

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие редактора перевода	10
Предисловие	13
Глава 1. Что такое кристалловолокна? Вводный обзор (П. Рудольф)	17
1.1. Введение	17
1.2. Методы получения кристалловолокон	21
1.2.1. Методы плавающей зоны	23
1.2.2. Методы вытягивания	26
1.3. Некоторые сведения фундаментального характера	31
1.3.1. Закон постоянства массы	32
1.3.2. Тепловой баланс на фронте кристаллизации	32
1.3.3. Капиллярная устойчивость	33
1.3.4. Разделение и осевое распределение компонентов	36
1.4. Волоконные материалы и их применение	38
1.4.1. Оксиды	38
1.4.2. Эвтектические соединения	59
1.4.3. Полупроводники	68
1.4.4. Металлы	70
1.5. Заключение	72
Список литературы	74
Глава 2. Физические основы метода микровытягивания (С. Уда)	84
2.1. Закон постоянства массы, тепловой баланс и устойчивость мениска в зоне расплава	84
2.2. Массоперенос в процессе выращивания кристалловолокон методом микровытягивания	87
2.2.1. Аналитический подход	87
2.2.2. Пример выращивания кристалловолокон	94

2.2.3. Потоки в зоне плавления	98
2.3. Влияние электрического поля на границе раздела фаз на распределение компонентов	101
2.3.1. Электрическое поле на границе раздела фаз	101
2.3.2. Экспериментальная часть	103
2.3.3. Результаты экспериментов	104
2.3.4. Анализ результатов	107
2.4. Влияние электрического поля на границе раздела фаз на распределение компонентов в процессе роста кристалловолокон	114
2.4.1. Распределение электрического поля на границе раздела фаз вдоль осевого направления	114
2.4.2. Методика эксперимента	114
2.4.3. Анализ результатов	118
2.4.4. Влияние градиента температуры на радиальное электрическое поле	122
Приложение 1. Решение уравнения 2.37.	124
Приложение 2. Список условных обозначений	126
Список литературы	129
Глава 3. Теоретический анализ процесса микровытягивания кристалловолокон (С. В. Лан)	131
3.1. Введение	131
3.2. Модель процесса микровытягивания и схема ее численной реализации	132
3.3. Результаты и обсуждение	138
3.3.1. Форма мениска и размер волокна	140
3.3.2. Влияние конвекции	141
3.3.3. Влияние скорости вытягивания	142
3.3.4. Влияние температуры капилляра	144
3.3.5. Влияние уровня расплава в тигле	145
3.4. Заключение	146
Список литературы	148
Глава 4. Выращивание кристалловолокон методом микровытягивания (Б. М. Эпельбаум)	149
4.1. Выращивание однородных волокон	149
4.1.1. Экспериментальные результаты выращивания волокон LiNbO_3 и PbWO_4	150
4.1.2. Условия выращивания волокон, однородных в осевом направлении	151

4.2. Огранка μ -PD волокон и улучшение качества их поверхности	155
4.2.1. Экспериментальные результаты	157
4.2.2. Обсуждение результатов	158
4.3. Исследование процесса выращивания кристаллов методом μ -PD	163
4.3.1. TAG — фазовые диаграммы и рост кристаллов	163
4.3.2. Вольфрамат свинца: проблема неконгруэнтного плавления	169
4.3.3. Вольфрамат свинца — поиск путей выращивания с оптимальной ориентацией	175
Список литературы	180
Глава 5. Получение и кристаллохимические свойства волоконных оксидных оптических материалов (В. И. Чани)	182
5.1. Введение	182
5.2. Приборы и методики	183
5.2.1. Аппаратура μ -PD-метода с резистивным нагревом	185
5.2.2. Аппаратура μ -PD-метода с индукционным нагревом	187
5.2.3. Свойства расплавов, смачивающих тигель	187
5.2.4. Использование затравки и отделение выращенного кристалла	191
5.3. Гранаты $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (YAG)	192
5.3.1. Выращивание кристалловолокон YAG:Nd	193
5.3.2. Свойства кристалловолокон YAG:Nd	194
5.3.3. Пространственное распределение ионов Nd^{3+} в кристалловолоконках YAG:Nd	196
5.3.4. Выращивание кристалловолокон YAG:Yb	197
5.4. Гранаты $\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ (TGG)	201
5.4.1. Выращивание кристалловолокон TGG	202
5.4.2. Свойства кристалловолокон TGG	205
5.4.3. Выращивание объемных кристаллов TGG	205
5.5. Смешанные гранаты на базе $\text{Tb}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (TAG)	207
5.5.1. Кристаллохимические свойства сложных гранатов	209
5.5.2. Кристалловолокна $(\text{Tb},\text{Lu})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (TLAG)	213
5.5.3. Кристалловолокна $(\text{Tb},\text{Yb})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (TYAG)	218
5.6. Кристаллы перовскита на базе KNbO_3	226
5.6.1. Кристалловолокна KNbO_3	227
5.6.2. Выращивание кристалловолокон KNbO_3	232
5.6.3. Выращивание кристалловолокон KNbO_3 с примесями Ta и Li	233
5.7. Кристалловолокна $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$	236
5.8. Другие материалы	239
5.8.1. Кристаллы гранатов $\text{Ca}_3(\text{Li},\text{Nb},\text{Ga})_5\text{O}_{12}$ (CLNGG)	241

5.8.2. Кристаллы ванадиевых гранатов	245
5.8.3. Ванадаты редких земель.	248
5.9. Выводы	249
Список литературы	251
Глава 6. Тугоплавкие оксидные эвтектики (А. Йошикава)	256
6.1. Введение	256
6.2. Техника и методика выращивания	260
6.2.1. Исходные материалы и соединения.	260
6.2.2. Методика выращивания волокон	260
6.2.3. Методы оценки качества волокон.	263
6.3. Выращивание оксидных эвтектик. Морфология и структурные свойства.	265
6.3.1. Эвтектика $YAG-Al_2O_3$	265
6.3.2. Эвтектические составы: редкоземельные <i>пара</i> -алюминаты (гранаты) — Al_2O_3 и редкоземельные <i>орто</i> -алюминаты (перовскиты) — Al_2O_3	272
6.3.3. Эвтектика ZrO_2/Al_2O_3	279
6.3.4. Эвтектика ZrO_2/Al_2O_3 , стабилизированная Y_2O_3	282
6.3.5. Эвтектика $Al_2O_3/YAG/ZrO_2$	288
Список литературы	293
Глава 7. Выращивание оксидных кристалловолокон методами микровытягивания и лазерного разогрева (К. Лебу, Ж. Булон)	295
7.1. Введение	295
7.2. Получение монокристаллов методом зонной плавки при лазерном разогреве	297
7.2.1. Основные принципы метода зонной плавки	297
7.2.2. Распределение компонентов.	297
7.2.3. Метод лазерного разогрева (LHPG)	300
7.3. Технологии вытягивания из мениска. Использование технологии микровытягивания μ -PD.	305
7.4. Иллюстрации возможностей методов выращивания кристалловолокон	308
7.4.1. Кристалловолоконна ниобата лития $LiNbO_3$	308
7.4.2. Кристалловолоконна $Ba_2NaNb_5O_{15}$ (BNN).	310
7.4.3. Кристалловолоконна $Sr_xBa_{1-x}Nb_2O_6$ (SBN)	313
7.4.4. Лазерные кристалловолоконна оксиапатита $Ca_8La_2(PO_4)_6O_2$ с примесью ионов Yb^{3+}	315

7.4.5. Сверхпроводники: $Bi2212$	317
7.4.6. Кристалловолоконна тугоплавких полупроводников, выращенные LHPG-методом, и перспективы применения комбинаторного подхода.	319
7.4.7. Примеры получения кристалловолокон с градиентом концентрации примесей редких земель. Анализ динамики процессов лазерных резонансных переходов в Y_2O_3 с примесью Yb^{3+}	323
7.4.8. Выращивание кристаллов фторидов (CaF_2)	328
7.5. Заключение	330
Список литературы	332
Глава 8. Выращивание кристалловолокон и объемных кристаллов модифицированным методом микровытягивания. Свойства полученных кристаллов (Ц. Фукуда)	336
8.1. Выращивание тонких волокон	336
8.1.1. Модификация металлических тиглей для выращивания оксидов	337
8.1.2. Устройство графитовых тиглей для выращивания тонких кремниевых волокон	343
8.1.3. Выращивание волоконных структур типа сердцевина-оболочка	349
8.1.4. Модификация метода микровытягивания с двумя капиллярами	351
8.1.5. Эвтектические волокна с оболочкой	361
8.2. Выращивание объемных кристаллов	361
Список литературы	366

Предисловие редактора перевода

Проблемы, связанные с получением и исследованием низкоразмерных материалов (волоконных и наноразмерных кристаллов), остаются важнейшими проблемами сегодняшнего дня, требующими как фундаментальных исследований, так и прикладных инновационных разработок. Кристалловолокна, описание синтеза и свойств которых приведено в настоящей книге, являются перспективными средами для изготовления световодов, волноводов, перестраиваемых узкополосных фильтров, для разработки элементов нелинейной оптики и лазерной техники (микролазеры, модуляторы и др.). На базе кристалловолокон создаются новые эффективные устройства для регистрации излучений.

Исследование возможностей применения кристалловолокон в качестве функциональных материалов, изучение методов их выращивания, анализ их свойств были и остаются актуальными задачами для исследовательских центров и требуют для своего решения междисциплинарного международного сотрудничества, которое было впервые успешно организовано японской стороной профессором Ц. Фукудой (Т. Fukuda) при поддержке Японского общества развития науки¹⁾. Результаты этого сотрудничества не остались незамеченными издательством Springer-Verlag, которое организовало издание этой первой в научной литературе книги по синтезу кристалловолокон из расплава. Ее издание не осталось незамеченным и в России. Российский фонд фундаментальных исследований поддержал перевод на русский язык и издание этой монографии в издательстве ФИЗМАТЛИТ.

Книга написана известными специалистами, работающими в ведущих мировых научных институтах материаловедения, которые не только имеют огромный личный опыт в области методов выращивания кристалловолокон, но и являются одними из главных разработчиков этих методов. С некоторыми из них, К. Лебу (К. Lebbou) и В. Чани, мне посчастливилось познакомиться и поработать в тесном сотрудничестве во время неоднократных визитов в Лионский университет.

¹⁾ Отметим, что работы по выращиванию волоконных кристаллов велись и ведутся также и в России. Одна из таких разработок, выполненная с участием редактора перевода (патент РФ № 2154290 — скнтилляционный световод), награждена золотой медалью Брюссельской выставки в 2001 году.

Их активность, увлеченность работой, глубина проработок вопросов и несомненная результативность заслуживают самых высоких оценок.

Круг рассматриваемых в книге вопросов настолько широк (от теоретических закономерностей тепло- и массообмена до технической реализации методов, от детального рассмотрения технологий выращивания конкретных составов волокон до анализа их физических, химических и механических свойств, а также различных сфер применения), что возникла необходимость введения ряда примечаний, поясняющих наиболее сложные в переводе места или некоторые специальные термины.

Идея перевода книги «Выращивание кристалловолокон из расплава» была подсказана мне ее авторами Валерием Чани и Киреддином Лебу во время моего последнего визита в Лионский университет в 2005 году по приглашению директора физико-химической лаборатории люминесцентных материалов профессора Кристиана Педрини (Ch. Pedrini). Идея была поддержана Жаном-Мари Фурмиге (J.-M. Fourmigué), директором фирмы FIBERCRYST, оборудование которой по выращиванию кристалловолокон размещено в Лионском университете. Он и подарил мне эту книгу. Наше тесное сотрудничество с Лионским университетом и фирмой FIBERCRYST в области волоконных технологий началось в 2003 году и продолжается по настоящее время. Уральский государственный технический университет (УГТУ–УПИ) совместно с Лионским университетом и фирмой FIBERCRYST являются разработчиками целого ряда совместных патентов на изобретения в области волоконных и объемно-волоконных скнтилляционных детекторов ионизирующих излучений, кристалловолоконных термолюминесцентных дозиметрических комплексов нового поколения, способов получения волоконных гетероструктур с использованием ионно-лучевых технологий, а также кристалловолоконных и световолоконных скнтилляционных кабелей, пригодных для пограничных и межгосударственных систем радиационного контроля и оповещения. Это патенты РФ №№ 2261459, 2262722, 2270462, 2282214, 2303798, 2323453, соавторы с французской стороны — Кристиан Педрини, Кристоф Дюжарден (Ch. Dujardin), Жан-Мари Фурмиге, Бенуа Отефей (B. Hautefeuille), Киреддин Лебу. Патентообладателем всех совместных разработок является УГТУ–УПИ (Россия, Екатеринбург). Один из патентов принадлежит совместно с УГТУ–УПИ и фирме FIBERCRYST (Франция, Лион). Разработка патента РФ 2323453 также выполнена совместно с французской стороной при активном участии специалистов (В. И. Арбузов, К. В. Дукельский) из НИТИОМ ВНЦ ГОИ им. С. И. Вавилова (Россия, С.-Петербург), который является вторым патентообладателем этой разработки, наряду с УГТУ–УПИ. В процессе совместных фундаментальных исследований кристалловолокон и патентных разработок в этой