

# НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ СТЕКЛОЛ

С. В. Немилов



[www.e.lanbook.com](http://www.e.lanbook.com)



**ЭБС  
ЛАНЬ**

**С. В. НЕМИЛОВ**

# **НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ СТЕКЛОЛ**

**Научный редактор Н. В. Никоноров**

*Учебное пособие*



**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
МОСКВА  
КРАСНОДАР  
2021**

ББК 30.3я73

Н 50

**Немилов С. В.**

**Н 50** Научные основы материаловедения стекол: Учебное пособие. — СПб.: Издательство «Лань», 2021. — 360 с.: ил. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

**ISBN 978-5-8114-2905-9**

Материаловедение стёкол — веществ, находящихся в стеклообразном состоянии, — имеет как теоретический, так и практический аспекты. В настоящее время отсутствует учебная литература, которая связывала бы эти аспекты на единой основе, автор предполагает восполнить этот пробел. Изложены классические теории стеклования жидкостей и основы неравновесной термодинамики стёкол. На основании обобщения большого массива экспериментальных данных показано, как именно разнообразие релаксационных процессов в стеклообразующих жидкостях, формирующих свойства стекол, связано с конкретной атомно-молекулярной структурой, определяемой химическим составом. С привлечением релаксационных уравнений Максвелла получены новые соотношения, связывающие свойства, важные как для теории, так и для практики (температуры стеклования, вязкость, времена релаксации, электропроводность, модули упругости, механические потери, и др.). Это открыло возможность точных расчётов, чего до сих пор в области материаловедения стёкол не существовало. Совокупность температурно-временных изменений в стёклах (от их «векового старения» до кристаллизационной способности) изложена в единой системе представлений. Дан анализ основных классов стёкол, применяемых сегодня в разных областях науки и техники (оксидных: силикатных, боратных, боросиликатных, германатных; содержащих фториды; фосфатных; халькогенидных; органических молекулярных и полимерных; металлических), с точки зрения особенностей их структуры и своеобразия свойств, важных для практики. Кратко охарактеризованы принципы производства стёкол различного назначения и отмечены перспективные направления практических разработок для каждой группы этих веществ. Математическая, физическая и химическая стороны изложения даны в предельно доступной форме.

Книга предназначена для студентов, обучающихся по направлениям подготовки и специальностям, входящим в УГС: «Химия», «Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии», «Химические технологии», «Физико-технические науки и технологии», «Технологии материалов». Пособие также представляет интерес для аспирантов и научных работников как химического, физического, так и химико-технологического профилей, обучение или работа которых связаны с этой областью материаловедения.

ББК 30.3я73

#### **Рецензенты:**

**В. И. АРБУЗОВ** — доктор физико-математических наук, профессор кафедры оптоинформационных технологий и материалов Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики;

**В. Г. КОНАКОВ** — доктор химических наук, профессор Института химии Санкт-Петербургского государственного университета.

#### **Научный редактор**

**Н. В. НИКОПОРОВ** — доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой оптоинформационных технологий и материалов Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

**Обложка**  
**Е. А. ВЛАСОВА**

© Издательство «Лань», 2021  
© С. В. Немилов, 2021  
© Издательство «Лань»,  
художественное оформление, 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ .....</b>	<b>3</b>
<b>ГЛАВА 1. СТЕКЛО В ЖИЗНИ ОБЩЕСТВА .....</b>	<b>6</b>
1.1. Обнаружение стекла человеком и его первые применения .....	6
1.2. Начало применения стекла в приборостроении .....	7
1.3. Области современного применения стекла .....	7
1.4. Стекло в современной науке .....	8
<b>ГЛАВА 2. ПРИРОДА СТЕКЛООБРАЗНОГО СОСТОЯНИЯ (ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА).....</b>	<b>10</b>
2.1. Отличительные признаки стекла и различные определения стеклообразного состояния.....	10
2.2. Строение стекла по данным дифракционных исследований .....	11
2.2.1. Дифракция кристаллами .....	11
2.2.2. Рассеяние излучений стёклами и жидкостями .....	12
2.2.3. Функция радиального распределения .....	13
2.2.4. Понятие о структурной единице.....	14
2.3. Упорядочение в неупорядоченных системах .....	15
2.3.1. Ближний порядок .....	15
2.3.2. Средний порядок.....	15
2.3.3. Дальний порядок .....	16
2.4. Кристаллитная теория строения стекла и гипотеза беспорядочной сетки .....	16
2.5. Современные методы изучения строения стекла.....	17
<b>ГЛАВА 3. ТЕОРИЯ СТЕКЛОВАНИЯ .....</b>	<b>20</b>
3.1. Природа взаимодействия в конденсированных системах.....	20
3.1.1. Ионное взаимодействие .....	20
3.1.2. Взаимодействие в металлах .....	21
3.1.3. Ковалентное взаимодействие .....	21
3.1.4. Водородные связи .....	22
3.1.5. Взаимодействия Ван-дер-Ваальса .....	23
3.2. Энергия химических связей.....	24
3.3. Основные особенности строения жидкостей.....	25
3.3.1. Непостоянство молекулярных координат во времени.....	25
3.3.2. Наличие пустот структуры (дырок) .....	25
3.3.3. Непостоянство взаимной ориентации молекул .....	25
3.3.4. Структурные параметры жидкости .....	25
3.3.5. Активационная природа структурных изменений в жидкостях .....	26
3.3.6. Зависимость энергии активации от вида химического взаимодействия.....	27
3.4. Проявление стеклования на свойствах жидкости .....	28

3.5. Соотношение температур стеклования и плавления (правило «2/3» Кауцмана).....	30
3.6. Время релаксации структуры и его зависимость от температуры .....	31
3.7. Модель Максвелла и соотношение Максвелла .....	32
3.8. Упруговязкое поведение жидкости при периодическом воздействии .....	34
3.9. Основы кинетической теории стеклования .....	35
3.9.1. Стеклование при линейном охлаждении или нагревании (теория Волькенштейна и Птицына).....	35
3.9.2. Экспериментальное определение $T_g$ .....	38
3.9.3. Стеклование при периодическом воздействии (теория Леонтовича и Мандельштама) .....	40
3.9.4. Взаимное соответствие обоих вариантов кинетической теории стеклования.....	42
3.10. Вязкость при температуре стеклования, рассчитанная на основании уравнения Максвелла и кинетической теории .....	44
<b>ГЛАВА 4. ВЯЗКОСТЬ СТЕКЛООБРАЗУЮЩИХ РАСПЛАВОВ И СТЕКОЛ.....</b>	<b>47</b>
4.1. Вводные замечания.....	47
4.2. Определение коэффициента вязкого течения.....	47
4.3. Основные сведения о вязкости газов.....	48
4.4. Вязкость расплавов стёкол: диапазоны изменений и методы измерений .....	49
4.4.1. Общий характер температурной зависимости .....	49
4.4.2. Общая характеристика методов измерения вязкости.....	51
4.5. Понятие о реологии и неньютоновских типах течения.....	53
4.6. Механизм вязкого течения и структура стёкол и расплавов .....	56
4.6.1. Общее уравнение температурной зависимости вязкости .....	56
4.6.2. Активационные параметры вязкого течения.....	58
4.6.3. Природа атомов, преодолевающих потенциальный барьер .....	61
4.6.4. Свободная энергия активации и прочность химических связей .....	63
4.6.5. Связь модуля сдвига и температуры стеклования.....	65
4.6.6. Связь энтропии активации вязкого течения со структурой стёкол .....	66
4.6.7. Другие подходы к характеристике температурной зависимости вязкости .....	68
4.6.8. Природа температурной зависимости вязкости .....	70
4.7. Роль вязкости в производстве стекла .....	76
<b>ГЛАВА 5. КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ РАСПЛАВОВ СТЕКОЛ.....</b>	<b>77</b>
5.1. Термодинамические особенности метастабильной жидкости.....	77
5.2. Работа образования зародыша кристаллизации .....	78
5.3. Кривые Таммана .....	79

5.3.1. Скорость зарождения и кривая зарождения .....	79
5.3.2. Скорость роста и кривая роста .....	80
5.4. Методы изучения кристаллизационной способности и её характеристики .....	82
5.4.1. Дифференциальный термический анализ .....	82
5.4.2. Политермический метод и диаграммы кристаллизационной способности .....	84
5.4.3. Фазовый состав кристаллов .....	85
5.4.4. Типы кристаллизации .....	85
5.4.5. Скорость кристаллизации .....	86
5.4.6. Ситаллы, их значение в технике .....	87
5.5. Роль кристаллизации в технологии стекловарения .....	88

## ГЛАВА 6. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И СООТНОШЕНИЯ

<b>ТЕРМОДИНАМИКИ</b> .....	<b>89</b>
6.1. Предмет термодинамики .....	89
6.2. Термодинамическая система, виды систем .....	89
6.3. Параметры состояния, параметры процессов .....	90
6.4. Функции и функционалы состояния .....	90
6.5. Виды процессов .....	91
6.6. Внутренняя энергия, теплота и работа .....	91
6.7. Максимальная работа при различных процессах .....	92
6.8. Законы (начала) термодинамики и термодинамические функции .....	93
6.8.1. I закон термодинамики .....	93
6.8.2. II закон термодинамики; энтропия как функция состояния .....	93
6.8.3. Термодинамические функции, важные для материаловедения .....	95
6.8.4. Соотношения, важные для практических расчётов .....	96
6.8.5. III закон термодинамики (тепловая теорема Нернста) .....	97
6.8.6. Статистический смысл отличной от нуля энтропии при абсолютном нуле .....	97
6.9. Производные термодинамических потенциалов и фазовые переходы .....	98
6.9.1. Первые производные термодинамических потенциалов, их физический смысл .....	98
6.9.2. Вторые производные термодинамических потенциалов (соотношения Максвелла), их физический смысл .....	99
6.9.3. Фазовые переходы I и II рода .....	99

<b>ГЛАВА 7. ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ КАК ОСНОВА СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К КЛАССАМ ОПТИЧЕСКИХ СТЕКОЛ.....</b>	<b>102</b>
7.1. Понятия «фазовые равновесия», «компонент», «диаграмма состояния» и др. Работы Гиббса и Розебома. Значение диаграмм состояния в современном материаловедении.....	102
7.2. Понятие химического потенциала. Условия равновесия фаз. Правило фаз Гиббса.....	103
7.3. Диаграмма состояния однокомпонентной системы.....	104
7.4. Эвтектики (двухкомпонентные системы). Линии ликвидуса и солидуса. Значение эвтектик в материаловедении .....	105
7.5. Твёрдые растворы (двухкомпонентные системы). Значение твёрдых растворов в материаловедении.....	108
7.6. Ограниченные твёрдые растворы .....	110
7.7. Упорядоченные твёрдые растворы .....	111
7.8. Полная несмешиваемость в жидком и твёрдом состояниях .....	112
7.9. Системы с расслаиванием в жидком состоянии («жидкость – жидкость»). Стабильное и метастабильное расслаивание .....	112
7.10. Системы с образованием химического соединения (двухкомпонентные системы, конгруэнтное плавление) .....	114
7.11. Системы с образованием химического соединения (двухкомпонентные системы, инконгруэнтное плавление).....	114
7.12. Трёхкомпонентные системы (принципы изображения, концентрационный треугольник Гиббса).....	115
7.13. Комбинации элементов диаграмм состояния. Физико-химический анализ. Роль диаграмм состояния в исследовании стеклообразных систем.....	117
<b>ГЛАВА 8. ТЕРМОДИНАМИКА СТЕКЛООБРАЗНОГО СОСТОЯНИЯ .....</b>	<b>119</b>
8.1. Термодинамические переменные, используемые при математическом описании стеклования.....	119
8.2. Математическое описание избыточной свободной энергии лабильной системы .....	122
8.2.1. Поверхности свободной энергии стекла и метастабильной жидкости .....	122
8.2.2. Математическое условие, налагаемое на изменения вторых производных термодинамического потенциала в точке стеклования.....	124
8.2.3. Соотношение Пригожина – Дефея и его экспериментальная проверка.....	125
8.2.4. Термодинамический инвариант стеклообразного состояния.....	128

8.2.5. Сравнение вкладов в полную энергию вещества энергии химических связей и энергии, обусловленной упорядочением или разупорядочением.....	135
8.2.6 Следствия, вытекающие из соотношений термодинамики стеклообразного состояния.....	138

## **ГЛАВА 9. СИСТЕМА РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ**

<b>В ЖИДКОСТЯХ И СТЁКЛАХ; ИХ ВЗАИМНАЯ СВЯЗЬ .....</b>	<b>146</b>
9.1. Внутреннее трение. Основные виды релаксационных процессов в стёклах .....	146
9.2. Расчёт температур максимума $\alpha$ -релаксации на основании уравнения Максвелла. Соотношения между потенциальными барьерами ионной, $\beta$ - и $\alpha$ -релаксации .....	149
9.3. Ионная проводимость и ионная релаксация .....	151
9.3.1. Природа ионной проводимости и диффузии в стёклах .....	152
9.3.2. Соотношение Максвелла для проводимости диэлектриков ...	156
9.3.3. Соотношение Максвелла как основа связи внутреннего трения и проводимости .....	157
9.3.4. Интерпретация ионной проводимости стекол как релаксационного процесса .....	159
9.4. Релаксация структуры в области высоких температур и отжиг стёкол .....	160
9.5. Релаксация структуры при возвратном изменении температуры (кроссовер-эффект).....	163
9.6. Особенности релаксационных явлений при переходе через температуру стеклования.....	166
9.7. Общие принципы расчёта изменения свойств при изменении температуры в области отжига на основании моделей .....	168
9.8. Релаксационные процессы в стёклах при низких температурах; роль немостиковых атомов .....	171
9.8.1. Физическое старение стекол при комнатной температуре: факты.....	171
9.8.2. Обобщенное описание всей совокупности данных по старению оксидных стекол .....	172
9.8.3. Расчёт изменения показателя преломления стёкол за длительные периоды времени .....	174
9.8.4. Соответствие релаксационных каналов старения спектрам внутреннего трения.....	175
9.9. Взаимная связь ионной проводимости оксидных стекол и вязкости в широком интервале температур.....	175
9.9.1. Возможность моделирования ионной проводимости в терминах теории упругости.....	176
9.9.2. Условие выполнения соотношения Литтлтона.....	177
9.10. Физические причины взаимосвязи различных релаксационных процессов в расплавах и стёклах .....	178



<b>ГЛАВА 10. КИНЕТИКА РАСТВОРЕНИЯ СТЁКОЛ</b>	
<b>В АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ.....</b>	<b>180</b>
10.1. Значение процессов химического взаимодействия материала с окружающей средой в материаловедении.....	180
10.2. Моделирование процессов взаимодействия твёрдого тела с окружающей средой .....	181
10.3. Принципы сопоставления экспериментальных и теоретических значений скорости растворения тела в жидкости .....	183
<b>ГЛАВА 11. КВАРЦЕВОЕ СТЕКЛО .....</b>	<b>187</b>
11.1. Диаграмма состояния: фазы кремнезёма, фазовые переходы.....	187
11.2. Строение элементарных ячеек кварца и кристобалита .....	188
11.3. Структурные единицы и характер химических связей в кремнезёме.....	188
11.4. Технология получения кварцевого стекла (КИ и КУ) .....	190
11.4.1. <i>Электротермический способ (КИ).....</i>	<i>190</i>
11.4.2. <i>Газопламенный способ (КИ) .....</i>	<i>191</i>
11.4.3. <i>Синтез из газовой фазы, КУ (паросинтетический).....</i>	<i>192</i>
11.5. Структура кварцевого стекла. Распределение валентных углов. Природа избыточной энергии кварцевого стекла.....	193
11.6. Упругие постоянные связей. Модель двухъямного потенциала как основа объяснения аномалий свойств. «Полиморфизм» кварцевого стекла.....	194
11.7. Свойства кварцевого стекла .....	195
11.7.1. <i>Вязкость и влияние на нее примесей.....</i>	<i>195</i>
11.7.2. <i>Кристаллизационная способность .....</i>	<i>197</i>
11.7.3. <i>Термическое расширение. Термостойкость .....</i>	<i>197</i>
11.7.4. <i>Упругие свойства .....</i>	<i>198</i>
11.7.5. <i>Прочность, трещины Гриффитца .....</i>	<i>198</i>
11.7.6. <i>Теплоемкость .....</i>	<i>200</i>
11.7.7. <i>Теплопроводность .....</i>	<i>201</i>
11.7.8. <i>Электропроводность.....</i>	<i>202</i>
11.7.9. <i>Особенности релаксации свойств в области температур отжига .....</i>	<i>202</i>
11.7.10. <i>Химическая устойчивость .....</i>	<i>203</i>
11.7.11. <i>Оптические свойства (пропускание и показатель преломления) .....</i>	<i>203</i>
11.7.12. <i>Дефекты структуры, их происхождение и спектроскопические проявления.....</i>	<i>204</i>
11.8. Области применения кварцевого стекла .....	206
<b>ГЛАВА 12. СИЛИКАТНЫЕ КРОНЫ.....</b>	<b>207</b>
12.1. Двухкомпонентные щёлочно-силикатные системы как основа силикатных кронов.....	207

12.1.1. Области стеклообразования в двухкомпонентных щёлочно-силикатных системах.....	207
12.1.2. Система $\text{Li}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (диаграммы состояния).....	208
12.1.3. Система $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (диаграммы состояния).....	208
12.1.4. Система $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (диаграммы состояния).....	209
12.1.5. Структурные единицы, их взаимоотношения, структурные мотивы каркаса.....	210
12.1.6. Сопоставление областей фазового разделения «жидкость – жидкость».....	213
12.2. Кристаллизационная способность и ее связь с диаграммой состояния.....	214
12.3. Зависимость вязкости, «длины» щелочно-силикатных расплавов от их состава и строения.....	216
12.4. Зависимость температуры стеклования $T_g$ от размера щелочного катиона.....	218
12.5. Зависимость вязкости и температуры стеклования от проявления расслаивания.....	219
12.6. Электрические свойства щёлочно-силикатных стёкол и их значение в материаловедении стеклообразных материалов.....	222
12.6.1. Числа переноса.....	222
12.6.2. Зависимость электропроводности от состава.....	223
12.6.3. Энергия активации электропроводности.....	224
12.6.4. Полищелочной эффект.....	226
12.7. Плотность и механические свойства щёлочно-силикатных стёкол.....	228
12.8. Особенности релаксационных процессов при высоких температурах.....	229
12.9. Химическая устойчивость стёкол, содержащих оксиды щелочных металлов.....	229
12.10. Оптические свойства щелочно-силикатных стёкол.....	232
12.11. Двойные системы с оксидами щелочноземельных металлов.....	232
Оксиды щелочноземельных металлов – неизменные компоненты практически всех составов находящих применение оксидных стёкол.....	232
12.11.1. Области стеклообразования и области расслаивания.....	232
В таблице 12.6 приведены составы, соответствующие началу и концу областей образования прозрачных стёкол.....	232
12.11.2. Типичные соединения и структурные единицы.....	233
12.11.3. Вязкость, зависимость $T_g$ от радиуса катиона.....	234
12.11.4. Электрические свойства (общая характеристика).....	234
12.11.5. Показатель преломления.....	234
12.12. Системы $\text{R}_2\text{O}-\text{R}'\text{O}-\text{SiO}_2$ .....	235
12.12.1. Общая характеристика областей стеклообразования.....	235

12.12.2. Специфика изменений состава для стёкол различного назначения.....	236
12.12.3. Основные принципы технологических процессов производства.....	236
<b>ГЛАВА 13. СИЛИКАТНЫЕ ФЛИНТЫ.....</b>	<b>240</b>
13.1. Общие сведения о флинтах.....	240
13.2. Система PbO–SiO <sub>2</sub> .....	240
13.2.1. Область стеклообразования.....	240
13.2.2. Диаграмма состояния.....	240
13.3. Свойства и структура стёкол системы PbO–SiO <sub>2</sub> .....	241
13.3.1. Плотность.....	241
13.3.2. Показатель преломления.....	242
13.3.3. Вязкость.....	242
13.3.4. Электрические свойства.....	243
13.3.5. Химическая устойчивость.....	243
13.3.6. Механические свойства.....	243
13.3.7. Структурная роль оксида свинца в этих стёклах.....	244
13.3.8. Микронеоднородная структура стёкол системы PbO–SiO <sub>2</sub> .....	245
13.4. Стёкла группы силикатных флинтгов – общие характеристики составов и оптических свойств. Особенности окраски стёкол с высоким показателем преломления.....	245
13.5. Принципы производства.....	247
<b>ГЛАВА 14. БОРОСИЛИКАТНЫЕ И ЛАНТАНОВЫЕ КРОНЫ И ФЛИНТЫ.....</b>	<b>248</b>
14.1. Боратные стёкла.....	248
14.1.1. Борный ангидрид.....	248
14.1.2. Диаграммы состояния щёлочно-боратных систем на примере системы Na <sub>2</sub> O–B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	249
14.1.3. Структурные единицы и характер химических связей в борном ангидриде и в щелочно-боратных стёклах.....	250
14.1.4. Зависимость доли атомов бора в четверной координации (N <sub>4</sub> ) от состава стёкол.....	251
14.1.5. Свойства боратных стёкол и их расплавов, проявление изменения координации бора на свойствах.....	253
14.1.6. Применение боратных стёкол.....	256
14.1.7. Диаграммы состояния систем с оксидами двухвалентных металлов, области стеклообразования в двойных системах.....	256
14.1.8. Фазовое разделение «жидкость – жидкость» в двойных боратных системах и способы управления этим явлением.....	257
14.2. Боросиликатные стёкла.....	258
14.2.1. Метастабильное фазовое разделение в системе Na <sub>2</sub> O–B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> –SiO <sub>2</sub> .....	258

14.2.2. Технология «Викор», стёкла типа «Пайрекс» и др.....	259
14.2.3. Практические составы боросиликатных кронов и особенности их свойств.....	260
14.2.4. Основы технологии производства.....	262
14.3. Алюмооборатные, алюмосиликатные и борнолантановые стёкла.....	262
14.3.1. Области стеклообразования в системах $RO-B_2O_3-Al_2O_3$ .....	262
14.3.2. Общая характеристика свойств стёкол систем $RO-B_2O_3-Al_2O_3$ .....	263
14.3.3. Области стеклообразования в системах $RO-B_2O_3-La_2O_3$ ; общая характеристика оптических и других свойств.....	263
14.3.4. Практические составы лантансодержащих стёкол (ОФ, СТК, ТБФ), особенности физико-химических свойств и основы производства.....	264
14.3.5. Структурная роль алюминия в силикатных и алюмосиликатных стёклах.....	265

## ГЛАВА 15. ФОСФАТНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ И ЦВЕТНЫЕ

<b>СТЁКЛА</b> .....	<b>269</b>
15.1. Оксиды фосфора, их структура и свойства.....	269
15.2. Состояние фосфорного ангидрида в стёклах. Способы введения $P_2O_5$ в состав стекла, особенности варки фосфатных стёкол.....	270
15.3. Двухкомпонентные фосфатные системы. Диаграммы состояния, основные химические соединения, структурные единицы, стеклообразование, особенности изменения свойств в зависимости от состава.....	270
15.4. Система $BaO-P_2O_5-Al_2O_3$ . Области применения фосфатных стёкол.....	273
15.4.1. Фосфатные кроны.....	274
15.4.2. Специальные светофильтры.....	275

## ГЛАВА 16. СПЕЦИАЛЬНЫЕ КЛАССЫ ОПТИЧЕСКИХ

<b>ОКСИДНЫХ СТЁКОЛ</b> .....	<b>278</b>
16.1. Германатные стёкла.....	278
16.1.1. Диоксид германия. Свойства и структура кристаллических модификаций и стекла.....	278
16.1.2. Двухкомпонентные германатные системы; изменение координационного числа атомов германия.....	280
16.1.3. Специальные стёкла с двуокисью германия и другими оксидами редких элементов; специфика их свойств и технологии.....	282
16.1.4. Двуокись германия в градиентной оптике.....	282
16.2. Теллуритные, ванадатные и другие стёкла.....	283

16.2.1. Теллуридные стёкла: специфика структуры, свойств и технологии .....	283
16.2.2. Ванадатные стёкла .....	285
16.2.3. Титанатные и ниобатные стёкла и стеклокристаллические материалы. Структурная роль диоксида титана в силикатных стёклах .....	285
16.2.4. Стёкла, содержащие $As_2O_3$ , $Sb_2O_3$ , $Bi_2O_3$ и другие оксиды .....	287
<b>ГЛАВА 17. ФТОРОСОДЕРЖАЩИЕ ОПТИЧЕСКИЕ СТЁКЛА.....</b>	<b>289</b>
17.1. Стеклообразный фтористый бериллий, фторобериллатные стёкла, особенности их технологии и свойств. Анионная проводимость стёкол .....	289
17.2. Стёкла на основе фторидов металлов и других галогенидов, области применения .....	290
17.3. Оксифторидные оптические стёкла: особенности их свойств и технологии .....	291
<b>ГЛАВА 18. ХАЛЬКОГЕНИДНЫЕ СТЁКЛА .....</b>	<b>293</b>
18.1. Элементы VI группы в стеклообразном состоянии (структура, свойства, характер химических связей) .....	293
18.1.1. Сера .....	293
18.1.2. Селен .....	294
18.1.3. Теллур и полоний .....	295
18.2. Двойные системы .....	295
18.2.1. Система S–Se .....	295
18.2.2. Система S–As .....	295
18.2.3. Система Se–As .....	297
18.2.4. Система Se–Ge .....	298
18.3. Основные структурные особенности соединений $As_2X_3$ и их соотношение с пропусканием .....	300
18.3.1. Изменение ближнего порядка в халькогенидах $As_2X_3$ .....	300
18.3.2. Изменение границы пропускания в соединениях $As_2X_3$ .....	301
18.4. Тройные системы. Области стеклообразования, общая характеристика свойств. Практическое использование .....	302
18.5. Системы с галогенами, практическое использование таких стекол .....	304
18.6. Общая характеристика физико-химических свойств халькогенидных стёкол .....	305
18.7. Место халькогенидных стекол в группе стёкол, прозрачных в ИК-области .....	307
18.8. Спектры пропускания стёкол и идентификация полос поглощения. Способы очистки материалов .....	308
18.9. Оптические постоянные халькогенидных стекол (диаграмма Аббе), типичные марки оптических стекол .....	310

18.10. Основы технологии промышленного изготовления халькогенидных стёкол .....	312
18.11. Области применения как оптических материалов .....	313
18.12. Фотоструктурные превращения и их проявление на свойствах .....	314
18.13. Халькогенидные стекла в электронике (краткие сведения).....	316
<b>ГЛАВА 19. СТЁКЛА НА ОСНОВЕ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ .....</b>	<b>318</b>
19.1. Общая характеристика классов органических низко- и высокомолекулярных стёкол.....	318
19.2. Общая характеристика свойств стёкол этих классов и связь свойств с молекулярной структурой.....	319
19.2.1. Низкомолекулярные вещества.....	319
19.2.2. Стеклообразные кристаллы .....	320
19.2.3. Стеклообразные полимеры .....	321
19.3. Полимерные стёкла в оптических применениях .....	322
19.3.1. Основные типы процессов полимеризации и химическое разнообразие полимеров .....	322
19.3.2. Главные технологические этапы получения полимерных стёкол .....	323
19.3.3. Общая характеристика физико-химических свойств полимерных стёкол в сравнении с оксидными .....	324
19.3.4. Способы модификации свойств (механических, оптических, спектральных) .....	325
19.3.5. Кронфлинтовые пары.....	325
19.3.6. Полимерные стекла в линзовой оптике, волоконной оптике и в самофокусирующихся оптических элементах .....	326
19.3.7. Полимеры в офтальмологической практике .....	327
<b>ГЛАВА 20. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СТЁКЛА .....</b>	<b>329</b>
20.1. Определение класса.....	329
20.2. Способы получения .....	329
20.3. Области стеклообразования (примеры систем, образующих металлические стёкла).....	331
20.4. Принципы организации структуры и отличительные особенности свойств.....	332
20.5. Общая характеристика свойств, возможных областей применения в современной технике .....	333
<b>ЛИТЕРАТУРА .....</b>	<b>337</b>
<b>ОГЛАВЛЕНИЕ .....</b>	<b>347</b>