рубин Сапфир	Al_2O_3 Al_2O_3 с приместью Cr Al_2O_3 с приместью Fe	Стержни диаметром 60–100 мм, длина до 3 м; пластины 140×300×30 мм	Приборостроение, часовая промышленность, ювелирные изделия, рубиновый лазер, квантовый усилитель, сапфировые подложки и окна
Германий	Ge	от 100 г до 10 кг, 200×200×500 мм	Полупроводниковые приборы
Кремний	Si	–"–	–"–
Галогениды	KCl, NaCl	от 1 до 100 кг, 300×300×800 мм	Сцинтилляторы
Сегнетова соль	$\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	от 1 до 25 кг, 100×100×600 мм от 1 до 40 кг, 500×500×300 мм	Пьезоэлементы
Триглицин-сульфат	$\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$	до 1 кг	Пироэлектрические элементы

Название	Химическая формула	Средняя величина кристаллов	Области применения
Дигидрофосфат калия KDP	KH_2PO_4	от 1 до 40 кг, 500×500×300 мм	Пьезоэлементы, нелинейные кристаллы, электрооптические кристаллы
Алюмоиттериевый гранат	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	40×40×150 мм 30×200×150 мм	Твердотельные лазеры, ювелирные изделия
Железоиттериевый гранат	$\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$	30×30×30 мм	Акустика, электроника
Гадолиний-галлиевый гранат	$\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$	20×80×200 мм	Подложки для магнитных пленок
Алмаз	C	от 0,1 до 3 мм	Абразивный материал
Ниобат лития	LiNbO_3	10×20×200 мм	Пьезоэлементы, акустоэлектрические и электрооптические элементы
Нафталин	C_{10}H_8	блоки в несколько кг	Сцинтилляционные счетчики
Бифталат калия	$\text{C}_8\text{P}_5\text{O}_4\text{K}$	до 1 кг	Рентгеновские анализаторы, нелинейная оптика
Сульфид кадмия	CdS	20×20×100 мм	Полупроводниковые приборы
Кальцит	CaCO_3	10×30×30 мм	Оптические приборы
Сульфид цинка	ZnS	20×20×100 мм	Полупроводниковые приборы
Арсенид галлия	GaAs	20×20×100 мм	—"
Фосфид галлия	GaP	—"	—"
Молибдаты редкоземельных элементов	$\text{Y}_2(\text{MoO}_4)_3$	100×10×100 мм	Твердотельные лазеры
Двуокись циркония (с добавкой Y_2O_3 до 10%)	ZrO_2	блоки около 2 кг, столбчатые кристаллы 100×10×50 мм	Ювелирные изделия, оптика
Двуокись гафния (с добавкой Y_2O_3 до 10%)	HfO_2	—"	—"
Вольфрамат кальция	CaWO_4	10×20×200 мм	Твердотельные лазеры
Алюминат иттрия	YAlO_3	10×10×100 мм	—"

Название	Химическая формула	Средняя величина кристаллов	Области применения
Алюминий (трубы различных сечений)	Al	Длина до 1 м, диаметр 3×20 см	Металлургия

4.2. Оптическая керамика

В результате поиска оптических материалов, в наиболее полной мере сочетающих прозрачность в ИК-области спектра при нормальной и высоких температурах с высокой механической прочностью и термостойкостью, в середине прошлого века была разработана технология изготовления методом горячего прессования необычных в классическом понимании поликристаллических оптических материалов. Прозрачные в оптическом диапазоне спектра и керамические по сути приемы изготовления эти материалы в отечественной литературе получили название оптической керамики. Этот термин в 1972 году принят также Американским керамическим обществом на своем ежегодном собрании [21].

Возможность изготовления прозрачных поликристаллических материалов была установлена экспериментально спектроскопистами, разработавшими так называемый KBr-метод исследования спектральных характеристик различных химических соединений путем впрессовывания их в бромистый калий.

Разработка технологических процессов изготовления представляющих практический интерес для оптотехники прозрачных и механически прочных поликристаллических материалов стала возможной только в результате систематических фундаментальных исследований кинетики и механизма процессов спекания. Исследование влияния на процесс уплотнения порошков при спекании температуры, давления, окружающей атмосферы, примесей и термической предистории исходных материалов привело к разработке двух приемов получения поликристаллических материалов с плотностью, весьма близкой к теоретической, т.е. с плотностью, соответствующей плотности монокристаллического вещества, а, соответственно, прозрачных и прочных.

Первый из этих приемов подобно классическому керамическому заключается в спекании предварительно сформированной заготовки при температуре, близкой к температуре плавления вещества, из которого она сформирована. Спекание осуществляется в вакууме или

в водороде. Успех применения этого метода определило установление факта повышенной подвижности ионов на границах зерен и в связи с этим установление роли в спекании границ зерен как основных каналов массопереноса и стоков вакансий. В результате проведенного потока были найдены добавки, небольшие количества которых способны существенно тормозить процесс рекристаллизации и таким образом сохранять большую удельную поверхность границ зерен во время всего процесса спекания. Торможение роста зерен сводит к минимуму удаление пор, захваченных зернами, в практически приемлемое время спекания. При этом уменьшение размера зерен весьма положительно сказывается на механической прочности получаемой керамики. Рассмотренный прием был с успехом применен для изготовления оптической керамики из окиси алюминия, алюмомагниевого шпинели, окиси иттрия, окиси циркония, окиси тория, окиси скандия и окислов редких элементов. Он является незаменимым в тех случаях, когда необходимо изготовить изделия сложных форм.

Более универсальным, позволяющим получать плотные и прозрачные поликристаллические материалы из веществ, относящихся к различным классам химических соединений, и потому получившим более широкое распространение, оказался второй прием изготовления оптической керамики, обычно называемый горячим прессованием. Этот прием заключается в проведении спекания при одновременном нагревании и приложении давления. Вполне возможно, что большему распространению этого метода способствовало то обстоятельство, что одновременный нагрев и воздействие давлением позволяют значительно снизить температуру спекания, а вместе с тем примерно на порядок снизить скорость собирательной рекристаллизации. Последнее свойство процесса горячего прессования благоприятствует получению плотной микрокристаллической, механически прочной и прозрачной керамики.

Технология производства оптических поликристаллов методом горячего прессования заключается в прессовании при высоких давлениях и температурах, составляющих $2/3$ температуры вещества: тонкодисперсных порошков оксидов, фторидов, сульфидов, селенов или более сложных соединений. При этом эффективно действуют два механизма массопереноса – трансляционное скольжение по кристаллографическим плоскостям и скольжение по границам зерен. Прикладываемые удельные давления составляют $1-3 \text{ т/см}^2$. Время

приложения давления составляет 5–60 мин. Процесс горячего прессования осуществляют, как правило, в вакууме порядка 10^{-2} – 10^{-4} мм рт. ст.

Получаемый беспористый материал, лишь немного уступая монокристаллу аналогичного химического состава по пропусканию в видимой части спектра, хорошо пропускает излучение ИК-области спектра и обладает высокой способностью выдерживать термомеханические удары. Размер единичного зерна в отпрессованной заготовке в зависимости от типа керамики составляет от единиц до нескольких десятков мкм. Методом горячего прессования могут быть получены заготовки различных форм: диски, линзы, полусферические обтекатели. Известны приемы, позволяющие одновременно получать несколько заготовок. В литературе отмечается возможность получения этим методом рабочих поверхностей оптических деталей с точностью до одной интерференционной полосы и не требующих дополнительной холодной обработки. В зависимости от типа оптической керамики максимальные размеры заготовок изменяются от 80 до 350 мм.

Наиболее широко применяется оптическая керамика из фтористого магния КО12, имеющая рабочий спектральный интервал пропускания излучения от 0,7 до 8,0 мкм. Керамика КО2 из сульфида цинка пропускает излучение в более далеком ИК-диапазоне: от 2,0 до 12,5 мкм.

Оптическая керамика КО3 представляет собой поликристаллический фтористый кальций (CaF_2), в котором отсутствие плоскостей спайности увеличило устойчивость материала к механическим и тепловым ударам. Рабочая спектральная область пропускания излучения в значительной степени зависит от качества сырья, но может быть доведена до 0,4–10,0 мкм.

Оптическая керамика КО5 – поликристаллический оксид магния. Температура плавления 2800°C . Рабочий спектральный диапазон пропускания излучения 0,4–8,0 мкм. Показатель преломления для $\lambda=2$ мкм равен 1,723. Высокая теплопроводность, равная 44 Вт/(м·К), позволяет использовать керамику марки КО5 в изделиях, подвергающихся температурным ударам. В воде керамика КО5 не растворяется, но при длительном хранении в условиях обычной атмосферы на ее поверхности образуется тонкий налет карбоната магния. Поэтому при длительном хранении изделий из керамики КО5 необходима химическая защита.

Применение новой технологии, основанной на газофазных методах выращивания, позволило повысить прозрачность поликристаллических оптических материалов и их механическую прочность. Получили развитие два метода: вакуумная сублимация и химическое газофазное осаждение. Поликристаллический селенид цинка ПО4 производится в виде пластин диаметром от 100 до 500 мм и толщиной до 30 мм [22].

Метод газофазного химического осаждения позволяет получать селенид цинка и сульфид цинка с рекордными параметрами по оптическому качеству и габаритным размерам. Метод основан на химическом взаимодействии пара цинка с селеноводородом (или сероводородом) с образованием твердого продукта – селенида (или сульфида) цинка. Осаждение производится в вакуумной печи при температуре 800°C, общем давлении 20 мм (аргон) и парциальном давлении реагентов (цинка и селеноводорода) 1–2 мм рт.ст. Продукт осаждения на твердой поверхности (на стенках реактора) в виде поликристаллического слоя с теоретической плотностью (5,27 г/см² для селенида цинка) и размером зерен 50–100 мкм. Скорость роста равна 0,06 мм/ч. Процесс роста длится несколько сотен часов непрерывно.

Полученный таким способом поликристаллический селенид цинка имеет показатель поглощения, на длине волны 10,6 мкм, равный $(5-10) \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$, прозрачен в спектральной области излучения 0,5–18 мкм (на уровне 50% при толщине, равной 1 см), имеет прозрачность на изгиб до 60 МПа и термостойкость по [23] $\Delta T=90^\circ\text{C}$; лучевая прочность в импульсе на длине волны излучения 10,6 мкм достигает 40 МВт/см²; двулучепреломление – не более 20 нм/см; включения – менее 1 мм для заготовок диаметром 360–500 мм и менее 0,5 мм для заготовок диаметром 180–200 мм.

Поликристаллический теллурид кадмия ПО6 получают аналогично. Оптическая керамика ПО6 прозрачна для ИК-излучения в интервале длин волн 0,9–29,0 мкм и в этой области спектра не имеет полос поглощения. Прозрачность керамики при этом равна 60–65% без учета потерь на отражение и может быть увеличена до 99% путем нанесения на поверхности просветляющего покрытия.

Показатель преломления керамики ПО6 для излучения длиной волны 10,6 мкм равен 2,67; плотность – 5,85 г/см³; температурный коэффициент линейного расширения – $55 \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, что определяет высокую термостойкость, равную 350°C. В воде не растворяется,

слабо подвержен действию органических жидкостей; температура плавления – 1090°C.

Получены заготовки оптической керамики ПО6 диаметром до 200 мм и толщиной до 20 мм. Применяется в качестве подложек светофильтров в ИК-спектрофотометрах и в окнах газовых лазеров на CO₂ со средней плотностью мощности. Приемники излучения с окнами из материала ПО6 выдерживают охлаждение до температуры жидкого азота без растрескивания окон.

Электрооптическая керамика КЭО10 представляет собой поликристаллический материал на основе цирконата-титаната свинца и лантана. Интегральное пропускание керамики без учета потерь на отражение при длине волны излучения He-Arg-лазера (630 нм) равно 60–65% при толщине образца 0,8 мм.

Материал КЭО10 устойчив к действию воды и щелочей и слегка растворим в минеральных кислотах, стоек в окислительной газовой среде вплоть до температуры плавления. Разработанные приемы изготовления электрооптической керамики обеспечивают получение материала высокого качества и с хорошо воспроизводимыми параметрами. В настоящее время получены заготовки диаметром 125 мм.

Материал опробован в устройствах записи информации и модуляторах света и может быть использован для изготовления электрически управляемых светофильтров, оптических затворов. Мелкозернистая керамика (с размером зерна менее 4 мкм) используется в устройствах, работающих на эффекте электрически управляемого пропускания, крупнозернистая – на эффекте рассеяния.

Оптическая люминесцентная керамика КОЛ1 представляет собой плотный и механически прочный прозрачный люминесцентный материал поликристаллической структуры; по химическому составу – это сульфид цинка (ZnS), активированный ионами серебра (с массовой долей до $2 \cdot 10^{-2}\%$) и содержащий до 1% хлористого натрия. Керамику изготавливают методом горячего прессования в вакууме. Она имеет синее свечение и возбуждается УФ-, рентгеновскими и электронными лучами. В отличие от катодолюминесцентных стекол типа КЛС и порошковых рентгенолюминофоров типа Р450 керамика имеет более высокую яркость свечения. Люминесцентная оптическая керамика обладает высокой стойкостью к действию электронных лучей: при плотности тока 10^{-5} А/см² устойчивость КОЛ1 в несколько раз превышает устойчивость монокристаллических экранов.

Материал не имеет отечественных и зарубежных аналогов. Световой выход катодолюминесценции равен 5 кд/Вт.

Оптическая керамика КО11 представляет собой новый светорассеивающий материал, получаемый методом горячего прессования фтористого магния (MgF_2). Интегральный коэффициент диффузного пропускания керамики марки КО11 для видимого света в зависимости от толщины образца и условий его изготовления может колебаться от 15 до 35%.

По своим рассеивающим характеристикам – оптическая керамика КО11 подобна молочным стеклам МС, благодаря высокой теплопроводности обладают лучшей термостойкостью; может применяться при температурах до 800°C. Оптическая керамика КО11 опробована в качестве рассеивателя света, работающего в газовой среде, содержащей пары фтора и фтористого водорода.

Создание поликристаллических материалов явилось одной из предпосылок развития сформировавшихся и становления новых направлений оптического приборостроения.

Марки, коды и способы получения оптической керамики приведены в табл. 4.2. Физико-механические свойства поликристаллического материала наиболее применяемых марок приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.2. Марки, коды и способы получения оптической керамики

Материал	Марка	КОД ОКП	Способ получения
Керамика оптическая на основе фторида магния	КО1	44 9298 0000	Метод рекристаллизационного прессования
Керамика оптическая на основе фторида магния, легированного фтористым кальцием	КО12	44 9298 5000	
Керамика оптическая на основе сульфида цинка	КО2	44 9298 1000	
Керамика оптическая на основе фторида кальция	КО3	44 9298 6000	
Материал оптический поликристаллический на основе селенида цинка	ПО4	44 9299 1000	Метод кристаллизации из паровой фазы

Таблица 4.3. Физико-механические свойства поликристаллического материала

Параметры	Марка поликристаллического материала				
	КО1	КО12	КО2	КО3	ПО4
Показатель преломления, n_e	1,3845	1,3845	2,1923 ($\lambda=10,6$)	1,4349	2,6645
Плотность при 20°C, г/см ³	3,18	3,18	4,09	3,18	5,26
Температурный коэффициент линейного расширения, $\alpha_i \cdot 10^6, ^\circ\text{C}^{-1}$	12,20	12,20	7,60	21,10	7,90
Теплопроводность, Вт/(м·°C)	14,65	14,65	17,00	–	14,10
Температура плавления, °C	1255	1255	1830±50	1420	1520±15
Модуль упругости Юнга, $E \cdot 10^{-10}$ Па	14,57	14,57	8,75	11,50	7,76
Модуль сдвига, $G \cdot 10^{-10}$ Па	5,54	5,54	3,32	4,50	2,96

Оптические свойства поликристаллических материалов представлены в Приложении П.4.1.

4.3. Оптические кристаллические материалы

Особые свойства кристаллических материалов: высокая прозрачность в УФ- и ИК-областях спектра, широкий набор дисперсионных свойств и др. позволяют значительно расширить круг задач, решаемых с помощью оптических приборов. В зависимости от структуры различают монокристаллические и поликристаллические материалы.

Марка оптического кристаллического материала определяется химическим составом, рабочей областью спектра, способом получения. Обозначение марки монокристаллического материала состоит из начальных букв химического соединения с добавлением буквы, указывающей основную рабочую область спектра. Так, например, ФЛ-У – фтористый литий с нормируемым показателем ослабления в УФ-области спектра. Обозначение марки поликристаллического материала состоит из букв и цифр, условно указывающих соответственно способ получения и химический состав материала. Так, например, КО1 – керамика оптическая на основе фторида магния, полученная рекристаллизационным прессованием; ПО4 – поликристаллический материал на основе селенида цинка, полученный кристаллизацией из паровой фазы. При обозначении марки материала того же химического состава, но обладающего особыми свойствами, добавляют букву или цифру, условно указывающую на дополнительные характеристики материала. Каждой марке оптического кристаллического материала

присвоен код по общесоюзному классификатору продукции (ОКП). Марки, коды ОКП, способы получения и формы поставки материалов приведены в табл. 4.4 и 4.5.

Таблица 4.4. Обозначение марки стекла кристаллических материалов

Вид материала	Материал	Марка	КОД ОКП	Способ получения
Моно-кристаллический	Литий фтористый	ФЛ-У	44 9291 0000	Метод Стокбаргера
		ФЛ-В	44 9291 2000	
		ФЛ-И	44 9291 1000	Метод Киропулоса
	Кальций фтористый	ФК-У	44 9292 0000	Метод Стокбаргера
		ФК-В	44 9292 1000	
		ФК-И	44 9292 2000	
	Барий фтористый	ФБ-У	44 9292 8000	Метод Стокбаргера
		ФБ-В	44 9293 0000	
		ФБ-И	44 9292 9000	
	Магний фтористый	ФМ-У	44 9293 2000	Метод Стокбаргера
		ФМ-И	44 9293 3000	
	Натрий хлористый	–	44 9293 7000	Метод Киропулоса
	Калий хлористый	–	44 9293 8000	
Калий бромистый	–	44 9293 6000		
Селенид цинка	–	44 9294 4000	Метод Бриджмена–Стокбаргера	
Лейкосапфир	Л-У	44 9294 7000	Метод ГОИ	
	Л-В	44 9295 6000		
	Л-И	44 9295 7000		
Гранат алюмоиттриевый	АИГ-У	44 9295 8000	Метод направленной кристаллизации	
	АИГ-В	44 9295 9000		
	АИГ-И	44 9296 0000		
Германий	КГО	44 9295 0000	Метод Чохральского	
Поли-кристаллический	Керамика оптическая на основе фторида магния	КО1	44 9298 0000	Метод рекристаллизационного прессования
	Керамика оптическая на основе фторида магния легированного фтористым кальцием	КО12	44 9298 5000	
	Керамика оптическая на основе сульфида цинка	КО2	44 9298 1000	
	Керамика оптическая на основе фторида кальция	КО3	44 9298 6000	

Вид материала	Материал	Марка	КОД ОКП	Способ получения
	Материал оптический поликристаллический на основе селенида цинка	ПО4	44 9299 1000	Метод кристаллизации из паровой фазы

Таблица 4.5. Формы поставки

Материал		Форма	Размеры, мм	
			Диаметр (наибольшая сторона)	Толщина
Литий фтористый марок	ФЛ-У	Диски, пластины	20–150(300)	5–50
	ФЛ-В, ФЛ-И		20–250(400)	
Кальций фтористый марок	ФК-У, ФК-В		20–180	5–35
	ФК-И		50–300(450)	5–50
Магний фтористый марок	ФМ-У	Диски, пластины	20–90	3–20
		Штабики	20–80	20–100
	ФМ-И	Диски, пластины	20–120	5–40
		Штабики	20–80	20–120
Натрий хлористый		Диски, пластины	20–200	5–40
Калий хлористый				
Калий бромистый				
Селенид цинка				
Лейкосапфир			30–100	3–10
Гранат алюмоиттриевый			15–120	3–140
Германий			20–80	3–20
Материалы поликристаллические марок	КО1	Диски, пластины	20–320	3–30
	КО12		20–120	3–15
	КО2		20–100	3–15
	КО3		30–50	3–10
	ПО4		20–350(500)	3–30(40)

4.3.1. Оптические характеристики

Оптические свойства материала характеризуются, прежде всего, показателем преломления и пропусканием оптического излучения.

Показатель преломления n определяется отношением скорости электромагнитного излучения в вакууме к фазовой скорости излучения в данном материале.

В Приложении П.4.2 приведены значения показателей преломления в области прозрачности материалов, средней дисперсии $n_{F'} - n_C$ или $n_{8,0} - n_{12,5}$. Для оптически однородных кристаллов фтористого магния и лейкосапфира приведены показатели

преломления для обыкновенного n_o и необыкновенного n_e лучей. Показатель преломления оптических материалов зависит от температуры. В таблицах приведены значения температурного коэффициента показателя преломления $\beta(t, \lambda) = \frac{dn(\lambda)}{dt}$, $^{\circ}\text{C}^{-1}$ для указанных в таблицах длин волн в интервале температур от минус 60 до 60 $^{\circ}\text{C}$ (для алюмоиттриевого граната в интервале температур 20–100 $^{\circ}\text{C}$). Для кристаллов фтористого магния и лейкосапфира значения температурного относительного коэффициента показателя преломления даны для обыкновенного β_o и необыкновенного β_e лучей.

Пропускание излучения оптическими кристаллическими материалами характеризуется спектральным коэффициентом пропускания и показателем ослабления. Спектральный коэффициент пропускания $\tau(\lambda)$ равен отношению потока монохроматического излучения, прошедшего сквозь образец материала, к потоку излучения, упавшему на него.

Спектральный коэффициент внутреннего пропускания $\tau_i(\lambda)$ равен отношению потока монохроматического излучения, достигшего выходной поверхности образца, к потоку излучения, прошедшему через его входную поверхность.

Показатель ослабления $\mu(\lambda)$ – это величина, обратная расстоянию, на котором поток излучения, образующего параллельный пучок, ослабляется в 10 раз в результате совместного действия поглощения и рассеяния в материале. Значение показателя ослабления рассчитывают по формуле:

$$\mu(\lambda) = -\frac{\lg \tau_i(\lambda)}{s},$$

где $\tau_i(\lambda)$ – коэффициент внутреннего пропускания, измеренный на приборе или полученный при расчете; s – толщина образца, см.

В таблицах Приложения П.4.2 приведена область прозрачности материалов, характеризуемая границами пропускания на краю полос поглощения, где коэффициент пропускания образца толщиной 10 мм достигает значения 0,5; приведены значения показателей ослабления и коэффициентов внутреннего пропускания материалов для длин волн в рабочей области спектра; приведены типовые кривые коэффициента пропускания $\tau(\lambda)$ образцов толщиной 10 мм.

На рис. 4.4 представлены дисперсионные кривые показателей преломления кристаллических материалов, на рис. 4.5 и 4.6 представлены диаграммы Аббе и $n_{10,6} - \nu_{10,6}$.

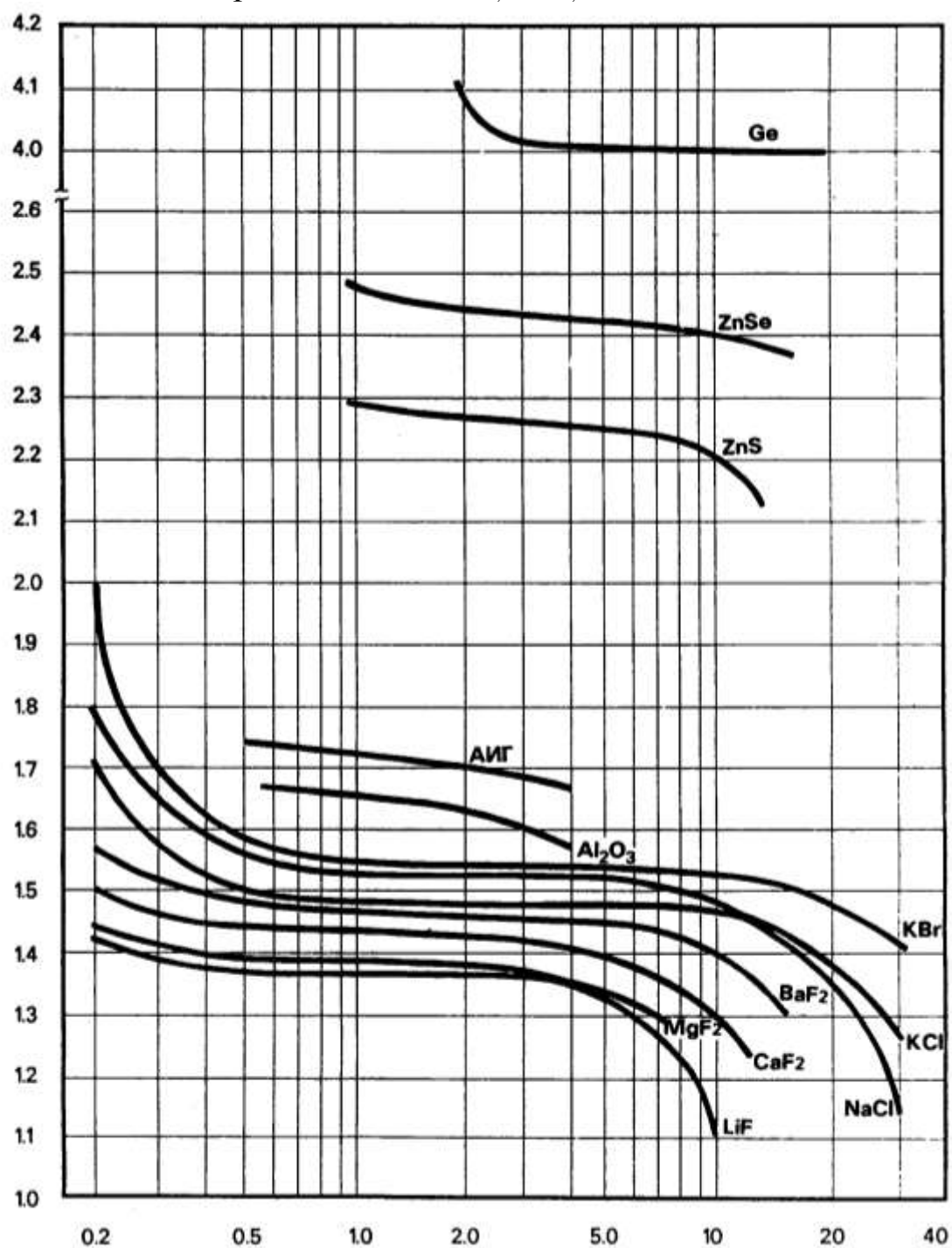


Рис. 4.4. Дисперсионные кривые показателей преломления

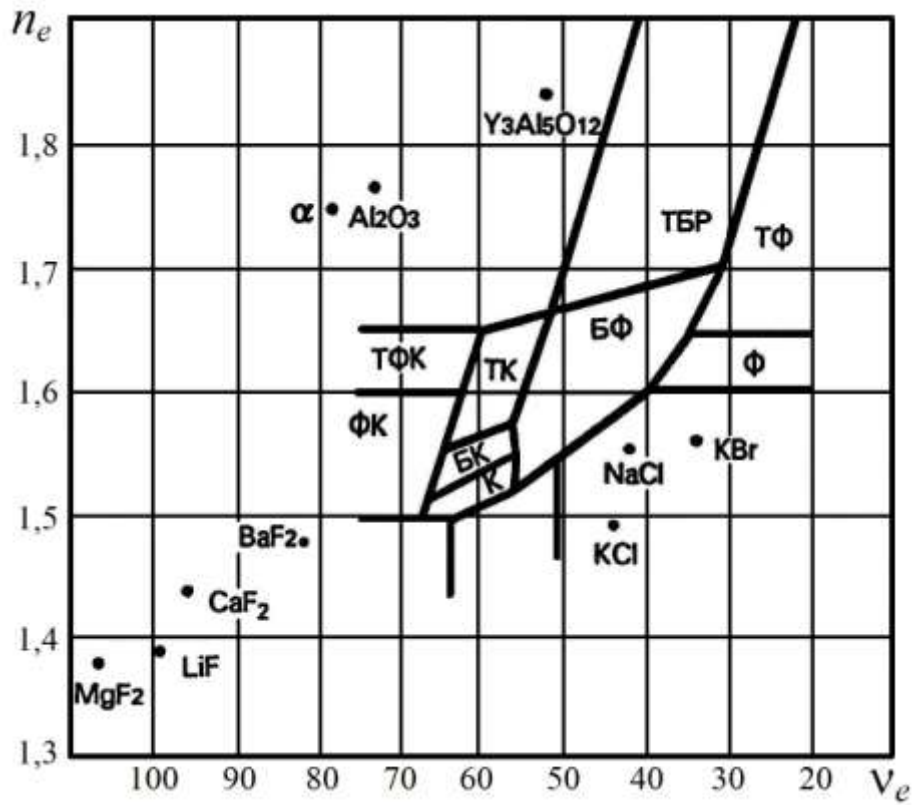


Рис 4.5. Диаграмма Аббе

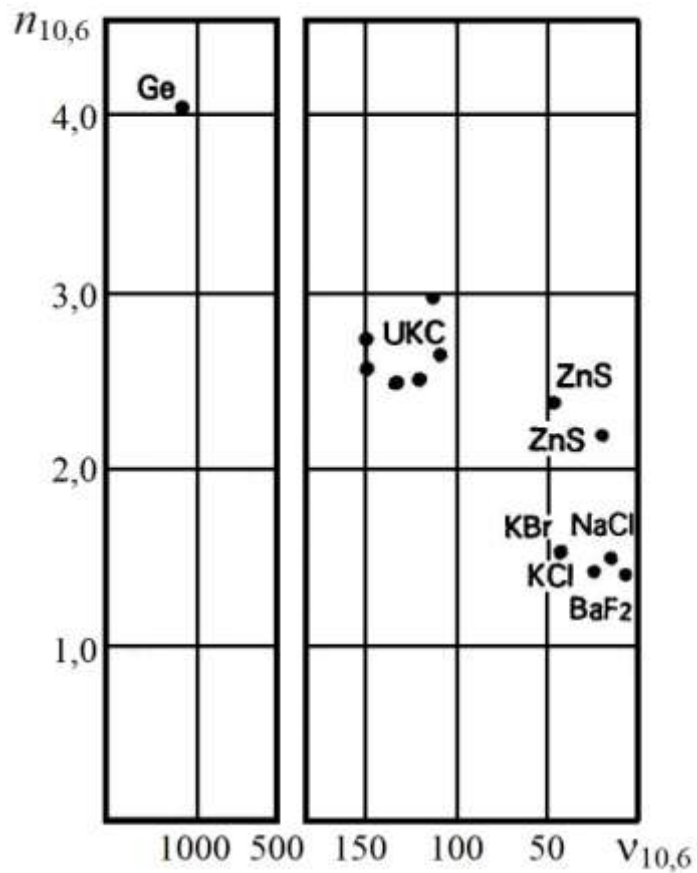


Рис 4.6. Диаграмма $n_{10,6}-V_{10,6}$

4.3.2. Кристаллографические характеристики

Монокристаллические материалы обладают упорядоченной трехмерной периодической пространственной атомной структурой. Кристаллографические данные, представленные в табл. 4.6, включают сингонию, определяющую характер основных физических свойств, класс симметрии, параметры решетки и спайность. Спайность – это свойство кристалла образовывать трещины параллельно определенным кристаллографическим плоскостям. Для обозначения спайности указывают кристаллографический символ системы плоскостей легкого раскалывания. Качественно спайность характеризуется как «совершенная» и «несовершенная». Кристаллографические характеристики поликристаллических материалов включают те же данные, что и для монокристаллов, отнесенные к каждому отдельному кристаллу (зерну).

Таблица 4.6. Кристаллографические характеристики

Материал	Сингония	Класс	Параметры решетки, Å		Спайность
			a	c	
Литий фтористый	Кубическая	$m\bar{3}m$	4,026	a	Совершенная по (100)
Кальций фтористый	Кубическая	$m\bar{3}m$	5,462	a	Совершенная по (111)
Барий фтористый	Кубическая	$m\bar{3}m$	6,196	a	Совершенная по (111)
Магний фтористый	Тетрагональная	$4/m\bar{3}m$	4,640	3,06	Несовершенная по (100), (110)
Натрий хлористый	Кубическая	$m\bar{3}m$	5,640	a	Совершенная по (100)
Калий хлористый	Кубическая	$m\bar{3}m$	6,292	a	Совершенная по (100)
Калий бромистый	Кубическая	$m\bar{3}m$	6,598	a	Совершенная по (100)
Лейко-сапфир	Тригональная	$\bar{3}m$	4,758	12,991	Несовершенная по (1011), (1120)
Гранат алюмоиттриевый	Кубическая	$m\bar{3}m$	12,005	a	Несовершенная по (100)
Германий	Кубическая	$m\bar{3}m$	5,657	a	Несовершенная по (111)
Селенид цинка	Кубическая	$\bar{4}3m$	5,668	a	Совершенная по (110)
Селенид цинка (ZnSe),	Кубическая	$\bar{4}3m$	5,668	a	Совершенная по (110)

Материал	Сингония	Класс	Параметры решетки, Å		Спайность
			a	c	
материал марки ПО4					
Магний фтористый (MgF₂), материал марки КО1	Тетрагональная	4/ <i>mmm</i>	4,640	3,06	Несовершенная по (100), (110)
Магний фтористый (MgF₂), материал марки КО12	Тетрагональная	4/ <i>mmm</i>	4,640	3,06	Несовершенная по (100), (110)
β-ZnS, материал марки КО2	Кубическая	$\bar{4}3m$	5,414	a	Совершенная по (110)
CaF₂, материал марки КО3	Кубическая	<i>m3m</i>	5,462	a	Совершенная по (111)

4.3.3. Теплофизические характеристики

В табл. 4.7 приведены значения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), теплопроводности, удельной теплоемкости, термостойкости и температуры плавления.

ТКЛР $\alpha_t, ^\circ\text{C}^{-1}$ определяет относительное изменение длины образца при изменении его температуры на 1°C , при этом

$$\alpha_t = \frac{1}{l} \frac{dl}{dt},$$

где l – длина образца; t – температура.

В табл. 4.7 приведены средние значения ТКЛР в указанных интервалах температур. Для оптически одноосных кристаллов фтористого магния и лейкосапфира приведены значения ТКЛР в направлениях, параллельном и перпендикулярном оптической оси.

Теплопроводность [$\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$] характеризует способность материала проводить тепло и определяется количеством теплоты, передаваемым через единичную площадку за единицу времени при единичном градиенте. Для кристаллов фтористого магния и лейкосапфира приведены значения теплопроводности в направлениях, параллельном и перпендикулярном оптической оси.

Удельная теплоемкость [Дж/(кг·°С)] характеризует энергию, необходимую для нагревания материала, и определяется количеством теплоты, требуемой для нагревания единицы массы материала, равной 1 кг, на один градус. В таблице приведены справочные значения удельной теплоемкости при постоянном давлении.

Термостойкость (°С) характеризует способность образца выдерживать без разрушения резкие смены температуры. Мерой термостойкости служит максимальная разность температур при быстрой их смене, выдерживаемая образцом без разрушения. В таблице приведены справочные значения термостойкости.

Температура плавления приведена в °С.

Таблица 4.7. Теплофизические характеристики

Материал	Температурный коэффициент линейного расширения, $\alpha_t \cdot 10^6 \text{°C}^{-1}$	Теплопроводность при t		Удельная теплоемкость при t		Термостойкость, °С	Температура плавления, °С
	в интервале $\pm 60 \text{°C}$	$t, \text{°C}$	Вт/(м·°С)	$t, \text{°C}$	$10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$		
Литий фтористый	28,1–34,8	26	14,2	10	1,5617	–	870
Кальций фтористый	16,2–19,4	36	9,71	40	0,8876	20±2	1418
Барий фтористый	16,5–19,2	38	7,10	–	0,4560	10±2	1354
Магний фтористый	⊥ c -оси (6,23–9,25)	27	–	–	0,9200	–	1255
	∥ c -оси (10,86–14,54)						
Натрий хлористый	36,4–40,8	35	6,15	24	0,8709	–	801
Калий хлористый	34,1–38,3	42	6,53	23	0,6950	–	776
Калий бромистый	36,6–39,6	46	4,81	100	0,4522	–	728
Лейко-сапфир	⊥ c -оси (3,24–5,66)	26	∥ c -оси (25,2)	18	0,7610	162±8	2030
			⊥ c -оси (23,1)				
Гранат	6,8	100	13,00	–	0,6270	–	1950

Материал	Температурный коэффициент линейного расширения, $\alpha_t \cdot 10^6 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Теплопроводность при t		Удельная теплоемкость при t		Термостойкость, $^\circ\text{C}$	Температура плавления, $^\circ\text{C}$
	в интервале $\pm 60^\circ\text{C}$	$t, ^\circ\text{C}$	Вт/(м \cdot $^\circ\text{C}$)	$t, ^\circ\text{C}$	$10^3 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$		
алюмоиттриевый	(в интервале 20–100 $^\circ\text{C}$)						
Германий	5,1–5,8	27	59,8	20–100	0,3098	–	937
Селенид цинка	6,4–7,6	25–300	16,9	25	0,3550	–	1520 \pm 15
Селенид цинка (ZnSe), материал марки ПО4	7,9 (при 27 $^\circ\text{C}$)	27	14,1	27	0,3668	57 \pm 7	1520 \pm 15
Магний фтористый (MgF₂), материал марки КО1	12,2 (при 27 $^\circ\text{C}$)	20	14,65	27	1,0551	96 \pm 6	1255
Магний фтористый (MgF₂), материал марки КО12	12,2 (при 27 $^\circ\text{C}$)	20	14,65	27	1,0551	96 \pm 6	1255
β-ZnS, материал марки КО2	7,6 (на всем интервале)	–	17,0	–	0,51	125 \pm 16	1830 \pm 50
CaF₂, материал марки КО3	21,1 (при 27 $^\circ\text{C}$)	–	–	27	0,9378	30 \pm 4	1420

4.3.4. Механические характеристики

В табл. 4.8 приведены значения плотности, твердости по Моосу, микротвердости по Виккерсу, а также значения величин, характеризующих упругие и фотоупругие свойства материала.

Таблица 4.8. Механические характеристики

Материал	Плотность, при 20°C, г/см ³	Твердость по Моосу	Постоянные упругой податливости, 10 ⁻¹² Па ⁻¹						Модуль упругости E, 10 ¹⁰ Па, в направлении					
			S ₁₁	S ₁₂	S ₁₃	S ₁₄	S ₃₃	S ₄₄	S ₆₆	ном.	<100>	<111>	c-оси	⊥ c-оси
Литий фтористый	2,60	4	11,32	-3,06	-	-	-	-	-	-	8,84	14,22	-	-
Кальций фтористый	3,18	4	6,83	-1,53	-	-	-	-	-	-	14,61	8,99	-	-
Барий фтористый	4,83	3	15,30	-4,69	-	-	-	-	-	-	6,54	6,63	-	-
Магний фтористый	3,18 (18°C)	6	12,45	-7,16	-1,66	-	-	5,94	17,54	10,53	-	-	16,91	7,97
Натрий хлористый	2,17	2	22,85	-4,69	-	-	-	-	78,34	-	4,37	3,27	-	-
Калий хлористый	1,98	2	26,21	-3,47	-	-	-	-	161,98	-	3,82	1,68	-	-
Калий бромистый	2,75 (25°C)	1,5	30,29	-4,18	-	-	-	-	194,92	-	3,30	1,38	-	-
Лейко-сапфир	3,98	9	2,3	-0,7	-0,4	0,5	2,2	6,8	6,8	-	-	-	46,26	42,64
Гранат алюмо-иттриевый	4,55	8,5	3,67	-0,90	-	-	-	8,67	8,67	-	27,26	28,45	-	-
Германий	5,33 (25°C)	6	9,69	-2,65	-	-	-	14,89	14,89	-	10,32	15,56	-	-
Селенид цинка	5,26	4	22,54	-8,47	-	-	-	27,03	27,03	-	4,43	9,22	-	-
Селенид цинка (ZnSe), материал марки ПО4	5,26	4	-	-	-	-	-	-	-	7,76	-	-	-	-

Материал	Плотность, при 20°C, г/см ³	Твердость по Моосу	Постоянные упругой податливости, 10 ⁻¹² Па ⁻¹						Модуль упругости E , 10 ¹⁰ Па, в направлении					
			S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{33}	S_{44}	S_{66}	ном.	<100>	<111>	c -оси	⊥ c -оси
Магний фтористый (MgF₂), материал марки КО1	3,18	6,5	-	-	-	-	-	-	-	14,57	-	-	-	-
Магний фтористый (MgF₂), материал марки КО12	3,18	6,5	-	-	-	-	-	-	-	14,57	-	-	-	-
β-ZnS, материал марки КО2	4,09	4,5	-	-	-	-	-	-	-	8,75	-	-	-	-
CaF₂, материал марки КО3	3,18	4,5	-	-	-	-	-	-	-	11,5	-	-	-	-

Таблица 4.8 (продолжение)

Материал	Модуль сдвига G , 10 ¹⁰ Па, в плоскости					Оптический коэффициент напряжений		Фотоупругие постоянные	
	ном.	(100)	(111)	 c -оси	⊥ c -оси	B_1	B_2	C_1	C_2
						для $\lambda=0,546$ мкм, 10 ⁻¹² Па ⁻¹			
Литий фтористый	-	4,09	6,29	-	-	2,15	1,05	0,77	-1,38
Барий фтористый	-	2,51	2,53	-	-	4,71	-1,70	100	-3,71
Магний фтористый	-	-	-	5,71	9,52	2,29	0,67	-	-
Калий хлористый	-	1,08	0,63	-	-	-2,71	7,31	-7,89	-5,18
Лейко-сапфир	-	-	-	14,43	16,29	1,583	1,583	-	-
Магний фтористый (MgF₂), материал марки КО1	5,54	-	-	-	-	1,21	-	-	-
Магний фтористый	5,54	-	-	-	-	1,21	-	-	-

Материал	Модуль сдвига G , 10^{10} Па, в плоскости					Оптический коэффициент напряжений		Фотоупругие постоянные	
	ном.	(100)	(111)		⊥	B_1	B_2	C_1	C_2
(MgF₂), материал марки КО12									
Кальций фтористый	–	4,76	3,38	–	–	для $\lambda=0,589$ мкм, 10^{-12} Па ⁻¹			
						2,14	–1,03	0,43	–1,71
Натрий хлористый	–	1,59	1,28	–	–	2,26	1,57	–0,44	–2,70
Калий бромистый	–	0,90	0,51	–	–	–3,27	9,11	–11,67	–8,40
Гранат алюмо- иттриевый	–	11,18	11,57	–	–	2,16	1,640	0,371	–0,155
Германий	–	4,67	6,72	–	–	для $\lambda=10,6$ мкм, 10^{-12} Па ⁻¹			
						11,54	34,94	26,92	15,38
Селенид цинка	–	1,98	3,70	–	–	для $\lambda=0,632$ мкм, 10^{-12} Па ⁻¹			
						8,69	11,73	10,51	–1,82
Селенид цинка (ZnSe), материал марки ПО4	2,96	–	–	–	–	для $\lambda=0,550$ мкм, 10^{-12} Па ⁻¹			
						1,21	–	–	–
β-ZnS, материал марки КО2	3,32	–	–	–	–	10,72	–	–	–
CaF₂, материал марки КО3	4,5	–	–	–	–	–	–	–	–

Таблица 4.8 (продолжение)

Материал	Микротвердость, 10^7 Па при условии			Коэффициент поперечной деформации ν при условии			
	ном.	c -оси	⊥ c -оси	ном.	c -оси	⊥ c -оси в плоскости	
						c -оси	⊥ c -оси
Литий фтористый	98	–	–	0,270	–	–	–
Кальций фтористый	165	–	–	0,216	–	–	–

Материал	Микротвердость, 10^7 Па при условии			Коэффициент поперечной деформации ν при условии			
	норм.	c -оси	$\perp c$ -оси	норм.	c -оси	$\perp c$ -оси в плоскости	
						c -оси	$\perp c$ -оси
Барий фтористый	82	–	–	0,307	–	–	–
Магний фтористый	–	441	289	–	0,577	0,130	0,276
Натрий хлористый	20	–	–	0,203	–	–	–
Калий хлористый	15	–	–	0,134	–	–	–
Калий бромистый	10	–	–	0,138	–	–	–
Лейкосапфир	–	1940	2200	–	0,309	0,157	0,170
Гранат алюмо- иттриевый	1813	–	–	0,244	–	–	–
Германий	900	–	–	0,273	–	–	–
Селенид цинка	117	–	–	0,376	–	–	–
Селенид цинка (ZnSe), материал марки ПО4	101 \pm 3	–	–	0,311	–	–	–
Магний фтористый (MgF₂), материал марки КО1	730 \pm 63	–	–	0,316	–	–	–
Магний фтористый (MgF₂), материал марки КО12	730 \pm 63	–	–	0,316	–	–	–
β-ZnS, материал марки КО2	217 \pm 13	–	–	0,317	–	–	–
CaF₂, материал марки КО3	185 \pm 4	–	–	0,273	–	–	–

Таблица 4.8 (продолжение)

Материал	Пьезооптические постоянные								
	π_{11}	π_{12}	$\pi_{11}-\pi_{12}$	$\pi_{11}-\pi_{31}$	$\pi_{33}-\pi_{13}$	π_{44}	π_{14}	π_{41}	π_{66}
Литий фтористый	для $\lambda=0,546$ мкм, 10^{-12} Па $^{-1}$								
	-0,57	1,02	-	-	-	-0,78	-	-	-
Барий фтористый	-0,62	2,31	-	-	-	1,06	-	-	-
Магний фтористый	-	-	1,76	1,14	0,52	1,35	-	-	0,51
Калий хлористый	4,74	3,11	-	-	-	-4,39	-	-	-
Лейко- сапфир	-	-	-0,57	-0,53	-0,52	-0,84	-0,02	-0,04	-
Магний фтористый (MgF₂), материал марки КО1	-	-	-0,92	-	-	-	-	-	-
Магний фтористый (MgF₂), материал марки КО12	-	-	-0,92	-	-	-	-	-	-
Кальций фтористый	для $\lambda=0,589$ мкм, 10^{-12} Па $^{-1}$								
	-0,29	1,16	-	-	-	0,70	-	-	-
Натрий хлористый	0,24	1,46	-	-	-	-0,85	-	-	-
Калий бромистый	6,10	4,39	-	-	-	-4,76	-	-	-
Германий	для $\lambda=10,6$ мкм, 10^{-12} Па $^{-1}$								
	-0,84	-0,48	-	-	-	-1,09	-	-	-
Селенид цинка	для $\lambda=0,632$ мкм, 10^{-12} Па $^{-1}$								
	-1,21	0,21	-	-	-	-1,35	-	-	-
Селенид цинка (ZnSe), материал марки ПО4	для $\lambda=0,550$ мкм, 10^{-12} Па $^{-1}$								
	-	-	-1,37	-	-	-	-	-	-
β-ZnS, материал марки КО2	-	-	-1,57	-	-	-	-	-	-

Материал	Пьезооптические постоянные								
	π_{11}	π_{12}	$\pi_{11}-\pi_{12}$	$\pi_{11}-\pi_{31}$	$\pi_{33}-\pi_{13}$	π_{44}	π_{14}	π_{41}	π_{66}
CaF₂, материал марки КОЗ	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Гранат алюмо- иттриевый	–0,12	0,05	–	–	–	–0,53	–	–	–

Плотность (г/см³) определяется отношением массы материала к его объему. В таблице приведены справочные значения плотности для комнатной температуры и нормального давления.

Твердость по Моосу характеризует способность материала подвергаться царапанию другим материалом.

Микротвердость по Виккерсу (Па) характеризует сопротивление поверхности материала вдавливанию индентора в виде четырехгранной алмазной пирамидки при определенной инденторной нагрузке. В таблице приведены справочные значения микротвердости при нагрузке 1 Н. Для оптических одноосных кристаллов фтористого магния и лейкосапфира значения микротвердости приведены для направлений, параллельного и перпендикулярного оптической оси.

Упругие свойства материала характеризуются постоянными упругой податливости, являющимися коэффициентами пропорциональности между составляющими напряжения и деформации, и техническими характеристиками упругости: модулем Юнга (в Па), модулем сдвига (в Па) и коэффициентом поперечной деформации. Упругие свойства материала зависят от кристаллографических направлений, связанных с приложенным напряжением и деформацией.

В таблице для кубических кристаллов приведены постоянные упругой податливости S_{11} , S_{12} и S_{44} , позволяющие произвести преобразование значений модуля Юнга и модуля сдвига к любой системе координат, а также максимальные и минимальные значения модуля Юнга и модуля сдвига, соответствующие кристаллографическим направлениям $\langle 100 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$, и значения коэффициента поперечной деформации.

Для оптически одноосных кристаллов фтористого магния и лейкосапфира приведены шесть постоянных упругой податливости и значения модуля Юнга и модуля сдвига для направлений и плоскостей, параллельных и перпендикулярных оптической оси. Значения коэффициента поперечной деформации для этих кристаллов даны для двух возможных положений: первое – усилие направлено

параллельно оптической оси, а деформация материала под действием этого усилия рассматривается в плоскости, перпендикулярной оптической оси; второе – усилие направлено перпендикулярно оптической оси (для кристаллов фтористого магния перпендикулярно также плоскости $\langle 100 \rangle$), а деформация материала под действием этого усилия, поскольку она различна, рассматривается в двух плоскостях, расположенных параллельно и перпендикулярно оптической оси кристалла.

Для поликристаллических материалов приведены изотропные значения модуля Юнга, модуля сдвига и коэффициента поперечной деформации без учета возможного влияния текстурированности материала.

Фотоупругие свойства характеризуются пьезооптическими постоянными (Па^{-1}), учитывающими анизотропию изменений показателя преломления под действием напряжений, и техническими характеристиками фотоупругости: главными фотоупругими постоянными C_1 и C_2 (Па^{-1}) и главными оптическими коэффициентами напряжений B_1 и B_2 (Па^{-1}). Фотоупругие постоянные C_1 и C_2 характеризуют зависимость изменения показателя преломления Δn_1 и Δn_2 материала под действием нормального напряжения σ , приложенного вдоль главных кристаллографических направлений:

$$\Delta n_1 = C_1 \sigma; \Delta n_2 = C_2 \sigma.$$

Для кубических кристаллов приведены значения пьезооптических постоянных π_{11} , π_{12} , π_{44} , позволяющих произвести преобразование фотоупругих постоянных C_1 и C_2 к любой системе координат, а также главные значения C_1 и C_2 для длин волн 0,550 мкм или 0,561 мкм при комнатной температуре.

Главные оптические коэффициенты напряжения B_1 и B_2 характеризуют взаимосвязь между двулучепреломлением и вызывающими его напряжениями:

$$\Delta n_1 \Delta n_2 = B_2 \sigma; \Delta n_{12} = 2B_2 \sigma_{12},$$

где Δn_{12} – двулучепреломление, вызываемое напряжением сдвига σ_{12} .

Значения пьезооптических постоянных, фотоупругих постоянных и оптических коэффициентов напряжения длин волн видимой области спектра при комнатной температуре приведены в таблице.

Для оптических одноосных кристаллов фтористого магния и лейкосапфира приведены пьезооптические постоянные, а также значения B_1 и B_2 , характеризующие двулучепреломление в плоскостях перпендикулярных оптической оси кристалла.

Для поликристаллических материалов приведены изотропные значения оптического коэффициента напряжения B_1 , а также пьезооптические постоянные $\pi_{11}-\pi_{12}$, характеризующие двулучепреломление; влияние текстурированности материала не учитывалось.

4.3.5. Химическая устойчивость

Химическая устойчивость кристаллических материалов характеризует их сопротивляемость к воздействию агрессивной среды: воды, кислот и органических соединений. В табл. 4.9 приведены растворимость кристаллических материалов в воде при температуре до 20°C [$\text{г}/(100 \text{ см}^3)$], а также способность их растворяться в кислотах и органических соединениях.

Таблица 4.9 Химическая устойчивость

Материал	Растворимость			
	в воде при t		в кислотах	в органических растворителях
	$t, ^\circ\text{C}$	$\text{г}/100 \text{ см}^3$		
Литий фтористый	20	0,27	растворяется	не растворяется в ацетоне и этиловом спирте
Кальций фтористый	18	0,0016	растворяется незначительно	не растворяется в ацетоне
Барий фтористый	10	0,17	растворяется	–
Магний фтористый	18	0,0076	растворяется	не растворяется в спиртах
Натрий хлористый	0	35,7	растворяется	растворяется в глицерине, незначительно в спирте и жидком аммиаке
Калий хлористый	20	34,7	–	растворяется в эфире, глицерине, незначительно в спирте
Калий бромистый	0	53,48	–	растворяется в глицерине, незначительно в эфире
Лейко-сапфир	20	$98 \cdot 10^{-6}$	растворяется незначительно	–
Гранат алюмо-иттриевый	20	не растворяется	растворяется незначительно	–

Материал	Растворимость			
	в воде при t		в кислотах	в органических растворителях
	$t, ^\circ\text{C}$	г/100 см ³		
Германий	20	не растворяется	растворяется в смеси соляной и азотной кислот, перекиси водорода	не растворяется
Селенид цинка	20	не растворяется	растворяется	не растворяется
Селенид цинка (ZnSe), материал марки ПО4	20	не растворяется	растворяется	не растворяется
Магний фтористый (MgF₂), материал марки КО1	20	не растворяется	не растворяется	не растворяется
Магний фтористый (MgF₂), материал марки КО12	20	не растворяется	не растворяется	не растворяется
β-ZnS, материал марки КО2	20	не растворяется	незначительно растворяется в слабых растворах кислот	не растворяется
CaF₂, материал марки КО3	20	не растворяется	незначительно растворяется в слабых растворах кислот	не растворяется

4.3.6. Параметры качества кристаллических материалов

К параметрам качества оптических кристаллических материалов, которые важны для потребителя, относятся: предельное отклонение показателя преломления, оптическая однородность, однородность по спектральному показателю ослабления, двулучепреломление, свилеподобные дефекты, пузыри и включения, ориентация оптической оси (для оптически одноосных кристаллов фтористого магния и лейкосапфира).

Предельное отклонение показателя преломления (расхождение между значениями показателя преломления, указанными в каталоге, и

значениями показателя преломления конкретной заготовки) не превышает $\pm 10 \cdot 10^{-4}$.

Однородность по спектральному показателю ослабления $\Delta\mu(\lambda)$ (относительное изменение показателя ослабления в пределах рабочей зоны заготовки) характеризуется величиной

$$\Delta\mu(\lambda) = \frac{\mu_{\max}(\lambda) - \mu_{\min}(\lambda)}{\mu_{\max}(\lambda)},$$

где $\mu_{\max}(\lambda)$ и $\mu_{\min}(\lambda)$ – наибольшее и наименьшее значения спектрального показателя ослабления в пределах рабочей зоны заготовки. Для монокристаллов $\Delta\mu(\lambda)$ принимает значения в пределах от 0,1 до 0,2; для поликристаллических материалов – от 0,1 до 0,3.

Для определения требований к оптическим кристаллическим материалам по оптической однородности (однородности показателя преломления в пределах рабочей зоны заготовки), по двулучепреломлению в рабочем направлении заготовки, при определении требований к свилеподобным дефектам, к пузырьности материала и непрозрачным включениям (к газообразным или твердым включениям) используют категории, установленные [12]. Технические требования к каждому конкретному материалу установлены в нормативно-технической документации.

5. ОПТИЧЕСКИЕ СИТАЛЛЫ

5.1. Стеклокристаллические материалы

Стекловарам хорошо известна проблема «расстекловывания», т.е. образования нежелательных кристаллов на поверхности или в объеме расплавленной стекломассы и выработанных из нее изделий. Наличие отдельных кристаллов снижает оптические и механические свойства стекла. Поэтому в стекольной промышленности большинство исследований направлено на получение стекол, устойчивых к кристаллизации. Первая известная попытка превратить стекло в почти полностью кристаллический материал была предпринята французским химиком М. Реомюром, результаты которой были опубликованы в 1739 году [24]. Однако конечный полностью кристаллический продукт получался непрочным из-за остаточных больших ориентированных кристаллов. Опыты по получению силикатных материалов с кристаллической структурой проводились в двадцатых годах прошлого столетия в Германии Х. Беккером, позже Х. Вагнером. Изделия из закристаллизованного стекла можно было использовать в качестве жаростойких и механически прочных плавильных сосудов.

В Советском Союзе в начале тридцатых годов проводились широкие исследования по использованию горных пород в стекоделии. Было установлено, что закристаллизованные стекла обладают повышенной прочностью и меньшей хрупкостью. Еще в 1932 году Н.Н. Китайгородский в докладе на совещании по новым строительным материалам писал [24]: «Подавляющее большинство стекол и стекломасс при определенной обработке со временем изменяют свою стекловидную структуру на кристаллическую. Чем выше кристаллизационная способность сплава и меньше скорость роста кристаллов (кристаллизационная скорость), тем тоньше будет кристаллическая структура вещества. При малой кристаллизационной способности и большой кристаллизационной скорости структура будет состоять из сравнительно малого количества крупных кристаллов. Кристаллизационная способность и скорость зависят от химического состава сплава и от температурных условий его охлаждения.

Таким образом, изменяя химический состав, температуру и время термической обработки, можно регулировать ход процесса кристаллизации и влиять на образование той или другой кристаллической структуры. Последняя же, в свою очередь,

обусловит необходимые физико-химические свойства полученного вещества и изделий из него.

Кристаллическая масса выгодно отличается от своего стекловидного источника отсутствием хрупкости, большой механической и химической прочностью. Такие свойства определяют большое распространение этого материала в строительстве и промышленности. Большую ценность он представляет и в дорожном строительстве. Рекристаллизационные плиты и пластины могут быть использованы для ступеней лестниц, перекрытий, выстилки площадок, балконов и т.д.

Для облегчения веса изделий и масс возможно рекристаллизовать блоки, плиты из пеностекла, которые станут напоминать пемзу и фактически явятся искусственной пемзой или искусственным туфом. Этот материал, как показал опыт, является прекрасным строительным и облицовочным материалом».

23 мая 1957 года американская фирма технического стекла Corning Glass Works объявила о создании целого ряда новых тонкозернистых стеклокристаллических материалов. Эти материалы были получены методом регулируемой кристаллизации из стекол специальных составов с незначительными добавками TiO_2 или солей светочувствительных металлов Ag, Au, Cu, необходимых для образования зародышевых центров кристаллизации, вокруг которых вырастают мириады микроскопически мелких кристаллов. Новые материалы отличались от стекол тем, что имели в основном кристаллическое строение, а от керамики – значительно меньшим размером кристаллов.

Результаты испытаний новых материалов показали, что они по своим свойствам превосходят многие обычные технические материалы. Они отличаются высокой твердостью и механической прочностью, обладают отличными электроизоляционными свойствами, высокой температурой размягчения и хорошей термостойкостью. Достаточно отметить, что они в несколько раз прочнее прокатного стекла, легче алюминия и могут быть тверже высокоуглеродистой стали.

Обладая весьма благоприятным сочетанием желаемых физических свойств, этот перспективный новый класс материалов привлек внимание конструкторов, инженеров и научных работников во всем мире. Исследования в области создания новых материалов на основе стекла получили развитие во многих странах. Наиболее известными из полученных материалов являются «пирокерам» и

«фотокерам» в США, «ситаллы» и «фотоситаллы» в СССР, «витрокерам» в ГДР, «девитрокерам» и «мираклон» в Японии, «фарфор из стекла» в Румынии, «минельбит» в Венгрии, «кростон» в Чехословакии, «квазикерамика» или «дисплиталь» в Польше.

В Советском Союзе одним из основных направлений в области изучения неорганических стекол было признано исследование новых стеклокристаллических материалов и физико-химических основ катализированной кристаллизации.

5.2. Оптические ситаллы

Итак, кристаллизацией стекла, которая обычно является его браком, можно управлять не только в направлении уменьшения, но и для создания в стекле огромного числа очень мелких кристаллов [25]. Очень удобны для этой цели стеклообразующие системы, склонные к микрорасплаиванию и кристаллизации хотя бы одной из микрофаз при последующей термообработке. Содержание кристаллической фазы в оптических ситаллах составляет 75%.

Физические свойства ситалла складываются из свойств кристаллического каркаса, образовавшегося в процессе термической обработки исходных стекол, и из свойств остаточной стекловидной фазы.

Для получения оптических ситаллов применяют систему из оксидов кремния, алюминия и лития с добавками диоксида титана. В этой системе специальной термообработкой можно выделить кристаллы литиевых алюмосиликатов – сподумена, эвкриптита или петалита, которые обладают очень низким или даже отрицательным значением ТКЛР: $\alpha = -90 \cdot 10^{-7} \text{°C}^{-1}$ эвкриптита $\text{LiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$; $\alpha = 9 \cdot 10^{-7} \text{°C}^{-1}$ сподумена $\text{LiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$; $\alpha = 3 \cdot 10^{-7} \text{°C}^{-1}$ петалита $\text{LiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{SiO}_2$.

В сочетании с положительным коэффициентом расширения остаточной стеклофазы это позволяет в заданном интервале температур иметь температурный коэффициент линейного расширения ситалла отрицательным, нулевым, слабо положительным ($5 \cdot 10^{-7} \text{°C}^{-1}$) и положительным ($57 \cdot 10^{-7} \text{°C}^{-1}$).

Различие свойств стеклообразной и кристаллической, анизотропных фаз в ситалле вызывает в нем наличие неустраняемых натяжений, которые при просмотре в поляризованном свете проявляются в виде характерной картины мелкоячеистой сетки.

Температура размягчения ситаллов достигает 1400°С, но при температуре 800°С они теряют прозрачность.

Заготовки ситалловых зеркал выпускаются серийно диаметром до 2,6 м и толщиной до 0,4 м. Для получения заготовок требуемого (меньшего) размера заготовки большего размера распиливают бесконечным гибким цепным алмазным инструментом. Плоскость от пропила получается гладкой, без вырывов. Поэтому этот способ резания ситаллов можно применять и для снятия припусков с крупных заготовок. Интенсивность резания выше, чем при любом другом способе.

Обозначения ситаллов

Каждому ситаллу присвоена марка, состоящая из двух или трех букв и цифр [26]. Первые две буквы «СО», одинаковые для всех ситаллов, являются начальными буквами слов «ситалл оптический», а последняя – начальной буквой наименования цвета: зеленый (СОЗ), красный (СОК) и не имеющие окраски (СО). Цифра в марке ситалла обозначает порядковый номер его разработки.

Основной маркой оптического ситалла в нашей промышленности является литиевоалюмосиликатный ситалл СО115М (ОСТ 3-104-90). Ситалл этой марки для использования в проходящем свете не предназначен. Ситаллы марок СОЗЗМ (АХ.38-90ТУ), СОЗ13, СОКЗЗ, СОКЗ4 могут использоваться в качестве оптических сред. Ситалл марки СОЗЗМ разработан с использованием соединений фосфора и кальция и обладает несколько более высокой прозрачностью. Так как ситаллы имеют двухфазную структуру, показатель светорассеяния при $\lambda=546$ нм составляет $\approx 3 \cdot 10^{-3}$. Центры окраски в цветных ситаллах образуются при вхождении активатора в ту или иную кристаллическую фазу.

Основные назначения оптических ситаллов приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Основные назначения оптических ситаллов

Марка ситалла	Назначение
СОЗ13	Термостойкий зеленый светофильтр, выделение спектральной области 510–520 нм
СОКЗЗ, СОКЗ4	Термостойкий красный светофильтр, выделение спектральной области 600–750 нм
СО115М	Термостойкий прозрачный конструкционный материал для отражающей оптики
СОЗЗМ	Оптический материал для приборов наивысшей термостабильности

Физические, химические и спектральные свойства ситаллов

Характеристики физических и химических свойств ситаллов: плотности ρ (кг/дм³), температурного коэффициента линейного расширения $\alpha \cdot 10^7$ (град⁻¹), показателя преломления n_e (или n_D , если n_e невозможно измерить), температура отжига T_0 (°C), химической устойчивости (к влажной атмосфере и кислотоустойчивости – пятнаемости), твердости по сошлифованию H_s относительно твердости оптического стекла К8, оптического коэффициента напряжения $B \cdot 10^{12}$ (Па⁻¹) приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2. Физико-химические свойства оптических ситаллов

Марка ситалла	Код ОКП	$n_e(n_D)$	ρ	T_0	$\alpha \cdot 10^7$ в интервале температур, °C		H_s	$B \cdot 10^{12}$	Химическая устойчивость	
					20–420	±60			к влажной атмосфере	кислотоустойчивость
СО313		(1,580)	2,59	620	18,0				А	І
СОК33		(1,550)	2,55	620	0±1,5		1,70		А	І
СОК34		(1,550)	2,58	620	0±2,5		1,70		А	І
СО115М	44 9290 1000	1,539	2,46	630	3,5	0±1,5	1,78		А	І
СО33М		(1,550)	2,53	600	0±1,0	0±1,5	1,70	2,9	А	І

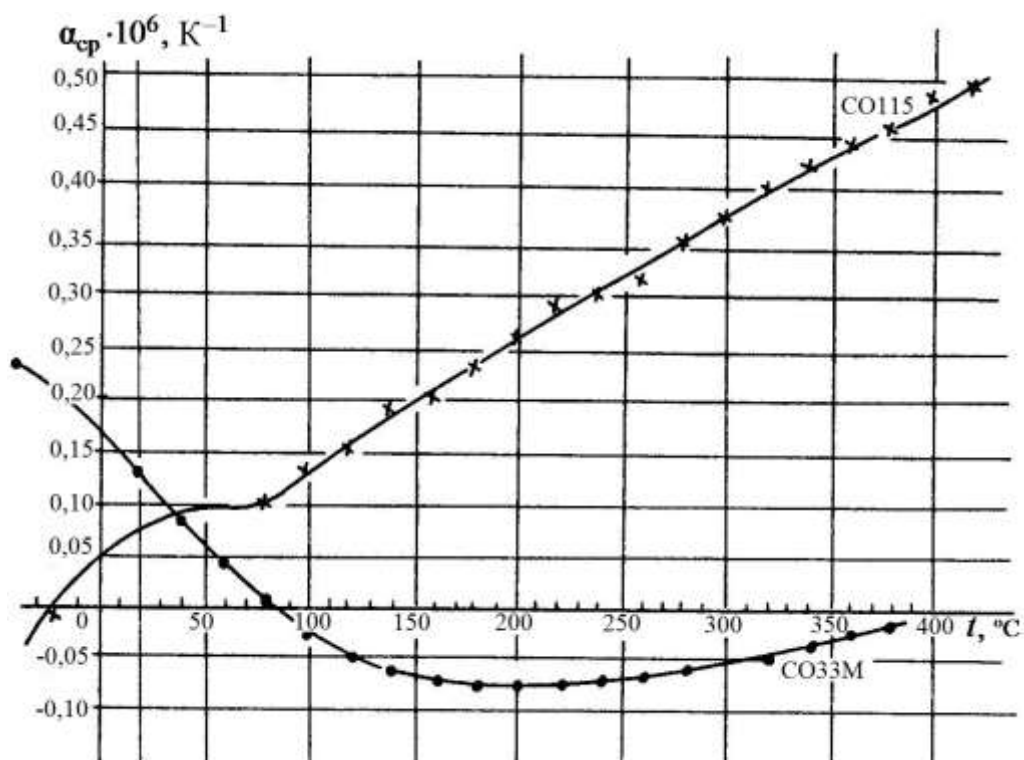


Рис. 5.1. Зависимость температурного коэффициента линейного расширения оптических ситаллов от температуры

ТКЛР ситаллов близок к нулю и изменяется нелинейно в широком диапазоне температур, как показано на рис. 5.1. На практике используют ТКЛР, измеренный в различных диапазонах температур: от плюс 60 до минус 60°С и от 20 до 420°С.

Термостойкость, коэффициент температуропроводности, температура отжига, оптический коэффициент напряжения, относительная твердость по сошлифованию для ситаллов измеряется так же, как и для цветных стекол.

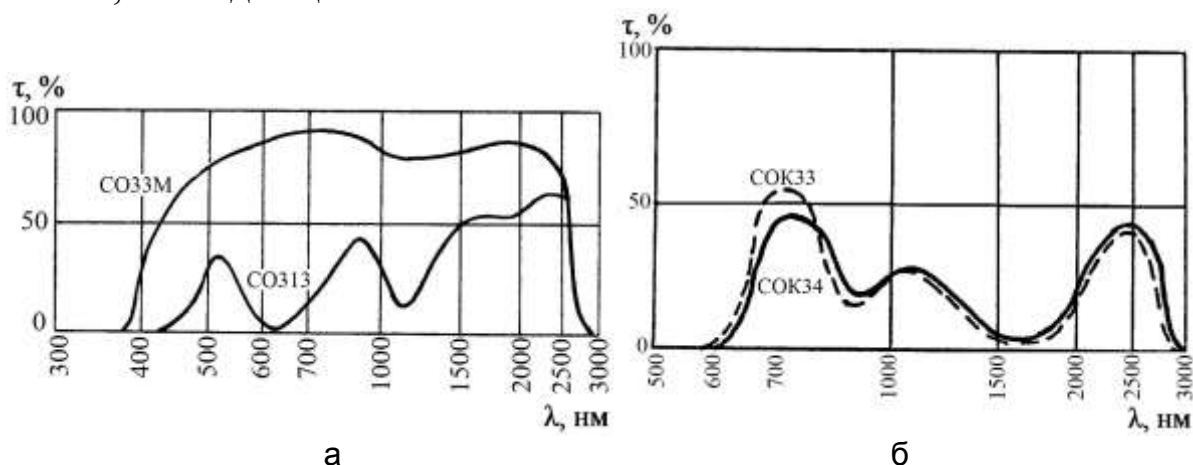


Рис. 5.2. Кривые спектрального пропускания оптического ситалла марок СО33М и СО313 (а); СОК33 и СОК34 (б)

Спектральные свойства ситаллов характеризуются спектральными кривыми коэффициента пропускания, представленными на рис. 5.2. Диапазон изменения длин волн выбран в зависимости от характера спектральных свойств и назначения ситаллов. Спектральные кривые коэффициента пропускания $\tau(\lambda)$, представленные на рис. 5.2, а, даны для ситаллов марок СО313 и СО33М, имеющих толщину 3 и 10 мм соответственно, т.е. близкую к наиболее часто используемой рабочей толщине светофильтров. Спектральные кривые коэффициента пропускания, приведенные на рис. 5.2, б, даны для ситаллов марок СОК33 и СОК34, имеющих толщину 3 мм.

При повышении температуры спектральное поглощение излучения в ситаллах изменяется, а при понижении температуры восстанавливается. Общим для всех зеленых ситаллов является смещение при нагревании края поглощения в видимую область спектра и уширение полосы поглощения за счет незначительного повышения интенсивности ее длинноволнового края и снижения интенсивности в максимуме. Пропускание в зеленой части спектра при этом уменьшается. Для красных ситаллов при нагревании характерно небольшое смещение края поглощения в красную область спектра, при этом спектральное пропускание образца уменьшается незначительно.

6. ОПТИЧЕСКИЕ СТЕКЛА ДЛЯ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Бескислородные инфракрасные оптические стекла предназначены для изготовления деталей оптических систем, работающих в диапазоне длин волн 0,7–17 мкм.

Смещение края фундаментальных полос поглощения в ИК-область спектра обусловлено заменой кислорода в составе стекол его аналогами в периодической системе элементов Д.И. Менделеева – серой, селеном, теллуrom.

Поскольку бескислородные стекла являются диэлектриками с полупроводниковым типом остаточной проводимости, положение края электронной полосы поглощения определяется межзонными переходами, а, следовательно, шириной запрещенной зоны, величина которой зависит от состава стекла.

6.1. Обозначения инфракрасных оптических стекол

Каждому бескислородному инфракрасному оптическому стеклу присвоена марка, состоящая из трех букв и двух цифр. Буквы в обозначении стекол соответствуют буквам в названии «Инфракрасное стекло», а цифры обозначают порядковый номер разработки: чем меньше цифра, тем раньше это стекло было освоено производством в промышленности.

Стекла марок ИКС23, ИКС24, ИСК28, ИКС29, ИКС34, ИКС25 выпускаются в заготовках размером 25–370 мм (наибольшая масса 25 кг); ИКС32 – 25–150 мм при отношении диаметра или диагонали заготовки к ее толщине от 3:1 до 10:1; ИКС27 – 25–100 мм при толщине не менее 5 мм; ИКС33 – 30–50 мм при толщине 6–7 мм.

Все свойства бескислородных стекол определяются в основном теми же величинами, что и свойства оксидных стекол. Поэтому приведем лишь некоторые уточнения свойств, специфических для инфракрасных стекол.

Основными характеристиками оптических свойств бескислородных инфракрасных стекол, как материала деталей оптических систем, являются показатель преломления, дисперсия и коэффициент дисперсии, абсолютная величина которых определяется их химическим составом; важной характеристикой в ИК-области спектра является спектральная характеристика стекол.

6.2. Показатель преломления стекол

Значения показателей преломления стекол в области спектра 1–14 мкм, измеренные гониометрическим методом при температуре 20°C и давлении 101,32 кПа, приведены в табл. 6.1. Точность измерения показателя преломления n_λ равна $\pm 1 \cdot 10^{-4}$. Температурные абсолютные коэффициенты показателя преломления $\beta_{\text{абс.}}(t, \lambda)$ приведены в табл. 2.2. Коэффициенты $\beta_{\text{абс.}}(^\circ\text{C}^{-1})$ определены как средние в диапазоне температур от 20°C до 120°C для спектрального диапазона от 2,0 мкм до 12,0 мкм.

Таблица 6.1. Показатели преломления бескислородных инфракрасных оптических стекол

λ , мкм	Показатель преломления n_λ стекла марки								
	ИКС23	ИКС24	ИКС28	ИКС29	ИКС34	ИКС32	ИКС25	ИКС27	ИКС33
1,0	2,4816	2,4640	–	–	–	–	–	–	–
1,8	2,4303	2,4134	2,7394	2,6443	2,6339	3,0447	2,8160	–	–
2,0	2,4261	2,4098	2,7285	2,6381	2,6283	3,0351	2,8081	–	–
2,2	2,4232	2,4062	2,7276	2,6333	2,6241	3,0257	2,8022	–	–
3,0	2,4163	2,3990	2,7120	2,6225	2,6147	3,0072	2,7894	–	–
4,2	2,4108	2,3937	2,7060	2,6168	2,6091	2,9971	2,7840	–	–
5,0	2,4086	2,3911	2,7026	2,6141	2,6067	2,9926	2,7804	2,6880	–
5,8	2,4056	2,3887	2,7003	2,6122	2,6048	2,9892	2,7785	–	–
7,0	2,4009	2,3845	2,6968	2,6090	2,6020	2,9864	2,7752	2,6820	2,6820
8,0	2,3965	2,3806	2,6940	2,6065	2,5995	2,9810	2,7728	–	2,6790
9,0	2,3922	2,3764	2,6908	2,6036	2,5971	2,9767	2,7703	–	2,6760
10,0	–	–	2,6875	2,6006	2,5941	2,9731	2,7675	–	2,6730
11,0	–	–	2,6833	2,5971	2,5909	2,9685	2,7645	–	2,6700
12,0	–	–	2,6788	2,5934	2,5873	2,9635	2,7612	–	2,6650
13,0	–	–	–	2,5892	2,5832	–	2,7579	–	2,6620
14,0	–	–	–	2,5846	2,5788	–	2,7542	–	2,6580

Таблица 6.2. Температурные абсолютные коэффициенты показателя преломления $\beta_{\text{абс.}}(t, \lambda)$

Марка стекла	$\beta_{\text{абс.}}(t, \lambda) \cdot 10^7, ^\circ\text{C}^{-1}$ для λ (мкм)						
	2,0	2,6	3,4	4,6	5,0	6,0–7,0	8,0–12,0
ИКС23	90	80	70	70	70	70	–
ИКС24	500	480	460	420	420	420	–
ИКС28	540	470	430	400	400	400	400
ИКС29	580	520	490	440	440	440	440
ИКС34	1090	1030	970	960	960	960	960
ИКС32	1420	1350	1320	1280	1280	1280	1280
ИКС25	620	550	500	460	460	460	460
ИКС27	–	–	700	680	680	680	680

Значения двулучепреломления стекла приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3. Значения двулучепреломления стекла

Марка стекла	Двулучепреломление для $\lambda=2,0$ мкм, нм/см, не более		
	1 категория	2 категория	3 категория
ИКС23	60	150	300
ИКС24	20	50	100
ИКС28	150	400	800
ИКС29	150	350	700
ИКС34	60	150	300
ИКС32	130	300	600
ИКС25	200	500	1000

6.3. Дисперсия стекла. Коэффициент дисперсии

Дисперсия стекла определяется как разность показателей преломления для двух длин волн. Значения показателей преломления для длин волн 2,0 мкм и 10,0 мкм и значения дисперсий для диапазонов длин волн 1,8–2,2 мкм и 8,0–12,0 мкм приведены в табл. 6.4. В той же таблице приведены значения коэффициентов дисперсии стекол, вычисленные по формулам:

$$v_{2,0} = \frac{n_{2,0} - 1}{n_{1,8} - n_{2,2}}, \quad v_{10,0} = \frac{n_{10,0} - 1}{n_{8,0} - n_{12,0}},$$

где n_λ и v_λ – значения показателя преломления и коэффициента дисперсии при $\lambda=1,8; 2,0; 2,2; 8,0; 10,0; 12,0$.

Таблица 6.4. Значения показателей преломления и дисперсий для различных диапазонов длин волн

Марка стекла	$n_{2,0}$	$n_{10,0}$	$n_{1,8} - n_{2,2}$	$n_{8,0} - n_{12,0}$	$\frac{n_{2,0} - 1}{n_{1,8} - n_{2,2}}$	$\frac{n_{10,0} - 1}{n_{8,0} - n_{12,0}}$
ИКС23	2,4261		0,0071		201	
ИКС24	2,4098		0,0072		196	
ИКС28	2,7285	2,6875	0,0118	0,0152	146	111
ИКС29	2,6381	2,6006	0,0110	0,0131	149	122
ИКС34	2,6283	2,5941	0,0098	0,0122	166	131
ИКС32	3,0351	2,9731	0,0190	0,0175	107	113
ИКС25	2,8081	2,7675	0,0138	0,0116	131	152

На рис. 6.1 в координатах $v_{2,0}, n_{2,0}$ для бескислородных стекол представлена диаграмма типа диаграммы Аббе, где для сравнения кроме бескислородных стекол приведены оптические кристаллы и область оптических оксидных стекол, обозначенная пунктиром.

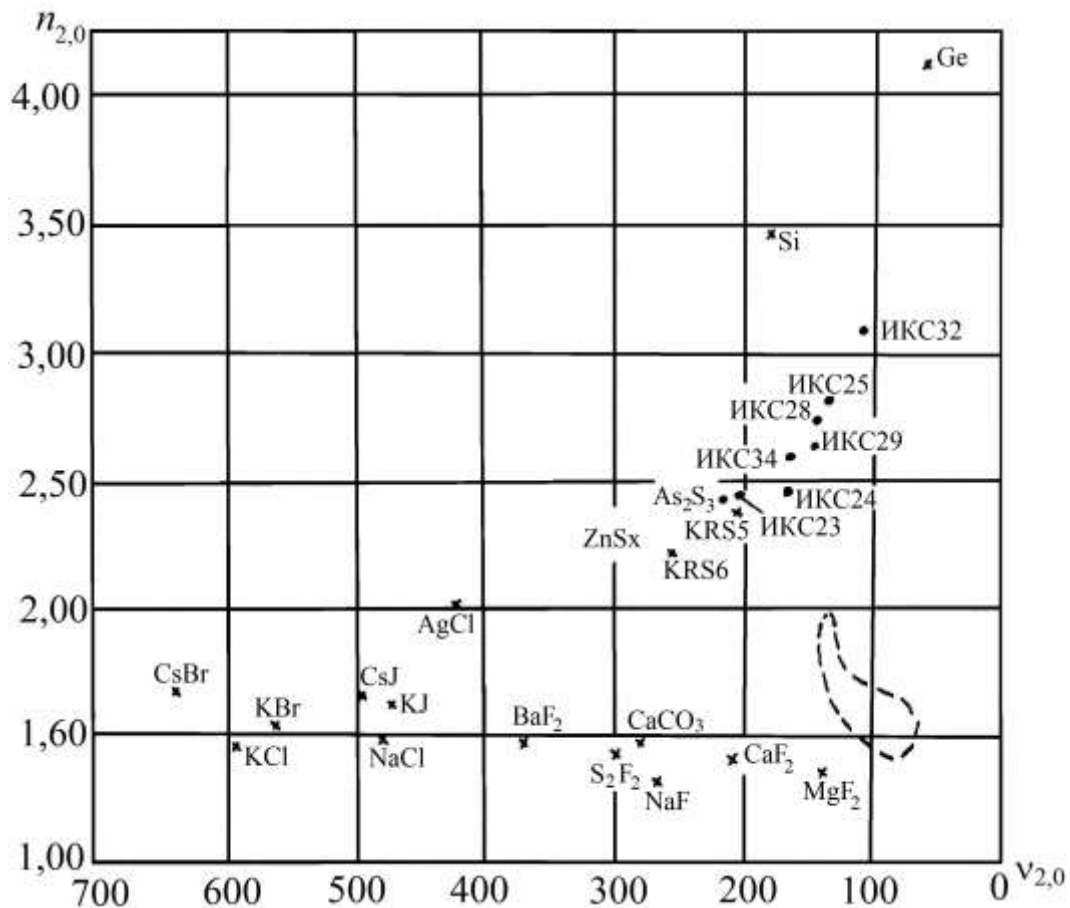


Рис. 6.1. Диаграмма Аббе в координатах $v_{2,0}$, $n_{2,0}$ для бескислородных стекол

Заметим, что от варки к варке стекла наблюдается изменение его оптических постоянных. Отклонение показателей преломления $\Delta n_{2,0}$ и $\Delta n_{10,0}$ наблюдается в пределах $\pm 30 \cdot 10^{-4}$, предельное отклонение дисперсии $\Delta(n_{1,8} - n_{2,2})$ и $\Delta(n_{8,0} - n_{12,0})$ не превышает $\pm 50 \cdot 10^{-5}$. По требованию заказчика могут быть изготовлены партии стекол с отклонениями $\Delta n = \pm 10 \cdot 10^{-4}$, а $\Delta(\delta n) = \pm 30 \cdot 10^{-5}$.

6.4. Спектральная характеристика стекол

Спектральная характеристика стекол определяется числовыми значениями коэффициента пропускания, показателя ослабления и спектральными кривыми пропускания.

Рабочая область пропускания определяется длиной волны, для которой коэффициент пропускания составляет половину его максимального значения.

Спектральный коэффициент пропускания τ_λ стекла определяется как отношение прошедшего через стекло потока излучения Φ_λ к падающему потоку Φ_0 :

$$\tau_{\lambda} = \frac{\Phi_{\lambda}}{\Phi_0}.$$

Величина $1 - \tau_{\lambda}$ характеризует полные потери излучения, обусловленные ослаблением и отражением от полированных поверхностей деталей.

Химическое просветление полированных поверхностей деталей из бескислородных стекол в области спектра от 0,6 мкм до 10 мкм позволяет увеличить пропускание детали на 23–30%. Вакуумное просветление увеличивает коэффициент пропускания в области спектра 8,0–14,0 мкм до 0,90–0,98.

При облучении стекол гамма-излучением дозой 10^7 Р коэффициент пропускания в рабочей области спектра не изменяется.

Показатель ослабления ε_{λ} (см^{-1}) стекла вычисляется на основании данных измерения коэффициента пропускания и показателя преломления в соответствии с формулой:

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{D_{\lambda} - D_{\rho m}}{l},$$

где $D_{\lambda} = -\lg \tau_{\lambda}$ – оптическая плотность; $D_{\rho m} = -\lg \frac{2n_{\lambda}}{n_{\lambda}^2 + 1}$ – поправка на

отражение от двух поверхностей (здесь n_{λ} – показатель преломления при длине волны λ); l – толщина образца в направлении прохождения луча.

По величине коэффициента пропускания и показателя ослабления стекла делятся на две категории. Пропускание стекол первой категории выше, чем второй, в среднем на 5%.

Температурное изменение пропускания определяется положением фундаментальных полос поглощения. В области прозрачности величина пропускания не изменяется.

Значения коэффициента пропускания τ_{λ} , показателя ослабления ε_{λ} (см^{-1}) и поправки на отражение от обеих поверхностей детали $D_{\rho m}$ приведены в табл. 6.5. Спектральные кривые коэффициентов пропускания представлены на рис. 6.2–6.4. Толщина контрольных образцов основных марок стекол 10 мм, коэффициент пропускания светофильтров ИКС27 и ИКС33 определяются при толщине 3 мм, т.е. близкой к наиболее часто используемой рабочей толщине светофильтров.

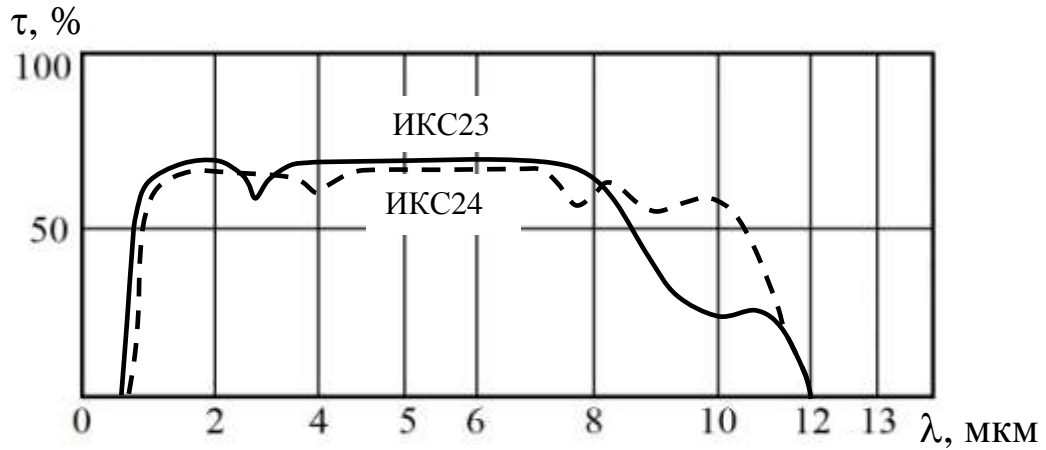


Рис. 6.2. Спектральные кривые коэффициентов пропускания светофильтров ИКС23 и ИКС24

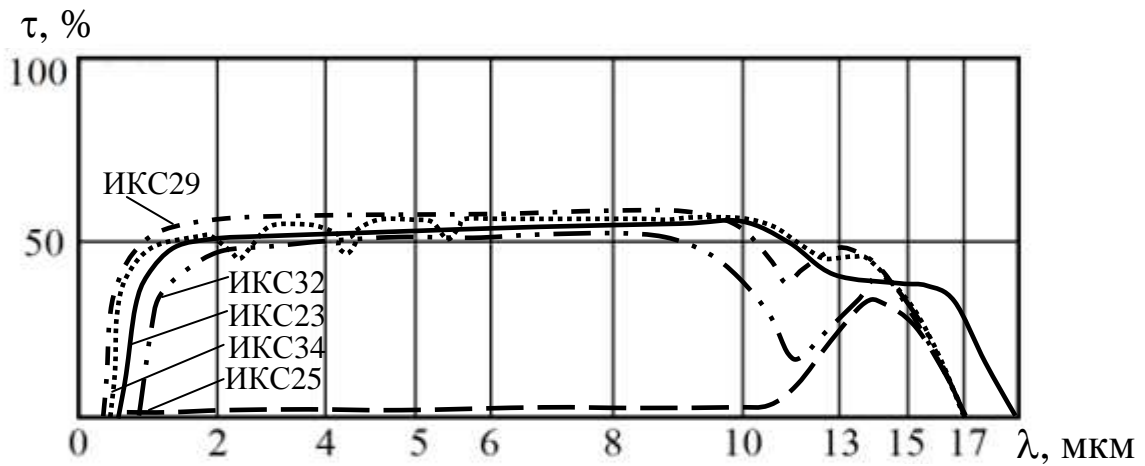


Рис. 6.3. Спектральные кривые коэффициентов пропускания светофильтров ИКС23, ИКС25, ИКС29, ИКС32 и ИКС34

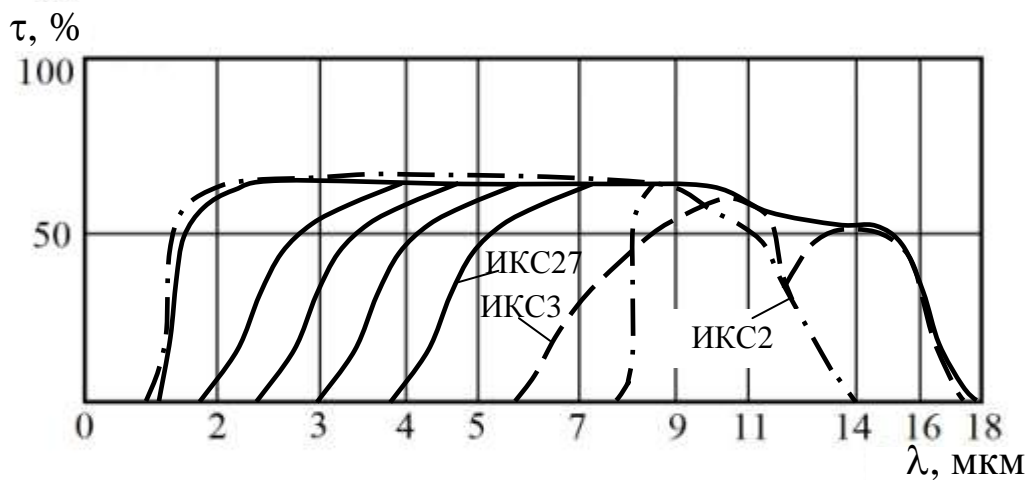


Рис. 6.4. Спектральные кривые коэффициентов пропускания светофильтров ИКС27, ИКС28 и ИКС33

Таблица 6.5. Спектральные характеристики бескислородных инфракрасных оптических стекол

Марка стекла	λ , мкм	τ_λ	ε_{λ} , см ⁻¹	$D_{\rho m}$
ИКС23	1,4	0,66	0,02	0,156
	2,0	0,68	0,02	0,154
	3,0	0,60	0,07	0,151
	4,0–7,5	0,68	0,02	0,150
	8,0	0,65	0,05	0,148
	9,0	0,42	0,23	0,148
ИКС24	1,4	0,63	0,05	0,152
	2,0–3,5	0,65	0,05	0,150
	4,0	0,60	0,07	0,148
	4,5–7,0	0,67	0,03	0,148
	7,8	0,55	0,11	0,146
	10,0	0,58	0,09	0,145
ИКС28	2,0	0,60	0,03	0,190
	4,0–8,0	0,63	0,02	0,186
	9,0	0,60	0,04	0,185
	10,0	0,56	0,07	0,185
	11,0	0,53	0,09	0,184
	12,0	0,50	0,12	0,184
ИКС32	2,0	0,53	0,05	0,226
	3,0–10,0	0,60	0,01	0,220
	11,0	0,56	0,03	0,218
	12,0	0,35	0,24	0,218
	14,0	0,40	–	–
ИКС29	2,0	0,60	0,04	0,178
	2,8	0,57	0,07	0,177
	3,5	0,62	0,03	0,176
	4,5	0,57	0,07	0,176
	5,5	0,65	0,01	0,175
	6,3	0,62	0,03	0,175
	7,0–11,0	0,65	0,01	0,174
	12,0	0,60	0,05	0,173
	13,0–14,0	0,51	0,13	0,172
ИКС34	1,4	0,60	0,04	0,180
	2,0	0,62	0,03	0,177
	3,0–11,0	0,65	0,02	0,174
	12,5	0,45	0,17	0,172
	14,0	0,55	0,09	0,171
ИКС25	2,0	0,56	0,05	0,199
	3,0	0,60	0,02	0,197
	4,0–12,0	0,61	0,02	0,195
	14,0	0,43	0,16	0,193
	16,0	0,43	–	–
ИКС27	6,0–10,0	0,63	0,06	0,184

Марка стекла	λ , мкм	τ_λ	ε_λ , см ⁻¹	$D_{от}$
ИКС33	10,0–12,0	0,60	0,15	0,183
	13,0	0,50	0,12	0,181

Коды ОКП бескислородных инфракрасных оптических стекол и характеристики их свойств: плотности ρ (кг·дм⁻³); модуля упругости $E \cdot 10^{-7}$ (Па); прочности на изгиб $\sigma \cdot 10^{-5}$ (Па); оптического коэффициента напряжения $B \cdot 10^{12}$ (Па⁻¹) для $\lambda = 2,0$ мкм; микротвердости $H \cdot 10^{-7}$ (Па); относительной твердости по сошлифовыванию H_s ; коэффициента поперечной деформации μ ; химической устойчивости к влажной атмосфере и кислотоустойчивости, значения температурного коэффициента линейного расширения $\alpha_t \cdot 10^7$ (°C⁻¹) для температур в диапазонах от –60°C до +20°C и от +20°C до температуры стеклования T_s (°C); температуры размягчения $T_{разм.}$ (°C); теплопроводности $\lambda \cdot 10$ (Вт·м⁻¹·°C⁻¹); удельной теплоемкости $C \cdot 10^{-4}$ (Дж·кг⁻¹·°C⁻¹); температуропроводности $\lambda \cdot 10^8$ (м²·с); максимальной температуры эксплуатации $T_э$ (°C), соответствующей вязкости 10^{17} Па·с приведены в табл. 6.6.

Таблица 6.6. Физико-химические свойства бескислородных инфракрасных оптических стекол

Марка стекла	Код ОКП	ρ , кг·дм ⁻³	$E \cdot 10^{-7}$, Па	$\sigma \cdot 10^{-5}$, Па	$B \cdot 10^{12}$, Па ⁻¹	$H \cdot 10^{-7}$, Па
ИКС23	44 9278 1000	3,32	1568	196	–10,20	147
ИКС24	44 9278 2000	3,89	1868	196	–3,260	196
ИКС28	44 9278 6000	4,43	1764	196	–27,03	147
ИКС29	44 9278 7000	4,74	1828	196	–22,44	157
ИКС34	44 9279 2000	4,47	2254	245	–10,00	245
ИКС32	44 9279 0000	5,66	2715	196	–20,40	206
ИКС25	44 9278 3000	4,72	1868	196	–31,62	147
ИКС27	44 9278 5000	4,89	1960	196	–	186
ИКС33	44 9279 1000	4,97	2009	196	–	147

Таблица 6.6 (продолжение)

Марка стекла	H_S	μ	$\varepsilon(f, t)$	$\operatorname{tg}\delta \cdot 10^4$	$\rho, \text{ Ом}\cdot\text{см}$		$\nu_\lambda,$ угл. $\text{мин}\cdot\text{А}^{-1}$	Химическая устойчивость	
					20°C	150°C		к влажной атмо- сфере	кислото- устойчи- вость
ИКС23	0,13	0,31	7,9	2,8	$1,2 \cdot 10^{17}$	–	0,065	с	1
ИКС24	0,11	0,28	7,5	1,6	$2,5 \cdot 10^{14}$	–	0,151	с	1
ИКС28	0,14	0,29	9,9	5,5	$8,0 \cdot 10^{12}$	$6,0 \cdot 10^7$	0,120	с	1
ИКС29	0,15	0,28	9,8	5,0	$4,0 \cdot 10^{13}$	$2,5 \cdot 10^8$	0,122	с	1
ИКС34	0,15	0,24	9,4	6,5	–	–	0,116	с	1
ИКС32	0,12	0,26	22,1	6,7	$8,9 \cdot 10^9$	–	0,120	с	1
ИКС25	0,12	0,29	10,3	6,5	$3,2 \cdot 10^{11}$	$1,3 \cdot 10^7$	0,170	с	1
ИКС27	0,14	0,28	11,6	29,0	$3,3 \cdot 10^{15}$	$2,0 \cdot 10^9$	–	с	1
ИКС33	0,14	0,28	10,8	36,0	–	–	–	с	1

Таблица 6.6 (продолжение)

Марка стекла	$\alpha_t \cdot 10^7, \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$		$T_S,$ $^\circ\text{C}$	$T_{\text{разм.}},$ $^\circ\text{C}$	$\lambda \cdot 10,$ $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	$C \cdot 10^{-4},$ $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	$\lambda \cdot 10^8,$ $\text{м}^2 \cdot \text{с}$	$T_\Sigma,$ $^\circ\text{C}$
	от –60 до +20	от 20 до T_S						
ИКС23	205	246	150	200	0,333	0,046	19	100
ИКС24	162	182	220	270	0,375	0,054	20	160
ИКС28	197	220	150	200	0,347	0,036	21	110
ИКС29	183	220	150	200	0,368	0,041	20	110
ИКС34	114	125	350	385	0,300	–	–	250
ИКС32	133	147	210	255	0,275	0,030	16,5	130
ИКС25	197	220	150	190	0,343	0,038	21	100
ИКС27	–	177	220	270	0,275	0,033	17	170
ИКС33	–	225	140	185	0,280	–	–	70

Основные назначения бескислородных инфракрасных оптических стекол указаны в табл. 6.7. По диапазону прозрачности стекла разделяются на три группы: стекла, прозрачные в области спектра 0,7–1,1 мкм (ИКС23, ИКС24); стекла, прозрачные в области спектра 1–17 мкм (ИКС28, ИКС29, ИКС34, ИКС32, ИКС25); светофильтры (ИКС27, ИКС33).

Таблица 6.7. Основные назначения бескислородных инфракрасных оптических стекол

Марка стекла	Назначение
ИКС23	Линзовый объектив, оптический клин, призма, защитная пластина, колпак для диапазона длин волн 0,7–9 мкм
ИКС24	Линзовый объектив, оптический клин, призма, защитная пластина, колпак для диапазона длин волн 0,8–11 мкм

Марка стекла	Назначение
ИКС28	Линзовый объектив, оптический клин, призма, защитная пластина, колпак для диапазона длин волн 1,2–12,5 мкм. Может быть использован в качестве фильтра для диапазона 8–12,5 мкм при нанесении интерференционных покрытий
ИКС29, ИКС34	Линзовый объектив, оптический клин, призма, защитная пластина, колпак для диапазона длин волн 1,0–15,5 мкм
ИКС32	Линзовый объектив, оптический клин, призма, защитная пластина, колпак для диапазона длин волн 1,5–15,5 мкм
ИКС25	Линзовый объектив, оптический клин, призма, защитная пластина, колпак для диапазона длин волн 1,5–17 мкм
ИКС27	Светофильтр со смещающейся границей пропускания в диапазоне длин волн 1,7–3,7 мкм, прозрачен до 16 мкм
ИКС33	Светофильтр для диапазона длин волн 7,5–16,5 мкм

Положение коротковолновой границы стекла ИКС27 смещается путем термообработки в пределах 1,7–3,7 мкм и может быть заранее задано заказчиком, ИКС33 является стеклом-фильтром для третьего атмосферного окна (8,0–12,0 мкм).

Стекло ИКС28 также может быть использовано в качестве фильтра для третьего атмосферного окна: его длинноволновая граница пропускания соответствует прозрачности атмосферы, смещение коротковолновой границы до 8 мкм достигается отражающими и просветляющими покрытиями. Интегральное пропускание фильтра толщиной 8–10 мкм в диапазоне 8,0–12,0 мкм составляет 60%.

7. ЛАЗЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Если амплитуда, частота, фаза, направление распространения и поляризация электромагнитной волны постоянны или изменяются, но не хаотически, а упорядоченно, по определенному закону, то такая волна когерентна [27]. Строго монохроматическая волна всегда когерентна. Взаимная когерентность двух немонахроматических волн означает, что они обладают одинаковым набором частот, а разность их фаз постоянна во времени. До появления лазеров можно было генерировать когерентные радиоволны, но невозможно было генерировать когерентные световые волны. Можно было усиливать слабые радиоволны, сохраняя все их свойства (что особенно важно в технике передачи информации), но не существовало усилителей света. И то, и другое стало возможным после создания лазеров. Для того, чтобы понять какими свойствами должны обладать лазерные материалы, необходимо иметь представление о том, что такое лазер и какие физические законы и принципы положены в основу его устройства и функционирования.

Резонансные свойства отдельных атомов и молекул, а также кристаллов, которые как было хорошо известно, могут избирательно излучать или поглощать свет определенной длины волны, к концу 50-х годов прошлого столетия были достаточно хорошо изучены.

Как атомы, так и молекулы и кристаллы являются сложными микросистемами, состоящими из ядер и электронов. Энергия относительно движения частиц, составляющих атомы, может принимать только строго определенные значения. Эти значения энергии $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_k$ называются уровнями энергии. Система энергетических уровней составляет энергетический спектр атома. Уровень с минимальной энергией называется основным, а остальные – возбужденными. Энергетический спектр изолированного атома определяется его структурой. Число атомов, обладающих одинаковой энергией, называется населенностью уровня.



Рис. 7.1. Энергетический спектр атома

Если атому, находящемуся на основном уровне ε_1 , сообщить энергию, он может перейти на один из возбужденных уровней, показанных на рис. 7.1. Наоборот, возбужденный атом может самопроизвольно (спонтанно) перейти на один из нижележащих уровней, излучив при этом определенную порцию энергии в виде кванта света. Если излучение света происходит при переходе атома с уровня энергии ε_m на уровень энергии ε_n , то частота испускаемого кванта света ν_{\min} :

$$\nu_{\min} = \frac{1}{h}(\varepsilon_m - \varepsilon_n),$$

где h – постоянная Планка, равная $6,62491 \cdot 10^{-27}$ эрг·с. С постоянной Планка связано наличие у частицы волновых свойств, так как импульсу p всякой частицы соответствует длина волны $\lambda = \frac{h}{p}$, а

энергии частицы – частота ν : $\varepsilon = h\nu$. Если $p \gg h$, то $\lambda \rightarrow 0$ и волновые свойства частицы становятся несущественными.

Спонтанные процессы излучения происходят в нагретых телах и светящихся газах: нагревание или электрических разряд переводят часть атомов в возбужденное состояние; переходя в нижние состояния, они излучают свет. В процессе спонтанных переходов атомы излучают свет независимо один от другого. Кванты света хаотически испускаются атомами в виде волновых цугов. Цуги не «согласованы» друг с другом во времени, т.е. имеют различную фазу. Поэтому спонтанное излучение некогерентно.

Наряду со спонтанным излучением возбужденного атома существует вынужденное (или индуцированное) излучение: атомы

излучают под действием внешнего быстропеременного электромагнитного поля, например, света. При этом оказывается, что под действием внешней электромагнитной волны атом излучает вторичную волну, у которой частота, поляризация, направление распространения и фаза полностью совпадают с характеристиками внешней волны, действующей на атом. Чтобы осуществить это практически, необходимо удовлетворить определенным условиям. Во-первых, необходим резонанс – совпадение частоты падающего света с одной из частот ν_{mn} энергетического спектра атома. О выполнении резонансного условия позаботилась сама природа: если световой квант испущен спонтанно при переходе атома с более высокого уровня ϵ_m на уровень ϵ_n , то его частота равна ν_{mn} и будет соответствовать переходу между аналогичными уровнями другого такого же атома, так как энергетический спектр одинаковых атомов абсолютно идентичен. В дальнейшем вынужденное излучение возбужденных атомов порождает целую лавину световых квантов, во всем подобных первичному кванту. В результате совокупность атомов испустит интенсивную когерентную световую волну, т.е. будет осуществлена генерация когерентного света. Другое условие связано с населенностью различных уровней. Наряду с вынужденным излучением света атомами, находящимися на верхнем уровне ϵ_m , происходит также резонансное поглощение атомов, населяющих нижний уровень ϵ_n . Атом, находящийся на нижнем уровне ϵ_n , поглощает световой квант, переходя при этом на верхний уровень ϵ_m . Для возникновения генерации необходимо, чтобы число атомов на верхнем уровне N_m было больше числа атомов на нижнем уровне N_n , между которыми происходит переход. Конечно, можно использовать лишь ту пару уровней, между которыми возможен переход, так как не все переходы между любыми двумя уровнями разрешены природой.

В естественных условиях на более высоком уровне при любой температуре меньше частиц, чем на более низком. Поэтому любое тело, сколь угодно сильно нагретое, не будет генерировать свет за счет вынужденных переходов.

Для возбуждения генерации когерентного света необходимо принять специальные меры, чтобы из двух выбранных уровней верхний был заселен больше, чем нижний. Состояние вещества, в котором число атомов на одном из уровней с более высокой энергией больше числа атомов на уровне с меньшей энергией, называется активным или состоянием с инверсией (обращением) населенностей.

Таким образом, для возбуждения генерации когерентного света необходима инверсия населенностей для той пары уровней, переход между которыми соответствует частоте генерации. Для примера рассмотрим, как эта проблема решается в рубиновом лазере.

Первым квантовым генератором света был рубиновый лазер, созданный в 1960 году. В дальнейшем появилось много других лазерных материалов, но остается бесспорным факт, что рубин по своим физическим и механическим свойствам был и остается одним из лучших лазерных материалов.

Рубин – это твердое кристаллическое вещество. Основой его является корунд – диэлектрический кристалл окиси алюминия (Al_2O_3). Рубином он становится тогда, когда небольшую часть атомов Al в этом кристалле заменяют ионы хрома Cr^{+++} . Содержание атомов Cr в кристалле невелико (0,05%). В рубине, обычно применяемом в лазерах, на каждый см^3 кристалла переходится около 10^{19} атомов Cr. Это составляет примерно одну десятитысячную от полного числа атомов. И тем не менее именно с введением атомов Cr кристалл принимает характерный для рубина красный цвет. Цвет кристалла обусловлен расположением энергетических уровней атомов Cr в рубине.

В кристалле на атомы Cr действует сильное электрическое поле, создаваемое атомами O и Al. Вклад самих атомов Cr в это поле ничтожно мал, так как мала их концентрация. Поэтому взаимодействие атомов Cr друг с другом очень слабо. Их энергетический спектр соответствует спектру свободного атома Cr, помещенного в сильное электрическое поле кристалла, расщепляющее уровни атома. Энергетический спектр Cr в рубине был изучен задолго до создания лазера. Рубин уже применялся в квантовой электронике для создания квантовых парамагнитных усилителей радиодиапазона, а еще раньше для исследования люминесценции.

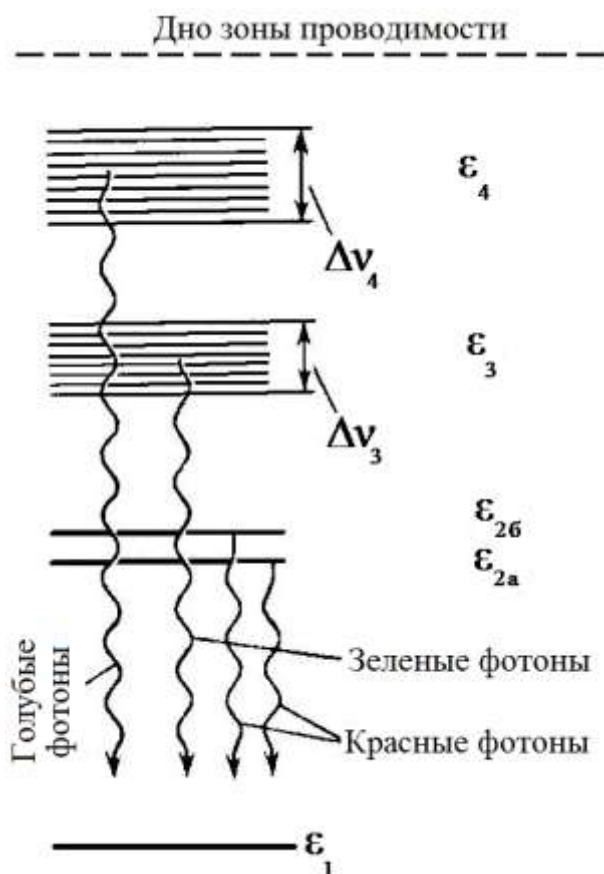


Рис. 7.2. Энергетический спектр примесных атомов Cr в рубине

Структура уровней Cr в рубине показана на рис. 7.2. Из рисунка видно, что имеется основное состояние ϵ_1 и два возбужденных состояния ϵ_{2a} и ϵ_{2b} . Это узкие уровни; переходы между ними и уровнем ϵ_1 и используются для генерации света. Кроме узких уровней ϵ_1 , ϵ_{2a} и ϵ_{2b} имеются две сравнительно широкие полосы энергий ϵ_3 и ϵ_4 . Длина волны излучения, соответствующая переходам между уровнями $\epsilon_2 - \epsilon_1 \sim 7000 \text{ \AA}$. Это – красный свет. Переходы между уровнями полосы ϵ_3 и уровнем ϵ_1 лежат в зеленом интервале спектра, а переход $\epsilon_4 - \epsilon_1$ – в голубом.

Если атом Cr возбудить, переведя его из основного состояния в полосу ϵ_3 или ϵ_4 , то за очень короткое время ($\sim 10^{-8} \text{ с}$) он перейдет из этих полос на один из уровней ϵ_2 . При переходе на уровень ϵ_2 атом Cr не излучает. Его энергия тратится на возбуждение колебаний кристаллической решетки рубина. Возможность возвращения атома из полос ϵ_3 и ϵ_4 снова на уровень ϵ_1 хотя и существует, но скорость этого процесса пренебрежимо мала по сравнению со скоростью перехода атомов на уровни ϵ_{2a} , ϵ_{2b} . На уровнях ϵ_2 атом «живет»

10^{-3} с, что по атомным масштабам является большим временем. Такое большое время жизни позволяет накапливать атомы на уровнях ε_2 и, если достаточно быстро переводить атомы с уровня ε_1 в полосы ε_3 или ε_4 , то на уровень ε_2 можно перевести более половины атомов. В таком случае уровни ε_2 окажутся более населенными, чем уровень ε_1 , т.е. возникает инверсия населенности по отношению к переходам с уровней ε_{2a} и ε_{2b} на уровень ε_1 .

Переход атомов Cr с уровня ε_1 на уровни ε_3 и ε_4 можно осуществить, заставляя их поглощать свет. Для перевода на эти уровни атомов Cr или, как говорят, для накачки рубинового лазера, можно использовать лампы, подобные лампам-вспышкам, применяемым в фотографии, только более мощные.

Как уже отмечалось, свет вызывает в веществе одновременно два процесса: поглощение света невозбужденными атомами и вынужденное испускание света возбужденными атомами. Если оба процесса происходят между двумя одинаковыми уровнями, то они протекают с одинаковой скоростью. Поэтому максимум того, что может в этом случае сделать накачка – это уровнять населенности. В действительности же имеется еще и спонтанное излучение, которое склоняет чашу весов в пользу уровня с меньшей энергией. Таким образом, в двухуровневой системе под действием световой накачки получить инверсию населенностей невозможно. Необходим третий уровень как своеобразный «перевалочный пункт».

Теоретически, конечно, можно было бы воспользоваться и узким третьим уровнем ε_{2b} , но практически – невозможно, лампа-вспышка излучает свет, близкий к белому, т.е. с широким спектром частот. Во всем этом широком частотном интервале мощность лампы может быть весьма значительной, но если из спектра лампы «вырезать» фильтром узкий интервал, то мощность излучения в малом спектральном интервале окажется малой. В таких случаях говорят, что лампа обладает малой спектральной плотностью света, которая соответствует спектральной плотности теплового излучения тела, нагретого до температуры 8000–10000К. Чем больше полоса поглощения атомов в кристалле, тем большая часть световой энергии, испускаемой лампой, используется.

Наличия широких полос в спектре ионов Cr^{+++} в рубине является «третьим уровнем» – благоприятным обстоятельством для создания лазера. Энергетические полосы Cr в рубине позволяют использовать 15% света лампы-вспышки. Узкие энергетические уровни дали бы

возможность использовать лишь доли процента света. С другой стороны, переход атомов Cr из широких полос ε_3 и ε_4 на узкие уровни ε_2 дает возможность концентрировать атомы в небольшом интервале энергии, что улучшает степень монохроматичности генерируемого света. Таким образом, система уровней Cr в рубине весьма благоприятна для создания лазера с помощью накачки мощной лампой-вспышкой.

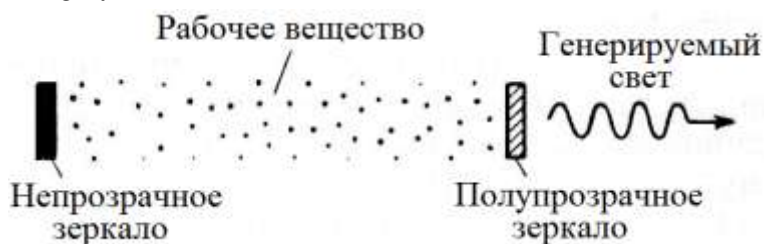


Рис. 7.3. Для возбуждения генерации когерентного света активное вещество помещают между двумя зеркалами

Вторая проблема, которую необходимо решить для создания лазера, – это проблема обратной связи. Для того чтобы свет управлял излучением атомов необходимо, чтобы часть излучаемой световой энергии все время оставалась внутри рабочего вещества, вызывая вынужденное излучение света все новыми и новыми атомами. Это осуществляется с помощью зеркал. В простейшем случае рабочее вещество помещается между двумя зеркалами, как показано на рис. 7.3, одно из которых полупрозрачно. Испущенная в каком-либо месте в результате спонтанного перехода атома световая волна усиливается за счет вынужденного испускания при распространении ее через рабочее вещество. Дойдя до полупрозрачного зеркала, свет частично пройдет через него. Эта часть световой энергии излучается лазером во вне и может быть использована. Часть же света, отразившаяся от полупрозрачного зеркала, даст начало новой лавине световых квантов. Эта лавина не будет отличаться от предыдущей в силу свойств вынужденного испускания. Для того чтобы возникла генерация света, усиление в активном веществе должно быть достаточно большим. Оно должно превышать некоторое значение, называемое пороговым. Действительно, пусть часть светового потока, падающего на полупрозрачное зеркало, отразилась назад. Усиление на двойном расстоянии между зеркалами (один проход) должно быть таким, чтобы на полупрозрачное зеркало вернулась световая энергия, не меньшая, чем в предыдущий раз. Только тогда световая волна начнет нарастать от прохода к проходу. Если же этого нет, то в течение второго прохода полупрозрачного зеркала достигнет меньшая

энергия, чем в предыдущий момент, в течение третьего – еще меньшая и т.д. Процесс ослабления будет продолжаться до тех пор, пока световой поток не иссякнет полностью. Вполне очевидно, что чем меньше коэффициент отражения полупрозрачного зеркала, тем большим пороговым усилением должно обладать рабочее вещество (лазерный материал).

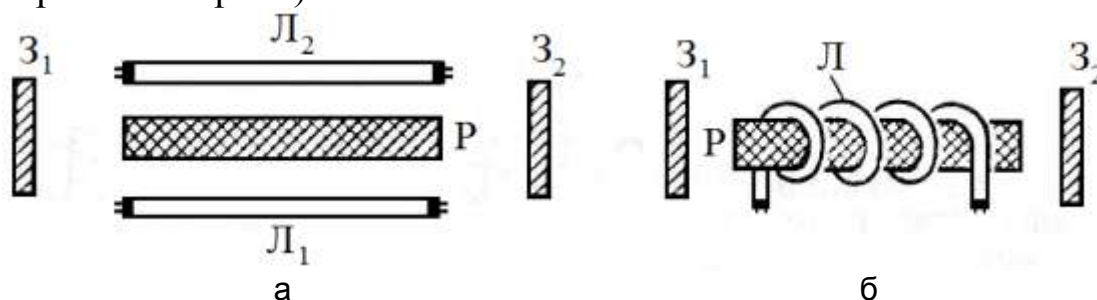


Рис. 7.4. Простейшие типы рубинового лазера

Схема простейшего типа рубинового лазера представлена на рис. 7.4. Рубиновый стержень помещается между зеркалами Z_1 и Z_2 . Лампы-вспышки L_1 и L_2 , осуществляющие накачку лазера, размещаются либо вдоль рубинового стержня (рис. 7.4, а), либо лампа в виде спирали L окружает стержень (рис. 7.4, б). Рубиновый стержень и лампы окружаются отражающим кожухом для лучшего использования света ламп. Генерация света развивается в пространстве между зеркалами вдоль кристалла рубина.

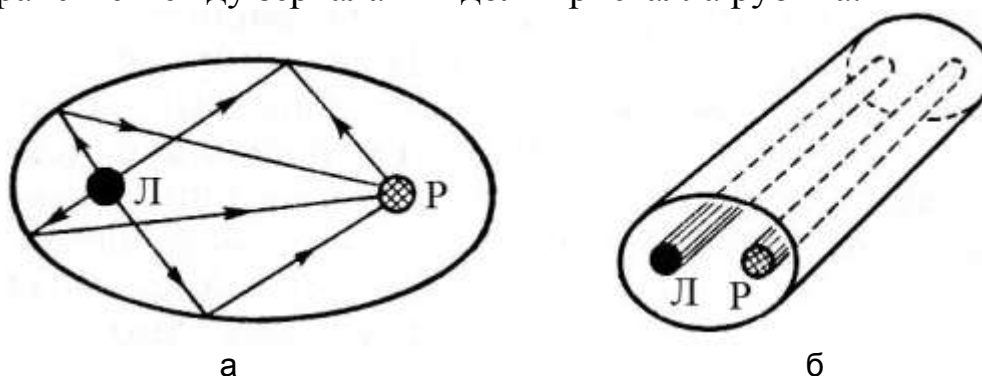


Рис. 7.5. Лазер, у которого рубиновый стержень Р и лампа Л расположены в фокальных линиях отражателя – эллиптического цилиндра

Часто в качестве отражателя применяется эллиптический цилиндр, как показано на рис. 7.5, в одной фокальной линии которого помещается лампа-вспышка L , а в другой – рубиновый стержень P . Этим достигается более эффективное использование света накачки. Иногда для увеличения энергии накачки вместо одной лампы применяют две или четыре. В таком случае используются совмещенные эллиптические отражатели (рис. 7.6).

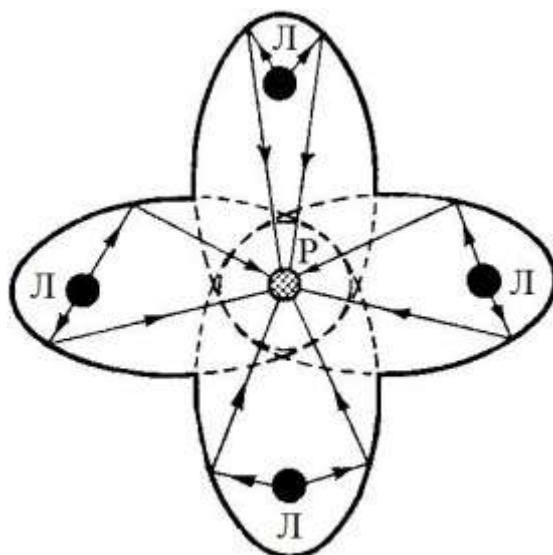


Рис. 7.6. Лазер с четырьмя совмещенными эллиптическими отражателями и четырьмя лампами накачки

Наиболее распространен импульсный режим работы рубиновых лазеров: лампа-вспышка выдает импульс света длительностью 10^{-3} с. В соответствии с этим рубиновый лазер излучает импульс когерентного света длительностью, несколько меньшей, чем 10^{-3} с. Последнее связано с тем, что нужно некоторое время для создания инверсии населенности, после которой начинается генерация. Генерация будет длиться до тех пор, пока интенсивность света лампы-вспышки не станет меньше величины, уже недостаточной для поддержания инерции.

С помощью существующих ламп-вспышек «перекачать» все атомы на уровень ε_2 было бы легко, если бы в рубине не возникала генерация. Лампа-вспышка легко переводит атомы Cr в возбужденное состояние до тех пор, пока не возникает инверсия населенности, т.е. превышение числа возбужденных атомов над невозбужденными. Однако уже при небольшом превышении начинается генерация. Она-то и препятствует переводу всех атомов в возбужденное состояние: генерация, начинающаяся сразу же после того, как чуть больше половины атомов Cr переведено в возбужденное состояние, «сбрасывает» атомы снова в основное состояние. Процесс сброса возбужденных атомов Cr в основное состояние в режиме генерации происходит столь интенсивно, что с ним лампа-вспышка справиться не может.

Перекачку всех атомов можно осуществить, если на некоторое время убрать из системы обратную связь, т.е. отключить зеркала, устранив тем самым возможность генерации. После этого можно

перекачать атомы Cr в возбужденное состояние ϵ_2 , в которое они будут находиться в течение 0,002 с. За это время надо успеть вновь включить зеркала и получить мощную вспышку лазера.

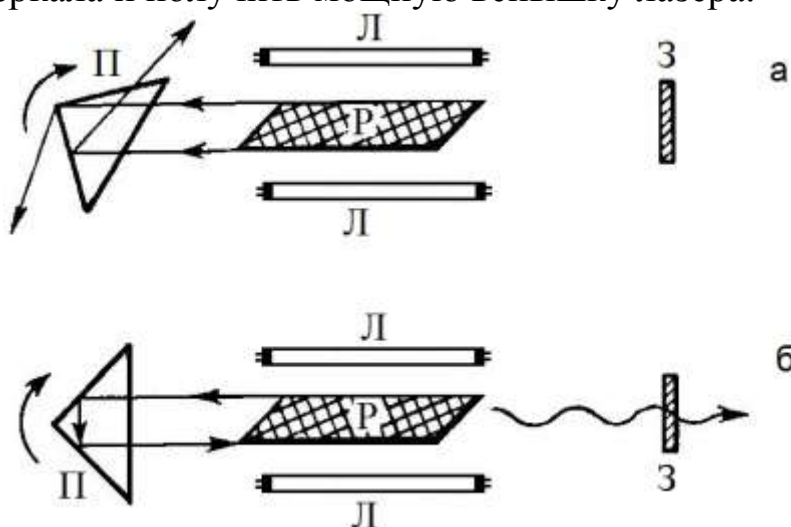


Рис. 7.7. Включение и выключение обратной связи в лазере с помощью вращающейся призмы П: обратная связь выключена, все излучение выходит наружу (а); обратная связь включена (б)

Практические задачу быстрого включения и выключения зеркал удалось решить путем применения ряда методов. Наибольшее распространение получили три из них. Первый метод состоит в том, что рубиновый стержень, накачиваемый лампами-вспышками, помещается между неподвижным зеркалом З и вращающейся призмой П, закрепленной на оси двигателя (рис. 7.7). При произвольном положении призмы (рис. 7.7, а) в лазере нет обратной связи: лучи, отражаясь от граней призмы, выходят из системы, при этом генерация отсутствует. В эти моменты происходит накачка рубинового стержня лампой-вспышкой, т.е. переброс частиц с уровня ϵ_1 в полосы ϵ_3 и ϵ_4 и через них на уровень ϵ_2 . Рис. 7.7, б демонстрирует то единственное положение призмы при ее вращении, когда отраженные лучи опять попадают в стержень рубина. К этому моменту перекачка частиц с уровня ϵ_1 на уровни ϵ_2 должна быть закончена и начинается быстрое развитие генерации. Призма при этом продолжает быстро вращаться, но лазерный импульс успевает развиваться за столь малое время, что призма не успевает существенно изменить свое положение. После высвечивания запасенной энергии лазер снова готов к накачке.

Однако оказывается, что отключение зеркала или призмы не исключает полностью обратную связь. Световая волна, падающая на границу раздела двух сред, претерпевает частичное отражение.

Амплитуда волнового фронта, отраженного поверхностью раздела, определяется формулами Френеля:

– колебание электрического вектора волны лежит в плоскости падения:

$$R_{\parallel} = -\frac{\operatorname{tg}(\theta_i - \theta_t)}{\operatorname{tg}(\theta_i + \theta_t)} A_{\parallel};$$

– колебание электрического вектора волны лежит в плоскости, перпендикулярной плоскости падения:

$$R_{\perp} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} A_{\perp},$$

где A_{\parallel} , A_{\perp} – амплитуда падающей волны.

При нормальном падении волны на поверхность раздела амплитуда

$$R_{\parallel} = -\frac{n-1}{n+1} A_{\parallel}; \quad R_{\perp} = -\frac{n-1}{n+1} A_{\perp}.$$

Показатель преломления рубина $n=1,8$. При этом при $A_{\parallel} = A_{\perp}$:

$$R = R_{\parallel} = R_{\perp} = \frac{0,8}{1,8} \approx 0,444. \text{ Поэтому при очень мощной накачке и,}$$

стало быть, большой инверсной разности населенностей ΔN_2 может возникнуть генерация и в отсутствие зеркал. Чтобы избежать этого, торцы кристалла срезают под определенным углом, при котором световая волна, падающая на границу раздела двух сред под углом Брюстера, проходит поверхность раздела без отражения. Угол Брюстера, определяемый из условия $R_{\parallel} = 0$, равен

$$\operatorname{tg} \lambda = n.$$

Более быстрое включение обратной связи можно осуществить с помощью затвора в виде ячейки Керра. При этом стеклянная кювета, заполненная нитробензолом, помещается между обкладками электрического конденсатора. Под действием электрического поля конденсатора нитробензол приобретает способность изменять поляризацию света: поворачивать направление векторов электрического и магнитного поля светового луча. Если на пути излучения рубина поставить поляроид-пластинку, поглощающую свет той поляризации, которой обладает излучение рубина, и пропускающую свет с перпендикулярной поляризацией, то свет не будет достигать зеркала и обратная связь в системе будет включена. Если же подать напряжение на обкладке конденсатора (рис. 7.8), то

ячейка Керра, помещенная между стержнем рубина и поляроидом, повернет плоскость поляризации на некоторый угол, зависящий от длины кюветы. Подбирая длину ячейки и напряжение, можно добиться поворота плоскости поляризации на 90° . При этом излучение пройдет через поляроид, достигнет зеркала и отразится, т.е. обратная связь будет включена. Таким образом, пока выключено напряжение на обкладках конденсатора, обратная связь в системе отсутствует, и лампа может накачивать рубиновый кристалл. В момент, когда инверсия достигает максимума, подается напряжение на обкладки конденсатора, в результате чего включается обратная связь и лазер выдает мощный импульс света. Время включения обратной связи с помощью ячейки Керра мало (10^{-8} с), поэтому и длительность светового импульса лазера $\sim 10^{-8}$ с.



Рис. 7.8. Схема включения и выключения обратной связи с помощью затвора в виде ячейки Керра

Затвор в виде ячейки Керра удобен также и тем, что он позволяет управлять мощностью лазера. Подавая на конденсатор импульс напряжения в разные моменты времени относительно включения лампы-вспышки, можно получать импульсы света разной длительности и мощности. Можно регулировать также и скорость включения затвора. Вместо ячейки Керра может быть использована ячейка Поккельса, работающая по тому же принципу, но с анизотропным кристаллом вместо жидкости в электрическом поле. На практике используются вращающиеся призмы и ячейки Керра и Поккельса, эффект Фарадея и ряд других моментов.

Итак, для создания источника когерентного света необходимы, прежде всего, следующие условия:

1. необходимо рабочее вещество с инверсной населенностью. Только тогда можно получить усиление света за счет вынужденных переходов;
2. рабочее вещество следует поместить между зеркалами, которые осуществляют обратную связь;

3. усиление, даваемое рабочим веществом, а, следовательно, число возбужденных атомов или молекул в рабочем веществе должно быть больше порогового значения, зависящего от коэффициента отражения полупрозрачного зеркала.

При выполнении этих трех условий мы получим систему, способную генерировать когерентный свет, и называемую лазером или оптическим квантовым генератором (ОКГ). Слово «лазер» составлено из первых букв английской фразы: «Light amplification by stimulated emission of radiation», что означает: усиление света с помощью вынужденного излучения.

В лазерных системах находит применение большое количество лазерных материалов, подобных рубину. Это, прежде всего, стекло, в которое введены атомы неодима (Nd). Для создания лазера успешно применяется флюорит кальция (CaF_2), в который введены атомы диспрозия (Dy) или самария (Sm) и другие. Материалы, применяемые для создания лазера непрерывного режима, приведены в табл. 7.1, а основные характеристики лазерных материалов с примесью редкоземельных элементов приведены в табл. 7.2. Все эти вещества – твердые тела, рабочими в них являются атомы введенных примесей, уровни которых используются для возбуждения генерации за счет накачки лампой-вспышкой. Разные материалы дают световое излучение с различной длиной волны λ . Так, рубин излучает красный свет с $\lambda \sim 0,7$ мкм, неодимовое стекло дает ИК-излучение с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм, а флюорит кальция с диспрозием генерирует излучение еще более длинной волны $\sim 2,5$ мкм.

Таблица 7.1. Твердотельные лазеры непрерывного режима

Активное вещество	Длина волны λ , мкм	Температура T , К	Пороговая мощность $P_{\text{пор}}$, Вт	Выходная мощность P , Вт	Примечания
Рубин $\text{Al}_2\text{O}_3: \text{Cr}^{+++}$	0,6934 0,6943	77 300	850 ~ 1200	$4 \cdot 10^{-2}$ 1	Квазинепрерывный режим при мощности накачки $P_{\text{н}} \sim 840$ Вт
$\text{CaWO}_4: \text{Nd}^{+++}$	1,065 1,058	77 300	~ 1000	~ 1	
YAG*: Nd^{+++}	1,06	300	~ 500	1,5	При солнечной накачке $P = 1$ Вт,

Активное вещество	Длина волны λ , мкм	Температура T , К	Пороговая мощность $P_{\text{пор}}$, Вт	Выходная мощность P , Вт	Примечания
					при накачке светом дуг $P=200$ Вт
YAG: Cr⁺⁺⁺-Nd⁺⁺⁺	1,06	77 300	180 750	10	
Стекло: Nd⁺⁺⁺	1,06	300	1370	10	Квазинепрерывный режим при $P_{\text{н}}=900$ Вт. Получена генерация при солнечной накачке
CaMoO₄: Nd⁺⁺⁺	1,067	77	850	1–5	Квазинепрерывный режим при $P_{\text{н}}=530$ Вт
CaMoO₄: Nd⁺⁺⁺	1,061	300	1200		Квазинепрерывный режим при $P_{\text{н}}=800$ Вт
CaF₂: U⁺⁺⁺	2,613	77	250	1	
CaF₂: Dy⁺⁺⁺	2,36	27,77	100	0,3	$P_{\text{н}}=15$ Вт при $T=4,2$ К. Получена генерация при солнечной накачке
CaF₂: Tu⁺⁺⁺	1,116	27 4,2	1000 600		Квазинепрерывный режим при $P_{\text{н}}=100$ Вт
Er₂O₃: Tu⁺⁺⁺	1,934	77	500		
Er_{1,48} Y_{1,5}Al₅O₁₂: Tu⁺⁺⁺**	2,014	77	520		
YAG: Tu⁺⁺⁺	2,0132	77	315		
YAG: Cr⁺⁺⁺-Tu⁺⁺⁺	2,0132	77	160		
Er_{1,48} Y_{1,5}Al₅O₁₂: Ho⁺⁺⁺	2,0979	77	47		
YAG: Cr⁺⁺⁺-Ho⁺⁺⁺	2,0975 2,1223	77 77	210 250		
Er₂O₃: Ho⁺⁺⁺	2,121	77	200		
YAG: Yb⁺⁺⁺-Tu⁺⁺⁺- - Er⁺⁺⁺-Ho⁺⁺⁺	2,123	85	30	15	При $P_{\text{н}}=300$ Вт, КПД генератора 5%

* YAG – иттриево-алюминиевый гранат, химическая формула $Y_3Al_5O_{12}$;

** $Er_{1,48} Y_{1,5} Al_5 O_{12} : Tu^{+++}$ – иттриево-алюминиевый гранат, в котором половина атомов Y замещена Er и Tu в отношении 1,48:0,02.

Таблица 7.2. Основные характеристики лазерных материалов с примесью редкоземельных элементов

Материал	Температура, К	Расстояние между нижним уровнем перехода и основным уровнем, см ⁻¹	Длина волны λ, мкм
CaF₂: Sm⁺⁺⁺	20	263	0,7082
SrF₂: Sm⁺⁺⁺	4,2	260	0,6969
CaF₂: Tu⁺⁺⁺	20; 70	0	1,116
CaF₂: Dy⁺⁺⁺	27; 77	35	2,36
CaWO₄: Nd⁺⁺⁺	77	2000	1,0576; 1,0633 1,0641; 1,0650 1,066
	300	2000	1,0652; 1,0582
	77	471	0,9145
	77	4000	1,3372; 1,345 1,387
	300	4000	1,3392
SrWO₄: Nd⁺⁺⁺	77	2000	1,054; 1,0627 1,0607
	295	2000	1,063
SrMoO₄: Nd⁺⁺⁺	77	2000	1,059; 1,0611 1,0627; 1,0640 1,0652
	295	2000	1,0643; 1,0576
CaMoO₄: Nd⁺⁺⁺	77	2000	1,067
YGaG: Nd⁺⁺⁺	300	2000	1,0633
GdGaG: Nd⁺⁺⁺	300	2000	1,0633
YAG: Cr⁺⁺⁺-Nd⁺⁺⁺	300	2000	1,06
CaWO₄: Ho⁺⁺⁺	77	250	2,046; 2,059
CaF₂: Ho⁺⁺⁺	77		2,092
Ca(NbO₃)₂: Ho⁺⁺⁺	77		2,047
YAG: Ho⁺⁺⁺	77	462	2,0975; 2,0914
		518	2,1223
YAG: Cr⁺⁺⁺-Ho⁺⁺⁺	77	462	2,0975
		518	2,1223
Er_{1,48}Y_{1,5}Al₅O₁₂: Ho⁺⁺⁺	77	462	2,0979; 2,0917
		518	2,123
ErO₃: Ho⁺⁺⁺	77		2,121
CaWO₄: Tu⁺⁺⁺	77	325	1,911; 1,916
SrF₂: Tu⁺⁺⁺	77		1,972
Ca(NbO₃)₂: Tu⁺⁺⁺	77		1,91
YAG: Tu⁺⁺⁺	77	240	1,8834
		582	2,0132
Er₂O₃: Tu⁺⁺⁺	77		1,934
YAG: Cr⁺⁺⁺-Tu⁺⁺⁺	77	582	2,0132

Материал	Температура, К	Расстояние между нижним уровнем перехода и основным уровнем, см ⁻¹	Длина волны λ , мкм
	300	600	2,019
Er_{1,48}Y_{1,5}Al₅O₁₂: Tu⁺⁺⁺	77	228	1,880
		240	1,884
		582	2,014
CaWO₄: Pr⁺⁺⁺	20, 77, 90	377	1,0468
PLMoO₄: Nd⁺⁺⁺	295	2000	1,0586
CaF₂: Nd⁺⁺⁺	300	2000	1,0461
	15–77	2000	1,0448; 1,0457 1,0467; 1,0507 1,0481; 1,0650
SrF₂: Nd⁺⁺⁺	77	2000	1,0437
	295	2000	1,0370
BaF₂: Nd⁺⁺⁺	77	2000	1,060
LaF₃: Nd⁺⁺⁺	77	2000	1,0631; 1,0399
	295	2000	1,0633
CeF₃: Nd⁺⁺⁺	90	2000	1,0638
Y₂O₃: Nd⁺⁺⁺	77	2000	1,073; 1,078
Gd₂O₃: Nd⁺⁺⁺	77	2000	1,0789; 1,0776
	300	2000	1,0789; 1,0741
La₂O₃: Nd⁺⁺⁺	77	2000	1,079
Ca(NbO₃)₂: Nd⁺⁺⁺	77	2000	1,060
YAG: Nd⁺⁺⁺	77	2000	1,0612
	300	2000	2,0648
SrMoO₄: Pr⁺⁺⁺	77		1,047
LaF₃: Pr⁺⁺⁺	77		0,5985
Ca(NbO₃)₂: Pr⁺⁺⁺	77		1,04
CaWO₄: Er⁺⁺⁺	77	375	1,612
CaF₂: Er⁺⁺⁺	77		1,617
	77	~12400	1,726; 1,715; 1,696
	77	~11000	1,26
Ca(NbO₃)₂: Er⁺⁺⁺	77		1,61
YAG: Er⁺⁺⁺	77	525	1,6602; 1,6452
Y₂O₃: Eu⁺⁺⁺	220	859	0,6113
YAG: Yb⁺⁺⁺	77	623	1,0296
Стекло: Nd⁺⁺⁺	300	2000	1,06
	80	0	0,918
	300	4000	1,37; 1,401
Стекло: Yb⁺⁺⁺	77		1,015
Стекло: Ho⁺⁺⁺	77		1,95
Стекло: Gd⁺⁺⁺	77		0,3125
Стекло: Yb⁺⁺⁺-Er⁺⁺⁺	300	0	1,5426
Стекло: Nd⁺⁺⁺-Yb⁺⁺⁺	77		1,018

Неодимовое стекло обладает некоторым преимуществом перед рубином. Изготовить однородный стержень из неодимового стекла для лазера проще, чем из рубина. Его можно сделать значительно большего размера, как по длине, так и по сечению. Если обычно применяемые рубиновые стержни имеют длину $\sim 15\text{--}20$ см и диаметр $0,3\text{--}1,5$ см, то стеклянные стержни могут достигать длины $0,5\text{--}1$ м и диаметра до 5 см. Неодимовое стекло обладает лучшей оптической прозрачностью, чем рубин, т.е. в нем меньше паразитных потерь света. Ширина полос у него тоже несколько больше, чем у рубина, что приводит к большему КПД. Однако благодаря все улучшающемуся качеству рубиновых стержней его оптическая прозрачность все больше приближается к прозрачности неодимового стекла. Главное же достоинство рубина – высокая прозрачность. Рубиновые стержни выдерживают большие удельные мощности генерируемого света, чем неодимовое стекло. Установлено, что при длительности импульса $10^{-8}\text{--}10^{-9}$ с рубин выдерживает мощности до $3\text{--}4 \cdot 10^9$ Вт на каждый см^2 поперечного сечения стержня, а неодимовое стекло только $1\text{--}1,5 \cdot 10^9$ Вт.

Таким образом, если от лазера, работающего в обычном режиме, хотят получить большую энергию светового импульса, то целесообразно использовать большие стержни неодимового стекла, дающие возможность получать от одного кристалла $100\text{--}1000$ Дж за импульс длительностью в доли секунды. Это соответствует мощности до 1 МВт. Если же необходимо иметь большие мощности от генератора меньших размеров, работающего в режиме гигантского импульса, то предпочтительнее использовать рубиновые лазеры.

Параметры отечественных неодимовых лазерных стекол, входящих в ОСТ 3-30-77 [28]: силикатных стекол ГЛС1, ГЛС2, ГЛС3, ГЛС5, ГЛС6, ГЛС7, ГЛС8, ГЛС9, ГЛС10, ГЛС14 и фосфатных стекол ГЛС21, ГЛС22, ГЛС23, ГЛС24, ГЛС25, ГЛС26, ГЛС27 и ГЛС32, приведены в каталоге [29]. В каталоге представлены те свойства неодимовых стекол, которые наиболее полно характеризуют материал как потенциальную активную среду для лазеров. В каталог не включены параметры, относящиеся к режиму усиления и генерации вынужденного излучения. Такой подход избран из тех соображений, что каждый из параметров – порог генерации, КПД, коэффициент усиления, ширина и положение спектра генерации, расходимость излучения – в сильнейшей степени зависит от условий работы активного элемента данного типа – размера в конкретном излучателе.

В каталоге представлены такие свойства, которые присущи стеклу данного химического состава при реальной технологии его производства, и отсутствуют параметры, случайным образом изменяющиеся от синтеза к синтезу и от образца к образцу (неактивное поглощение, пузырность, свильность, двулучепреломление и прочее), т.е. соответствующие качеству стекла, а не его свойствам.

Спектрально-люминесцентные свойства неодимового стекла в первую очередь определяют эффективность его использования в избранном типе излучателя. Потенциальная активная среда должна с максимальной эффективностью запасти на метастабильном уровне поглощенную энергию накачки для того, чтобы в заданной спектральной области осуществилось вынужденное излучение. Это определяет набор важнейших параметров среды: спектры поглощения и люминесценции, квантовый выход и время жизни метастабильного состояния, вероятность спонтанного излучения и сечение вынужденного перехода. Эти параметры включены в каталог.

Из оптических постоянных приведены значения показателя преломления для ряда длин волн ($n_F - 486,13$ нм, $n_e - 546,07$ нм, $n_D - 589,29$ нм, $n_C - 656,27$ нм, $n_{1060} - 1060$ нм, $n_{1530} - 1530$ нм), средней дисперсии $n_F - n_C$, коэффициента дисперсии v_D и нелинейного показателя преломления. Величина нелинейного показателя характеризует способность стекла к самофокусировке под воздействием мощных световых потоков.

Как правило, оптическая накачка активных элементов происходит в направлении, перпендикулярном направлению лазерного излучения. Из-за поглощения накачки в коротковолновых полосах активатора выделение тепла (стоксовы потери) в объеме активного элемента происходит неравномерно и возникает градиент температуры, перпендикулярный оси элемента. Кроме того, поскольку во многих случаях активный элемент принудительно охлаждается с поверхности, то можно считать, что градиент температуры в лазерном стекле в плоскости волнового фронта присутствует почти всегда. Расходимость лазерного излучения в таком случае определяется искажениями волнового фронта, вызванными этими изменениями температуры. Поэтому термооптические свойства лазерных стекол относятся к важнейшим.

При наличии температурных градиентов оптические искажения, возникающие в активных элементах из стекла, зависят от термооптических постоянных W , P и Q :

$$\begin{aligned}
 W &= \beta + \alpha(n-1), \\
 P &= \beta - \frac{\alpha E}{2(1-\mu)}(C_1 + 3C_2), \\
 Q &= \frac{\alpha E}{2(1-\mu)}B,
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} W \\ P \\ Q \end{aligned}} \right\}$$

где β – температурный коэффициент или изменение абсолютного показателя преломления стекла для излучения данной длины волны при изменении температуры на 1 град.: $\beta = \frac{dn}{dt}$; α – коэффициент температурного расширения; E – модуль упругости (модуль Юнга); μ – коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона); C_1 и C_2 – фотоупругие постоянные; B – оптический коэффициент напряжения: $B = C_1 - C_2$.

Физический смысл величины W состоит в том, что она определяется изменением оптического пути света при прохождении слоя стекла единичной толщины при изменении температуры на 1 град. Величина W определяет искажение волнового фронта световой волны при отсутствии термоупругих напряжений, когда световой поток распространяется параллельно оси симметрии активного элемента, а градиент температуры перпендикулярен этой оси.

Величина P описывает искажение волнового фронта световой волны при наличии термоупругих напряжений в отсутствие двулучепреломления.

Величина Q описывает искажение волнового фронта световой волны, вызванное двулучепреломлением из-за упругих напряжений.

Ввиду сложности определения термооптические постоянные при промышленном выпуске стекла не нормируются и имеют справочный характер.

В таблицах каталога представлены значения основных теплофизических и механических параметров, полученные непосредственно измерением или расчетным путем.

Коэффициент термического расширения α получен интерференционным методом [27]. В основном приведены средние значения α в интервале температур от 273 до 393 К; кроме того, для ряда стекол указаны значения α при 293 и 343 К, а также в интервале $213 \text{ K} < t < 273 \text{ K}$.

Коэффициент температуропроводности α рассчитан по формуле:

$$\alpha = \frac{\lambda}{d \cdot C},$$

где λ – коэффициент теплопроводности; C – удельная теплоемкость (определена калориметрическим методом); d – плотность, измеряемая способом гидростатического взвешивания в толуоле.

Значения низкотемпературной вязкости получены по методу вдавливания индентора.

Твердость стекол по сошлифованию определена как отношение объема сошлифованного стекла марки К8 или ГЛС1 к объему стекла данной марки, сошлифованного при тех же условиях.

Микротвердость по Кнупу измерена методом вдавливания пирамиды.

Оптический коэффициент напряжения B определен согласно ОСТ 3-488-71 [30].

Модуль Юнга E и коэффициент Пуассона μ измерены методом составного кварцевого резонатора по скорости распространения ультразвуковых волн при комнатной температуре.

Химическая устойчивость лазерных стекол к внешним воздействиям выражает степень сопротивляемости механически полированной поверхности стекла действию реагентов, имитирующих влияние окружающей среды и образующих гироскопические капельные налеты (стойкость к действию влажной среды) или пятна (стойкость к действию слабокислых растворов).

Данные о химической устойчивости позволяют дополнительно учитывать выбор и технологии механической и химической обработки стекла на всех этапах его производства, оптимизировать условия хранения и применения стеклянных активных элементов лазерных устройств с дополнительными приемами защиты и без них.

При облучении γ -радиацией и УФ-излучением в незащищенном стекле возникают центры окраски, приводящие к дополнительному неактивному поглощению. Радиационно-оптическая устойчивость к воздействию указанного типа увеличивается при добавлении к его основному составу антисоляризирующих компонентов (например, церия).

Лазер, в котором активной средой является газ или смесь газов, называют газовым лазером. Первый газовый лазер был создан вслед за рубиновым лазером в конце 1960 года в США А. Джаваном, В. Беннетом и Д. Эрриотом. С помощью высокочастотного генератора в трубке, заполненной смесью неона (Ne) и гелия (He), возбуждался электрический разряд. Существенным отличием

газового лазера от рекламной газоразрядной лампы, если не считать специально подобранных пропорций и давления He и Ne, было наличие двух плоскопараллельных зеркал, расположенных на концах газоразрядной трубки. Принципиальная схема газового лазера представлена на рис. 7.9. Эти зеркала образуют оптический резонатор, который обеспечивает генерацию в газовом разряде монохроматического когерентного светового излучения, направленного вдоль от трубки.

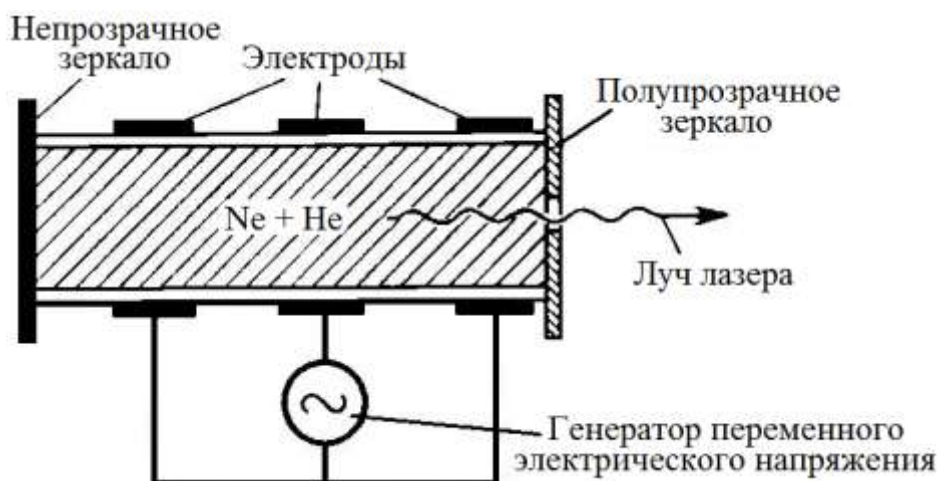


Рис. 7.9. Схематическое изображение газового лазера

Генерация когерентного света происходит одинаково во всех лазерах, как в газовых, так и в твердотельных. Особенности газового лазера и отличие отдельных видов газовых лазеров друг от друга связаны с выбором рабочего газа и способом создания инверсии населенностей.

Оптическая накачка газов – малоэффективный способ получения инверсии населенностей в газе. Газы обладают очень узкими линиями поглощения. Это означает, что при возбуждении газа с помощью оптической накачки источником света с широким спектром используется только ничтожная часть световой мощности источника. Остальной свет бесполезен; более того, он вредит, нагревая рабочий газ.

В газоразрядных лазерах инверсия населенностей уровней создается за счет возбуждения атомов или молекул газа при их соударениях со свободными быстрыми электронами, образующимися в электрическом разряде. Различают три типа газоразрядных лазеров: лазеры на нейтральных атомах, ионные лазеры и молекулярные лазеры. Они отличаются друг от друга как механизмом образования инверсии населенностей, так и диапазонами генерируемых длин волн λ . Различие в диапазонах обусловлено различиями в энергетическом

спектре нейтральных атомов, молекул и ионов. Характеристики газоразрядных лазеров приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3. Твердотельные лазеры непрерывного режима

Рабочие частицы	Длина волны, мкм	Режим работы	Особенности
Ионы Ne⁺⁺⁺	0,2358	Импульсный	Наименьшая известная длина волны. Требуются большие токи
Ионы Ne⁺⁺	0,3324		Генерирует также и на других длинах волн
Молекулы N₂	0,3371		Очень высокая импульсная мощность. Требуются высокие напряжения
Ионы Ar⁺⁺	0,4880	Непрерывный	Большая мощность в синей области спектра
	0,5145		Большая мощность в зеленой области спектра
Ионы Kr⁺⁺	0,5682		Большая мощность в желтой области спектра
Смесь атомов He и Ne	0,6323		Средняя мощность в красной области спектра. Широко применяется
	1,1523		Инфракрасный лазер небольшой мощности
Атомы Xe	2,061		Активная среда обладает высоким коэффициентом усиления
Смесь CO₂+N₂+He	10,6	Непрерывный и импульсный	Высокий КПД и очень высокая мощность
Молекулы H₂O	27,9	Импульсный	Высокая мощность в ИК-диапазоне
	118,6		Один из немногих лазеров далекого ИК-диапазона
Молекулы HCN	337	Непрерывный	То же

В гелий-неоновом лазере рабочим веществом являются нейтральные атомы Ne. Рабочими веществами в ионных газовых лазерах являются сильно ионизированные инертные газы (Xe, Kr, Ar, Ne), а также ионы фосфора (P), серы (S) и хлора (Cl). В ионных газовых лазерах лазерные переходы происходят между уровнями ионизированных атомов, причем степень ионизации может быть очень большой. Так, например, ультрафиолетовый импульсный лазер на длине волны 2358 Å работает на трехкратно ионизированных атомах Ne (см. табл.).

Молекулы, в отличие от атомов, имеют, помимо электронных, также колебательные и вращательные энергетические уровни. Первый молекулярный лазер на углекислом газе CO_2 был создан Р. Пателем в США в 1964 году.

Кроме электрического разряда, инверсия населенностей уровней атомов и молекул в газовых лазерах может создаваться в результате химических реакций, при которых образуются атомы или радикалы в возбужденных состояниях.

Лазер, рабочим веществом которого является жидкость, называется жидкостным лазером. Созданные почти одновременно в 1960 году лазеры на твердом теле (рубиновый лазер) и газе (гелий-неоновый лазер) сразу же продемонстрировали преимущества и недостатки твердой и газообразной среды в качестве активных веществ лазеров. Жидкости потенциально объединяют в себе преимущества твердых и газообразных лазерных материалов: плотность жидкостей достаточно велика, а их оптическая однородность в больших объемах не уступает однородности газов. Дополнительным преимуществом жидкости является возможность ее циркуляции через резонатор лазера. Это позволяет поддерживать ее температуру и активность при помощи внешнего теплообменника и регенератора.

Весьма перспективны лазеры на неорганических жидкостях, независимо разработанные в СССР (на основе оксихлорида фосфора и галогенидов металлов) и в США (на основе оксихлорида селена с четыреххлористым оловом). Активным веществом в этом случае является неодим (Nd), растворенный в жидкости в количестве, равном нескольким процентам. Свойства этих жидкостей не ограничивают размера активных элементов. Их дополнительное существенное преимущество по сравнению, например, с силикатным стеклом с примесями Nd состоит в том, что в них спектр генерации Nd остается узким ($\sim 1 \text{ \AA}$) даже при большом превышении порога генерации (в стекле спектр генерации уширяется до $80\text{--}100 \text{ \AA}$).

Возможность осуществления жидкостных лазеров на растворах органических красителей была предсказана в 1964–1965 годах и экспериментально осуществлена в 1966 году. Источником оптической накачки служили лазеры на рубине и неодимовом стекле. Принципиальная схема лазера показана на рис. 7.10. Позднее генерация была получена при возбуждении красителей светом обычных импульсных ламп. Коэффициент преобразования энергии накачки в энергию генерируемого излучения во многих случаях

(например, для красителей полиметинового ряда) достигает 50%. Из красителей, генерирующих видимый свет наиболее эффективны пиронин, родамины, трипафлавин, 3-аминофталамид (коэффициент преобразования ~15%). Растворителями обычно служат спирты, глицерин, серная кислота, вода и другие.

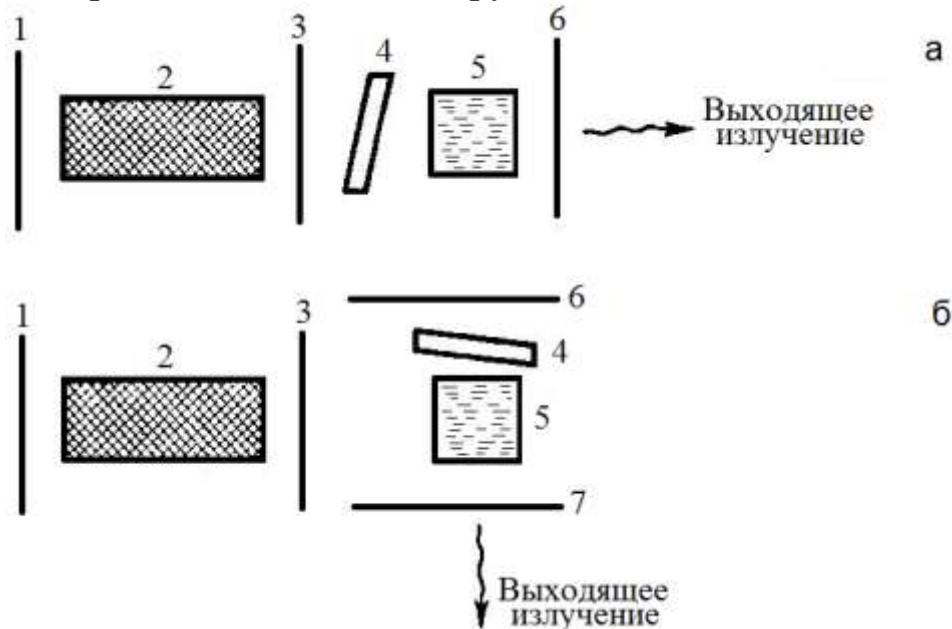


Рис. 7.10. Схема продольного (а) и поперечного (б) лазеров на органических красителях; 1, 3, 6, 7 – зеркала; 2 – рубин или неодимовое стекло; 4 – интерферометр Фабри-Перо; 5 – кювета с раствором красителя

Основные достоинства лазеров на органических красителях – возможность получения генерации на любых частотах в видимой и ближней ИК-области спектра, плавное изменение (перестройка) частоты, безынерционность и дешевизна. Лазеры на органических красителях хорошо работают в периодическом режиме, причем нагрев активного вещества устраняется циркуляцией раствора через кювету, находящуюся в резонаторе. Большие коэффициенты усиления позволяют использовать такие системы, как широкополосные квантовые усилители света.

8. ФОТОХРОМНЫЕ СТЕКЛА

Способность вещества обратимо приобретать или изменять окраску (спектры пропускания и поглощения) под действием оптического УФ-, видимого и ИК-излучения называется фотохромизмом (от греч. $\rho\acute{\eta}\sigma$, род. падеж $\rho\eta\acute{o}\tau\acute{o}\varsigma$ – свет и $\chi\rho\acute{o}\mu\alpha$ – цвет, краска). Фотохромные материалы – это светочувствительные вещества, в которых явление фотохромизма используется (с 1960-х годов) для регистрации изображений и оптических сигналов, в системах оперативной памяти ЭВМ, в голографии и др. Отличаются очень высокой разрешающей способностью, быстродействием, многократным использованием, хранением информации в пределах от 10^{-6} с до нескольких лет и др. [31].

Фотохромные стекла (ФХС), обратимо изменяющие пропускание в видимой области спектра в зависимости от освещенности и длительности облучения УФ- или коротковолновым излучением видимого диапазона находят широкое применение в оптическом приборостроении, светотехнике, медицинской офтальмологии. После прекращения облучения пропускание стекла восстанавливается.

На рис. 8.1 показана кривая зависимости изменения пропускания ФХС марки ФХС7, характерная для стекол и других марок, при облучении и после его прекращения (так называемая кинетическая кривая) [32].

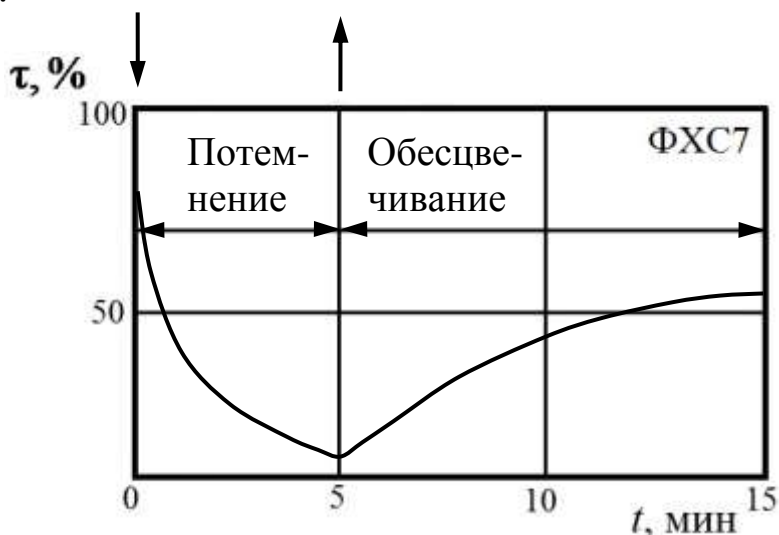


Рис. 8.1. Характерная зависимость изменения пропускания ФХС при облучении и после его прекращения (кинетическая кривая)

Различают два класса ФХС – гомогенные и гетерогенные. В гомогенных ФХС носителем фотохромных свойств является матрица основного стекла, активированная окислами металлов переменной

валентности (европия, церия и др.) и кадмия. Эти стекла обладают незначительным фотохромным эффектом, а поэтому большого распространения не имеют. В основном используются гетерогенные ФХС, представляющие собой, по меньшей мере, двухфазную систему, состоящую из матричного натриево-алюмо-боросиликатного стекла с растворенными в нем светочувствительными микрокристаллами галогенидов серебра или меди, являющимися основными носителями фотохромных свойств. Матричное стекло своим составом и термической историей оказывает влияние на размер, форму и примесный состав светочувствительной фазы, имеющей обычно размер порядка 100–150 Å. Светочувствительная фаза выделяется в стекле в процессе специальной термической обработки выше T_0 в диапазоне температур 500–600°C.

Промышленностью освоены и выпускаются крупносерийно ФХС следующих марок: ФХС2, ФХС4, ФХС6 и ФХС7. В табл. 8.1 указаны их основные назначения и характерный для каждой марки стекла тип светочувствительной фазы.

Таблица 8.1. Основные назначения ФХС и тип светочувствительной фазы

Марка стекла	Назначение	Светочувствительная фаза	Сенсибилизатор светочувствительной фазы
ФХС2	Запись и хранение информации	AgBr(Cl)	Cu^+ , Cd^{2+}
ФХС4	Защита оптических систем от мощного импульсного излучения широкого спектрального состава	AgBr(Cl)	Cu^+ +CuCl(Br)
ФХС6, ФХС7	Защита органов зрения человека от действия солнечного излучения; решение специальных задач клинической офтальмологии	AgCl (Br) CuCl	Cu^+

Под действием активного излучения в светочувствительной фазе ФХС происходят конкурирующие процессы: с одной стороны, образование центров окраски (ЦО), а с другой – термическое и оптическое разрушение ЦО, результирующая которых определяет скорость и степень потемнения стекла. Предполагается, что за ЦО, дающие широкую полосу добавочного поглощения в области 500–600 нм, ответственны коллоидные частицы серебра Ag_n (для стекол марок ФХС2, ФХС4, ФХС6) и меди Cu_n (для стекол марок ФХС4, ФХС7). После прекращения действия излучения сохраняется только процесс термического разрушения ЦО, вызывающий обесцвечивание (релаксацию) стекла.

В табл. 8.2 приведены характеристики физико-химических свойств ФХС, измеренные по стандартным методикам: показателя преломления n_e , плотности ρ (кг/дм³), температуры отжига T_o (°С), температурного коэффициента линейного расширения $\alpha \cdot 10^7$ (град⁻¹), твердости по сошлифованию H_s относительно твердости стекла марки К8, химической устойчивости (к влажной атмосфере и кислостойчивости), температуры прессования $T_{\text{пресс}}$ (°С).

Таблица 8.2. Физико-химические свойства ФХС

Марка стекла	Код ОКП	n_e	ρ	T_o	$\alpha \cdot 10^7$	H_s	Химическая устойчивость		$T_{\text{пресс}}$
							к влажной атмосфере	кислостойчивость	
ФХС2		1,507	2,38	450	60	1,1	А	2	1050
ФХС4	44 9238 1000	1,500	2,35	500	69	1,1	А	2	1080
ФХС6		1,497	2,36	450	63	1,1	А	1	1070
ФХС7	94 8921	1,501	2,34	450	60		Б	4	1040

В табл. 8.3 приведены значения спектрального показателя поглощения $\tau(\lambda)$ ФХС в области длин волн 330–1000 нм. По этим данным определены значения граничной длины волны $\lambda_{\text{гран}}$ для стекол: ФХС6 – 380 нм, ФХС7 – 430 нм, ФХС2 – 445 нм, ФХС4 – 500 нм.

Таблица 8.3. Спектральные характеристики ФХС

λ , нм	Спектральный показатель поглощения ФХС $\tau(\lambda)$			
	ФХС2	ФХС4	ФХС6	ФХС7
330			0,68	
350			0,33	
370				0,48
380	0,35			0,35
400	0,19		0,06	0,22
420	0,10			0,16
440	0,06	0,22		0,12
450	0,04	0,17	0,06	0,11
500	0,02	0,05	0,03	0,06
550	0,02	0,02		0,03
600	0,02	0,02	0,02	0,02
650	0,02	0,03	0,02	0,02
700	0,02	0,03	0,02	0,05
750	0,02	0,04		0,06
800	0,02	0,04	0,01	0,06

λ , нм	Спектральный показатель поглощения ФХС $\tau(\lambda)$			
	ФХС2	ФХС4	ФХС6	ФХС7
850	0,02	0,04		0,05
1000	0,01	0,01		

На рис. 8.2 представлены кривые спектрального поглощения ФХС в обесцвеченном состоянии до облучения для образцов практически применяемых толщин: ФХС2 – 4 мм, ФХС4 – 5 мм, ФХС6 и ФХС7 – 2,5 мм. Рис. 8.3 иллюстрирует изменения спектрального поглощения образцов стекол той же толщины после облучения. Из вида приведенных на рисунке кривых следует, что при этом наблюдается сдвиг края поглощения облученных стекол по сравнению с необлученными в длинноволновую область спектра и появление широких полос поглощения с максимумом в области 500–600 нм. Для стекла ФХС4 здесь вводится параметр оптической плотности D_{ϕ} облученного стекла в широкой спектральной области (облучение импульсом 8 Дж/см² длительностью 1,5 мс). Изменение спектрального поглощения в общем случае зависит от интенсивности, длительности, а также от температуры облучения.

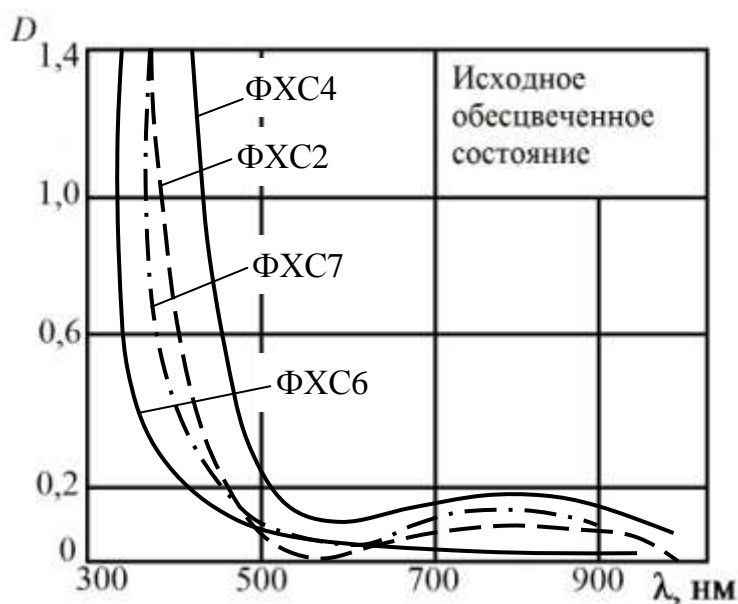


Рис. 8.2. Кривые спектрального поглощения ФХС в обесцвеченном состоянии

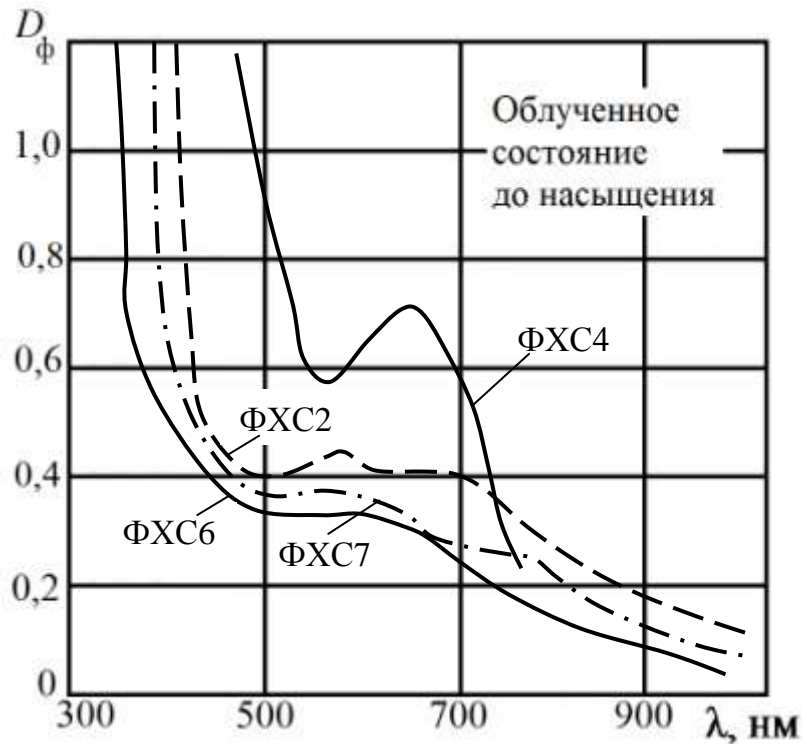


Рис. 8.3. Кривые спектрального поглощения ФХС после облучения

Приведем экспозиционные характеристики стекла ФХС4 в виде зависимости D_ϕ от плотности энергии импульса длительностью 1,5 мс (табл. 8.4).

Таблица 8.4. Экспозиционные характеристики стекла ФХС4 в виде зависимости D_ϕ от плотности энергии импульса

Плотность энергии импульса E , Дж/см ² ·10 ⁴	Оптическая плотность D_ϕ
0,1	0,97
1	1,1
10	1,9
15	2,0

Температурная зависимость потемнения D_ϕ стекла ФХС4 и времени релаксации потемнения на длине волны 600 нм до уровня 0,7 от исходного при воздействии импульсом 25 Дж/см² длительностью 1 с показана на рис. 8.4.

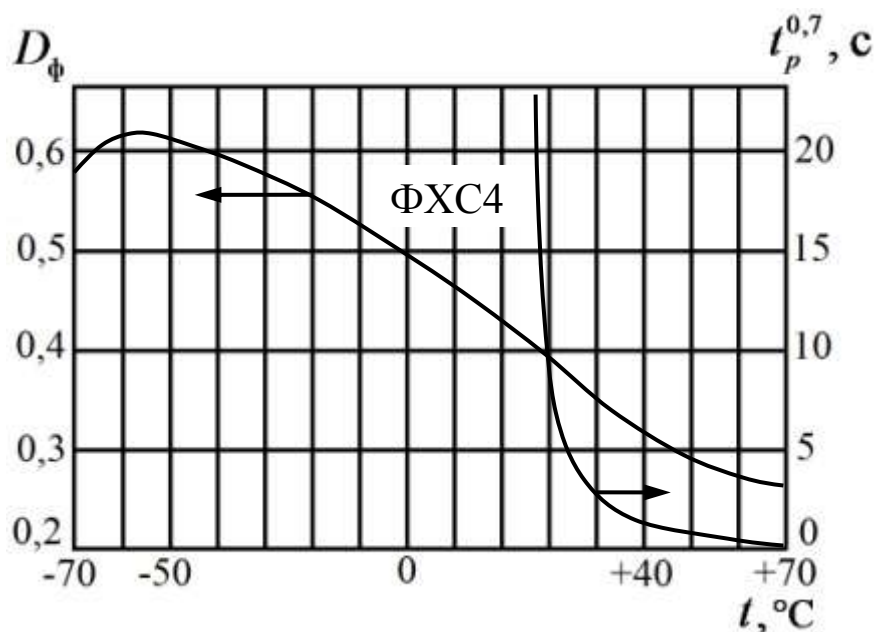


Рис. 8.4. Температурная зависимость потемнения D_{ϕ} стекла ФХС4 и времени релаксации потемнения

Приведем также данные по положению максимума спектральной чувствительности ФХС.

Таблица 8.5. Значения максимума спектральной чувствительности ФХС

Марка стекла	Максимум спектральной чувствительности λ_{\max} , нм
ФХС2	410
ФХС4	400
ФХС6	360
ФХС7	385 (без предварительной УФ-засветки); 400–1000 (после УФ-засветки, уровень которой для очувствления стекла ФХС7 к длинноволновому излучению составляет 10^{-4} Дж/см ²)

Измерение спектральной чувствительности ФХС проводилось для образцов практически применяемых толщин в области максимума спектрального приращения оптической плотности в спектре поглощения стекла для постоянной величины энергетической облученности $E=22,6$ Вт/м² длительностью 150 с.

Спектральная чувствительность галоидомедного стекла ФХС7 имеет особенность, связанную с проявлением эффекта оптической сенсбилизации, сущность которого состоит в увеличении светочувствительности стекла к видимой и длинноволновой области спектра после предварительной ультрафиолетовой засветки стекла.

9. СВЕТОРАССЕИВАЮЩИЕ СТЕКЛА

9.1. Классификация светорассеивающих стекол

По своим свойствам и назначению светорассеивающие стекла разделены на три типа. Классификация стекол приведена в табл. 9.1 [33].

Таблица 9.1. Классификация светорассеивающих стекол

Тип	Назначение	Марки стекол
I Стекла для диффузного отражения света	Изготовление непрозрачных деталей, диффузно отражающих направленный на них свет (экраны, пластины кюветы, сферы). Изготовление устойчивых во времени образцов сравнения и рабочих эталонов отражения и белизны. Детали из диффузно отражающего стекла применяются в фотометрах, спектрофотометрах, колориметрах, компараторах, денситометрах, нефелометрах и других приборах для контроля продукции различных отраслей промышленности (текстильной, бумажной, лакокрасочной, пищевой и других). Стекла марок МС20, ОНС1, ОНС2, ОНС3 и ОНС4 представляют серию стекол с последовательно уменьшающимся коэффициентом отражения (от 0,97 до 0,14).	МС20 ОНС1 ОНС2 ОНС3 ОНС4
II Стекла для диффузного пропускания света	Изготовление деталей, диффузно рассеивающих проходящий через них свет. Детали, преобразующие направленный световой пучок в диффузный при работе в проходящем свете, применяются в схемах разнообразных оптических приборов. Стекла марок МС19, МС13, МС23 и МС12 представляют серию стекол с последовательно уменьшающимся коэффициентом пропускания (от 0,91 до 0,13).	МС19 МС13 МС23 МС12
III Стекла для образцов мутности	Изготовление образцов и рабочих эталонов мутности, а также имитаторов различных рассеивающих сред. Образцы и рабочие эталоны мутности применяются для градуировки и проверки правильности работы измерительных устройств (нефелометров, компараторов и других приборов). Стекла марок МС16, МС17, МС18 и МС19 представляют серию стекол с последовательно возрастающей мутностью.	МС16 МС17 МС18 МС19

Примечания.

1. Буквы МС в названии марок стекла являются кратким обозначением, как молочных, так и мутных стекол; буквы ОНС – отражающих нейтральных стекол.
2. Стекло марки МС19 может использоваться как для преобразования проходящего направленного пучка света в диффузный, так и в качестве образца мутности,

поэтому оно отнесено к типу II и типу III.

9.2. Величины и понятия, используемые для характеристик свойств светорассеивающих стекол

1. $\rho(\lambda)$ – спектральный коэффициент отражения, равный отношению потока излучения с длиной волны $\lambda \pm \Delta\lambda$, отраженного образцом стекла, к потоку излучения, упавшему на него ($\Delta\lambda \ll \lambda$).
2. ρ – интегральный коэффициент отражения в видимой области спектра для источника A , определяемый выражением

$$\rho = \frac{\int_{400}^{750} \rho(\lambda) v(\lambda) I_{\lambda} d\lambda}{\int_{400}^{750} v(\lambda) I_{\lambda} d\lambda},$$

где $v(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность среднего глаза; I_{λ} – спектральная плотность излучения источника A .

3. $\beta(\lambda)$ – спектральный коэффициент яркости, равный отношению яркости образца стекла к яркости совершенного рассеивателя, находящегося в тех же условиях освещения.
4. $\chi(\gamma)$ – индикатриса рассеяния, характеризующая пространственное распределение рассеянного излучения. Индикатрису рассеяния можно представить графиком зависимости коэффициента яркости образца светорассеивающего стекла от угла наблюдения γ в одной плоскости.
5. $\tau(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания, равный отношению пропущенного образцом потока излучения с длиной волны $\lambda \pm \Delta\lambda$ к потоку излучения, упавшему на него ($\Delta\lambda \ll \lambda$).
6. τ – интегральный коэффициент пропускания в видимой области спектра для источника A , определяемый выражением

$$\tau = \frac{\int_{400}^{750} \tau(\lambda) v(\lambda) I_{\lambda} d\lambda}{\int_{400}^{750} v(\lambda) I_{\lambda} d\lambda}.$$

7. Δ – отступление от нейтральности коэффициента пропускания, определяемое следующим образом: в качестве Δ берется максимальное из трех абсолютных значений

$$\Delta i = \frac{|\tau_i - \tau|}{\tau} 100\% \quad (i=1, 2, 3),$$

где τ_1 – коэффициент пропускания образца для светового потока, выделяемого из излучения источника A светофильтром из стекла марки СС-8 [6] толщиной 8 мм; τ_2 – то же для светофильтра из стекла марки РС-2 толщиной 2 мм; τ_3 – то же для светофильтра из стекла марки КС-14 толщиной 2 мм.

Вместо τ_i могут быть взяты следующие значения $\tau(\lambda)$: $\tau(440)$ вместо τ_1 , $\tau(550)$ вместо τ_2 и $\tau(650)$ вместо τ_3 ; длина волны дана в нм.

8. δ – отступление от диффузности, характеризующее отступление индикатрисы рассеяния света, прошедшего через слой стекла, от индикатрисы идеального рассеивателя; определяется при освещении образца по нормали к поверхности и равно отношению коэффициента яркости, измеренного по нормали к поверхности, к коэффициенту яркости, измеренному под углом $\gamma=60^\circ$ к нормали. Здесь термин «отступление от диффузности» введен для величины, которая в нормали НО5708-68 «Стекла светорассеивающие» названа коэффициентом диссимметрии.
9. τ_r – коэффициент направленного пропускания, равный отношению светового потока, прошедшего через образец и не претерпевшего рассеяния, к световому потоку, упавшему на него.
10. $\tau_r(\lambda)$ – спектральный коэффициент направленного пропускания, равный отношению потока излучения с длиной волны $\lambda \pm \Delta\lambda$, прошедшего через образец и не претерпевшего рассеяния, к потоку излучения, упавшему на него ($\Delta\lambda \ll \lambda$).
11. $\sigma(\lambda)$ – натуральный показатель рассеяния (спектральный) – величина, обратная расстоянию, на котором поток монохроматического излучения, образующего параллельный пучок, ослабляется в результате рассеяния в $e=2,718$ раз.
12. $K(\lambda)$ – натуральный показатель поглощения (спектральный) – величина, обратная расстоянию, на котором поток монохроматического излучения, образующего параллельный пучок, ослабляется в результате поглощения в $e=2,718$ раз.
13. $\varepsilon(\lambda)$ – натуральный показатель ослабления (спектральный) – величина, обратная расстоянию, на котором поток монохроматического излучателя, образующего параллельный

пучок, ослабляется в результате рассеяния и поглощения в $e=2,718$ раз.

14. $\Sigma(\lambda)$ – направленный показатель рассеяния (спектральный) – величина, пропорциональная спектральному коэффициенту яркости $\beta(\lambda)$, обусловленному рассеянием света слоем единичной толщины в некотором направлении. При $\gamma=90^\circ$ с направлением освещающего пучка направленный показатель рассеяния определяется выражением

$$\Sigma(\lambda) = \frac{\beta(\lambda)n^2}{\pi l},$$

где n – показатель преломления; l – толщина освещенного рассеивающего слоя.

В нормали НО5708-68 эта величина названа коэффициентом рассеяния.

15. n_D – показатель преломления для длины волны $\lambda=589,3$ нм.

9.3. Величины и понятия, используемые для характеристики механических, теплотехнических и химических свойств светорассеивающих стекол

1. Механические свойства:

плотность при температуре 20°C и давлении 760 мм рт. ст.

2. Теплотехнические характеристики:

температура отжига – температура, которой соответствует вязкость стекла $10^{13\pm 0,5} \text{ нЗ}$;

температура спекания – температура, которой соответствует вязкость стекла $10^{10\pm 0,7} \text{ нЗ}$.

3. Химическая устойчивость характеризуется устойчивостью к действию влажной атмосферы (налетоопасностью) и устойчивостью к действию пятнающих агентов (воды, слабокислых водных растворов).

3.1. По устойчивости к влажной атмосфере стекло (в рассматриваемом случае силикатное) делят на следующие группы:

А – неналетоопасные стекла;

Б – промежуточные стекла;

В – налетоопасные стекла.

3.2. По устойчивости к действию пятнающих агентов силикатное стекло делится на следующие группы:

- I – непятнающиеся стекла;
- II – стекла средней пятнаемости;
- III – пятнающиеся стекла;
- IV – нестойкие стекла, требующие применения защитных покрытий.

Светорассеивающее стекло поставляется в виде хорошо отожженных заготовок, имеющих форму плоских дисков и прямоугольных плиток со стороной или диаметром от 40 до 150 мм. По согласованию с изготовителем стекло поставляется в виде заготовок другой формы. Заготовки после прессования или механической обработки подвергаются тонкому отжигу. Форма и размеры заготовок должны быть указаны при заказе.

9.4. Характеристики светорассеивающих стекол

9.4.1. Стекла для диффузного отражения света (стекла I типа)

Числовые значения характеристик светорассеяния стекол I типа измерены при такой толщине образцов, при которой интегральный коэффициент пропускания τ практически равен нулю.

Измерения индикатрис рассеяния светорассеивающих стекол I типа (МС20, ОНС1, ОНС2, ОНС3 и ОНС4) проводились в отраженном свете при двух углах α падения освещающего пучка: $\alpha=0^\circ$ (рис. 9.1, а) и $\alpha=45^\circ$ (рис. 9.1, б). Стрелки на этих рисунках указывают направление падения освещающего пучка лучей.

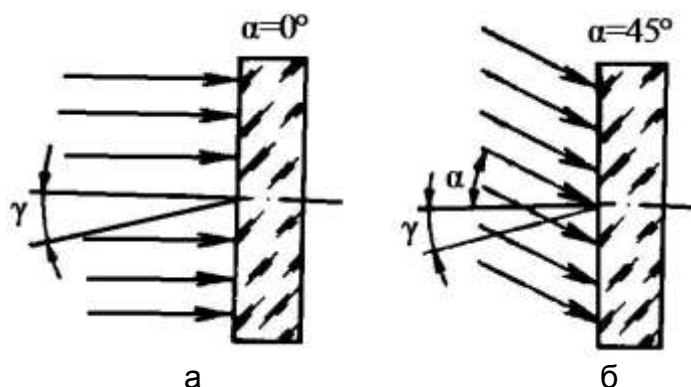


Рис. 9.1. Схема измерения индикатрис рассеяния светорассеивающих стекол I типа

Сравнительные характеристики стекол для диффузного отражения (МС20, ОНС1, ОНС2, ОНС3, ОНС4)

Значения интегрального коэффициента отражения ρ стекол марок МС20, ОНС1, ОНС2, ОНС3 и ОНС4 приведены в таблице:

Марка стекла	МС20	ОНС1	ОНС2	ОНС3	ОНС4
ρ	0,97	0,74	0,53	0,30	0,15

Спектральные кривые коэффициента отражения $\rho(\lambda)$ стекол МС20, ОНС1, ОНС2, ОНС3 и ОНС4 представлены на рис. 9.2.

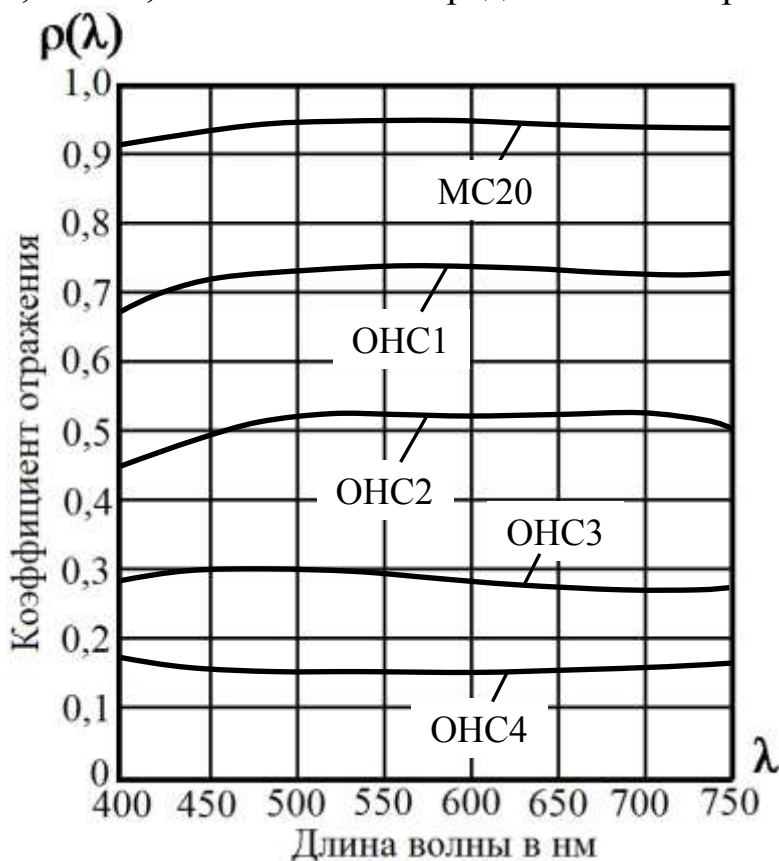


Рис. 9.2. Спектральные кривые коэффициента отражения $\rho(\lambda)$

Характер изменения индикатрис спектрального коэффициента яркости $\beta(\lambda)$ полированных образцов стекла марок МС20, ОНС1, ОНС2, ОНС3 и ОНС4 при изменении угла наблюдения γ при угле падения освещающего пучка лучей $\alpha=0^\circ$ представлены на рис. 9.3. Углы наблюдения γ отсчитываются от нормали к поверхности образца.

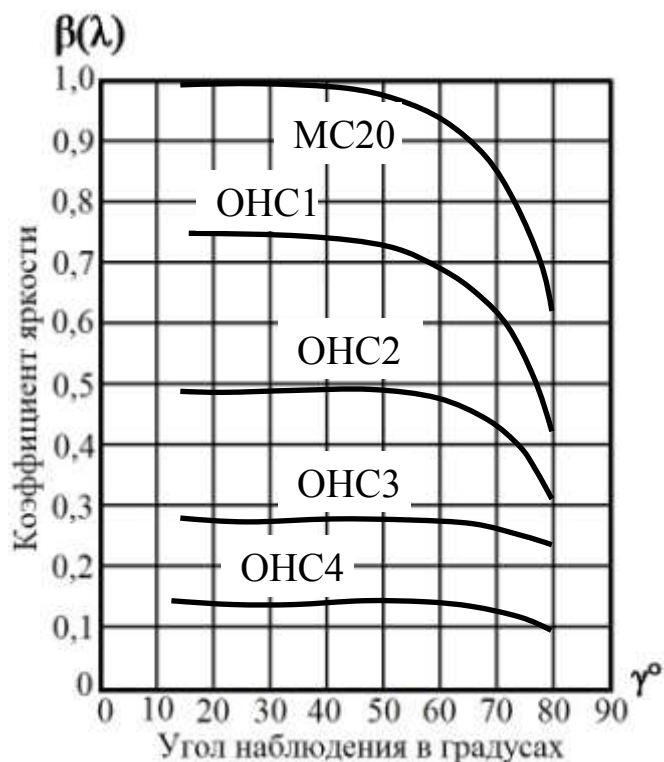


Рис. 9.3. Зависимость коэффициента $\beta(\lambda)$ от угла γ ($\alpha=0^\circ$; $\lambda=550$ нм)

Характер изменения индикатрис спектрального коэффициента яркости $\beta(\lambda)$ полированных образцов стекла марок MC20, OHC1, OHC2, OHC3 и OHC4 при изменении угла наблюдения γ при угле падения освещающего пучка лучей $\alpha=45^\circ$ представлены на рис. 9.4. Стрелкой отмечен угол падения освещающего пучка лучей.

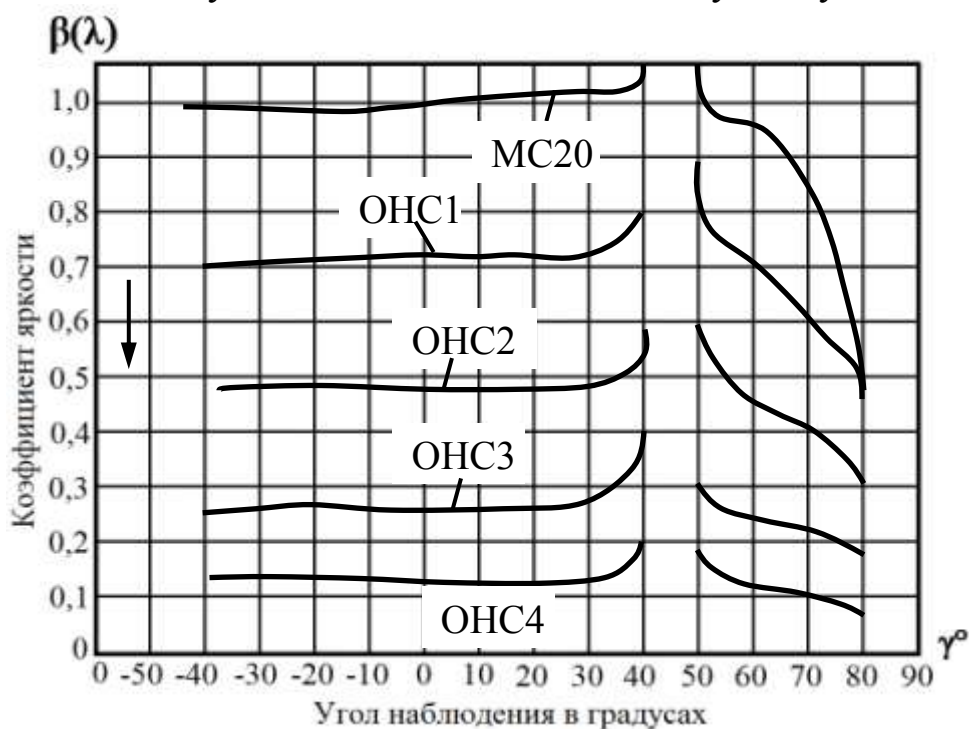


Рис. 9.4. Зависимость коэффициента $\beta(\lambda)$ от угла γ ($\alpha=45^\circ$; $\lambda=550$ нм)

9.4.2. Стекла для диффузного пропускания света (стекла II типа)

Числовые значения характеристик светорассеяния стекол II типа (МС19, МС13, МС23 и МС12) получены в результате измерений при освещении образцов стекла направленным световым пучком лучей с малым углом расходимости (не превосходящим 0,15 радиан), падающим по нормали к поверхности образца, как показано на рис. 9.5. Стрелки на рис. 9.5 указывают направление падения освещающего пучка лучей и направление наблюдения.

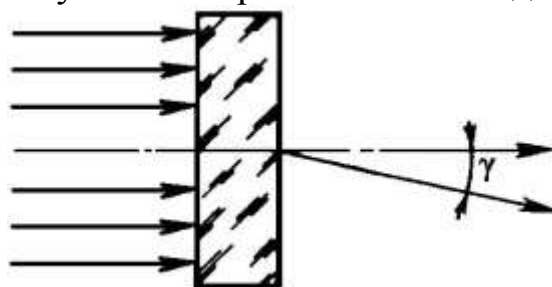


Рис. 9.5. Схема измерения индикатрисы рассеяния светорассеивающих стекол II типа

Сравнительные характеристики стекол для диффузного отражения (МС19, МС13, МС23 и МС12)

Область значений характеристик светорассеяния стекол для диффузного пропускания согласно нормам ГОСТ 5708-68 приведена в табл. 9.2.

Таблица 9.2. Область значений характеристик светорассеяния стекол согласно нормам ГОСТ 5708-08

Марка стекла	Толщина образца, мм	Обработка поверхности контролируемых образцов	Интегральный коэффициент пропускания	Отступление от нейтральности коэффициента пропускания, %	Отступление от диффузности индикатрисы рассеяния	Коэффициент направленного пропускания	Спектральный коэффициент пропускания при $\lambda=440$ нм
			τ	Δ	δ	τ_r	$\tau(\lambda)$
МС12	2	Полируются или шлифуются	от 0,13 до 0,35	—	не нормируется	—	не нормируется
МС13	2	Полируются	не менее 0,5	не более 10	не более 1,35 для стекла 1-й категории, не более 3,00 для стекла 2-й	—	—

Марка стекла	Толщина образца, мм	Обработка поверхности контролируемых образцов	Интегральный коэффициент пропускания	Отступление от нейтральности коэффициента пропускания, %	Отступление от диффузности индикатрисы рассеяния	Коэффициент направленного пропускания	Спектральный коэффициент пропускания при $\lambda=440$ нм
			τ	Δ	δ	τ_r	$\tau(\lambda)$
					категории		
МС23	2	—"	не менее 0,5	не более 10	—"	—	—"
МС19	8	—"	не нормируется	не нормируется	не нормируется	не нормируется	от 0,65 до 0,75

Зависимость характеристик светорассеяния от толщины нескольких образцов с полированными поверхностями представлена в табл. 9.3.

Таблица 9.3. Зависимость характеристик светорассеяния от толщины образцов стекла

Марка стекла	Толщина образца, мм	Интегральный коэффициент пропускания	Отступление от нейтральности коэффициента пропускания, %	Отступление от диффузности индикатрисы рассеяния	Коэффициент направленного пропускания
		τ	Δ	δ	τ_r
МС12	2	0,27	8,3	1,08	—
	1	0,36	5,6	1,08	—
МС13	3	0,59	4,4	1,25	—
	2	0,68	3,5	1,40	—
МС23	1	0,78	1,4	3,00	—
	3	0,53	2,0	1,10	—
	2	0,61	2,0	1,10	—
МС19	1	0,68	0,8	1,65	—
	8	0,79	7,2	11,9	—
	6	0,82	4,6	20,4	—
	4	0,86	2,0		+
	2	0,91	1,2		+

Характер изменения индикатрис коэффициентов яркости $\beta(\lambda)$ полированных образцов стекла марки МС12 толщиной 0,5–3,0 мм (пунктирная линия) и марки МС13 (сплошные линии) при изменении угла наблюдения представлены на рис. 9.6. Цифры у кривых означают толщину образца в мм. Значения коэффициента яркости при угле наблюдения $\gamma=0^\circ$ приняты равными единице.

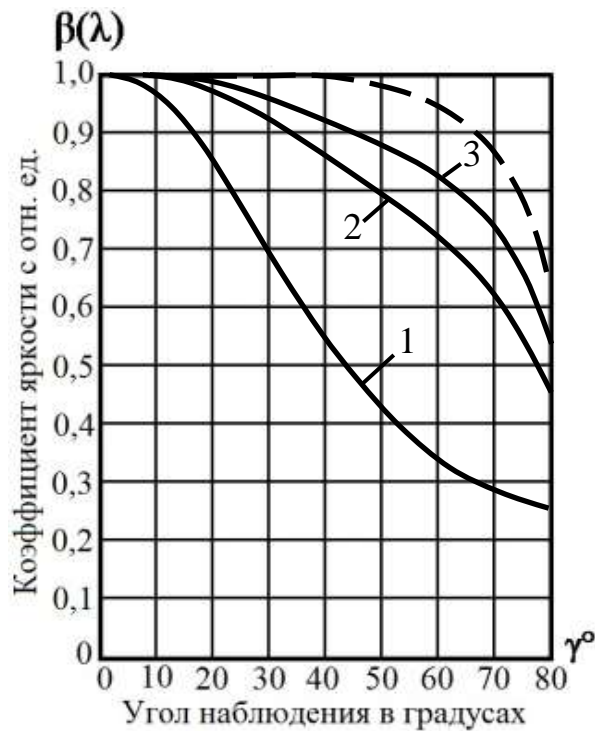


Рис. 9.6. Зависимость коэффициента $\beta(\lambda)$ от угла γ образцов стекла марки MC12 (пунктирная линия) и марки MC13 (сплошные линии)

Характер изменения индикатрис коэффициента яркости $\beta(\lambda)$ полированных образцов стекла марки MC23 (пунктирные линии) и марки MC19 (сплошные линии) при изменении угла наблюдения представлен на рис. 9.7. Цифры у кривых означают толщину образца в мм. Значения коэффициента яркости образца стекла марки MC23 при угле наблюдения $\gamma=0^\circ$ и угле наблюдения $\gamma=5^\circ$ для образцов стекла марки MC19 приняты равными единице.

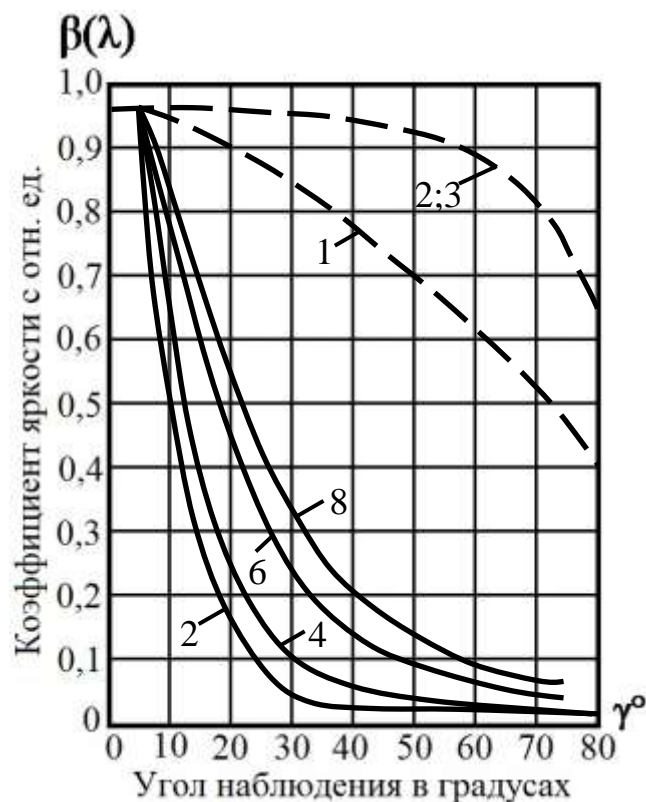


Рис. 9.7. Зависимость коэффициента $\beta(\lambda)$ от угла γ образцов стекла марки MC23 (пунктирные линии) и марки MC19 (сплошные линии)

9.4.3. Стекла для образцов мутности (стекла III типа)

Числовые значения характеристик светорассеяния стекол III типа марок MC16, MC17 и MC18 получены в результате измерений, которые проводились с образцами стекол цилиндрической формы. Измеряемый рассеянный свет распространялся через поверхность цилиндра в плоскости, перпендикулярной его оси. При построении индикатрис рассеяния использовались спектральные коэффициенты яркости $\beta(\lambda)$, пересчитанные на одинаковую толщину рассеивающего слоя для всех углов наблюдения. Схематически условия измерений показаны на рис. 9.8. Стрелки на рисунке указывают направление падения освещающего пучка лучей.

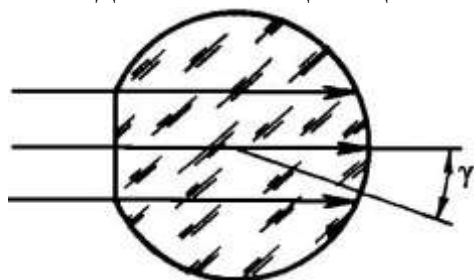


Рис. 9.8. Схема измерения индикатрис рассеяния светорассеивающих стекол III типа

Сравнительные характеристики стекол для образцов мутности (МС16, МС17, МС18 и МС19)

Область значений характеристик светорассеяния стекол III типа приведена в табл. 9.4.

Таблица 9.4. Значения характеристик светорассеяния стекол III типа

Марка стекла	Натуральный показатель ослабления при $\lambda=440$ нм	Направленный показатель рассеяния при $\lambda=546$ нм
	$\varepsilon(\lambda), \text{см}^{-1}$	$\Sigma(\lambda), \text{см}^{-1}$
МС19	13,0–33,0	–
МС18	0,10–0,20	$(1-3) \cdot 10^{-3}$
МС17	0,03–0,10	$(1-10) \cdot 10^{-4}$
МС16	меньше 0,03	$(1-10) \cdot 10^{-5}$

Характер изменения индикатрис рассеяния стекол марок МС16 и МС17 при изменении угла наблюдения γ показан на рис. 9.9. Значения коэффициентов яркости $\beta(\lambda)$ при угле наблюдения $\gamma=90^\circ$ приняты равными единице.

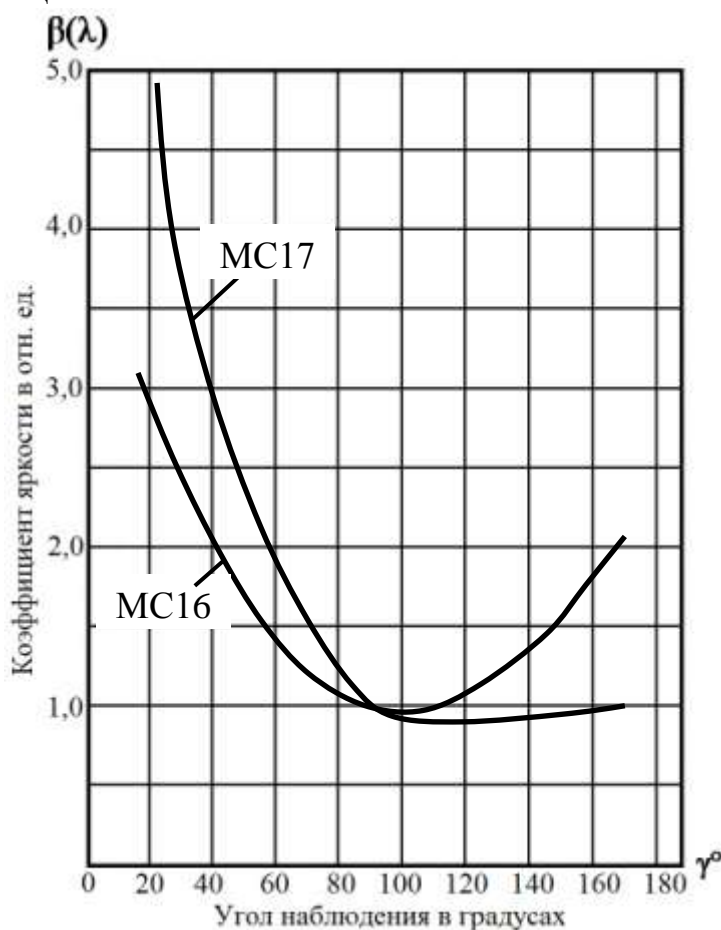


Рис. 9.9. Зависимость коэффициента $\beta(\lambda)$ от угла γ образцов стекла марок МС16 и МС17

Характер изменения индикатрисы рассеяния стекла марки МС18 показан на рис. 9.10. Значение коэффициента яркости $\beta(\lambda)$ при угле наблюдения $\gamma=90^\circ$ принято равным единице.

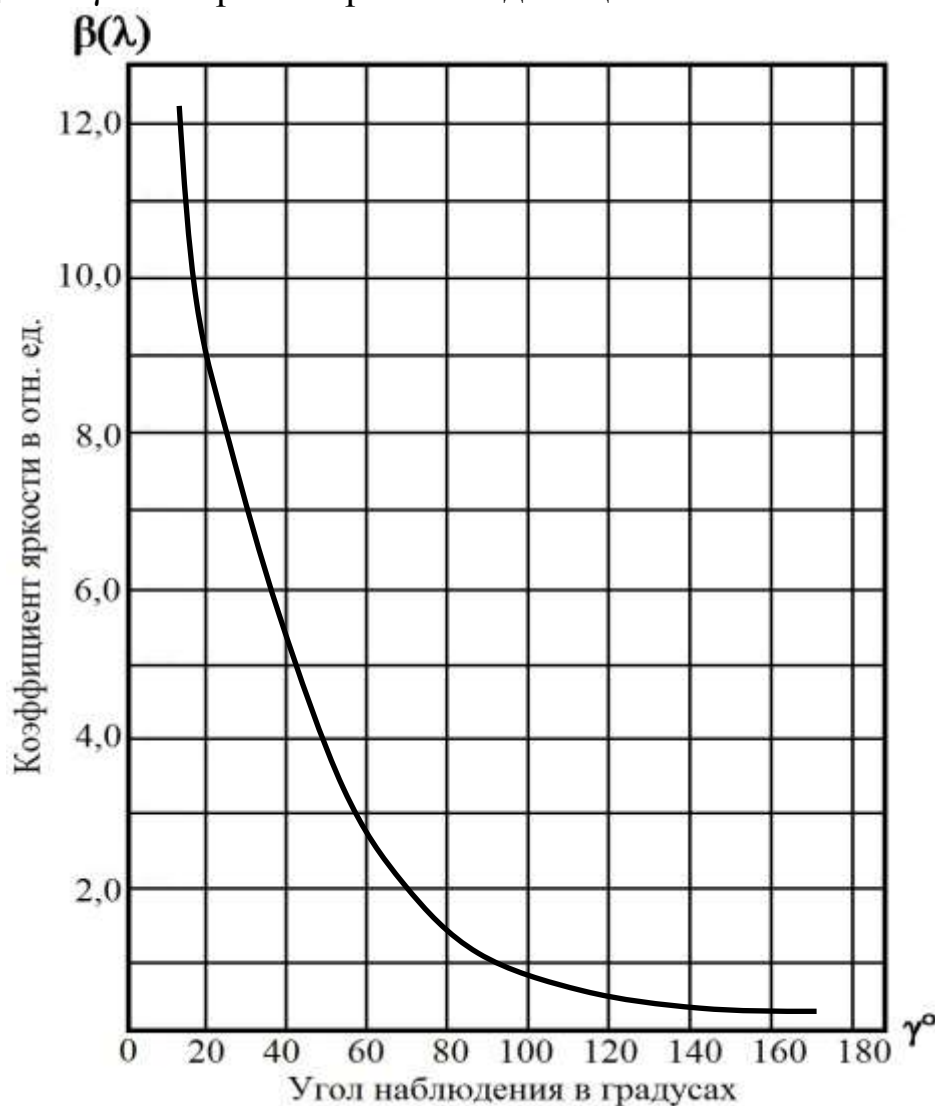


Рис. 9.10. Зависимость коэффициента $\beta(\lambda)$ от угла γ образца стекла марки МС18

Представление о характере изменения индикатрис коэффициента яркости $\beta(\lambda)$ полированных образцов стекла марки МС19 дает рис. 9.11. Цифры около кривых означают толщину образца в мм. Значения коэффициента яркости $\beta(\lambda)$ при угле наблюдения $\gamma=5^\circ$ приняты равными 10^4 .

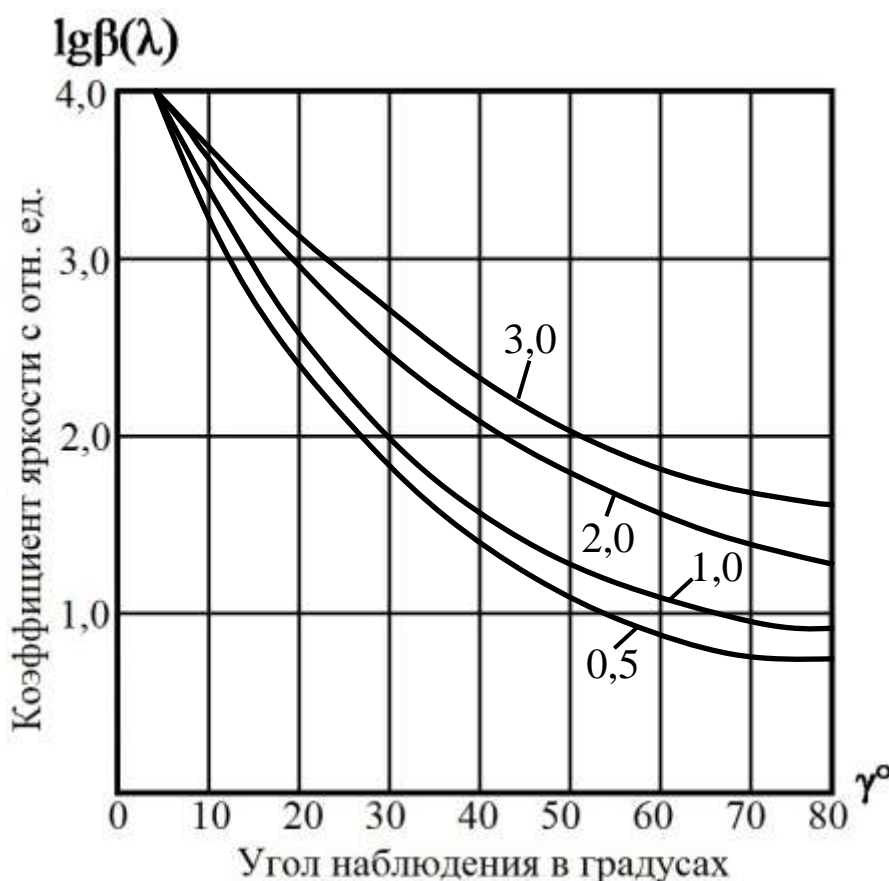


Рис. 9.11. Зависимость коэффициента $\beta(\lambda)$ от угла γ образцов стекла марки MC19

9.4.4. Физико-химические свойства светорассеивающих стекол

Величины, характеризующие некоторые физико-химические свойства светорассеивающих стекол, приведены в табл. 9.5.

Таблица 9.5. Физико-химические свойства светорассеивающих стекол

Тип стекла	Марка стекла	Показатель преломления n_D	Плотность, г/см ³	Температура отжига, °С	Температура спекания, °С	Группы химической устойчивости по [34]	
						к влажной атмосфере	к действию пятняющих агентов
I	MC20	1,52	2,80	(520)	600	A	} I
	ОНС1	1,50	2,61	(580)	680	A	
	ОНС2	1,50	2,61	(540)	640	A	
	ОНС3	1,50	2,61	(540)	640	A	
	ОНС4	1,50	2,61	(580)	680	A	
II	MC12	1,49	2,45	545	630	A	} I
	MC13	1,51	2,54	520	620	A	
	MC23	1,52	2,63	520	620	A	

Тип стекла	Марка стекла	Показатель преломления n_D	Плотность, г/см ³	Температура отжига, °С	Температура спекания, °С	Группы химической устойчивости по [34]	
						к влажной атмосфере	к действию пятнающих агентов
Ш	МС16	1,472	2,30	410	500	А	} Ш
	МС17	1,472	2,30	410	500	А	
	МС18	1,472	2,30	410	500	А	
	МС19	1,472	2,30	410	500	А	

10. МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В АСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОПТИКЕ

10.1. Материалы для преломляющей оптики

Оптические материалы, применяемые в современной телескопостроении, должны удовлетворять специфическим требованиям применения и эксплуатации телескопов. В реальных условиях обсерватории телескоп и его оптика работают под влиянием климатических и температурных воздействий. Весьма специфическим требованиям должны удовлетворять телескоп и его оптика при базировании в открытом космосе.

Вполне естественно, что материалы, используемые для преломляющей оптики (линзы, призмы, плоскопараллельные пластинки и др.) должны быть прозрачны для излучения в заданном диапазоне длин волн, иметь необходимый показатель преломления и коэффициент дисперсии.

Для видимого излучения материал оптических деталей можно выбрать из каталога бесцветного оптического стекла, описанного в первой части пособия [35]. Материалы для ИК-области спектра представлены в предыдущих разделах данного пособия.

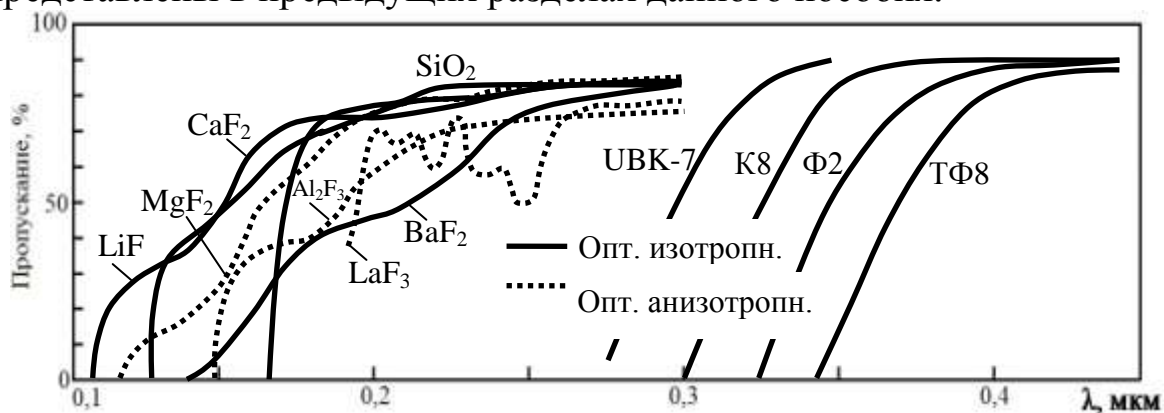


Рис. 10.1. Кривые спектральной прозрачности стекол К8, Ф2, ТФ8, фиолетового крона UBK-7, кварцевого стекла и некоторых кристаллов в УФ-области спектра

Пропускание излучения обычными кроновыми стеклами простирается в коротковолновую часть спектра не далее длины волны $\lambda=0,33$ мкм. Как следует из вида кривых, представленных на рис. 10.1, еще менее прозрачны в этой области флинтовые стекла. Изготовленные в платиновых ваннах печах из особо чистых материалов, стекла прозрачны до длины волны $\lambda=0,29$ мкм. Такие стекла называются фиолетовыми. В УФ-области находит применение плавленый кварц (SiO₂). В лучших образцах он прозрачен до $\lambda=0,185$ мкм. Отечественная промышленность выпускает несколько

марок кварцевого стекла: КИ, КУ-1, КУ-2, КВ, КВ-Р. Зарубежные фирмы выпускают кварцевое стекло под различными фирменными названиями: витросил и спектросил (Англия), пурсил и тетрасил (Франция), инфрасил, супрасил (ФРГ), 151, 201, 204А, 7940, 7943 (США). Кроме кварца для излучения УФ-области спектра находят применение некоторые кристаллы (см. кривые на рис. 10.1). Спектральная область прозрачности некоторых оптических кристаллов приведена в табл. 10.1 [36].

Таблица 10.1. Спектральная область прозрачности некоторых оптических кристаллов

Материал	Область прозрачности, мкм	Материал	Область прозрачности, мкм
NaF*	0,15–15	PbS	3,0–7
NaCl*	0,21–26	PbSe	5,0–7
KCl (сильвин)*	0,21–30	PbTe	4,0–7
KBr*	0,23–40	Al ₂ O ₃ (сапфир)	0,17–6,5
KI*	0,38–42	CaCO ₃	0,3–5,5
CaF ₂ (флюорит)	0,13–12	CdS	0,52–16
BaF ₂	0,15–15	SiO ₂ (кварц крист.)	0,4–4,5
MgO (периклес)	0,25–8,5	SiO ₂ (кварц плавл.)	0,2–4,5
Al ₂ O ₃ ·MgO	0,18–5,3	TiO ₂	0,43–6,2
ZnS	0,35–8	Se	1–20
Ge (монокристалл)	1,8–23	SeAs	1–19
Германиевое стекло	0,4–6	Si (монокристалл)	1,2–15
GaAs	1,0–11	BaTiO ₃	0,5–6,9
InAs	3,8–7	CsBr*	0,22–55
InP	1,0–15	CsI*	0,24–70
InSb	7,0–16	LiF*	0,12–9
CdS	0,52–16	MgF ₂	0,11–7,5
SrTiO ₃	0,39–6,8	MgO	0,25–8,5
CdF ₂ *	до 11	KDP (дигидроген-фосфат калия)	0,25–1,7
As ₂ S ₃	0,6–11		
SrF ₂	до 11	KRS-5 (галлий-йодистобромистый)	0,5–40
BaF ₂	0,15–15		
PbF ₂	0,25–17		

* – материалы гигроскопичные или растворимые в воде.

10.2. Материалы для зеркал астрономических телескопов

7 января 1610 года навсегда останется памятной датой в истории человечества. Вечером этого дня итальянский ученый Галилео Галилей (1564–1642) впервые направил изготовленный им телескоп на небо. Он увидел то, что предвидеть заранее было невозможно. Луна, испещренная горами и долинами, оказалась миром, сходным хотя бы по рельефу с Землей. Планета Юпитер предстала перед глазами изумленного Галилея крошечным диском, вокруг которого обращались четыре необычные звездочки – его спутники. При наблюдении в телескоп планета Венера оказалась похожей на маленькую Луну. Она меняла свои фазы, что свидетельствовало о ее обращении вокруг Солнца. Несмотря на несовершенство построенных телескопов, Галилей в течение первых двух лет наблюдений сумел сделать большое количество открытий. Открытия Галилея положили начало телескопической астрономии [37]. Сравнительно малые aberrации изображения, образованного системой отражающих поверхностей вращения, полное отсутствие хроматических aberrаций не могли не привлечь внимания к таким системам. Уже в 1616 году Н. Цукки предложил схему зеркального телескопа (рефлектора). В 1634 году французский ученый Марен Мерсенн (1588–1648) предложил оптическую схему телескопа, состоящего из большого вогнутого и малого выпуклого зеркал, отражающая поверхность которых имела форму параболоида вращения. Оптическую схему объектива телескопа, состоящего из большого вогнутого зеркала с параболоидной формой отражающей поверхности и малого вогнутого зеркала с эллипсоидной формой отражающей поверхности, впервые предложил шотландский математик и астроном Джеймс Грегори (1638–1675) в 1663 году. Оптическую схему объектива телескопа, состоящего из большого вогнутого зеркала с параболоидной формой отражающей поверхности и малого выпуклого зеркала с гиперболоидной формой отражающей поверхности, впервые предложил Г. Кассегрен в 1672 году.

Заметим, что допустимое отклонение формы отражающей поверхности примерно в четыре раза меньше допустимого отклонения формы преломляющей поверхности. Контроль формы несферических поверхностей и сегодня представляет собой непростую задачу. Поэтому оптические схемы телескопа Мерсенна, объектив Грегори и Кассегрена, представленные соответственно на рис. 10.2–10.4, не получили практического воплощения. Вероятно, по этой причине телескоп, построенный в 1664 году Р. Гуком по схеме

Грегори, оказался не пригодным для наблюдения из-за низкого качества образованного изображения.

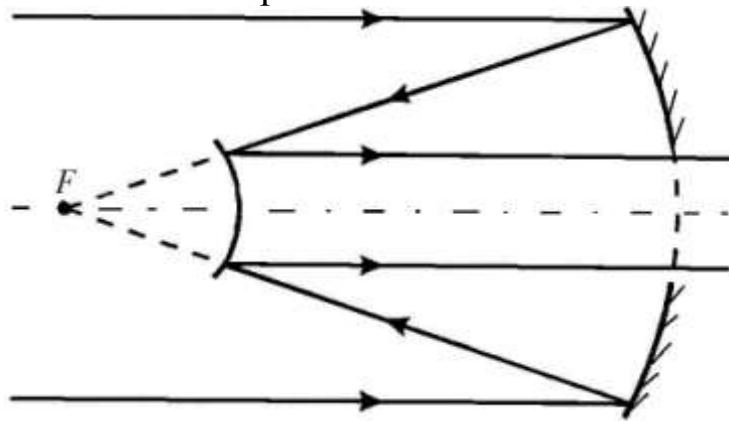


Рис. 10.2. Оптическая схема телескопа Мерсенна

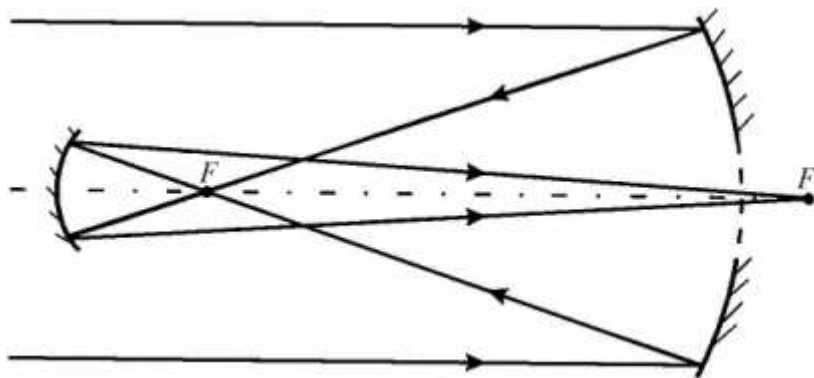


Рис. 10.3. Оптическая схема объектива телескопа Грегори

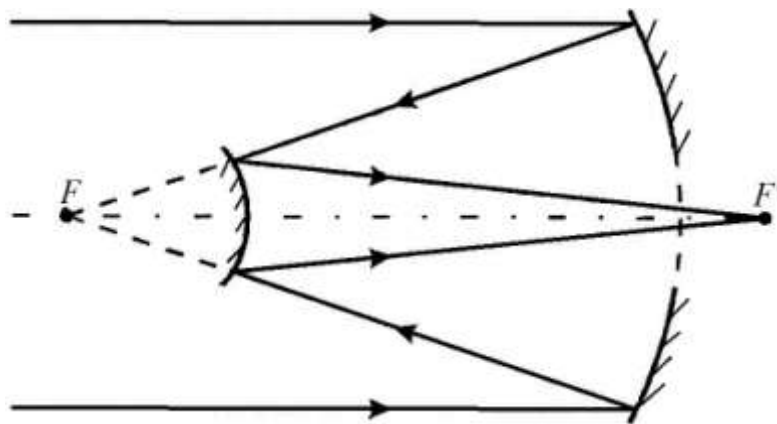


Рис. 10.4. Оптическая схема объектива телескопа Кассегрена

Заслуга создания первого рефлектора, пригодного для наблюдения, принадлежит английскому математику, механику, астроному и физику Исааку Ньютону (1643–1727), который в 1668 году собственноручно изготовил рефлектор с вогнутым зеркалом из зеркальной бронзы (сплав из 6 частей меди, 2 частей олова и 1 части мышьяка). При сферической форме отражающей поверхности диаметр вогнутого зеркала $D=2,5$ см, фокусное расстояние $f'=16,5$ см.

Для вывода изображения из падающего на зеркало пучка лучей И. Ньютон применил диагональное плоское зеркало, как показано на рис. 10.5. В 1671 году И. Ньютон изготовил второй телескоп, диаметр главного зеркала которого $D=3,4$ см, а фокусное расстояние $f'=15,9$ см.

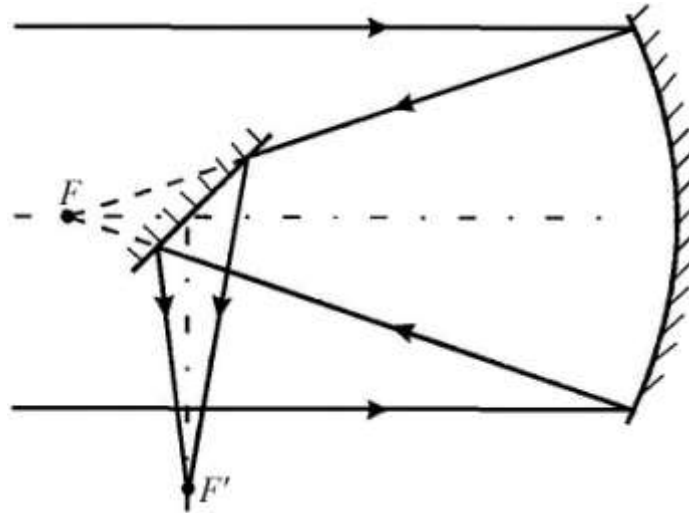


Рис. 10.5. Оптическая схема объектива телескопа Ньютона

В 1721 году Джон Гадлей изготовил ньютоновский телескоп с главным зеркалом из бронзы диаметром $D=15$ см при фокусном расстоянии $f'=158$ см. С помощью этого телескопа легко наблюдались не только спутники Юпитера, но и такие объекты, как щель Кассини в кольце Сатурна, которые с трудом различал Гюйгенс в свой 37-метровый «воздушный» рефрактор.

В 1732–1768 годах сначала в Эдинбурге, а затем в Лондоне Джеймс Шорт организовал фабричный выпуск высококачественных рефлекторов. Большинство из них было построено по схеме Грегори, причем диаметр самого большого главного зеркала $D=55$ см при фокусном расстоянии $f'=3$ м. Эти телескопы получили широкое распространение.

Во время заграничных путешествий Петр I приобрел телескопы и угломерные инструменты, предполагая организовать в России научные астрономические наблюдения с их практическим выходом в теорию кораблеводства и геодезию. Один из сподвижников Петра генерал-фельдцейхмейстер русской армии Яков Вилимович Брюс (1670–1735) не только занимался астрономическими наблюдениями в обсерваториях, созданных им в Москве на Сухаревой башне и в своем подмосковном имении в Глинках, но также сам строил телескоп и изготовлял зеркала к ним. В 30-х годах XVIII века Брюс писал неизвестному лицу: «При этом пересылаю я к трубам зеркала, из коих

меньшее сделано с мышьяком, а другое – без мышьяка. Отошли их, пожалуйста, господину профессору Лейтману и сообщи, что я еще прошлым летом сделал катадиоптрическую трубу (отражательный телескоп). Оба зеркала к этой трубе изготовлены мною в своем доме. Эту трубу с окуляром в 2,8 дюйма я неоднократно употреблял для наблюдения Луны. Луна в ней выглядела отчетливо и ясно, и был виден весь ее диаметр». В Государственном Эрмитаже в Санкт-Петербурге сохранилось вогнутое зеркало для телескопа, изготовленное Брюсом в 1733 году.

В творческой деятельности основоположника русской науки Михаил Васильевича Ломоносова (1711–1765) на всем ее протяжении важное место занимали вопросы прикладной оптики и особенно конструирование и изготовление различных оптических приборов и инструментов. М.В. Ломоносов разработал несколько разновидностей зеркальных телескопов, отличающихся от широко известных в то время рефлекторов Грегори и Ньютона, которые он изготавливал в период с 1761 по 1765 год. В марте 1762 года М.В. Ломоносов решил создать телескоп с наклоном главного зеркала к оси трубы и выполнил все необходимые для этого расчеты. Построив и опробовав его 15 апреля 1762 года, он записал: «Изображение произведено в действие с желательным успехом». Известно, что через 12 лет (в 1774 году) аналогичную конструкцию зеркального телескопа предложил Вильям Гершель.

Музыкант по профессии, В. Гершель из Ганновера переселился в английский город Бат и из любителя астрономии в короткое время вырос в крупного астронома и оптика. Тогда уже существовали совершенные системы линзовых телескопов Д. Доллонда, но они стоили дорого. В. Гершель сам изготавливал более доступные телескопы-рефлекторы с бронзовыми зеркалами и даже продавал их. Им изготовлено около 100 зеркал для телескопов. Он довел их размеры до $D=1,22$ м и $f'=12$ м. Наиболее крупное зеркало из сплава 75% меди и 25% олова он заключил в трубу и смонтировал на азимутальной установке, подвижной по вертикали и горизонтали. Зеркало весило 960 кг при толщине 9 см [38].

Несмотря на недостатки конструкции, большие телескопы гершелевского типа продолжали строить. Широкую известность из них получили телескопы англичанина У. Ласселя и ирландца Т. Гребба.

Самый крупный рефлектор с металлическим зеркалом был создан ирландским аристократом Вильямом Парсонсом, носившим титул

лорда Росса. В своем поместье Росс построил оптико-механические мастерские, своих крестьян он обучил оптике и механике, превратив их тем самым в опытных механиков и инженеров. Все вспомогательное оборудование находилось на высшем уровне техники того времени.

Исполненное зеркало диаметром $D=2$ м, толщиной 15 см, с фокусным расстоянием $f'=14$ м было отлито весной 1842 года. Три года ушло на его обработку и, наконец, в феврале 1845 года «левиафан» лорда Росса стал пригодным для созерцания вселенной. Телескоп Росса построен по схеме Ньютона, при этом площадка наблюдателя находилась сбоку от инструмента. Впрочем, иногда Росс наблюдал и по схеме Ломоносова. Открытия, сделанные Россом с помощью созданного телескопа, трудно переоценить.

До середины XIX века для астрономических зеркал использовалась зеркальная бронза, содержащая у разных исполнителей от 67 до 75% меди, от 33 до 25% олова и в некоторых случаях до 2% мышьяка. Коэффициент отражения свежеотполированных зеркал достигал 60%. Ю. Либих и К. Штейнгель в Германии в 1856 году и Л. Фуко во Франции в 1857 году применили химическое серебрение стеклянных зеркал. С середины XIX века тяжелые металлические зеркала были вытеснены более легкими стеклянными с серебряным покрытием. Технология шлифовки и полировки стеклянных поверхностей много проще, чем металлических. Стекло хорошо поддается отжигу, а его прозрачность позволяет исследовать оптическими методами остаточные напряжения в нем. Решительная победа «стеклянных» рефлекторов над «металлическими» была обусловлена еще и тем, что Л. Фуко изобрел оригинальный метод контроля формы обрабатываемой поверхности («теневого метод»), сразу резко повысивший качество изготовления зеркал. Теперь задача состояла в том, чтобы научиться отливать крупные стеклянные заготовки зеркал.

Уже в 1878 году в Париже установили рефлектор со стеклянным зеркалом, посеребренным по методу Л. Фуко. Диаметр этого зеркала был таким же, как у крупнейшего из гершелевских телескопов ($D=122$ см). В 1908 году в Калифорнии в обсерватории Маунт Вилсон был установлен изготовленный Ричи 60-дюймовый рефлектор и в течение 9 лет этот великолепный по качеству изготовления рефлектор оставался крупнейшим из действующих телескопов. В 1917 году в той же обсерватории установили новый 100-дюймовый рефлектор работы

Ричи. На протяжении последующих 33 лет этот телескоп прочно удерживал первенство среди действующих телескопов.

Главное зеркало современного рефлектора является наиболее ответственным устройством телескопа, определяющим его выходные параметры. Помимо необходимости решения очевидных проблем, возникающих при изготовлении круглой заготовки главного зеркала и качественной обработки ее рабочей поверхности, необходимо решение основной конструкторской проблемы – проблемы обеспечения высокой стабильности формы отражающей поверхности зеркала как в процессе ее обработки, так и в весьма сложных условиях эксплуатации в обсерватории.

Вполне очевидны два основных источника деформации зеркала: деформации вследствие температурных градиентов в материале зеркала, возникающих в результате изменений температуры окружающей среды, и деформации от собственного веса зеркала. Если уменьшение влияния перепада температуры достигается, прежде всего, выбором материала, то уменьшение деформации поверхности зеркала от его собственного веса определяется и конструктивными параметрами зеркала.

В простейшем случае главное зеркало представляет собой равнотолщинный мениск. Поскольку относительная величина высоты сегмента, образованного отражающей поверхностью, достаточно мала, для оценки прогиба зеркала от собственного веса заменим мениск круглой плоскопараллельной пластиной. Прогиб δ свободно опертой круглой пластины диаметра D и толщины h , изготовленной из материала с модулем упругости E , коэффициентом Пуассона μ и плотностью γ , равен [39]:

$$\delta = G \frac{D^2}{q^2} (1 - \rho^2) \left(\frac{5 + \mu}{1 + \mu} - \rho^2 \right), \quad (10.1)$$

где $q = \frac{h}{D}$; $G = \frac{3}{256} \frac{1 - \mu^2}{E} \gamma$; $\rho = \frac{r}{r_0} = 2 \frac{r}{D}$, где r – расстояние от оси до произвольной точки поверхности круглой пластины, при этом $0 \leq \rho \leq 1$.

При $\rho=0$: $\delta_0 = G \frac{D^2}{q^2} \frac{5 + \mu}{1 + \mu}$. При этом плоский волновой фронт,

падающий на отражающую поверхность, принимает форму, отклонение которой от плоскости равно:

$$W_p(\rho) = 2(\delta_0 - \delta) = 2G \frac{D^2}{q^2} \rho^2 \left(\frac{5 + \mu}{1 + \mu} + 1 - \rho^2 \right). \quad (10.2)$$

Заметим, что если $\rho=0$, то $W_p(0)=0$, а если $\rho=1$, то $W_p(1) = 2G \frac{D^2}{q^2} \frac{5+\mu}{1+\mu}$. Сферичность волнового фронта можно компенсировать перефокусировкой изображения. Отклонение сферического волнового фронта от плоского можно определить выражением:

$$W_c(\rho) = R - \sqrt{R^2 - r_0^2 \rho^2} = R \left(1 - \sqrt{1 - \frac{r_0^2}{R^2} \rho^2} \right),$$

где R – радиус сферического волнового фронта. При малой величине отклонения можно принять:

$$W_c(\rho) = \frac{1}{2} \frac{r_0^2}{R^2} \rho^2. \quad (10.3)$$

При $W_c(1) = W_p(1)$ имеем $W_c(\rho) = \frac{1}{2} \frac{r_0^2}{R^2} \rho^2 = 2G \frac{D^2}{q^2} \frac{5+\mu}{1+\mu}$. При этом выражение (10.3) можно представить в виде:

$$W_c(\rho) = 2G \frac{D^2}{q^2} \frac{5+\mu}{1+\mu} \rho^2. \quad (10.4)$$

В результате получаем, что остаточная (некомпенсируемая) деформация волнового фронта определяется разностью выражений (10.2) и (10.4):

$$W_0(\rho) = W_p(\rho) - W_c(\rho) = 2G \frac{D^2}{q_0^2} (1 - \rho^2) \rho^2. \quad (10.5)$$

Из условия $\frac{dW_0(\rho)}{d\rho} = 0$ находим, что деформация волнового фронта принимает экстремальное значение при $\rho = \pm \frac{\sqrt{2}}{2}$. При этом

$$W_0(\rho)_{\text{ext}} = \frac{1}{2} G \frac{D^2}{q_0^2}. \text{ Положив } W_0(\rho)_{\text{ext}} \geq k\lambda, \text{ получаем}$$

$$q_0 \geq D \sqrt{\frac{G}{2k\lambda}}, \text{ а } h \geq D^2 \sqrt{\frac{G}{2k\lambda}}. \quad (10.6)$$

При $k \leq \frac{1}{4}$ максимальная величина нормированной освещенности $i(P'_0)$ (число Штреля) в изображении точки приближенно определяется выражением [40]:

$$i(P'_0) = 1 - \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \omega^2, \quad (10.7)$$

где ω – среднеквадратическая величина деформации волнового фронта, равная $\omega = \sqrt{\bar{W}^2 - (\bar{W})^2}$, при этом

$$\bar{W}^n = \frac{1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} W^n(\rho, \varphi) \rho d\rho d\varphi = 2 \int_0^1 W^n(\rho) \rho d\rho. \quad (10.8)$$

Применив последовательно выражения (10.5), (10.8) и (10.7), получаем

$$q_0 \geq D \sqrt{\frac{2\pi}{15\lambda}} G \sqrt{\frac{5}{1-i(P'_0)}}. \quad (10.9)$$

Легко убедиться, что при $k \leq \frac{1}{4}$ (критерий Релея) и при $i(P'_0) \geq 0,8$ (критерий Марешаля) выражения (10.6) и (10.9) дают практически одинаковую величину q_0 , равную

$$q_0 \geq D \sqrt{\frac{2G}{\lambda}}. \quad (10.10)$$

При изменении положения трубы телескопа в процессе наведения на объект наблюдения и слежения за ним ось зеркала в оправе отклоняется от нормали к поверхности Земли, при этом изменяется характер распределения сил воздействия зеркала на оправу, а, следовательно, изменяется величина и форма прогиба зеркала. Поэтому в общем случае условие стабильности отражающей поверхности зеркала естественно определять без учета возможной перефокусировки изображения. Используя выражения (10.2), (10.8) и (10.7) при $i(P'_0) \geq 0,8$ получаем

$$q \geq 2q_0 \sqrt[4]{\psi}, \quad (10.11)$$

где $\psi = 1 + \frac{15}{2} \frac{3+\mu}{(1+\mu)^2}$; $q_0 = D \sqrt{\frac{2G}{\lambda}}$.

Для однородных материалов коэффициент Пуассона изменяется достаточно в узких пределах. Поэтому можно считать, что в соответствии с формулой (10.1) прогиб пластины

$$\delta \sim \frac{\gamma}{E} \frac{D^4}{h^2}. \quad (10.12)$$

Зеркало телескопа должно сохранять свою форму при изменении положения в пространстве. Сохранение формы зависит не только от

материала зеркала, но и от системы его разгрузки. Поэтому жесткость зеркала Д.Д. Максудов определяет коэффициентом [36]

$$\sigma_{\min} = \frac{E}{\gamma} C_n \frac{h^2}{D^4}, \quad (10.13)$$

где C_n – постоянная, зависящая от системы разгрузки и единиц измерения, называемая коэффициентом Данжона–Кудера.

Массу зеркала (пластины) определяем выражением

$$m = \frac{\pi D^2}{4} h \gamma.$$

Учитывая формулу (10.13), получаем

$$m = \frac{\pi D^4}{4} \sqrt{\frac{\sigma_{\min}}{C_n}} \sqrt{\frac{\gamma^3}{E}}.$$

Отсюда следует, что относительный вес различных зеркал, имеющих одинаковый диаметр и заданную жесткость, пропорционален величине [36]:

$$\omega = \sqrt{\frac{\gamma^3}{E}}. \quad (10.14)$$

Зеркало должно сохранять свою форму и при изменении температуры. Если теплопроводность материала $\lambda = \infty$, то градиентов температуры в материале нет. В этом случае все линейные размеры зеркала изменяются по закону $l_{t_1} = l_{t_0} [1 - \alpha(t_1 - t_0)]$, где α – коэффициент линейного расширения; t_0 , t_1 – начальное и конечное значение температуры. При этом зеркало остается подобным себе, изменяется лишь фокусное расстояние системы на величину

$$\Delta f' = \alpha f' \Delta t, \quad (10.15)$$

а качество изображения сохраняется неизменным. С другой стороны, если коэффициент линейного расширения материала зеркала равен нулю ($\alpha = 0$), то никакие перепады температуры не могут повлиять на геометрические параметры зеркала. Теплопроводность λ и коэффициент линейного расширения α стекла имеют вполне конечные значения. Это приводит к тому, что при ночном падении температуры центральная часть зеркала еще сохраняет прежнюю температуру, в то время как наружные слои уже остыли. В результате краевая часть зеркала, примыкающая к наружной лицевой и к образующей цилиндрической поверхности, охлаждается на большую глубину, чем остальная часть зеркала, и край его деформируется сильнее. Г. Ричи назвал это эффектом края.

Д.Д. Максудов ввел коэффициенты количественной оценки теплофизических свойств материала астрономического зеркала. Распространение температуры в материале зеркала определяется температуропроводностью материала τ , т.е. скоростью, с которой передается изменение температуры в материале от точки к точке. Она связана с теплопроводностью λ , теплоемкостью C и плотностью γ материала зависимостью

$$\tau = \frac{\lambda}{C\gamma}. \quad (10.16)$$

Чем выше температуропроводность материала τ , тем предпочтительнее этот материал для применения. Как уже отмечалось, что чем меньше коэффициент линейного расширения материал, тем к меньшим деформациям зеркала приведет изменение температуры. И, наконец, температурные и механические деформации тем меньше, чем выше упругость материала, характеризуемая модулем Юнга E . Поэтому качество материала для зеркала Д.Д. Максудов характеризовал коэффициентом, который принято называть коэффициентом Максудова

$$\mu = \frac{E\tau}{\alpha} = \frac{E}{\gamma} \frac{\lambda}{C\alpha}. \quad (10.17)$$

С середины 30-х годов XX века для изготовления астрономических зеркал применялось специфическое стекло с уменьшенным значением коэффициента линейного расширения ($\alpha=(25-32) \cdot 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$), получившее название «пирекс». Главное зеркало 200-дюймового рефлектора обсерватории Мауни Паломар (Калифорния) изготовлено из пирекса.

Еще в 30-х годах прошлого века советские ученые И.В. Гребенщиков и Н.Г. Пономарев предлагали применять в крупногабаритных рефлекторах зеркала с ребристой структурой на тыльной стороне. Это существенно уменьшало вес зеркала при сохранении его жесткости. Американские оптики, изготовившие зеркало 200-дюймового рефлектора, использовали идею советских ученых. Зеркало этого телескопа с тыльной стороны имеет ребристую структуру. И, тем не менее, при диаметре 5 м и фокусном расстоянии 16,5 м вес главного зеркала составляет 13 тонн.

В 1975 году был принят в эксплуатацию телескоп БТА (Большой Телескоп Азимутальный), впервые построенный на основе применения альт-азимутальной монтировки при автоматическом наведении телескопа на объект наблюдения и автоматическом

сопровождении его. Телескоп создан в ЛОМО под руководством главного конструктора Б.К. Иоаннисиани (1911–1985). Главное зеркало телескопа БТА диаметром $D=6050$ мм и толщиной $h=650$ мм изготовлено из однородного малопузырного стекла пирекс «316». Его отражающая поверхность имеет форму параболоида вращения. Такое зеркало представляется массивным и достаточно жестким диском. Однако заметим, что прогиб зеркала пропорционален отношению $\frac{D^4}{h^2}$. Пусть тот же прогиб имеет зеркало диаметром D_3 и толщиной h_3 .

При этом из равенства $\frac{D^4}{h^2} = \frac{D_3^4}{h_3^2}$ находим, что

$$h_3 = \frac{D_3^2}{D^2} h.$$

При $D=6050$ мм; $h=650$ мм, а $D_3=1$ м получаем $h_3=17,76$ мм. Такая пластина жесткой уже не кажется. Расчетами было установлено, что зеркало телескопа БТА достаточно разгрузить в 60 точек, как в торцевом, так и в радиальном направлениях. При этом амплитуда упругих деформаций в пределах рабочей зоны зеркала не превышает 0,01 мкм. При обработке заготовки зеркала была проведена разметка, сверление и фрезерование 60 глухих отверстий для размещения механизмов разгрузки и их обработка. Масса зеркала, вычисленная по фактическим размерам, равна 41700 кг.

В конце 50-х годов прошлого столетия появился новый материал, который в разных странах получил разные фирменные названия: пирокерам и сервит – в США, ситалл – в СССР, церодур – в ФРГ. Ситаллы могут иметь практически нулевой коэффициент линейного расширения. Сейчас освоена технология изготовления крупных заготовок из ситалла. Ситалл СО-115М изготавливается Лыткаринским заводом оптического стекла (ОАО «ЛЗОС») в виде дисков, квадратных и прямоугольных пластин с максимальным размером до 3000 мм с различными формами облегчения.

В конце 60-х годов появился еще один новый материал – плавленый кварц, легированный двуокисью титана (TiO_2). За рубежом он получил название ULE.

Огромным достижением науки и техники явилось создание в США космического телескопа «Хаббл», построенного по схеме Ричи–Кретьена, с главным зеркалом диаметром $D=2,4$ м. В 1990 году телескоп «Хаббл» был доставлен на орбиту высотой 600 км космическим кораблем «Дискавери». Главное зеркало телескопа

«Хаббл» состоит из двух пластин (передняя и задняя поверхности зеркала) толщиной около 25 мм, находящихся на расстоянии 250 мм друг от друга и соединенных между собой сотовой конструкцией из ребер толщиной около 10 мм. В качестве материала для пластин и ребер использовано стекло марки ULE – легированный кварц со сверхмалым коэффициентом расширения («ULE» – ultralow expansion) [41].

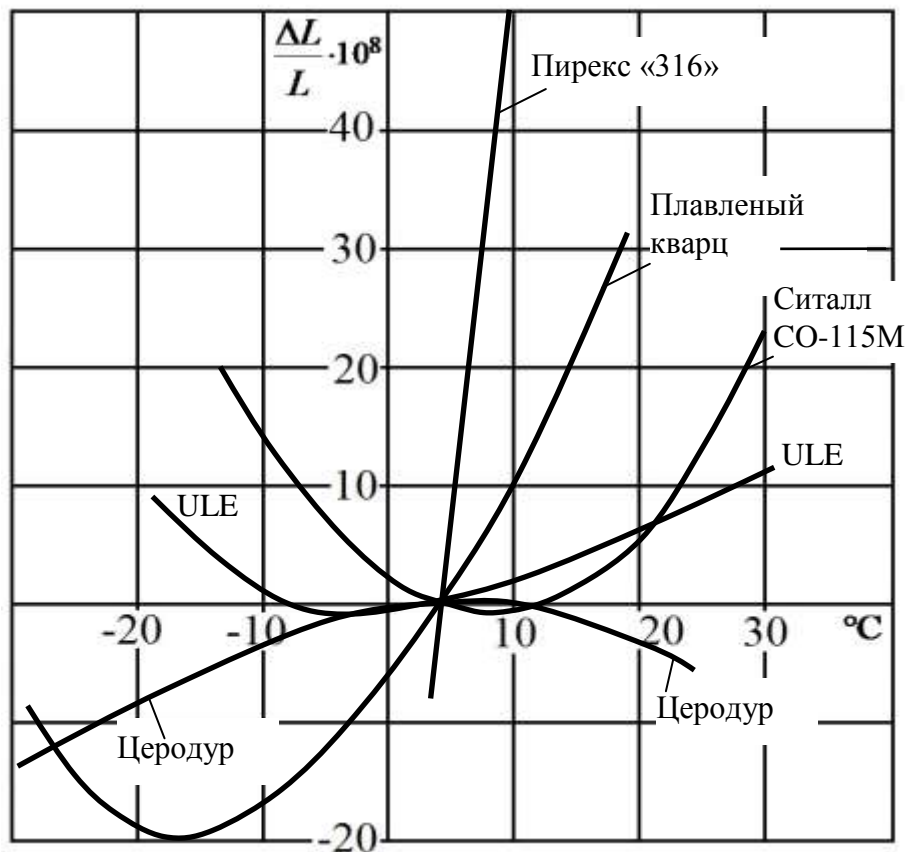


Рис. 10.6. Относительное удлинение различных материалов при изменении температуры

Таблица 10.2. Характеристики основных материалов для астрономических зеркал

Материал	γ , г/см ³	E , кг/мм ²	λ , кал/(см·сек·°С)	C , кал/(г·°С)	$\alpha \cdot 10^7$, 1/°С	τ , см ² /сек	$E/\gamma \cdot 10^{-8}$, 1/см	μ	ω
Крон К8	2,52	8230	0,0023	0,18	70	0,00504	3,3	0,53	0,91
Пирекс «316»	2,48	6685	0,0021	0,17	30	0,00498	2,69	1,00	1,00
Кварц плавле- ный	2,21	7450	0,0032	0,165	4	0,00875	3,4	14,6	0,79
Ситалл СО-115М	2,46	10000	0,0042	0,22	±1	0,00774	4,1	70,0	0,81

Материал	γ , г/см ³	E , кг/мм ²	λ , кал/(см· сек·°С)	C , кал/(г· °С)	$\alpha \cdot 10^7$, 1/°С	τ , см ² /сек	$E/\gamma \cdot 10^{-8}$, 1/см	μ	ω
ULE	2,213	6889	0,00313	0,183	0,2	0,0079			
Зеркаль- ная бронза	8,6	8000	0,20	0,18	186	0,130	0,93	4,9	5,87
Сталь	7,7	21000	0,11	0,12	110	0,120	2,7	20,6	3,06
Инвар	7,9	14000	0,0262	0,123	5–12	0,022	1,8	31	3,82
Серебро	10,5	7000	1,01	0,056	195	1,70	0,67	55	8,40
Алюми- ний	2,70	7500	0,48	0,214	255	0,83	2,8	22	1,06
Бериллий	1,85	30000	0,38	0,392	111	0,524	16,2	127	0,30
Титан	4,5	10500	0,13	0,142	71	0,20	2,3	25	1,95
Молибден	10,0	35000	0,35	0,065	55	0,54	3,5	310	3,51
Сплав АМг6Л	2,21	7000	0,275	0,226	238	0,465	2,78	12,5	0,85

На рис. 10.6 представлены кривые, определяющие зависимость относительного удлинения пирекса «316», кварца, ситалла марки СО-115М, церодура и ULE. Характеристики основных материалов для астрономических зеркал приведены в табл. 10.2. Из анализа характеристик, приведенных в таблице, следует перспективность использования такого легкого и дешевого материала как алюминий. Но чистый алюминий – очень мягкий металл, сформировать точную форму поверхности на нем весьма сложно. В США широко применяется химическое осаждение фосфорного никеля на чистый алюминий. Этот процесс получил название «каниген». Слой канигена толщиной около 0,07 мм аморфен, тверд, химически устойчив, хорошо полируется, дает малое рассеяние света. В 1974 году в обсерватории Пенн-Стейн (США) вступил в строй рефлектор диаметром 1,5 м. Его главное зеркало отлито из алюминия и покрыто канигеном [36]. Ж.М. Лорецян (Бюраканская обсерватория) исследовал ряд металлов, в том числе алюминиево-магниевый сплав АМг6Л с хромовым и никелевым покрытиями и показал перспективность этих материалов.

Из всех материалов наибольшее значение коэффициента μ имеют молибден и бериллий. Но молибден при $\gamma=10,2$ г/см³ имеет малое значение отношения $\frac{E}{\gamma}$, в то время как у бериллия оно составляет 16,2. Коэффициент ω бериллия составляет всего 0,35. Главным недостатком бериллия с технологической точки зрения является его

высокая токсичность, что делает необходимым проведение специальных мероприятий, исключающих попадание бериллия и его соединений во внешнюю среду при технологических операциях [41].

По нормам, принятым в СССР, предельно допустимые концентрации (ПДК) бериллия в воздухе составляют $0,01 \text{ мкг/м}^3$, а в воде – $0,2 \text{ мкг/л}$. Естественное содержание бериллия в воздухе и в воде, как правило, составляет долю от предельно допустимой концентрации, т.е. $0,1 \text{ ПДК}$. В рабочей зоне производства бериллия и его обработки предельно допустимая концентрация бериллия в России составляет 1 мкг/м^3 , в Англии и США – 2 мкг/м^3 . В этих зонах должны быть предусмотрены индивидуальные средства защиты рабочих и особые условия труда. Поэтому в случае использования бериллия вообще нежелательна непосредственная оптическая обработка из-за очень больших трудностей обеспечения экологической безопасности работающих и окружающего пространства.

Профессор И.И. Крыжановский разработал технологию соединения стекла с металлом методом спекания. На основе этого метода в Государственном оптическом институте (ГОИ) им. С.И. Вавилова разработана уникальная технология создания металлических зеркал с использованием конструкционных стеклянных покрытий. Разработка специальных стекол для этих целей проводилась специалистами института оптических материалов под руководством академика РАН, профессора Г.Т. Петровского.

При разработке стекла для конструкционного покрытия необходимо учитывать множество требований и факторов, основными из которых являются:

- обеспечение адгезии стекла к металлу;
- возможность согласования температурного коэффициента линейного расширения стекла и основы;
- обеспечение на необходимом уровне твердости и химической стойкости стеклянного покрытия;
- обеспечение требуемого интервала температур размягчения стекла;
- исключение процессов кристаллизации стекла.

Технология нанесения конструкционного покрытия на металлическую основу включает следующие основные операции:

- изготовление стеклянных пластин толщиной $3\text{--}5 \text{ мм}$;
- укладка стеклянных пластин на поверхность металлического основания зеркала;

– нагрев, выдержка и охлаждение сборки по заданному температурно-временному режиму.

В результате на металлическом основании образуется прочно соединенный с последним сплошной стеклянный слой. При последующей механической обработке (шлифовке) толщина слоя уменьшается и в готовых изделиях составляет 0,5–1 мм.

В результате выполненных исследований были разработаны стекла и технология нанесения покрытий на зеркала из бериллия, титана и богатых кремнием алюминиевых сплавов [42]. Изготовлены и исследованы зеркала диаметром до 1200 мм. Зеркала со стеклянным покрытием выдерживают охлаждение до температуры минус 60°C без разрушения последнего. Технические возможности позволяют наносить стеклянные покрытия на зеркала диаметром до 1500 мм.

В России начало поиску и разработке новых подходов и созданию оптических зеркал (нетрадиционных материалов, новых конструктивных и технологических решений) было положено сотрудниками ГОИ им. С.И. Вавилова по инициативе члена-корреспондента РАН профессора М.М. Мирошникова [42]. Ими было показано, что, превосходя стеклообразные материалы по теплопроводности более, чем на два порядка, ряд металлов и других материалов даже при относительно высоких значениях относительного ТКЛР сохраняют форму отражающей поверхности при температурных изменениях окружающего пространства, претерпевая, однако, масштабные изменения.

Кремний обладает благоприятным сочетанием физико-механических и теплофизических свойств для удовлетворения требований, предъявляемых к материалам зеркальной оптики [43].

Малый удельный вес при относительно высоком модуле упругости и низкий ТКЛР при высокой теплопроводности и температуропроводности обеспечивают зеркалам из кремния весьма привлекательный уровень основных функциональных характеристик. К положительным свойствам кремния следует отнести возможность получения сверхгладких поверхностей на уровне 20 Å путем непосредственной оптической обработки.

Разработка технологии изготовления зеркал из кремния была начата в начале 1980-х годов и потребовала решения многих научно-технических и технологических проблем. В результате была разработана технология изготовления облегченных зеркал из кремния диаметром до 600 мм. Исходные заготовки с сотовой облегчающей

структурой изготавливаются методом литья кремния в графитовые формы.

Технология создания крупногабаритных облегченных зеркал из карбида кремния, получившего условное название «сикар», была разработана в ГОИ им. С.И. Вавилова в первой половине 1990-х годов, когда были изготовлены различные образцы облегченных зеркал диаметром от 200 до 930 мм [44]. Под словами «карбид кремния» понимается двухфазный композиционный материал, состоящий из карбида кремния и кремния в отношении по объему (80–85)/(15–20)% соответственно. Исключительно благоприятное сочетание физико-механических и теплофизических свойств сикара позволяет свести к минимуму воздействие внешних источников размерной нестабильности зеркал, таких, как гравитационное и температурное поля. Подобные деформации являются обратимыми и исчезают при прекращении воздействия внешнего фактора. Неизменными являются и параметры шероховатости оптических поверхностей. Зеркала из сикара демонстрируют также отсутствие необратимых изменений (гистерезиса) формы после нагрева до 100°C и охлаждения вплоть до криогенных (20 К) температур.

Привлекает внимание разработчиков материал для астрономических зеркал: экологически чистый высокотеплопроводный алмаз-карбидный композиционный материал «скелетон» [45]. Композит алмаз-карбид кремния – новый тип композиционного материала с уникальными свойствами, полученный путем химических реакций. В зависимости от концентрации алмаза и карбида кремния модуль упругости принимает значения в диапазоне 550–700 ГПа при плотности 3,1–3,3 г/см³. Твердость материала по Кнуппу составляет 50–55 ГПа. Теплопроводность достигает 600 Вт/(м·К), т.е. выше теплопроводности меди. Такое сочетание свойств объясняется микроструктурой материала, формируемой жесткой карбидокремниевой матрицей, армированной алмазными частицами.

Материал получают по «безусадочной» технологии, которая позволяет производить изделия не только сложных форм, но и больших габаритов. Одним из альтернативных методов получения изделий требуемого размера и формы является проведение химических реакций в объеме заготовки. При этом объемное содержание карбида кремния в материале заготовки определяется количеством углерода, вступившего в реакцию с кремнием.

Этим методом получают сверхтвердый материал с высокой износостойкостью, что крайне затрудняет механическую обработку готовой заготовки. Поэтому придание формы изделия на ранних стадиях технологического процесса и последующее преобразование состава и структуры материала внутри заготовки весьма перспективно.

Свойства перспективных материалов приведены в табл. 10.3 [46].

Таблица 10.3. Свойства перспективных материалов

Параметр	Материал				
	Be	Si	Композит АКК (скелетон)	Композит SiC/Si (сикар)	Ситалл СО-115М
Плотность ρ , 10^3 кг/м ³	1,85	2,3	3,4	3	2,5
Модуль упругости E , ГПа	300	150	800	400	92
Удельная жесткость E/γ , 10^8 м	15,1	6,5	23,5	13,3	3,7
Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	190	160	650	180	1,3
Температуропроводность τ , 10^{-4} м ² /сек	0,59	0,97	3,2	0,86	0,006
ТКЛР α , 10^{-4} м ² /сек	11,4	2,5	2	2,5	0,15
Коэффициент термдеформаций α/λ , 10^{-8} м/Вт	6,5	1,6	0,3	1,4	11,5

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение П.1.1

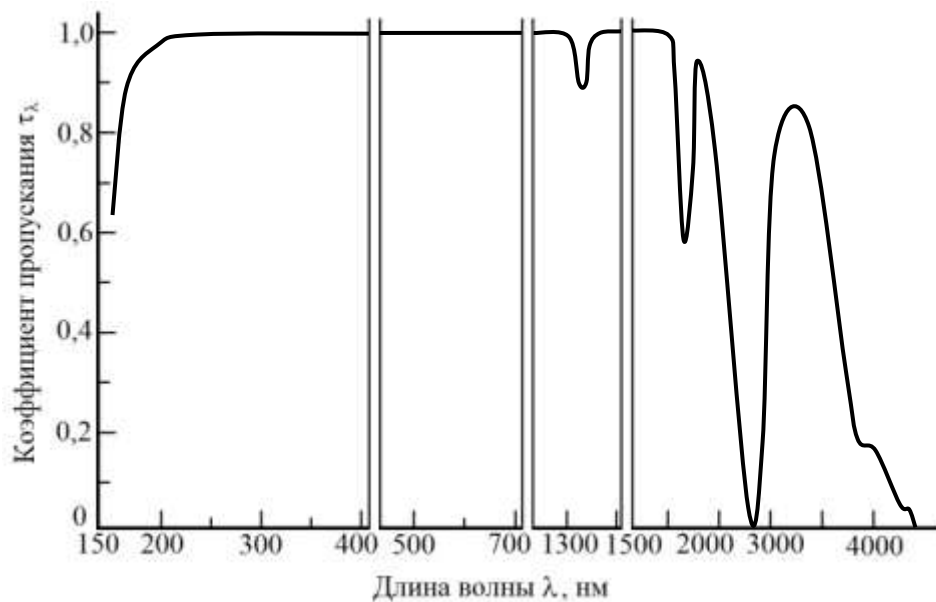


Рис. П.1.1. Спектральная кривая коэффициента пропускания кварцевого стекла марки КУ-1 в слое толщиной 1 см

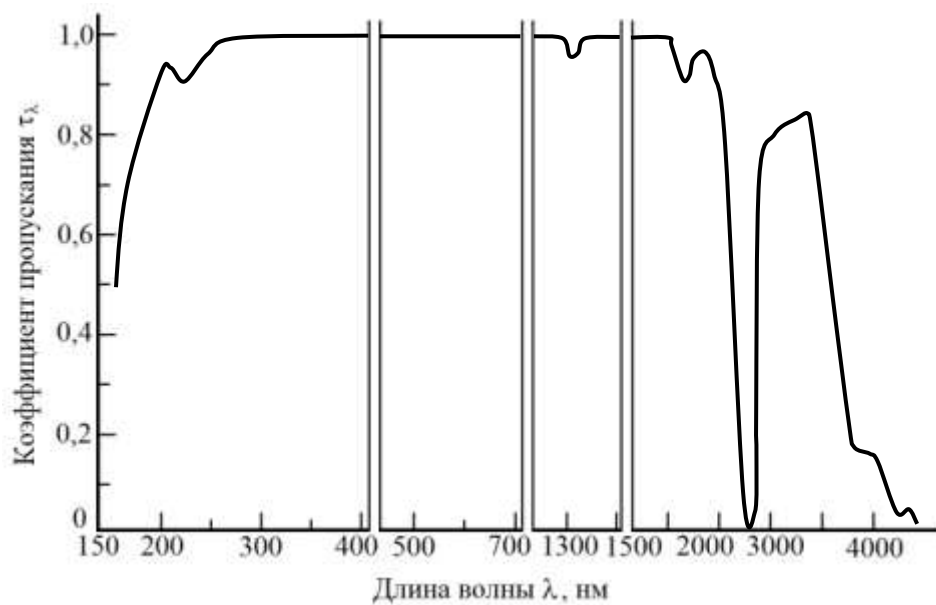


Рис. П.1.2. Спектральная кривая коэффициента пропускания кварцевого стекла марки КУ-2 в слое толщиной 1 см

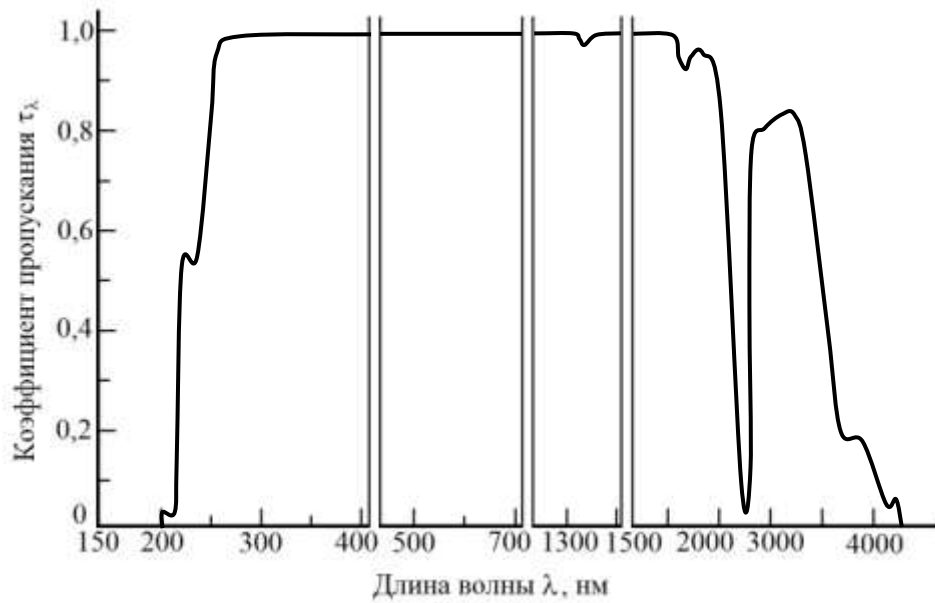


Рис. П.1.3. Спектральная кривая коэффициента пропускания кварцевого стекла марки КВ в слое толщиной 1 см

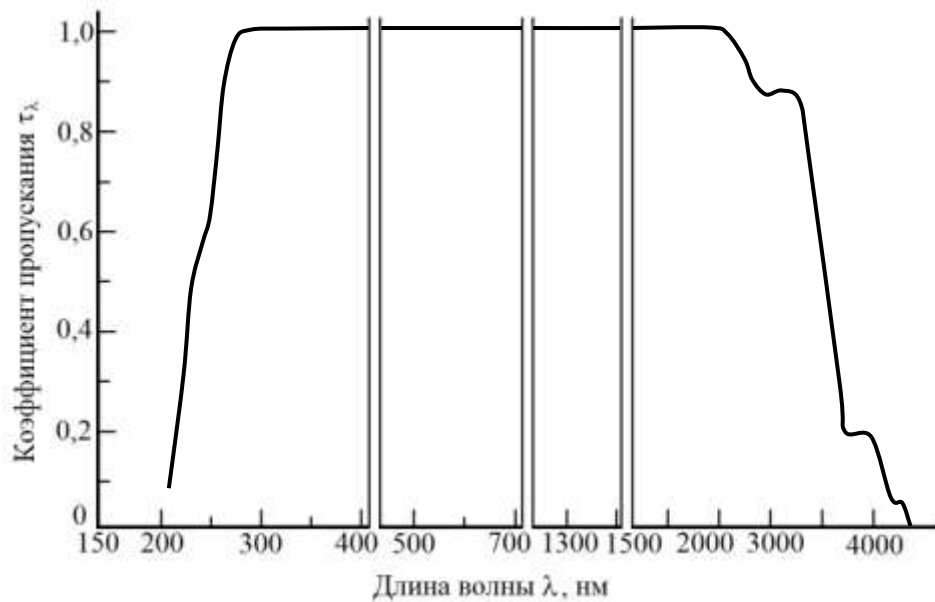


Рис. П.1.4. Спектральная кривая коэффициента пропускания кварцевого стекла марки КИ в слое толщиной 1 см

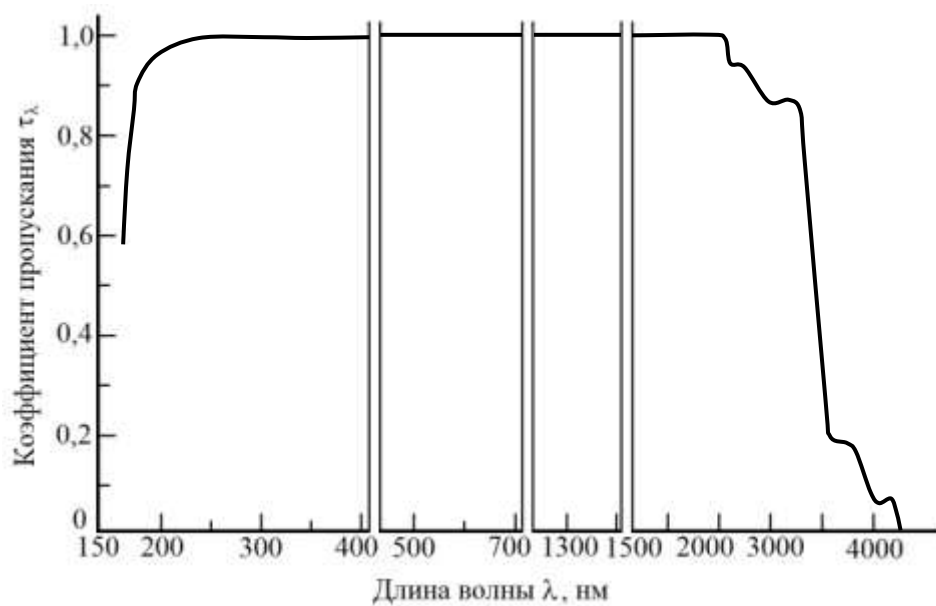


Рис. П.1.5. Спектральная кривая коэффициента пропускания кварцевого стекла марки КУВИ в слое толщиной 1 см

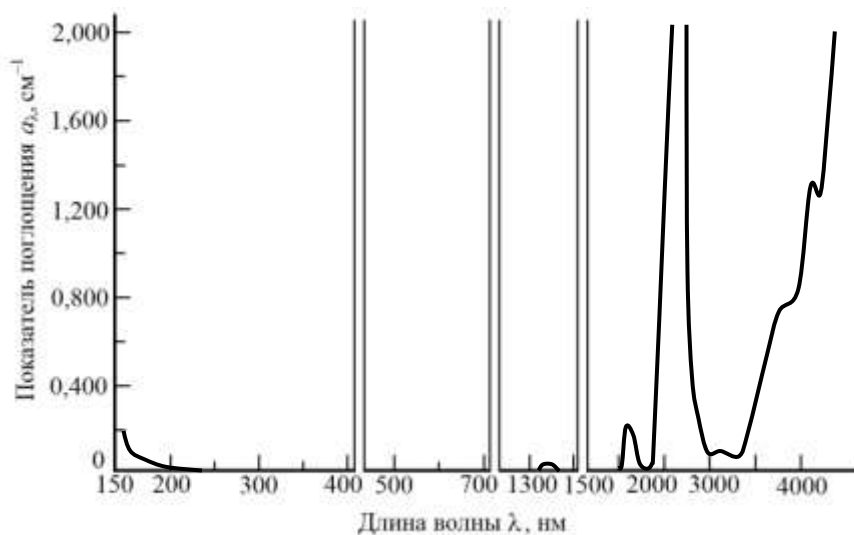


Рис. П.1.6. Спектральная кривая показателя поглощения кварцевого стекла марки КУ-1 в слое толщиной 1 см

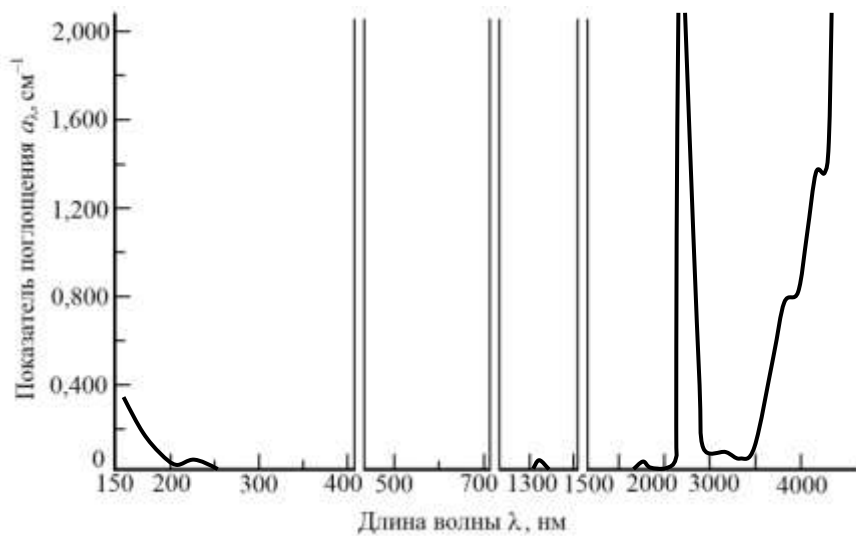


Рис. П.1.7. Спектральная кривая показателя поглощения кварцевого стекла марки КУ-2 в слое толщиной 1 см

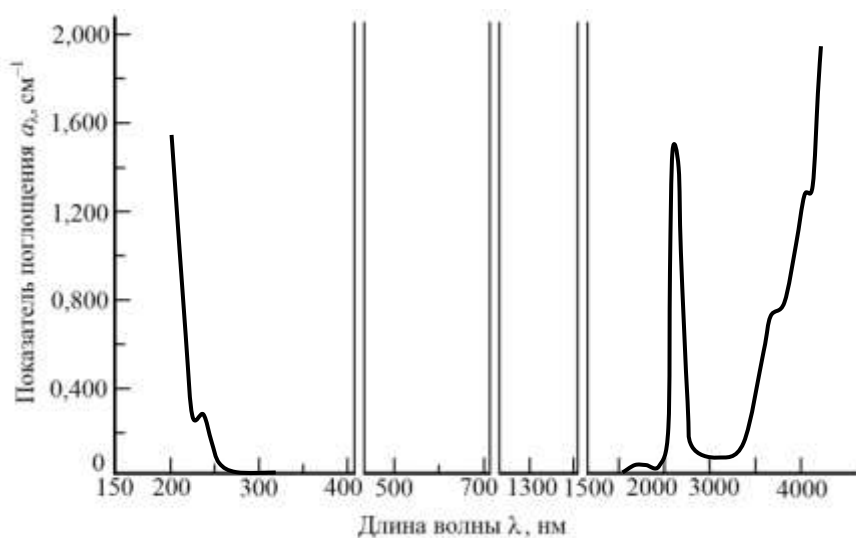


Рис. П.1.8. Спектральная кривая показателя поглощения кварцевого стекла марки KB в слое толщиной 1 см

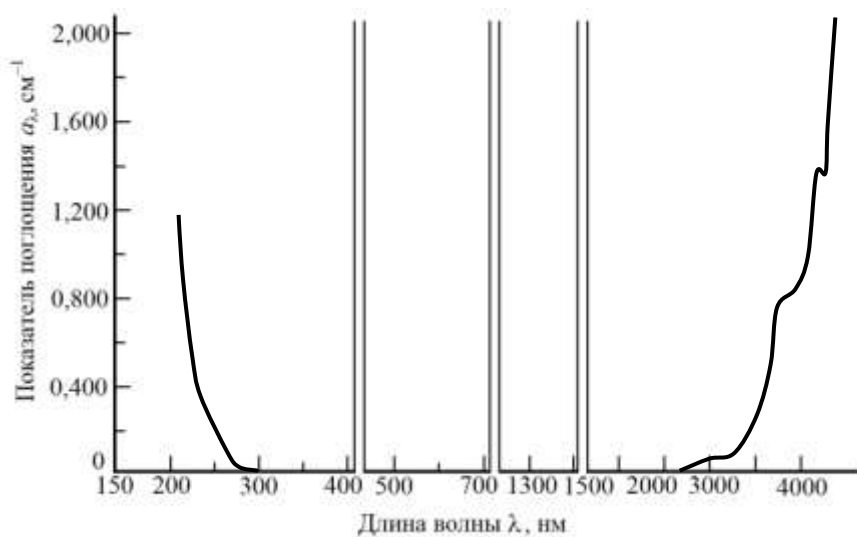


Рис. П.1.9. Спектральная кривая показателя поглощения кварцевого стекла марки КИ в слое толщиной 1 см

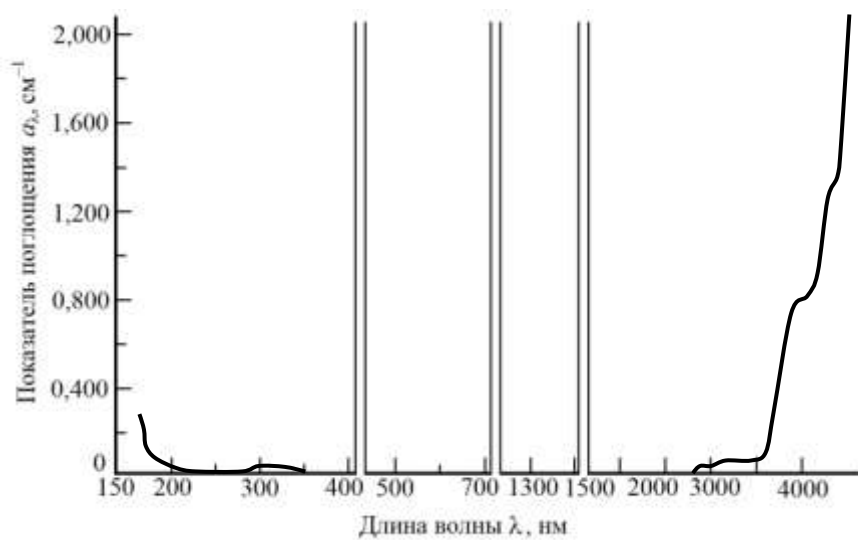


Рис. П.1.10. Спектральная кривая показателя поглощения кварцевого стекла марки КУВИ в слое толщиной 1 см

Таблица П.1.1. Показатели поглощения α_λ кварцевого стекла при различных длинах волн в слое стекла толщиной 1 см

Длина волны λ , нм	Коэффициент поглощения α_λ , см ⁻¹ , стекла марки				
	КУ-1	КУ-2	КВ	КИ	КУВИ
170	0,201	0,305	–	–	0,248
180	0,046	0,180	–	–	0,073
190	0,027	0,122	–	–	0,038
200	0,018	0,073	–	–	0,029
210	0,009	0,036	1,523	1,125	0,022
215	0,007	0,027	–	–	0,018
220	0,004	0,022	0,658	0,658	0,013
230	0,000	0,025	0,248	0,362	0,009
240		0,036	0,268	0,280	0,009
250		0,027	0,146	0,233	0,009
260		0,007	0,036	0,097	0,009
270		0,002	0,002	0,032	0,009
280		0,000	0,000	0,004	0,007
300		0,000	0,000	0,000	0,009
325	0,013				
350	0,009				
400	0,004				
500	0,000	0,000	0,000	0,000	
750					
1000					
1385					
2000	0,056	0,018	0,013	0,000	
2200	0,000	0,000	0,000		
2300	0,237	0,046	0,034		
2380	0,056	0,020	0,020		
2500	0,022	0,013	0,013		
2720	0,102	0,032	0,032		
2800	>2,5	>2,5	1,523		0,000
2900	>2,5	1,824	0,824	0,020	
3000	0,530	0,143	0,114	0,046	
3100	0,174	0,092	0,092	0,060	
3300	0,105	0,081	0,084	0,071	
3750	0,068	0,066	0,071	0,060	
3750	0,745	0,745	0,745	0,745	

Длина волны λ , нм	Коэффициент поглощения α_λ , см ⁻¹ , стекла марки				
	КУ-1	КУ-2	КВ	КИ	КУВИ
3900	0,733	0,733	0,733	0,733	0,733
4000	0,824	0,824	0,824	0,824	0,824
4220	1,301	1,301	1,301	1,301	1,301
4300	1,155	1,155	1,155	1,155	1,155
4400	>2,5	>2,5	>2,5	>2,5	>2,5

Таблица П.1.2. Поправка на отражение D_p от двух поверхностей при длине волны λ , нм

λ , нм	D_p	λ , нм	D_p	λ , нм	D_p
160	–	300	0,034	2800	0,026
170	0,049	400	0,032	3000	0,026
180	0,045	500	0,031	3200	0,025
190	0,043	1000	0,030	3400	0,025
200	0,041	1500	0,029	3600	–
210	0,040	1800	0,029	3800	–
220	0,039	2100	0,028	4000	–
230	0,038	2400	0,028	4200	–
240	0,036	2600	0,027	4400	–
250	0,035	2700	0,026		

Таблица П.1.3. Категории изготавливаемого кварцевого стекла по показателям качества

Наименование показателя качества	Категория стекла для заготовок размеров, мм														
	до 150 включит.					св. 150 до 300 включ.					св. 300 до 500 вкл.		св. 500 до 1200 вкл.		
	Марка стекла														
	КУ-1	КУ-2	КВ	КИ	КУВИ	КУ-1	КУ-2	КВ	КИ	КУВИ	КУ-1	КУ-2	КВ	КУ-2	КВ
Показатель поглощения в УФ-области спектра	01	1	–	–	1	1	2	–	–	1	1	2	–	2	–
Показатель поглощения в ИК-области спектра	–	–	–	1	1	–	–	–	1	1	–	–	–	–	–
Люминесценция	1	2	–	–	1	1	2	–	–	1	1	2	–	–	–
Двулучепреломление	01	1	1	4	1	01	1	1	4	1	1	2	2	2*	2*
Бесвильность	1	1	1	2	1	1	2	2	2	1	1	2	2	2*	2*
Мелкозернистая неоднородность	01	1	1	3	01	01	2	2	3	01	1	2	2	2*	2*

* Контроль проводится по согласованию между изготовителем и потребителем.

Таблица П.1.4. Категории изготавливаемого кварцевого стекла по оптической однородности

Марка стекла	Категория стекла по оптической однородности для заготовок размеров, мм			
	до 150 включ.	св. 150 до 300 включ.	св. 300 до 500 включ.	св. 500 до 1200 включ.
КУ-1	1-4	2-4	3-5	—
КУ-2	1-4	1а-5	2-5	—
КВ	1-4	1а-5	2-5	—
КИ	3-5	3-5	—	—
КУВИ	1а-5	2-5	—	—

Таблица П.1.5. Категории изготавливаемого кварцевого стекла по пузырьности

Наименование показателя качества	Категория стекла при массе заготовки, кг											
	до 0,500 включит.				св. 0,500 до 1,000 включ.				св. 1,000 до 2,000 включ.			
	Марка стекла											
	КУ-1	КУ-2, КВ	КИ	КУВИ	КУ-1	КУ-2, КВ	КИ	КУВИ	КУ-1	КУ-2, КВ	КИ	КУВИ
Пузырность (категория)	01-4	01-5	2-6	1-4	01-4	2-5	2-6	1-4	01-5	3-5	3-6	1-5
Включения (категория, класс)	01-2	01-3	1-4	1-4	01-2	1-3	2-4	1-4	1а-3г	1в-4в	2б-4г	1а-4б

Таблица П.1.5 (продолжение)

Наименование показателя качества	Категория стекла при массе заготовки, кг									
	св. 2,000 до 5,000 включ.		св. 5,000 до 8,000 включ.		св. 8,000 до 25,000 вкл.		св. 25,000 до 100,000 вкл.		св. 100,000 до 325,000 вкл.	
	Марка стекла									
	КУ-1	КУ-2, КВ	КУ-1	КУ-2, КВ	КУ-1	КУ-2, КВ	КУ-2, КВ		КУ-2, КВ	
Пузырность (категория)	1-5	3-6	1-5	4-6	1-6	4-6	4-6		5-6*	
Включения (категория, класс)	1а-4в	3в-4г	1а-4г	3в-4г	1а-4г	3в-4г	4в-4г		4*	

* Допускаемое количество пузырей и включений устанавливается при заказе по согласованию между изготовителем и заказчиком.

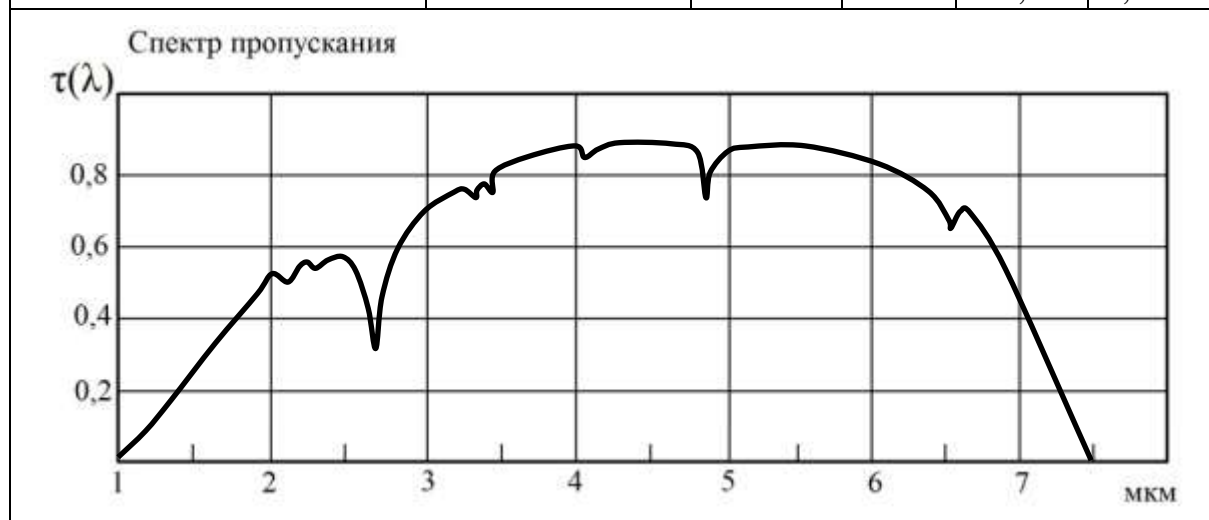
Таблица П.1.6. Классы изготавливаемого кварцевого стекла по пузырьности

Марка стекла	Категория пузырьности		
	1–2	3–4	5–6
	Класс пузырьности		
КУ-1	а	б	в
КУ-2, КВ	б	д	е
КИ	г	е	ж
КУВИ	а	б	в

Приложение П.4.1

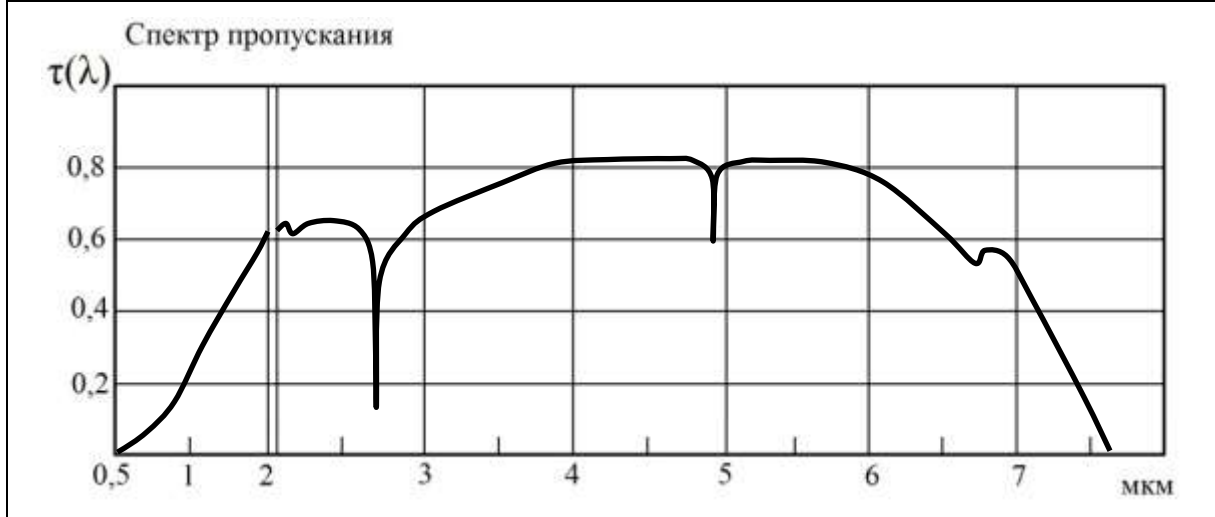
Оптическая керамика марки КО1 (MgF₂)

n_e	$n_F - n_C'$	$n_{10,6}$	$n_{8,0} - n_{12,5}$	Коэффициент внутреннего пропускания		Показатель преломления	
				λ , мкм	$\tau_i(\lambda)$	λ , мкм	$n(\lambda)$
1,3845	0,0072	—	—	0,2		0,2	
Показатель ослабления $\mu(\lambda)$, см ⁻¹ , не более 0,08 (4,0 мкм)				0,5		0,5	
				2,0	0,50	1,0	1,3778
Температурный коэффициент показателя преломления для $\lambda=3,39$ мкм, 10^{-5}°C^{-1} в интервале $\pm 60 \text{°C}$		Область прозрачности, мкм (толщина 10 мм)		3,0	0,72	2,0	1,3720
				5,0	0,85	3,0	1,3640
				6,0	0,86	4,0	1,3526
				7,0	0,50	5,0	1,3374
						6,0	1,3179
0,125–0,07		2,0–7,0				7,0	1,2934
						8,0	1,2635



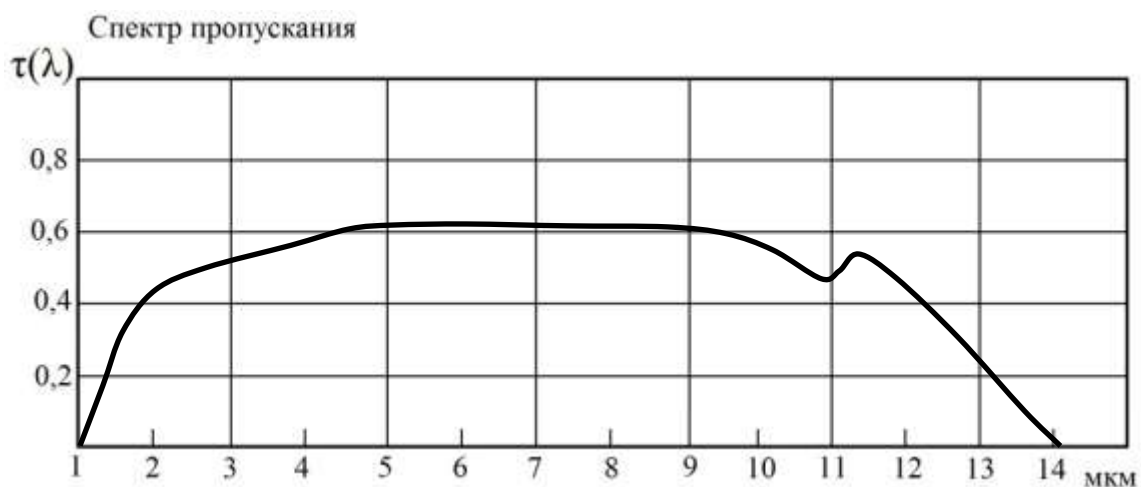
Оптическая керамика марки КО12 (MgF₂)

n_e	$n_F - n_C'$	$n_{10,6}$	$n_{8,0} - n_{12,5}$	Коэффициент внутреннего пропускания		Показатель преломления	
				λ , мкм	$\tau_i(\lambda)$	λ , мкм	$n(\lambda)$
1,3845	0,0072	—	—	0,2		0,2	
Показатель ослабления $\mu(\lambda)$, см ⁻¹ , не более				0,5	0,05	0,5	
0,54 (1,0 мкм)		0,08 (4,0 мкм)		2,0	0,29	1,0	1,3778
Температурный коэффициент показателя преломления для $\lambda=3,39$ мкм, 10^{-5}C^{-1} в интервале $\pm 60^\circ \text{C}$		Область прозрачности, мкм (толщина 10 мм)		3,0	0,70	2,0	1,3720
				5,0	0,81	3,0	1,3640
				6,0	0,79	4,0	1,3526
				7,0	0,40	5,0	1,3374
						6,0	1,3179
0,125–0,07		1,5–7,0				7,0	1,2934



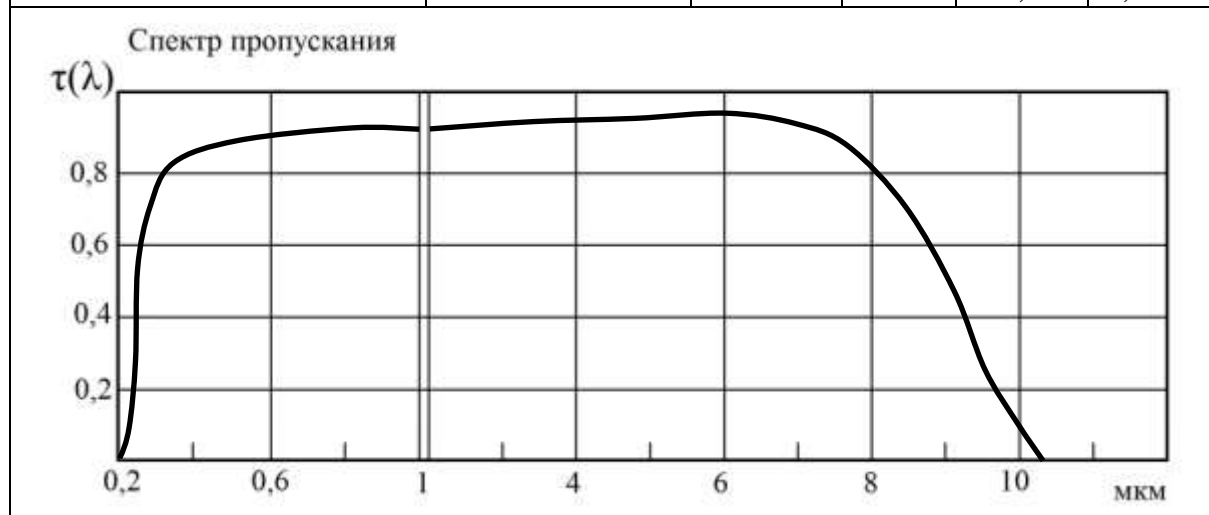
Оптическая керамика марки КО2 (β -ZnS)

n_e	$n_F - n_C'$	$n_{10,6}$	$n_{8,0} - n_{12,5}$	Коэффициент внутреннего пропускания		Показатель преломления	
				λ , мкм	$\tau_i(\lambda)$	λ , мкм	$n(\lambda)$
—	—	2,1923	0,0594	0,2		0,2	
Показатель ослабления $\mu(\lambda)$, см^{-1} , не более				0,5		0,5	
0,15 (10,6 мкм)				2,0	0,62	1,0	2,2965
Температурный коэффициент показателя преломления для $\lambda=3,39$ мкм, 10^{-5}°C^{-1} в интервале $\pm 60\text{°C}$		Область прозрачности, мкм (толщина 10 мм)		3,0	0,72	2,0	2,2623
				5,0	0,85	3,0	2,2572
				6,0	0,85	4,0	2,2501
				7,0	0,85	5,0	2,2461
				8,0	0,85	6,0	2,2380
				9,0	0,83	7,0	2,2303
				10,0	0,81	8,0	2,2223
				12,0	0,60	9,0	2,2119
4,00–4,30		1,8–12,5				10,0	2,2002
						11,0	2,1861
						12,0	2,1700
						12,5	2,1629



Оптическая керамика марки КОЗ (CaF₂)

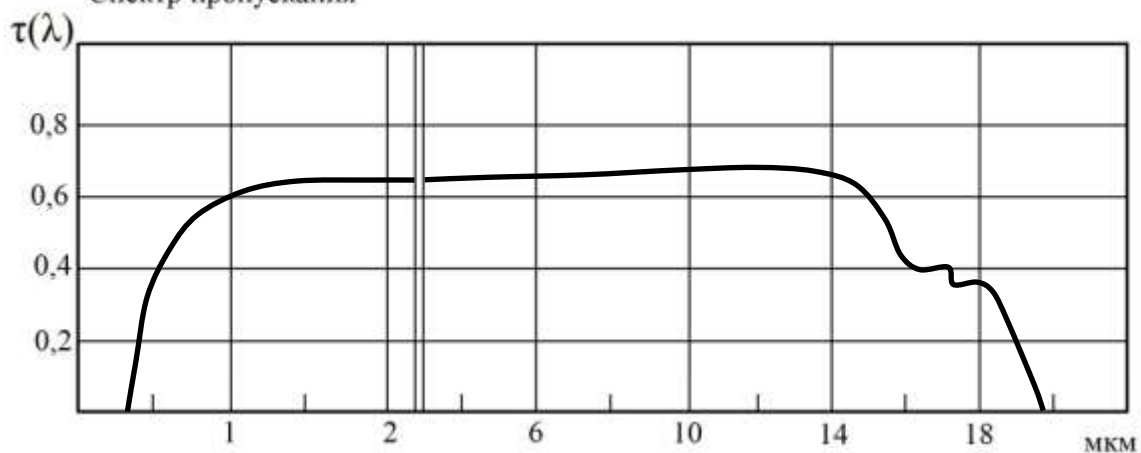
n_e	$n_F - n_C'$	$n_{10,6}$	$n_{8,0} - n_{12,5}$	Коэффициент внутреннего пропускания		Показатель преломления	
				λ , мкм	$\tau_i(\lambda)$	λ , мкм	$n(\lambda)$
1,4349	0,0043	1,2996	—	0,2		0,2	
Показатель ослабления $\mu(\lambda)$, см ⁻¹ , не более 0,05 (4,0 мкм)				0,5	0,91	0,5	1,4365
				2,0	0,95	1,0	1,4289
Температурный коэффициент показателя преломления для $\lambda=3,39$ мкм, 10^{-5}°C^{-1} в интервале $\pm 60 \text{°C}$ (-0,95)–(1,17)		Область прозрачности, мкм (толщина 10 мм) 0,21–9,0		3,0	0,97	2,0	1,4239
				5,0	0,97	3,0	1,4179
				6,0	0,97	4,0	1,4097
				7,0	0,96	5,0	1,4006
				8,0	0,87	6,0	1,3856
				9,0	0,59	7,0	1,3693
						8,0	1,3499
		9,0	1,3268				



Поликристаллический материал марки КОЗ (ZnSe)

n_e	$n_F - n_C'$	$n_{10,6}$	$n_{8,0} - n_{12,5}$	Коэффициент внутреннего пропускания		Показатель преломления	
				λ , мкм	$\tau_i(\lambda)$	λ , мкм	$n(\lambda)$
2,6645	0,1841	2,4034	0,0285	0,2		0,2	
Показатель ослабления $\mu(\lambda)$, см^{-1} , не более				0,6	0,56	0,5	
0,02 (10,6 мкм)				1,0	0,75	1,0	2,4894
Температурный коэффициент показателя преломления для $\lambda=3,39$ мкм, 10^{-5}°C^{-1} в интервале $\pm 60\text{°C}$		Область прозрачности, мкм (толщина 10 мм)		3,0	0,93	2,0	2,4462
				5,0	0,93	3,0	2,4376
				6,0	0,93	4,0	2,4331
				7,0	0,95	5,0	2,4296
				8,0	0,95	6,0	2,4258
				9,0	0,96	7,0	2,4219
				10,0	0,96	8,0	2,4176
				12,0	0,96	9,0	2,4123
				15,0	0,85	10,0	2,4067
				20,0	0,05	11,0	2,4006
6,00–6,30		0,55–18,0				12,0	2,3936
						12,5	2,3891
						15,0	2,3662

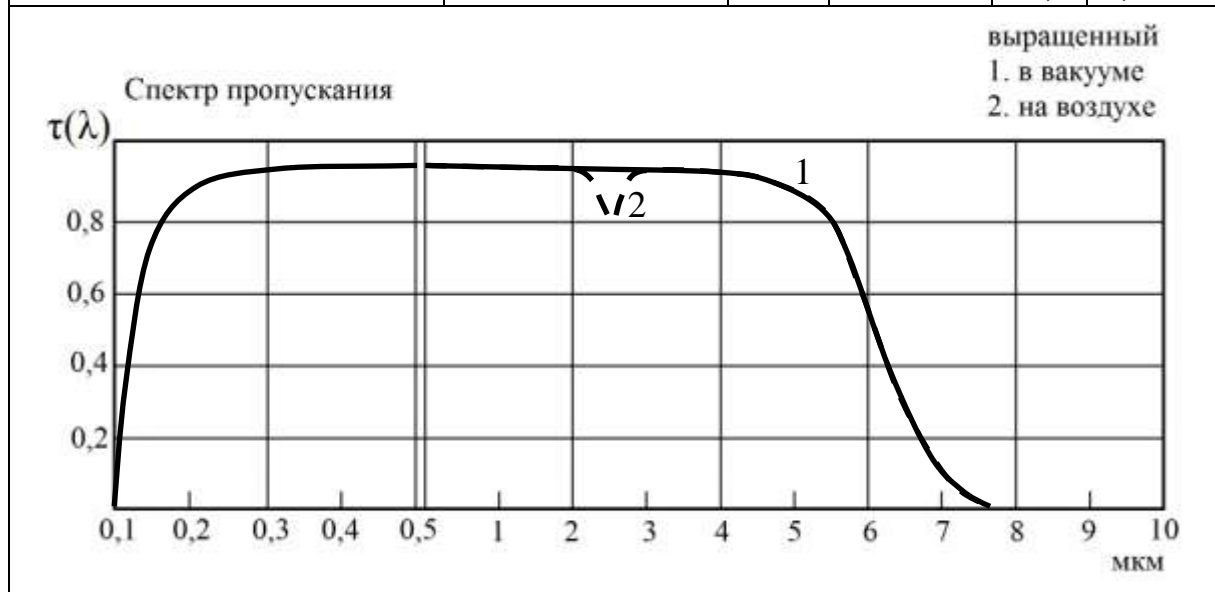
Спектр пропускания



Приложение П.4.2

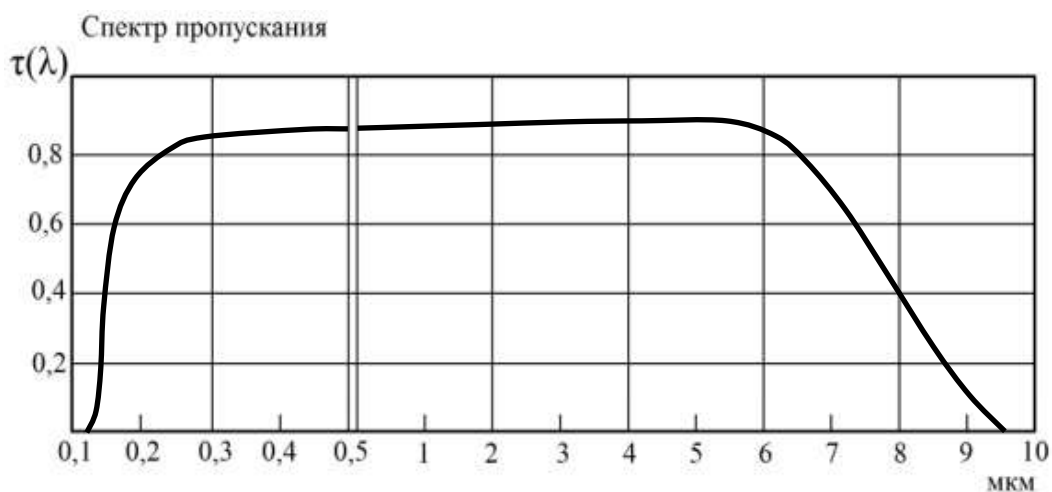
Литий фтористый (LiF)

n_e	$n_F - n_C'$	$n_{10,6}$	$n_{8,0} - n_{12,5}$	Коэффициент внутреннего пропускания		Показатель преломления	
				λ , мкм	$\tau_i(\lambda)$	λ , мкм	$n(\lambda)$
1,3931	0,0040	—	—	0,2	0,90	0,2	1,4390
Показатель ослабления $\mu(\lambda)$, см^{-1} , не более				0,5	0,98	0,5	1,3943
ФЛ-У		ФЛ-В		ФЛ-И			
0,05 (0,2 мкм)		0,02 (0,4 мкм)		0,03 (2,6–2,9 мкм)		1,0 1,3871	
Температурный коэффициент показателя преломления для $\lambda=3,39$ мкм, 10^{-5}°C^{-1} в интервале $\pm 60 \text{°C}$				Область прозрачности, мкм (толщина 10 мм)		3,0	1,3788
						5,0	1,3666
						6,0	1,3494
						7,0	1,3266
						6,0	1,2975
(-1,25)–(-1,51)						7,0	1,2620
						8,0	1,2180
						9,0	1,1650
						10,0	1,1010



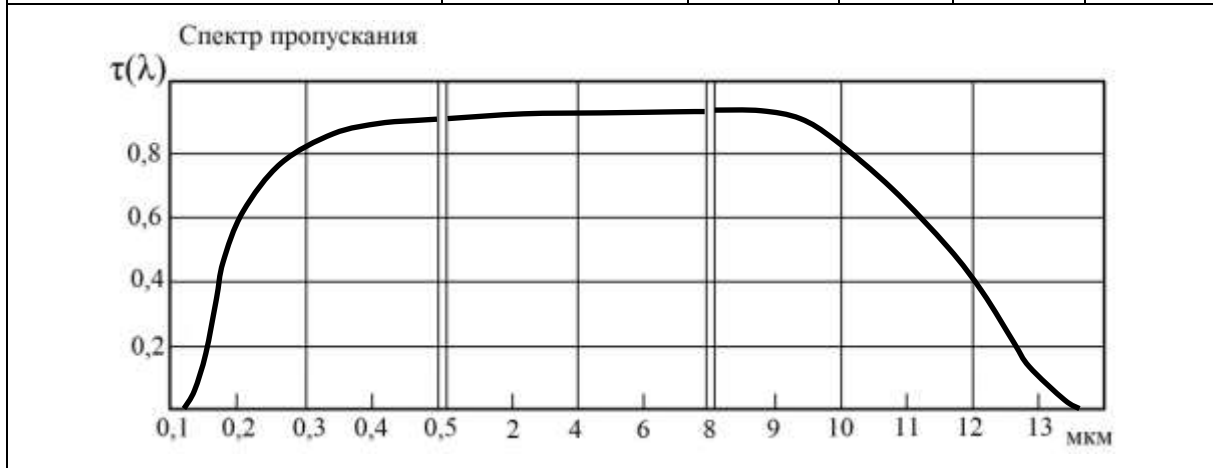
Кальций фтористый (CaF₂)

n_e	$n_F - n_C'$	$n_{10,6}$	$n_{8,0} - n_{12,5}$	Коэффициент внутреннего пропускания		Показатель преломления					
1,4349	0,0043	1,2996	—	λ , мкм	$\tau_i(\lambda)$	λ , мкм	$n(\lambda)$				
Показатель ослабления $\mu(\lambda)$, см ⁻¹ , не более				0,2	0,87	0,2	1,4951				
				0,5	0,97	0,5	1,4365				
ФК-У	ФК-В	ФК-И		1,0	0,99	1,0	1,4289				
0,10 (0,2 мкм)	0,01 (0,4 мкм)	0,05 (7,5 мкм)		3,0	0,99	2,0	1,4239				
Температурный коэффициент показателя преломления для $\lambda=3,39$ мкм, 10 ⁻⁵ °C ⁻¹ в интервале $\pm 60^\circ\text{C}$				5,0	0,99	3,0	1,4179				
				6,0	0,98	4,0	1,4096				
				7,0	0,97	5,0	1,3990				
				8,0	0,88	6,0	1,3856				
				9,0	0,59	7,0	1,3693				
				10,0	0,19	8,0	1,3498				
				(-0,95)–(-1,17)		Область прозрачности и, мкм (толщина 10 мм) 0,15–9,0		9,0		9,0	1,3268
								10,0		10,0	1,3002
						11,0	1,2676				
						12,0	1,2299				



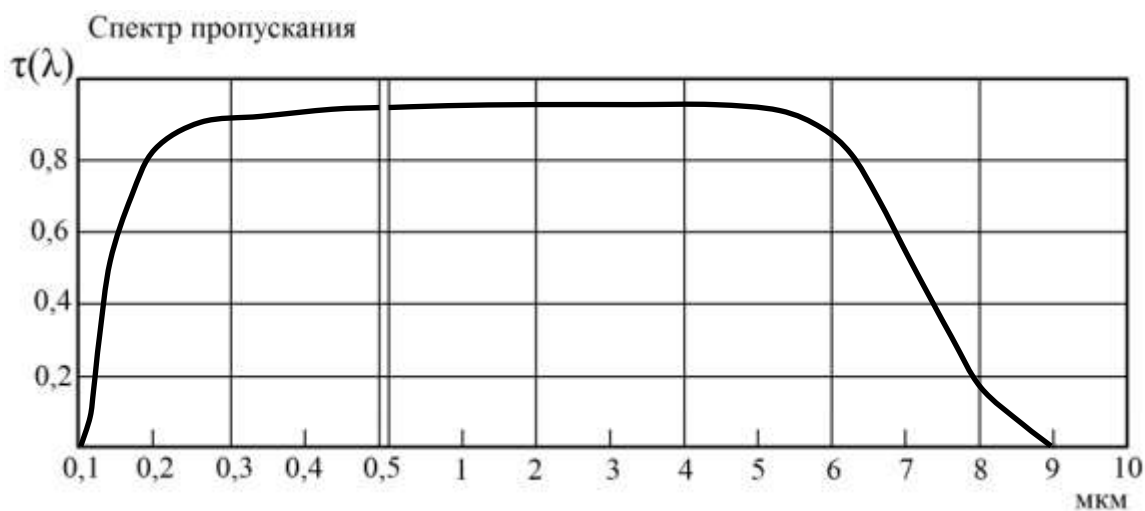
Барий фтористый (BaF₂)

n_e	$n_F - n_C'$	$n_{10,6}$	$n_{8,0} - n_{12,5}$	Коэффициент внутреннего пропускания		Показатель преломления	
				λ , мкм	$\tau_i(\lambda)$	λ , мкм	$n(\lambda)$
1,4759	0,0059	1,3926	0,0673	0,2	0,60	0,2	1,5573
Показатель ослабления $\mu(\lambda)$, см ⁻¹ , не более				0,5	0,96	0,5	1,4779
				1,0	0,97	1,0	1,4686
ФБ-У	ФБ-В	ФБ-И		3,0	0,97	2,0	1,4647
0,20 (0,2 мкм)	0,08 (0,4 мкм)	0,13 (10,6 мкм)		5,0	0,97	3,0	1,4612
Температурный коэффициент показателя преломления для $\lambda=3,39$ мкм, $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ в интервале $\pm 60^\circ\text{C}$			Область прозрачности, мкм (толщина 10 мм)	6,0	0,97	4,0	1,4587
				7,0	0,97	5,0	1,4511
				8,0	0,97	6,0	1,4441
				9,0	0,97	7,0	1,4357
				10,0	0,85	8,0	1,4258
				12,0	0,42	9,0	1,4144
				15,0		10,0	1,4014
(-1,27)–(-1,51)			0,18–12,0			11,0	1,3865
						12,0	1,3696
						12,5	1,3585
						15,0	1,3050



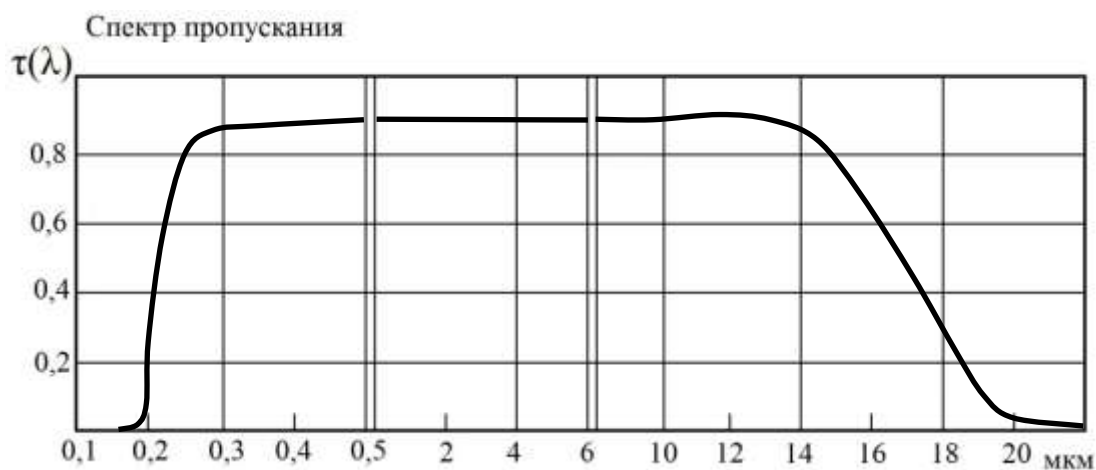
Магний фтористый (MgF₂)

n_e		$n_{F'}-n_{C'}$		Коэффициент внутреннего пропускания		Показатель преломления	
n_o	n_e	n_o	n_e	λ , мкм	$\tau_i(\lambda)$	λ , мкм	n_o/n_e
1,3786	1,3904	0,0034	0,0110				
Показатель ослабления $\mu(\lambda)$, см ⁻¹ , не более				0,2	0,95	0,2	1,4231
				0,5	0,97		1,4367
ФМ-У		ФМ-И		1,0	0,97	0,5	1,3797
0,07 (0,2 мкм)		0,02 (5,0 мкм)		3,0	0,97		1,3916
Температурный коэффициент показателя преломления для $\lambda=3,39$ мкм, $10^{-5}^{\circ}\text{C}^{-1}$ в интервале $\pm 60^{\circ}\text{C}$		Область прозрачности, мкм (толщина 10 мм)		5,0	0,97	1,0	1,3736
				6,0	0,91		1,3852
				7,0	0,54	2,0	1,3686
				8,0	0,12	3,0	1,3797
						4,0	1,3618
$\beta_o=(0,15-0,10);$ $\beta_e=(0,10-0,04)$		0,13–7,0				5,0	1,3724
						6,0	1,3525
							1,3622
						7,0	1,3400
							1,3487
						8,0	1,3242
							1,3315
		9,0	1,3044				
			1,3101				



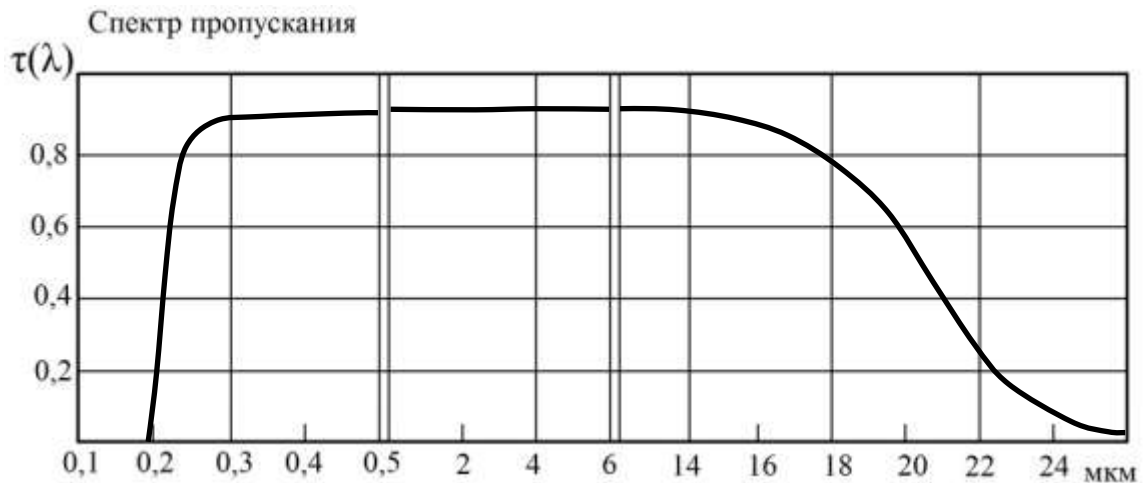
Натрий хлористый (NaCl)

n_e	$n_F - n_{C'}$	$n_{10,6}$	$n_{8,0} - n_{12,5}$	Коэффициент внутреннего пропускания		Показатель преломления	
				λ , мкм	$\tau_i(\lambda)$	λ , мкм	$n(\lambda)$
1,5467	0,0132	1,4906	0,0308	0,2	0,16	0,2	1,7899
Показатель ослабления $\mu(\lambda)$, см^{-1} , не более 0,001 (10,6 мкм)				0,5	0,97	0,5	1,5516
				1,0	0,97	1,0	1,5320
Температурный коэффициент показателя преломления для $\lambda=3,39$ мкм, 10^{-5}°C^{-1} в интервале $\pm 60\text{°C}$		Область прозрачности, мкм (толщина 10 мм)		3,0	0,98	2,0	1,5254
				5,0	0,98	3,0	1,5242
				6,0	0,98	4,0	1,5217
				7,0	0,98	5,0	1,5185
				8,0	0,98	6,0	1,5153
				9,0	0,98	7,0	1,5112
				10,0	0,98	8,0	1,5066
				12,0	0,98	9,0	1,5009
				15,0	0,87	10,0	1,4947
				20,0	0,05	11,0	1,4878
(-3,31)–(-3,73)		0,21–17,0		12,0	0,98	12,0	1,4800
				12,5		12,5	1,4758
				15,0		15,0	1,4403
				20,0		20,0	1,3822
				30,0		30,0	1,0912



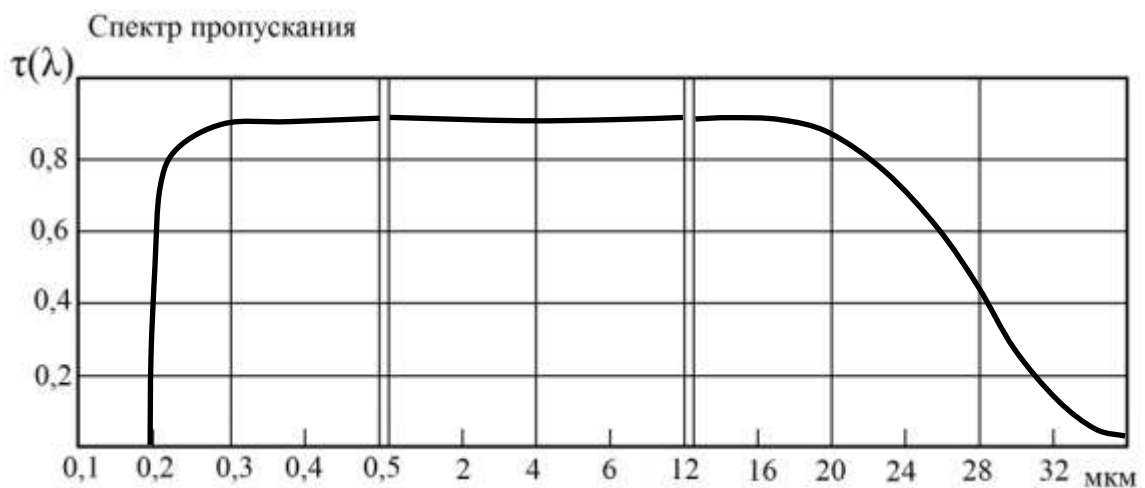
Калий хлористый (КСI)

n_e	$n_F - n_C'$	$n_{10,6}$	$n_{8,0} - n_{12,5}$	Коэффициент внутреннего пропускания		Показатель преломления		
				λ , мкм	$\tau_i(\lambda)$	λ , мкм	$n(\lambda)$	
1,4930	0,0112	1,4546	0,0172	0,2	0,89	0,2	1,7170	
Показатель ослабления $\mu(\lambda)$, см^{-1} , не более				0,5	0,98	0,5	1,4968	
				0,001 (10,6 мкм)				1,0
Температурный коэффициент показателя преломления для $\lambda=3,39$ мкм, 10^{-5}°C^{-1} в интервале $\pm 60\text{°C}$			Область прозрачности, мкм (толщина 10 мм)		3,0	0,98	2,0	1,4751
					5,0	0,98	3,0	1,4735
					6,0	0,98	4,0	1,4720
					7,0	0,98	5,0	1,4703
					8,0	0,98	6,0	1,4683
					9,0	0,98	7,0	1,4659
					10,0	0,98	8,0	1,4632
					12,0	0,98	9,0	1,4601
					15,0	0,95	10,0	1,4566
					20,0	0,68	11,0	1,4527
(-3,28)–(-3,75)			0,21–21,0		12,0		12,0	1,4463
					12,5		12,5	1,4460
					15,0		15,0	1,4325
					20,0		20,0	1,3947
					30,0		30,0	1,2626



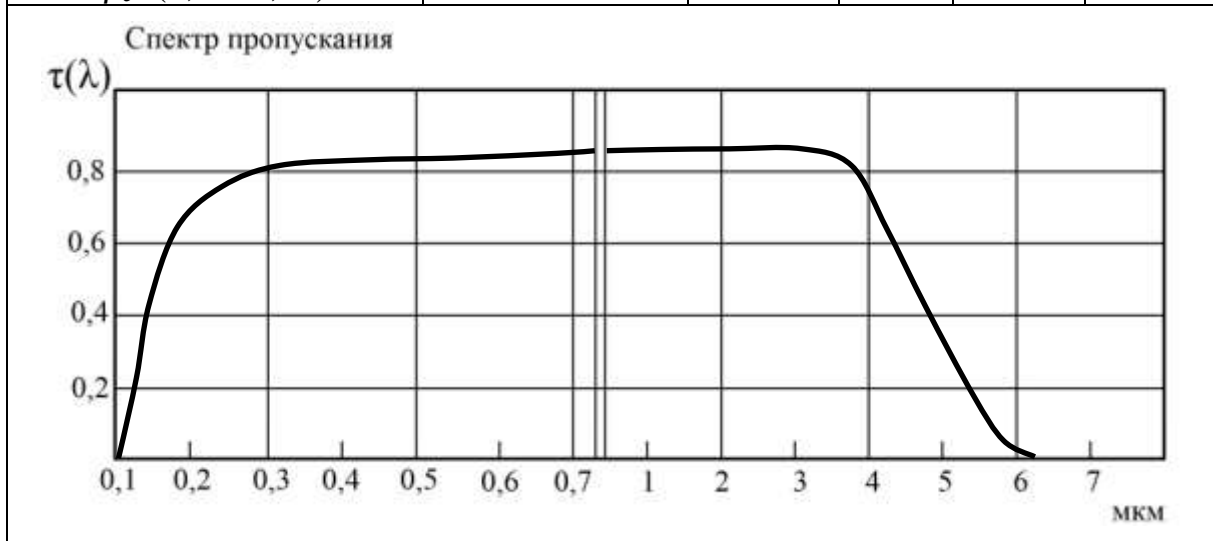
Калий бромистый (KBr)

n_e	$n_F - n_C$	$n_{10,6}$	$n_{8,0} - n_{12,5}$	Коэффициент внутреннего пропускания		Показатель преломления	
				λ , мкм	$\tau_i(\lambda)$	λ , мкм	$n(\lambda)$
1,5639	0,0617	1,5251	0,0099				
Показатель ослабления $\mu(\lambda)$, см^{-1} , не более 0,001 (10,6 мкм)				0,2	0,48	0,2	2,0995
				0,5	0,98	0,5	1,5700
Температурный коэффициент показателя преломления для $\lambda=3,39$ мкм, 10^{-5}C^{-1} в интервале $\pm 60^\circ\text{C}$ (-3,95)–(-4,29)				Область прозрачности, мкм (толщина 10 мм) 0,21–28,0		1,0	1,5444
						3,0	1,5383
						5,0	1,5368
						6,0	1,5357
						7,0	1,5346
						8,0	1,5334
						9,0	1,5319
						10,0	1,5303
						12,0	1,5285
						15,0	1,5265
				20,0	1,5242		
				30,0	1,5217		
						12,0	1,5204
						15,0	1,5127
						20,0	1,4924
						30,0	1,4253



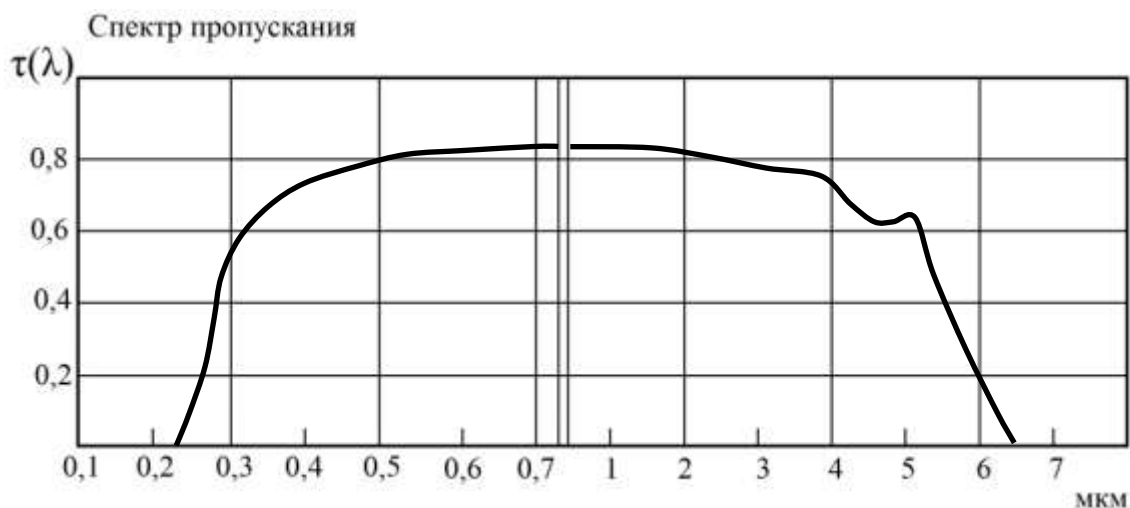
Лейкосапфир ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)

n_e	$n_F - n_C'$	$n_{10,6}$	$n_{8,0} - n_{12,5}$	Коэффициент внутреннего пропускания		Показатель преломления	
				λ , мкм	$\tau_i(\lambda)$	λ , мкм	$n(\lambda)$
1,7771	0,0107	—	—	0,2	0,79	0,2	
Показатель ослабления $\mu(\lambda)$, см^{-1} , не более				0,5	0,97		
Л-У	Л-В	Л-И		1,0	0,97	0,5	
0,20 (0,2 мкм)	0,02 (0,4 мкм)	0,46 (5,0 мкм)		3,0	0,97		
Температурный коэффициент показателя преломления для $\lambda=0,46$ мкм, 10^{-5}°C^{-1} в интервале $\pm 60\text{°C}$			Область прозрачности, мкм (толщина 10 мм)	5,0	0,45	1,0	1,7545
$\beta_o=(0,88-1,28)$; $\beta_e=(0,99-1,39)$						2,0	1,7460
						3,0	1,7374
						3,0	1,7299
						4,0	1,7015
						4,0	1,6920
						4,0	1,6748
						4,0	1,6679



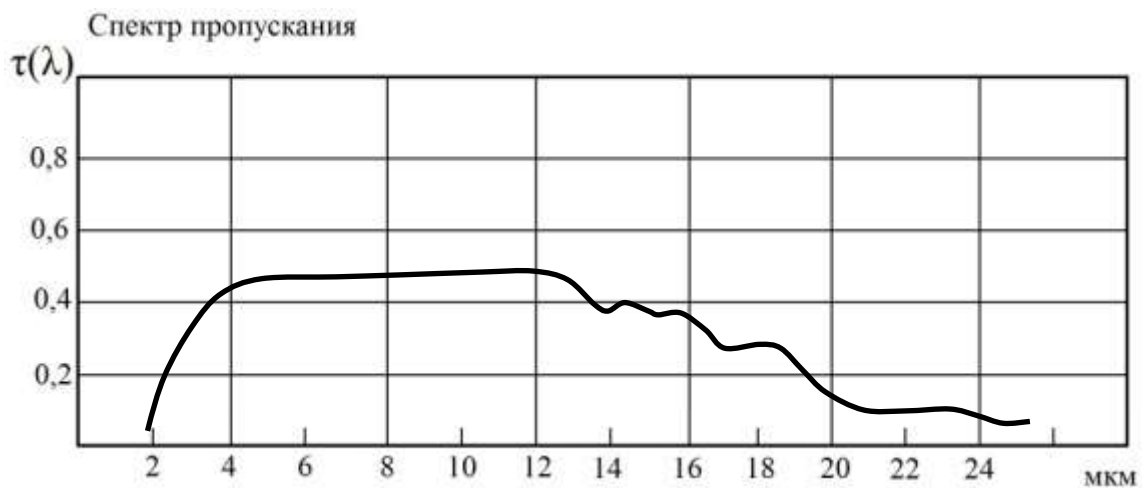
Гранат алюмоиттриевый ($Y_3Al_5O_{12}$)

n_e	$n_F - n_C$	$n_{10,6}$	$n_{8,0} - n_{12,5}$	Коэффициент внутреннего пропускания		Показатель преломления			
				λ , мкм	$\tau_i(\lambda)$	λ , мкм	$n(\lambda)$		
1,8364	0,0164	—	—	0,3	0,63	0,2			
Показатель ослабления $\mu(\lambda)$, $см^{-1}$, не более				0,5	0,97	0,5	1,8450		
АИГ-У		АИГ-В		АИГ-И					
0,06 (0,36 мкм)		0,02 (0,4 мкм)		0,01 (1,15 мкм)					
Температурный коэффициент показателя преломления для $\lambda=0,5$ мкм, $10^{-5}°C^{-1}$ в интервале 20–100°C				Область прозрачности, мкм (толщина 10 мм)		1,0	0,98	1,0	1,8197
						3,0	0,94	2,0	1,8035
				5,0	0,72	3,0	1,7855		
				6,0	0,14	4,0	1,7602		
10,2		0,28–5,5							



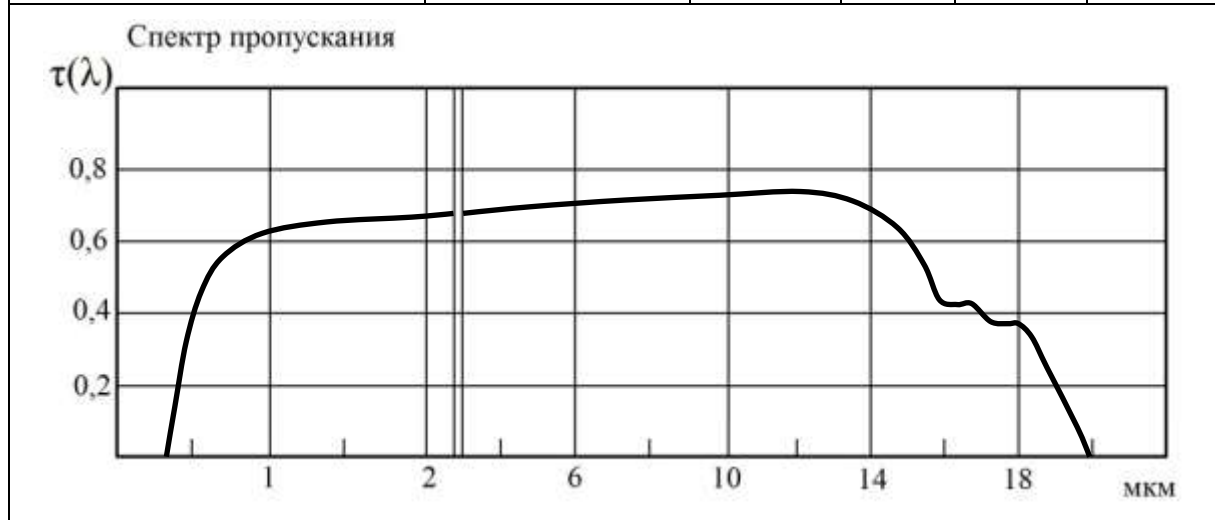
Германий (Ge)

n_e	$n_F - n_C$	$n_{10,6}$	$n_{8,0} - n_{12,5}$	Коэффициент внутреннего пропускания		Показатель преломления	
				λ , мкм	$\tau_i(\lambda)$	λ , мкм	$n(\lambda)$
—	—	4,0034	0,0036	0,2		0,2	
Показатель ослабления $\mu(\lambda)$, см^{-1} , не более 0,02 (10,6 мкм)				0,5		0,5	
				1,0		1,0	
Температурный коэффициент показателя преломления для $\lambda=3,39$ мкм, 10^{-5}°C^{-1} в интервале $\pm 60\text{°C}$		Область прозрачности, мкм (толщина 10 мм)		3,0	0,97	2,0	4,1079
				5,0	0,97	3,0	4,0446
				6,0	0,97	4,0	4,0242
				7,0	0,97	5,0	4,0153
				8,0	0,97	6,0	4,0106
				9,0	0,97	7,0	4,0076
				10,0	0,96	8,0	4,0053
				12,0	0,97	9,0	4,0047
				15,0	0,56	10,0	4,0040
				35,0–40,0		1,8–17,0	
		12,0	4,0029				
		12,5	4,0024				
		15,0	4,0017				



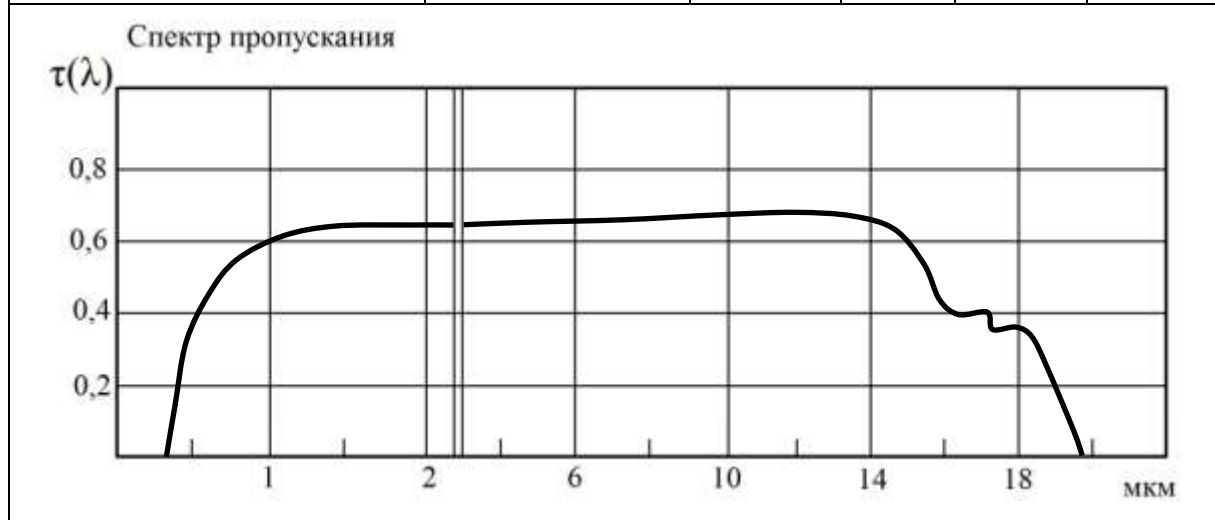
Селенид цинка (ZnSe)

n_e	$n_F - n_C'$	$n_{10,6}$	$n_{8,0} - n_{12,5}$	Коэффициент внутреннего пропускания		Показатель преломления	
				λ , мкм	$\tau_i(\lambda)$	λ , мкм	$n(\lambda)$
2,6645	0,1841	2,4034	0,0285	0,2		0,2	
Показатель ослабления $\mu(\lambda)$, см^{-1} , не более				0,5	0,65	0,5	
0,005 (10,6 мкм)				1,0	0,76	1,0	2,4894
Температурный коэффициент показателя преломления для $\lambda=3,39$ мкм, 10^{-5}C^{-1} в интервале $\pm 60^\circ\text{C}$		Область прозрачности, мкм (толщина 10 мм)		3,0	0,94	2,0	2,4462
				5,0	0,97	3,0	2,4376
				6,0	0,97	4,0	2,4331
				7,0	0,99	5,0	2,4296
				8,0	0,99	6,0	2,4258
				9,0	0,99	7,0	2,4219
				10,0	0,99	8,0	2,4176
				12,0	0,98	9,0	2,4123
6,00–6,30		0,55–18,0		15,0	0,90	10,0	2,4067
				20,0	0,16	11,0	2,4006
						12,0	2,3936
						12,5	2,3891
						15,0	2,3662



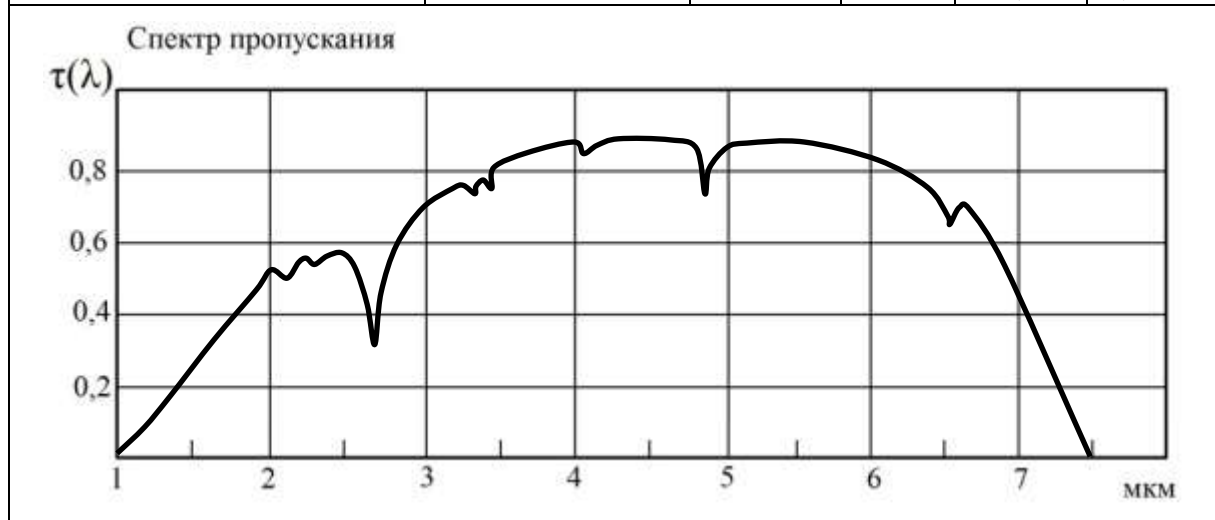
Селенид цинка (ZnSe), материал марки ПО4

n_e	$n_F - n_C'$	$n_{10,6}$	$n_{8,0} - n_{12,5}$	Коэффициент внутреннего пропускания		Показатель преломления	
				λ , мкм	$\tau_i(\lambda)$	λ , мкм	$n(\lambda)$
2,6645	0,1841	2,4034	0,0285	0,2		0,2	
Показатель ослабления $\mu(\lambda)$, см^{-1} , не более 0,02 (10,6 мкм)				0,6	0,56	0,5	
				1,0	0,75	1,0	2,4894
Температурный коэффициент показателя преломления для $\lambda=3,39$ мкм, 10^{-5}C^{-1} в интервале $\pm 60^\circ\text{C}$		Область прозрачности, мкм (толщина 10 мм)		3,0	0,93	2,0	2,4462
				5,0	0,93	3,0	2,4376
				6,0	0,93	4,0	2,4331
				7,0	0,95	5,0	2,4296
				8,0	0,95	6,0	2,4258
				9,0	0,96	7,0	2,4219
				10,0	0,96	8,0	2,4176
				12,0	0,96	9,0	2,4123
6,00–6,30		0,55–18,0		15,0	0,85	10,0	2,4067
				20,0	0,05	11,0	2,4006
						12,0	2,3936
						12,5	2,3891
						15,0	2,3662



Магний фтористый (MgF₂), материал марки КО1

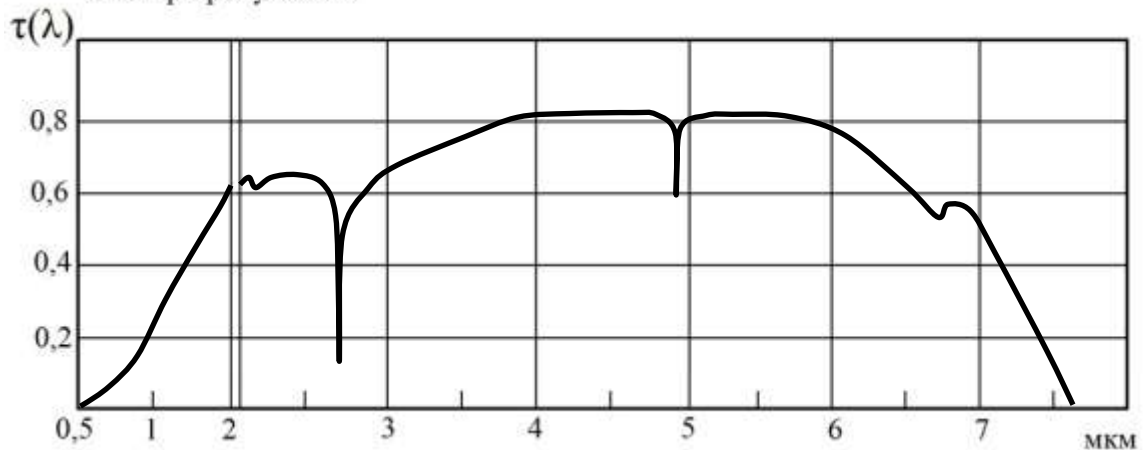
n_e	$n_F - n_C$	$n_{10,6}$	$n_{8,0} - n_{12,5}$	Коэффициент внутреннего пропускания		Показатель преломления	
				λ , мкм	$\tau_i(\lambda)$	λ , мкм	$n(\lambda)$
1,3845	0,0072	—	—	0,2		0,2	
Показатель ослабления $\mu(\lambda)$, см ⁻¹ , не более				0,5		0,5	
0,08 (4,0 мкм)				2,0	0,50	1,0	1,3778
Температурный коэффициент показателя преломления для $\lambda=3,39$ мкм, 10^{-5}°C^{-1} в интервале $\pm 60 \text{°C}$		Область прозрачности, мкм (толщина 10 мм)		3,0	0,72	2,0	1,3720
				5,0	0,85	3,0	1,3640
				6,0	0,86	4,0	1,3526
				7,0	0,50	5,0	1,3374
						6,0	1,3179
0,125–0,07		2,0–7,0				7,0	1,2934
						8,0	1,2635



Магний фтористый (MgF₂), материал марки КО12

n_e	$n_F - n_C'$	$n_{10,6}$	$n_{8,0} - n_{12,5}$	Коэффициент внутреннего пропускания		Показатель преломления		
				λ , мкм	$\tau_i(\lambda)$	λ , мкм	$n(\lambda)$	
1,3845	0,0072	—	—	0,2		0,2		
Показатель ослабления $\mu(\lambda)$, см ⁻¹ , не более				0,5	0,05	0,5		
0,54 (1,0 мкм)		0,08 (4,0 мкм)		2,0	0,29	1,0	1,3778	
Температурный коэффициент показателя преломления для $\lambda=3,39$ мкм, 10^{-5}°C^{-1} в интервале $\pm 60 \text{°C}$			Область прозрачности, мкм (толщина 10 мм)		3,0	0,70	2,0	1,3720
					5,0	0,81	3,0	1,3640
					6,0	0,79	4,0	1,3526
					7,0	0,40	5,0	1,3374
							6,0	1,3179
0,125–0,07			1,5–7,0			7,0	1,2934	

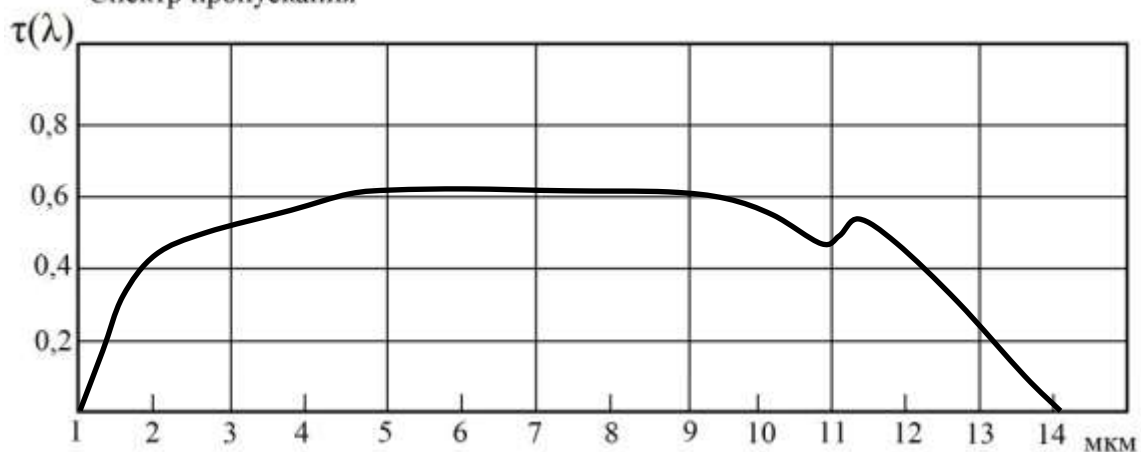
Спектр пропускания



β-ZnS, материал марки КО2

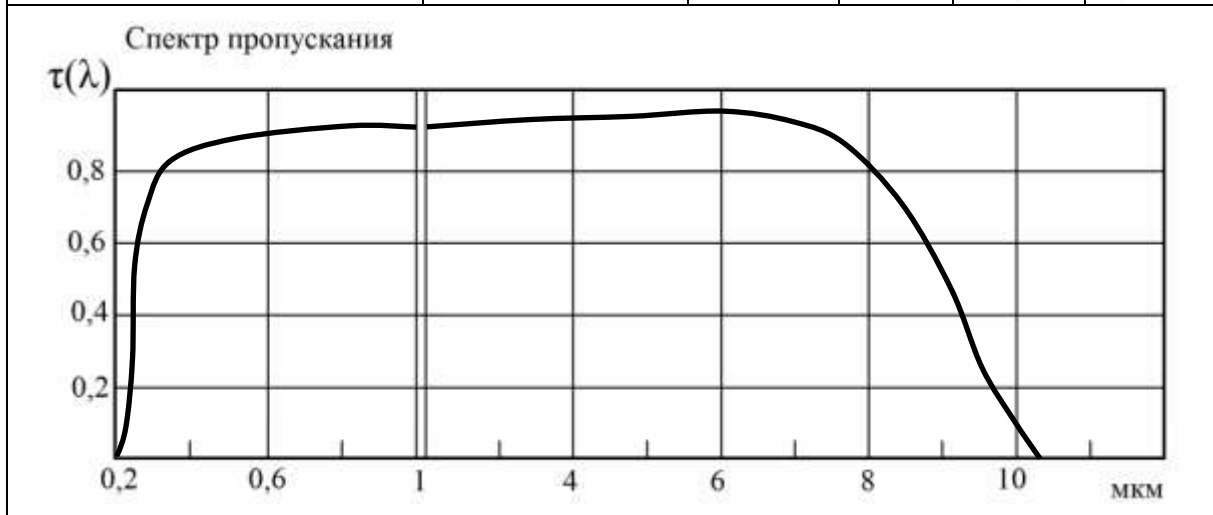
n_e	$n_F - n_C'$	$n_{10,6}$	$n_{8,0} - n_{12,5}$	Коэффициент внутреннего пропускания		Показатель преломления	
				λ , мкм	$\tau_i(\lambda)$	λ , мкм	$n(\lambda)$
—	—	2,1923	0,0594	0,2		0,2	
Показатель ослабления $\mu(\lambda)$, см^{-1} , не более				0,5		0,5	
0,15 (10,6 мкм)				2,0	0,62	1,0	2,2965
Температурный коэффициент показателя преломления для $\lambda=3,39$ мкм, 10^{-5}°C^{-1} в интервале $\pm 60\text{°C}$		Область прозрачности, мкм (толщина 10 мм)		3,0	0,72	2,0	2,2623
				5,0	0,85	3,0	2,2572
				6,0	0,85	4,0	2,2501
				7,0	0,85	5,0	2,2461
				8,0	0,85	6,0	2,2380
				9,0	0,83	7,0	2,2303
				10,0	0,81	8,0	2,2223
4,00–4,30		1,8–12,5		12,0	0,60	9,0	2,2119
						10,0	2,2002
						11,0	2,1861
						12,0	2,1700
						12,5	2,1629

Спектр пропускания



CaF₂, материал марки КОЗ

n_e	$n_F - n_C'$	$n_{10,6}$	$n_{8,0} - n_{12,5}$	Коэффициент внутреннего пропускания		Показатель преломления		
				λ , мкм	$\tau_i(\lambda)$	λ , мкм	$n(\lambda)$	
1,4349	0,0043	1,2996	—	0,2		0,2		
Показатель ослабления $\mu(\lambda)$, см ⁻¹ , не более				0,5	0,91	0,5	1,4365	
0,05 (4,0 мкм)				2,0	0,95	1,0	1,4289	
Температурный коэффициент показателя преломления для $\lambda=3,39$ мкм, 10^{-5}C^{-1} в интервале $\pm 60^\circ \text{C}$ (-0,95)–(1,17)			Область прозрачности, мкм (толщина 10 мм) 0,21–9,0		3,0	0,97	2,0	1,4239
					5,0	0,97	3,0	1,4179
					6,0	0,97	4,0	1,4097
					7,0	0,96	5,0	1,4006
					8,0	0,87	6,0	1,3856
					9,0	0,59	7,0	1,3693
						8,0	1,3499	
						9,0	1,3268	



ЛИТЕРАТУРА

1. Ботвинкин О.К., Запорожский А.И. Кварцевое стекло. – М.: Стройиздат, 1965. – 259 с.
2. Леко В.К., Мазурин О.В. Свойства кварцевого стекла. – Л.: Наука, 1985. – 165 с.
3. ГОСТ 15130-86. Стекло кварцевое оптическое. Общие технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. – 31 с.
4. Зверев В.А., Кривоустова Е.В., Точилина Т.В. Оптические материалы. Часть I. Учебное пособие для конструкторов оптических систем и приборов. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 241 с.
5. ГОСТ 3521-81. Стекло оптическое. Метод определения бессвильности. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 7 с.
6. ГОСТ 9411-91. Стекло оптическое цветное. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1992. – 49 с.
7. Гудимов М.М., Перов Б.В. Органическое стекло. – М.: Химия, 1981. – 216 с.
8. Дедовец Г.С. Светопрозрачные аллиловые полимерные материалы за рубежом. Обзорная информация. – М.: НИИТЭХИМ, 1979. – 15 с.
9. Справочник технолога-оптика / Под ред. М.А. Окатова. – СПб: Политехника, 2004. – 679 с.
10. Торбин И.Д., Даминов Ю.Ф. Оптические детали из полимеров // ОМП. – 1974. – № 10. – С. 72–79.
11. Шепурев Э.И. Оптические свойства стеклообразных органических полимеров // ОМП. – 1986. – № 1. – С. 51–55.
12. ГОСТ 23136-93. Материалы оптические. Параметры. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1995. – 22 с.
13. Торбин И.Д., Даминов Ю.Ф. Оптические детали из полимеров // ОМП. – 1974. – № 10. – С. 72–79.
14. Александров Г.А., Халлулина Н.З. Упрочняющие, просветляющие и отражающие покрытия на оптических деталях из полимерных материалов // Материалы научно-технической конференции «Свойства и применение оптических и прозрачных полимеров». – Л.: ЛДНТП, 1984. – 91 с.
15. Торбин И.Д. Оптические клеи // Материалы научно-технической конференции «Свойства и применение оптических и прозрачных полимеров». – Л.: ЛДНТП, 1984. – 91 с.
16. Русинов М.М., Грамматин А.П., Иванов П.Д. и др. Вычислительная оптика: Справочник. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1984. – 423 с.

17. Галимов Н.Б., Косяков В.И., Лышков Н.В., Тухватулин А.Ш. Формирование распределения показателя преломления в полимерных градах // Материалы научно-технической конференции «Свойства и применение оптических и прозрачных полимеров». – Л.: ЛДНТП, 1984. – 91 с.
18. Карапетян Г.О., Косяков В.И. Полимерные грады // Материалы научно-технической конференции «Свойства и применение оптических и прозрачных полимеров». – Л.: ЛДНТП, 1984. – 91 с.
19. Ратнер О.Б., Лашков Г.И., Торбин И.Д., Попов А.П. Полимерный фоточувствительный материал «реоксан» для голографии с записью в трехмерных средах // Материалы научно-технической конференции «Свойства и применение оптических и прозрачных полимеров». – Л.: ЛДНТП, 1984. – 91 с.
20. Физический энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. Ред. кол. Д.М. Алексеев, А.М. Бонч-Бруевич, А.С. Боровик-Романов и др. – М.: Сов. энциклопедия, 1983. – 928 с.
21. Волюнец Ф.К. Способы изготовления, структура и физико-химические свойства оптической керамики // ОМП. – 1973. – № 9. – С. 48–61.
22. ОСТ 3-6307-87. Материал оптический поликристаллический марки ПО4. Технические условия. – Введ. 01.07.1988. – 16 с.
23. ГОСТ 11103-85. Стекло неорганическое и стеклокристаллические материалы. Метод определения термической стойкости. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 8 с.
24. Бережной А.И. Ситаллы и фотоситаллы. – М.: Машиностроение, 1966. – 348 с.
25. Окатов М.А., Антонов Э.А., Байгожин А. и др. Справочник технолога-оптика / Под ред. М.А. Окатова. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб: Политехника, 2004. – 679 с.
26. Цветное оптическое стекло и особые стекла. Каталог / Под ред. Г.Т. Петровского. – М.: Дом оптики, 1990. – 228 с.
27. Квантовая электроника. Маленькая энциклопедия. – М.: Сов. энциклопедия, 1969. – 432 с.
28. ОСТ 3-30-77. Стекло оптическое ГЛС. Технические условия. – Введ. 01.07.1978.
29. Промышленные лазерные стекла. Каталог // Под ред. д.ф.-м.н. М.Н. Толстого. – М.: Дом оптики, 1982. – 70 с.
30. ОСТ 3-488-71. Стекло оптическое. Метод определения оптического коэффициента напряжения.

31. Советский энциклопедический словарь / Гл. ред. А.М. Прохоров. – 4-е изд. – М.: Сов. энциклопедия, 1988. – 1600 с.
32. Цветное оптическое стекло и особые стекла. Каталог / Под ред. Г.Т. Петровского. – М.: Дом оптики, 1990. – 228 с.
33. Каталог светорассеивающих стекол (оптических) / Под ред. Гуревича М.М. – Л.: ГОИ им. С.И. Вавилова, 1975. – 57 с.
34. ГОСТ 13917-92. Материалы оптические. Методы определения химической устойчивости. Группы химической устойчивости. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 15 с.
35. Зверев В.А., Кривоустова Е.В., Точилина Т.В. Оптические материалы. Часть 1. Учебное пособие для конструкторов оптических систем и приборов. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 244 с.
36. Михельсон Н.Н. Оптические телескопы. Теория и конструкция. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1976. – 512 с.
37. Зигель Ф.Ю. Астрономы наблюдают. – М.: Наука, 1977. – 192 с.
38. Мельников О.А., Слюсарев Г.Г., Марков А.В., Купревич Н.Ф. Современный телескоп. – М.: Наука, 1968. – 320 с.
39. Гоголев Ю.А., Зверев В.А., Пожинская И.И., Соболев К.Ю. Анализ основных проблем создания оптики крупных телескопов // Оптический журнал. – 1996. – № 4. – С. 16–32.
40. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1975. – 855 с.
41. Мирошников М.М., Любарский С.В., Химич Ю.П. Зеркала оптических телескопов // ОМП. – 1990. – № 9. – С. 3–18.
42. Любарский С.В., Химич Ю.П. Оптические зеркала из нетрадиционных материалов // Оптический журнал. – 1994. – № 1. – С. 76–83.
43. Химич Ю.П., Никитин Д.Б., Грудкин В.Н., Горшков В.Н. Облегченные зеркала из кремния // Труды конференции «Прикладная оптика-2010». – СПб, 2010. – С. 288–290.
44. Химич Ю.П., Никитин Д.Б. Размерная стабильность зеркал из карбида кремния // Труды конференции «Прикладная оптика-2010». – СПб, 2010. – С. 286–287.
45. Катаев С., Сидоров В., Гордеев С. Алмаз-карбидный композиционный материал «скелетон» для теплоотводов в изделиях электронной техники // Электроника: НТБ. – 2011. – Т. 109. – № 3. – С. 60–64.
46. Химич Ю.П. Потенциальные возможности различных материалов для создания крупногабаритных облегченных зеркал // Труды конференции «Прикладная оптика-2010». – СПб, 2010. – С. 280–285.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Кварцевое стекло.....	4
1.1. Краткий исторический очерк.....	4
1.2. Природный кварц	11
1.2.1. Кремнезем. Основные модификации кремнезема.....	11
1.2.2. Полиморфные превращения кремнезема.....	18
1.3. Способы получения кварцевого стекла.....	21
1.3.1. Электротермический способ	21
1.3.2. Газопламенный способ.....	23
1.3.3. Синтез из газовой фазы.....	24
1.4. Физико-механические характеристики кварцевого оптического стекла	27
1.5. Марки кварцевого оптического стекла.....	31
1.6. Параметры заготовок и показатели качества кварцевого оптического стекла.....	34
1.7. Требования к качеству кварцевого оптического стекла.....	35
2. Оптические цветные стекла.....	41
2.1. Обозначения стекол	41
2.2. Спектральные характеристики цветных оптических стекол	42
2.3. Показатель поглощения	42
2.4. Оптическая плотность	42
2.5. Физико-химические свойства цветного оптического стекала	53
2.5.1. Температурное изменение спектрального поглощения.....	53
2.5.2. Изменение спектрального поглощения известных оптических стекол под влиянием ультрафиолетового излучения.....	54
2.5.3. Термостойкость стекол.....	54
2.5.4. Температура отжига.....	55

2.5.5. Оптический коэффициент напряжения.....	55
2.5.6. Относительная твердость стекла по сошлифованию....	62
2.5.7. Химическая устойчивость стекол.....	62
3. Органическое (полимерное) стекло.....	69
3.1. Физико-механические и теплофизические свойства органических стекол	69
3.2. Оптические свойства прозрачных полимеров.....	78
3.3. Способы изготовления деталей из оптических полимеров	87
4. Кристаллы и кристаллические материалы.....	99
4.1. Кристаллы	99
4.2. Оптическая керамика	104
4.3. Оптические кристаллические материалы	110
4.3.1. Оптические характеристики.....	112
4.3.2. Кристаллографические характеристики	116
4.3.3. Теплофизические характеристики	117
4.3.4. Механические характеристики.....	120
4.3.5. Химическая устойчивость	127
4.3.6. Параметры качества кристаллических материалов	128
5. Оптические ситаллы.....	130
5.1. Стеклокристаллические материалы	130
5.2. Оптические ситаллы	132
6. Оптические стекла для инфракрасной области спектра.....	136
6.1. Обозначения инфракрасных оптических стекол	136
6.2. Показатель преломления стекол	137
6.3. Дисперсия стекла. Коэффициент дисперсии	138
6.4. Спектральная характеристика стекол	139
7. Лазерные материалы.....	146
8. Фотохромные стекла	170
9. Светорассеивающие стекла.....	176
9.1. Классификация светорассеивающих стекол.....	176

9.2. Величины и понятия, используемые для характеристик свойств светорассеивающих стекол	177
9.3. Величины и понятия, используемые для характеристики механических, теплотехнических и химических свойств светорассеивающих стекол.....	179
9.4. Характеристики светорассеивающих стекол	180
9.4.1. Стекла для диффузного отражения света (стекла I типа)	180
9.4.2. Стекла для диффузного пропускания света (стекла II типа).....	183
9.4.3. Стекла для образцов мутности (стекла III типа).....	186
9.4.4. Физико-химические свойства светорассеивающих стекол	189
10. Материалы зеркал телескопов.....	191
10.1. Материалы для преломляющей оптики.....	191
10.2. Материалы для зеркал астрономических телескопов	193
Приложения.....	210
Литература.....	240



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ

Кафедра прикладной и компьютерной оптики была образована в 1996 году путем объединения двух старейших кафедр оптического факультета: кафедры теории оптических приборов и кафедры оптических приборов и компьютерной оптики, в результате чего кафедра стала крупнейшей и ведущей в России в области прикладной оптики, оптических приборов и компьютерной оптики.

Кафедра имеет восемь учебно-исследовательских лабораторий: оптических измерений, контрольно-измерительных оптических приборов, микроскопов и медицинских оптических приборов, геодезических приборов, кинофотоприборов, компьютерных средств контроля оптики, исследования качества оптического изображения, а также лабораторию компьютерной оптики. На кафедре работают два сетевых компьютерных класса.

В учебном процессе используются научный потенциал и лабораторная база крупнейшего в России научного центра в области оптики – ВЦ ГОИ им. С.И. Вавилова, ведущего оптического предприятия – ОАО «ЛОМО».

Достижения кафедры отмечены двумя Ленинскими премиями, пятью Государственными премиями, премией Совета Министров, премией французской Академии Наук. Кроме того, работы, выполненные на кафедре, отмечались многочисленными медалями и дипломами международных и российских выставок, медалями С.П. Королева, Ю.А. Гагарина, премиями Минвуза.

В настоящее время кафедра ведет подготовку специалистов и научную работу в следующих взаимосвязанных направлениях:

- теория и проектирование оптических систем, традиционно называемые вычислительной оптикой;
- оптические измерения и контроль оптических элементов и систем;

- оптические приборы, включая общую теорию, микроскопы и контрольно-измерительные приборы, геодезические приборы, офтальмологическую оптику;

- математические методы, алгоритмы, программы и компьютерные системы решения оптических задач, что можно коротко назвать компьютерной оптикой.

С 1965 года на кафедре оптико-механических приборов благодаря новаторским идеям и методам С.А. Родионова получает развитие новое направление в прикладной оптике – разработка математических методов, алгоритмов и программного обеспечения для решения оптических задач. Результаты фундаментальных исследований С.А. Родионова в области формирования изображения, теории дифракции и математического моделирования были положены в основу разработки пакета программ для автоматизированного проектирования оптических систем ОПАЛ, широко известного в оптической промышленности.

В настоящее время объектами исследований в области компьютерной оптики, проводимых на кафедре являются:

- методы и программы проектирования оптических систем (методы синтеза, анализа aberrаций и качества изображения, методы оптимизации, расчет допусков);

- обработка данных контроля оптических элементов и систем (интерферограммы, гартманогаммы и т.п.);

- компьютерное моделирование изображения с учетом различных факторов (частичная когерентность, поляризация, нелинейности и неизопланатизм и т.д.);

- теория и методы оптимальной компьютерной юстировки;

- моделирование процессов ближнепольной оптики.

Общепрофессиональная и специальная подготовка специалистов базируется на следующих составляющих:

- фундаментальных и широких знаниях в области предмета разработки и исследования (прикладной оптики, оптотехники, оптических приборов и систем);

- глубоких знаниях прикладной математики, включая математическое моделирование, численные методы, методы оптимизации и т.п.;

- владении современными компьютерными технологиями, особенно применяемыми в инженерной и научной деятельности.

В настоящее время кафедра прикладной и компьютерной оптики факультета оптико-информационных систем и технологий является одним из крупнейших подразделений Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики, ориентированным на выпуск высококвалифицированных специалистов.

С информацией о кафедре можно ознакомиться на сервере: **aco.ifmo.ru**

**Виктор Алексеевич Зверев
Екатерина Всеволодовна Кривоустова
Татьяна Вячеславовна Точилина**

Оптические материалы
Часть 2

Учебное пособие для конструкторов оптических систем и приборов.

В авторской редакции

Дизайн обложки

Н.А. Кривоустова, И.Н. Тимощук

Верстка

Т.В. Точилина

Редакционно-издательский отдел Санкт-Петербургского национального
исследовательского университета информационных технологий, механики
и оптики

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.09

Подписано к печати 06.12.13

Заказ № 3082

Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе