



# Оптические материалы и технологии



## Оптические материалы и технологии

1. Классификация оптических материалов по типу взаимодействия с излучением, строению и области применения. Спектральные и интегральные характеристики оптических материалов.
2. Зонное строение и оптические свойства металлических, полупроводниковых и диэлектрических материалов.
3. Оптическое поглощение и люминесценция в модели конфигурационных кривых. Правило Стокса; антистоксова люминесценция. Энергетический и квантовый выход люминесценции.
4. Стеклообразное и кристаллическое состояние вещества. Определение стекла. Понятие интервала превращения.
5. Оптическое бесцветное стекло. Определение, состав, классификация промышленных стекол по их оптическим постоянным.

6. Показатели качества оптического стекла и методы их определения. Связь качества стекол с допусками на их оптические свойства.
7. Физико-химические свойства стекол. Показатели твердости, химической стойкости стекла.
8. Варка оптического стекла. Виды стекловаренных печей. Этапы технологического процесса варки.
9. Способы разделки стекла и производства заготовок оптических деталей путем термической и механической обработки.
10. Типы оптических деталей. Допуски на чистоту полированных поверхностей. Основные, вспомогательные и специальные операции обработки стекла. Способы обработки свободным и связанным абразивом.

## **ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ КУРСА**

### **"Оптические материалы и технологии"**

**Цель - получение студентами знаний по материаловедению в оптико -механической и светотехнической отраслях промышленности.**

**После изучения курса студенты должны:**

**•иметь знания о природе и свойствах оптических, светотехнических и конструкционных материалов, о физических принципах, лежащих в основе управления характеристиками материалов, технологических приемах и методах получения оптических материалов с заданными свойствами.**

**•уметь в лабораторных условиях экспериментально определять оптические и светотехнические характеристики материалов.**

**Задачи: рассмотреть структуру и свойства оптических, светотехнических и конструкционных материалов, вопросы технологии производства и контроля номируемых параметров оптических материалов и типовых деталей.**

## УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Вильчинская С.С., Лисицын В.М. Оптические материалы и технологии. Учебное пособие. - 2011 г.
2. Справочник технолога-оптика / М.А.Окатов и др. – 2-е изд.- СПб.: Политехника, 2004.-679 с.
3. В.Г.Зубаков и др. . Технология оптических деталей / М.: "Машиностроение".-1985.-368 с.
4. Ландсберг Г.С. Оптика. Учеб. пособие: Для вузов. – 6-е изд.- М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.-848с.

- **ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ** – это материалы прозрачные для лучей света и имеющие высокую оптическую однородность. В ряде случаев оптическим материалам должны быть присущи особые свойства, например, избирательное пропускание света, стойкость к радиационному облучению и др.
- **ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ** различаются по строению, св-вам, назначению, а также по технологии изготовления.

## Классификация оптических материалов по типу взаимодействия с излучением

С потоком излучения, распространяющимся в среде могут происходить следующие изменения:

- **Рассеяние** части потока в результате отражения от частиц, имеющих  $n$  отличающийся от  $n$  среды;
- **Поглощение** части потока излучения средой с преобразованием в другие виды энергии (тепло, генерация носителей тока, эмиссия электронов и ионов);
- **Пропускание** части потока через среду;
- **Поглощение** части потока излучения средой с преобразованием в излучение другого спектрального состава (**люминесценция**);
- **Изменение спектрального состава излучения**, вследствие селективного поглощения энергии излучения средой;
- Изменение **поляризации** отраженного и пропущенного потоков;
- Изменение **направления** распространения.

## По назначению различают:

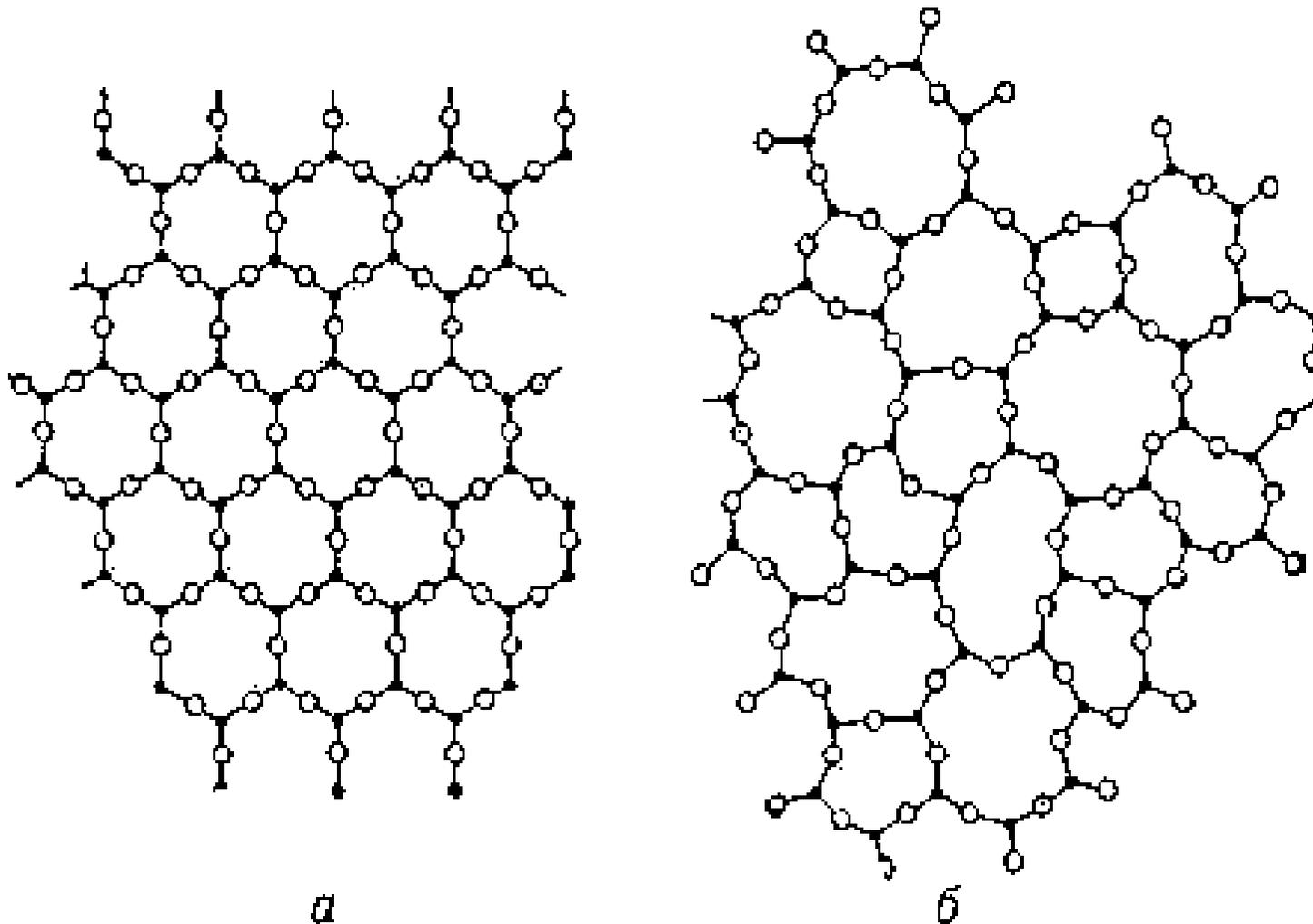
- О. м. для элементов оптич. устройств;
- просветляющие, отражающие и поглощающие покрытия;
- электрооптич., магнитооптич., акустооптич. материалы;
- лазерные материалы;
- материалы для преобразования света в тепло и электричество;
- в виде композитов, порошков, эмульсий: дисперсные фильтры, люминесцирующие стекла, красители для лазеров;
- оптич. клеи (с определенным показателем преломления).

# Классификация оптических материалов по строению



Расплавленное вещество при охлаждении переходит либо в **кристаллическое**, либо в **стеклообразное** состояние.

<b>Кристаллическое состояние (кристалл)</b>	<b>Стекло</b>
Атомы расположены в строго определенном порядке, называемом атомной решеткой ( <b>дальний порядок</b> )	порядок в той или иной мере нарушен ( <b>ближний порядок</b> -упорядоченность на расстояниях, сравнимых с межатомными)
Изотропные Анизотропные	Изотропные свойства
Имеет определенную температуру плавления и определенную температуру затвердевания	Не имеет определенной температуры плавления



Строение кварца  $\text{SiO}_2$ :

а — кристаллического;

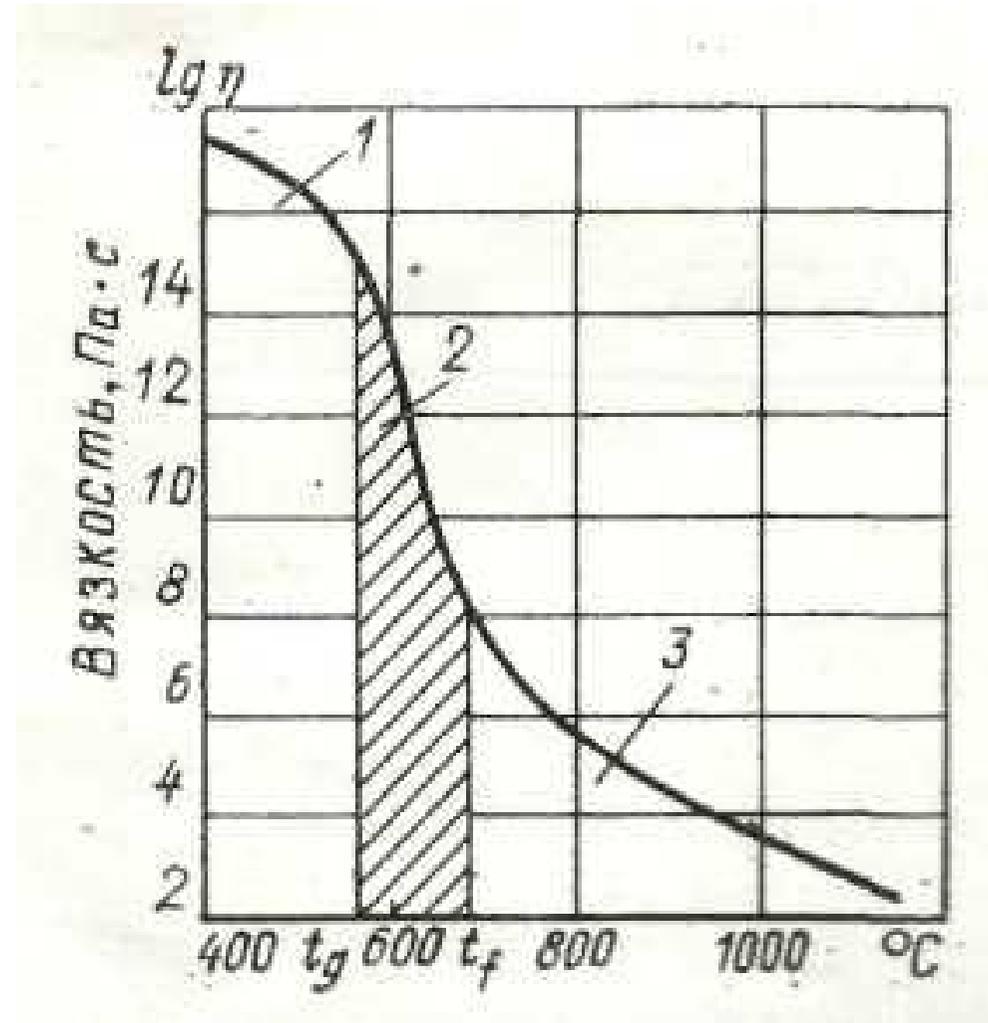
б — аморфного;

чёрные кружки — атомы Si, белые — атомы O.

- В газе отсутствует дальний и ближний порядок.
- В жидкостях и стеклообразных телах существует ближний порядок — некоторая закономерность в расположении соседних атомов. На больших расстояниях порядок «размывается» и постепенно переходит в «беспорядок», т. е. дальнего порядка в жидкости и стеклообразных телах нет.
- Отличие структуры обнаруживается с помощью рентгенограмм. Монохроматические рентгеновские лучи, рассеиваясь на кристаллах, образуют дифракционную картину в виде отчётливых линий или пятен. Для стекла это не характерно.

- Оптическое стекло, высокопрозрачное однородное химически стойкое стекло.
- Получается в результате варки смеси неорганических веществ.
- Показатель преломления (от 1,47 до 2,04)  
Коэффициент дисперсии (от 70 до 78)
- Коэффициент пропускания  
для оптического стекла -0,95-0,99.  
для оконного 0,83-0,90

# Изменение агрегатного состояния стекла при нагревании



- 1 - твердое стеклообразное вещество;
- 2 - размягченная стекломасса;
- 3 - жидкая стекломасса

- Наибольшее распространение в качестве оптического материала получили **оптические стекла**, которым присущи многообразие оптических свойств, хорошие технологические и эксплуатационные качества.
- **Оптическое стекло** используют в производстве оптических деталей (очуляров, луп), приборов (микроскопов), оптико-технических устройств (рефлекторов, отражателей) и астрономических приборов.
- Из **светотехнического стекла** изготавливается всевозможная светотехническая аппаратура и осветительная арматура – преломители и светорассеиватели (оболочки ламп, линзы, фары) сферические, параболтические и гиперболические отражатели, светофильтры и световые сигналы.

- Радиационно-дозиметрическое стекло используют в производстве защитных дозиметров, и индикаторов, спектрометров, детекторов, счетчиков.
- Стекла активированные неодимом используются в качестве активных сред твердотельных лазеров.

- **Кристалл**

Кристалл - твердое тело, состоящее из упорядоченных, периодически повторяющихся в пространстве частиц.

Диапазон спектральной прозрачности кристаллов превосходит область прозрачности стекол.

- Изотропность свойств стекла не позволяет создавать на его основе оптические элементы с резко выраженными электро-, акустооптическими и другими свойствами. Этим объясняется очень большой ассортимент различных кристаллов, которые производит современная оптическая промышленность.

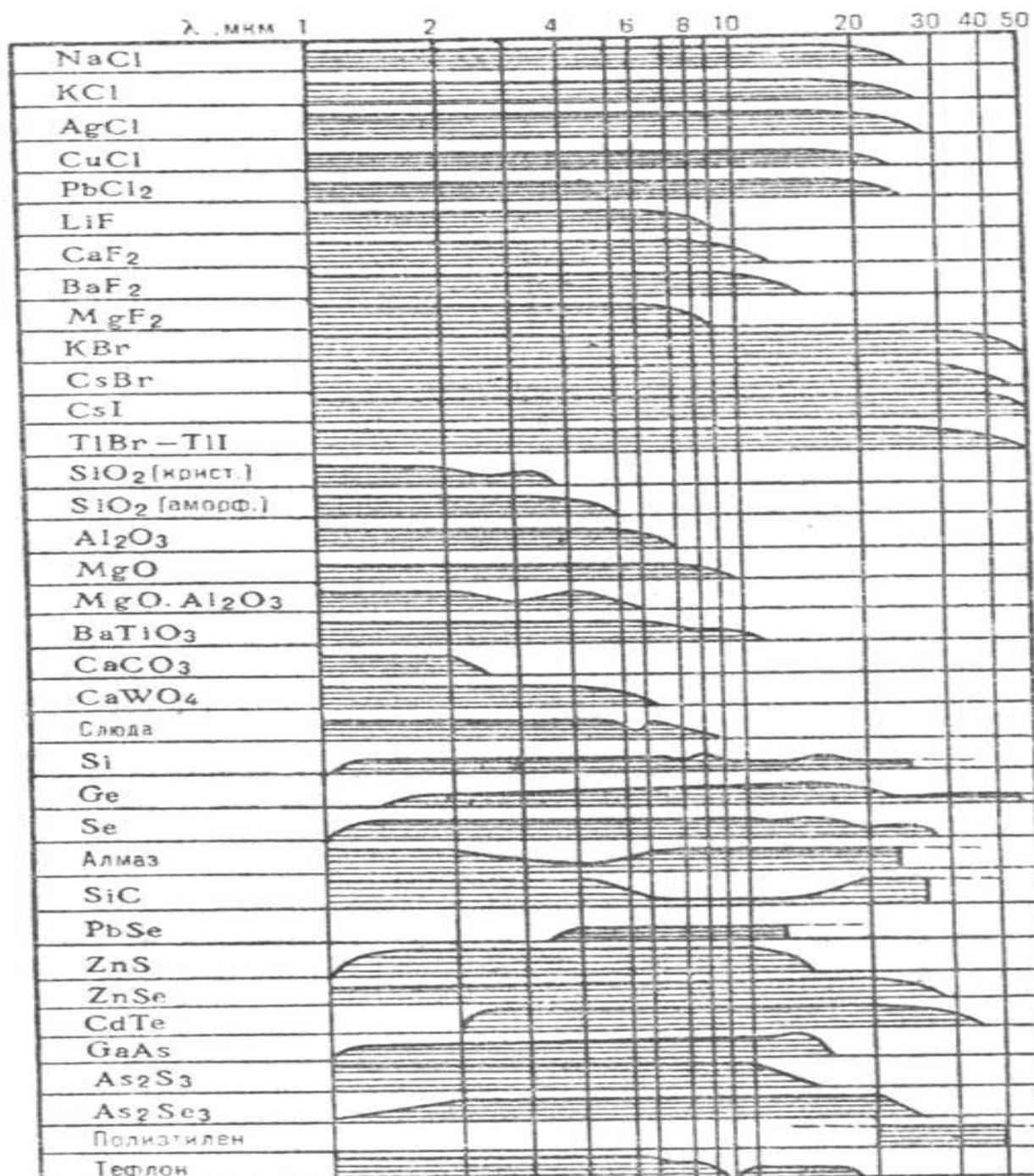
## Природные монокристаллы:

- Флюорит  $\text{CaF}_2$ ,
- Кварц  $\text{SiO}_2$ ,
- Кальцит (исландский шпат)  $\text{CaCO}_3$ ,
- Слюда
- Алмаз и др.,

## Синтетич. монокристаллы:

обладают прозрачностью в разл. участках оптич. диапазона (рис. 1) и имеют высокую однородность и определенные габариты.

Рис. 1. Прозрачность оптич. материалов в ИК области спектра.



- **Применение кристаллов** основано на св-вах
- напр. высокой твердости и прозрачности (алмаз используют при обработке материалов).
- В лазерной техники - рубин, иттрий-алюминиевый гранат и др., полупроводниковые лазерные кристаллы.
- В технике управления световыми пучками используют К., обладающие электрооптич. св-вами.
- К. корунда  $Al_2O_3$  применяют в оптич. лазерах, в ювелирном деле и др.

- Поликристаллы (Оптическая керамика) состоят из множества отдельных беспорядочно ориентированных мелких кристаллических зерен.
- Технология производства: вакуумное прессование при высоких давлениях и температурах порошков оксидов, фторидов, сульфидов, селенидов или более сложных соединений.

- Поликристаллы (Оптическая керамика) обладают высокой термич. и радиац. стойкостью, радиопрозрачностью, высокой огнеупорностью.
- Применяют для изготовления изделий подвергающихся механическим и тепловым ударам (иллюминаторы летательных аппаратов, корпуса галогенных ламп, ИК-спектрофотометры и окна газовых лазеров).

- Поликристаллические О. м.  
характеризуются прозрачностью, по  
величине сходной с прозрачностью  
монокристаллов, и лучшими по сравнению  
с ними конструкц. св-вами.

# СИТАЛЛЫ

(стеклокристаллические материалы)

- Получают направленной кристаллизацией разл. стекол при их термич. обработке.
- В ситаллах мелкодисперсные кристаллы равномерно распределены в стекловидной матрице.
- Обладают высокой прочностью, твердостью, износостойкостью, малым термич. расширением, хим. и термич. устойчивостью, газо- и влагонепроницаемостью.
- **Применяются** в микроэлектронике, ракетной и космич. технике (для изготовления астрономических зеркал, телескопов), оптике, полиграфии как светочувствит. материалы (для изготовления оптич. печатных плат, в качестве светофильтров).

## Оптические ситаллы

Основу ситаллов составляют стекла системы  $\text{LiO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ .

Кристаллизация в стекле вызывается введением в состав катализатора (оксида титана  $\text{TiO}_2$ ) и последующей термической обработкой в твердой фазе.

Термообработку выполняют в электрических печах по режиму, предусматривающему две ступени выдержки (рис. 1).

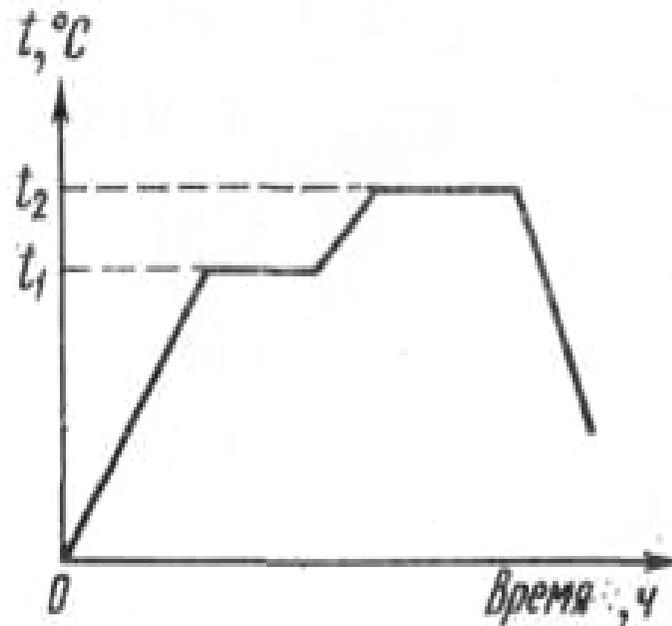
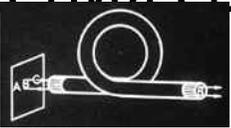
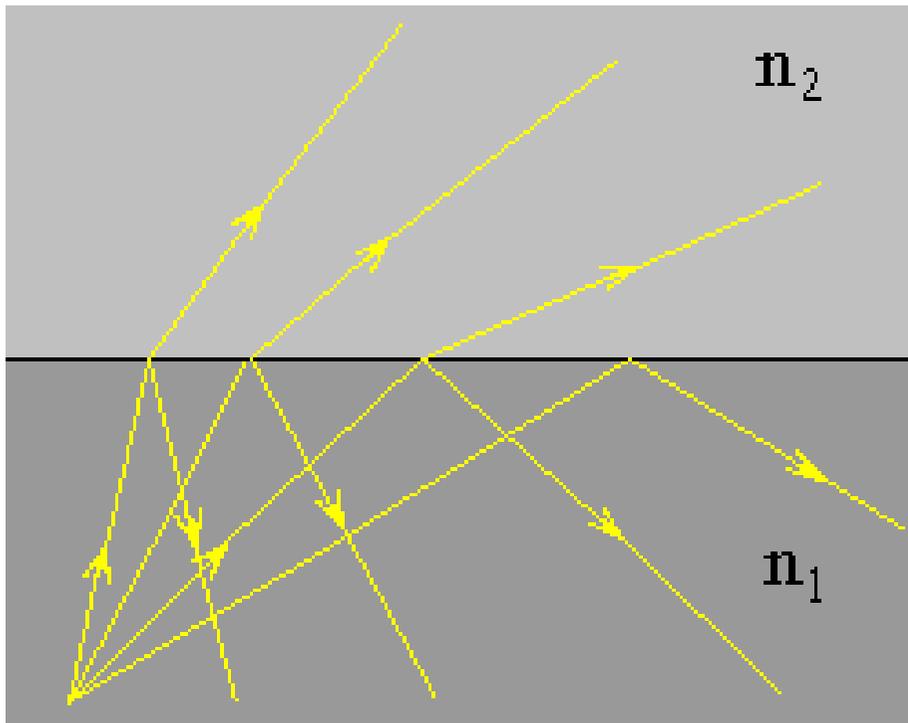


Рис.1. График термообработки ситаллов

Первая выдержка при  $t_1 = 800\text{ }^\circ\text{C}$  обеспечивает условия для равномерного образования многочисленных центров кристаллизации по всему объему материала; вторая выдержка при  $t_2 = 880\text{ }^\circ\text{C}$  — интенсивный рост кристаллов до заданных размеров.

## Волоконно-оптические элементы

- Полное внутреннее отражение используется для передачи света и изображения по *световодам*.
- Основной элемент световода – стеклянное или полимерное волокно цилиндрической формы, покрытое оболочкой из прозрачного материала с меньшим, чем у волокна, показателем преломления.
- За счет многократного полного отражения свет может быть направлен по любому пр  или изогнутому пути.

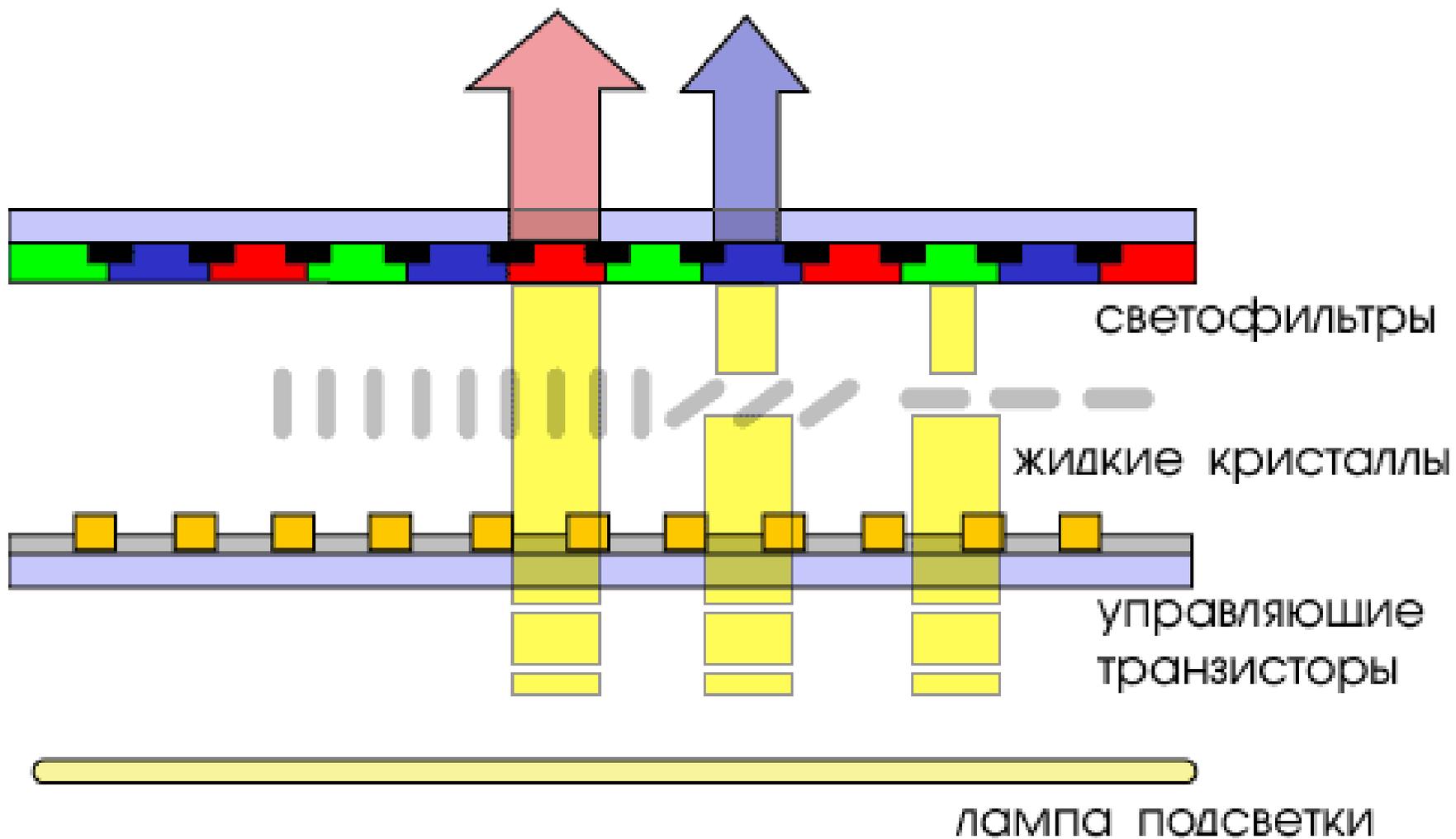


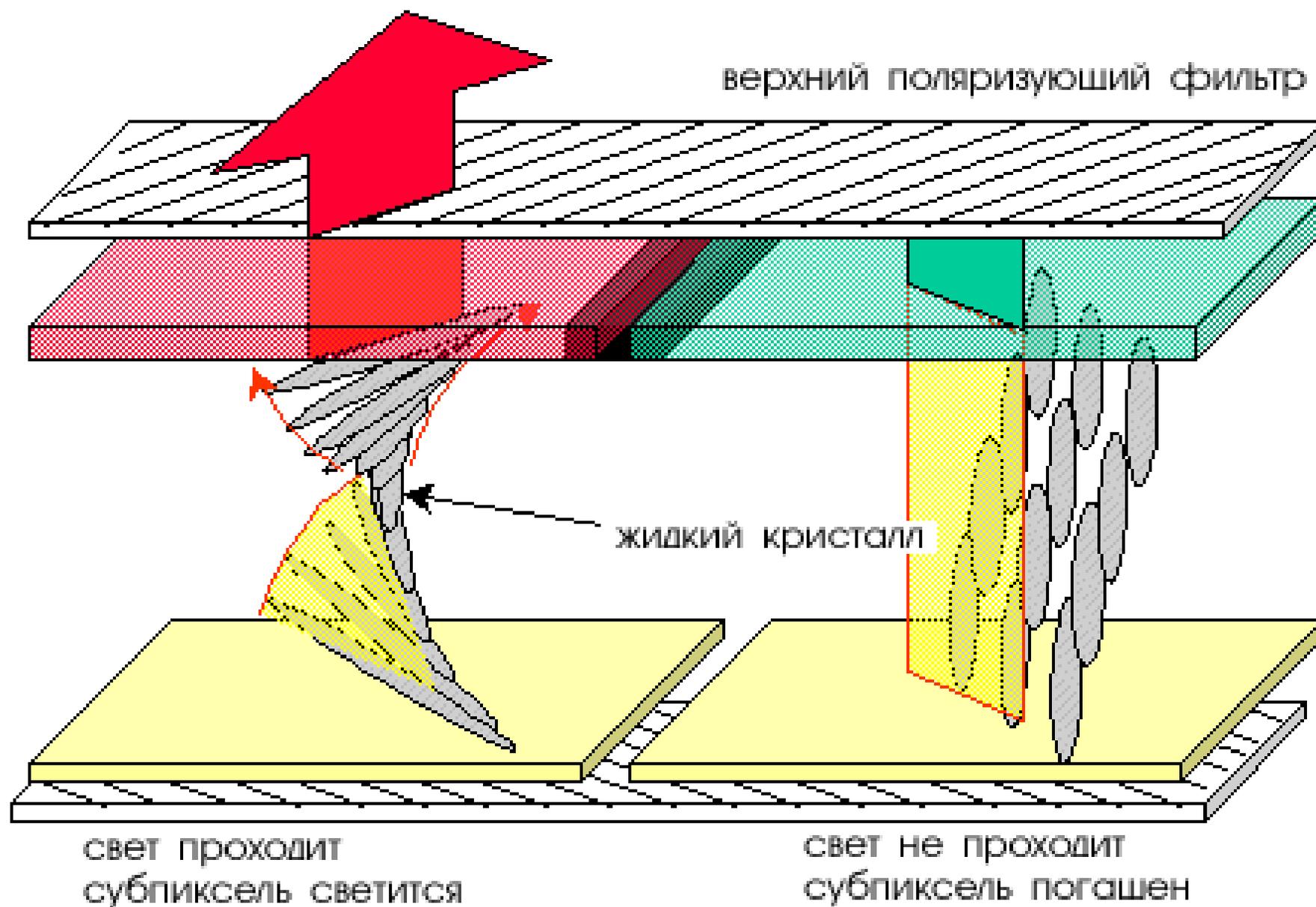
полное внутреннее  
отражение

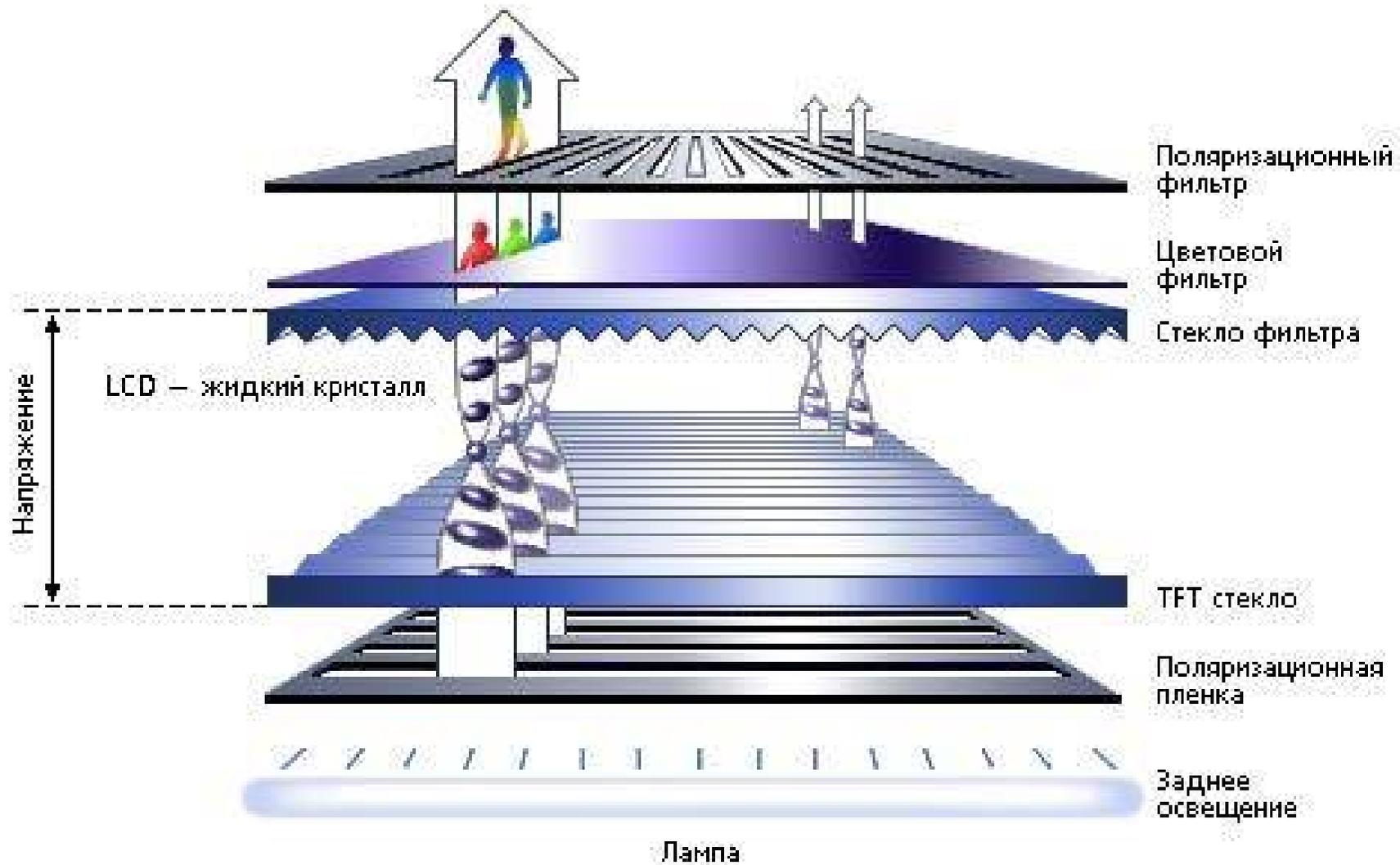
$$n_1 > n_2$$

При переходе света из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду по мере увеличения угла падения направление преломленного луча приближается к границе раздела. Когда угол падения превосходит некоторое предельное значение, преломленный луч не существует - падающий на границу раздела свет полностью отражается.

- **Жидкие кристаллы** — уникальная фаза вещества. Сочетают в себе свойства как твердых тел (наличие дальнего порядка), так и жидкостей (проявление текучести, вязкости).







- В настоящее время известно большое количество органических соединений, способных образовывать жидкие кристаллы. Наибольшее количество веществ, существующих в жидкокристаллическом состоянии, это соединения, содержащие бензольные кольца.

- Основой конструкции устройств отображения и преобразования информации является ячейка, представляющая собой две параллельных (обычно стеклянных) пластины, между которыми расположен тонкий слой (5...30 мкм) жидкого кристалла. На внутренних поверхностях пластин нанесены прозрачные электроды, на которые подается электрическое напряжение.

## Область применения

- Лазерная, дисплейная техника, термооптика, медицина...
- С помощью жидких кристаллов обнаруживают пары вредных химических соединений и опасные для здоровья человека гамма- и ультрафиолетовое излучения. На основе жидких кристаллов созданы измерители давления, детекторы ультразвука.

- Прогресс движется благодаря созданию новых материалов
- Для новых изобретений требуются материалы с заданными свойствами
- Наука и технология XXI века ознаменовалась повышением интереса специалистов к **наноматериалам.**
- Получены нанокристаллические соединения с новым комплексом ранее неизвестных оптических, механических, тепловых, электрических и магнитных свойств

- **Изготовление оптических деталей и приборов**

- Процесс изготовления прецизионных оптических приборов подчинён строгому графику, когда все производственные операции регламентированы и оптимизированы. Здесь нет места ошибкам, компромиссам и небрежному отношению к мелочам.
- Оптические материалы (стекло, кристаллы и др.), их технические и потребительские свойства определяют качество и добротность изготавливаемой оптической детали. Она должна быть прозрачной, не иметь включений, стойкой к внешним механическим и атмосферным воздействиям.
- Именно поэтому в опт. производстве используют только качественные оптические материалы, соответствующие требованиям норм и стандартов, имеющие паспорта и аттестаты.

# Технологический процесс для изготовления оптических деталей

---

- ❑ Разработка чертежа изготавливаемой детали (чертежи, поступившие от заказчиков, перерабатываются с учётом требований ГОСТ или ISO).
  - ❑ Проверка наличия пробных стекол (при необходимости корректировка оптического расчёта и чертежа оптической детали или оформление задания на изготовление ПС)
  - ❑ Подготовка заготовительного эскиза, рабочего чертежа с сопроводительными документами
  - ❑ Заказ стекла
  - ❑ Подбор или изготовление рабочего инструмента для всех видов технологических переходов (шлифовка, полировка, покрытие, склейка)
-

# Производство оптических деталей из стекла и кристаллов в НПП ФОКУС

---



Сферические линзы и цилиндрические линзы (любой формы), шариковые линзы, микролинзы, плоские и интерферометрические пластины, оптические окна, прецизионные призмы и призмённые склейки, точные подложки для зеркал и дифракционных решеток, цветные и интерференционные фильтры, нейтральные фильтры, зеркала (любой формы).

Двусклеенные ахроматические и трёхсклеенные апохроматические компоненты

---

*в том числе по чертежам заказчиков*

# Отдел Технического Контроля

---

- ❑ *СТ 41* – прибор для проверки децентрированности линз
  - ❑ *УИМ 23* – прибор для контроля длин изготавливаемых деталей
  - ❑ *ИЗВ 29* - прибор для проверки толщин деталей
  - ❑ *ПК 750* - прибор для измерения фокусного расстояния линз
  - ❑ *ПК 452* – интерферометр для проверки плоских поверхностей диаметром до 350 мм.
  - ❑ *ИКС 29* – инфракрасный спектрофотометр
  - ❑ *СФ 20* – спектрофотометр
  - ❑ *ОСК-2 ЦЛ* – оптическая скамья, служит для измерения фокусов длиннофокусных деталей, аттестации объективов на качество сборки.
  - ❑ *ПКС 250* – поляриметр, который служит для проверки ориентации одноосных кристаллов ( $MgF_2$ ) и проверки напряжения оптических деталей
  - ❑ *ГС-5* – гониометр
-

# Покрытия

---

Просветляющие покрытия для различных длин волн:

- *24И* – фтористый магний  $MgF_2$
- *57ИЭ.41ИЭ* – двуокись циркония-двуокись кремния  $ZrO_2xSiO_2$

Зеркальные покрытия:

- *1И.41ИЭ* – алюминий+двуокись кремния  $Al+SiO_2$
- *1И.24И* – алюминий+фтористый магний  $Al+MgF_2$
- *1И.31И* – алюминий+моноокись кремния  $Al+SiO$

Светоделительные покрытия с различным отношением  $\rho/\tau$ :

- *1И* – алюминий  $Al$
  - *15И* – титан  $Ti$
-

# **Законы распространения света в веществе**

- Световой поток, взаимодействуя с поверхностью материала, претерпевает структурные и пространственные изменения.
- **Структурные:** дисперсия, интерференция и поляризация света.
- **Пространственные:** преломление, отражение и рассеяние света.

*С потоком излучения, распространяющимся в среде могут происходить следующие изменения:*

- **Рассеяние** части потока в результате отражения от частиц, имеющих  $n$  отличающийся от  $n$  среды;
- **Поглощение** части потока излучения средой с преобразованием в другие виды энергии (тепло, генерация носителей тока, эмиссия электронов и ионов);
- **Пропускание** части потока через среду;
- Поглощение части потока излучения средой с преобразованием в излучение другого спектрального состава (**люминесценция**);
- **Изменение спектрального состава** излучения, следствие селективного поглощения энергии излучения средой;
- **Изменение поляризации** отраженного и пропущенного потоков;
- **Изменение направления** распространения.

## Уравнение баланса

$$\Phi_0 = \Phi_{\text{отр}} + \Phi_{\text{погл}} + \Phi_{\text{пр}} \quad (1)$$

$$1 = \Phi_{\text{отр}} / \Phi_0 + \Phi_{\text{погл}} / \Phi_0 + \Phi_{\text{пр}} / \Phi_0 = \rho + \alpha + \tau \quad (2)$$

- где  $\rho$  - коэффициент отражения,
- $\alpha$  - коэффициент поглощения
- $\tau$  - коэффициент пропускания.

- Отражение, поглощение, пропускание и ослабление проходящего через среду излучения, как правило, является **различным** в **различных спектральных диапазонах** измерений.
- Соответственно коэффициенты отражения, поглощения, пропускания и показатели поглощения, ослабления, измеренные с использованием монохроматического излучения с длиной волны  $\lambda$ , называются **спектральными коэффициентами отражения  $\rho_\lambda$ , поглощения  $\alpha_\lambda$ , пропускания  $\tau_\lambda$  и показателями поглощения  $\kappa_\lambda$  [ $\text{м}^{-1}$ ], ослабления  $(\mu + \kappa)\lambda$  [ $\text{м}^{-1}$ ]**.
- Зависимости спектральных коэффициентов от длины волны называются **спектрами отражения  $\rho(\lambda)$ , поглощения  $\alpha(\lambda)$ ,  $\kappa(\lambda)$ ,  $D(\lambda)$ , пропускания  $\tau(\lambda)$ , ослабления  $(\mu + \kappa)(\lambda)$** .

Коэффициент пропускания последовательно расположенных сред  $\tau_p$  равен произведению коэффициентов пропускания каждой из них:

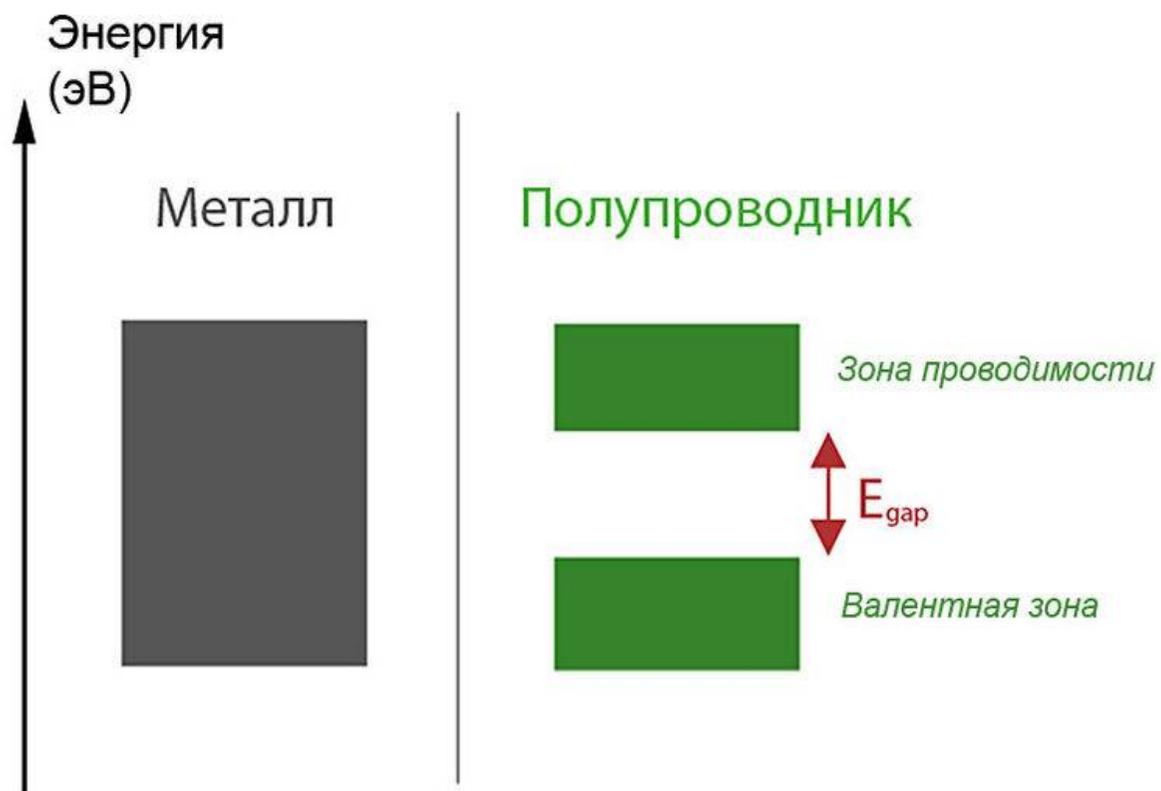
$$\tau_p = \tau_1 \tau_2 \dots \tau_n.$$

Оптическая плотность последовательно расположенных сред равна сумме оптических плотностей каждой из них с толщинами  $l_1, l_2 \dots l_n$ :

$$D_p = D_1 + D_2 + \dots + D_n = \kappa_1 l_1 + \kappa_2 l_2 + \dots$$

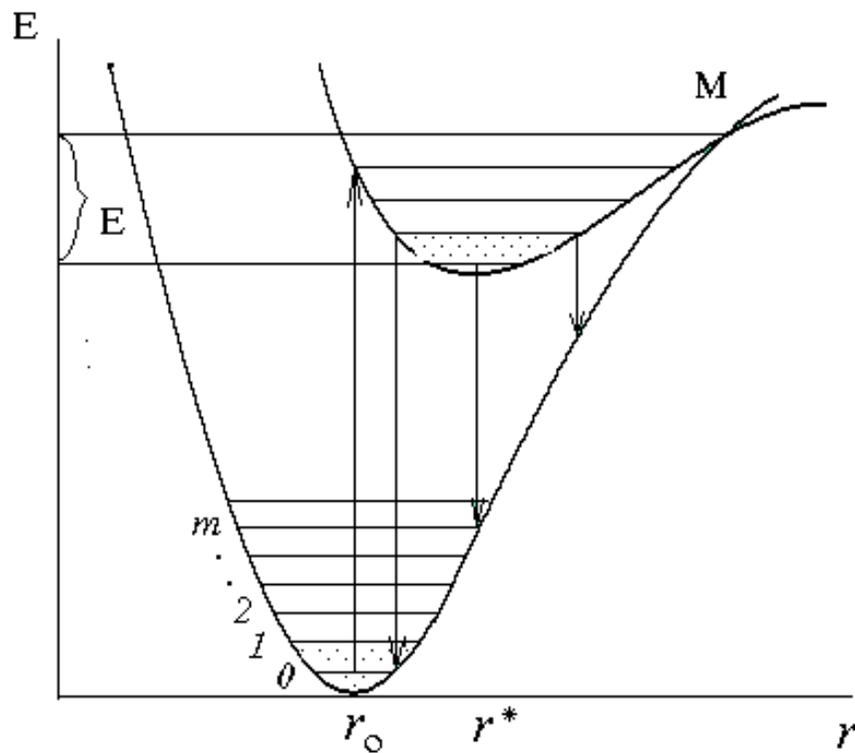
- Интегральный коэффициент пропускания среды связан с его спектральными значениями выражением:

$$\tau_1 = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_\lambda \cdot \tau_\lambda \cdot \kappa_\lambda \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_\lambda \cdot \kappa_\lambda \cdot d\lambda}$$



- **Запрещённая зона** — область значений энергии, которыми *не может* обладать электрон в идеальном (бездефектном) кристалле.
- Характерные значения ширины запрещённой зоны в полупроводниках составляют 0,1—4 эВ.
- Кристаллы с шириной запрещённой зоны более 3 - 4 эВ обычно относят к диэлектрикам. Полупроводники с шириной запрещённой зоны менее ~0.3 эВ называют **узкозонными** полупроводниками, а полупроводники с шириной запрещённой зоны более ~3 эВ — **широкозонными** полупроводниками.

# Оптическое поглощение и люминесценция в модели конфигурационных кривых



Стоксов сдвиг в спектре  
люминесценции

$$h\nu_{\text{в}} > h\nu_{\text{л}}$$

- **Люминесценцией** называют спонтанное свечение тел длительностью, превышающей период световых колебаний и возбуждаемое за счет любого вида энергии, кроме тепловой.
- Люминесцировать могут твердые, жидкие и газообразные тела. При разных способах возбуждения и в зависимости от того, в каком агрегатном состоянии находится тело, во время люминесценции могут происходить самые различные процессы. Однако во всех случаях их можно условно разбить на следующие три стадии:
  - 1) поглощение возбуждающей энергии и переход тела в неравновесное состояние;
  - 2) преобразование энергии возбуждения внутри тела и
  - 3) испускание света и переход тела в равновесное состояние.
- Первые две стадии всегда зависят от способа и режимов возбуждения. Последняя же стадия в большинстве твердых и жидких веществ определяется почти целиком внутренним строением центров люминесценции и мало зависит от того, в каком виде энергия была первоначально поглощена люминесцирующим телом.

# Законы геометрической оптики

- прямолинейного распространения света
- независимости световых лучей
- отражения света
- преломления света



# Стекло оптическое бесцветное



# План

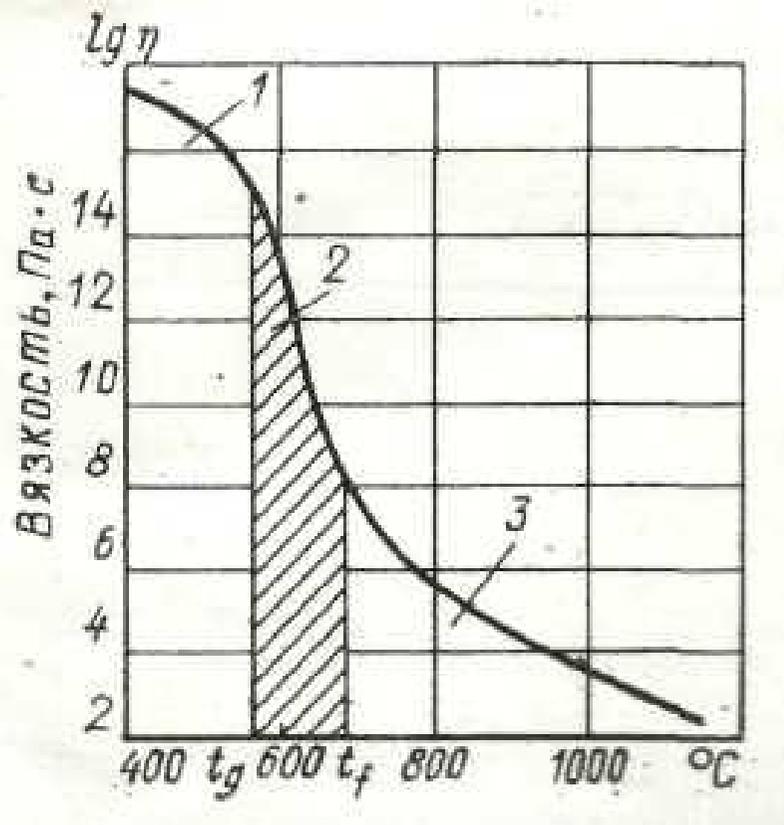
- Природа и свойства стекла.
- Состав и классификация стекол.
- Свойства оптических материалов.

Наибольшее распространение в качестве оптического материала получили **оптические стекла**, которым присущи многообразие оптических свойств, хорошие технологические и эксплуатационные качества.

- Оптическое стекло
- **Светотехническое стекло**
- **Радиационно-дозиметрическое стекло**
- **Стекла активированные неодимом**

Расплавленное вещество при охлаждении переходит либо в **кристаллическое**, либо в **стеклообразное** состояние.

<b>Кристалл</b>	<b>Стекло</b>
Атомы расположены в строго определенном порядке, называемом атомной решеткой	порядок в той или иной мере нарушен
Изотропные Анизотропные	Изотропные
Имеет определенную температуру плавления и определенную температуру затвердевания	Не имеет определенной температуры плавления



Стекло - вещество, полученное путем переохлаждения расплава определенного химического состава, приобретающее в результате увеличения вязкости свойства твердого тела, причем процесс перехода из жидкого состояния в стеклообразное должен быть обратимым.

Рис. 1. Изменение агрегатного состояния стекла при нагревании:  
 1 - твердое стеклообразное вещество;  
 2 - размягченная стекломасса;  
 3 - жидкая стекломасса

## Стёклам присущи следующие признаки:

1. ближний порядок,
2. однородность по всему объёму,
3. изотропность свойств,
4. высокая прозрачность (интегральный показатель ослабления  $< 0,004 \text{ см}^{-1}$ ),
5. твёрдость при комнатной температуре;
6. малая электро и теплопроводность;
7. стойкость к реагентам атмосферы и воды;
8. большой интервал значений показателей преломления света, для разных марок от 1,44 до 2,35

Стёкла состоят из окислов:

$\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{BaO}$ ,  
 $\text{Al}_2\text{O}_3$  и др.;

Стёкла оптические определяют по 100%-й  
формуле химического состава.

Например, 72% -  $\text{SiO}_2$ , 10% -  $\text{CaO}$ , 18% -  $\text{K}_2\text{O}$ .

Большинство стекол многокомпонентны.  
В состав входят 4-12 окислов.  
Например, Крон содержит семь окислов:

$\text{SiO}_2$  — 72 %;  
 $\text{B}_2\text{O}_3$  — 8,15 %;  
 $\text{K}_2\text{O}$  — 10,45 %;  
 $\text{Na}_2\text{O}$  — 7,20 %,  
 $\text{CaO}$  — 1,55 %;  
 $\text{MgO}$  — 0,45 %;  
 $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 0,20 %.

## Типы и условное обозначение оптических стекол:

- ЛК - легкий крон
- ФК - фосфатный крон
- ТФК - тяжелый фосфатный крон
- К - крон
- БК - баритовый крон
- ТК - тяжелый крон
- СТК - сверх тяжелый крон
- ОК - особый крон
- КФ - крон флинт
- БФ - баритовый флинт
- ТБФ - тяжелый баритовый флинт
- ЛФ - легкий флинт
- Ф - флинт
- ТФ - тяжелый флинт
- СТФ - сверх тяжелый флинт
- ОФ - особый флинт

# Химический состав оптических стекол

Тип стекла	SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PbO	BaO	ZnO	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	F
Кроны:														
легкий (ЛК) . . . . .	53,3	16,2	8,8	—	0,2	—	—	—	—	—	—	16,2	—	5,3
фосфатный (ФК) . . . . .	—	3,0	10,0	—	0,5	70,5	—	—	—	—	4,0	12,0	—	—
крон (К) . . . . .	72,0	8,1	—	—	0,2	—	—	—	—	1,5	0,5	10,5	7,2	—
баритовый (БК) . . . . .	49,5	4,8	—	—	0,2	—	2,6	21,6	12,5	—	—	7,6	1,2	—
тяжелый (ТК) . . . . .	32,7	13,2	3,1	—	1,6	—	—	45,9	3,5	—	—	—	—	—
Кронфлинт (КФ) . . . . .	63,0	1,8	—	—	0,2	—	16,0	—	—	2,0	—	11,0	6,0	—
Флинты:														
баритовый (БФ) . . . . .	41,8	—	—	—	0,2	—	33,2	11,4	5,2	—	—	8,2	—	—
легкий (ЛФ) . . . . .	61,0	—	—	—	0,2	—	26,3	—	—	—	—	8,0	4,5	—
флинт (Ф) . . . . .	47,0	—	—	—	0,2	—	46,4	—	—	—	—	6,4	—	—
тяжелый (ТФ) . . . . .	31,6	—	—	—	0,2	—	65,4	—	—	—	—	2,8	—	—
особый (ОФ) . . . . .	53,1	17,5	1,1	21,3	0,5	—	—	—	—	—	—	6,5	—	—

Стекла классифицируют по типам в зависимости от значений показателя преломления и коэффициента дисперсии

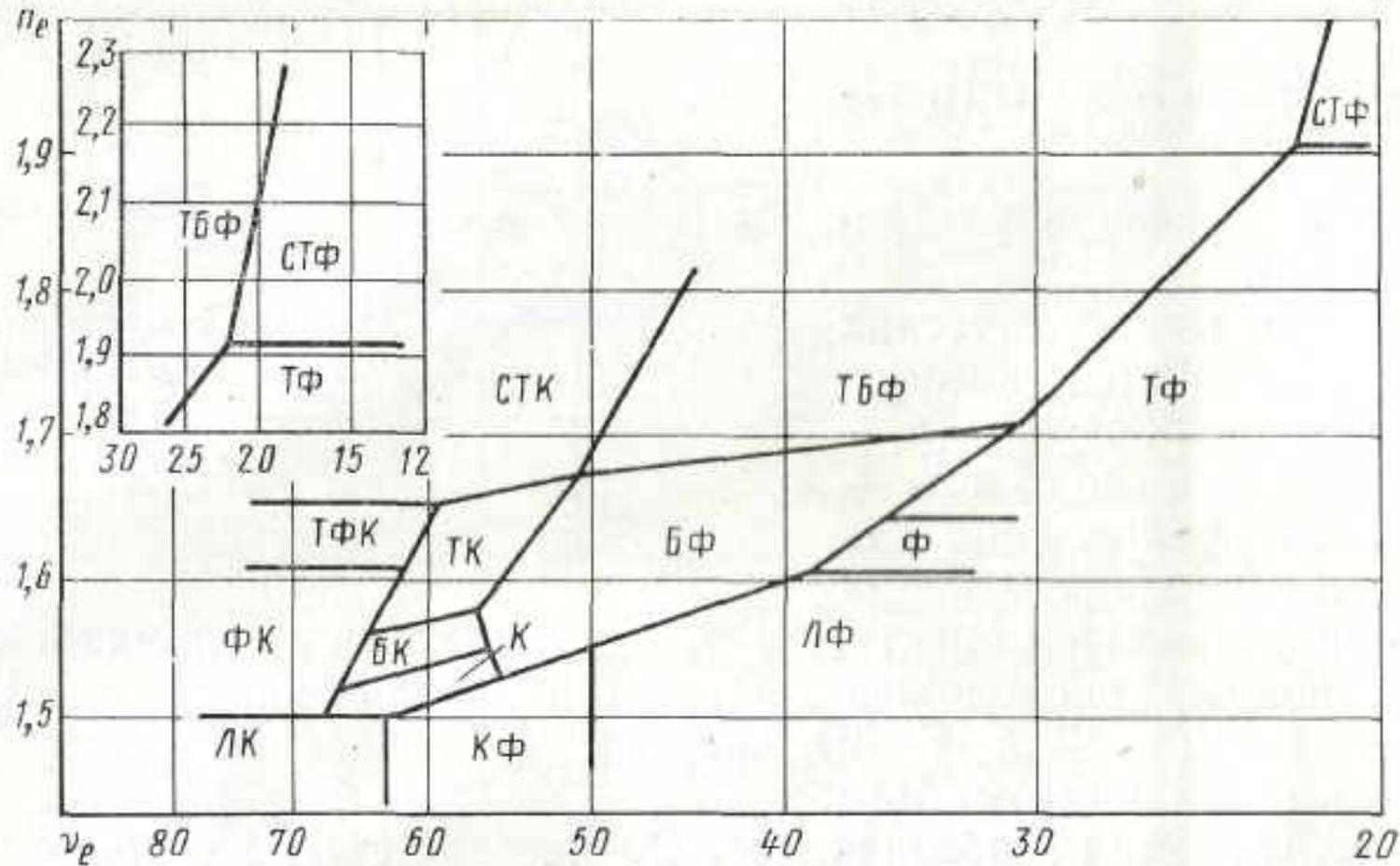
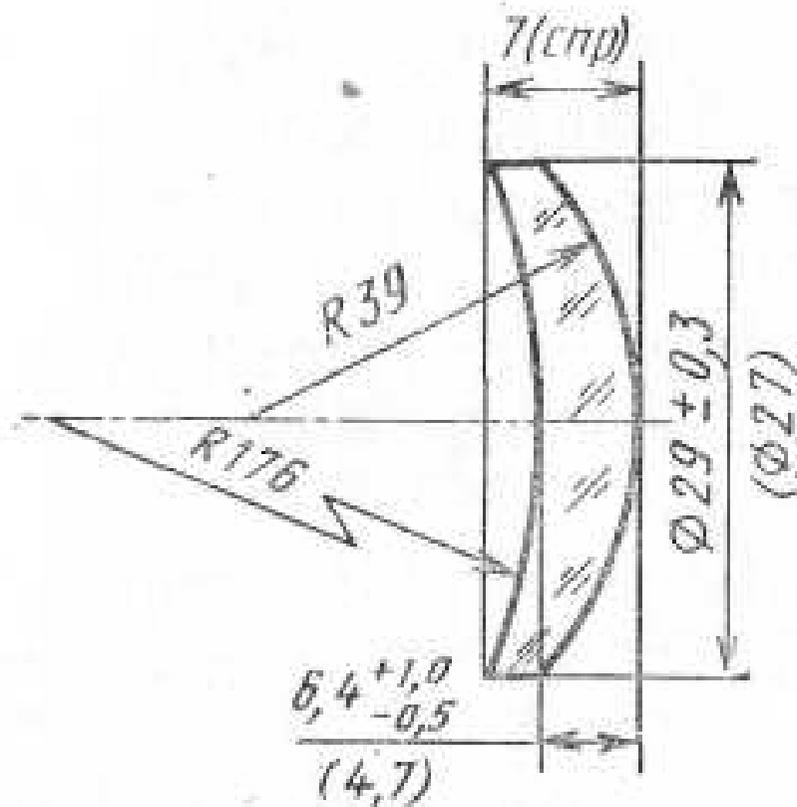


Диаграмма Аббе  $n_e = f(v_e)$  для оптического стекла



Общие ТУ по ГОСТ 13240-78  
 Марка стекла ТК 16 ГОСТ 3514-76

Катег. и класс $\Delta n_e$	4B
Катег. и класс $\Delta(n_e' - n_e')$	3Г
Однородность	3
Дв. лучепреломл.	3
НА	4
Бесшвиальность	2Б
Пузырность	5Д
Штук	10 000
МТ	218-82
КЗ	2,76
Масса, г	
макс.	14,60
ном.	12,50
мин.	11,51

Образец оформления технических условий на заготовку линзы

## Стекло оптическое кварцевое

однокомпонентное силикатное стекло на основе кремнезема  $\text{SiO}_2$ .

Физико-химические свойства:

- 1) Прозрачность в широком диапазоне УФ, видимых, ИК волн и радиочастот.
- 2) Высокая термостойкость.
- 3) Химическая и радиационная устойчивость.
- 4) Малый ТКЛР.

## Марки кварцевого стекла:

1)КУ1, КУ2 - прозрачные в УФ области спектра.

2)КВ, КВР - прозрачные в видимой области спектра.

3)КИ - прозрачные в ИК области спектра.

## Применяют для изготовления

- прозрачных люков летательных аппаратов,
- активных элементов ОКГ,
- оболочек источников света
- и других оптических деталей подвергающихся резким температурным воздействиям.

# Свойства оптических материалов



## План лекции:

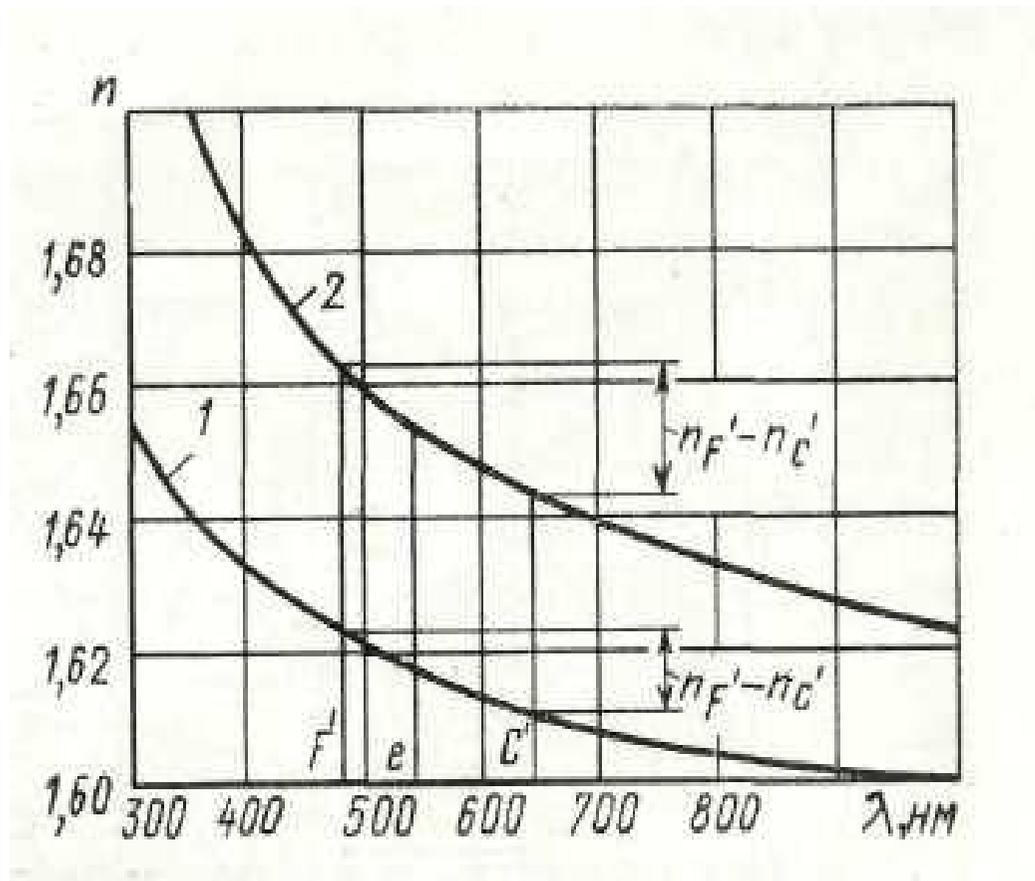
- **Оптические,**
- **Механические,**
- **Термические и термооптические,**
- **Химические характеристики ОМ**

Свойства	Характеристика
Оптические	Значения показателей преломления $n_\lambda$ , относительных частных дисперсий $\nu$ и коэффициентов дисперсии $\nu_D$ для длин волн и соответствующих им спектральных линий
Термооптические	Для спектральных линий $F, D, C$ ; приращения относительных значений показателя преломления при повышении температуры на $1^\circ \beta_{t,\lambda}$ ; термооптические постоянные $V_{t,\lambda}$ . Термооптические постоянные $W_{t,\lambda}$
Теплотехнические	Значения коэффициентов линейного расширения $\alpha_t$ в определенных температурных интервалах; удельной теплоемкости $c$ ; коэффициента теплопроводности $\alpha_t$ ; температуры отжига $T_{от}$ ; температуры спекания $T_{сп}$
Устойчивость к ионизирующим излучениям	Значения приращения оптической плотности образца $\Delta D$ после облучения его заданной дозой рентгеновских и гамма-лучей
Светорассеяние	Показатель светорассеяния $\delta'$ , численно характеризующий долю светового потока, теряющегося в стекле вследствие рассеяния
Механические	Значения плотности $d$ ; оптического коэффициента напряжения $B$ ; модуля Юнга $E$ ; коэффициента Пуассона $\mu$ ; относительной твердости по сошлифовыванию
Химические	Показатели химической устойчивости к действию атмосферной влаги и пятнающих агентов
Электрические	Значения диэлектрической проницаемости для определенных частот при различных температурах; тангенса угла диэлектрических потерь при тех же условиях; удельного объемного сопротивления $\rho$ при повышенных температурах

## Оптические характеристики:

- показатель преломления,
- средняя и частная дисперсии,
- коэффициент дисперсии

Дисперсия – зависимость  $n$  от  $\lambda$ .



Основной показатель преломления  $n_e$

для 546 нм (линия ртути)

Средняя дисперсия

разность показателей преломления для двух

длин волн,  $n_{F'} - n_{C'}$

480 нм и 643,8 нм (линии кадмия)

Рис. 1. Кривые хода дисперсии  $n = f(\lambda)$ :

1 - для кронового стекла ТК14;

2 - для флинтового стекла ТФ1.

## Коэффициент дисперсии

$$v = (n_1 - 1)/(n_2 - n_3),$$

$n_2$  и  $n_3$  — показатели преломления для длин волн, ограничивающих какой-либо диапазон спектра  
 $n_1$  — показатель преломления для длины волны, расположенной внутри диапазона.

## Основной коэффициент дисперсии или число Аббе

$$v_e = (n_e - 1)/(n_F' - n_C'),$$

$n_F' - n_C'$  для линий кадмия имеющих длины волн 480 нм и 643,8 нм.

Стекла классифицируют по типам в зависимости от значений показателя преломления и коэффициента дисперсии

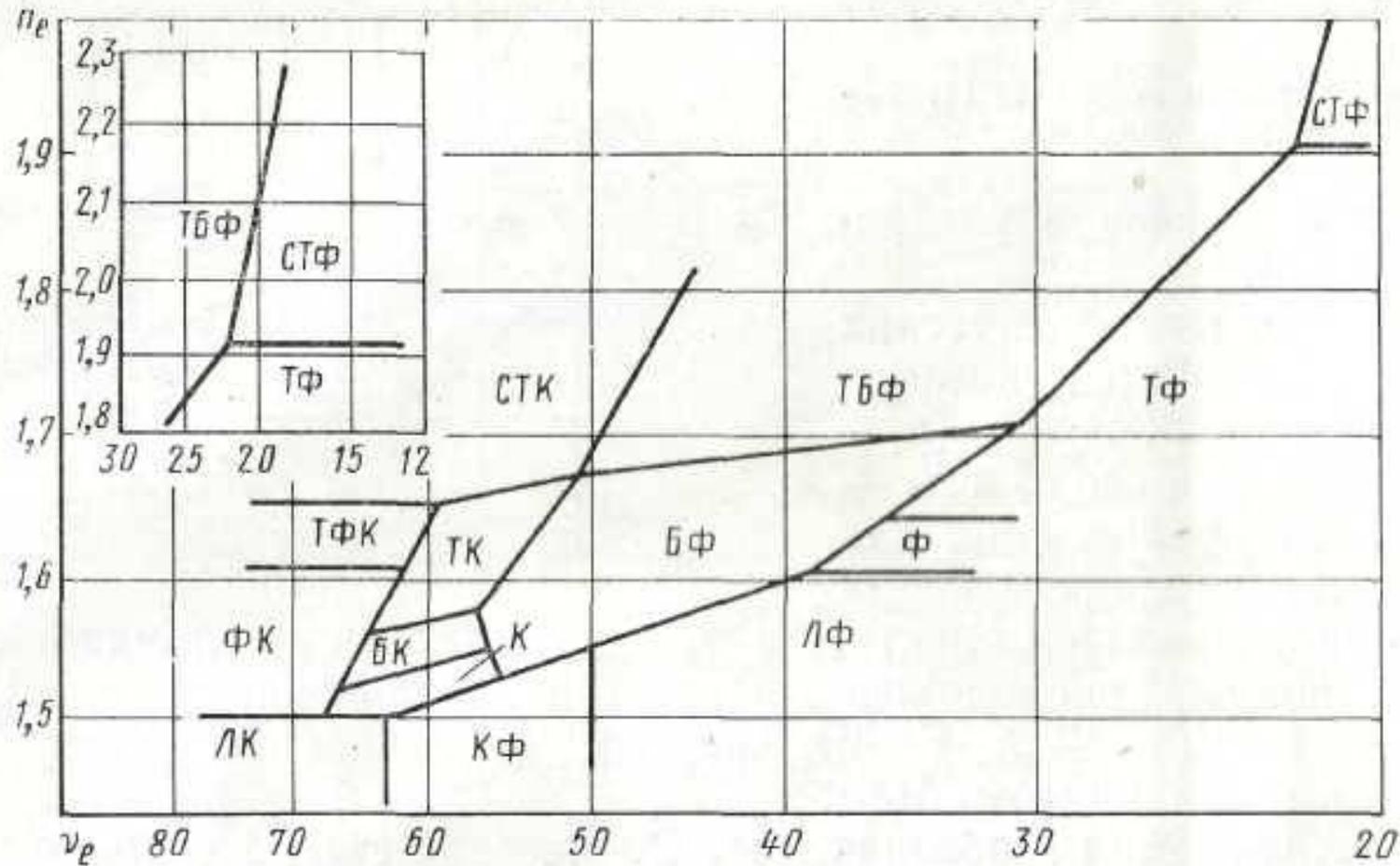


Диаграмма Аббе  $n_e = f(v_e)$  для оптического стекла

## Типы и условное обозначение оптических стекол:

- ЛК - легкий крон
- ФК - фосфатный крон
- ТФК - тяжелый фосфатный крон
- К - крон
- БК - баритовый крон
- ТК - тяжелый крон
- СТК - сверх тяжелый крон
- ОК - особый крон
- КФ - крон флинт
- БФ - баритовый флинт
- ТБФ - тяжелый баритовый флинт
- ЛФ - легкий флинт
- Ф - флинт
- ТФ - тяжелый флинт
- СТФ - сверх тяжелый флинт
- ОФ - особый флинт

# Химический состав оптических стекол

Тип стекла	SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PbO	BaO	ZnO	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	F
<b>Кроны:</b>														
легкий (ЛК) . . . . .	53,3	16,2	8,8	—	0,2	—	—	—	—	—	—	16,2	—	5,3
фосфатный (ФК) . . . . .	—	3,0	10,0	—	0,5	70,5	—	—	—	—	4,0	12,0	—	—
крон (К) . . . . .	72,0	8,1	—	—	0,2	—	—	—	—	1,5	0,5	10,5	7,2	—
баритовый (БК) . . . . .	49,5	4,8	—	—	0,2	—	2,6	21,6	12,5	—	—	7,6	1,2	—
тяжелый (ТК) . . . . .	32,7	13,2	3,1	—	1,6	—	—	45,9	3,5	—	—	—	—	—
Кронфлинт (КФ) . . . . .	63,0	1,8	—	—	0,2	—	16,0	—	—	2,0	—	11,0	6,0	—
<b>Флинты:</b>														
баритовый (БФ) . . . . .	41,8	—	—	—	0,2	—	33,2	11,4	5,2	—	—	8,2	—	—
легкий (ЛФ) . . . . .	61,0	—	—	—	0,2	—	26,3	—	—	—	—	8,0	4,5	—
флинт (Ф) . . . . .	47,0	—	—	—	0,2	—	46,4	—	—	—	—	6,4	—	—
тяжелый (ТФ) . . . . .	31,6	—	—	—	0,2	—	65,4	—	—	—	—	2,8	—	—
особый (ОФ) . . . . .	53,1	17,5	1,1	21,3	0,5	—	—	—	—	—	—	6,5	—	—

- Выпускаемые промышленностью оптические стекла описаны в каталоге (108 марок).
- Для каждой марки указаны значения  $n$  для длин волн 23 спектральных линий, пять средних дисперсий и коэффициентов дисперсий, относительные частные дисперсии для 24 участков спектра, что полностью характеризует стекло как оптический материал во всех областях спектра.



# Механические свойства

- плотность
- прочность
- твёрдость
- фотоупругость

- **Плотность  $\rho$**  - это масса единицы объема.

- В зависимости от состава стекла

2,30 (стекло ЛК7)

6,79 г/см<sup>3</sup> (стекло СТФ11).

Значения плотности, необходимые для расчета массы оптической детали и заготовки, приведены в каталоге.

- **Прочность** - предельное напряжение, вызывающее разрушение стекла.

$$E = 2G (1 + \mu),$$

$E$  - модуль упругости,

$G$  - модуль сдвига,

$\mu$  - коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона).

Для оптических стекол  $E = (4,8-11,5)10^7$  кПа,

$$\mu = 0,17-0,31.$$

- особенность стекла:

высокая прочность при сжатии

низкая при растяжении

- Прочность стекла в значительной степени зависит от состояния его поверхностей.
- Прочность стёкол можно повысить:
  1. шлифованием,
  2. полированием,
  3. закалкой.

## Твёрдость:

1. Склерометрическая - характеризуется шириной царапины, образующейся на поверхности стекла при царапании иглой с радиусом закругления 2 мкм.
2. Относительная твёрдость по сошлифовыванию  $N_{отн}$  – отношение объема сошлифованного свободным абразивом стекла марки К8 к объему стекла данной марки, сошлифованного в тех же условиях.

наибольшая твердость у кварцевого стекла и ситаллов ( $N_{отн} = 1,5-1,9$ ), наименьшая у стекол ФК ( $N_{отн} = 0,2$ ) и тяжелых флинтгов ТФ ( $N_{отн} = 0,5$ ).

- Фотоупругие свойства стекла проявляются при возникновении упругих деформаций в образце. Стекло становится веществом анизотропным, что приводит к появлению двойного лучепреломления: луч света, проходящий через стекло, поляризуется и разлагается на два луча - обыкновенный и необыкновенный, плоскости поляризации которых взаимно перпендикулярны. Это явление называют фотоупругостью.
- Показатели преломления стекла для поляризованных лучей отличаются от показателей преломлений стекла в ненапряженном состоянии.

- Фотоупругость стекла характеризуется фотоупругими постоянными  $C_1$  и  $C_2$ , выражающими приращение значения показателя преломления стекла для лучей света, поляризованных в направлениях, параллельном и перпендикулярном действию напряжения, равного  $10^5$  Па.
- Оптический коэффициент напряжения

$$V = C_1 - C_2.$$

Оптический коэффициент напряжения определяет разность оптического хода поляризованных лучей в стекле и характеризует двойное лучепреломление, возникающее при напряжении, равном  $10^5$  Па.

# Термические и термооптические свойства стекла :

1. удельная теплоёмкость,
2. теплопроводность,
3. коэффициент линейного расширения,
4. термостойкость,
5. температура спекания

- **Тепловые свойства стекла**
- В оптическом производстве широко применяются процессы, связанные с выделением или, наоборот, использованием тепла. Поэтому тепловые свойства стекла в ряде случаев играют решающую роль.
- **Удельная теплоемкость** - количество тепла, необходимое при данной температуре для нагревания единицы массы стекла на один градус. Теплоемкость оптических стекол изменяется в следующих пределах: для ТФЗ  $c=0,407$ , для К8 - 0,739, для кварца - 0,895 кДж/кг•град.
- **Теплопроводность стекла** определяется его способностью передавать тепловую энергию в направлении более низких температур. С повышением температуры теплопроводность стекол увеличивается. Повышенную теплопроводность имеют стекла с большим количеством  $Al_2O_3$ ,  $Ba_2O_3$ , MgO и CaO. Предельным случаем является кварцевое стекло. Стекла, содержащие много PbO или BaO, наоборот, имеют низкую теплопроводность. Теплопроводность характеризуется коэффициентами теплопроводности и температуропроводности.
- **Тепловое расширение стекла** характеризуется коэффициентами линейного  $\alpha$  и объемного  $\beta$  расширения. Коэффициент расширения зависит от химического состава стекла. У оптических стекол он изменяется в довольно широких пределах.
- **Термостойкость стекол** - это способность стекол выдерживать без разрушения резкие перепады температур. Мерой термостойкости является разность температур, которую выдерживает стекло без разрушения. В отличие от других тепловых свойств, термостойкость зависит не только от свойств материала, но и от геометрии и размеров заготовки, интенсивности теплообмена и т.д.

**1. Удельная теплоёмкость  $C$**  – это количество теплоты необходимое для нагревания единицы массы стекла на один градус.

У оптических стекол  $C = 300-800$  Дж/(кг·°С);

- ТФ3  $C=407$  Дж/кг·°С
- К8  $C=739$  Дж/кг·°С
- Кварц  $C=889$  Дж/кг·°С

## 2. Теплопроводность стёкол

- Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  характеризует способность стекла передавать тепло от нагретых участков к менее нагретым.

- 3.** *Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР)* характеризует относительное удлинение  $dl/l$  образца стекла при нагревании его на  $1^\circ$ .
- Средние значения ТКЛР, определены для областей от  $-60$  до  $+20$   $^\circ\text{C}$  и от  $+20$  до  $+120$   $^\circ\text{C}$ .
  - У оптических стекол наименьший ТКЛР имеет кварцевое стекло  $(2-5) \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , у большинства стекол ТКЛР находится в пределах  $(50-90) \cdot 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .

4. Термостойкость — способность стекла выдерживать без разрушения резкие перепады температуры.

- При охлаждении термостойкость стекла значительно меньше, чем при нагревании.
- Наибольшую термостойкость имеет кварцевое стекло, стекло ЛК5 и ситаллы, способные выдерживать перепад температуры 300 - 500 °С.

**5. Температура спекания  $T_{сп}$**  – температура, при которой происходит термическое спекание образцов стекла размером 20×20×10 мм с полированными поверхностями, уложенных один на другой (460—680 °С).

- Спекание стекла используют при изготовлении стекло-металлических зеркал, кювет, волоконно-оптических элементов.
- ТФ7 – 460 ° С,
- К8 - 620 ° С,
- ТК14 – 680 ° С.

- **Термооптические характеристики**
- термооптическая постоянная стекла

$$V_{\lambda} = \beta_{\lambda} / (n_{\lambda} - 1) - \alpha_{\text{ср}},$$

где  $\beta_{\lambda}$  - приращение показателя преломления при длине волны  $\lambda$  с изменением температуры на один градус;

$n_{\lambda}$  - показатель преломления стекла для длины волны  $\lambda$  при  $t = 20$  °С;

$\alpha_{\text{ср}}$  - средний ТКЛР в интервале температур от -60 до +20 °С и от +20 до +120 °С.

- **Вязкость**  $\eta$  веществ изменяется в зависимости от температуры. При нагревании выше температуры размягчения стекло приобретает свойства жидкого вещества - становится вязким и текучим.
- Температурный интервал, в котором вязкость изменяется в определенных пределах, определяет технологическую «длину» стекла.

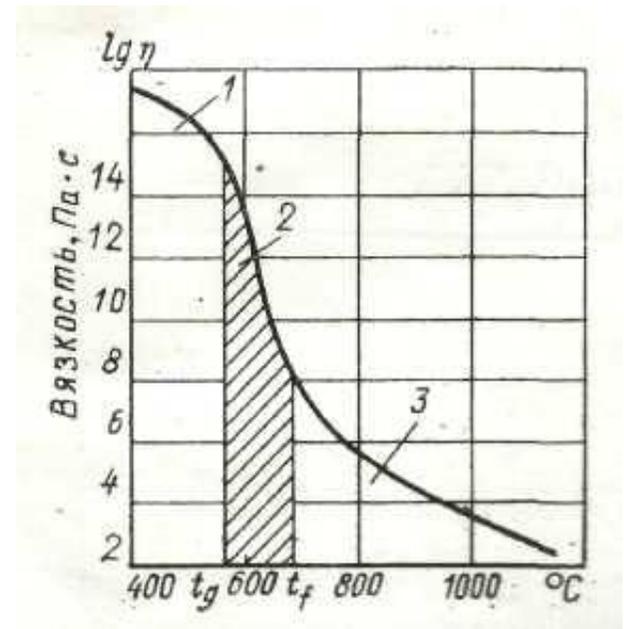


Рис. 1. Изменение агрегатного состояния стекла при нагревании:  
 1 - твердое стеклообразное вещество;  
 2 - размягченная стекломасса;  
 3 - жидкая стекломасса

- интервалы:

«варочный»  $\eta = 10-10^3$  Па·с

«выработочный»  $\eta = 10^4-10^8$  Па·с.

- К «длинным» стеклам - флинты Ф, ЛФ, ТФ,
- к «коротким» - кроны К, ТК.
- Вязкости стекла равные  $10^7$ ,  $10^9$ ,  $10^{12}$  Па·с. характеризуют соответственно процессы: моллирования стекла, спекания и отжига.

# Химические свойства стекла

- Показатели химической устойчивости:

1) химическая устойчивость поверхности к действию влажной атмосферы.

2) устойчивость к действию пятнающих реагентов (нейтральной воде, слабокислым и щелочным водным растворам).



По устойчивости к действию влажной атмосферы  
(налетоопасности):

- А — неналетоопасные,
- Б — промежуточные,
- В — налетоопасные.

По устойчивости к действию пятнающих реагентов :

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



### Химические свойства стекла

- Наиболее **устойчивыми** к действию пятнающих реагентов (1 группа): **кроны, кронфлинты, флинты и легкие флинты.**
- Пятнающимися и **нестойкими** (3 и 4 группы): **тяжелые и сверхтяжелые кроны, тяжелые и особые флинты.**

- Учет химических свойств оптических стекол необходим, с одной стороны, для предотвращения нежелательного воздействия жидкой фазы на полированные поверхности заготовок оптических деталей на всех стадиях их обработки.
- С другой стороны, для целенаправленного изменения структуры поверхности при травлении штрихов, цифр и других знаков;
- образовании просветляющих, защитных и прочих покрытий определенной толщины за счет гидролиза поверхности;
- интенсификации процессов полирования путем введения в состав полирующих композиций водных растворов окислителей;
- изменении прочностных и других свойств оптического контакта за счет разницы толщины гидролизных пленок.

# Показатели качества оптических стекол



## **Основная задача при варке стекла**

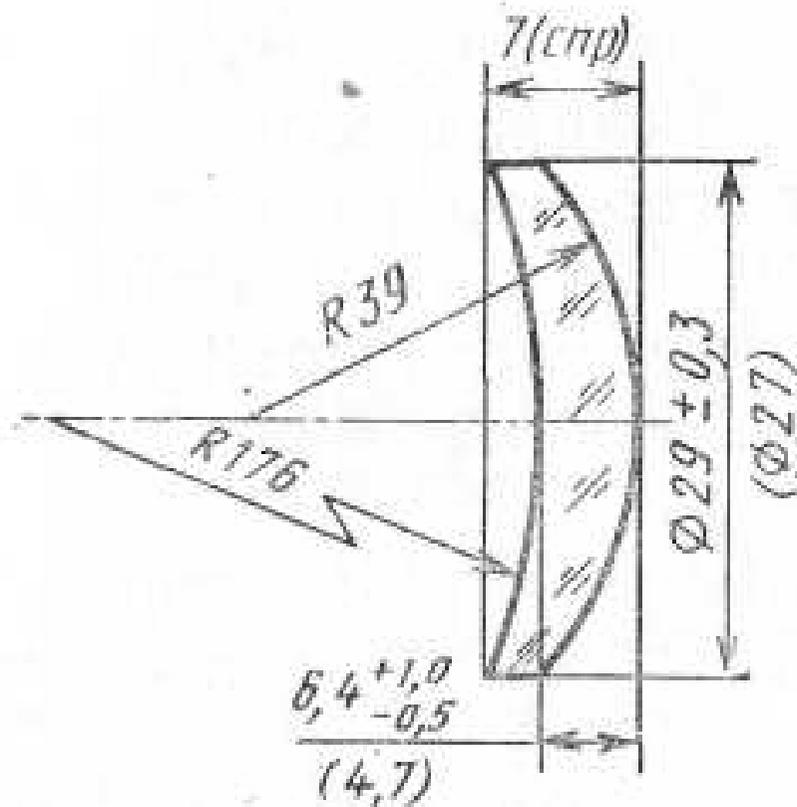
- получить для данной марки значение показателя преломления и дисперсии заданные ГОСТом

- Завышение требований к показателям качества не дает заметного улучшения прибора, но увеличивает стоимость стекла.
- Например, если изменить требования к однородности стекла с 3 категории на 1, стоимость стекла увеличится в 4-5 раз.

# Показатели качества оптических бесцветных стекол

Категории по:

- отклонению показателя преломления
- отклонению средней дисперсии
- оптической однородности
- двойному лучепреломлению
- показателю ослабления
- бессвильности
- пузырьности



Катег. и класс $\Delta n_e$	4B
Катег. и класс $\Delta(n_e' - n_e')$	3Г
Однородность	3
Дв. лучепреломл.	3
НА	4
Бесшвиальность	2Б
Пузырность	5Д
Штук	10 000
МТ	218-82
КЗ	2,76
Масса, г	
макс.	14,60
ном.	12,50
мин.	11,51

Общие ТУ по ГОСТ 13240-78  
 Марка стекла ТК 16 ГОСТ 3514-76

Образец оформления технических условий на заготовку линзы

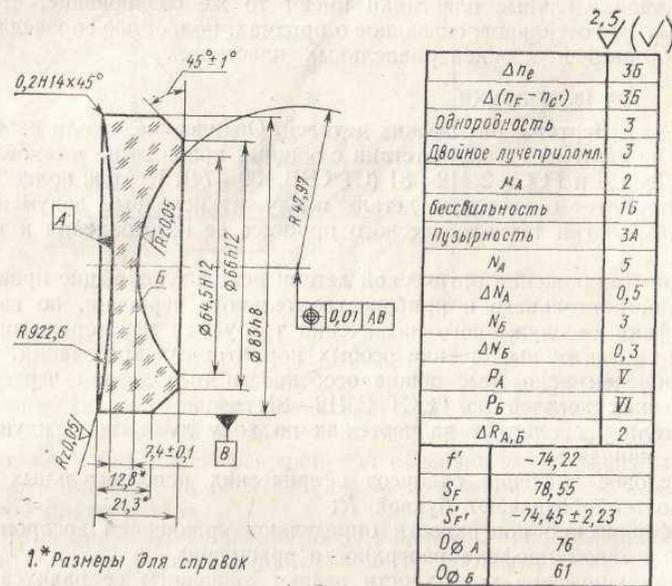


Рис. 67. Линза из стекла Ф1 ГОСТ 3514—76

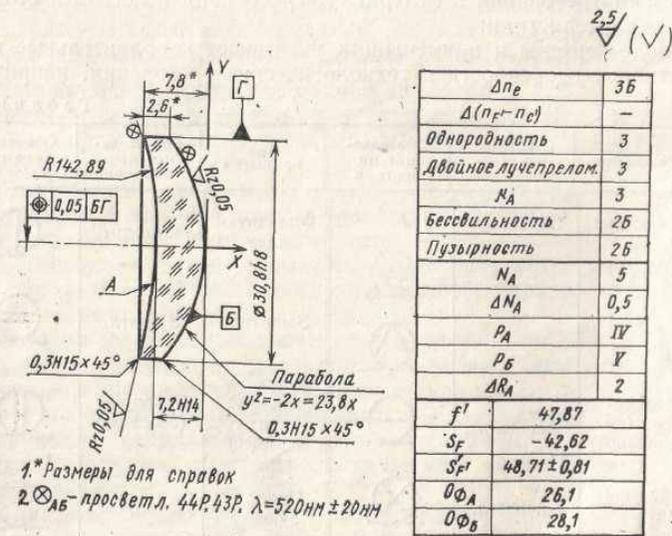


Рис. 68. Линза с асферической поверхностью из стекла БК10 ГОСТ 3514—76

По отклонению показателя преломления и средней дисперсии установлено **5 категорий** качества стекла

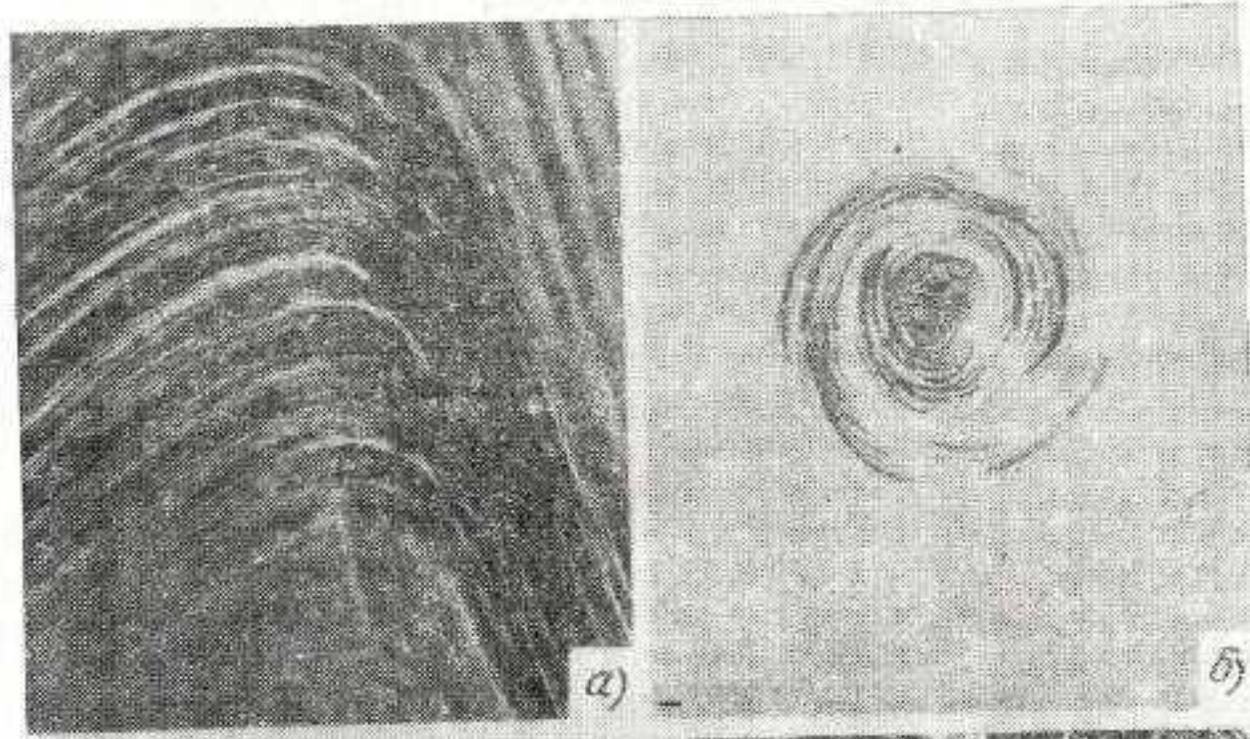
Категория	$\Delta n_e 10^4$	$\Delta(n_F' - n_C') 10^5$
1	$\pm 2$	$\pm 2$
2	$\pm 3$	$\pm 3$
3	$\pm 5$	$\pm 5$
4	$\pm 10$	$\pm 10$
5	$\pm 20$	$\pm 20$

По однородности показателя преломления в партии заготовок установлено 4 класса, по средней дисперсии 2 класса качества

Класс	Наибольшая разность $\Delta n_e 10^4$ в партии заготовок	Наибольшая разность $\Delta(n_F' - n_C') 10^5$ в партии заготовок
А	0,2	-
Б	0,5	-
В	1	1
Г	В пределах заданной категории	В пределах заданной категории

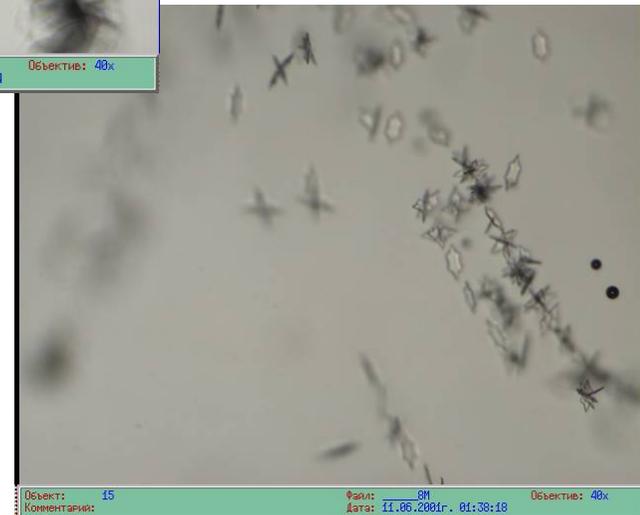
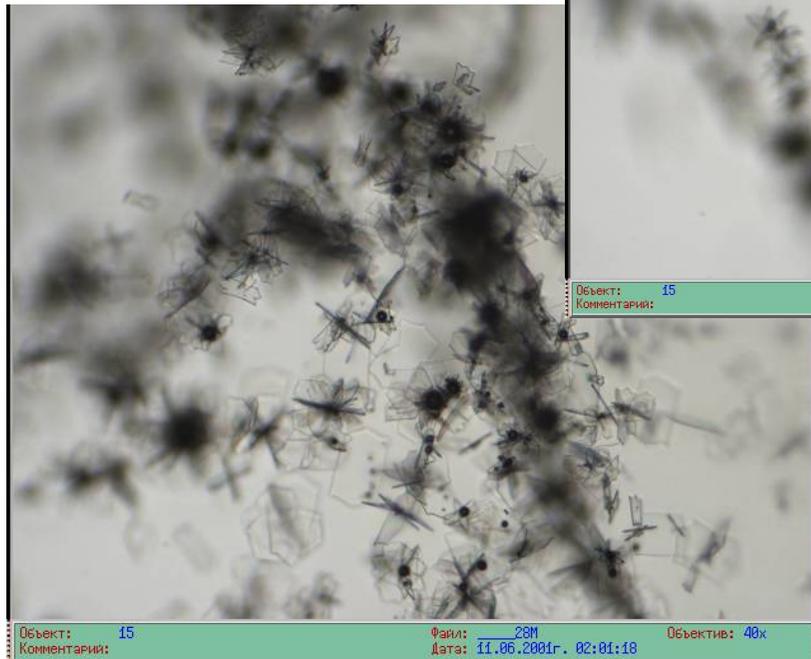
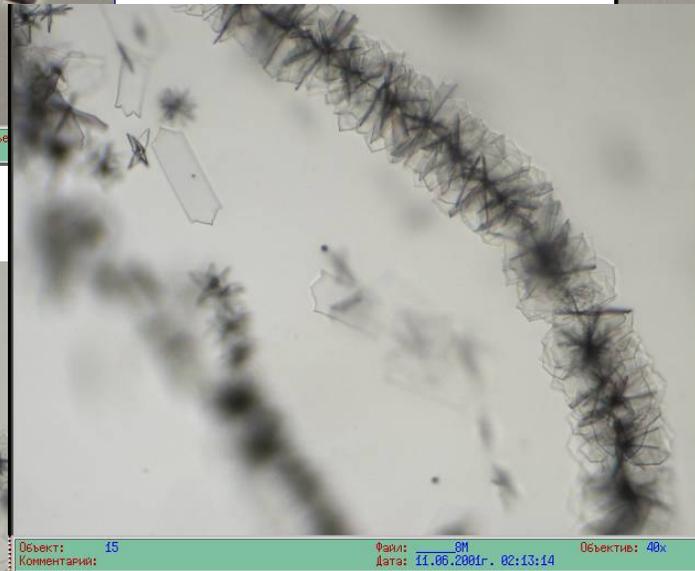
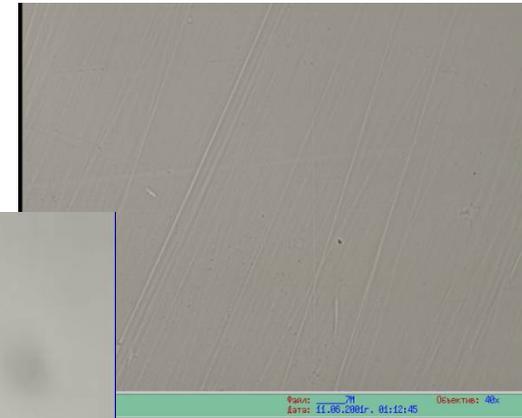
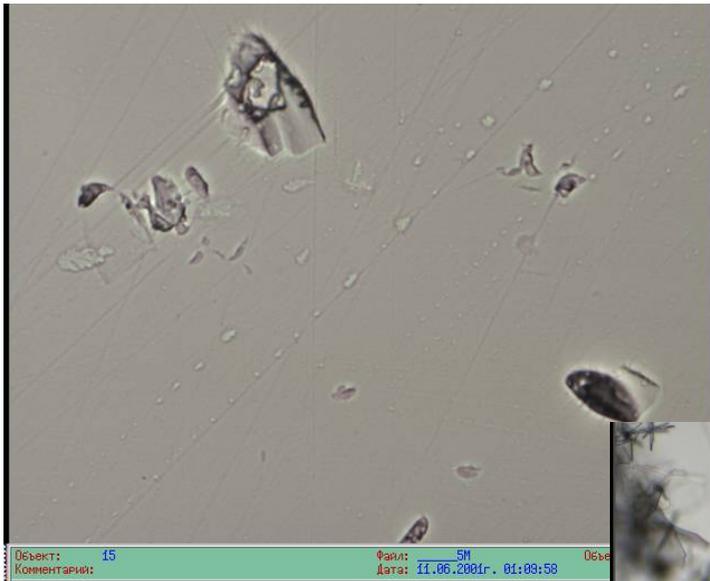
- *Оптическая неоднородность* стекла рассматривается как неоднородность  $n$  по объему материала.
- Неоднородности могут быть химического или физического происхождения. **Химические неоднородности — свили** возникают в процессе варки и выработки стекла и обусловлены непостоянством химического состава ввиду непровара или улетучивания отдельных компонентов, разъедания стенок стекловаренных сосудов и плохой гомогенизации расплава.

- **Свили** - прозрачные нитевидные или слоистые включения имеющие показатель преломления отличный от показателя преломления основной массы стекла.

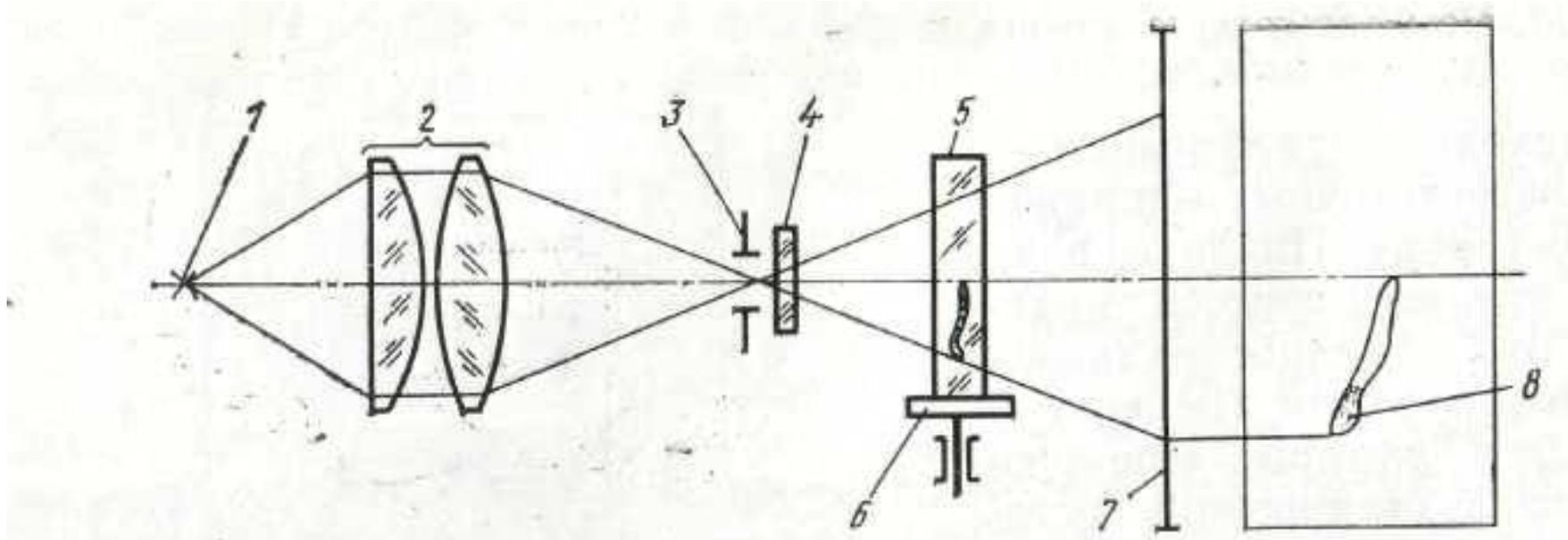


а — нитевидная свиль; б — узловая свиль

Образцы литий-фосфат-боратного стекла.  
Изображение получено на микровизире.  
Увеличение \*40



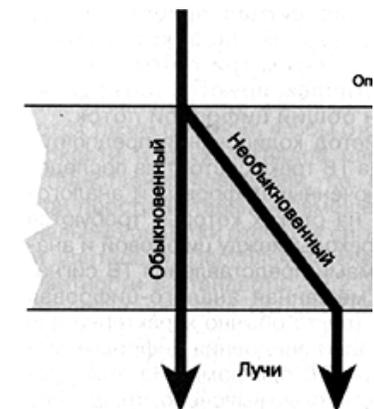
## Установка для контроля бессвильности стекла



Метод контроля: на экране проекционной установки получают тенью картину свили и сравнивают ее с тенью картиной эталонных свилей 1-й или 2-й категорий бессвильности.

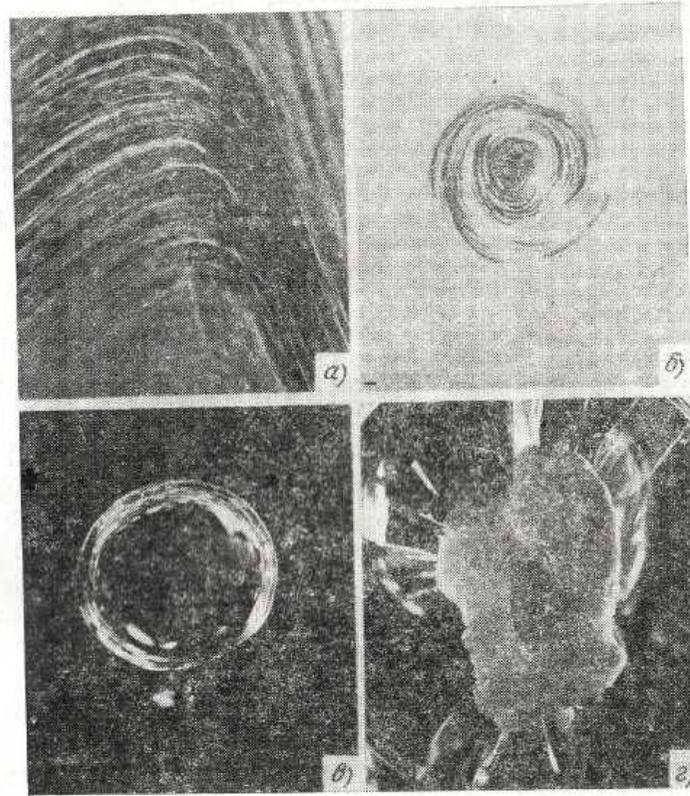
- **Физические неоднородности** связаны с образованием в заготовках стекла остаточных напряжений при отжиге вследствие быстрого охлаждения или температурных градиентов в печи. Напряжения в стекле вызывают появление двойного лучепреломления и изменение значения  $n$ .
- Физические неоднородности могут быть устранены повторным отжигом.

- **Двойное лучепреломление** является показателем качества **отжига** стекла, который характеризуется **разностью хода** (в **нанометрах на 1см пути**) двух лучей, на которые разделяется падающий луч под действием остаточных напряжений при прохождении в толще стекла в направлении наибольшего размера.
- Допускаемое двойное лучепреломление нормируется **пятью категориями**. Числовые значения предельных отклонений для всех пяти категорий находятся в пределах **от 1,5 до 65 нм/см**.
- Категория 1 назначается для интерференционных, астрономических приборов, зеркал лазеров.
- Категории 2-3 для фотографических, киносъёмочных объективов, телевизионных приборов, оборачивающих систем.
- Категории 4 – 5 для осветительных систем, конденсоров, луп.



- **Показатель ослабления** есть величина обратная расстоянию, на котором поток излучения от источника типа А ослабляется в результате поглощения и рассеяния в 10 раз.
- Установлено 8 категорий качества стекла, нормируемых по показателю ослабления  $\mu_A = 0.0002-0.0130 \text{ см}^{-1}$

- **Пузырность** характеризуют диаметром наибольшего пузыря допускаемого в заготовке при ее просмотре.
- Установлено 11 категорий пузырности.
- Допустимые предельные отклонения диаметров пузырей для всех категорий находятся в пределах от 0,002 до 5 мм.
- Для сеток, шкал, лимбов, мик коллиматоров, которые рассматриваются с большим увеличением, пузырность назначается 1 категории.
- Пузырность категории 3-5-7 назначается в любительских фотоаппаратах, биноклях, зрительных трубах.



### Дефекты стекла:

*a* — нитевидная свиль; *б* — узловая свиль;

*в* — пузыри; *г* — камень

Камни, сопровождаемые трещинами в заготовках  
оптических деталей не допускаются

# **ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКОГО БЕСЦВЕТНОГО СТЕКЛА**

## **Основная задача при варке стекла**

- получить для данной марки значение показателя преломления и дисперсии заданные ГОСТом.
- получить высокую степень однородности оптического стекла.

Большинство оптических стекол многокомпонентны. В состав оптических стекол обычно входят 4-12 окислов. Например, одна из марок стекла типа К содержит семь окислов в следующем соотношении:

$\text{SiO}_2$  — 72 %;

$\text{B}_2\text{O}_3$  — 8,15 %;

$\text{K}_2\text{O}$  — 10,45 %;

$\text{Na}_2\text{O}$  — 7,20 %;

$\text{CaO}$  — 1,55 %;

$\text{MgO}$  — 0,45 %;

$\text{Al}_2\text{O}_3$  — 0,20 %.

- каков приблизительный состав песка?
- что кроме диоксида кремния входит?
- и сам диоксид чистый или связан с чем-то?
  
- все зависит от региона и карьера, есть пески с содержанием диоксида кремния выше 98% и это природные.
  
- кристаллы  $\text{SiO}_2$  как правило включают в себя примеси, дающие цвет всему песку.

Если песок кварцевый (по виду практически бесцветный, это кремнезём) то он действительно может состоять из  $\text{SiO}_2$  на 95-99%, а обычный жёлтоватый песок, содержит примеси железа А так еще полевого шпата (преимущественно К-На) и слюды (мусковита), оксид алюминия, оксиды и соли металлов. и т.д.

Тип стекла	SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PbO	BaO	ZnO	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	F
Кроны:														
легкий (ЛК) . . . . .	53,3	16,2	8,8	—	0,2	—	—	—	—	—	—	16,2	—	5,3
фосфатный (ФК) . . . . .	—	3,0	10,0	—	0,5	70,5	—	—	—	—	4,0	12,0	—	—
крон (К) . . . . .	72,0	8,1	—	—	0,2	—	—	—	—	1,5	0,5	10,5	7,2	—
баритовый (БК) . . . . .	49,5	4,8	—	—	0,2	—	2,6	21,6	12,5	—	—	7,6	1,2	—
тяжелый (ТК) . . . . .	32,7	13,2	3,1	—	1,6	—	—	45,9	3,5	—	—	—	—	—
Кронфлинт (КФ) . . . . .	63,0	1,8	—	—	0,2	—	16,0	—	—	2,0	—	11,0	6,0	—
Флинты:														
баритовый (БФ) . . . . .	41,8	—	—	—	0,2	—	33,2	11,4	5,2	—	—	8,2	—	—
легкий (ЛФ) . . . . .	61,0	—	—	—	0,2	—	26,3	—	—	—	—	8,0	4,5	—
флинт (Ф) . . . . .	47,0	—	—	—	0,2	—	46,4	—	—	—	—	6,4	—	—
тяжелый (ТФ) . . . . .	31,6	—	—	—	0,2	—	65,4	—	—	—	—	2,8	—	—
особый (ОФ) . . . . .	53,1	17,5	1,1	21,3	0,5	—	—	—	—	—	—	6,5	—	—

## Приготовление шихты

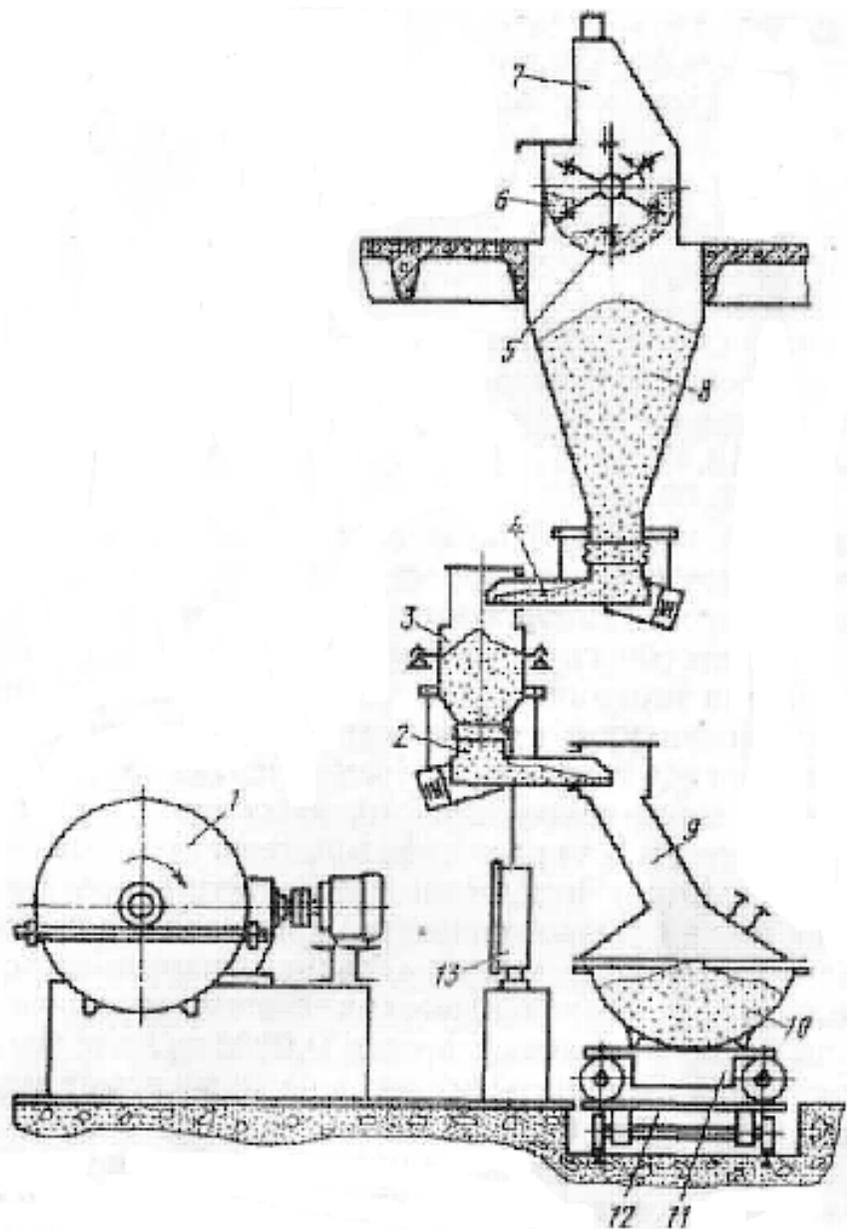
Шихта - смесь сырьевых химических материалов: солей, окислов, гидроокисей.

Используют природные материалы: кварц, сульфат и синтетические: окислы, соли калия, бария, кальция.

При высоких температурах соли и гидроокиси разлагаются:  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ .

В сырьевых материалах для оптического стекловарения не должны присутствовать красящие примеси: соединения железа, хрома, никеля, меди.

Перед составлением шихты материалы подвергают измельчению и помолу до зернистости 0,05—0,3мм.



**Подготовка шихты**  
состоит из операций:  
1) дробление  
2) помол  
3) обогащение  
4) сушка  
5) просев  
6) усреднение.

Секция механизированной линии приготовления шихты для варки стекла

Соприкасающиеся с материалом поверхности бункеров, лотков и смесителя во избежание попадания в шихту железа покрывают листовым алюминием.

Для варки стекол используют также бой стекла той же марки в виде кусков массой 10—100 г в количестве до 40 % теоретической массы навариваемой стекломассы.

**Варка стекла** — это термический процесс, в результате которого шихта и бой стекла превращаются в расплавленную однородную стекломассу.

**Стадии процесса варки оптического стекла:**

- Силикатообработка;
- Стеклообработка;
- Осветление;
- Гомогенизация;
- Охлаждение.

## Этапы технологического процесса варки стекла:

засыпка и развар шихты,  
осветление и гомогенизация расплава,  
охлаждение стекломассы до температуры выработки,  
вывоз сосуда со стекломассой из печи на отлив.



Технологический график варки оптического стекла

- **Силикатообработка** начинает происходить уже при температуре 400°C когда заканчиваются основные химические реакции в твердых частицах и улетучиваются газообразные составы, испаряется вода, а не прореагировавшие компоненты спекаются. С дальнейшим повышением температуры плавятся соли, твердые вещества растворяются в расплавах и реакции ускоряются.

- Стеклообработка начинается когда стекло представляет собой еще пенистый расплав, который насыщен частицами шихты, кварца и пузырьками газов. Кварцевый песок растворяется в расплаве силикатов, а силикаты провариваются, стекло становится прозрачным, число пузырей и пены уменьшается.

Стеклообработка продолжительна во времени особенно для вязких составов стекла.

- **Осветление** заключается в освобождении стекла от газовых пузырьков.
- Большое количество пузырей делает стекло не пригодным для изготовления оптических деталей.
- Чтобы легче удалить пузыри нужно сделать стекло менее вязким и создать в нем восходящий поток.
- Для этого **повышают температуру** на  $100^{\circ}\text{C}$  выше температуры провара шихты, и интенсивным механическим **перемешиванием** стекла, **добавкой в состав стекла осветителей**, которые интенсивно выделяют легкие пузырьки  $\text{O}_2$ , способствующие удалению тяжелых пузырей из  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  (нитраты, сульфаты, аммонийные соли) При высоких температурах они разлагаются, выделяя в стекломассу большое количество крупных пузырей размером до 1—3 мм, отличающихся по составу от углекислоты, которой пересыщен расплав стекломассы. Углекислота, давление которой низко, стремясь выровнять свое давление, переходит в эти пузырьки.)

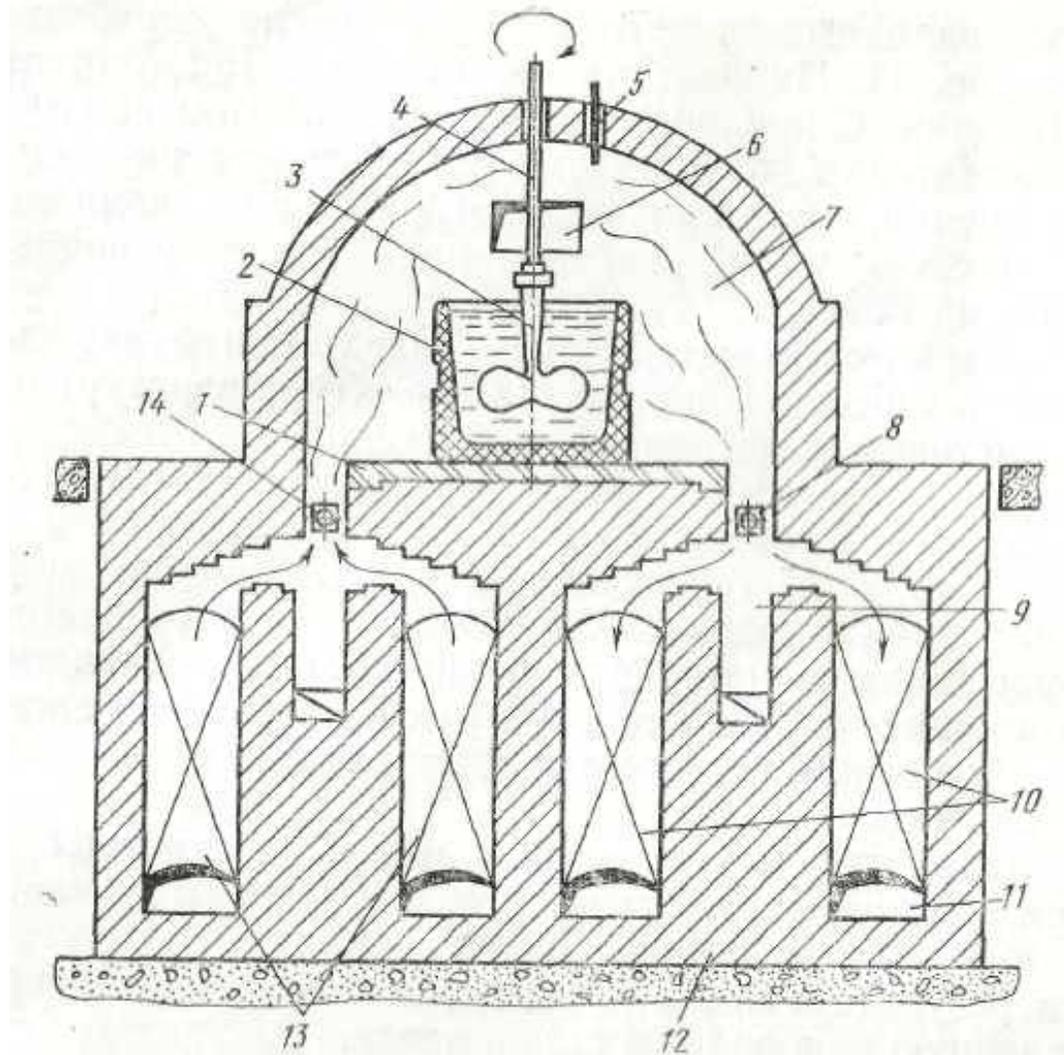
- **Гомогенизация** – процесс приведения стекла к состоянию химической однородности.
- Осветление и гомогенизация стекломассы, в результате которых повышается однородность и удаляются пузыри, протекают практически одновременно. Температура в печи повышается до значения, соответствующего вязкости стекла 1-10 Па·с. Расплав становится менее вязким, что вызывает процесс выделения и подъема на поверхность пузырей.
- На конец штанги стекломешальной машины надевают обожженную при температуре 1200—1300 °С керамическую мешалку и вводят ее в расплав, постепенно увеличивая частоту вращения штанги с 10—15 до 70—80 об/мин. При перемешивании происходит выравнивание химического состава стекломассы и удаление оставшихся пузырей, поднимающихся вместе со стеклом из нижних слоев в верхние

- **Охлаждение** необходимо для получения стекла вязкостью обеспечивающей отлив стекла из стекловаренного сосуда.

При охлаждении в стекле продолжаются процессы осветления и гомогенизации. **Режим охлаждения должен выдерживаться строго по графику – чтобы избежать появления кристаллизации.**

## Оборудование для варки стекла:

- пламенные горшковые печи периодического действия
- ваннные печи непрерывного действия
- печи с индукционным нагревом с платиновыми тиглями

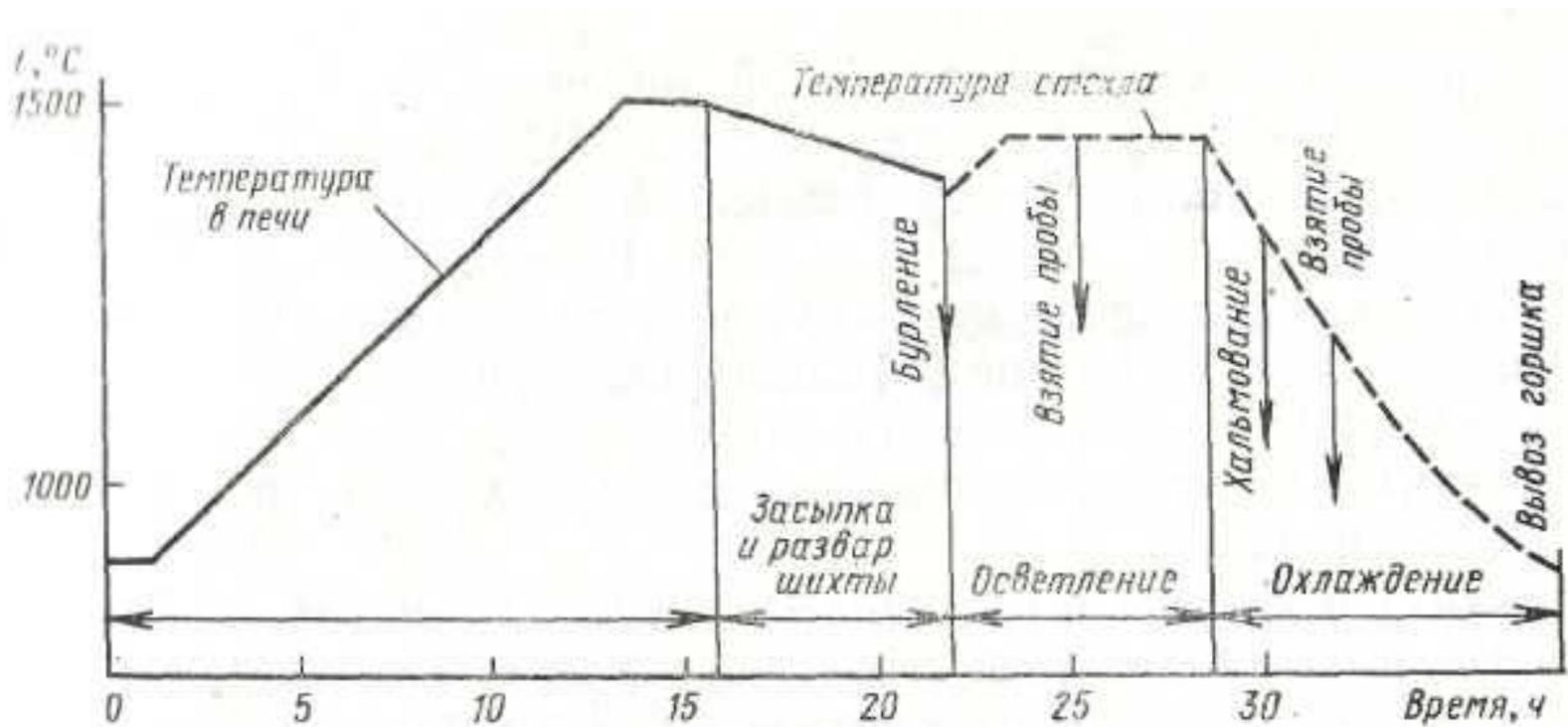


Однгоршковая стекловаренная печь

12 - основание, из огнеупорного кирпича,  
 10 и 13 - регенераторы,  
 7-рабочая камера.  
 6 - окно для засыпки шихты, взятия проб и наблюдения за процессом варки;  
 2- стекловаренный горшок. Рабочая камера обогревается пламенем от сгорания природного газа, подаваемого попеременно через две пары горелок 8 и 14.  
 Температура в рабочей камере печи 1550-1570°C, контроль температуры осуществляется термопарой 5.

## Этапы технологического процесса варки стекла:

засыпка и развар шихты,  
осветление и гомогенизация расплава,  
охлаждение стекломассы до температуры выработки,  
вывоз горшка со стекломассой из печи на отлив.



Технологический график варки оптического стекла

- Горшковые печи для варки оптических стёкол должны выдерживать длительный срок температуронагрева до  $1000^{\circ}\text{C}$ ,
- обеспечивать возможность оперативного регулирования температуры в печи с точностью  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ,
- иметь манёвренный тепловой режим в пределах температур  $700-900^{\circ}\text{C}$  и  $1500 - 1600^{\circ}\text{C}$ .
- В одной печи нельзя варить одновременно стёкла двух марок, т. к. они имеют различные тепловые режимы варки.

## **Стекловаренные сосуды.**

**Сосуды (горшки) для варки оптических стёкол большинства марок делают из высокоогнеупорных материалов глины и каолина.**

**Объемом 500-900 л.**

**Глины огнеупорные с температурой плавления 1750°C состоят из полиминеральных смесей гидросиликатов. Каолин (белая глина) с температурой плавления 1800°C отличается меньшей загрязнённостью.**

**Смесь глины и каолина в соотношении 1:1 называют шамотом, который обжигают до полной усадки для изготовления горшков**

**Засыпку шихты начинают с подачи боя.** Куски стекла расплавляются и образуют слой стекломассы толщиной несколько сантиметров, предохраняющий дно горшка от разъедания активными химическими компонентами шихты. В дальнейшем засыпку шихты и боя чередуют.

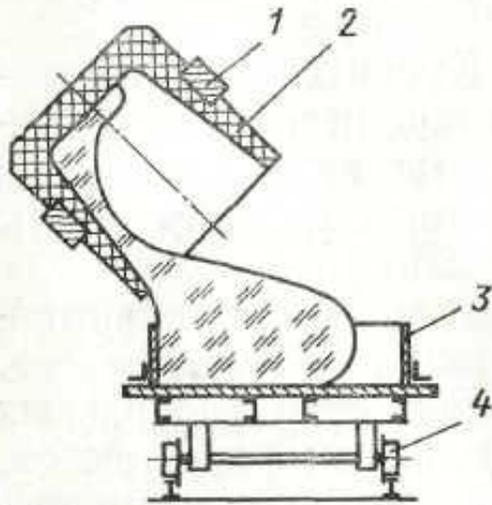


Рис. 14. Отливка стекла в форму

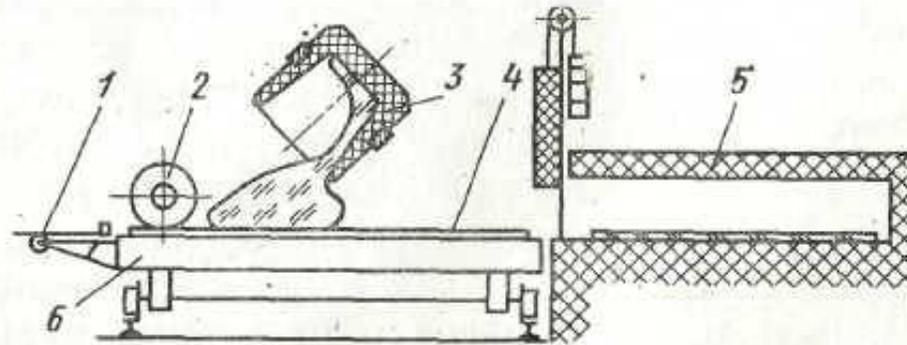


Рис. 15. Отливка стекла в лист

Выработку стекла из горшка осуществляют двумя способами:

отливом в форму или на литейный стол с прокаткой в лист.

Сразу же после отлива форму со стеклом помещают в электрическую печь отжига.

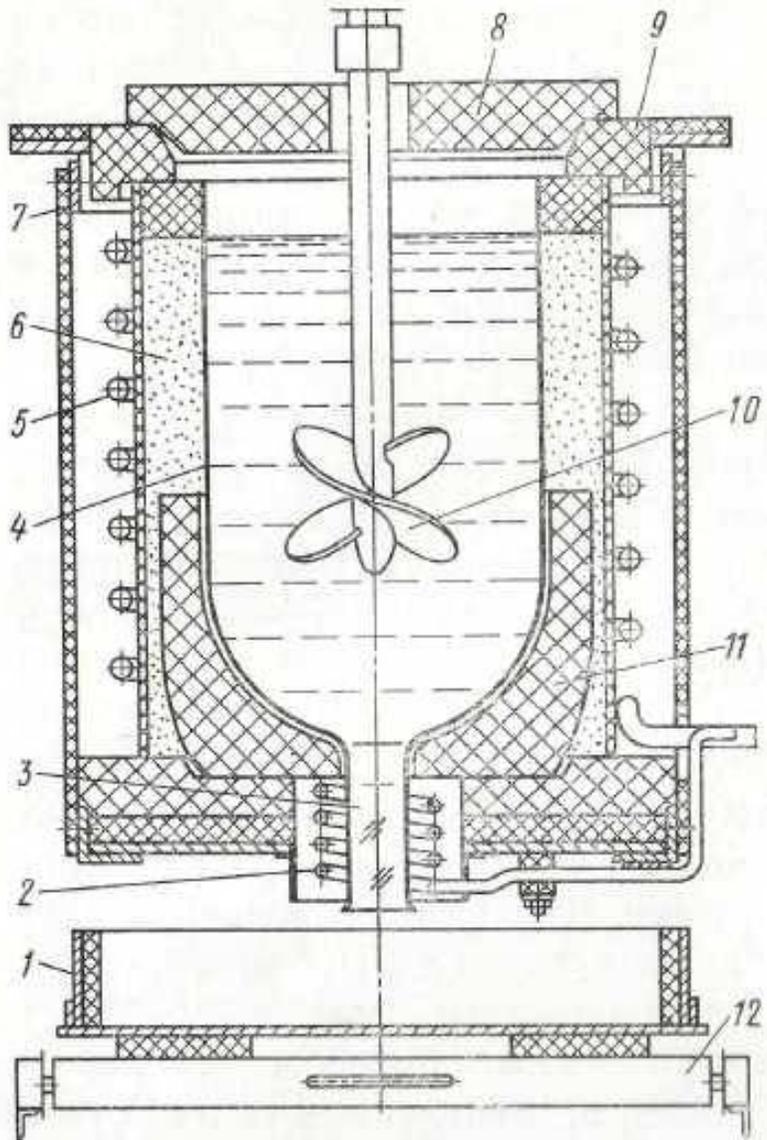
При прокатке в лист получают листы стекла толщиной 18-40 мм.

Ванные печи применяют для варки стёкол одной марки в больших количествах. Эта печь представляет собой ряд бассейнов, выполненных из огнеупорных материалов, отделенных один от другого порогами и соединенных между собой протоками. Сверху печь закрыта сводом.

Стекломасса через платиновую трубу 2 (рис. 6), вставленную в отверстие бассейна охлаждения 1 ванны, сливается в форму.



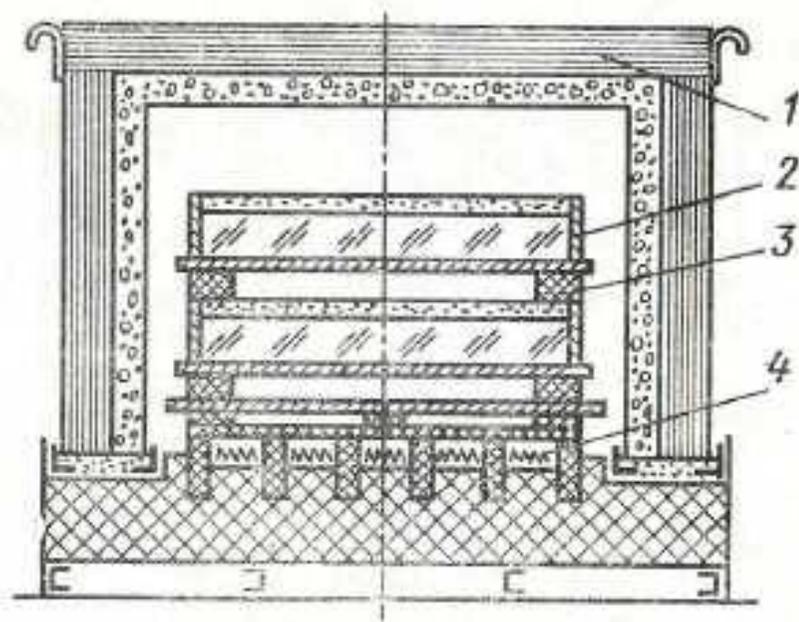
Выработка стекла из ванной печи



Стекла некоторых марок с повышенными требованиями по однородности и пузырьности, имеющие склонность к разъеданию стенок керамических сосудов варят в платиновых тиглях (объемом 50-70 л) в печах с индукционным нагревом. Технологический процесс варки стекла в платиновом тигле аналогичен процессу варки в керамических горшках.

Установка для варки стекла в платиновом тигле

Отжиг оптического стекла проводят в камерных электрических печах. Печь перед установкой в нее форм со стеклом разогревается с помощью нагревателей 4 до температуры 200-500 °С. Формы 2 с горячим отлитым стеклом устанавливают краном на подставки 3, после чего печь закрывают теплоизоляционным колпаком 1. Стекло разогревается до температуры  $t = t_B + (10-20^\circ\text{C})$  и выдерживается при этой температуре 4-8 ч.



За верхнюю границу области отжига стекла принимают температуру  $t_B$ , при которой вязкость стекла составляет  $10^{12}$  Па с.

Нижняя граница  $t_H$  области отжига находится на  $70-150^\circ$  ниже и определяется опытным путем для каждой марки стекла.

Печь для отжига блочного стекла

- Состав «оконого» стекла выражается формулой  $\text{Na}_2 \text{CaSi}_6 \text{O}_{14}$  или  $\text{Na}_2 \text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2$ .
- Основными исходными продуктами стекольного производства являются сода, известняк и песок. Процесс образования стекла может быть выражен уравнением:
- $\text{Na}_2 \text{CO}_3 + \text{CaCO}_3 + 6\text{SiO}_2 = 2\text{CO}_2 + \text{Na}_2 \text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2$
- Смесь исходных веществ нагревают приблизительно до 1400 °С и выдерживают расплавленную массу до полного удаления газов, после чего она пускается в дальнейшую переработку.
- 7) При выработке стекла соду нередко заменяют более дешевой смесью сульфата натрия и угля. В этом случае реакция идет по следующему уравнению:
- $\text{Na}_2 \text{SO}_4 + \text{C} + \text{CaCO}_3 + 6\text{SiO}_2 = \text{Na}_2 \text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 + \text{CO} + \text{SO}_2 + \text{CO}_2$
- 8) Исследования при помощи рентгеновских лучей показали, что стеклообразное состояние вещества (подобно жидкому) отличается от кристаллического неполной упорядоченностью взаимного расположения отдельных элементов пространственной решетки. На рис. 145 приведены схемы структур  $\text{Al}_2 \text{O}_3$  в кристаллическом (Л) и стеклообразном (Б) состояниях. Как видно из этих схем, характерные для кристаллической решетки  $\text{Al}_2 \text{O}_3$  шестиугольники в стеклообразном состоянии строго не выдержаны, но общий характер расположения частиц все же подобен имеющему место в кристалле.

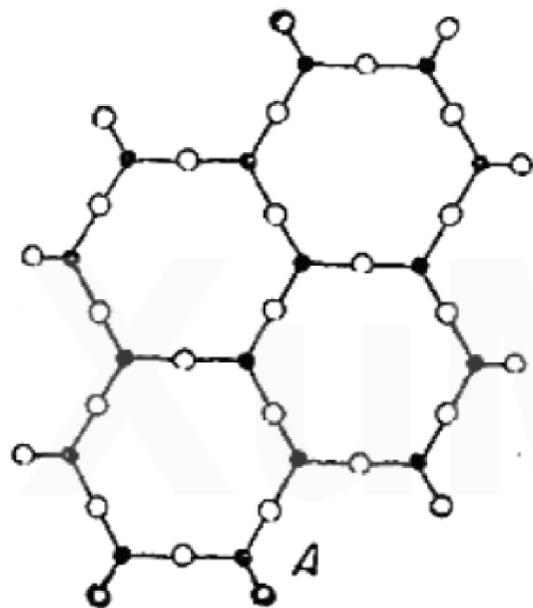


Рис 145. Схемы структур  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в кристаллическом (А) и стеклообразном (Б) состояниях.

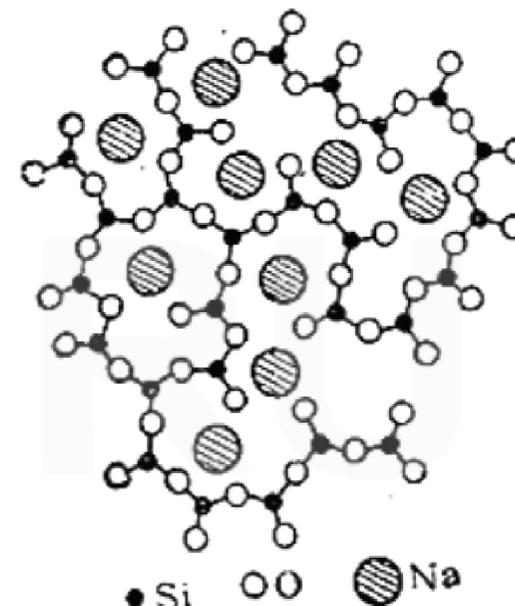


Рис. 146. Схема структуры натрий-силикатного стекла.

Как видно из этих схем, характерные для кристаллической решетки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  шестиугольники в стеклообразном состоянии строго не выдержаны, но общий характер расположения частиц все же подобен имеющему место в кристалле. Схема структуры натрий-силикатного стекла дает представление о размещении в решетке металлических ионов: последние без какой-либо четкой последовательности располагаются в пустотах силикатной сетки. Так как в этой сетке нет строго закономерного повторения структурных элементов, отдельные ее связи характеризуются неодинаковой прочностью. Поэтому стекло, в противоположность кристаллу, не обладает определенной [температурой](#) плавления, а в процессе нагревания размягчается постепенно.