

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»
(ФГБОУ ВПО «СГГА»)

Институт оптики и оптических технологий

Кафедра метрологии и технологии оптического производства

КУРС ЛЕКЦИЙ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Новосибирск
СГГА

ВВЕДЕНИЕ

«Без оптического стекла нет ни познания природы, ни власти над ней», - писал в 1921 г. основоположник отечественной оптической науки и промышленности академик Д.С. Рождественский.

Сравнительно с техническими стеклами в состав оптических стекол входит гораздо большее число компонентов, в том числе соединения редких и рассеянных элементов. Это позволяет получать стекла с экстремальными значениями оптических постоянных, а значит - создавать новые, весьма совершенные оптические системы. Помимо оптических постоянных, оптическое стекло должно удовлетворять целой совокупности технологических и эксплуатационных свойств, определяющихся химическим составом стекла. Весь технологический процесс производства - подготовка исходного сырья, приготовления стекловаренных сосудов, варка, выработка и тонкий отжиг оптического стекла - определяется происходящими при этом химическими процессами.

В методическом пособии даны основы производства оптического стекла в плазменных печах и использованием керамических горшков, поскольку именно эта технология освоена промышленностью и стала традиционной.

Сказанное справедливо и в случае варки оптического стекла в ваннах и электрических печах.

В методическом пособии описываются свойства стекол, используемых при комбинировании оптических систем, показатели качества оптического стекла, физико-химические свойства.

Подробно описаны физико-химические основы производства оптического стекла", включая сведения о сырьевых материалах стекловарения, варке стекла, химических процессах взаимодействия сырьевых материалов при варке. Изложены основы тонкого отжига оптического стекла.

В методическом пособии даны сведения и о других материалах, используемых для изготовления оптических деталей: оптических кристаллах, ситаллах, оптической керамике и полимерных материалах.

Методическое пособие может быть использовано при изучении дисциплины «Оптические материалы и технология их обработки».

ТЕМА 1

ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА В РОССИИ

Первая фирма специализированного производства стекла была создана во Франции в 1832 году выходцем из Швейцарии Генрихом Гинаном. Из его завода выросла затем одно из известнейших оптических фирм Парра-Мантуа, которая в 1863 году соединилась с крупным французским концерном акционерным обществом Совирель. В XIX веке секретами производства стекла,

кроме Франции владели еще Англия и Германия.

В России производства оптического стекла не существовало, хотя еще в середине XVIII века, после появления работ академика Эйлера о хроматических aberrациях оптических систем, М.В. Ломоносов проводил много исследований с целью получения стекол с разными показателями преломления. Он был первым руководителем оптической мастерской Академии Наук, которая от него перешла к Кулибину. Работы Эйлера были продолжены академиком в области теоретической оптики Иваном Цейгером, чьи результаты обсуждались на заседаниях Академии в 1763 году.

В 1777 году академическая конференция слушает сообщение академика Крафта о трудностях английского способа производства стекла и обсуждает предлагаемый им новый способ варки. Впервые была рассмотрена возможность получения однородного стекла с помощью механического перемешивания расплава. Однако, это предложение реализовано не было. Через несколько десятилетий Пьер Гинан во Франции практически использовал предложение Крафта и стал «родоначальником» способа получения однородного оптического стекла.

В 1908 году оптико-механическая мастерская Обуховского завода (з-д Большевик) возбудила перед Морским министерством, в ведении которого находился завод, вопрос о необходимости изготовления оптического стекла в России. В переданной по этому вопросу докладной записке начальник завода писал:

Оптическое отделение Обуховского завода вырабатывает совершенно самостоятельно как механическую, так и оптическую части приборов и инструментов, за исключением оптического стекла, в необработанных плитках. Поставщикам этого материала главным образом являются заводы Шотта в Иене и отчасти Парра-Мантуа в Париже, которые в настоящее время единственные поставщики для всего мира. Из всей массы вырабатываемого стекла на долю Шотта приходится 0,9 его количества. Небольшой же завод Парра-Мантуа изготавливает лишь очень немногие сорта. До последнего времени Обуховский завод мирился с необходимостью выписывать стекло из-за границы теперь же приходится раздумывать об освобождении от иностранной зависимости в этом деле. Завод Шотта находится в тесной зависимости от завода Цейса и в непродолжительном времени перейдет в его полную собственность. Цейс же обладая большими средствами постарается монополизировать оптическую промышленность всего мира, одни заводы скупая, с другими вступая в различные соглашения; так он купил уже два оптических завода в Америке, покупает во Франции завод Крауса, вступил в соглашение с фирмой Герц в Берлине и, по всей видимости, с заводом Ченс в Лондоне. Таким образом, Цейс имея в своих руках главный источник оптического стекла, может поставить и несомненно поставит не вошедшие с ним в соглашения заводы в безвыходное положение, лишив сырого материала для производства».

Предложение Обуховского завода было поставлено на обсуждение совещания, созванного в феврале 1909 года. Было принято решение

приспособить на одном из фарфоровых заводов газовую печь для варки оптического стекла, а Обуховскому заводу, под руководством профессора Тищенко, вести опыты по освоению производства оптического стекла в лабораторном и полужаводском масштабе с тем, чтобы на основе этих опытов разработать проект устройства новых печей. Расходы на все это в сумме 137 тыс. руб. должны быть отнесены, как сказано в протоколе совещания, за счет казны.

Решения эти осуществлены не были. Когда началась первая мировая война, русская оптико-механическая промышленность оказалась в тяжелом положении. Запасы оптического стекла на предприятиях не обеспечивали возможность выполнения заказов армии на военные оптические приборы. Расход стекла резко увеличился, а получение его из-за границы значительно затруднилось. В августе 1914 года в Петербурге была создана комиссия по изысканию способов производства оптического стекла. Комиссия единодушно высказалась за необходимость срочно начать изготовление оптического стекла в России.

Опыты начались с варки стекла с большим содержанием свинца (флинт). Это стекло содержит компоненты разной плотности. Вследствие этого в процессе варки происходит их расслаивание - ликвация. После охлаждения стекло оказывается неоднородным по составу, а, следовательно, и по показателю преломления. Вторая особенность этого стекла заключается в его склонности к окрашиванию в желтоватые тона, что снижает светопропускание.

Опыты по варке стекла разного состава проведенные профессором Н.Н. Качаловым, показали, что со стороны оптических свойств оно соответствует техническим условиям, но имеет ряд недостатков. К таким недостаткам относилось большое количество пузырей, окрашенность, неоднородность и др. Несмотря на успехи в деле освоения производства оптического стекла, Качалов понимал, что возможности производства стекла столь малы, что не могут иметь практического значения для нужд оптико-механической промышленности. Между тем война продолжалась, и потребность в оптическом стекле с каждым днем ощущалась все острее. Он предложил создать на заводе специальный отдел оптического стекла, работа в котором будет поставлена на строго научных началах. Для научного руководства всей организацией производства оптического стекла была учреждена коллегия консультантов - высококвалифицированных специалистов по вопросам теоретической и прикладной физики и химии (проф. Рождественский, Тищенко, Курнаков, Грум-Гржимайло). На коллегия возлагалось верховное руководство опытами и ведение регулярных заседаний, на которых обсуждались полученные результаты, и намечалась программа дальнейших работ.

Коллегия сыграла исключительно важную роль в обеспечении успешного освоения производства оптического стекла на заводе. Консультанты принимали активное участие в работах отдела оптического стекла, наблюдали за проводившимися опытами. Однако, несмотря на самоотверженный труд ученых, выпуск стекла был крайне незначителен. Завод освоил только три

мраки оптических стекла; трудоемкие подготовительные операции выполнялись вручную или с помощью примитивных устройств.

Только после Великой Октябрьской революции в нашей стране выросла технически передовая и мощная промышленность оптического стекловарения. В 1926 год было произведено уже 2 тонны отечественного оптического стекла, что в то время полностью удовлетворило запросы оптико-механической промышленности. На основании этого в феврале 1927 года было решено прекратить ввоз заграничного стекла. В том же году вышел первый каталог оптического советского стекла, насчитывающий 18 марок.

Внутри нашей страны основным официальным документом на оптическое стекло, является ГОСТ 3514-76 «Стекло оптическое бесцветное. Технические условия».

2. Стеклообразное состояние вещества

Вещества, находящиеся в твердом состоянии, в соответствии с их внутренним строением, подразделяют на аморфные и кристаллические.

При низких температурах стекло представляет аморфную разновидность твердого состояния вещества. С термодинамической точки зрения стеклообразное состояние вещества является неравновесным, метастабильным, поскольку оно обладает избытком свободной энергии. Это положение, в какой-то степени иллюстрируют кривые охлаждения расплавов веществ (рис.1).

Примечание: метастабильным состоянием называют одно из возможных устойчивых при данных условиях состояний системы, которое не соответствует наименьшему значению свободной энергии. Температура медленно охлаждаемого расплава изменяется линейно до значения $t_{кр}$, при которой вещество кристаллизуется. Процесс сопровождается выделением внутренней теплоты кристаллизации и до его завершения температура остается постоянной. При дальнейшем охлаждении вещества температура изменяется по линейному закону

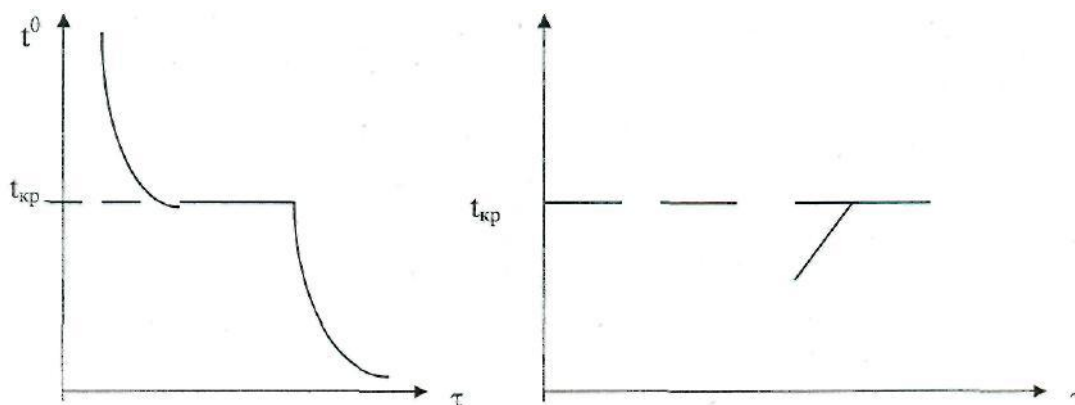


Рис. 1. Процессы затвердевания жидкостей

Расплав можно переохладить ниже температуры кристаллизации. Но сохранившийся при этом запас внутренней энергии, при незначительном изменении состояния расплава, может вызвать его кристаллизацию (кривая А).

При быстром охлаждении расплава можно избежать кристаллизации. Известно, что кристаллизация переохлажденной жидкости может начаться по двум причинам: вследствие внесения в нее кристаллов того вещества, которое должно выкристаллизоваться, или же в жидкости самопроизвольно образуются кристаллы, которые в дальнейшем действуют также, как и внесенные извне.

Какие свойствами вещества обуславливают его способность переохлаждаться, не кристаллизуясь и застывать стеклообразно? Тамман, который изучал условия кристаллизации органических веществ, ввел два термина - скорость кристаллизации и способность к самопроизвольной (спонтанной) кристаллизации.

Под скоростью кристаллизации имеется в виду скорость, с которой кристалл, образовавшийся в расплаве, увеличивает свои размеры. При температуре плавления вещества скорость роста кристаллов равно нулю. По мере понижения температуры, скорость начинает падать и опять доходит до нуля.

Очевидно, что легко переохлаждаются и стеклообразно застывают те вещества, которые обладают малой скоростью и малой способностью кристаллизации, и, особенно, если невелика область, в которой они одновременно имеют значительную величину. В этом случае при охлаждении расплава сначала будет область, где скорость кристаллизации имеет заметную величину, но расти нечему, т.к. образование центров кристаллизации маловероятно. По мере перехода в следующую область образование центров становятся более вероятно, но скорость кристаллизации уменьшается настолько, что они не успевают вырасти до заданных размеров. Уменьшение скорости кристаллизации совпадает (кривая 2) с быстрым увеличением вязкости. Это понятно, если учесть, что беспорядочно расположенные в жидкости молекулы должны переместиться и повернуться, чтобы занять свои места в кристаллической решетке. Этот процесс будет совершаться тем труднее, чем более вязка жидкость.

Стекло в отличие от кристаллических веществ, не имеет ни определенной температуры плавления, ни затвердевания. Стекломасса в некотором температурном интервале, постепенно, переходит из жидкого состояния в пластическое, а затем в твердое. Переход из одного крайнего состояния в другое называют процессом стекловарения, а температурный интервал, в котором этот процесс происходит, интервалом стекловарения. Он ограничен двумя температурами - верхней t_f и t_g .

t_f - flüssigkeit - температура при которой стекломасса из жидкого состояния переходит в пластическое,

t_g - glass - температура которая соответствует переходу стекла из пластического в твердое, хрупкое состояние. Величина t_g для силикатных

стекол, в зависимости от их состава, находится в пределах 400-600 °С.

Температуры t_f и t_g понятия условные, поскольку процесс стекловарения происходит постепенно и непрерывно, однако эти температуры отражают важное технологическое свойство стекла - температурный ход вязкости. Температура t_f соответствует вязкости 10^9 Па с, а температура t_g вязкости 10^2 Па с. Значения вязкости, соответствующие t_g и t_f одинаковы для всех составов стекол

Стеклообразное состояние распространено довольно широко. Около половины элементов периодической системы Менделеева, при соответствующем их сочетании, дают стекло. Но часть их является красителями, другие по ряду причин не находят практического применения. Из-за многообразия химической природы веществ, неравновесности стеклообразного состояния и отсутствия общих структурных критериев для разного состава, полного определения стекла пока не дано. К оптическому стеклу предъявляют ряд особых требований, которые подчеркиваются в его определении: «оптическим стеклом называют однородное стекло любого химического состава, обладающее постоянством свойств во всей своей массе и их повторяемостью от плавки к плавке».

Первым отличительным признаком оптического стекла от других промышленных стекол является его высокая однородность. Достигают ее специальными приемами механического перемешивания стекломассы во время варки и особыми режимами термической обработки готового стекла - так называемым тонким оптическим отжигом. Тонкий оптический отжиг является завершающей стадией в технологии оптического стекла. Он приводит всю его массу в структурно-однородное состояние. При этом оптические постоянные изменяются и принимают значения, стандартизованные для стекла каждой марки. Напряжения в заготовках понижаются до таких минимальных значений, которые не будут вызывать дополнительных деформаций в процессе формообразования оптических поверхностей.

Вторым отличительным признаком оптического стекла считают его прозрачность. Оптическим материалом высокого качества считают стекло, обладающее интегральным коэффициентом свет поглощения менее 0,4 % на см. Для целого ряда систем такая прозрачность оказывается недостаточной, и применяют стекла со свет поглощением 0,2 - 0,1 % на см. и менее. Сверхпрозрачные стекла требуются для волоконно-оптических линий дальней связи. В рабочем диапазоне длин волокон, в красной и ближней ИК областях спектра поглощение должно быть на уровне 0,002% на см. длины. Широкое развитие цветной фотографии, кино и телевидения потребовало введения нормирования пропускания стекла по спектру, т.к. для правильной цветопередачи недопустимо повышенное поглощение в синей части спектра.

Третьим отличительным признаком оптических стекол является большой интервал значений показателя преломления, лежащий для разных марок в пределах от 1,44 до 2,35, и строгая воспроизводимость их величины для каждой марки, независимо от времени и места изготовления стекла. Наличие большого

числа стекол с разными и строго воспроизводимыми оптическими постоянными и является той основой, которая позволяет рассчитывать и конструировать оптические системы любого назначения.

ТЕМА 2

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОСТАВА ОПТИЧЕСКИХ СТЕКОЛ

Все свойства оптических стекол (физические, физико-химические технологические) определяются их химическим составом. Только термообработка стекла в той или иной мере отражается на показателе преломления, плотности, прочности и некоторых других свойствах.

Основой технических стекол является тройная система: Na_2O - SiO_2 - CaO . В небольшом количестве в их состав вводят окислы MgO , Al_2O_3 иногда ZrO_2 . В оптическом приборостроении такие стекла используют для изготовления очковых линз, защитных и покровных стекол и др. неотчетливых деталей.

В качестве стеклообразующего окисла многих оптических стекол также служит кремнезем SiO_2 , но состав их гораздо сложнее. Такие стекла представляют собой многокомпонентные системы, содержащие 5 - 8 и даже 10-12 окислов. Если содержание SiO_2 в стекле превышает 30 - 40 мол.% его называют силикатным. Компонентами общими для силикатных стекол являются: SiO_2 , K_2O , Na_2O . В кроны еще вводят B_2O_3 , Al_2O_3 , BaO , CaO и другие компоненты, слабо повышающие дисперсию, а в состав флинт-окислов PbO и TiO_2 , способствующие ее увеличению.

На силикатной основе получают флинт-окислы с показателем преломления $n_d = 2,00 - 2,05$. Кроны и баритовые флинт-окислы с показателем преломления $n_d = 1,65 - 1,67$. Дальнейшему повышению показателя преломления препятствует высокая кристаллизационная способность стекла. Это заставляет использовать в качестве стеклообразователей другие компоненты, в частности B_2O_3 , GeO_2 , TeO_2 , а в качестве модификаторов окислы Ta_2O_5 , TiO_2 , ZrO_2 , La_2O_3 , CdO и др. Для получения стекол с высоким коэффициентом дисперсии используют фосфорный ангидрид - P_2O_5 . Особо высокого коэффициента дисперсии достигают введением фторидов.

Оптические бесцветные стекла по ГОСТ Р3514-94 имеют в ИК области границу пропускания 2,6 - 2,7 мкм. При этой длине волны коэффициент

пропускания равен 50%, причем это не собственное поглощение стекла, а полоса поглощения гидроксильных групп - OH . Граница пропускания этих стекол в УФ области - 300 нм.

Состав оптических стекол разных типов

Многообразие оптических постоянных стекол определяется многообразием их состава. При этом состав стекол каждого типа характеризуется содержанием некоторых компонентов в относительно

небольших пределах.

Легкие кроны - ЛК

Эти стекла принадлежат пятикомпонентной системе: $K_2O-B_2O_3-Al_2O_3-SiO_2-F$. К легким кронам причисляют стекла с показателем преломления меньше 1,5 и коэффициентом дисперсии большим 67. Для получения стекол с особо низким показателем преломления в состав вводят, возможно, большее количество компонентов с $n_e < 1,5$. Такими компонентами являются SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 . Наиболее действенное влияние оказывает фтор. В состав стекол типа ЛК всегда вводят окислы щелочных металлов.

Кроны - К

Основой является система $K_2O-Na_2O-B_2O_3-SiO_2$, которая осложняется небольшим количеством окислов двухвалентных металлов - PbO , BaO , CaO , MgO , ZnO , общее содержание которых, за единичным исключением не превышает 10-12 масс. %.. Показатель преломления кронов лежит в пределах 1,50-1,54, а коэффициент дисперсии от 67 до 55.

Борный ангидрид, содержащийся в кронах, приводит к существенному повышению коэффициента дисперсии, уменьшает вязкость стекломассы при температуре «осветления», при определенном содержании способствует повышению химической устойчивости стекла. Последней цели достигают также введением в стекло окиси алюминия (Al_2O_3). В небольших количествах она снижает кристаллизационную способность стекла. Однако в кронах Al_2O_3 применяют лишь в исключительных случаях, т.к. она повышает вязкость и без того вязкого расплава и способствует обильному пенообразованию стекломассы в период осветления. Помимо большой потери стекла, пенообразование повышает пузырность стекла, т.к. трудно установить окончание периода осветления, при включении же мешалки пена частично попадает в стекломассу. Повышения химической устойчивости кронов достигают главным образом с помощью борного ангидрида.

Баритовые кроны - БК.

Стекла типа БК являются многокомпонентной системой, с основой $K_2O-Na_2O-BaO-ZnO-B_2O_3-SiO_2$. Показатель преломления стекол этого типа находится в пределах 1,510-1,575, а коэффициент дисперсии от 66,5 до 55,5. Как и в кронах, коэффициент дисперсии повышают введением в состав стекла борного ангидрида. Вязкость БК в период осветления несколько ниже, чем у кронов.

Тяжелые кроны - ТК

Основой стекол служит система $BaO-B_2O_3-SiO_2$. Стекла этой системы обладают высокой кристаллизационной способностью и склонностью к расслаиванию (ликвации). Поэтому во все стекла типа ТК вводят Al_2O_3 (до 5-6 масс. %), которая сужает область расслаивания. В некоторые стекла с этой же целью вводят ZnO . Несмотря на усвоение состава, стекла типа ТК обладают

повышенной кристаллизационной способностью, что усложняет их производство. Показатель преломления стекла типа ТК от 1,555 до 1,665. Коэффициент дисперсии $\nu = 64-50,5$.

Сверхтяжелые кроны - СТК

Получение таких стекол на основе системы $\text{BaO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ невозможно из-за высокой кристаллизационной способности, которую компонентами Al_2O_3 , CaO , ZnO , обычными для стекол типа ТК, снизить не удастся. Поэтому в стекла типа СТК вводят окислы, обладающие низкой дисперсией, в частности - ThO_2 , ZnO_2 , La_2O_3 , CdO . В этих стеклах содержание SiO_2 еще ниже, чем в ТК, и составляет 7-40 мол. %. В результате вязкость расплава СТК очень мала и он показывает сильное разрушающее действие на огнеупор. Поэтому стекла типа СТК варят в сосудах из платины. Показатель преломления стекол типа СТК в пределах 1,65 - 1,67. Коэффициент дисперсии 50 - 45.

Группа флинтот включает в себя собственно флинтот, а также стекла, в состав которых входят компоненты характерные для кронов и флинтот. Последние имеют в названии «приставку», отражающую сочетание данного флинта с кронами: кронфлинтот, баритовые флинтот, тяжелые баритовые флинтот.

Флинтот типов: ЛФ, Ф, ТФ, СТФ

В основе флинтот лежит тройная системы $\text{K}_2\text{O-PbO-SiO}_2$, и лишь в некоторые флинтот вводят небольшое количество Na_2O , BaO или B_2O_3 .

Показатель преломления и коэффициент дисперсии флинтот разных типов ограничены значениями:

ЛФ	Ф	ТФ	СТФ
n_e 1,545-1,600	1,600-1,640	1,64-1,90	1.90
ν_e 50-39	39-35	35-22	22

Кронфлинтот - КФ

Кронфлинтот занимают промежуточное положение между кронами и легкими флинтотами, как по составу, так и по оптическим постоянным. Основой стекол КФ служит система $\text{K}_2\text{O-Na}_2\text{O-PbO-SiO}_2$. В стекла дополнительно вводят B_2O_3 и Al_2O_3 . Из щелочных окислов предпочтение отдают Na_2O , которыми при том же показателе преломления стекла позволяет получить его с меньшим коэффициентом дисперсии.

Показатель преломления этих стекол от 1,50 до 1,545. Коэффициент дисперсии $\nu_e=63 - 50$.

Все стекла типа КФ содержат большое количество SiO_2 - от 73 до 83 мол. %, почему и являются тугоплавкими. Для снижения вязкости расплава в период «осветления», в КФ вводилось большое количество Na_2O , в результате чего стекла получались налетоопасными. В связи с этими особенностями натриевых КФ были разработаны их заменители, в которых часть Na_2O заменена на K_2O , и часть PbO на TiO_2 . В большое число марок КФ введен фтор, сильно снижающий вязкость расплава. Все это делает стекла типа КФ химически более

устойчивыми и технологичными.

Баритовые флинт - БФ.

Стекла БФ занимают широкий центральный участок диаграммы «показатель преломления - коэффициент дисперсии». Слева они ограничены стеклами БК и ТК, справа флинтами типа ЛФ, Ф и ТФ, снизу - КФ и сверху ТБФ. Соответственно и состав БФ является промежуточным между составом стекол соседних с ним типов.

Показатель преломления стекол БФ лежит в пределах от 1,52 до 1,70. Коэффициент дисперсии от 56 до 31.

Тяжелые баритовые флинт - ТБФ.

По оптическим постоянным стекла типа ТБФ являются промежуточными между ТФ и СТК. Как и у СТК, в качестве кислотных окислов в них входят 20-40 мол. % SiO_2 и около 20 мол. % B_2O_3 -Компонентами, повышающими показатель преломления, помимо тех, которые входят в состав стекол типа СТК, служат окислы, обладающие высокой дисперсией, а именно - PbO , TiO_2 , WO_3 .

Несиликатные стекла

В несиликатных стеклах в качестве стеклообразователя входит фосфорный ангидрид P_2O_5 , борный ангидрид B_2O_3 , двуокись германия GeO_2 или двуокись теллура TeO_2 . Соответственно стекла носят название - фосфатных, боратных, германатных, теллуритных. В зависимости от требуемых значений показателя преломления и коэффициента дисперсии в них вводят окислы и фториды различных элементов.

Фосфатные и тяжелые фосфатные кроны ФК и ТФК

При показателе преломления 1,50-1,62 их коэффициент дисперсии лежит в пределах от 70 до 63-64. Фосфатные кроны обладают повышенной относительной дисперсией в синей части спектра, т.е. являются лангкронами.

Стеклообразователем здесь служит фосфорный ангидрид. Содержание P_2O_5 в стеклах типа ФК находится в пределах 70-45 масс. %, а в стеклах типа ТФК - 45-30 масс. %. В качестве компонентов повышающих показатель преломления стекол используют окислы бария, стронция, лантана. Окислы алюминия значительно повышают химическую устойчивость фосфатных кронов. Борный ангидрид существенно не повышает химическую устойчивость стекол к действию влажной атмосферы, но способствует их кислотоустойчивости.

Для понижения кристаллизационной способности в некоторых стеклах часто фосфатный ангидрид замещается на кремнезем. Осветлителем служит окись мышьяка или окись сурьмы.

Особые кроны - ОК

Обладают повышенной относительной дисперсией в синей части спектра. В диаграмме Аббе они могут располагаться в полях кронов всех типов.

Показатель преломления особых кронов 1,485-1,52, коэффициент дисперсии лежит в пределах 81 и 85.

По своему свойству особые кроны являются промежуточными между чисто фосфатными и фторидными стеклами. Основными компонентами особых кронов являются фториды элементов I, II или III групп периодической системы и метафосфат алюминия, способствующий повышению химической устойчивости стекла. Чем больше в стекле содержится фтора, тем выше его коэффициент дисперсии. Показателя преломления достигается введением в стекло окиси бария или окислов других элементов II группы периодической системы.

Особые флинт - ОФ

Особые флинт - оптические стекла с пониженной, по сравнению с обычными флинтами, относительной частной дисперсией в синей части спектра. Эти стекла, наряду с особыми кронами, используются в апохроматах для исправления вторичного спектра. Как и особые кроны, особые флинты не занимают особого участка в диаграмме Аббе и практически располагаются на участках кронфлинтов и баритовых флинтов. Особые флинты получают на щелочно-сурьмяноборосиликатной (ОФ1) или свинцовоборатной (ОФ4, ОФ5) основе. В последнем случае третьим компонентом служит оксид алюминия и оксид лантана.

ТЕМА 3

НОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ БЕСЦВЕТНЫЕ СТЕКЛА

В последнее десятилетие практическое значение стекол с особыми оптическими и спектральными характеристиками неизменно возросло. Использование этих стекол в оптических системах позволяет эффективно решать сложные задачи в области технологии, химии, атомной энергетике, связи и видеотехнике. В условиях конверсии проблема разработки и внедрения новых стекол не только не теряет своего значения, а становится более актуальной, т.к. выпускаемые приборы гражданского назначения - фото- и киноаппаратура, съемочные камеры телевидения, объективы высокоразрешающих микроскопов и др. - должны быть конкурентоспособными на мировом рынке. Так, для создания фото- и кинообъективов экстра-класса дополнительно к существующим требуются кроны с высокими значениями коэффициента дисперсии и увеличенными значениями относительной дисперсии в синей части спектра, сверхтяжелые кроны и тяжелые баритовые флинты с высоким значением показателя преломления и экстремальными значениями коэффициента дисперсии. В съемочных камерах объективов цветного телевидения необходимы стекла типа особых кронов-заменителей флюорита, флинты с укороченной дисперсией в синей части спектра, сверхтяжелые флинты. При этом предъявляются высокие требования к пропусканию стекла в диапазоне длин волн 400-700 нм, а также к пузырьности,

т.к. крупные пузыри диаметром более 0,1-0,2 мм в стекле первой компоненты объектива проецируются на экран телевизора в виде серого пятна. Объективы для фотолитографии komponуются из стекол с экстремальными оптическими характеристиками, высоким пропусканием в ультрафиолетовой части спектра ($\lambda=365$ нм); при этом предъявляются сверхвысокие требования к однородности - заготовки не должны иметь свилей при просмотре в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а перепад показателя преломления по заготовке не должен превышать $1 \cdot 10^{-6}$. Стекла для микроскопов с разрешением до 3000 линий на 1 мм должны иметь широкий диапазон значений показателя преломления и средней дисперсии и обладать ярко выраженным особым ходом дисперсии, не люминесцировать, иметь высокое пропускание в диапазоне длин волн 400-700 нм и малое рассеяние - показатель светорассеяния не более $4-10 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$.

Особое значение в настоящее время придается созданию очковых стекол для бифокальных очковых линз и высокопреломляющих облегченных очковых стекол для линз высокой рефракции.

Разработка высокопреломляющих стекол с уменьшенной плотностью имеет существенное значение в тех случаях, когда требуется уменьшение массы оптических приборов. Это особенно важно в переносных съемочных телевизионных камерах, фото - и киносъемочной аппаратуре.

Еще одной из задач, стоящих перед оптическим материаловедением, является получение термически и механически прочных стекол, которые применяются для защитных окон, водомерных стекол и др. Рассмотрим новые разработанные и осваиваемые в производстве стекла.

Фосфатные кроны

Среди стекол с особым ходом частных дисперсий особое место занимают фторофосфатные лангкроны, отличающиеся значительно увеличенной относительной частной дисперсией в синей части спектра и высокими значениями коэффициента дисперсии, которые у некоторых стекол приближаются к значениям соответствующих величин у керамических фторидов. Стекла типа фторофосфатных кронов имеют отрицательные значения температурного коэффициента показателя преломления и термооптической постоянной W , которая характеризует оптический материал в системе при неравномерном распределении температуры. Получение стекол с отрицательными или близкими к 0 значениями W открывает возможность для создания приборов, которые могут успешно работать в условиях значительных температурных перепадов. Таким образом, использование фторофосфатных стекол в оптических системах позволяет избавиться от остаточного хроматизма и термоволновой аберрации.

До недавнего времени в России выпускались только две марки фторофосфатного стекла: ОК1 ($n_e=1,5239$, $v_e=76,0$) и ОК2 ($n_e=1,5521$, $v_e=72,7$).

Указанные стекла обладают ярко выраженным особым ходом дисперсии - их коэффициент дисперсии на 16 - 19 единиц больше, чем у обычных стекол с

теми же значениями относительной частной дисперсии. В последние годы разработаны составы фторофосфатных стекол ОК570-642, ОКЗ (ОК441-928) и ОК4 (ОК449-916). С введением этих стекол в ГОСТ будет ликвидировано отставание от ведущих фирм мира («ШОТТ», Германия, «Хойя», Япония).

Стекла ОКЗ и ОК4 превосходят по значениям коэффициента дисперсии стекла F K54 («ШОТТ») и FCD10 («Хойя»).

Стекло ОК570-642 имеет наибольшее значение показателя преломления среди всех разработанных фторофосфатных стекол ($n_e=1,570$) и увеличение значение относительных частных дисперсий, что особо перспективно для использования его в светосильных апохроматах.

Отличительной особенностью стекла ОК570-642 является самое низкое из всех стекол каталога значение суммы термооптических постоянных $(W+R) \cdot 10^{-7}$ 30° с $0,64 \text{ мкм}=10$. По кристаллизации стекло ОК570-642 находится на уровне промышленных фторофосфатных стекол и может синтезироваться в сосудах большой емкости. В настоящее время отрабатывается технология варки стекла в производственных условиях.

Стекла ОК4410928 и ОК449-916 близки по своим оптическим постоянным к кристаллическому фториду кальция. Отличительной ($\delta_e > 90$) и максимальное для стекол отклонение относительных частных дисперсий и коэффициентов дисперсий нормальной прямой.

Стекла ОК441-928 и ОК449-916 в настоящее время вводятся в ГОСТ под марками ОКЗ и ОК4 соответственно и выпускаются в промышленных условиях в заготовках диаметром до 160 мм Лыткаринским заводом оптического стекла.

Тяжелые баритовые флинт

В новых оптических приборах все большее применение находят тяжелые баритовые флинт (ТБФ), которые обладают более высокими значениями показателя преломления, чем баритовые флинт. Это позволяет уменьшать кривизну линз и их число в объективе, а также облегчает исправление аберраций.

В России промышленностью выпускается около 10 марок стекол типа ТБФ, в то время как каталоги многих зарубежных фирм (3 - 5) содержат значительно большее количество таких стекол со значительно более выгодным сочетанием оптических постоянных, чем у отечественных. Так, каталог фирмы «ШОТТ» включает стекло LaSF3 ($n_e=1,8127$, $v_e=40,4$), которое широко используется в массовой кинофотооптике. Наиболее близким по константам отечественным стеклом является стекло ТБФ9. Однако стекло ТБФ9 выпускается ограниченно вследствие значительной кристаллизационной способности и высокого содержания дефицитных и дорогостоящих материалов (массовая доля $Ta_2O_5 \sim 20\%$, $GeO_2 \sim 10\%$).

Разрабатывается и осваивается промышленностью новое стекло ТБФ736 с высоким содержанием оксида лантана. Стекло имеет показатель преломления $n_e=1,81$, коэффициент дисперсии $v_e=40$, характеризуется низким значением показателя ослабления ($\mu_\lambda=0,0010-0,0020$) и высокой химической

устойчивостью.

Благодаря оригинальным оптическим постоянным и хорошей технологичности, стекло может найти широкое применение в кино-фотооптике.

Особые флинт

Особые флинт отличаются укороченной по сравнению с обычными флинтами и баритовыми флинтами относительной частной дисперсией не только в синей, но и в красной области спектра. Они используются для апохроматизации объективов - исправления вторичного спектра как самостоятельно, так и в паре с фторофосфатными кронами (ОК1-ОФ6).

Новые особые флинт ОФ7, ОФ8 и ОФ9 по оптическим характеристикам близки к стеклам KzFS9, RzFS5, KzFS8 фирмы «ШОТТ». Обладая высокой устойчивостью к влажной атмосфере и пятнающим агентам, особые флинт ОФ7, ОФ8 и ОФ9 имеют преимущества как в процессе обработки, так и при эксплуатации изделий.

От зарубежных аналогов особые флинт ОФ7, ОФ8 и ОФ9 отличаются высокой оптической однородностью крупногабаритных заготовок.

Особые флинт отличаются укороченной по сравнению с обычными флинтами и баритовыми флинтами относительной частной дисперсией не только в синей, но и в красной области спектра. Они используются для апохроматизации объективов - исправления вторичного спектра как самостоятельно, так и в паре с фторофосфатными кронами (ОК1-ОФ6).

Новые особые флинт ОФ7, ОФ8 и ОФ9 по оптическим характеристикам близки к стеклам KzFS9, RzFS5, KzFS8 фирмы «ШОТТ». Обладая высокой устойчивостью к влажной атмосфере и пятнающим агентам, особые флинт ОФ7, ОФ8 и ОФ9 имеют преимущества как в процессе обработки, так и при эксплуатации изделий.

От зарубежных аналогов особые флинт ОФ7, ОФ8 и ОФ9 отличаются высокой оптической однородностью крупногабаритных заготовок.

Флинт и тяжелые флинт

В последнее время разработаны состав и технология производства новых марок флинтов и тяжелых флинтов. Все они созданы в основном на силикотитановой, а ТФ 15 на фосфатниобиевой основе. Это предопределяет некоторые физические и физико-химические их особенности. Практически все стекла имеют увеличенную дисперсию в синей части спектра и уменьшенное значение коэффициента дисперсии по сравнению со свинцовыми флинтами, что делает выгодным их применение для апохроматизации объективов, особенно в паре со сверхтяжелыми кронами и тяжелыми баритовыми флинтами. Все стекла имеют на 30-25% меньшую плотность, чем свинцовые флинт, а также высокий уровень устойчивости к жестким излучениям без введения в стекло оксида церия. И наконец, титановая основа позволяет производить варку стекла сразу в платиновом сосуде без применения двухстадийной технологии, что

намного удешевляет стоимость стекла.

Стекло - заменитель Ф9

Стекло Ф618-341, разработанное в НИИТИОМ совместно с Лыткаринским заводом оптического стекла и по сравнению со стеклом Ф9 с теми же оптическими характеристиками, имеет следующие преимущества:

лучшую технологичность вследствие меньшей склонности к кристаллизации и возможности одностадийной варки в платиновых сосудах;

устойчивость к жестким излучениям без введения GeO_2 на уровне стекол сотой серии;

более высокое светопропускание - стекло Ф9 обычно получают 6-7-й категории, Ф109 - 8-й категории, а Ф618-314 получают 3-4й категории. Кроме того, стекло Ф 618-314 имеет плотность $2,71 \text{ г/см}^3$ в отличие от стекла Ф9, имеющего плотность $2,93 \text{ г/см}^3$.

Стекло ТФ21

Стекло ТФ 21 является более технологичным заменителем стекла ТФ11 вследствие меньшей склонности к кристаллизации. Если ТФ11 получают в заготовках диаметром до 90 мм, то стекло ТФ21 получено в заготовках диаметром до 280 мм.

Без введения оксида церия оно устойчиво к воздействию жесткого излучения на уровне стекол сотой серии. По светопропусканию стекло значительно лучше, чем ТФ11, ТФ21 получено 2-й категории, а ТФ11 - 4-7й категорий.

Стекло ТФ14

В результате исследований разработаны состав и технология производства нового фтористо-титанового флинта ТФ 14. Стекло ТФ 14 является аналогом стекла ТФ 8 по показателю преломления, но имеет в два раза меньше значение коэффициента дисперсии и увеличенное до уровня фтористотитановых флинтов значение относительной дисперсии в синей части спектра. Сочетание уменьшенного значения относительной частной дисперсии делает стекло ТФ 14 ценным для использования в апохроматах.

Большим преимуществом стекла ТФ 14 является его малая плотность - $3,00 \text{ г/см}^3$, в то время как у его аналога по показателю преломления стекла ТФ 8 плотность составляет $4,23 \text{ г/см}^3$.

Радиационная устойчивость стекла ТФ 14 значительно выше, чем у известных тяжелых флинтов. Приращение его оптической плотности при дозе облучения 10^5 Р . без введения в состав оксида церия находится на уровне стекла ТФ 108.

Благоприятное сочетание высокого показателя преломления и низкой плотности, а также высокое качество стекла по пузырьности и прозрачности позволяет использовать стекло ТФ 14 для очковой оптики. Стекло ТФ 14 выпускается промышленностью в заготовках диаметром до 250 мм.

Стекло ТФ15

Представителем нового класса стекол является тяжелый фосфатный особый флинт ТФ15, показатель преломления которого равен $n_e = 1,77$

коэффициент дисперсии $v_e = 26$, плотность $3,35 \text{ г/см}^3$. Плотность нового стекла на 30 % ниже плотности свинцово-силикатных флинтгов. По своему составу оно отличается высоким содержанием пятиоксида ниобия, что определяет особые оптические свойства и малую плотность стекла. Пятиокись ниобия позволила получить стекло, обладающее комплексом хороших эксплуатационных и физико-химических свойств, присущих Nb_2O_5 .

Новое стекло ТФ15 рекомендуется использовать для создания объективов с высокой апохроматической коррекцией и высокой разрешающей способностью, а также в приборах с уменьшенным весом оптических деталей, в приборах, работающих в условиях воздействия повышенной влажности и кислых сред, в приборах, работающих в условиях повышенной радиации.

Сверхтяжелые флинты

В отечественном каталоге оптического стекла существует три марки стекол типа сверхтяжелых флинтгов - СТФ 2, СТФ 3, СТФ111, среди которых СТФ 3 имеет самый высокий показатель преломления ($n_e = 2,1880$). В каталоге передовых зарубежных фирм максимальный показатель преломления ограничивается значением $n_e = 1,99238$ для стекол марки FDS - 10 фирмы «Хойя». Однако стекло СТФ3 имеет высокую кристаллизационную способность, что приводит к низкому выходу годного стекла.

Новое стекло СТФ111 при таком же, как у СТФ3, показателе преломления характеризуется значительно более высоким выходом годного, качество стекла по пузырьрности выше и стабильнее, чем у СТФ3. В составе стекла не содержится токсичного оксида таллия, что делает его производство экологически более чистым по сравнению с СТФ3. Стекло марки СТФ111 относится к наивысшим классам химической устойчивости по отношению к влажной атмосфере и пятнающим агентам, характеризуется у - устойчивостью без введения оксида церия и низким поглощением на длине волны $\lambda = 1,06 \text{ нм}$ ($K_\lambda = 0,0007 \text{ см}^{-1}$).

Существенным недостатком высокопреломляющих стекол типа БФ, СТФ, ТБФ, ТФ является пониженное пропускание в коротковолновой видимой области спектра, что значительно ограничивает их применение в оптическом приборостроении.

Основное достоинство нового типа стекол на фосфатно-теллуритной основе состоит в сочетании высокого значения показателя преломления с повышенным пропусканием в указанной части спектра. Для сравнения можно привести данные, характеризующие стекло ТФ10, у которого при значении показателя преломления $n_e = 1,8137$ пропускание на длине волны 400 нм составляет 61 %. В разработанном новом стекле марки СТФ 117-02 с показателем преломления $n_e = 1,9798$ пропускание на той же длине волны равно 95 %.

Высокопреломляющие стекла фосфатно-теллуритной помимо высокого пропускания характеризуются низкой кристаллизационной способностью, позволяющей производить их в больших объемах. К недостаткам стекол следует отнести низкую химическую устойчивость, поэтому стекла требуют

защиты.

ТЕМА 4

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТЕКЛА. ТВЕРДОСТЬ ПО СОШЛИФОВЫВАНИЮ

Твердость стекла определяет трудоемкость процессов его механической обработки. Чем тверже стекло, тем больше усилий надо затратить на эти процессы. Однако менее твердое стекло больше подвержено царапанию а значит, затрудняет получение полированной поверхности высокого класса чистоты.

В зависимости от твердости стекла выбирают вид и зернистость шлифующего абразива, материал образующий рабочую поверхность полировальника, полирующий абразив и жидкую фазу суспензии этого абразива.

При выполнении операций шлифования стекла учитывают его относительную твердость по сошлифованию. Характеристикой является отношение объема V сошлифованного стекла марки К8 к объему V^x стекла марки x , сошлифованного при тех же условиях,

$$\text{т.е. } K_T = \frac{V^{K8}}{V^x}$$

Как и прочие свойства стекла, твердость его связана с химическим составом. Такие компоненты как SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 , повышают твердость, а оксиды одно- и двухвалентных элементов, особенно K_2O , Na_2O , PbO ее снижают.

Относительная твердость K_T по сошлифовыванию наиболее распространенных марок оптических стекол лежит в диапазоне 0,7-1,0. Устекол типа ТФ она составляет 0,5-0,6. Такая же величина у ряда марок стекол типов БФ (БФ6-БФ16), Ф (Ф1, Ф2, Ф4), ФК (ФК1, ФК13, ФК14). У некоторых марок стекла относительная твердость по сошлифовыванию больше 1,0. К числу таких относятся: ЛК5 (1,6), КФ5 (1,2), ТБФ3 (1,3), ТБФ4 (1,7), СТК12 (3,0), кварцевое стекло (2,5).

Прочность

Под прочностью понимают способность стекла выдерживать без разрушения воздействие различных видов нагрузки (растяжение, сжатие, изгиб, удар и др.).

Техническая прочность стекла зависит от действующего напряжения. Стекло почти лишено способности к пластической деформации, поэтому его прочность при растяжении и изгибе меньше чем при сжатии. Теоретическая прочность материала определяется силами действующими между его атомами (молекулами, ионами), и, следовательно? зависит от энергии химической связи. Прочность на разрыв, характеризуемая как напряжение, при котором

происходит разрушение тела при одновременном разрыве всех межатомных связей, теоретически оценивается равной:

$$\sigma_{\text{теор}} = (0,1 - 0,2)E$$

где E - модуль упругости.

Практически, реальная прочность стекла на несколько порядков ниже теоретической. Исходя из приведенного соотношения последняя должна равняться 1000-1500 кг/мм², а фактически она равна 10-12 кг/мм².

Согласно гипотезе Гриффитса, причина несоответствия между теоретической и технической прочностью объясняется тем, что на поверхности реальных материалов статистически произвольно распределены дефекты различной степени сложности. Дефекты, получившие название «трещин Гриффитса», представляют собой нарушение поверхностного слоя, обусловленное разрывом связей Si - O- Si вследствие абразивного действия твердых частиц или соприкосновения с поверхностями твердых тел. Разрушение поверхности вызывается также в результате ее взаимодействия с влагой и газами воздуха.

При отсутствии трещин прочность должна быть высокой. Действительно, нанесение защитных покрытий на поверхность стекла позволяет повысить среднюю прочность до 350 кг/мм². Прочность свежевытянутых кварцевых нитей диаметром 5-10 мкм составляет при испытании на воздухе 590 кг/мм², а в жидком азоте - 1800 кг/мм². При хранении на воздухе происходит «старение» поверхностного слоя, обусловленное его взаимодействием с окружающей средой, и образованием поверхностного дефектного слоя. Вследствие того, что трещины Гриффитса имеют малые размеры, их не удастся наблюдать с помощью современных оптических и электронно-оптических приборов.

Оптические детали приборов подвергаются в основном изгибу и растяжению. Поэтому применительно к условиям эксплуатации для определения прочности оптического стекла используют метод симметричного изгиба.

Главным фактором снижающим механическую прочность оптических деталей является трещиноватый слой, который не полностью удаляется полированием. Кроме того, нарушенный слой, хотя и малой величины создается процессом полирования. Полное удаление трещиноватого слоя образованного в процессе шлифования и уменьшение толщины слоя нарушаемого полированием позволяет, в определенной степени, повысить прочность стекла. Кроме того прочность стекла может быть увеличена закалкой, травлением, ионным обменом.

Закалка создает в поверхностном слое напряжения сжатия, которые препятствуют образованию и росту трещин. Прочность стекла повышается в 2-3 раза. Эффективен этот метод только для деталей большой толщины и мало пригоден для стекол с малым КТР.

Травлением в плавиковой кислоте упрочнения стекла достигают за счет

удаления поверхностного слоя нарушенного в процессе шлифования и полирования. Степень повышения прочности зависит от глубины травления. При полном удалении этого слоя достигают 2 - 4 кратного увеличения прочности. Однако глубокое травление нарушает точность формы полированной поверхности, и для деталей оптического тракта формирующего изображение этот метод не применяют.

Ионно-обменное упрочнение производят путем обработки поверхности стекла в расплавах солей. Поверхностное сжатие возникает в результате внедрения более крупных ионов из солевого расплава (например KNO_3) в те полости, которые ранее занимали ионы меньшего размера (например Na^+). Минимальная толщина слоя, на которую происходит диффузия ионов калия из расплава, составляет 50 мкм. Метод позволяет повысить прочность стекла в 2-3 раза.

Развитие ОКГ определило необходимость введения еще одной прочностной характеристики оптических материалов - лучевой (или оптической) прочности. В таких ОКГ световой луч создает напряженность поля до десятков миллионов вольт на сантиметр. При этом наблюдается ряд необычных явлений. В частности, при фокусировании излучения неодимового лазера с энергией 1,5 джоуля, внутри образцов стекла на площади 0,03 мм (диаметр - 0,2 мм) под действием импульса длительностью 50 нсек / $5 \cdot 10^{-8}$ сек, происходит электрострикция. Т.е. в местах наибольшей напряженности поля имеет место сжатие вещества и увеличение его показателя преломления. Нарушение однородности показателя преломления приводит к самофокусировке излучения. Плотность самосфокусированного потока достаточна для развития процессов ионизации, что влечет за собой разрушение материала.

Т.о. в случае коротких импульсов предел оптической прочности определяется нелинейными свойствами стекла, характеризующими его способность концентрировать световую энергию волны в канал диаметром 6-8 мкм, что приводит к возникновению плотностей светового потока 10^{12} Вт/см². Что касается оптической прочности при более длительных импульсах, то имеющийся фактический материал говорит в пользу теплового механизма разрушения.

Фотоупругие свойства

Изотропное по своей природе стекло, подвергнутое сжатию или растяжению, становится анизотропным подобно одноосному кристаллу, направление оптической оси которого совпадает с направлением действия напряжений. Искусственную анизотропию называют **фотоупругостью**.

Фотоупругие свойства стекол используют при расчете режимов отжига, определении волновой аберрации объективов работающих в условиях переменных температур и давлений, при подборе стекол для ОКГ, обладающих минимальной температурной дисторсией.

Фотоупругость стекол определяется тремя величинами - фотоупругими

постоянными C_1 и C_2 и их разностью $B=C_1 - C_2$, которую называют оптическим коэффициентом напряжения (ОКН).

Фотоупругие постоянные C_1 и C_2 характеризуют приращение показателя преломления для света с колебаниями, соответственно параллельными и перпендикулярными действию напряжений при их изменении на 10^5 Па. Оптический коэффициент напряжения (ОКН) характеризует двойное лучепреломление, возникающее при напряжении 10^5 Па.

При сжимающей нагрузке показатель преломления стекла увеличивается, а сжимающие напряжения имеют отрицательный знак, то C_1 и C_2 тоже отрицательные. Если напряжения одинаковы, то $|C_2| > |C_1|$. Исключение составляют немногие марки стекла.

Фотоупругие свойства зависят от длины волны излучения, температуры и химического состава стекла, значения B , C_1 и C_2 при комнатной температуре для $\lambda=550$ нм приведены, соответственно, в ГОСТ 3514-76 и ОСТ 3-1195-72. Величины их ограничиваются пределами: B - от 0,65 до 3,5; C_1 от +0,1 до -6,1 10^{-12} 1/Па; C_2 от -2,0 до -6,8- 10^{-12} 1/Па.

Наибольший интерес для объективостроения и элементов ОКГ представляют стекла с малыми значениями B , C_1 и C_2 для выбранных длин волн. Показатели преломления таких стекол мало зависят от напряжений, а значит эти стекла допускают большие температурные перепады без искажения волнового фронта. К числу таких стекол, в частности относятся стекла типов ТФ и СТФ с большим (~74%) содержанием свинца. Стекла с большим ОКН (халькогенидные стекла - ИКС) могут использоваться для измерения очень малых напряжений.

Химические свойства

Технология изготовления и эксплуатационные качества оптических деталей зависят от химической устойчивости стекла. Она характеризует способность полированной поверхности противостоять разрушающему воздействию агрессивных сред. Различают:

- устойчивость стекла к средам (вода, кислые растворы), с которыми полированные поверхности соприкасаются, в основном, в процессе изготовления деталей, а также при сборке прибора. Стекла разрушаемые водой или кислыми растворами называют пятнающимися.

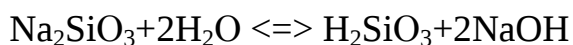
- устойчивость стекла по отношению к влажной атмосфере, воздействию которой поверхности деталей подвергаются при эксплуатации и хранении приборов. Стекла разрушаемые влажной атмосферой называют налетоопасными.

Механизм разрушения стекла как водой, так и влажной атмосферой принципиально одинаков и представляет процесс гидролиза легкорастворимых окислов поверхностного слоя. Характер разрушения поверхностного слоя пятнающихся и налетоопасных стекол различен.

При воздействии воды степень разрушения поверхности стекла

определяется растворимостью веществ, входящих в его состав и их способностью к ионному обмену с растворителем. Вода вымывает из поверхностного слоя растворимые продукты гидролиза - окислы металлов, щелочи.

Реакция гидролиза протекает по схеме:



при испарении воды: $\text{H}_2\text{SiO}_3 \rightarrow \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

На поверхности остается тонкая, пронизанная порами, пленка коллоидного кремнезема, которая нерастворима в воде, устойчива к действию кислот и слабых щелочей. Ее толщина в зависимости от марки стекла, составляет от 15 до 70 Å. Показатель преломления пленки меньше чем у стекла и поэтому отраженный свет вследствие интерференции приобретает цветовую окраску. Попадая на отдельные участки полированной поверхности, вода образует пятна. Чем больше разница в показателях преломления стекла и пленки, тем резче выражено явление пятнания. К наиболее сильно пятнающимся относятся стекла содержащие значительное количество тяжелых металлов (PbO, BaO), которые определяют величину показателя преломления. С пятнанием можно встретиться в процессе изготовления деталей из стекол типов ТК, БФ, ТФ. У стекол, не содержащих окислов тяжелых металлов, поверхностный слой обедняется щелочами. Это не вызывает существенного изменения показателей преломления и появления интенсивной интерференционной окраски.

Начальная стадия разрушения стекла водой или кислыми растворами не опасна, однако при длительном воздействии этих сред поверхностная плёнка растрескивается, пятна становятся мутными, прозрачность стекла снижается. Пятнаемость стёкол согласно ГОСТ13719-68 характеризуют временем (час.), в течение которого под воздействием 0,1 н. раствора CH_3COOH при температуре 50 °С на свежеполированной поверхности образуется плёнка оптической толщины 135 нм. В зависимости от этого времени оптическое силикатное и несиликатное стекло разделено на 3 группы:

- I. Непятнающие стёкла. Время образования плёнки более 5 час.
- II. Промежуточные стёкла. Время образования плёнки от 5 до 1 час.
- III. Пятнающие стекла. Время образования плёнки менее 1 час.

Некоторые нестойкие силикатные (ТК) и несиликатные стекла (боратные, германатные) не образуют пленок с хорошим защитными свойствами, и растворение стекла происходит непрерывно с явно выраженными признаками порчи поверхности. Следует обратить особое внимание на пятнаемость фторфосфатных стекол типа особых кронов (ОК), которые относятся третьей группе пятнаемости. В связи с выявившейся в последнее время тенденцией к применению крупногабаритных линз из этих стекол, на промежуточных технологических стадиях готовые поверхности таких линз целесообразно предохранять от разрушения нанесением защитных покрытий.

Технолог должен учитывать, что длительное хранение полированных

деталей без нанесения просветляющих или других покрытий может ухудшить качество и прочность последних. Межоперационное время хранения деталей из стекол БФ и ТФ - не более 8 часов, для стекол типа ТК - не более суток. Нанесением на полированные поверхности пленки защитного лака (эмаль НЦ-25) срок хранения стекол типа БФ и ТФ увеличивается до 20 часов.

Во влажной атмосфере устойчивость стекла определяется гигроскопичностью его компонентов, их способностью поглощать влагу атмосферы. Образующиеся щелочи или продукты их взаимодействия с углекислотой воздуха остаются на поверхности. По устойчивости к влажной атмосфере силикатные стекла разделены на 3 группы А, Б, В, а несиликатные на группы: а, у, д. Принадлежность к этим группам определяют по времени (час.) образования на полированной поверхности капельного гигроскопического налёта.

Группа А. Неналётоопасные стекла. На полированной поверхности при 85 % относительной влажности и 50 °С капельно-гигроскопический налёт образуется более чем через 20 часов.

Капельно-жировые и биологические налеты

Капельно-жировые налеты представляют собой мельчайшие капельки жира на поверхности стекла. Под влиянием влаги воздуха они увеличиваются в объеме, и через некоторое время вся поверхность стекла покрывается налетом - скоплением капелек. Капельно-жировой налет удаляют органическим растворителем.

Биологический налет представляет собой плесень и водоросли на поверхности стекла, споры которых почти всегда присутствуют в воздухе. Возникает такой налет обычно у краев детали, соприкасающейся с оправой, прокладками и т.п. Продукты, выделяемые плесенью, имеют кислую реакцию, и поэтому стекло под плесенью слегка разрушается. Одной из основных причин биологического налета является высокая влажность воздуха. Предохранение деталей от плесени, особенно деталей приборов выпускаемых в тропическом исполнении, осуществляется специальной защитой.

ТЕМА 4

ЦВЕТНОЕ ОПТИЧЕСКОЕ СТЕКЛО

Видимая область спектра, ограниченная длинами волн $\lambda=400-740$ нм условно разделена на 7 цветовых участков: фиолетовый ($\lambda=400-450$ нм), синий ($\lambda=450-480$ нм), голубой ($\lambda=480-500$ нм), зеленый ($\lambda=500-578$ нм), желтый ($\lambda=578-592$ нм), оранжевый ($\lambda=592-620$ нм) и красный ($\lambda=620-740$ нм). Условность такого деления состоит, во-первых в том, что невозможно установить точные границы перехода от излучения одного цвета к излучению другого, и, во-вторых в том, что глаз в состоянии различить гораздо большее (порядка 1000) число цветовых оттенков.

Вещество, окрашенное в черный цвет, полностью поглощает видимый свет. Вещество, полностью пропускающее видимый свет - прозрачно и бесцветно. Если же вещество способно часть видимого света поглощать, а остальную пропускать, то оно окрашено в цвет того излучения, которое пропускает. Так, например, стекла окрашенные в красный цвет (рубиновое стекло) поглощает излучение фиолетового, синего, желтого и зеленого цвета и пропускает излучение красного цвета.

Кислородные (окисные) стекла приобретают способность поглощать видимую область при наличии в них центров окрашивания. Эти центры могут быть четырех типов: индуцированные, ионные, молекулярные и коллоидные. Для варки цветного оптического стекла используют силикатную, фосфатную алюмокальциевую и другие основы бесцветного стекла, красители которые вводят в шихту бесцветного стекла, могут находиться в нем в молекулярно растворенном или коллоидном состоянии. В качестве молекулярных красителей используют окислы металлов, в частности: Co, Si, Mn, Fe, Mo, Te, Cr, Va, W, Ti, Ni, редкие земли и др. Коллоидные красители: Se, Cd, Au, Ag и др. Коллоидные красители окрашивают стекло от желтого до темно-красного цвета. Красители влияют на спектральные характеристики стекол, а его физико-химические свойства определяются основным составом. Цвет и интенсивность окраски стекла зависят от природы и концентрации красителя, режима варки.

В зависимости от окраски цветные оптические стекла разделены на ряд типов. Каждый тип включает несколько марок, различающихся интенсивностью окраски. Обозначение марок составлено из букв и цифр. Первая, или две первые буквы - начальные буквы наименования цвета, а последняя, одинаковая для всех буква С - начальная буква слова «стекла». Цифра в марке показывает порядок разработки. Чем меньше номер, тем раньше это стекло освоено промышленностью.

Типы и марки цветного стекла регламентирует ГОСТ 94-11-78 «Цветное стекло»:

-ультрафиолетовое	- 5 марок	- оранжевые (ОС)	- 7 марок
- фиолетовое (ФС)	- 3 марки	- красные (КС)	- 8 марок
- синие (СС)	- 11 марок	- инфракрасные (ИКС)	- 5 марок
- сине-зеленые (СЗС)	-15 марок	-пурпурные (ПС)	- 7 марок
- зеленые (ЗС)	- 8 марок	- нейтральные (НС)	- 11 марок
- желто-зеленые (ЖЗС)	- 11 марок	- темные (ТС)	- 5 марок
- желтые (ЖС)	-10 марок	- белые (БС)	- 10 марок

Область применения цветного стекла той или иной марки определяется его спектральными свойствами, для характеристики которых используют: численные значения показателей поглощения K_λ или оптической плотности D_λ для различных длин волн, спектральные кривые коэффициента пропускания τ_λ ,

оптической плотности D_λ и логарифма оптической плотности $\lg D_\lambda$.

Показатель поглощения K_λ стекла для света длиной волны определяется из выражения:

$$K_\lambda = \frac{-\lg \tau_\lambda}{l}$$

Где τ_λ - коэффициент пропускания стекла толщиной 1 (мм) для хроматического света длиной волны λ .

Примечание: показатель поглощения K_λ - величина обратная расстоянию, на котором поток излучения, образующего параллельный пучок, ослабляется в результате поглощения в среде в 10 раз.

Оптическая плотность D_λ массы стекла для монохроматического света с длиной волны λ связана с показателем поглощения K_λ и коэффициентом пропускания τ_λ соотношением:

$$D_\lambda = -\lg \tau_\lambda = K_\lambda \times l$$

При расчете оптической плотности светофильтров кроме поглощения света учитывают его потери на отражение от двух поверхностей стекла.

Стекла, окрашенные молекулярными красителями, имеют избирательную кривую пропускания, например, стекло СС5 имеет характерную избирательную кривую пропускания с максимумом в области 415-420 нм. Стекло УФС5 ограничивает пропускание ультрафиолетовой части спектра в области 370-380 нм. Нейтральные стекла ослабляют пропускание в видимой части спектра в зависимости от концентрации красителя в составе стекла.

Стекла окрашенные коллоидными красителями, в частности селеном и кадмием дают резкую границу пропускания.

Наибольшее распространение получили селенокадмиевые стекла, имеющие желтую, красную и оранжевую окраски.

Светофильтры, устанавливаемые вблизи источников, света сильно нагреваются, т.к. последние одновременно с видимыми лучами излучают и тепловые. При нагреве стекла его спектральное поглощение изменяется, а при охлаждении, как правило, восстанавливается. При нагреве стекла коротковолновая граница пропускания и полосы поглощения смещаются в область более длинных волн, полосы поглощения размываются, плотность в минимумах увеличивается. В некоторых случаях эти изменения могут резко ухудшить спектральные свойства светофильтров. Граница поглощения стекол ЖС, ОС, КС при повышении температуры на каждые 100 °С смещается на 10 - 15 нм, что может соответствовать переходу стекла в следующую марку такого типа. Особенно сильно смещается граница стекол марок КС17, КС18, КС19. Учитывая изменение спектральных характеристик при их нагреве, в технической документации приводятся графики оптической плотности типовых стекол при разных температурах (20°, 100°, 200°, 400° С). Эта специфика работы цветных стекол предъявляет определенные требования к их термостойкости и КТР. Термостойкими, условно, считают стекла, у которых КТР менее $70 \cdot 10^{-7}$ град⁻¹.

Спектральные свойства стекол могут изменяться, в результате длительного облучения УФ лучи УФ области и предназначенных для работы с источником УФ излучения. К таким стеклам относятся: УФС1, УФС2, УФС5, УФС6, БС3, БС4, БС12, ПС11 и др. Изменение спектральной характеристики светофильтров из этих стекол зависит от мощности источника, времени облучения, положения границы пропускания стекла в УФ области и от толщины фильтра. Чем более короткие волны пропускает стекло, тем в большей степени оно теряет прозрачность. При использовании лампы ПРК-2 светофильтр из стекла УФС1 становится непригодным для пропускания $\lambda=254$ нм через 50-100 часов облучения.

Многие светофильтры не могут быть получены в одном стекле. Оптимальные, наиболее близкие к теоретическим, светофильтры с определенным ходом спектральных кривых, как правило, получают при составлении двух или трех цветных стекол. Светофильтры, выделяющие узкие области спектра, также можно изготавливать только путем комбинирования нескольких стекол.

Цветное стекло разделяют на категории по следующим показателям качества: отклонение параметров кривой показателя поглощения K_λ от значений установленных для каждой марки, двойное лучепреломление, свильность, пузырность.

По двойному лучепреломлению установлены 3 категории соответствующие категориям ГОСТ Р 3514-94, а именно:

3 -я категория	$\delta = 10$ нм/см
4-я категория	$\delta = 20$ нм/см
5-я категория	$\delta = 50$ нм/см

По свильности стекло разделено на 4 категории. Из них 1-я и 2-я категории соответствуют категориям бесцветного стекла, у стекла 3-й категории допускаются одиночные и узловые свили. У стекла 4-й категории допускаются свили, оставшиеся после перемешивания по установленному технологическому режиму для стекла данной марки;

По пузырности стекло разделено на 8 категорий соответствующих категориям ГОСТ Р 3514-94, начиная с 1а и до 8 (размер пузырей от 0,05 до 2,0 мм).

Химическую устойчивость цветных стекол, также как и бесцветных, характеризуют устойчивостью по отношению к пятнанию и образованию налетов. По устойчивости к пятнанию стекла разделены на 5 групп: стекла 1-3 групп - устойчивые, 4-й - средней устойчивости, 5-й - неустойчивые. По устойчивости к влажной атмосфере большинство стекол разделено на 3 группы: А - устойчивые (неналетоопасные), П - промежуточные, В - неустойчивые.

Светофильтры из стекол группы А не покрываются налетом в течение 10 лет и более, из стекол группы П - могут покрыться за 5 -6 лет, а из стекол группы В - за несколько месяцев.

Химическую устойчивость некоторых стекол, в виду особенности их состава, определяют только по поведении во влажной атмосфере, в соответствии с которыми они разделены на 2 группы: а - устойчивые, д - неустойчивы. К группе а относятся: СЗС21, СЗС22, СЗС23, СЗС24, СЗС25, БС14. К группе д - УФС1, УФС2, УФС5, СЗС26, ЗС7, ЗС8, ЗС10, ЖС20, ПС11. Детали из стекол группы а можно применять без защиты, а из группы д необходимо защищать, т.к. они могут покрыться налетом и потерять прозрачность весьма быстро.

ТЕМА 5

ОПТИЧЕСКОЕ КВАРЦЕВОЕ СТЕКЛО.

Кварцевое стекло - единственное промышленное стекло, содержащее один компонент - кремнезем. По оптическим свойствам это обычный крон с показателем преломления $n=1,4584$ и коэффициентом дисперсии $\nu = 67,83$. Прозрачно в области $\lambda = 165$ нм - 3,5 мкм. Пропускание при $\lambda = 165$ нм составляет $\tau_{156} = 50 - 60 \%$. Оно не гигроскопично, устойчиво к действию воды и кислот (кроме плавиковой и фосфорной). Растворить в воде его можно при совместном действии высоких давлений и температуры. Кварцевое стекло легированное титаном имеет практически нулевой ($0,4 \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-1}$) КТР.

Получают кварцевое стекло плавлением при высокой температуре (1700 °С) разновидностей природного кварца (кварцевый песок, жильный кварц, горный хрусталь) или кристаллического кварца полученного путем выращивания. В зависимости от вида сырья и способа его плавления кварцевое стекло может быть прозрачным или непрозрачным. Непрозрачное стекло выплавляют из чистых кварцевых песков. Большое число мелких пузырей находящихся в стекломассе и рассеивающих свет, делают его непрозрачным. Сырьем для оптического кварцевого стекла служит горный хрусталь или чистый кремнезем, получаемый синтетическим путем.

Из-за высокой вязкости расплава способы варки, применяемые в производстве многокомпонентных стекол, для кварцевого стекла не пригодны. Его получают разными способами, в частности плавлением кристаллического кремнезема бестигельным способом в высокотемпературном кислородно-водородном пламени, тигельным способом в вакуумкопресссионных печах обогреваемых электрическим током и др.

Для получения стекла газоплазменным способом, очищенное от примесей сырье (горный хрусталь, синтетический кварц), посредством гидротермодара, измельчают до размера 0,15-0,20 мм. Крупку засыпают в бункер, откуда она попадает в факел пламени кислородно-водородной горелки, плавится и попадает на нагретую подложку. Прилипая к ней расплавленные частицы постепенно образуют блок. Такому стеклу присвоена марка КВ (прозрачное в видимой области). Стеклу наплавленному тем же способом, но при избытке водорода и подвергнутому длительной (48-50 часов) тепловой обработке при

1100 °С, присвоена марка КУ (прозрачное в ультрафиолетовой области). Применением сырья без примесей получают стекло, которому присвоена марка КВР (устойчивое к жесткому облучению).

Для получения стекла вакуум-компрессионным способом, сосуд (кварц, молибден) с измельченным кристаллическим кварцем помещают в печь и создают там разряжение 10^{-4} - 10^{-5} мм ртутного столба. После расплавления кварца вакуум снижают. Для уменьшения пузырности стекломассы в печь вводят инертный газ и создают там избыточное давление, сохраняемое и при охлаждении стекла. Толщина наплавленных блоков не более 30 см. Полученное таким способом стекло обладает повышенной прозрачностью в ближней ИК области. Ему присвоена марка КИ. При высоких температурах это стекло становится бурым, а под действием жесткого облучения темнеет.

Разновидностью рассмотренного является вакуум-водородный способ. Отличается он тем, что после плавления кварца в молибденовом сосуде стекло пересыщают водородом, который подается в камеру и создает там избыточное давление. Водород повышает стойкость стекла к излучению. Наплаваемые блоки достигают диаметра 1 м и толщины 40 см.

Шликерный и парофазный способы изготовления кварцевого стекла

Суть шликерного способа заключается в том, что из пудры с размером зерен 0,05-0,03 мм изготавливают суспензию консистенции густой сметаны. Ее разливают в гипсовый сосуд, выдерживают в течение 2-х суток, а затем помещают в печь и сплавляют.

Для получения стекла парофазным способом в качестве исходного сырья используют химическое соединение - тетрахлорид кремния виде жидкости - $\text{SiCl}_4 + 4\text{H}_2\text{O}$. Попадая в зону пламени кислородно-водородной горелки, жидкая фаза испаряется. Образуется аморфный кремнезем и соляная кислота, т.е. $\text{Si}(\text{OH})_4 + 4\text{HCl}$. Конденсированный кремнезем, т.е. $\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ сплавляется в стекло. Такое стекло отличается высокой химической чистотой (примесей в нем менее 0,001%), не люминесцирует и не боится жесткого излучения. Недостаток этого стекла в том, что из-за реакции гидролиза в нем содержится много воды, которая вызывает поглощение при $\lambda = 2,7$ мкм. В УФ области оно прозрачно до $\lambda = 165$ нм. Применяют его в качестве окон силовых лазеров. Природа поглощения света, определяющая границу пропускания кварцевого стекла в УФ области обусловлена возбуждением валентных электронов, участвующих в образовании связей Si-O. С позиций зонной теории возникновение спектров собственного поглощения обусловлено тем, что под действием кванта УФ излучения валентные электроны связи Me-0 покидают валентную зону и переходят в зону проводимости или на энергетические более высокие уровни вблизи зоны проводимости. Спектр собственного (фундаментального) поглощения имеет вид широкой полосы, характеризующейся краем поглощения (или границей пропускания). Край поглощения характеризуется

длиной волны ($\lambda_{гр}$), при которой оптическая плотность на 0,3 выше минимального значения. Край поглощения может быть определен из соотношения:

$$\lambda_{гр} = \frac{h \times c}{E_g}$$

где E_g - ширина запрещенной зоны.

Поскольку h и c являются величинами постоянными, то соотношение может быть упрощено, и если E_g выражена в электроновольтах, то

$$\lambda_{гр} \times E_g = 1237$$

Ширина запрещенной зоны зависит от характера химической связи. Зная, что для кварца и кварцевого стекла ширина запрещенной зоны равна 8,1 эВ, из соотношения приведенного выше, следует, что

$$\lambda_{гр} = 150 \text{ нм.}$$

Это значит, что излучение с большой длиной волны и, следовательно, с меньшей энергией кванта не в состоянии возбудить электрон до величины E_g и стекло будет прозрачно при $\lambda > 150$ нм, в то время как более коротковолновые излучения будут переводить электроны в зону проводимости (стекло непрозрачно при $\lambda < 150$ нм). Получить кварцевое стекло с границей пропускания в области длин волн, более коротких, чем 150 нм, физически не представляется возможным. Практически оказалось возможным получить кварцевое стекло с границей пропускания 165 нм.

В соответствии с ГОСТ 15130-69 выпускалось 5 марок оптического кварцевого стекла, а именно:

КУ-1 - прозрачное в УФ области без полос поглощения при $\lambda = 170-250$ нм, КУ-2 - прозрачное в УФ области с полосой поглощения при $\lambda = 170-250$ нм, КВ - с высоким пропусканием в области $\lambda = 270-2700$ нм, с полосами поглощения при $\lambda = 240$ и $\lambda = 2120$ нм, КВР - устойчивое к воздействию γ -облучения, КИ - прозрачное в ИК области, без полос поглощения при $\lambda = 2120$ нм

В новом стандарте - ГОСТ 15130-78 нашли отражение изменения происшедшие в технологии производства кварцевого стекла и соответственно изменения в его марках. Согласно ГОСТ 15130-78 выпускают:

КУ-1-1 - стекло прозрачное в УФ области без полос поглощения при $\lambda = 170-250$ нм. Это же стекло заменило выпускавшееся ранее стекло марки КВР.

КУ-2 - то же, что и стекло по ГОСТ 15130-69,

КВ - то же, что и стекло по ГОСТ 15130-69,

КИ - то же, что и стекло по ГОСТ 15130-69.

У кварцевого стекла нормируют: спектральный показатель ослабления, радиационно-оптическую устойчивость, оптическую однородность, двойное лучепреломление, свильность, пузырность, включения.

Особенность технологии производства кварцевого стекла газоплазменным способом определяет необходимость нормировать дополнительный, свойственный данному способу, показатель качества, а именно - мелкозернистую неоднородность (рябь). Обнаруживается она при просмотре

стекла в направлении оси направленного блока и является следствием взаимодействия пламени горелки с крупкой кварца. Под действием пламени на поверхности зерен образуется пленка, показатель преломления которой отличается от показателя преломления сердцевин. Наблюдать эту разность показателей преломления можно в виде теневой или дифракционной картины в видимой или УФ областях спектра. От ряби свободно стекло получаемое из тетрахлорида кремния. Из этого стекла возможно получение заготовок линз и призм.

Оптическая неоднородность кварцевого стекла имеет химическую природу. Объясняется это невозможностью получения полного смещения газов H_2 и O_2 из за взрывоопасности гремучей смеси. Поэтому разные участки направляемого блока в неравной степени обогащены H_2 или O_2 . Неоднородность имеет зонный характер, который определяется конструкцией горелки.

Двойное лучепреломление кварцевого стекла имеет незначительную величину из-за малости КТР. Структурное двойное лучепреломление геометрически совпадает с зонами оптической неоднородности стекла, которые обогащены H_2 или O_2 , т.е. SiO_2+H_2 или SiO_2+O_2 . В этих зонах двойное лучепреломление имеет разные знаки. Снимают его путем выдержки стекла при 1100^0 С. При этом показатель преломления по зонам выравнивается.

Свильность кварцевого стекла практически отсутствует при его получении вакуум-компрессионным способом. Другие способы получения стекла создают грубые свили, которые по степени грубости находятся вне категорий.

Пузырность кварцевого стекла отсутствует у марки КУ-1-1. Наиболее пузырно стекло марки КИ.

Светопоглощение кварцевого стекла нормируют у марки КУ для $\lambda = 2,7$ мкм.

ТЕМА 6

ФОТОХРОМНЫЕ СТЕКЛА

Отличительной особенностью фотохромных стекол является их способность к уменьшению светопропускания пропорционально возрастанию интенсивности падающего светового потока.

Определенную часть фотохромных стекол изготавливают на основе галоидного серебра. Представляют они двухфазные системы. В этих стеклах, на первый взгляд прозрачных, электронный микроскоп обнаруживает огромное количество неоднородностей капель размером 50 - 300 нм, разделенных второй стеклофазой. Толщина прослоек составляет примерно 600 нм, в 1 см^3 стекла насчитывается до 10^{15} таких неоднородностей. Микроликвационные явления развиваются в процессе вторичной термической обработки фотохромных стекол, которая является обязательной в технологии их производства. Только после этой обработки стекло и приобретает необходимые свойства. Галоидное

серебро при этом вытесняется в поверхностные слои капелеобразной фазы.

Под действием активирующего излучения происходит разложение микрокристаллов галоидного серебра с образованием серебряной фазы вокруг стеклянного ядра. Частицы металлического серебра и являются красящими центрами. При этом светопропускание стекла снижается. Но галоген (обычно хлор) не может переместиться в стекле на большие расстояния и остается достаточно близко от кристаллика серебра. После прекращения действия световых фотонов галоген рекомбинируется с серебром и прежнее пропускание света стеклом восстанавливается.

Таким образом, физическая основа процесса протекающего в фотохромных стеклах та же, что и в фотоэмульсиях, а именно разложение галоидного серебра под действием света. Принципиальное отличие заключается в том, что в фотохромных стеклах этот процесс обратим, в то время как фотоэмульсию можно засветить только один раз.

Оптические свойства фотохромных стекол характеризуют значениями коэффициента фотохромности - K_{ϕ} и чувствительности - S_{ϕ} .

Коэффициент фотохромности это величина характеризующая уменьшение добавочной оптической плотности за 30" термического обесцвечивания:

$$K_{\phi} = \frac{D_{3a} - D_{(3a)}}{D_{3a} - D_a}$$

здесь D_a - оптическая плотность в видимой области спектра полированной пластинки толщиной 2,5 мм,

D_{3a} - то же для стекла, подвергнутого 30" непрерывному облучению источником света, имитирующим солнечное излучение,

$D_{(3a)}$ - то же для стекла, обесцвеченного в течение 30" после окончания облучения, при температуре 20°C и освещенности не более 10 люкс.

Чувствительность представляет собой величину обратную количеству освещения необходимого для получения добавочной оптической плотности равной 0,2 при заданных условиях освещения:

$$S_{\phi} = \frac{1}{E \times t} \text{ люкс}^{-1} \text{ сек}^{-1}$$

здесь E и t - экспозиция (E - освещенность на поверхности образца, t - длительность) необходимая для достижения добавочной оптической плотности, равной 0,2 т.е.

$$D_t - D_0 = 0,2$$

D_t - оптическая плотность облученной в течение t сек полированной пластинки толщиной 2,5 мм.

Выпускаются пять марок фотохромных стекол: ФХС-2, ФХС-3, ФХС-6, ФХС-7, ФХС-8.

Стекло ФХС-2 предназначено для записи информации и фиксации трехмерных голограмм. Запись на фотохромном стекле является амплитудной,

т.е. за счет изменения коэффициента поглощения стекла, в отличие от фазовой записи электрооптических кристаллов, где фиксация происходит за счет изменения показателя преломления.

Важной характеристикой голограммы является дифракционная эффективность, т.е. отношение интенсивности восстановленного пучка света к интенсивности подсветки при восстановлении изображения. У фазовой голограммы дифракционная эффективность может достигать до 100%. У амплитудной голограммы пределом является 3,5%. На стекле ФХС-2 достигнуто 2%. Преимуществом фотохромных стекол является высокая чувствительность, т.е. короткое время записи. Фактически полученная разрешающая способность составляет 2100 линий на миллиметр.

По сравнению с фотоэмульсиями фотохромные стекла имеют существенное преимущество в том смысле, что не нуждаются в химической обработке. Дело не только в упрощении процесса, но и в отсутствии возможности возникновения деформаций, которые сильно сказываются на качестве восстановленного изображения.

Стекло ФХС-3 предназначено для изготовления линз солнцезащитных очков, которые могут использоваться как на открытой местности, так и внутри помещений.

Стекло создает условия комфортного зрения при изменении освещенности от 5 до 5-10 люкс.

Стекло ФХС-6 предназначено для линз солнцезащитных очков, работающих только на открытой местности. Преимуществом ФХС-6 перед ФХС-3 является то, что в исходном необлученном состоянии оно имеет более высокую прозрачность и отсутствие окрашенности.

Стекло ФХС-7 предназначено для записи информации и регистрации трехмерных голограмм. Дифракционная эффективность амплитудной голограммы составляет 3,5%.

Стекло ФХС-8 предназначено для остекления зданий или транспорта, поэтому в нем фотохромные свойства достигаются за счет галлоидных соединений меди, а не серебра.

Для выбора нужной марки фотохромного стекла можно ориентироваться на значения исходной оптической плотности и плотности после 30" воздействия солнечного света (или облучения на установке ИФС-2).

Марка стекла	Исходная оптическая плотность	Плотность после 30" воздействия света
ФХС-2	0,1	1,0
ФХС-3	0,1	0,5
ФХС-6	0,4	0,5
ФХС-7	0,15	1,3
ФХС-8	0,15	0,4

ТЕМА 7

СТЕКЛА ДЛЯ АКТИВНЫХ ТЕЛ ОКГ

Генерирующими центрами в твердотельных лазерах являются активные атомы, введенные в стеклообразную или кристаллическую среду. Число активных атомов обычно невелико и составляет единицы или доли процента от полного числа атомов в среде. Последняя представляет собой, как бы «раствор» слабой концентрации, подобный идеальному газу и отличающийся от него в основном тем, что положение атомов закреплено в пространстве с точностью до амплитуды тепловых колебаний. В стекле, являющемся аморфным телом, концентрация легирующих элементов выше, чем в кристаллах. Объясняется это тем, что в последних активатор всегда замещает один из ионов решетки. Это и ограничивает процент легирования.

Индукцированное излучение получено на силикатной, фосфатной и других стеклообразных матрицах с примесью различных 3-х валентных редкоземельных ионов (Ce^{3+} , Pr^{3+} , Sm^{3+} , Eu^{3+} , Gd^{3+} , Tb^{3+} и др.). Практическое значение из них имеют пока лишь стекла активированные Nd^{3+} . Объясняется это следующими причинами:

1. Стекла активированное Nd^{3+} , имеет узкие полосы люминесценции, причем на полосу 1,06 мкм, полуширина которой колеблется от 240 до 480 Å, приходится до 80% всей люминесценции. Время жизни метастабильного уровня достаточно велики и в зависимости от основы стекла находится в пределах от 50 до 1000 мксек.

2. Спектр поглощения стекла имеет много полос поглощения в видимой и близкой ИК областях, что облегчает оптическую накачку. Даже при небольшой концентрации Nd^{3+} силы осциллятора полос поглощения вполне достаточно для того, чтобы обеспечить инверсию населенности на единицу интервала частоты, необходимую для работы ОКГ. Для других редкоземельных ионов силы осциллятора полос поглощения значительно меньше чем для неодима.

3. Стекло может работать в широком диапазоне температур вплоть до 500 К.

4. Спектр поглощения стекла при комнатной температуре имеет ряд ярко выраженных достаточно узких полос поглощения в области от УФ до ближней ИК. Облучение стекла в области полос поглощения приводит к люминесценции, большая часть которой приходится на ближнюю ИК область. Спектр люминесценции состоит из 4-х полос в области длин волн - 0,88, 1,06, 1,33 и 1,9 мкм. Наиболее интенсивной является полоса 1,06 мкм. Интенсивность полосы 1,9 мкм на два порядка меньше. Благоприятная энергетическая схема неодима и высокая однородность стекла обеспечивает высокий энергетический выход. Поэтому активные тела из стекла активированного неодимом обычно применяют в импульсных системах для получения больших пиковых мощностей.

Специфика работы лазерных стекол требует одновременного выполнения ряда условий, которые должны быть реализованы в материале активного тела. Это оптическая однородность, высокая эффективность преобразования световой энергии лампы накачки, малые искажения волнового фронта при градиенте температуры по сечению активного тела, сохранение оптических свойств (фотохимическая стойкость) при больших дозах УФ облучения лампой накачки, высокая прозрачность на длине волны генерации, высокая лучевая прочность, высокая устойчивость и др.

Оптическая неоднородность стекла приводит к самофокусировке потока излучения. Сконцентрированная в нем энергия может оказаться достаточной для развития процесса ионизации, что повлечет за собою разрушение активного тела. В сечении активного тела оптическая неоднородность допустима до $\Delta n = 10^{-6}$.

В мощных импульсных лазерах наблюдается разрушение активных тел под действием собственного излучения. Одной из причин этого является также эффект самофокусировке потока излучения. Дело в том, что воздействие мощного короткого импульса вызывает электрострикцию, т.е. сжатие вещества в местах наибольшей напряженности поля. Показатель преломления здесь увеличивается. Нарушение оптической однородности приводит к сжатию - самофокусировке потока, сжатый поток с большей плотностью энергии в нем вновь увеличивает показатель преломления и т.д., пока не получится луч диаметром 6-8 мкм. Плотность энергии в нем достигает 10^{12} Вт/см², который оказывается достаточно для разрушения стекла. Объемная прочность стекла, состав которого соответствует стеклу марки К8 составляет примерно 200 Дж/см². Остальные стекла имеют меньшую прочность. В действительности крупные детали из оптического стекла разрушаются при меньших нагрузках, чем это следует при расчете. Изучение лазерных стекол показало наличие в них дефектов типа включений. Характерны 3 типа:

- включения типа камней и свилей керамического происхождения. В обычном стекле они в силу малости размера значения не имеют.

- включения металлической платины. Образуются они при варке стекла в платиновом сосуде. В процессе варки платина растворяется. Металлические частицы - включения имеют размер от 1 до 20 мкм.

- включения в виде сферических шариков металлов, имеющие черный цвет. Образуются в процессе варки из окислов шихтных материалов восстановившихся до металла (сурьма, мышьяк). В обычном стекле все дефекты, в том числе и включения, учитывают, начиная с размера 0,03 мм. Поэтому раньше на все перечисленные дефекты - включения, в стеклах для ОКГ внимания не обращали, а они опасны.

Опасность заключается в том, что когда через стекло проходит мощный импульс и на его пути встречается непрозрачное включение, то часть пучка, приходящаяся на поперечное сечение включения, им поглощается. Включение прогревается, а поскольку его размер мал, то оно полностью превращается в газ. Включение сечением 0,1 мм испаряется за 9 - 10 секунд. Давление газа от

испарившегося включения размером 0,01 мм достаточно для того, чтобы разрушить заготовку диаметром 0,5 метра. Учитывая этот эффект детали оптического тракта ОКГ изготавливают из кварцевого стекла получаемого из газовой фазы. Явление разрушения стекла усугубляется тем, что его поверхностная прочность меньше прочности в объеме. Если принять, что объемная прочность стекла марки К8 составляет 200 дж/см², то прочность поверхности не превышает 20 дж/см². Поверхностный слой подвергнутого механической обработке ослаблен за счет наличия трещиноватого слоя.

При воздействии мощного светового импульса на поверхности стекла протекает явление фотоэффекта: электроны, выбитые с поверхности лазерным лучом, нагреваются излучением и вблизи поверхности стекла образуется плазменный слой. Этот слой поглощает лазерное излучение и его воздействие на стекло, однако факел плазмы не предохраняет стекло, а разрушает как своей температурой, так и давлением.

Развитие мощных лазеров поставило еще одну задачу. Нагрев стекла настолько велик, что работающий активный элемент превращается в дефокусирующую линзу и угловая расходимость луча увеличивается. Для уменьшения этого эффекта необходимы определенные термооптические свойства стекла, для неодимовых стекол введены две новые термооптические постоянные,

$$P = \beta - \frac{\alpha \times E}{2(1 - \mu)} \times C_1 + 3C_2 /$$

$$Q = \frac{\alpha \times E}{2(1 - \mu)} \times C_1 - C_2 /$$

где Р - среднее для двух поляризаций изменение показателя преломления стекла.

Q - двойное лучепреломление, обусловленное термическими эффектами.

Оптические искажения, возникающие в процессе накачки, пропорциональны разности этих постоянных. Идеальным является случай когда Р = 0 и Q = 0. Но достичь такого состояния практически нельзя, т.к. элемент нагревается по-разному на разных стадиях его работы.

Неактивное поглощение стекла на длине волны генерации снижает КПД резонатора. Стекла активированные неодимом работают на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм. На этой волне поглощают: Fe²⁺, Си²⁺. Наибольшим поглощением обладают Fe и Си. Особенно вредно Fe²⁺, которое сильно поглощает красную область Fe³⁺-поглощающее синюю область, лазерное стекло считают хорошим, если коэффициент поглощения K_λ на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм менее 1 10⁻³ см⁻¹ концентрация примесей дающих такое поглощение не должна превышать Fe²⁺ - 3 10⁻⁵ и Си²⁺ - 1 10⁻⁴. Практически варят стекло с содержанием железа 1-2-10⁻⁵.

Каждое из рассмотренных выше требований достаточно трудно реализуется для оптического стекла. Тем не менее, развитие технологии стекловарения и спектрально-люминесцентных исследований позволили создать к настоящему времени гамму промышленных стекол в количестве 12

марок, которые обеспечивают решение многих задач, поставленных перед данным направлением приборостроения. В отечественных лазерных стеклах достигнут комплекс высоких показателей качества, в частности: отсутствие свилей в заготовках размером 1200x280x70 мм, малая пузырность - до 3 пузырей в 1 кг стекла, малое неактивное поглощение - менее $2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$, высокий квантовый выход люминесценции, сохранение КПД генерации после 10^5 - 10^6 вспышек лампы накачки, отсутствие механических включений и т.п.

Основным официальным документом на неодимовые стекла пока является отраслевой стандарт ОСТ 3-30-70 (готовится ОСТ 3-30-77). «Стекло оптическое люминесцирующее активированное неодимом. Марки. Основные параметры. Технические требования». В ОСТ неодимовые стекла обозначают ГЛС (генерирующее люминесцентное стекло) вместо ранее применявшихся наименований Л ГС и КГСС. ОСТ предусматривает поставку стекла в виде заготовок имеющих форму стержней прямоугольного или круглого сечения, в виде прямоугольных пластин.

Лазерные стекла выпускают на силикатной и фосфатной основах с разными концентрациями активатора. Все марки стекла от ГЛС-1 до ГЛС-14 включительно имеют силикатную основу, а марки от ГЛС-21 до ГЛС-24 - фосфатную. Модуль Юнга и соответственно термостойкость силикатных стекол выше, чем фосфатных. Отличаются они и большей длительностью люминесценции, что является положительным свойством. КТР силикатных стекол из-за сравнительно высокого содержания щелочных окислов лежит в пределах 10 - $120 \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-1}$. У фосфатных стекол он равен $106 \cdot 10^{-7} \text{ град}^{-1}$.

Фосфатные стекла позволяют получить угловую расходимость луча на уровне 2-3 минут, в то время как на силикатных стеклах она достигает 20 минут. Фосфатное стекло ГЛС-21 и его аналоги являются атермальными, обладая в несколько раз меньшими термооптическими постоянными, чем атермальные силикатные.

Примечание: атермальными являются стекла с нулевой и отрицательной термоволновой постоянной W , которая характеризуют изменение длины хода света в стекле при изменении температуры на 1 градус.

Ряд марок имеет дополнительное обозначение - П, указывающее на варку стекла в платиновом сосуде для уменьшения пузырности. Такими, в частности, являются стекла ГЛС-1П, ГЛС-4П. Следует иметь в виду, что стекло этих марок может содержать включения кристаллической платины.

Неодимовое стекло делится на категории и классы по трем показателям качества:

- по показателю неактивного поглощения стекла на длине волны генерации $\lambda_g=1,06 \text{ мкм}$, установлены 3 категории:

- первая категория $K_\lambda=0,002 \text{ см}$
 - вторая категория $K_\lambda=0,004 \text{ см}$
 - третья категория $K_\lambda=0,006 \text{ см}$

- по размеру наибольшего пузыря в заготовке (от 0,2 до 1,0 мм) установлены три категории

- по числу пузырей в 1 кг предусмотрены 3 класса - А, Б и В. В классе А

допускается 10 пузырей, в классе Б - 20 пузырей и в классе В - 100 пузырей. По содержанию твердых неметаллических включений, которые относятся к пузырям, установлены 2 категории. В первой включения не допускаются, во второй они могут быть в количестве не более 10 штук.

Двойное лучепреломление в заготовках контролируют в направлении их большего размера. Величина двойного лучепреломления не должна превышать 3-6 нм/см.

Развитие разработок лазерных стекол ведется в направлении уменьшения температурных зависимостей термооптических свойств, снижения ОКН, повышения лучевой прочности и химической устойчивости. Для всех видов лазерных стекол большие перспективы лежат в области повышения термооптической прочности активных элементов за счет различного вида обработок стержней (закалка, ионный обмен, защитные покрытия). Термообработка стержней позволяет также наводить в них анизотропию, компенсирующую те неоднородности, которые возникают в процессе работы элементов.

Некоторые физико-химические свойства ГЛС

Свойства стекла	ГЛС-1 ГЛС -1-П	ГЛС-2	ГЛС-3	ГЛС-4 ГЛС-4-П
Показатель преломления для $\lambda = 1,06$ мкм	1,521	1,518	1,518	1,515
КТР в диапазоне 20-120°C-10 ⁻⁷ град ⁻¹	94	119	121	103

ТЕМА 8

СТЕКЛА ПРОЗРАЧНЫЕ В ИК ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Все обычные оптические стекла - силикатные, боратные, фосфатные, боросиликатные, главными компонентами которых являются различные соединения с кислородом (SiO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 и др.) прозрачны в ИК области до $\lambda = 2,6 - 2,7$ мкм. Прозрачность цветных стекол типа ИКС достигает области $\lambda = 3,0 - 3,5$ мкм. В более далекой ИК области прозрачны бескислородные стекла. Стеклообразующие в них являются: сульфид сурьмы (Sb_2S_3), селениды (As_2Se_3 и Sb_2Se_3 , теллуриды (As_2Te_3) и другие соединения.

Основой промышленных бескислородных стекол являются соединения:

As - Ge - Se	As - Se - Tl	Pb - As - Ge - Se
Sb - Ge - Se	Sn - Sb - Ge - Se	Sn - Pb - As - Ge - Se
Sn - As - Se	Sn - As - Ge - Se	As - Ge - Se - Te

Стеклообразный Se имеет границу пропускания в ИК области $\lambda = 20,5$ мкм, но у него низка температура плавления (217°C). Для повышения термостойкости состав бескислородных стекол усложняют введением других компонентов, что приводит к снижению границы пропускания до $\lambda = 15,0 - 17,0$ мкм.

Граница пропускания некоторых кристаллов простирается значительно дальше, в частности TlJ - TlBr прозрачен до $\lambda = 60$ мкм. В ИК области прозрачны также LiF, KCl, CaF₂, CsJ, KBr и др. Но кристаллы имеют ряд отрицательных качеств, ограничивающих их применение. К числу таких качеств относятся, например, анизотропия механических свойств.

Бескислородные стекла лишены основных недостатков кристаллов, хотя и уступают им по пропусканию в ИК области. Они химически устойчивы. Не меняют оптических свойств при жестком облучении до дозы 10^7 рентген.

По величине показателя преломления и коэффициента дисперсии бескислородные стекла разделены на 3 группы:

I. стеклообразователи на основе: Ge - Se; Ge - Se - S

$n = 2,35 - 2,5$

$\nu = 210 - 180$

II стеклообразователи на основе: As - Se; As - Ge - Se

$n = 2,6 - 2,9$

$\nu = 170 - 120$

III стеклообразователи на основе: Te - Tl; Te - Pb

$n = 3,0 - 3,5$

$\nu = 100 - 120$

Выпускают стекла нескольких марок, рабочая граница пропускания которых составляет:

ИКС 23	1,0- 9,0 мкм	ИКС 29	1,0-15,5 мкм
ИКС 24	1,0-11,0 мкм	ИКС 30	1,0-11,5 мкм
ИКС 25	1,5-17,0 мкм	ИКС 31	1,2-12,0 мкм
ИКС 27	2,0-16,0 мкм	ИКС 32	2,0 - 12,0 мкм
ИКС 28	1,2-12,5 мкм	ИКС 33	7,2-16,5 мкм

На границе ИК области пропускание составляет 50 % от пропускания в максимуме.

Бескислородные стекла имеют отрицательный коэффициент оптического напряжения (В), в частности:

ИКС 23	В = -10	ИКС 28	В = -26,5
ИКС 24	В = -3,2	ИКС 29	В = -22,0
ИКС 25	В = -31	ИКС 30	В = -5,4

У бескислородных стекол нормируют: показатель преломления, коэффициент дисперсии, свильность, пузырность, двойное лучепреломление.

Показатель нормируют для $\lambda = 2,0$ мкм, а не как у обычных стекол ($\lambda = 546,07$ нм). Допуск на n составляет $\pm 2 \cdot 10^{-4}$. Коэффициент дисперсии ν рассчитывают для длин волн:

$$\nu = \frac{n_{2.0} - 1}{n_{1.8} - n_{2.2}}$$

Отклонение коэффициента дисперсии ν допускают до $\pm 50 \cdot 10^{-5}$.

Величина двойного лучепреломления составляет $\delta = 20 - 200$ нм/см (у обычных стекол минимальная величина двойного лучепреломления $\delta = 2$ нм/см).

По пузырьности бескислородные стекла отклоняются к 5 - 8 категориям (диаметр пузыря от 0,5 до 2,0 мм), ГОСТ Р 3514-94.

Сульфиды и селениты на воздухе легко воспламеняются, выделяются ядовитые вещества, образуются водородные соединения серы, селена и мышьяка. Поэтому варку бескислородных стекол производят в герметичных сосудах. Основными этапами процесса являются: очистка сырьевых материалов и приготовление шихты, вакуумирование и варка, моллирование заготовок и их отжиг. Исходную шихту, весом 8-10 кг засыпают в толстостенную ампулу из прозрачного кварцевого стекла с узким горлом позволяющих соединить ее с вакуумной системой. Воздух из ампулы откачивают до разряжения порядка 10^{-5} мм. ртутного столба. и запаивают ее. Размер ампулы для шихты указанного веса - диаметр порядка 170 мм и длина 300-350 мм. Ампулу устанавливают в металлический кожух (во избежание ее разрыва, который возможен из-за выделения паров серы) и помещают в трубчатую электрическую печь. После расплавления вещества печь покачивают вокруг горизонтальной оси. Расплав в ампулу переливается и перемешивается без применения мешалки. Максимальная температура варки – 900 °С.

Слиток сваренного стекла представляет собой черную массу с металлическим блеском. Предельный вес слитка достигает 15 кг. Слиток распиливают на пластины, а затем моллируют. Температура размягчения стекла ИКС достигает 440 °С.

Заготовки бескислородных стекол поставляют в виде дисков или квадратных пластин диаметром или стороной от 25 до 250 мм и толщиной от 5 до 25 мм (ИКС 27 толщиной от 3 до 10 мм).

Для снятия остаточных напряжений заготовки отжигают. Их выдерживают в печи при температуре соответствующей вязкости $\eta = 10^{11,5}$ Па. Скорость охлаждения порядка 5 град/час. КТР стекол ИКС составляет $110 \cdot 10^{-7}$ град.

ТЕМА 9

СТЕКЛА СВЕТОРАСSEИВАЮЩИЕ

Тип	Марка	Показатель преломления	Плотность, г/см ³	Температура, °С		Группы химической устойчивости действию пятнающих агентов
				отжига	спекания	
I	MC20 ОНС1	1,52	2,80	520	600	I
		1,50	2,61	580	680	
	ОНС2	1,50	2,61	540	640	
	ОНС3	1,50	2,61	540	640	
	ОНС4	1,50	2,61	580	680	
II	MC12	1,49	2,45	545	630	I
	MC13	1,51	2,54	520	620	
	MC23	1,52	2,63	520	620	
III	MC16	1,472	2,30	410	500	III
	MC17					
	MC18					
	MC19					

Стекла светорассеивающие (молочные) применяют для изготовления деталей, диффузно рассеивающих проходящий или отраженный свет, их обозначают МС. Они приобретают рассеивающие свойства благодаря введению в состав соединений фтора в виде креолина, кремнефтористого натрия и других соединений, обеспечивающих мелкодисперсную кристаллизацию «глушение» света.

Заготовки светорассеивающих стекол поставляются в виде прессовок с наибольшей стороной до 150 мм; заготовок отлитых в форму по чертежам заказчика, плиток, полученных путем холодной обработки кускового горшкового стекла.

В таблице приведены некоторые физико-химические свойства светорассеивающих стекол. Химическая устойчивость светорассеивающих стекол к влажной атмосфере соответствует группе

Требования к бесшвильности стекол МС - низкие. Число пузырей и камней в стеклах МС12 - МС14 и МС19 не нормируются. В стеклах МС16 - МС18 допускается 100 пузырей на 1 кг стекла, особым требованием к стеклам МС12 - МС14 и МС19 является равномерность их глушения. Равномерность глушения оценивается визуально при просмотре образцов стекла в проходящем свете, а для стекла МС-14 в отраженном свете.

У стекол МС12 и МС13 контролируются также отсутствие прямого

светопропускания путем просмотра нити лампы мощностью 60 Вт через пластинку стекла, помещенного у глаза наблюдателя на расстоянии 1 м от лампы. Нить лампы не должна быть видна.

Увиолевые стекла не содержат окислов железа, свинца, платины и хорошо пропускают ультрафиолетовое излучение, которое поглощают окислы свинца, титана и сурьмы. Стекла УТ49 и УТ88 предназначены для изготовления деталей и изделий с высоким пропусканием в ультрафиолетовой части спектра. Цифры 49 и 88 обозначают значение коэффициента термического расширения стекла. По химическому составу стекла являются щелочными алюмоборосиликатными стеклами.

ТЕМА 10

ОПТИЧЕСКИЕ СИТАЛЛЫ

Немногим более 20 лет тому назад было обращено внимание на то обстоятельство, что кристаллизацией стекла можно управлять. Она может быть направлена не только в сторону уменьшения, но и по пути создания в стекле огромного количества очень мелких кристаллов. Для этой цели используют стеклообразующие системы, которые при термообработке склонны к микрорасслаиванию и кристаллизации хотя бы одной из микрофаз.

Различают два вида кристаллизации стекла: неравномерную, происходящую только на поверхности, либо в отдельных случайных точках объема, и равномерную происходящую одновременно во всем объеме при наличии большого числа (10^{12} и более в 1 см^3) предзародышевых центров.

Равномерная кристаллизация ведет к постепенному перерождению стекла в поликристаллическое тело. Такие тела резко отличаются по свойствам и структуре от исходного стекла. Подобные материалы, получившие название «ситалл» (первая буква взята от слова «стекло», остальные от слова «кристалл»), были получены в СССР в 1958 году. Ситаллы получили большое практическое применение. Они в несколько раз прочнее стекла и имеют высокую устойчивость к температурным перепадам.

Ситалл представляет собою материал, в объеме которого равномерно распределены, сросшиеся друг с другом или соединенные прослойками стекла, кристаллические частицы, отличающиеся высокой дисперсностью и однородностью размера. Если величина кристаллов меньше длины волны света, материал остается прозрачным. Технологический процесс производства оптических ситаллов построен так, чтобы размер выросших кристаллов не превышал 0,4 мкм, т.е. был меньше длины волны видимой области спектра. Если показатели преломления кристаллов и остаточной стеклофазы будут близки между собою, то потери света за счет его рассеяния останутся в допустимых пределах. Количество кристаллической фазы в прозрачных ситаллах составляет 50 – 60 %.

Кристаллы возникают и растут по всему объему стекла в результате его

термической обработки. Осуществляют ее в несколько этапов, при этом и происходит последовательная кристаллизация стекла. Первый этап - выдержка исходного стекла в течение нескольких часов при температуре начала развития метастабильной ликвации или кристаллизации примесной фазы с выпадением ее в виде частиц размером около 100 Å.

Примечание: под названием «ликвация», «жидкостная не смешиваемость», «расслаивание», подразумевается процесс распада расплава из размягченного стекла на две или более жидкие фазы, т.е. на отдельные части разобщенные физическими поверхностями раздела. Ликвация, происходящая в высоковязком стекле, называется метастабильной, т.е. система, ликвидировавшаяся на две стеклообразные фазы является метастабильной по отношению к кристаллическому состоянию. Вследствие сравнительной малости размеров выделяющихся в стекле каплевидных областей (обычно 50 - 1000 Å) иногда применяют термин «микроликвация» или «выделение микрофаз».

Выпавшая стеклообразная или примесная кристаллическая фаза создает поверхность раздела между фазами, что облегчает равномерное по объему стекла зарождение одной из основных кристаллических фаз, выпадающих из стекла при понижении температуры. При дальнейшем снижении температуры продолжается кристаллизация первой основной фазы и выпадение следующих кристаллических фаз. Переход от прозрачных к полупрозрачным и непрозрачным ситаллам связан с развитием данного процесса - ростом кристаллических частиц, перестройкой всей структуры. Процесс перехода сопровождается резким изменением свойств материала - плотности, показателя преломления, КТР, температуры размягчения, вязкости, механических свойств и др.

Свойства ситаллов складываются из свойств кристаллического каркаса, образовавшегося в процессе термической обработки исходных стекол, и из свойств остаточной стекловидной фазы.

Прозрачные ситаллы, как сказано выше, получают в системах, которые способны к микроликвации. Зародышами кристаллизации в таких системах являются капельки ликвидировавшего вещества. Прозрачные ситаллы получены в системах:

$\text{Li}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$; $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$; $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$.

Все они содержат стимуляторы кристаллизации: TiO_2 , ZnO_2 , F и др.

Для получения оптических ситаллов оказалась удобной система **$\text{LiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$** с добавками двуокиси титана TiO_2 , который играет роль катализатора ситаллизации.

Основной маркой оптического ситалла является литиевый алюмосиликатный ситалл СО-115М. Он термостоек, имеет малый или близкий к нулю КТР. Область применения - изделия, в котором не допускаются изменения формы поверхности с изменением температуры, и изделия не предназначенные для работы в проходящем свете, например астрозеркала, основания гироскопов и др.

Ситалл СО-156. КТР близок к нулю. Обладает повышенной прозрачностью

в видимой области. КТР резко меняется с повышением температуры, что снижает термостойкость. Содержит значительное количество пузырей. Используют для изготовления пробных стекол и других средств измерительной техники.

Ситалл СО-21. Обладает отрицательным КТР в диапазоне температур 0 °-350 °С, что обеспечивает высокую термостойкость. Применяют для термостойкого остекления.

Ситалл СО-33М. Получен на фосфатной основе. КТР практически равен нулю. Отличается более низкой, по сравнению с другими, температурой плавления, что облегчает гомогенизацию расплава и позволяет уменьшить свильность.

Различие свойств стеклообразной и кристаллической фаз, из которых последняя является анизотропной, приводит к возникновению в ситаллах неустраняемых напряжений. При контроле в поляризованном свете они наблюдаются в виде мелкоячеистой сетки.

Ситаллы обладают высокой химической устойчивостью по отношению к воздействию воды, щелочей, кислот (кроме плавиковой).

Сииталлы на силикатной основе содержат до 70 % SiO_2 , поэтому для гомогенизации расплава необходимы температуры порядка 1550 °-1650 °С. Огнеупоров выдерживающих температуру 1650 °С нет. Ее можно повышать лишь до 1550 °С, но при ней вязкость расплава велика и в нем остаются свили. Это обстоятельство в сочетании с необходимостью выработки крупногабаритных заготовок определило промышленную технологию производства ситаллов. Варят их в основном в ваннах плавки. После варки расплав разливают в формы. Имеющиеся неоднородности ориентируются по направлению растекания стекломассы. Поэтому в закристаллизованной заготовке упругость материала вдоль и поперек потоков свилей оказывается неодинаковой. Это определяет разную скорость его сошлифовывания и споллировки и, в конечном итоге, астигматизм поверхности изделия.

ТЕМА 11

ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В качестве материала для изготовления оптических деталей используют некоторые термопластичные полимеры, в частности:

- полиметилметакрилат марок ЛСО-М и ЛСО-М-4Б (ГОСТ 15809-70), полистирол блочный марки Д (ГОСТ 20282-86),
- смола поликарбонатная Дифлон (ТУ 6-05-1668-74).

Показатель преломления полиметилметакрилата марок ЛСО-М, ЛСО-М-4Б и практически одинаков и равен - 1,49. Показатель преломления полистирола марки Д - 1,59; поликарбонатной смолы Дифлон - 1,58.

Близость показателя преломления полимеров между собою ограничивает их применение в сложных оптических системах, из-за отсутствия возможности

исправления хроматических aberrаций.

Недостаточно стабильна и величина показателя преломления, которая зависит от чистоты мономеров, точности соотношения компонентов, условий полимеризации. Так как полностью мономер полимеризовать не удастся, то при комнатной температуре происходит его диффузия из глубинных слоев в поверхностные и показатель преломления органического стекла все время меняется. В поверхностных слоях его величина больше.

Оптическая однородность полимеров не высока. В частности, у полиметилметакрилата отношение $\varphi/\varphi_0 = 3 - 5$, в то время как у стекла $\varphi/\varphi_0 = 1,0 - 1,5$. Показатель ослабления полимеров меньше чем у стекла высшей категории. По свильности детали отлитые из полиметилметакрилата соответствуют 2-й категории ГОСТ Р 3514-94, что позволяет использовать их для образования изображения.

Физико-химические свойства полимеров затрудняют их использование для изготовления точных деталей. В частности, остаточные напряжения в материале составляют от 20 до 200 нм/см. Полимеры отличаются значительной усадкой при переходе из одного агрегатного состояния в другое. В частности, у полиметилметакрилата марки ЛСО-М она составляет 0,6 - 0,8 %, у блочного полистирола марки Д от 0,4 до 0,6 % и поликарбонатной смолы Дифлон от 0,5 до 0,7 %. Усадка вызывает изменение формы оптических поверхностей. Отклонения достигают $N > 20$. Величина усадки зависит от конструкции детали и режима литья (скорость впрыска, температура формы, давление). У полимеров значительно ниже, чем у стекла (примерно в 25 раз) устойчивость к царапанью и истиранию. Малая теплостойкость полимеров не позволяет использовать изготовленные из них детали в устройствах, где может быть высокая температуры. Значительный коэффициент термического расширения, даже при малом температурном градиенте, вызывает деформацию деталей с большой разнотолщиной. Малая теплопроводность полимеров вызывает деформацию деталей при резких изменениях температуры.

К числу положительных качеств полимеров относится их небольшая плотность (1,0 - 1,2 г/см³), и большая по сравнению со стеклом ударная вязкость. Основное преимущество полимеров - высокая производительность процессов изготовления деталей. Наиболее распространенным является способ литья под давлением.

Общие ТУ на детали, изготавливаемые литьем под давлением из термопластичных материалов общего применения, предназначенные для использования в видимой и близкой ИК областях спектра, установлены ОСТом 3-944-72.

В зависимости от назначения деталей ОСТ предусматривает их следующие типы:

В - растры, линзы Френеля и др. детали расположенные в плоскости изображения или вблизи нее,

Г - визиры фотоаппаратов, призмы с элементами крепления, лупы с оправой, линзы с посадочными базами не нуждающиеся в центрировании и др.

детали приборов широкого потребления,

Д - конденсоры, линзы диапроекторов и др. детали осветительных систем,

Е - защитные стекла, матовые экраны.

Детали, изготовленные литьем под давлением, не требуют дополнительной обработки поверхностей. Полимеры используют и для изготовления световодов, волоконных деталей. Их преимущество перед стеклом - высокое светопропускание, малый вес, гибкость, способность противостоять жесткому излучению.

Особенности свойств полимеров определяют специфические требования к конструкции деталей и их использованию в приборах, в частности: учитывая малую поверхностную твердость материалов, детали устанавливают либо за защитным стеклом, либо в гнездах исключая вероятность повреждения. Следует также учитывать, что детали накапливают на поверхностях статистическое электричество, а следовательно, притягивают пыль.

Качество деталей зависит не только от их конструктивных особенностей, конструкции пресс-формы и точности ее изготовления, но также и от правильности выбора и соблюдения технологических параметров процесса литья, в частности: от давления - P кгс/см² и температуры в материальном цилиндре, от температуры - S_f литьевой формы и от скорости - V мм/сек впрыска массы. Высокое качество деталей характеризуемое разрешающей способностью (n -линий на мм) получают при изменении давления в широких пределах. Оптимальная температура формы - в диапазоне $S_f=60-80$ С. При малой скорости впрыска первые струи вязко-текучего мономера отвердевают, в материале возникают значительные внутренние напряжения. С увеличением скорости, форма заполняется более равномерно.

Детали характеризуют несколькими показателями качества: величиной включений, чистотой поверхности.

По величине включений предусмотрены 4 группы: 0,1, 2, 3, характеризующиеся диаметром и числом включений на определенном участке в пределах светового диаметра в рабочем направлении детали.

По чистоте поверхности детали разделяются на 4 класса, аналогичные IV-VII классам чистоты по ГОСТ 1141-76, а именно:

Тип детали	Класс чистоты	Группа по включениям
ГОСТ 1141-76		
В	IV	1
Г	IV-VII	1 - 2
Д	V-VII	2 - 3
Е	VI-VII	2 - 3

Средняя дисперсия ПММА колеблется уже в четвертом знаке и поэтому нормирование в настоящее время не представляется возможным.

Двойное лучепреломление в оптических полимерных деталях является следствием напряжений, возникающих в процессе их изготовления, и в различных по конструкции деталях соответствует 50 - 150 нм/см, что

превышает значения 5 категории по ГОСТ 23136-78.

Свилы в литых полимерных деталях образуются на линии стыка потоков материала при заполнении расплавов пресс-формы. Величина и характер свилей зависит от конфигурации детали, а также от формы и расположения впускных каналов литниковой системы. При литье под давлением обычно встречаются нитевидные свилы диаметром в десятые доли миллиметра, а также пучкообразные, состоящие из нескольких нитей.

Ошибка рабочих поверхностей литых оптических деталей из ПММА достигает $N = 20$ и больше полос, поэтому их измерение с помощью интерферометров практически не возможно. Определить отклонение оптической поверхности полимерной детали с помощью контактных методов не удастся из-за низкого модуля упругости полимеров. Поэтому в графе требований к точности формы может быть прочерк, а точность формы поверхности задают допустимой величиной отклонений от заданного фокусного расстояния или по величине.

Пузыри в литых полимерных деталях обусловлены присутствием влаги в исходном материале (грануляте). В толстостенных деталях встречаются скопления мельчайших пузырей в несколько тысячных долей миллиметра. Пузырность в полимерных деталях укладывается в категории и классы ГОСТ 23136-78. В процессе изготовления деталей в них попадает пылинки и темные включения, находящиеся в производственном помещении, которые рассеивают свет аналогично пузырям. Поэтому любые посторонние включения в оптических полимерных деталях приравниваются к пузырям.

Чистота рабочих поверхностей полимерных деталей находится в пределах IV-V классов по ГОСТ 23136-78. На поверхности детали появляются следующие характерные дефекты: тонкие трещины, пятна, полосы и царапины. Причиной поверхностных дефектов является, с одной стороны, действие высоких внутренних напряжений, способствующих образованию микротрещин, а с другой - дефекты поверхностей пресс-формы. Царапины могут появиться при механической доработке деталей (отделение литника).

Центрировка полимерных линз зависит от точности изготовления формирующего инструмента. Значения центрировки полимерных линз лежат в пределах 0,05 - 0,1 мм.

Применение полимерных материалов для изготовления оптических деталей

В таблице 1 - оптические характеристики полимеров, применяемых в оптике в качестве оптических сред.

Таблица 1

Материал	Показатель преломления			Коэффициент дисперсии ν	Светопропускание в видимой области, %
	n_e	n_c	n_f		
Полиметилметакрилат	1,491	1,488	1,496	57,8	89 - 92
Полистирол	1,590	1,585	1,604	30,8	85 - 90
Поликарбонат	1,586	1,581	1,598	30,3	86
Сополимер стирола с метилметакрилатом	1,579	1,574	1,592	32,2	90
Сополимер стирола с акрилонитрилом	1,567	1,563	1,578	36,0	88
Полиэтиленгликольбисаллилкарбонат	1,504	1,501	1,510	54,3	82 - 92
Полидиаллилтерефталат	1,571	—	—	29,9	—

В таблице 2 приведены физико-механические и эксплуатационные свойства оптических полимерных материалов и для сравнения - оптического силикатного стекла К8. По некоторым механическим характеристикам (разрушающее напряжение, твердость) полимерные оптические материалы уступают силикатным. Преимуществами полимеров являются низкая плотность (в 2-3 раза меньше, чем у силикатных стекол) и высокая ударная вязкость.

Физико-механические и эксплуатационные свойства оптических полимерных материалов

Таблица 2

Свойства	ПММА	ПС	САН	МСО-20	ПК	К8
Плотность, г/см ³	1,18 - 1,19	1,05 - 1,10	1,04 - 1,27	1Д4	1,20	2,2-5,3
Разрушающее напряжение σ , Па при растяжении при сжатии	70-80 100-200	40-50 80-110	60-70 105-110	50-60 110-120	55-65 75-85	70-90 800-2000
Модуль упругости G, Па	290	280	260		200	650

Ударная вязкость, кДж/м	13-18	16	20	16	20	0,5-1,5
Твердость по шкале Маоса	2-3	2	2-3	2-3	2-3	5-7
температурный коэффициент линейного расширения 10^6 , $^{\circ}\text{C}^{-1}$	63-77	63-90	70-95		60-70	8-11
Теплопроводность, Вт/см град	0,16- 0,18	0,08- 0,12			0,17	0,58-1,05
Теплостойкость, $^{\circ}\text{C}$ по Мартенсу	87-92	70-80	80-90	75-80	115-127	—
по Вику	—	95-100	105-115	105	164-166	—
Показатель текучести расплава, г/10 мин.	3-4,6	2-8	1,3-2	1-3,J	2,35	
Усадка при литье, %	0,4-0,6	0,9-1	0,9-1	0,9-1	0,7-0,8	—
Максимальная температура эксплуатации деталей, $^{\circ}\text{C}$	69-90	60-80	70-96	60-80	120-140	200

Преимуществами полимерных изделий является их низкая стоимость, малая масса, высокая ударопрочность, а основными недостатками полимеров как оптического материала - высокий коэффициент расширения, оптическая неоднородность и большой температурный коэффициент расширения.

Из полимеров изготавливают чаще всего детали визирной, осветительной и просмотровой оптики (линзы визирных устройств фотоаппаратов, светопроводы, конденсорные линзы, лупы, окуляры микроскопов и др. детали).

Для получения оптических полимерных деталей используют литье под давлением, прессованием, полимеризацию в форме, механическую обработку (шлифование и полирование). Каждый из этих способов имеет свои преимущества и недостатки. При выборе способа изготовления конкретно оптической детали учитывают требования, предъявляемые к оптическим качествам полимерных деталей, серийность их производства и технические возможности их изготовления.

Основными характеристиками метода изготовления оптических деталей из полимеров являются его производительность и качество полученных

оптических деталей. Наиболее интересен и широко применяется для изготовления оптических деталей метод литья под давлением, отличающийся кратковременностью цикла операций.

Полимеры широко применяются при изготовлении изделий массового потребления - лупы, бинокли, простая фотооптика. Легкая формуемость полимеров делает возможным массовое изготовление оптических деталей сложной конфигурации, которые трудно или невозможно получить из силикатного стекла таких, как детали с асферическими поверхностями и линзы Френеля. Изготовление линз Френеля из полимеров значительно расширило область применения таких линз. Они применяются в конденсор-ных устройствах, дающих равномерное освещение больших поверхностей, а также в визирах фотоаппаратов.

Характеристика способов переработки полимеров в детали оптического назначения

Практически все используемые в оптике полимеры, за исключением полиэтилен-гликоль-бисаллилкарбоната (ДЭГБАК), являются термопластами - это полиметилметакрилат (ПММА), полистирол (ПС) и его сополимеры с нитрилом акриловой кислоты (СН). Для изготовления оптических полимерных деталей применяются почти все методы переработки полимерных материалов.

Основными характеристиками любого способа переработки полимеров являются его производительность и точность изготовления деталей. При этом высокая производительность связана с понижением точности полимерных деталей. Поэтому при определении способа изготовления полимерной оптики учитывают как требования к оптическим показателям качества полимерных деталей и серийности их производства, так и технические возможности изготовления. Рассмотрим важнейшие способы формообразования оптических полимерных деталей.

Изготовление зеркал методом копирования

Метод копирования в сравнении с другими способами переработки полимерных материалов является малопродуктивным, однако он обеспечивает получение наиболее высокоточных рабочих поверхностей оптических деталей. Преимуществом метода является возможность воспроизведения асферических поверхностей с высокой точностью. Метод копирования используется для получения вогнутых параболических, торических и других поверхностей зеркал (точность по кружку рассеяния до 0,05 мм).

Сущность метода заключается в заполнении пространства между сферической поверхностью заготовки (подложки) и асферической поверхностью эталона синтетической смолой. После полимеризации эталон отделяют от готовой детали, на слое смолы остается отпечаток сферической поверхности. Этот метод в настоящее время обеспечивает получение асферических поверхностей с минимальной асферизацией в 40 мкм.

В методе копирования наиболее трудным является изготовление точных

эталонных поверхностей. Для эталонов применяют стекло или сталь, причем сталь предпочтительнее ввиду ее наибольшей стойкости к разрушению в процессе отделения детали от эталона. Точность поверхности эталона и подложки определяют требования к изготавливаемым деталям.

Для получения асферизирующего слоя применяют материалы на основе полиэфирной или эпоксидной смол.

Механическая обработка

Механическую обработку листовых, блочных и профильных заготовок органических стекол применяют в единичном и мелкосерийном производстве, когда использование дорогостоящего прессованного или литейного оборудования экономически нецелесообразно.

Органические стекла легко подвергаются всем видам механической обработки на обычном металлорежущем оборудовании. Однако качество поверхности полимерных деталей, получаемых методом резания, не соответствует требованию к оптическим деталям. Для этих деталей необходима дополнительная обработка - оптическое полирование на смоляном полировальнике окисью хрома или алмазным порошком АСМ1 с добавкой глицерина. Чистота обрабатываемых поверхностей деталей после полировки может достигать $R_z 0,100-0,05$ мкм.

Полимеризация в форме

Методом полимеризации в форме получают детали с высокой оптической чистотой и точностью размеров. Однако из-за длительности процесса полимеризации и большого количества ручных операций производительность способа невелика. Этим методом из акриловых полимеров получают очковые и контактные линзы, призмы, зеркала, отражатели, а также модели для оптических исследований напряжений.

Полимеризацию акриловых полимеров производят из предварительно приготoвленной и завакуумированной смеси мономера с инициатором полимеризации в термошкафу или автоклаве при температуре 30-60°C. Формы для полимеризации, состоящие из пуансона и матрицы, изготавливают из стекла или металла, причем формирующие поверхности обрабатывают до шероховатости $R_z 0,100-0,05$. В процессе полимеризации половинки формы соединяют с помощью трубочин или дополнительных элементов, обеспечивающих компенсацию усадки образующегося полимера.

Методом полимеризации в форме получают оптические детали из жидких термореактивных композиций на основе мономеров типа ДЭГБАК. Наибольшую ценность для оптики представляет возможность при сополимеризации мономеров на основе ДЭГБАК с метилметакрилатом, диаллилтаконатом и другими мономерами в широких пределах варьировать показатель преломления и коэффициент дисперсии, а также твердость, ударную вязкость.

Исходные мономеры тщательно вакуумируют, смешивают с 3 – 5 %

отвердителя (перекись бензола), гомогенизируют с помощью центрифуги, заливают в форму и медленно полимеризуют в термошкафу при температуре 50 °С - 100 °С.

Форма для изготовления деталей состоит из двух оформляющих оболочек, которые удерживают на определенном расстоянии друг от друга упругим дистанционным кольцом. Оболочки чаще всего изготавливают из закаленного стекла, способного выдерживать значительное напряжение, возникающее при усадке смеси в процессе полимеризации. Величина усадка составляет приблизительно 12-15 %.

Прессование

Прессование термопластов используют главным образом при производстве крупногабаритных и разнотолщинных деталей. Прессованные детали могут быть получены с более высокой прочностью рабочих поверхностей и иметь меньшие внутренние напряжения, чем литые детали, что объясняется минимальным течением материала в пресс-форме и достаточным временем релаксации макромолекул в пластичном состоянии.

Процесс прессования пригоден для серийного производства изделий и уступает по производительности методу литья под давлением. Этим способом изготавливают крупногабаритные линзы, линзы Френеля, параболические и эллиптические зеркала, асферические пластины для телевизоров, отражатели, светопроводы и др. Для прессования прозрачных термопластов используют обычные прессы для переработки реактопластов. Технология прессования сводится к следующему. В пресс-форму, разогретую до температуры расплава полимера, загружают материал в виде заготовки максимально приближенной к окончательной форме детали. Под давлением расплавленный материал принимает необходимую форму. После охлаждения пресс-формы под давлением извлекают готовую деталь, с которой удаляют заусенцы и облой.

ТЕМА 12

КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ

Необходимость использования кристаллов в качестве материала для изготовления оптических деталей определяется тем, что они обладают рядом свойств, которые у стеклообразных веществ либо ограничены либо отсутствуют вообще, в частности:

- кристаллы при отсутствии в них внутренних напряжений обладают свойством двойного лучепреломления (MgF_2 , SiO_2 , Al_2O_3 , $CaCO_3$, CaW_4 , KH_2PO_4 , $NH_4H_2PO_4$ и др.) и электрооптическим эффектом, т.е. способностью вращать плоскость поляризации света при наложении электрического поля ($NaCl$, SiO_2 , $NH_4H_2PO_4$, KH_2PO_4 , $BaTiO_3$, $GaAs$, и др.).

- ряд кристаллов имеют высокую температуру плавления, что позволяет

использовать их в устройствах работающих при высоких температурах:

CaF- 1360 °C	CaW ₄ - 1535 °C	CaCO ₃ - 1335 °C
Al ₂ O ₃ -2030 °C	SiO ₂ -1700 °C	

Наряду с положительными качествами кристаллы имеют и отрицательные свойства, которые усложняют технологию изготовления оптических деталей и их эксплуатацию, в частности:

- целый ряд кристаллов, имеющих широкое применение гигроскопичны и растворимы в воде, например

- все кристаллы обладают анизотропией механических свойств в разных кристаллографических направлениях, у них неодинаковы твердость, модуль Юнга и предел упругости.

- в состав некоторых кристаллов входят токсичные вещества, в частности - таллий, цезий, мышьяк. Соли таллия поражают центральную нервную систему, желудочно-кишечный тракт и почки, действуют на кожу. Соли цезия раздражают дыхательные пути и кожу, вызывают желудочно-кишечные заболевания. Профессиональные заболевания являются следствием вдыхания пыли этих солей и ее всасыванием через кожу. Учитывая это, при работе с кристаллами, содержащими токсичные вещества, необходимо строгое соблюдение техники безопасности и промышленной санитарии, а именно: обеспечение герметичности оборудования, обязательное использование респираторов, резиновых перчаток и напальчников, отдельное хранение спецодежды, соблюдение личной гигиены, периодический медицинский осмотр и др.

Природные кристаллы необходимой степени прозрачности, однородности и размеров встречаются редко, поэтому широкое использование в приборостроении они получили только с развитием техники их синтеза. Однако еще не все оптические кристаллы могут быть выращены в настоящее время с необходимой степенью однородности и нужных размеров. Эти трудности преодолеваются как совершенствованием технологии выращивания, так и разработкой технологии получения прессованных материалов - оптической керамики. По оптическим характеристикам она соответствует монокристаллам, а по техническим изотропна и подобно стеклу, обладает высокими термомеханическими свойствами и может быть изготовлена больших размеров.

Кристаллические материалы условно делят на две группы: полупроводники и диэлектрики, оптические свойства которых резко различны.

Из числа полупроводников наиболее часто применяют: GaAs, InAs, InSb, Ge, Si и др. Их оптические свойства определяются главным образом собственным и примесным поглощением, а также поглощением на свободных носителях, особенно при больших длинах волн. Полупроводники непрозрачны в видимом и коротковолновом участках спектра, имеют большие значения показателя преломления. Во многих случаях это определяет необходимость нанесения просветляющих покрытий.

Кристалл	Показатель преломления	Область пропускания, мкм
GaAs	3,20 - 2,73	5 - 15
Si	3,57 - 3,42	1 - 10
Ge	4,12 - 4,00	2 - 23
Bi ₂ Te ₃	9,20 - 9,00	10 - 15

К диэлектрикам относят щелочно-галогидные кристаллы (KBr, CaF₂, KCl, и др.), а также кристаллы некоторых окислов и неорганических солей. Кристаллы диэлектрики имеют сравнительно небольшие значения показателя преломления, их отражательная способность мала и они не требуют просветления. Оптические свойства в незначительной степени зависят от температуры. Диэлектрики обладают большим разнообразием оптических свойств. Среди них наибольшее число двупреломляющих кристаллов и кристаллов обладающих электрооптическим эффектом. Применение многих диэлектриков для изготовления оптических деталей ограничено их гигроскопичностью и малой механической прочностью.

В системе координат X, Y, Z оптические свойства среды характеризуют показатели преломления n_x , n_y , n_z , которые в общем случае образуют поверхность второго порядка определяемую выражением:

$$\left(\frac{x}{n_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{n_y}\right)^2 + \left(\frac{z}{n_z}\right)^2 = 1$$

Это выражение носит название эллипсоида показателей преломления.

По оптическому действию диэлектрики делятся на две группы - оптические изотропные и оптически анизотропные.

Оптически изотропной будет среда, у которой $n_x = n_y = n_z = n_0$. В этом случае эллипсоид показателей преломления превращается в шар и кристалл пропускает свет в любом направлении с одинаковой скоростью как обычное стекло свободное от напряжений.

Вторую группу составляют оптически анизотропные среды, которые могут быть одноосными и двуосными. Одноосные характеризуются двумя показателями преломления: $n_x = n_y = n_o$, и $n_z = n_e$, где n_o - показатель преломления обыкновенного луча, а n_e - показатель преломления необыкновенного луча. *Обыкновенными* называют лучи, которые распространяются в кристалле во все стороны с одинаковой скоростью. Геометрическое место концов векторов их скоростей будет шаровой поверхностью. Лучи, у которых скорость распространения внутри кристалла неодинакова, образуют эллипсоид вращения. Их называют *необыкновенными*. Обе поверхности вписываются одна в другую, и представляют собой волновую поверхность света прошедшего через кристалл. Если волновая поверхность шара вписана в эллипсоид, то скорость распространения лучей необыкновенных в большинстве направлений больше скорости обыкновенных. Такие кристаллы называют *оптически положительными*. Наоборот, если шаровая поверхность описывает эллипсоид,

то кристалл считается *оптически отрицательным*. Прямую соединяющую точки касания поверхностей называют *оптической осью кристалла*. Лучи идущие в этом направлении не испытывают двойного лучепреломления.

Величина показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей у некоторых кристаллов характеризуется следующими значениями:

Кристалл	n_o	n_e
CaCO_3	1,4864	1,6584
SiO_2	1,5443	1,5534
$\text{NH}_4 \text{H}_2\text{PO}_4$	1,4787	1,5242
KH_2PO_4	1,4684	1,5095
CaW_4	1,918	1,934
Al_2O_3	1,7604	1,7686

Краткая характеристика оптических изотропных диэлектриков

Из оптически изотропных диэлектриков наиболее часто используют: NaCl , KCl , KBr , CaF_2 , LiF , TlBr - TIJ , $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$

NaCl - мягкий, отличающийся высокой степенью однородности кристалл. Растворим в воде и глицерине, незначительно растворяющийся в спирте и аммиаке. Детали из NaCl нуждаются в защите от воздействия влаги и паров воды. Область прозрачности от 0,3 до 18 мкм. Отличается большим КТР, который в интервале температур от $+60^\circ\text{C}$ до $+500^\circ\text{C}$ изменяется от $400 \cdot 10^{-7}$ до $550 \cdot 10^{-7}$ град $^{-1}$. Температура отжига -650°C , температура плавления -800°C , температура сублимации -1413°C . Применяют для изготовления призм и окон спектральных приборов работающих в ИК области, окон лазеров на CO_2 . Из-за малой твердости, растворимости в воде и анизотропии механических свойств изготовление деталей с точными оптическими поверхностями высокого класса чистоты представляет определенную трудность.

KCl - по физико-химическим свойствам сильвин близок к NaCl , т.е. он мягок, растворим в воде и гигроскопичен. Изготовленные из него детали нуждаются в защите от разрушающего воздействия влаги и паров воды. Без защиты детали могут быть использованы короткое время в лабораторных условиях в сухом помещении. Пропускание KCl в большей степени зависит от посторонних примесей, которые, как правило, снижают его. КТР $-280 \cdot 10^{-7}$ град $^{-1}$. Плотность $\rho=1,98 \text{ г/см}^3$. Температура плавления -768°C . Область пропускания - от 0,2 до 18 мкм.

KBr - однородный и очень мягкий кристалл. Хорошо растворим в воде и гигроскопичен. Изготовленные детали (призмы и окна приборов ИК

спектроскопии) нуждаются в защите от влаги и паров воды. Диапазон пропускания от 0,21 до 20 мкм. КТР в температурном интервале от +60°C до +500°C, соответственно $390 \cdot 10^{-7}$ и $542 \cdot 10^{-7}$ град⁻¹. Температура отжига - 630°C, температура плавления - 728°C, температура сублимации - 1380°C. Плотность - 2,75 г/см³. Кристалл растворим не только в воде, но и в глицерине, эфире.

Кристаллы NaCl, KCl, KBr нормируют по нескольким показателям качества:

- пропускание в ИК области спектра,
- опалесценции,
- двойному лучепреломлению,
- пузырьности,
- свилеподобным дефектам.

Примечание: **опалесценция** - рассеяние света из-за дефектов при сильном световом облучении, рост кристалла может происходить в нескольких очагах кристаллизации. При этом образуются блоки с разным разворотом кристаллической решетки. Границы блоков работают как свили. При механической обработке кристалла блоки из-за их разной ориентации срабатывают с неодинаковой интенсивностью. По пропусканию в ИК области установлена одна категория, характеризуется величиной показателя поглощения K_λ в слое толщиной 1 см при длинах волн $\lambda=13, 17$ и 19 мкм.

Опалесценция заготовок, которую оценивают по видимому светорассеянию, не должна превышать опалесценции контрольных образцов.

По двойному лучепреломлению, характеризующему разностью хода обыкновенного и необыкновенного лучей поляризованного света в рабочем направлении заготовки на 1 см пути, установлены 2 категории. Первая категория допускает разность хода 50 нм/см, вторая - 80 нм/см.

По пузырьности, оцениваемой диаметром наибольшего пузыря в заготовке, кристаллы разделены на 8 категорий, которые соответствуют категориям 3-10 (диаметр пузыря от 0,2 до 5,0 мм) пузырьности бесцветного оптического стекла по ГОСТ Р 3514-94. Также как и в стекле, прозрачные и непрозрачные включения, произвольно расположенные в массе кристалла, приравниваются к пузырям.

По свилеподобным дефектам, характеризующим площадью занятой дефектами в рабочем направлении заготовки, установлено 3 категории. У кристаллов относимых к 1-й категории, площадь занимаемая дефектами не должна превышать 25% общей площади, у кристаллов 2-й категории - не более 50% и у кристаллов 3-й категории - 100%. К свилеподобным дефектам относят также расположенные ориентированно внутренние дефекты - мутные нити, пленки на границе блоков и в массе кристалла, полосы скольжения, слои роста и др.

CaF₂ - однородный, достаточно твердый кристалл. Практически не растворим в воде и негигроскопичен. В зависимости от рабочей области пропускания установлены 3 марки фтористого кальция:

ФК-У - с нормируемым пропусканием в УФ области спектра,

ФК-В - с нормируемым пропусканием в видимой области спектра,
ФК-И - с нормируемым пропусканием в ИК области спектра.

Прозрачность СаF₂ этих марок охватывает область от 0,15 до 10 мкм. Используют как материал для изготовления деталей УФ микроскопии в апохроматах и ахроматах, окон и призм в УФ и ИК спектроскопии, окон химических ОКГ. Обладает большим КТР и малой термической стойкостью. Отличается резко выраженной анизотропией механических свойств. По твердости превосходит все оптически изотропные диэлектрики.

Нормируется показателями качества СаF₂, независимо от марки, : область пропускания (УФ, видимая, ИК), двойное лучепреломление, пузырность, свилеподобные дефекты. У флюорита марок ФК-У и ФК-В, кроме того, нормируют опалесценцию и окрашенность.

По пропусканию в УФ области спектра установлены 2 категории, характеризующиеся наибольшей величиной показателя поглощения K_λ в слое толщиной 1 см для нескольких длин волн:

1-я категория $\lambda = 0,14 \text{ мкм}$ и $\lambda = 0,205 \text{ мкм}$

2-я категория $\lambda = 0,155 \text{ мкм}$ и $\lambda = 0,306 \text{ мкм}$

По пропусканию в видимой и ИК областях спектра установлено по одной категории, характеризующихся наибольшей величиной показателя поглощения K_λ в слое толщиной 1 см, при длине волны $\lambda = 0,4 \text{ мкм}$ для флюорита марки ФК-В и при $\lambda = 7,5 \text{ мкм}$ и $\lambda = 9,3 \text{ мкм}$ для флюорита марки ФК-И.

Опалесценция флюорита марки ФК-У не допускается вообще, а у кристаллов марок ФК-В и ФК-И не должна превышать опалесценции контрольного образца.

По пузырности СаF₂ разделен на 7 категорий, соответствующих категориям 2 - 8 пузырности бесцветного оптического стекла по ГОСТ Р3514-94 (диаметр пузыря от 0,1 мм до 2,0 мм). К пузырям приравнивают прозрачные и непрозрачные одиночные включения, расположенные в массе кристалла произвольно.

По свилеподобным дефектам установлено 4 категории, характеризующиеся площадью занятой этими дефектами в рабочем направлении заготовки, а именно:

I - свилеподобные дефекты не допускаются,

II - 25% площади заготовки,

III- 50% площади заготовки,

IV- не ограничиваются.

По величине остаточных напряжений, характеризующихся наибольшей разностью хода обыкновенного и необыкновенного лучей поляризованного света в рабочем направлении заготовки на пути в 1 см, установлено 3 категории: I -20 нм/см; II - 50 нм/см; III - 80 нм/см.

LiF - однородный и достаточно твердый кристалл. Практически не растворим в воде и негигроскопичен. Хорошо обрабатывается, шлифуется и полируется в присутствии воды, однако получить поверхность высокого класса чистоты весьма трудно. Применяют в качестве материала для изготовления

деталей в ахроматических и апохроматических системах, для призм и окон в УФ и ИК спектроскопии, для линз разных приборов работающих в УФ области спектра. Пропускание τ_λ , колеблется в зависимости от присутствия в LiF примесей. Пределы пропускания от 0,18 до 6,0 мкм. Пропускание в области 2,7-2,8 мкм зависит от наличия в кристалле связанной кристаллизационной воды.

Среднее КТР в интервалах температур от - 60 °С до +20 °С и от +20 °С до +120 °С равны соответственно $310 \cdot 10^{-7}$ и $345 \cdot 10^{-7}$ град⁻¹. Температура отжига – 750 °С, температура плавления – 870 °С и температура сублимации – 1676 °С.

В зависимости от основной области пропускания установлены 2 марки LiF: ФЛ-У - с нормируемым пропусканием в УФ области и ФЛ-И - с нормируемым пропусканием в ИК области спектра. Кристаллы марки ФЛ-И повышенного качества по механическим характеристикам выпускают под маркой ФДМ-0.13.

Общими нормируемыми показателями качества кристаллов марки ФЛ-У и ФЛ-И, кроме пропускания в соответствующей области спектра, являются: опалесценция, двойное лучепреломление, пузырность, свилеподобные дефекты. У LiF марки ФЛ-У, кроме того нормируют окрашенность.

По пропусканию в УФ области спектра для LiF марки ФЛ-У установлены две категории, характеризующиеся величиной показателя поглощения K_λ в слое толщиной 1 см при нескольких длинах волн:

1-я категория: $\lambda = 0,12 \text{ мкм}$ $\lambda = 0,14 \text{ мкм}$ $\lambda = 0,19 \text{ мкм}$

По пропусканию в ИК области спектра для LiF марки ФЛ-И и также установлены 2 категории характеризующиеся величиной показателя поглощения на участке спектра $\lambda = 2,6 - 2,9 \text{ мкм}$. Для 1-й категории величина K_λ допустима не более 0,03 и для II-й категории не более 0,07.

Окрашенность кристаллов марки ФЛ-У, предназначенных для работы в видимой области, не допускается.

По двойному лучепреломлению, пузырности и свилеподобным дефектам кристаллы LiF разделены на такое же число категорий и с теми же численными значениями параметров, что и кристаллы CaF₂.

В настоящее время кристаллы LiF марки ФЛ-И предназначенные для работы ИК области спектра заменяют на оптическую керамику прозрачную в соответствующей области.

NaF - однородный и достаточно твердый кристалл. Он мало растворим в воде и изготовленные из него детали могут быть использованы в лабораторных условиях без защиты от влаги. Применяют, в основном, для изготовления призм и окон ИК спектрометров. Хорошо шлифуется и полируется в присутствии воды. Пределы пропускания -от 0,2 мкм до 12 мкм.

BaF₂ - по оптическим свойствам является аналогом CaF₂, а по твердости близок к LiF. Прозрачен в области от $\lambda=0,14 \text{ мкм}$, до $\lambda=14 \text{ мкм}$. Практически не растворим в воде и не гигроскопичен. Широкое применение получил в ОКГ на CO₂. Несмотря на большое поглощение при $\lambda=10,6 \text{ мкм}$ кристалл в импульсном режиме выдерживает 10^7 ватт/см³. Как и CaF₂ применяют для изготовления окон химических ОКГ.

Установлены (ГО 5550-67) две марки фтористого бария: ФБ-У - с

нормируемым пропусканием в УФ и видимой областях спектра, и ФБ-И - с нормируемым пропусканием в ИК области. Заготовки имеют форму дисков диаметром от 40 до 250 мм, толщиной 10 и 15 мм, и представляют блоки сросшихся между собою монокристаллов.

По оптической однородности заготовки размером до 100 мм соответствуют 3-й категории бесцветного оптического стекла по ГОСТ Р 3514-94, а размером от 100 мм и более - 4-й категории.

Двойное лучепреломление в рабочем направлении допустимо до 80нм/см.

ТЕМА 13

ВЫРАЩИВАНИЕ КРИСТАЛЛОВ

Образование и рост кристаллов — сложный физико-химический процесс, связанный со скачкообразным переходом из неупорядоченного состояния вещества, расплава, раствора, пара, в кристаллическую твердую фазу.

Переход в кристаллическое состояние происходит при строго определенной для каждого вещества температуре кристаллизации. Необходимым условием начала кристаллизации является нарушение равновесия системы, например раствора и кристаллической фазы, путем переохлаждения или перенасыщения раствора.

Процесс кристаллизации состоит из двух этапов:

- образования кристаллического зародыша;
- роста зародыша в кристалл.

Очень часто центром кристаллизации является не самопроизвольно образовавшийся зародыш, а различные инородные частицы: пылинки, примеси, стенки сосуда. Это явление широко используется в технологии выращивания кристаллов, когда в раствор или в расплав вводится кристаллик-затравка со строго определенной кристаллографической ориентацией.

После появления кристалла зародыша или введения затравки в жидкую фазу, начинается спонтанное отложение на нем вещества, образующего правильный многогранный кристалл.

Выращивание кристаллов осуществляется кристаллизацией:

- из раствора;
- расплава;
- газовой фазы.

Выбор метода кристаллизации зависит от свойств вещества, в ряде случаев кристаллы одного и того же вещества можно выращивать различными методами.

Выращиванием из раствора получают кристаллы веществ, образующих пересыщенные растворы. В качестве растворителей применяют воду,

органические вещества (ацетон, толуол и др.), а также щелочные растворы. Условия перенасыщения раствора создаются за счет испарения растворителя, понижения температуры или создания температурного градиента. Для выращивания обычно используют затравочные кристаллы. В процессе роста кристалла раствор перемешивают. Способ этот прост, не требует сложного оборудования, но для выращивания оптических кристаллов применяется редко.

Гидротермальный синтез является разновидностью метода Выращивания из раствора, его применяют для выращивания синтетических кристаллов кварца (рис. 2).

В автоклав 1 засыпают размельченный поликристаллический природный кварц 4, заполняют автоклав до определенного уровня растворителем (щелочным раствором) и помещают внутрь рамку 2 с затравочными кристаллами. После этого автоклав закрывают и устанавливают в электрическую печь, где раствор нагревается до 400 °С. Под действием температуры внутри автоклава создается давление порядка $(2-3)10^8$ Па. В этих условиях кварц интенсивно растворяется в щелочи, образуя насыщенный раствор.

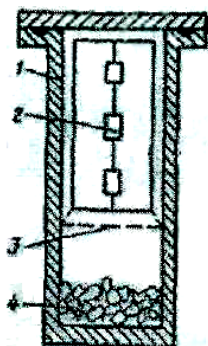


Рис 2. Установка для гидротермальной кристаллизации кварца

Температуру в верхней части автоклава поддерживают на 20 °С ниже, чем в нижней, поэтому там образуется зона кристаллизации. Благодаря градиенту температуры и перфорационной решетке 3 создаются конвекционные потоки раствора, обеспечивающие его перемешивание и подачу свежего пересыщенного раствора в верхнюю кристаллизационную зону автоклава.

Выращенные монокристаллы массой до 800 грамм имеют совершенную геометрическую форму. Скорость роста кристалла достигает 1 мм/сутки.

Выращивание кристаллов из расплава возможно несколькими методами:

1 Методом Чохральского (рис. 3) получают монокристаллы германия, кремния, кристаллы арсенидов галлия и индия и другие путем вытягивания их из расплава.

В слегка перегретый расплав 5, помещенный в тигель 6, опускают стержень 1 с монокристаллической затравкой 2, имеющую заданную кристаллографическую ориентацию. Оплавляют поверхность затравочного

кристалла для удаления дефектов поверхностного слоя, и, регулируя мощность нагревателей 4, постепенно снижают температуру расплава.

Затравочный кристалл начинают медленно поднимать вверх, одновременно вращая его с частотой до 60 об/мин., что вызывает перемешивание расплава и уменьшает влияние неравномерности распределения температуры в расплаве. Вращающаяся затравка, увлекает за собой столбик расплава, который, поднявшись над поверхностью, попадает в зону пониженных температур, где и происходит кристаллизация.

Затравленный кристалл некоторое время подогревают, отчего его сечение сужается и образуется шейка 7. После этого температуру вновь снижают и сечение кристалла 3 увеличивается.

Основное назначение шейки — предотвратить проникновение несовершенств кристалла-затравки, в растущий кристалл. Выращенный кристалл отжигают для снятия внутренних напряжений.

Достоинства: Отсутствие контакта кристалла и фронта кристаллизации со стенками тиглей, возможность наблюдения за процессом роста кристалла, работа под вакуумом или в защитной среде позволяет получать этим методом крупные совершенные кристаллы с массой до 4 кг.

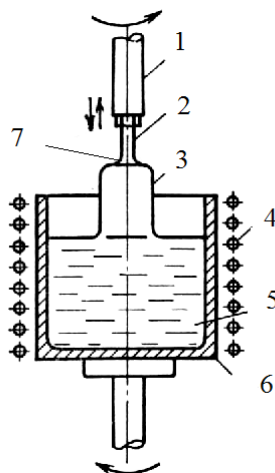


Рис. 3. Выращивание кристаллов по методу Чохральского

2 Метод Киропулоса применяется для выращивания щелочно-галлоидных кристаллов из расплава (рис. 4). Метод Киропулоса отличается от метода Чохральского тем, что зона кристаллизации расположена под зеркалом расплава.

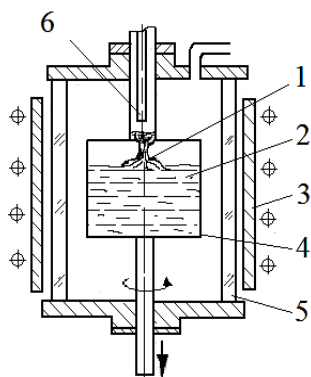


Рис.4. Установка для выращивания кристаллов щелочно-галоидных солей

Исходная кристаллическая соль 2 расплавляется в цилиндрическом тигле 4 и нагревается до температуры, которая превышает температуру плавления на 100-120 °С. На поверхность перегретого расплава опускают закрепленный на охлаждаемом стержне 6 затравочный кристалл и начинают медленно снижать температуру расплава. В определенный момент на границе раздела кристалл-расплав за счет отвода тепла через стержень создается переохлаждение и на затравке начинает расти монокристалл 1. Кристалл растет в радиальном направлении, от затравки к стенкам тигля, не распространяясь в глубину.

Когда диаметр кристалла достигнет размеров, близких к внутреннему диаметру тигля, стержень с растущим кристаллом начинают медленно поднимать, следя за тем, чтобы фронт кристаллизации находился под поверхностью расплава. На стенках тигля обычно образуются наросты паразитных кристаллов.

При выращивании крупных кристаллов необходимость подъема выращиваемого кристалла отпадает, так как уровень расплава опускается за счет сокращения его объема при кристаллизации (для NaCl, KCl на 15 %). Для предотвращения испарения и образования окислов над поверхностью расплава внутри герметичного кварцевого сосуда 5 поддерживают почти атмосферное давление инертного газа. Заготовка или расплав вращаются с частотой 2 об/мин. В течение суток вырастает кристалл, например, KCl массой 2 кг. При работе по методу Киропулоса необходимо тщательно выдерживать температурный режим расплава, нагреватели для уменьшения градиента температуры закрывают выравнивающим экраном 3.

3 По методу Вернейля выращивают пламенной плавкой кристаллы с температурой плавления 1500 - 2500 °С: корунды, титаны бария, стронция и др.

На рисунке 5 показана схема установки для получения кристаллов рубина.

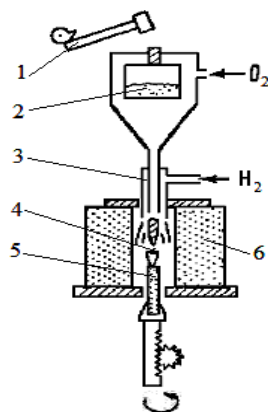


Рис. 5. Выращивание кристаллов рубина

Химически чистая окись алюминия (Al_2O_3) с добавкой окиси хрома (Cr_2O_3) в виде порошков с частицами размером 20 мкм загружается в бункер 2. Под действием встряхивающего устройства 1 порошок через сетчатое дно бункера попадает в струю водородно-кислородного пламени горелки 3.

Снизу через отверстие кристаллизационной камеры 6 вводится ориентированный затравочный кристалл 5. Благодаря малым размерам частицы шихты расплавляются на лету и, попадая на затравочный кристалл, образуют расплавленный слой 4. Затравка медленно вращаясь, опускается и по мере охлаждения расплава происходит кристаллизация и рост кристалла. Полученные кристаллы отжигаются во избежание образования трещин и внутренних натяжений.

Для получения качественных кристаллов по методу Вернейля необходимо точно согласовать расход шихты, подачу водорода и кислорода и скорость опускания затравки.

4 Методом зонной плавки (рис. 6) получают тугоплавкие кристаллы сапфира, граната и др.

В контейнер-лодочку 6 прямоугольной формы помещают затравочный кристалл 1 и поликристаллический стержень 5. С помощью нагревателя 3 создают расплавленную зону 4, медленно сдвигают ее к затравке, добиваясь полного оплавления затравки по торцу. Затем перемещают нагреватель в направлении от затравки и смещают зону расплава. На границе затравка-расплав 2 происходит переохлаждение и кристаллизация расплава.

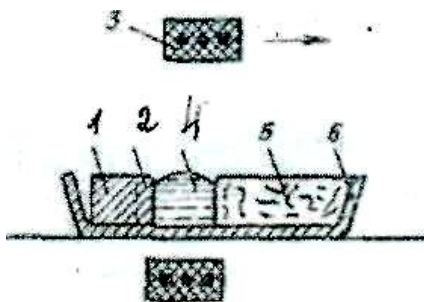


Рис. 6. Выращивание кристаллов методом зонной плавки

Процесс происходит в вакууме или в среде инертного газа. Лодочку изготавливают из графита, кварца или тугоплавких окислов алюминия.

Полученные монокристаллы имеют форму плоских пластин с толщиной и габаритными размерами, соответствующими размерам контейнера-лодочки.

При зонной плавке кристалла происходит одновременно очистка исходного вещества. Примеси из-за разности растворимости в жидкой фазе оттесняются в конец лодочки.

ТЕМА 14

ОПТИЧЕСКИЕ ПОЛИКРИСТАЛЛЫ (КЕРАМИКА)

В 70-х годах появился новый поликристаллический материал — оптическая керамика. Название отражает прозрачность материала в оптическом диапазоне и керамический прием его изготовления. Появление керамики связано с тем, что монокристаллы, как это отмечалось ранее, обладают свойствами, которые усложняют технологию изготовления деталей, снижают их эксплуатационные качества. К числу таких свойств, в частности, относится механическая анизотропия, низкая термостойкость и др.

Оптическую керамику изготавливают из тонкодисперсных веществ (окислы, фториды, сульфиды, селениды и др.), прозрачных в ИК области спектра. По структуре керамика представляет диэлектрический аналог металлов, отличающийся только одной фазой.

Для оптической керамики характерно сочетание свойств поликристаллических и стеклообразных веществ. В частности, коэффициент термического расширения керамики из веществ относящихся к кубической сингонии совпадает с КТР исходного вещества. Если же исходное вещество относится к оптически анизотропным, то КТР керамики соответствует средней арифметической величине главных значений КТР исходного материала.

У монокристаллов, как известно, независимо от симметрии кристаллической решетки, механические свойства анизотропны и разрушение материала в процессе механической обработки идет, в основном, по плоскости спайности. Механические свойства керамики изотропны по всем направлениям, т.к. у нее нет плоскостей спайности, по которым происходит преимущественное разрушение кристалла. Поэтому механическая обработка керамики по существу не отличается от обработки стекла, однако из-за зернистости структуры трудно получить поверхность высоких классов чистоты. С этой же особенностью материала связана и точность форм поверхности. Объясняется это разной ориентацией микроблоков (зерен) и их неодинаковой интенсивностью износа по соответствующим кристаллографическим плоскостям.

Прочность керамики определяется размером зерен исходного вещества, зависит от их формы, степени деформации кристаллической решетки, наличия примесей на границе зерен. Оптическая керамика не имеет равных себе материалов (оптических) по термостойкости, способности выдерживать

термомеханические удары. Улучшение термомеханических характеристик достигается за счет разориентированности отдельных зерен так, что трещина, идущая по кристаллографической плоскости микрзерна не имеет возможности беспрепятственно развиваться и блокируется

Химическая устойчивость керамики определяется в первую очередь структурой вещества. Все типы оптической керамики не гигроскопичны, не растворяются в воде, не подвержены разрушению морской водой. Эксплуатация керамики при высокой температуре ($\approx 400^\circ\text{C}$) и влажности ($\approx 90\%$) вызывает потерю ее прозрачности.

Показатель преломления керамики зависит от плотности и показателя преломления исходного материала, наличия в нем примесей, текстурированности.

У керамики из оптических изотропных материалов показатель преломления отличается от его значения для монокристалла не более чем на 2-3 единицы четвертого знака. У керамики из оптически анизотропного одноосного кристалла показатель преломления в первом приближении определяют из соотношения:

$$n_{ko} = \frac{n_e + 2n_o}{3}$$

Практически получены следующие значения показателя преломления керамики из оптически изотропных материалов:

CaF_2		MgO
Керамика	$n_{ko} = 1,4289$	$n_{ko} = 1,7223$
Монокристалл	$n_{ko} 1,4289$	$n_{ko} = 1,7227$

По оптической однородности керамика не уступает стеклу и монокристаллам, но при ее исследовании теневым методом выявляется зернистая структура как у кварцевого стекла получаемого наплавлением крупки.

Технология изготовления керамики принятая в отечественной промышленности заключается в вакуумном прессовании исходных веществ при высоком ($1-3 \text{ тонны/см}^2$) давлении и температуре ($2/3$ температуры плавления вещества). При этом эффективно действуют два механизма массопереноса - трансляционное скольжение по кристаллографическим плоскостям и скольжение по границам зерен. В очень короткое время со скоростью фазовых превращений происходит одновременная рекристаллизация всего материала.

Освоен промышленный выпуск оптической керамики нескольких марок, в частности:

КО-1. Керамика из фтористого магния – MgF_2 Рабочий интервал пропускания от 1 до 7 мкм.

показатель преломления	$n_\lambda = 1,3778$
температура плавления	$T_{\text{пл}} = 1255^\circ\text{C}$
плотность	$\rho = 3,18 \text{ г/см}^3$

Используют для изготовления обтекателей, окон различных приемников

излучения, в качестве подложек для ИК фильтров.

КО-2, Керамика из сульфида цинка - ZnS . Рабочая область пропускания от 1 до 14 мкм.

показатель преломления	$n_\lambda = 2,2907$
температура плавления	$T_{\text{пл}} = 1830^\circ\text{C}$
плотность	$\rho = 4,098 \text{ г/см}^3$

Применяют в качестве для изготовления линз в ИК технике.

КО-3. Керамика из фтористого кальция – CaF_2 . Рабочая область пропускания от 0,4 до 10 мкм.

показатель преломления	$n_\lambda = 1,4289$
температура плавления	$T_{\text{пл}} = 1360^\circ\text{C}$
плотность	$\rho = 3,18 \text{ г/см}^3$

КО-4. Керамика из селенида цинка - ZnSe . Рабочий диапазон пропускания от 0,5 до 21 мкм.

показатель преломления	$n_\lambda = 2,485$
температура плавления	$T_{\text{пл}} = 1500^\circ\text{C}$
плотность	$\rho = 5,27 \text{ г/см}^3$

Материал способен выдержать большие температурные градиенты. Используют для изготовления обтекателей, окон лазеров на CO_2 , деталей вакуумной техники, деталей интегральной оптики.

КО-5. Керамика из окислов магния - MgO . Рабочая область пропускания от 0,4 до 8,0 мкм.

показатель преломления	$n_\lambda = 1,7223$
температура плавления	$T_{\text{пл}} = 2800^\circ\text{C}$
плотность	$\rho = 3,58 \text{ г/см}^3$

Высокая теплопроводность КО-5 позволяет использовать ее в изделиях, подвергающихся тепловым ударам. Отличается высокой термостойкостью и прочностью, благодаря чему данную керамику применяют как броню самолетов и вертолетов (защитные колпаки для пилотов), для изготовления деталей ИК микроскопии. В воде КО-5 не растворяется, но при длительном хранении наблюдается ее взаимодействие с углекислотой воздуха и образование на поверхности деталей тонкого налета карбоната магния. Поэтому изделия, рассчитанные на длительное хранение, целесообразно подвергать защите.

КО-6. Керамика из теллурида кадмия - CdTe . Рабочая область пропускания от 0,9 до 29 мкм и не имеет в этом диапазоне полос поглощения.

показатель преломления	$n_\lambda = 2,807$
температура плавления	$T_{\text{пл}} = 1800^\circ\text{C}$
плотность	$\rho = 5,85 \text{ г/см}^3$

Прозрачность КО-6 в указанном выше диапазоне длин волн составляет 60-65% без учета потерь на отражение и может быть увеличена до 99 % при нанесении на поверхности детали просветляющих покрытий. Материал опробован в качестве подложек светофильтров в ИК спектрофотометрах, окнах газовых лазеров на CO_2 , приемники излучения с окнами из КО-6 выдерживают

охлаждение до температуры жидкого азота.

Официальным документом на оптическую керамику пока являются стандарты предприятия-изготовителя. Основная форма поставки керамики - плоские пластины разной конфигурации, диски мениски. В зависимости от марки керамики максимальные размеры заготовок могут быть от 80 до 350 мм.

ТЕМА 15

НОРМИРУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОГО СТЕКЛА. СИСТЕМА НОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ

Оптическое бесцветное стекло нормируют по следующим параметрам, характеризующим качество материала:

- показатель преломления и средняя дисперсия,
- однородность партии заготовок по показателю преломления и средней дисперсии,
- оптическая однородность,
- двойное лучепреломление,
- свильность,
- пузырность,
- показатель ослабления,
- радиационно-оптическая устойчивость (для серии «100»).

Прежде чем перейти к рассмотрению нормирования, необходимо сделать некоторые пояснения к самим нормируемым параметрам.

Основными оптическими постоянными принято называть значения показателей преломления для некоторых длин световых волн, а также вычисленные из этих значений производные величины - средние дисперсии, коэффициенты средней дисперсии и относительные частные дисперсии.

В отечественном каталоге стекла, показатели преломления приводятся для 23 спектральных линий химических элементов и для 12 длин волн, генерируемых лазерами наиболее употребительных типов.

Показатель преломления n_e для $\lambda = 546,07$ нм расположенный вблизи максимума чувствительности глаза человека называют основным показателем преломления. То, что в качестве основного показателя преломления ранее использовался показатель преломления в желтой части спектра (т.е. для линий D или d), связано с высокой чувствительностью глаза в желтой части спектра, а также с тем обстоятельством, что ранее в оплотехнике подавляющее большинство приборов было рассчитано для работы с глазом наблюдателя. Однако для измерителя линия D не удобна, т.к. она представляет собой слабо расщепленный дублет. Линия e также расположена вблизи максимума чувствительности глаза, но гораздо удобнее для измерений. Кроме того, в широко развитой сейчас проекционной фотолитографии именно при использовании линии e производится важная технологическая операция совмещения ($\lambda = 546,07$ нм неактивна по отношению к фоточувствительному

слою).

Требования к оптическим постоянным вытекают из системы допусков на отступление оптотехнических параметров оптических деталей от расчетных значений.

Светопоглощение стекла ранее определялось через коэффициент светопоглощения - K_d т.е., через выраженное в процентах отношение потока белого света (излучение газонаполненной лампы, близкое к излучению стандартного источника света А), поглощенного стеклом толщиной в 1 см, к

световому потоку в начале пути. В действительности, кроме потерь на поглощение, учитываются потери на рассеяние света, и поэтому суммарную величину правильнее и точнее называть коэффициентом ослабления. Допускавшаяся неточность объясняется тем, что потери на рассеяние находятся на уровне 0,002 - 0,08 % на 1 см, т.е. при использовании стекла со светопоглощением 0,4 - 0,6 % на 1 см этими величинами можно пренебречь. Сейчас, в связи со все более широким использованием сверхпрочных стекол со светопоглощением 0,1 % и менее, потери на светорассеяние становятся сравнимыми с потерями на светопоглощение.

Примечание. Стандартный источник света А - электрическая лампа накаливания при цветовой температуре тела накала 2850 ± 50 К

Нормируемые показатели качества бесцветного оптического стекла

Оптические, механические и др. свойства стекла определяются в основном его химическим составом, но процесс варки и изготовления заготовок вызывают отклонение параметров. Образуются неоднородности, окрашенность и др. дефекты. ГОСТ Р 3514-94 нормирует ряд показателей качества стекла. Значения этих показателей, по которым стекло может быть поставлено заводами изготовителями, зависят от его марки и размера заготовок.

Показатель преломления и средняя дисперсия.

Стекло каждой партии варки может отличаться от установленных для него значений показателя преломления n_e и средней дисперсии $n'_F - n'_C$. Несоответствие фактических значений n_e и $n'_F - n'_C$, расчетным приводит к возникновению aberrаций, исправление которых было сделано по номинальным значениям оптических постоянных. Изменяются фокусные расстояния и отрезки, что усложняет, а в ряде случаев исключает юстировку прибора. По величине отклонения n_e и $n'_F - n'_C$, ГОСТ Р 50224-92 предусматривает 5 категорий:

категория	предельные отклонения	
	показатель преломления	средняя дисперсия
1	$\pm 2 \times 10^{-4}$	$\pm 0,2 \times 10^{-2}$
2	$+3 \times 10^{-4}$	$+0,3 \times 10^{-2}$
3	$\pm 5 \times 10^{-4}$	$\pm 0,5 \times 10^{-2}$
4	$\pm 10 \times 10^{-4}$	$\pm 0,8 \times 10^{-2}$
5	$\pm 20 \times 10^{-4}$	$\pm 1,6 \times 10^{-2}$

Измерение фактических значений показателя преломления и средней дисперсии производят на специальных образцах, отжигаемых с партией заготовок.

Под однородностью партии по показателю преломления и средней дисперсии понимают одинаковость их значений у всех заготовок партии. Установлены 4 класса однородности партии заготовок по показателю преломления n_e и 2 класса однородности партии по средней дисперсии n_F, n_C' ,

класс	наибольшая разность в партии	
	показатель преломления	средняя дисперсия
А	$0,2 \times 10^{-4}$	—
Б	$0,5 \times 10^{-4}$	—
В	$1,0 \times 10^{-4}$	$0,1 \times 10^{-2}$
Г	в пределах допуска на отклонение по заданной категории	

Класс однородности А или Б в партии заготовок ставят только в чертежах тех деталей оптических систем, которые пересчитывают на фактические значения n_e и n_F, n_C' . При пересчете, для компенсации aberrаций изменяют воздушные промежутки, толщину линз, и что сложнее для производства, радиусы кривизны одной-двух поверхностей.

Проще всего высшие классы однородности получают при комплектовании партии заготовок из стекла одной варки. Однако, целый ряд новых стекол с ценными оптическими постоянными нельзя сварить в сосуде такого объема,

чтобы из полученного стекла можно было скомплектовать крупную партию заготовок. Поэтому ГОСТ Р 3514-94 оговаривает, что любой класс однородности таких стекол можно требовать при заказе партии стекла весом не более 12 кг.

Метод контроля показателя преломления n_e и средней дисперсии $n_F' - n_C'$ назначают в зависимости от требуемой точности их определения. Ниже перечисленные методы обеспечивают:

- гониометрический по ГОСТ 5723-75 точность $1,5 \times 10^{-5}$
- интерференционный по ГОСТ 5421-73 точность $1,0 \times 10^{-4}$
- рефрактометрический по ГОСТ 3516-74 точность $2,0 \times 10^{-5}$
- компенсационный по ГОСТ 8201- точность $1,0 \times 10^{-5}$

Метод контроля должен обеспечивать точность на порядок выше требуемой категории.

Хотя к стеклу для ряда оптических деталей и не предъявляют жестких требований по показателю преломления и средней дисперсии, все же важно стекло варить по высшим категориям оптических постоянных. Это вызвано тем, что для достижения возможно большего выхода годного, стекло каждой варки вырабатывается комплексно, т.е. оно раскраивается одновременно под заготовки разных деталей. При этом необходимо, чтобы оптические постоянные не лимитировали выбор номенклатуры заготовок данного комплекса. А это возможно только в том случае, если стекло отвечает 1 и 2 категориям по показателю преломления и по средней дисперсии.

На устойчивость оптических постоянных стекла основное влияние оказывают три фактора - точность составления шихты, стабильность стеклоустойчивости сосуда и мешалки, точность выполнения установленного режима варки стекла.

Для хорошей воспроизводимости оптических постоянных от варки к варке содержание компонентов шихты выдерживают с точностью до 0,01-0,05%. Нестабильность стекловаренного сосуда и мешалки, в результате чего керамика попадает в стекломассу, вызывает изменение показателя преломления. При этом, чем выше показатель преломления стекла, тем больше его изменение.

Между тем за период варки в стекломассу переходит около 0,5% огнеупора от его массы. В процессе варки стекла, особенно в периоды засыпки и осветления, происходит непрерывное изменение его состава в результате избирательного улетучивания компонентов смеси сырьевых материалов и самой стекломассы. Наиболее летучи фтор, окись свинца, фосфорный и борный ангидрид, окислы щелочных металлов. При переходе в газообразную фазу летучие компоненты оказывают разрушающее воздействие на поверхность сосуда и мешалки. Все это приводит к тому, что фактический состав стекла не только имеет отклонения от синтетического, но и не остается неизменным от варки к варке. Факторы варки особенно сильно сказываются на константах многосвинцовых и фтористых стекол, стекол с малым содержанием кремнезема. Так, например, в процессе осветления показатель преломления флинтгов снижается со скоростью от $0,3 \cdot 10^{-4}$ до $0,8 \cdot 10^{-4}$ в час, а тяжелых

флинт с еще большей скоростью. Поэтому затягивание периода осветления стекла, например, стекла марки ТФ5 всего на 2 часа может вывести его не только за пределы 1-й, Между тем за период варки в стекломассу переходит около 0,5% огнеупора от его массы. В процессе варки стекла, особенно в периоды засыпки и осветления, происходит непрерывное изменение его состава в результате избирательного улетучивания компонентов смеси сырьевых материалов и самой стекломассы. Наиболее летучи фтор, окись свинца, фосфорный и борный ангидрид, окислы щелочных металлов. При переходе в газообразную фазу летучие компоненты оказывают разрушающее воздействие на поверхность сосуда и мешалки. Все это приводит к тому, что фактический состав стекла не только имеет отклонения от синтетического, но и не остается неизменным от варки к варке. Факторы варки особенно сильно сказываются на константах многосвинцовых и фтористых стекол, стекол с малым содержанием кремнезема. Так, например, в процессе осветления показатель преломления флинта снижается со скоростью от $0,3 \cdot 10^{-4}$ до $0,8 \cdot 10^{-4}$ в час, а тяжелых флинтов с еще большей скоростью. Поэтому затягивание периода осветления стекла, например, стекла марки ТФ5 всего на 2 часа может вывести его не только за пределы 1-й, но и 2-й категории, несмотря на то, при составлении шихты состав был выдержан строго.

Таким образом, поддержание показателя преломления и средней дисперсии оптических стекол в пределах высшей категории представляется задачей довольно трудной. И несмотря на это 90 – 95 %, а по некоторым массовым маркам и все 100 % варок, наши заводы выпускают по 1 и 2 категории оптических постоянных. Столь высокая константность оптического стекла есть результат строгого соблюдения технологической дисциплины и создания определенной системы «исправления» синтетического стекла, способствующего поддержанию неизменным его фактического состава.

Сви́льность стекла

Свили представляют собой тонкие прослойки стекла, которые отличаются от остальной массы химическим составом, и следовательно величиной показателя преломления. Разность показателей преломления стекла и свилей мала (10^{-4} - 10^{-7} , редко 10^{-3}), поэтому невооруженным глазом последние не видны. По происхождению свили относят к керамическим и поверхностным дефектам. Большую часть стекла варят в керамических сосудах и перемешивают керамической мешалкой. При высокой температуре они вступают во взаимодействие со стекломассой, создавая на своей поверхности пограничный слой богатый продуктами разрушения керамики. Этот слой частично захватывается движущейся стекломассой и вмешивается в нее. Возникают свили «керамического» происхождения.

Некоторые компоненты стекла находящегося в расплавленном состоянии испаряются особо интенсивно, а другие практически целиком остаются в стекломассе. В результате состав, а вместе с тем и показатель преломления поверхностной пленки стекла отличается от состава и показателя преломления

внутренней массы. При размешивании стекломассы поверхностная пленка затягивается внутрь. Образуются свили «поверхностного» происхождения.

Пропеллерная мешалка, посредством которой производят перемешивание стекломассы, не обеспечивает ее полной однородности. В расплаве образуются потоки, направленные так, что вдоль оси сосуда стекломасса поднимается вверх, затем направляется к кромке и опускается вдоль стенок вниз, движется к центру дна сосуда, опять поднимается и т.д. Этот поток, захватывая пограничные и поверхностные слои, формирует химические неоднородности - свили. Плотность свилей керамического происхождения, как правило, меньше плотности расплава стекла. Поэтому они всплывают и вместе с поверхностной пленкой образуют слой, состав которого отличается от стекломассы и обладает повышенной вязкостью.

В вертикальном сечении сосуда картина распределения свилей представляет системы замкнутых контурных слоев. Слои деформированы в соответствии с профилем сосуда и по форме напоминают совокупность торических поверхностей. Слои, располагаясь упорядоченными потоками, наиболее грубы у поверхности, стенок и дна сосуда. Вблизи его оси тянется жгут свилей толщиной 10-30 мм («хвостовая свиль»), который портит однородность стекла центральной части. В процессе перемешивания расплава при температуре осветления, свили керамического и поверхностного происхождения растягиваются, утоньшаются и растворяются довольно быстро. Во время охлаждения и те и другие продолжают вмешиваться в стекломассу, но скорость их растворения постепенно уменьшается. В результате с некоторого момента времени они практически не «усваиваются» стекломассой, и ко времени вывоза сосуда из печи в нем устанавливается некоторая стационарная картина химических неоднородностей, обнаруживаемая в виде потока свилей. Эта картина может варьироваться в широких пределах. По внешнему виду, расположению и оптическим свойствам свили настолько разнообразны, что невозможно найти два одинаковых образца стекла.

Исследования с использованием чувствительных средств контроля показали, что, по-видимому, абсолютно бессвильного стекла нет, т.к. кроме грубых и средней грубости слоев обнаруживаются свили в виде тонкой сетки, наблюдаемые при ее определенной ориентации. Кроме того, установлено, что видимость слоев уменьшается по мере удаления от стенки сосуда к его центру. На этом основании сделан вывод, что граница обнаружения свилей обусловлена методом наблюдения и что они распространяются вероятнее всего до центра сосуда, имея слоистое строение аналогичное строению четко выраженных свилей.

С введением пропеллерного способа перемешивания стекломассы практически были ликвидированы нитевидные свили и преобладающими стали свили в виде слоев. Так как одиночный слой очень тонок, а его показатель преломления мало отличается от основы, он не оказывает существенного влияния на распространение света в приборе и на качество изображения. Поэтому видимость одиночной свили, как критерий качества стекла, стала

постепенно заменяться оценкой вредности всех свилей в данной заготовке. Решающее значение приобрело исследование распределения свилей. В практику контроля качества стекла вошло понятие «поток свилей». Поток, состоящий из большого числа параллельных свилей, влияет на качество изображения значительно сильнее одиночного слоя.

По своему строению свиля многообразны и сколь либо рационально классифицировать их очень трудно. Невозможность подобрать одинаковые по оптическим характеристикам свиля, которые могли бы быть эталонами, приводила к ограничению условий контроля качества стекла по этому параметру. Поскольку строго предсказать поведение свиля в оптической системе, даже на основании вызываемых ею искажений интерференционной картины, не представляется возможным, то вредность данного дефекта стекла оценивают лишь качественно. Поэтому на контроль свилей методом теневой проекции, по ГОСТ 3514-76 и ГОСТ 3521-69, следует смотреть как на сравнительно простой, удобный и дешевый прием, помогающий отсортировать сравнительно грубые свиля и их скопления, которые могут портить чистоту поля зрения и качество изображения.

Ранее (1950 - 1952 г.), при отбраковке стекла для астрономических объективов, применялись теневые приборы по схеме Фуко. Из-за больших радиусов сферических зеркал и визуального рассмотрения теневых картин установка обладала разрешающей способностью порядка $0,01\lambda$, которая недостаточна для обнаружения свильных потоков. Деформации волнового фронта представлялась глазу плавными. Вследствие этого, а также из-за трудностей обеспечения высоких требований к качеству поверхностей, теневые приборы распространения не получили. В схеме Фуко: А - испытуемое стекло, Е - сферическое зеркало с центром в точке О, Н - нож Фуко, О - светящаяся точка. Даже в том случае, если диск А имеет строго плоские и параллельные поверхности, он вносит сферическую абберацию, которая зависит от величины показателя преломления стекла, толщины заготовки и от апертурного угла φ . Для уменьшения абберации пользуются малыми значениями угла φ , т.е. применяют длиннофокусные зеркала с отношением диаметра к радиусу кривизны порядка 1:10. Если диск А наклонен по отношению к оси установки, то возникают абберации наклонных пучков - кома и астигматизм. Абберации, при данном угле наклона и толщине диска будут тем меньше, чем меньше апертурный угол φ . Это также заставляет пользоваться зеркалом с уменьшенным относительным отверстием. Если диск имеет клиновидность, то и в этом случае возникают абберации комы и астигматизма, которые увеличиваются с ростом апертурного угла. Это опять же заставляет применять зеркала с малым относительным отверстием. Все это, в конечном итоге, привело к исключению метода Фуко для контроля свильности стекла.

Метод контроля свильности по ГОСТ 3514-76 и ГОСТ 3521-69 основан на способности глаза различать разность освещения экрана. В соответствии с указанными ГОСТами для оптического бесцветного стекла всех серий установлены две категории свильности:

Категория	Характеристика свильности
1	не допускаются свили, обнаруживаемые при просмотре на установках, градуированных по контрольному образцу сравнения 1-й категории по ГОСТ 3521-69.
2	не допускаются свили, обнаруживаемые при просмотре на установках, градуированных по контрольному образцу сравнения 2-й категории по ГОСТ 3521-69.

В зависимости от числа направлений просмотра, в которых заготовка стекла должна соответствовать указанной категории, установлены 2 класса свильности:

Класс	Число направлений просмотра
А	Две взаимно перпендикулярных
Б	Одно

Категорию свильности определяют на теневой установке, используя свойство свилей отклонять проходящие через них лучи. При освещении образца 1 точечным источником 2 света, на экране 3 будет видна теневая картина 4 свили 5. Критерием оценки является расстояние от образца до экрана, на котором свиль перестаёт быть видимой. Если при диафрагме 6 диаметром 2 мм и расстоянии от образца до экрана равном 500 ± 50 мм (определено по эталону 1-й категории) видимость свили пропадет, стекло относят к 1-й категории. Если видимость свили не исчезает, то ставят диафрагму диаметром 4 мм.

мм, что соответствует условиям контроля 2-й категории. Если стекло соответствует ей, то свили обнаруживаться не должны.

Свилы вызывают деформацию волнового фронта, проходящего через деталь, нарушают чистоту поля зрения, могут являться источником разрушения изделия, вызывают астигматизм обрабатываемых поверхностей. Чистота поля зрения нарушается вследствие того, что перераспределяется световая энергия. Наиболее вредны слабые потоки свилей, у которых Δn и толщина малы. При большом Δn свет рассеивается свилью под большим углом. Объясняется это тем, что как правило показатель преломления $n_{св}$ свили меньше показателя преломления $n_{ст}$ стекла и она (свиль) действует подобно отрицательной линзе.

Если Δn , а вместе с тем и угол φ малы, то плотность рассеянного света, а следовательно и вред от такой свили (или потока свилей) будет больше. Напряжения на границе свиль-стекло возникают из-за неодинакового состава и соответственно разных физико-химических свойств массы стекла и свили.

Напряжения свыше 600 кг/см^2 могут вызвать разрушение стекла. При наличии в стекле потока ориентированных свилей жесткость конструкции детали в разных направлениях становится неодинаковой, что и приводит к астигматизму обрабатываемых поверхностей.

Знание закономерностей распределения свильных слоев в сырьевом стекле определяет его рациональное использование, в частности:

- заготовки для призм Дове получать прессованием не удастся. Их вырезают из удаленных от краев кусков блочного стекла так, чтобы направление луча входящего в призму было перпендикулярно большим поверхностям блока. При этом свильные слои имеющиеся в стекле будут расположены перпендикулярно параллельным граням призмы и их влияние на волновой фронт станет наименьшим по сравнению с другими способами раскроя;

- при изготовлении заготовок активных элементов ОКГ из стекла легированного неодимом и содержащего неоднородности в виде ориентированных свильных потоков, их целесообразно располагать параллельно, или под малым углом, к волновому фронту генерируемого

излучения. Такая ориентация заготовок является необходимым условием уменьшения расходимости генерируемого излучения;

- при изготовлении крупногабаритных призм, с размерами катетных граней порядка 100-160 мм, трудности в удовлетворении требований по свилем резко возрастают. Удовлетворить их можно только при раскросе блочного стекла с учетом расположения свильных слоев. Например, работоспособный светоделительный кубик со стороной 100 мм можно получить если свильные слои будут расположены параллельно гипотенузной грани;

- при крупногабаритной линзовой оптики оптимальными являются заготовки, у которых свильные слои параллельны преломляющим поверхностям детали.

Стекло контролируемое по ГОСТ 3514-76 и по ГОСТ 3521-69 используют по следующему назначению:

- 1Б - для объективов интерференционных приборов, астрономических и коллиматорных приборов, микроскопов, биноклей и др.

- 2Б - для линз окуляров, конденсоров, для сеток и др. деталей.

- 1А или 2А - для отражательных и оборачивающих призм, бипризм.

- 1А - для спектральных и разделительных призм.

Пузырность стекла.

Пузыри представляют собой замкнутые полости в стекле заполненные газом различной степени разрежения. Состав газа зависит от химического и шихтного состава стекол, условий варки. В пузырях стекол на основе сульфатсодержащих шихт часто содержится сернистый газ, в карбонатных - углекислый. В большинстве пузырей стекол любого типа содержится азот. Зная состав газа легче устанавливать причины возникновения пузырей и предотвращать их образование.

Практически ни одно стекло не может быть сварено без пузырей, только в одном их меньше, в другом больше. Возникновение пузырей вызывается разными причинами, в частности:

- *химические реакции*. Сырьевые шихтные материалы представляют собой химические соединения, которые вследствие термического разложения и химических реакций выделяют газы. Объем газов во много раз превышает объем образующейся стекломассы. Так, 1 кг смеси содержащей 10 масс% Na_2CO_3 , 8 масс% H_3BO_3 или 82% SiO_2 , выделяет 0,036 м³ CO_2 и 0,026 м³ водяных паров, а при температурах варки объем выделяющихся газов благодаря термическому расширению становится больше в 4-5 раз. В то же время известно, что для образования 1000 шт. пузырей диаметром 0,2 мм достаточно всего 1 см газа. Образующаяся стекломасса буквально пронизывается газами, химическая активность которых особенно велика в момент выделения.

- *пузыри из огнеупора*. Высокоразвитая поверхность стекловаренного сосуда предоставляет в распоряжение пересыщенного газами расплава множество центров зарождения газовой фазы. Источником пузырей являются и газы из пор керамики, которая интенсивно взаимодействует с расплавленным стеклом. Интенсивность взаимодействия тем выше, чем меньше вязкость стекла. Так известно, что разьедаемость шамотного порошка тяжелым кроном в 20 - 26 раз больше, чем кроном. Соответственно пузырей в стеклах ТК больше, чем в стеклах типа К. Это согласуется с общим объемом пор, освобождающихся при разьедании шамотного или высокоглиноземистого сосуда. В результате разьедания 1 кг керамики в стекломассу перейдет около 72 см³ газа. Еще одним источником газовых пузырей служит вытеснение газа из сообщающихся пор керамики. Скорость вытеснения газовых пузырей из пор зависит от вязкости расплава. Скорость особенно велика у стекол типа ТК, вязкость которых при температурах осветления, ниже чем у стекол типа К.

Уменьшение числа пузырей возникающих из пор керамики вследствие ее разьедания стекломассой достигают при использовании сосудов из плавленного кварца, применением высокоглиноземистых намазок. Беспузырные стекла получают также при варке в сосудах из платины.

Сопоставление количества пузырей в 1 кг стекла разных марок с их химическим составом показывает, что при варке в керамических сосудах их тем меньше, чем больше содержание (мольное) кремнезема и глинозема. Соответственно, наименее пузырными являются стекла типов: К, ЛК, ЛФ, Ф. Наиболее пузырными - ТК, ТФ, некоторые марки БФ. Это объясняется тем, что при варке стекла в керамическом сосуде основным источником пузырей являются заполненные газом поры огнеупорного материала, а его разрушение под воздействием расплава этих стекол протекает различно.

Для правильного отбора стекла, особенно в тех случаях, когда нужны беспузырные заготовки, необходимо знать, как пузыри распределены в объеме сосуда. Известно, что в верхних слоях стекломассы число крупных пузырей больше, чем в нижних. Объясняется это законом Стокса, согласно которому скорость подъема пузырей пропорционально квадрату их диаметра. Число

пузырей в 1 кг стекла увеличивается от центра к периферии в 10 раз, а в стекле лежащем непосредственно у самой поверхности сосуда в 100 раз. По мере перемещения от нижних слоев стекла к верхним число пузырей в 1 кг также растет.

Пузырность характеризуют диаметром наибольшего пузыря в заготовке и средним числом пузырей в 1 кг сырьевого стекла.

В зависимости от размера пузырей стекло разделено на категории:

Категория	1	1a	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Диаметр пузыря, мм не более	0,002	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0	2,0	3,0	5,0

В зависимости от среднего числа пузырей диаметром более 0,03 мм в 1 кг сырьевого стекла предусмотрено 6 классов:

Класс	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж
Среднее число пузырей	3	10	30	100	300	1000	3000

В стекле всех категорий, число пузырей диаметром до 0,03 мм включительно, не должно превышать числа пузырей допускаемых по соответствующему классу. Для стекла заготовок 1-й категории пузырности не назначают.

Класс пузырности стекла величина справочная. Его оценивают только при запуске стекла - в межоперационном контроле. Далее он нигде не учитывается.

К пузырям приравнивают камни (инородные не расплавившиеся включения), центры узловых свилей (расплавившиеся, но не размешанные включения), кристаллы (включения, образующиеся в результате кристаллизации). По размеру наибольшего включения, допускаемого в единице массы сырьевого стекла или заготовки, установлено 5 категорий:

Категория включения	1	2	3	4	5
Размер включения, мм не более	0,2	0,5	1,0	2,0	3,0

Контроль пузырности стекла (ГОСТ 3522-69) основан на свойстве пузырей рассеивать падающий на них свет. Испытуемую заготовку, освещаемую источником света, просматривают на фоне черного экрана. Размер пузырей

определяют сравнением с образцами, содержащими контрольные пузыри. Среднее количество пузырей в 1 кг сырьевого стекла определяют по образцам, изготовленным из его проб.

Пузыри, имеющиеся в стекле, вносят ряд дефектов в работу оптической системы, в частности: происходит рассеяние света, при большом количестве

пузырей снижается прочность изделия, а такие детали, как активные тела ОКГ, при наличии включений разрушаются в процессе накачки, пузыри вышедшие на поверхность детали приводят к располировке и возникновению местных ошибок. Вскрытые пузыри не позволяют наносить рисунок на поверхность детали, а так же мешают наблюдению и измерению объекта.

Стекло категорий 1,1а, 2 и 3 используют для деталей, расположенных вблизи или непосредственно в плоскости изображения (призмы, коллективы, выравнивающие стекла больших размеров и др.). Стекло для сеток, лимбов, коллиматоров, должно соответствовать категориям 1 или 1а. Пузыри в стекле для объективов всех систем заметного влияния на качество изображения не оказывают. Так, в любительских фотообъективах, объективах зрительных труб типа бинокля и геодезических приборов, допускают пузырность 5-7 категорий (0,5-1,0 мм) и классы Г,Д, Е (100-1000 шт.). В объективах зрительных труб и фотообъективах большого диаметра допускают пузыри 7-9 категорий (1-3 мм) и грубее. Такие же требования предъявляют к стеклу светофильтров.

Оптическая однородность стекла.

Оптическая однородность характеризует степень постоянства показателя преломления в объеме материала заготовки. При установившейся температуре и данной длине волны λ света показатель преломления должен быть одинаков в каждом элементарном объеме стекла. Его непостоянство вызывает деформацию волнового фронта, следствием которой является ухудшение качества изображения, снижение разрешающей способности оптической системы.

Однородность - основное свойство оптического стекла, отличающее его от стекла иного назначения. Однако даже в оптическом стекле однородность

нарушается. Образуются свили, возникают напряжения и структурная неоднородность. Поэтому необходимо определить ту степень однородности стекла, которая еще обеспечит прибору нужное качество.

Однородность можно оценить прямо, путем измерения разности показателей преломления в различных точках стекла. Однако выполнить такие измерения можно лишь с помощью сложной интерферометрической методики, что непригодно для массового контроля качества стекла. Поэтому используют косвенные методы, оценивающие однородность стекла с учетом условий работы оптического прибора - измерение разрешающей способности, искажение дифракционного изображения, величины волновой аберрации. На измерении разрешающей способности основан метод оценки однородности заготовок стекла размером до 250 мм. Критерием является численное значение отношения угла ϕ разрешения дифрактометра, в параллельный пучок которого введена заготовка, к теоретическому углу ϕ_0 разрешения самой установки. В

зависимости от величины этого отношения стекло разделено на 5 категорий:

Категория	1	2	3	4	5
Отношение φ/φ_0 , не более	1,0	1,0	1,1	1,2	1,5

Примечание: стекло 1-й категории должно отвечать дополнительному требованию, а именно: при просмотре на установке с точечной диафрагмой, которую ставят вместо штриховой мирры, дифракционное изображение точки должно представлять круглое светлое пятно, окруженное концентрическими с ним кольцами. Картина не должна иметь разрывов, углов и др. заметных на глаз отклонений.

Дифрактометр состоит из зрительной трубы 1, стола 2, на котором размещен испытуемый образец 3, коллиматора 4 с миррой 5, диафрагмы 6, осветителя 7.

Контроль пузырьности

Пузыри — это замкнутые полости в стекле, заполненные газом различной степени разрежения. Камни, кристаллы и головки узловых свилей при оценке качества стекла на пузырьность приравниваются к пузырям.

Метод определения пузырьности оптического бесцветного стекла заключается в просмотре его на темном фоне при направленном боковом освещении, когда пузыри вследствие рассеяния ими света хорошо видны. Оптическое цветное стекло просматривают в проходящем свете, при этом изображение пузырей проецируется на экран или сетчатку глаза.

Для определения пузырьности заготовок из бесцветного стекла с пузырями диаметром более 0,05 мм служит установка (рис. 7), состоящая из осветителя 1 (кинопроекционная лампа 300 Вт), щелевой диафрагмы 2, конденсора 3 диаметром 12 - 15 см и экрана 5, создающего темный фон. Заготовка 4 должна иметь полированные поверхности. Если испытываются стекла в кусках неправильной формы или линзы с полированными поверхностями, то такие образцы погружают в кювету с иммерсионной жидкостью, показатель преломления которой подобран с точностью $\pm 0,002$ к показателю преломления исследуемого образца. Глаз наблюдателя 6 рассматривает пузыри на темном фоне. Диаметр пузыря определяют визуально, сравнением с пузырями в контрольных образцах. Определение среднего числа пузырей в 1 кг стекла начинают с подсчёта числа пузырей диаметром более 0,5 мм, а затем по другим образцам определяют число пузырей меньшего размера. При определении диаметра наибольшего пузыря просматриваемое стекло освещают пучком света так, чтобы его внутренняя часть была освещена через одну из боковых поверхностей. Поверхности, перпендикулярные к освещенной, через которые ведется просмотр, по возможности следует оставлять в тени. Это достигается с помощью диафрагм, регулирующих диаметр сечения пучка, выходящего из конденсора.

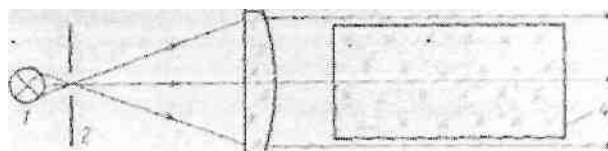


Рис. 7. Схема установки для определения пузырности стекла

Контроль темного стекла, пропускающего инфракрасные лучи, с пузырями диаметром 0,2 мм и более проводится на установке с электронно-оптическим преобразователем. Изображения пузырей рассматриваются на экране электронно-оптического преобразователя с помощью лупы $2,5^{\times} - 4^{\times}$ по ГОСТу 10513 - 63. В установке используют осветитель с лампой накаливания (12 В, 100 Вт), конденсор диаметром - 10 см, ирисовую диафрагму и светофильтр КС-19.

Контроль оптической однородности

Оптическая однородность материала характеризуется постоянством показателя преломления заготовки или готовой детали по всему объему. Определение оптической однородности осуществляется с помощью коллиматора *К* и зрительной трубы *Т* (рис.8), снабженных дополнительными приспособлениями: источником света 1 (обычно электрическая лампа накаливания), конденсором 2 и светофильтром 3.

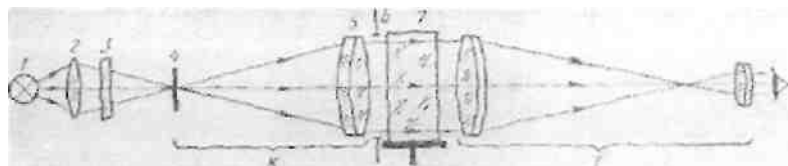


Рис. 8. Схема установки для определения оптической однородности стекла

В фокальной плоскости коллиматорного объектива 5 устанавливают штриховую миру 4 или точечную диафрагму, а после объектива диафрагму 6. В параллельном пучке лучей между коллиматором и зрительной трубой помещают исследуемую заготовку 7 или деталь, обычно выполненные в виде плоскопараллельных пластинок круглой или прямоугольной формы.

Сущность метода основана на сравнении разрешающей способности объектива коллиматора при введении заготовки в параллельный пучок лучей и без нее. Очевидно, что если исследуемый оптический материал абсолютно однороден по показателю преломления, а поверхности заготовки имеют плоскую форму, то разрешающая способность объектива коллиматора не изменится после введения ее в параллельный пучок. Поэтому для оценки оптической однородности используется коэффициент

$$K = \frac{\varphi}{\varphi_0}$$

где φ - предельный угол разрешения коллиматора, за которым установлен исследуемый образец (заготовка или деталь);

φ_0 — теоретический угол разрешения объектива коллиматора.

Вместо угла φ_0 можно использовать фактический предельный угол разрешения объектива коллиматора, если последний отличается от угла (φ_0 не более, чем на один элемент мира). Для вычисления угла φ_0 можно пользоваться формулой

$$\varphi_0 = 120 / D$$

где D — диаметр диафрагмы коллиматора в миллиметрах, равный диаметру

круглой заготовки или наименьшей стороне прямоугольной заготовки.

Фокусное расстояние объектива коллиматора должно быть не менее 600 мм, а

относительное отверстие — не более 1:9. Дифракционное изображение точки в фокальной плоскости объектива должно состоять из круглого светлого диска, окруженного концентрическими кольцами, т. е. иметь характерный вид кружка Эри. Клиновидность заготовок, готовых деталей и контрольных образцов, когда в качестве источника излучения применена лампа накаливания, не должна превышать 2'. При использовании монохроматических источников света допуск на клиновидность может быть увеличен до 1°. Если заготовка имеет шлифованные поверхности, то на них накладывают полированные плоскопараллельные пластинки, смоченные иммерсионной жидкостью, показатель преломления которой не должен отличаться от показателя преломления заготовки более чем на 0,002 для линии спектра D (длина волны $\lambda = 589,3$ нм)

При невозможности подбора требуемых жидкостей поверхности испытуемого

образца необходимо полировать с точностью до трех интерференционных полос, при этом местные ошибки составляют не более 0,3 полосы.

Собственно процесс контроля состоит из следующих основных этапов.

1. Поверхности образца, через которые ведется просмотр, тщательно протирают. Если эти поверхности шлифованные, то на них накладывают пластины, смоченные иммерсионной жидкостью.

2. Образец устанавливают в держателе с помощью прокладок так, чтобы не возникали упругие деформации, вызывающие искажение изображения мира.

3. Включают осветитель и изображение мира совмещают с центром поля зрения окуляра зрительной трубы. Увеличение окуляра должно соответствовать размеру рассматриваемых элементов мира.

4. Определяют предельно разрешаемый элемент мира, затем по таблицам находят соответствующий угол φ . Для оценки стекла 1-й категории в фокальной плоскости объектива коллиматора устанавливают точечную диафрагму (диаметр отверстия от 0,007 по 0,1 мм) рассматривают ее изображение с помощью окуляра сильного увеличения или микроскопа. Если оптическую однородность определяют с целью установления категории оптического стекла или его официальной аттестации, то при выполнении

измерений необходимо соблюдать требования, предусмотренные в ГОСТе 3518—69.

Двойное лучепреломление.

В процессе охлаждения стекла от температуры отжига в нем возникают механические напряжения вследствие неизбежных перепадов температуры между центральными и краевыми участками заготовки, снижая прочность стекла. Это иногда приводит к самопроизвольному нарушению целостности заготовки при ее нагревании или механической обработке, способствует искривлению точно обработанной поверхности при обдирке и шлифовке другой поверхности.

Напряжения вызывают двойное лучепреломление, которое заключается в том, что при прохождении через стекло луч света распадается на два луча, поляризованные в двух взаимно перпендикулярных направлениях и распространяющиеся с различной скоростью. Двойное лучепреломление определяется разностью хода этих двух лучей (выраженной в нанометрах на 1 см пути луча в стекле) и может служить мерой остаточных напряжений, а следовательно , и качества отжига стекла.

По двойному лучепреломлению оптическое стекло в заготовках размером до 300 мм разделяется на 6 категорий в соответствии с табл. 1.4. В этом случае разность хода измеряется в середине заготовки в направлении ее наибольшего размера. Только стекло, поставляемое по категории 1а и предназначенное для поляризационных приборов, дополнительно просматривается в рабочем направлении заготовки.

Таблица 1.4.

Категория по двойному лучепреломлению	1	1а	2	3	4	5
Допускается разность хода, нм/см пути	2	6	6	10	20	50

Разность хода, измеренная в направлении наибольшего размера, не имеет прямой связи с оптической однородностью стекла, а служит лишь для суждения о прочности заготовки и характеризует напряжения, влияние которых проявляется при механической обработке детали. Для оценки последнего фактора экспериментально найдена следующая формула, справедливая для марки стекла К8:

$$N = l,1 \times 10^{-3} d \delta$$

где N - искривление поверхности, выраженное числом интерференционных полос по диаметру заготовки; l - толщина заготовки, см и δ - разность хода, измеренная в направлении диаметра d заготовки и

выраженная в нм/см.

Расчет по этой формуле показывает, что для большей части линз окуляров, сеток и защитных стекол можно допускать стекло с напряжениями, отвечающими 4-й категории, для линз объективов и оборачивающих систем необходимо требовать стекло по 3-й категории, а для призм - по 2-й и 3-й категориям. Учитывая необходимый запас прочности, следует давать на 1-ю категорию более жесткие допуски, и это не будет отвечать рекомендациям, указанным в приложении к ГОСТ 3514-67.

Если кругление и центрировка линзы для диска могут быть проведены до полировки, допустимые напряжения можно увеличить до 50 нм/см, если последней операцией будет кругление, то нужно требовать 3 и 4-ю категорию, если же последней операцией будет сверление или фрезерование, то для сохранения оптически точной поверхности должно отвечать 1 - й категории.

За 16 лет хранения заготовок с двойным лучепреломлением в пределах от 3 до 400 нм/см, не изменилось ни значение этой величины, ни форма полированной поверхности.

Самопроизвольное нарушение целостности детали может наступить лишь при очень высоких напряжениях. Так, для большинства стекол, давление в $9,8 \times 10^4$ Па (1 кгс/см^2) вызывает двойное лучепреломление в 3,5 нм/см. Поэтому в стекле, удовлетворяющем даже 5-й категории, усилие не превышает $14,7 \times 10^4$ Па (15 кгс/см^2). В тоже время сопротивление стекла на разрыв равно $(408-612 \times 10^4)$ ПА ($400-600 \text{ кгс/см}^2$), а на сжатие - почти в 10 раз больше. Таким образом, стекло, отвечающее 5-й категории по двойному лучепреломлению, обладает 30- кратным запасом прочности на растяжение.

В случае небольших заготовок двойное лучепреломление, измеренное в направлении наибольшего размера, не может оказывать существенного влияния на качество оптической системы. Поэтому с точки зрения неоднородности показателя преломления в мелких заготовках нет необходимости нормировать двойное лучепреломление, тем более, что такая неоднородность прямо скажется на разрешающей силе заготовки, которая особо нормируется и контролируется.

Показатель ослабления

До последнего времени единственной нормируемой величиной характеризующей потери света в стекле, был коэффициент показателя ослабления μ_λ . Он равен отношению потока белого света, поглощенного стеклом на пути 1 см, к световому потоку в начале этого пути и выражается в процентах.

По показателю ослабления излучения источника А устанавливают восемь категорий, характеризующих предельными значениями показателя ослабления μ_λ , для источника излучения А и приемника излучения, спектральная чувствительность которого приведена к относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения для дневного зрения.

В таблице1 приведены значения коэффициента внутреннего пропускания τ_λ слоя стекла толщиной 10 см для источника А, соответствующие наибольшим значениям показателя ослабления.

Таблица 1.5

Категория по показателю ослабления излучения источника А	Показатель ослабления μ_λ , см ⁻¹	Коэффициент внутреннего пропускания для толщины 10 см, τ_λ не менее
1	0,0002-0,0004	0,991
2	0,0005-0,0009	0,980
3	0,0010-0,0017	0,962
4	0,0018-0,0025	0,944
5	0,0026-0,0035	0,925
6	0,0036-0,0045	0,902
7	0,0046-0,0065	0,861
8	0,0066-0,0130	0,741

Желательно, чтобы потери света в стекле были бы минимальными, в пределе равнялись нулю. В лучших стеклах, сваренных в производственных условиях из наиболее чистых сырьевых материалов, они составляют 0,1-0,2%, а в среднем - 0,5-0,6%.

Установлено, что основной вклад в коэффициент светопоглощения оптического стекла вносят примеси красящих элементов - железа, марганца, меди, хрома, никеля и кобальта, которые попадают в него вместе с сырьевыми материалами, с продуктами разрушения варочного сосуда и мешалки, из атмосферы печи и производственных помещений.

При принятом методе измерения коэффициент светопоглощения стекла равен сумме потерь (на 1 см пути в стекле) от поглощения и от рассеяния. Потери света от рассеяния оптических стекол лежат в пределах от 0,002 до 0,082% на 1 см пути в стекле. Если бы стекло вообще не содержало никаких красящих элементов, то и тогда потери света в стекле большинства марок были бы порядка сотых долей процента. И только стекла некоторых составов, с ничтожно малым рассеянием, обладали бы коэффициентом светопоглощения в тысячные доли процента.

Коэффициент светопоглощения оптических стекол в зависимости от назначения приборов выбирается в соответствии и с таблицей 2.

Таблица 2

Коэффициенты светопоглощения для приборов различного назначения

Группа систем и приборов	Название оптических деталей и приборов	пределы	категория
I	Волоконные жгуты, бесцветная основа стекла для оптических квантовых генераторов	до 0,1	I
II	Объективы для цветной передачи, спектральные призмы, системы, работающие в ограниченной части спектра (УФ, ИК, красной), все военно-полевые и космические приборы с длиной пути в стекле 200 мм и выше	0,11 - 0,2	1
III	Оптические приборы, в которых общая длина пути света в стекле лежит в пределах 50-200 мм	0,21 - 0,4	2
IV	Оптические приборы, в которых общая длина пути света в стекле не мене 50 мм	0,41 - 0,6	1 - 3

Коэффициент светопоглощения в видимой, ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра

Оптические стекла отличаются высокой прозрачностью, но при больших толщинах они заметно поглощают свет, что сопровождается в ряде случаев легкой желтоватой или зеленоватой окраской. Светопоглощение стекол зависит главным образом от степени чистоты шихтных материалов и качества стекловаренных горшков.

Прозрачность оптического стекла в видимой области спектра характеризуется величиной коэффициента светопоглощения, определяемого как отношение потока белого света, поглощенного, стеклом на пути 1 см, к потоку в начале этого пути.

В соответствии с ГОСТом 3514—67 установлены следующие семь категорий стекла по коэффициенту светопоглощения:

Категория	...	000		00	0	12	3	4
Коэффициент светопоглощения в % не более		0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,5	3,0

Стекло категорий 000, 00, 0 применяют для изготовления деталей многолинзовых систем, призм с большой длиной хода луча, деталей приборов, в которых высокое светопропускание является основным показателем качества.

Для изготовления оптических деталей любительских фотографических и киносъёмочных объектов применяют оптические стекла 1-й и 2-й категорий по светопоглощению.

Коэффициент светопоглощения определяют методом, основанным на измерении ослабления светового потока при прохождении через образец. Метод заключается в определении коэффициента пропускания τ как отношения

светового потока Φ_1 , прошедшего через образец, к падающему на него световому потоку Φ :

$$\mu_{\lambda} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2}$$

Измерения выполняют на образцах, изготовленных в форме параллелепипеда с поперечным сечением не менее 25х25.мм. Торцовые стороны образцов должны быть свежеполированы на смоле. Не допускаются грубые царапины, следы недополировки, располированные пузыри диаметром более 0,5 мм.

Длина образца для определения коэффициента светопоглощения стекла категорий 000 и 00 должна быть 180 - 200 мм, для более низких категорий 100 ± 10 мм.

Для измерения коэффициента пропускания τ применима любая аппаратура, обеспечивающая точность; измерения $\pm 0,5$ %.

Широко используется в промышленности фотометр, состоящий из осветителя, шарового приемника с фотоэлементом и гальванометром (или микроамперметром) и столика для контролируемого образца (рис. 9). Осветитель представляет собой коллиматор, состоящий из объектива 3, в фокальной плоскости которого расположена диафрагма 2, освещаемая лампой накаливания с помощью конденсорной линзы 1. Лампа накаливания получает питание от источника постоянного напряжения или источника переменного, но стабилизированного напряжения. Точность стабилизации должна быть не менее 1 %. За объективом коллиматора располагается ирисовая диафрагма 4, позволяющая изменять сечение пучка лучей, выходящих из коллиматора.

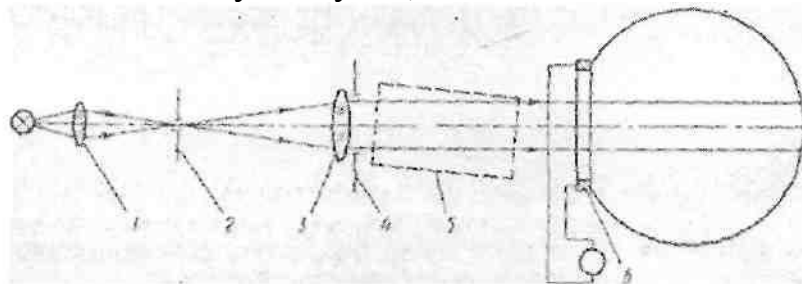


Рис. 9. Схема фотометра для измерения коэффициента светопоглощения стекла

Приемник оформлен в виде светомерного шара, окрашенного внутрисернистым барием. В стенку шара вмонтирован селеновый фотоэлемент 6. Селеновые фотоэлементы, применяемые в качестве приемников, должны быть свободны от тока сползания, изменение фототока (утомляемость) фотоэлемента через 5 мин после начала работы при освещенности поверхности 300 лк не должно превышать $\pm 2\%$. Для регистрации фототока рекомендуются магнитоэлектрические микроамперметры типа М-95 теньвым указателем отсчета или зеркальные гальванометры, заключенные в отсчетное устройство Уф-206.