

*А. М. Бахтиярова<sup>1</sup>, Е. Д. Моисеева<sup>1\*</sup>, Д. В. Климова<sup>1</sup>, Т. В. Ларина<sup>1</sup>*

## **Свойства оптических монокристаллов и методы их выращивания**

<sup>1</sup>Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,  
Российская Федерация  
\* e-mail: elizaveta.1103@mail.ru

**Аннотация.** Монокристаллы обладают уникальными физическими свойствами благодаря тому, что представляют собой единое зерно с молекулами в строгом порядке и без границ зерен. Кристаллы разнообразных веществ находят широкое применение в современной технике, в особенности оптических приборах. Их примерами являются фотонные устройства, которые включают лазеры, оптические модуляторы и усилители, фотоприемники, лавинные фотодиоды, обработку сигналов, а также оптоэлектронные и фотонные интегральные схемы. Качественные оптические материалы очень важны в этих приборах, и методы их получения постоянно совершенствуются. Выращивание монокристаллов представляет собой сложную научно-техническую задачу из-за необходимости использования веществ особой чистоты, а также постоянно повышающимся требованиям к оптическому качеству кристаллов. Целью работы является рассмотрение метода и технологического процесса выращивания различных оптических монокристаллов, а также их свойств.

**Ключевые слова:** выращивание монокристаллов, оптические свойства, метод Чохральского, метод зонной плавки, метод Бриджмена

*A. M. Bakhtiyarova<sup>1</sup>, E. D. Moiseeva<sup>1\*</sup>, D. V. Klimova<sup>1</sup>, T. V. Larina<sup>1</sup>*

## **Properties of optical single crystals and methods of their cultivation**

<sup>1</sup>Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk,  
Russian Federation  
\* e-mail: elizaveta.1103@mail.ru

**Annotation.** Single crystals have unique physical properties due to the fact that they are a single grain with molecules in a strict order and without grain boundaries. Crystals of various substances are widely used in modern technology, especially optical instruments. Examples of these are photonic devices, which include lasers, optical modulators and amplifiers, photodetectors, avalanche photodiodes, signal processing, and optoelectronic and photonic integrated circuits. High-quality optical materials are very important in these devices, and methods for their production are constantly being improved. Growing single crystals is a complex scientific and technical problem due to the need to use substances of special purity, as well as constantly increasing requirements for the optical quality of crystals. The purpose of the work is to consider the method and technological process of growing various optical single crystals, as well as their properties.

**Keywords:** single crystal cultivation, optical properties, Chokhralsky method, zone melting method, technological process

## ***Введение***

Кремний является наиболее распространенным монокристаллом, который выращивают разными методами. Его кристаллическая структура обеспечивает наивысшее преобразование света в электричество. Поэтому монокристаллы кремния используются в качестве линз тепловизоров из-за их прозрачности при определенных длинах волн инфракрасного излучения. Со схожими оптическими свойствами монокристалл германия используется в некоторых детекторах гамма-излучения и инфракрасной оптике. Монокристаллы сапфира известны в лазерной технике и нелинейной оптике. Монокристаллы фосфида индия особенно подходят для объединения оптоэлектроники с быстродействующей электроникой в виде оптического волокна с его подложками большого диаметра. А кристаллы теллурида кадмия применяются с целью получения ИК-изображений. Их также используют в виде солнечных элементов [1-2].

## ***Методы и материалы***

Существуют различные методы выращивания оптических монокристаллов, и некоторые из них представлены в данной статье.

Метод Чохральского является основным способом получения кристаллов. Процесс состоит из получения монокристаллов направленной кристаллизацией, путем вытягивания слитка вверх по всей площади. Установка Чохральского представлена на рис. 1 [3-4].

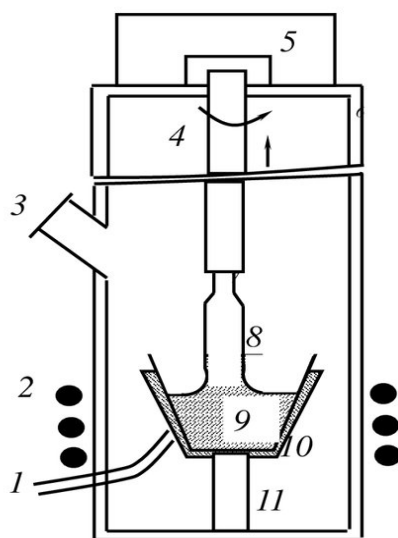


Рис. 1. Схема установки для выращивания монокристаллов:

- 1 – термопара, 2 – индукционная печь, 3 – окно для визуального контроля,
- 4 – ось вращения, 5 – устройство для вращения, 6 – водяная рубашка,
- 7 – монокристаллическая затравка, 8 – выращиваемый кристалл, 9 – расплав,
- 10 – графитовый нагреватель, 11 – теплоизоляционная подложка

Данный метод используется для получения полупроводниковых материалов, таких как германий, кремний, теллур и др. Монокристалл ниобата лития,

выращенный методом Чохральского, представлен на рис. 2. Линзы, выращенные из монокристалла германия, представлены на рис. 3 [5–6].



Рис. 2. Монокристалл ниобата лития



Рис. 3. Линзы из монокристалла германия

Большая часть производства монокристаллического кремния и германия выпускается по методу Чохральского. Сейчас возможно получение монокристаллов длиной около 2 м, диаметром 300 мм и массой 265 кг [4].

К достоинствам данного метода относятся:

- 1) возможность контролировать и управлять процессом роста кристалла;
- 2) можно добавлять и смешивать примеси;
- 3) отсутствие повреждений кристалла при охлаждении тигля;
- 4) не образуются побочные зародыши, мешающие росту основного кристалла [6–7].

К недостаткам метода Чохральского можно отнести следующее:

- 1) разностенность растущего кристалла;
- 2) примеси могут распределяться неравномерно;
- 3) возникают дислокации и другие дефекты [8–9].

Метод Бриджмена схож с предыдущим способом получения монокристаллов. В данном методе тигель с коническим дном помещается в верхнюю высокотемпературную зону печи. Помещенное вещество плавится, после его переме-

падают в нижнюю зону печи, где температура ниже. Поэтому начинается процесс кристаллизации, и в конце остается один зародыш, на котором образуется монокристалл. Установка получения кристаллов методом Бриджмена показана на рис. 4 [10–11].

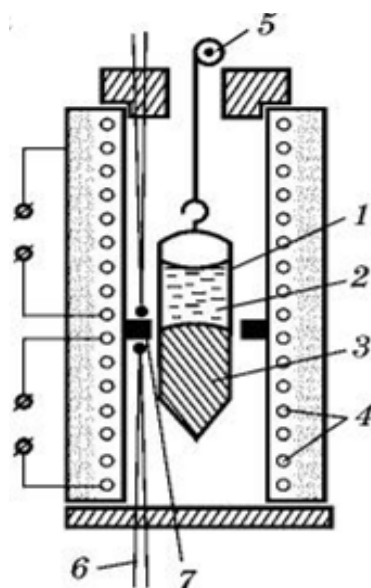


Рис. 4. Схема установки для выращивания монокристаллов:

1 – контейнер, 2 – расплав, 3 – кристалл, 4 – нагреватель, 5 – устройство для перемещения контейнера, 6 – термопара, 7 – экран

К преимуществам метода Бриджмена можно отнести:

- 1) достаточно простой и легкий метод получения нужных кристаллов;
- 2) возможности задачи кристаллу нужные условия роста.

К недостаткам относится:

- 1) кристалл загрязняется;
- 2) полученные кристаллы тяжело вытащить из тигля, они принимают его форму;
- 3) кристаллы растрескиваются.

Данный метод используют для получения кристаллов рубина, синтетических гранатов и др. [12–14].

Метод зонной плавки является разновидностью направленной кристаллизации. Отличие лишь в том, что в каждый момент времени расплавляется некоторая часть образца. Схема установки, используемая в данном методе, представлена на рис. 5 [15–16].

Данный метод служит для выращивания крупных монокристаллов корунда и синтетических гранатов [17]. Получают кристаллы следующим образом: исходную смесь помещают в молибденовую лодочку, идущую вдоль нагревателя. Зона постепенно расплавляется и затем затвердевает, в итоге образуется кристалл [18].

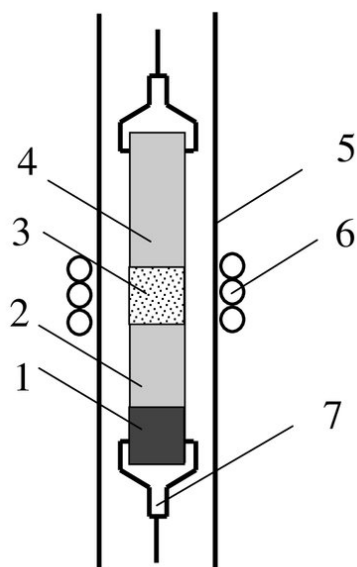


Рис. 5. Схема установки для получения монокристаллов:

1 – затравка, 2 – кристалл, 3 – расплавленная зона, 4 – исходный материал, 5 – стенки герметичной камеры, 6 – индуктор, 7 – кристаллодержатель

Преимущества метода зонной плавки:

- 1) метод является технически простым и позволяет выращивать крупные монокристаллы разных форм;
- 2) метод позволяет проводить химическую очистку вещества;
- 3) дает контролируемую возможность локализации примесей внутри будущего кристалла;
- 4) можно управлять кристаллографической ориентацией готового кристалла с помощью затравочного монокристалла заданной ориентации [19–20].

Недостатки этого метода включают:

- 1) не совпадение размеров слитка и исходной заготовки;
- 2) возникновение в кристаллах трещиноватости [18].

Свойства монокристаллов, полученных зонной плавкой:

- высокая теплопроводность, в отличие от аморфных веществ и поликристаллов. Это можно объяснить лучшими условиями для распространения тепловых колебаний кристаллической решетки в бездефектной структуре;
- высокая электропроводность для проводящих монокристаллов, используемых в электронных приборах;
- высокая механическая прочность, в особенности на разрыв и ударный изгиб. Объясняется это тем, что разрушение материала начинается в области дефекта кристаллической решетки, так как именно здесь концентрируются механические напряжения;
- наличие анизотропии физико-химических и оптических свойств. Показатель преломления во многих кристаллах зависит от направления распространения излучения в кристалле и от поляризации излучения;

– некоторые монокристаллы могут проявлять электрооптические, пьезоэлектрические и нелинейнооптические свойства, то есть их физико-химические и оптические параметры зависят от внешнего электрического поля, от интенсивности оптического излучения и так далее.

### *Заключение*

Данные свойства позволяют создавать приборы и устройства, такие как поляризаторы, фазовые пластинки, преобразователи частоты оптического излучения, оптические модуляторы, дефлекторы [2–3, 5].

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров С. Е. Технология полупроводниковых материалов : учебное пособие / С. Е. Александров, Ф. Ф. Греков – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 240 с. – Текст : электронный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/210869> (дата обращения: 05.05.2024). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.
2. Орликов Л. Н. Основы технологии оптических материалов и изделий. : учебное пособие / Л. Н. Орликов – Москва : ТУСУР, 2012. – 88 с. – Текст : электронный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/5432> (дата обращения: 05.05.2024). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.
3. Сидоров Н. В. Оптические свойства и вторичная структура монокристаллов ниобата лития : научная статья / Н. В. Сидоров, М. Н. Палатников – Москва : Национальный исследовательский университет "МИФИ", 2017. – 2 с. – Текст : электронный. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29718945> (дата обращения: 05.05.2024). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.
4. Терехов А. И. Технологические основы изготовления интегральных микросхем : учебное пособие / А. И. Терехов, И. А. Тихомирова – Иваново : ИГЭУ, 2018. – 116 с. – Текст : электронный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/154591> (дата обращения: 05.05.2024). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.
5. Постников В. С. Оптическое материаловедение : учебное пособие / В. С. Постников – Пермь : ПНИПУ, 2013. – 280 с. – Текст : электронный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/160605> (дата обращения: 05.05.2024). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.
6. Микушин А. В. Физические основы электроники : учебное пособие / А. В. Микушин – Санкт-Петербург : Лань, 2023. – 148 с. – Текст : электронный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/311846> (дата обращения: 05.05.2024). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.
7. Дудкин А. Н. Электротехническое материаловедение : учебное пособие / А. Н. Дудкин, В. С. Ким – Санкт-Петербург : Лань, 2020. – 200 с. – Текст : электронный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/139259> (дата обращения: 05.05.2024). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.
8. Шишляев В. Н. Основы кристаллизаций сплавов : учебное пособие / В. Н. Шишляев – Пермь : ПНИПУ, 2006. – 161 с. – Текст : электронный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/160751> (дата обращения: 05.05.2024). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.
9. Мельников А. Г. Материаловедение : учебное пособие / А. Г. Мельников – Томск : ТПУ, 2016. – 224 с. – Текст : электронный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/107720> (дата обращения: 05.05.2024). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.

10. Колосько А. Г. Основы микро- и нанотехнологий. Кристаллы : учебное пособие / А. Г. Колосько, С. В. Кузьмин – Санкт-Петербург : СПбГУТ им. М.А. Бонч-Бруевича, 2022. – 105 с. – Текст : электронный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/279200> (дата обращения: 05.05.2024). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.
11. Лозовский В. Н. Нанотехнологии в электронике. Введение в специальность : учебное пособие / В. Н. Лозовский, С. В. Лозовский – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 332 с. – Текст : электронный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/206276> (дата обращения: 05.05.2024). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.
12. Чернышов Е. А. Современные плавильные печи. Устройство и работа плавильных печей литейных цехов : учебное пособие / Е. А. Чернышов, А. И. Евстигнеев, Э. А. Дмитриев – Комсомольск-на-Амуре : КНАГУ, 2018. – 453 с. – Текст : электронный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/151969> (дата обращения: 05.05.2024). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.
13. Шишляев В. Н. Кристаллизация и литейные свойства сплавов : учебное пособие / В. Н. Шишляев – Пермь : ПНИПУ, 2008. – 260 с. – Текст : электронный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/160750> (дата обращения: 05.05.2024). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.
14. Масанский О. А. Материаловедение и технологии конструкционных материалов : учебник / О. А. Масанский, В. С. Казаков, А. М. Токмин – Красноярск : СФУ, 2019. – 336 с. – Текст : электронный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/157550> (дата обращения: 05.05.2024). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.
15. Пасынков В. В, Сорокин В. С. Материалы электронной техники : учебник для вузов / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин – Санкт-Петербург : Лань, 2003. – 368 с. – Текст : электронный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/5432> (дата обращения: 05.05.2024). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.
16. Свечникова Л. А. Фазовые и структурные превращения в металлах и сплавах : учебник / Л. А. Свечникова, В. И. Темных, А. М. Токмин – Красноярск : СФУ, 2019. – 284 с. – Текст : электронный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/157568> (дата обращения: 05.05.2024). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.
17. Ахмедшина В. А. Кристаллизация энергонасыщенных соединений из растворов : учебное пособие / В. А. Ахмедшина, В. Я. Базотов – Казань : КНИТУ, 2012. – 124 с. – Текст : электронный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/73288> (дата обращения: 05.05.2024). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.
18. Кузнецов В. Г. Новые конструкционные материалы : учебное пособие / В. Г. Кузнецов, Г. А. Аминова – Казань : КНИТУ, 2020. – 472 с. – Текст : электронный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/196133> (дата обращения: 05.05.2024). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.
19. Астахов А. В. Оптическое материаловедение111 : учебное пособие / А. В. Астахов, Е. В. Полякова, В. Е. Стригалев – Санкт-Петербург : СПбГУТ им. М.А. Бонч-Бруевича, 2014. – 96 с. – Текст : электронный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/181459> (дата обращения: 05.05.2024). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.
20. Ярмонов А. Н. Вакуумные технологии : учебное пособие / А. Н. Ярмонов – Пермь : ПНИПУ, 2015. – 306 с. – Текст : электронный. – URL: <https://e.lanbook.com/book/160773> (дата обращения: 05.05.2024). – Режим доступа: для авторизованных пользователей.

© А. М. Бахтиярова, Е. Д. Моисеева, Д. В. Климова, Т. В. Ларина, 2024