



Получение методами кристаллизации из расплава некоторых объемных кристаллов фотоники в России

Часть 1

А. В. Наумов, В. В. Старцев
АО «ОКБ «Астрон», Лыткарино, Моск. обл., Россия

В работе представлен обзор современного состояния методов получения некоторых объемных кристаллов фотоники из расплава. В первой части обзора дан анализ текущего состояния дел в России для некоторых промышленно важных кристаллов фотоники. Отмечены факторы, являющиеся значимыми для современного производства, а также определяющими факторами для контроля состава, структуры, морфологии и других свойств промышленных оптических материалов.

Ключевые слова: выращивание кристаллов, кристаллизация, монокристалл, семейство методов Чохральского и Бриджмена, GaAs

Статья получена: 12.05.2022

Статья принята: 01.06.2022

Рост объемных (3D) кристаллических материалов, невзирая на успехи в области создания наноразмерных 0D-2D структур, остается одним из самых сложных и удивительных достижений в области материаловедения. Например, кремний электронного качества, выращенный методом Чохральского, является одним из самых чистых и самых совершенных материалов, когда-либо созданных человечеством. Современная технология производства монокристаллических слитков диаметром свыше 300 мм и массой более 200 кг позволяет достигать уровня примесей $\leq 0,05$ ppba, эти кристаллы полностью свободны от дислокаций, а распределение микро-

Preparation of Some Bulk Photonics Crystals by the Melt Crystallization Methods in Russia

Part 1

A. V. Naumov, V. V. Startsev
Mechano-optical Design Bureau "Astrohn" JSC, Lytkarino,
Moscow region, Russia

The paper presents an overview of the state-of-the-art methods for melt preparation of some bulk photonics crystals. The first part of the review analyzes the current situation in Russia for some industrially significant photonics crystals. The factors that are important for modern production, as well as the determinant factors for control of the composition, structure, morphology, and other properties of industrial optical materials, are indicated.

Keywords: crystal growth, crystallization, single crystal, family Czochralski and Bridgman methods, GaAs

Article received: 12.05.2022

Article accepted: 01.06.2022

Despite any progress in the creation of nanoscale 0D-2D structures, the growth of bulk (3D) crystalline materials remains one of the most comprehensive and amazing achievements in the field of materials science. For example, the Czochralski-grown electronic grade silicon is one of the purest and most advanced materials ever made by the mankind. Modern production technology for the single-crystal ingots with a diameter of more than 300 mm and a weight of more than 200 kg can achieve an impurity level of ≤ 0.05 ppba. Such crystals are completely free from dislocations, and distribution of the microdefects, such as vacancies and interstitial atoms, is efficiently controlled. Due to their optical and electronic properties, single crystals of semiconductors $A^{III}-B^V$, (GaAs, GaN, InP, InSb), $A^{II}-B^{VI}$ (CdTe, ZnCdTe, ZnSe), etc., are applica-



дефектов, таких как вакансии и междоузельные атомы, эффективно контролируется. Благодаря своим оптическим и электронным свойствам монокристаллы полупроводников $A^{III}-B^V$, (GaAs, GaN, InP, InSb), $A^{II}-B^{VI}$ (CdTe, ZnCdTe, ZnSe) и другие применимы для различных электронных и оптоэлектронных устройств и компонентов, таких как светодиоды, фотоприемники, мощные лазеры, для волоконно-оптической, беспроводной и спутниковой связи и для многого другого [1] (табл. 1). Высокий спрос на различные монокристаллические материалы обусловил необходимость совершенствования технологий выращивания, которые используются в настоящее время, а также разработки новых или усовершенствованных технологий выращивания монокристаллов.

ble for various electronic and optoelectronic devices and components, such as LEDs, photoelectric detectors, high-power lasers, applications in the field of fiber-optic communications, wireless and satellite communications, and much more [1] (Table 1). The high demand for various single-crystal materials has stipulated the improvement of growth technologies that are currently used, as well as the development of new or improved single-crystal growth technologies. This paper is devoted to a review of the current situation in Russia in relation to a certain, very small part of optoelectronics and photonics crystals obtained by the directed melt crystallization methods. However, in our opinion, the given developmental problems are typical for preparation of other photonics materials [1, 2].

Таблица 1. Примеры выращенных кристаллов для микро- и оптоэлектроники

Table 1. Examples of crystals grown for micro- and optoelectronics

Область применения кристалла (доля рынка, %)	Пример кристалла (размер)	Область применения	Метод получения
Микроэлектроника, оптоэлектроника, солнечная энергетика (94%)	Моно-Si (300 мм), Ge (150 мм), GaAs (200 мм), InP (150 мм), GaSb (50 мм), GaInSb (50 мм), InSb (100 мм), CdTe, ZnCdTe (125 мм), и т. д.	Интегральные схемы (ИС), фотоприемные устройства (ФПУ), транзисторы, светодиоды и др.	CZ, VG/VGF, FZ
Оптические кристаллы (2%)	Сапфир (720 кг), CaF_2 (375 мм), BaF_2 , MgF_2 , MgO, Quartz, Si, Ge, ZnSe, ZnS, $CaCO_3$, YVO_4 , $LiNbO_3$, BaB_2O_4 (BBO), $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG)	Линзы, зеркала, призмы, поляризаторы и т. д.	KY, CZ, VG/VGF
Нелинейная оптика и лазерные кристаллы (1%)	YAG, KH_2PO_4 (KDP), Bi_2SiO_20 (BSO), $KTiOAsO_4$ (KTA), O-BBO, LiB_3O_5 (LBO), $KTiOPo_4$ (КТР), $AgGaS_2$, $ZnGeP_2$, Mg:LiNbO ₃ , Nd:YVO ₄ Nd:YAG, Nd:GdVO ₄ Ti:Sapphire	лазерные применения, оптическая связь и т. п..	CZ, Рост из раствора (расплава)-TSSG
Акустические кристаллы (1%)	$LiNbO_3$ (100 мм), $LiTaO_3$ (100 мм), $La_3Ga_5SiQ_{14}$ (100 мм)	ПАВ-фильтры, датчики и т. п.	CZ, VB
Сцинтилляционные кристаллы (2%)	$Bi_4Ge_3O_{12}$ (125 мм), Lu_2SiO_5 (LSO), BaF_2 , CaF_2 , $PbWO_4$ Ti:CsI, Na:CsI, Nai, CdTe, ZnCdTe	Радиационные детекторы, позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ)	Cz, VB/VGF
Ювелирные (<1%)	Сапфир, рубин, (200 мм), $MgAl_2O_4$, $CaCO_3$	Ювелирные вставки	CZ, метод Вернейля

Примечание: CZ – метод Чохральского; CCZ – полу-непрерывный метод Чохральского; LEC liquid encapsulated Czochralski – метод Чохральского с герметизацией расплава; KY – метод Кирополуса; Edge-defined, film-fed growth (EFG) technique – метод Степанова, вытягивание через фильеру; CVD chemical vapor deposition – химическое осаждение из газовой фазы; PVT physical vapor deposition – физическое осаждение из газовой фазы; CVT chemical vapor transport – химические транспортные реакции; VB – «вертикальный Бриджмен»; HB – «горизонтальный Бриджмен»; FZ – float zone – бестигельная зонная плавка; HPVB high-pressure vertical Bridgman – «вертикальный Бриджмен» при высоком давлении; Bridgman LP – метод Бриджмена при низком давлении; HZM horizontal zone melting – горизонтальная зонная плавка; HPVZM high-pressure vertical zone melting – то же при высоком давлении; GF gradient freezing – направленная кристаллизация; VGF vertical gradient freezing – вертикальная направленная кристаллизация; TSSG Top Seed Solution Growth – рост из раствора/расплава с затравливанием сверху; THM travelling heater method – метод движущегося нагревателя

Настоящая работа посвящена обзору состояния дел в России по некоторой, весьма незначительной части кристаллов оптоэлектроники и фотоники, получаемых методами направленной кристаллизации из расплава. Однако отмеченные проблемы развития, являются, на наш взгляд, типичными и для получения других материалов фотоники [1,2].

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ-ОБЩАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ

Основные способы выращивания кристаллов (рис. 1):

- из газовой фазы;
- из расплава;
- из раствора;
- из твердой фазы.

ВЫРАЩИВАНИЕ ИЗ РАСПЛАВА: СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время около 70% технически важных кристаллов выращивают из расплава. К ним прежде всего относятся неорганические функциональные материалы сравнительно простого состава:

SINGLE CRYSTAL PREPARATION METHODS – GENERAL CLASSIFICATION

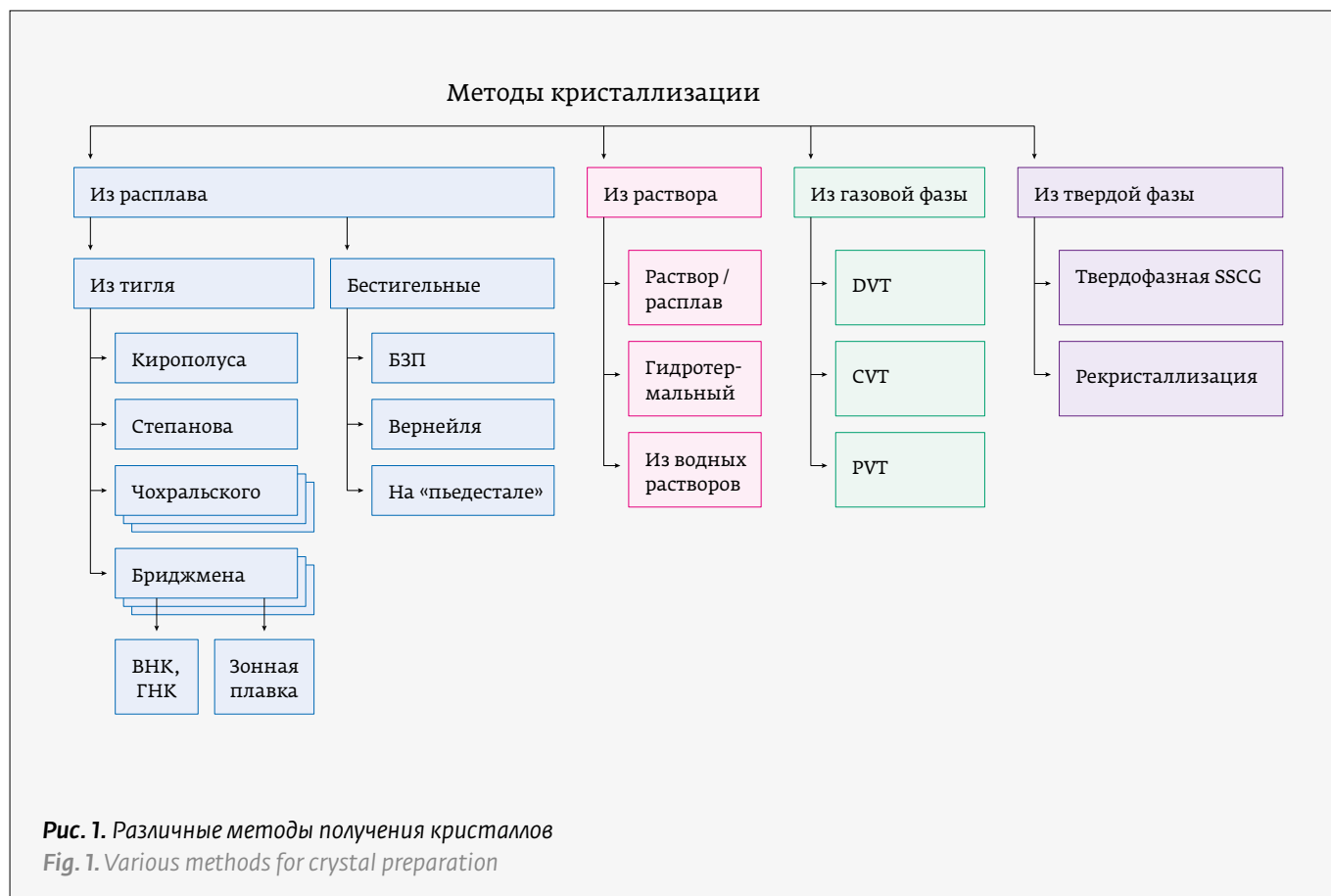
The main crystal growing methods are as follows (Fig. 1):

- gas phase;
- melt;
- solution;
- solid phase.

MELT GROWTH – STATUS AND PROBLEMS

At present, about 70% of technically significant crystals are grown from a melt. Such crystals primarily include the inorganic functional materials with a relatively simple composition: elementary semiconductors and metals, oxides, halides, chalcogenides, silicates, germanates, borates, molybdates, tungstates, vanadates, niobates, etc. The main condition is their congruent melting, absence of polymorphic transitions. The sufficient chemical inertness is desirable. To date, various techniques have been developed for growing crystals from melts:

- under the conditions of temperature change with a stationary crucible (Kyropoulos technique, etc.);



элементарные полупроводники и металлы, оксиды, галогениды, халькогениды, силикаты, германаты, бораты, молибдаты, вольфраматы, ванадаты, ниобаты и др. Основное условие – их конгруэнтное плавление, отсутствие полиморфных переходов и желательна – достаточная химическая инертность

К настоящему времени разработаны различные технические приемы выращивания кристаллов из расплавов:

- а) в условиях изменения температуры при неподвижном тигле (метод Киропулоса и др.);
- б) при перемещении кристалла в температурном градиенте (метод Чохральского);
- в) при передвижении тигля или печи в температурном градиенте (метод Бриджмена);
- г) бестигельные методы (метод Вернейля, метод б. з. п и др.);
- д) методы зонной кристаллизации.

Методы Чохральского и Бриджмена (рис. 2) являются наиболее используемыми методами роста из расплава. Рост монокристаллов из расплава позволяет изготавливать крупные монокристаллы высокого качества за относительно короткое время по сравнению с другими методами выращивания [1–4]. Однако метод выращивания из расплава также имеет ряд недостатков. К ним относятся трудности в поддержании стабильной температуры в процессе роста кристаллов и в достижении очень высоких температур плавления для некоторых материалов, трудности достижения химической однородности (это особенно заметно в случае, когда в кристалле присутствует множество элементов), реакционная способность расплавленного материала с тиглем, а также высокие затраты на производство и оборудование.

Семейство методов Чохральского

Метод Чохральского (Cz) важен в производстве монокристаллов для электронного и оптического применения, таких как, например, монокристаллы кремния и германия, $A^{III}-B^V$ (GaAs, GaN, InP, InSb), $A^{II}-B^{VI}$ (CdTe, ZnCdTe, ZnSe), а также некоторые другие монокристаллы фторидов и оксидов. Метод относится к тигельным методам направленной кристаллизации и заключается в вытягивании из расплава затравки вместе с растущим на ней монокристаллом. Расплав находится в тигле. Используются резистивный или ВЧ-нагреватель, подставка для тигля изготовлена из графита, а тепловые экраны – из материалов на основе графита [1, 2]. Одно из преи-

- б) when moving a crystal in a temperature gradient (Czochralski method);
- с) when moving the crucible or furnace in a temperature gradient (Bridgman method);
- д) crucibleless methods (Verneuil technique, float zone melting method, etc.);
- е) zone crystallization methods.

The Czochralski and Bridgman methods (Fig. 2) are the most used melt growth methods. The growth of single crystals from a melt makes it possible to produce the large high-quality single crystals in a relatively short period of time compared to other growth methods [1–4]. However, the melt growth method also has a number of disadvantages. Such disadvantages include the difficulties in maintaining a stable temperature during the crystal growth process and in achieving very high melting points for some materials, the difficulties in obtaining chemical homogeneity (this is especially noticeable in the case of a lot of elements in the crystal), reactivity of the molten material with the crucible, as well as high production and equipment costs.

Family of Czochralski Methods

The Czochralski method (Cz) is important for the single crystal production for electronic and optical applications, such as single crystals of silicon and germanium, $A^{III}-B^V$ (GaAs, GaN, InP, InSb), $A^{II}-B^{VI}$ (CdTe, ZnCdTe, ZnSe), as well as some other single crystals of fluorides and oxides. The method belongs to the crucible directional crystallization methods and consists in pulling the stub from the melt together with the single crystal growing on it. The melt is located in the crucible. The resistance-type or RF heater is used, the crucible support is made of graphite, and the heat shields are made of graphite-based materials [1,2]. One of the advantages of this method is ability to obtain the dislocation-free single crystals with a given orientation, an ordered crystalline structure, certain optical and electrical parameters, and a high purity of a single crystal. These features have ensured the continuous development of the method over the entire period of its industrial application (Fig. 2) [3, 4].

The pulling speed depends on the physical and chemical specifications of the crystallized substance and on the crystal diameter (most often it ranges from 1 to 80 mm/hour). The upper limit of the growth rate is limited by the maximum allowable intensity of heat extraction through the crystal into the external environment. The traditional Czochralski method is characterized by the temperature gradients of tens and hundreds of degrees per cm, when the crystal-

муществ метода – возможность получения бездислокационных монокристаллов с заданной ориентацией, упорядоченной кристаллической структурой, определенными оптическими и электрическими параметрами, высокой чистотой монокристалла. Это обеспечило непрерывное развитие метода за все время его промышленного применения (рис. 2) [3,4].

Скорость вытягивания зависит от физико-химических характеристик кристаллизуемого вещества и от диаметра кристалла (чаще всего составляет от 1 до 80 мм/час). Верхний предел скорости роста лимитируется максимально допустимой интенсивностью отвода теплоты через кристалл в окружающее пространство. Для традиционного метода Чохральского характерны градиенты температуры в десятки и сотни градусов на один сантиметр, при которых форма фронта кристаллизации практически повторяет форму изотерм. При таких градиентах поверхность раздела кристалл – расплав становится атомно-шероховатой, рост происходит по нормальному механизму, подавлено проявление граней на округлом фронте кристаллизации, приводящих к возникновению неоднородностей в кристалле [6].

Достоинством также является отсутствие непосредственного контакта кристалла со стенками тигля, что позволяет получать более совершенные образцы; при необходимости – извлечение кристалла на любом этапе выращивания; возможность управления геометрической формой кристалла при изменении температуры расплава и скорости вытягивания.

Все эти качества способствовали широкому распространению метода Чохральского при выращивании монокристаллов кремния, германия, лейкосапфира, иттрий-алюминиевого граната, ниобата лития, фосфида и арсенида галлия и многих других материалов. На сегодня в России методом Чохральского получают (список неполный):

- кремний: «Солар Кремниевые технологии» (Подольск), «КРИТ» (Москва), «Кремний» (Зеленоград);
- германий: «Германий» (Красноярск), «Германий и приложения» (Москва), «ОКБ Астрон» (Лыткарино);



lization front-line shape almost follows the shape of isotherms. In the case of such gradients, the crystal-melt interface becomes atomically rough, the growth process is performed according to the standards mechanism, and the occurrence of planes on the rounded crystallization front-line leading to the inhomogeneities in the crystal is suppressed [6].

Another advantage is the absence of direct crystal contact with the crucible walls that makes it possible to obtain more perfect samples; if necessary, extraction of a crystal at any stage of growth; the ability to control the crystal geometric shape when changing the melt temperature and the pulling speed.

All these qualities have contributed to the widespread use of the Czochralski method in the single crystal growth of silicon, germanium, leucosapphire, yttrium-aluminum garnet, lithium niobate, gallium phosphide and arsenide, and many other materials. At present, the following substances are obtained in Russia by the Czochralski method (non-exhaustive list):

- silicon: Solar Silicon Technologies (Podolsk), KRIT (Moscow), Kremniy (Zelenograd);
- germanium: Germanium (Krasnoyarsk), Germanium and Applications (Moscow), Mechano-optical Design Bureau “Astron” (Lytkarino);
- indium antimonide, gallium arsenide, other A^{III}B^V: Giredmet (Moscow);
- yttrium-aluminum garnets YAG: Exciton (Stavropol);
- GGG, YAG, GSGG and A^{III}B^V : Research Institute of Materials Science (Zelenograd);
- La₃Ga₅SiO₁₄, lithium tantalate and niobate: Fomos Materials (Moscow);



- антимионид индия, арсенид галлия и др. $A^{III}B^V$: Гиредмет (Москва);
- иттрий-алюминиевые гранаты YAG: «Экситон» (Ставрополь);
- GGG, YAG, GSGG и $A^{III}B^V$: НИИМВ (Зеленоград, Москва);
- $La_3Ca_5SiO_{14}$, танталат и ниобат лития: «Фомос материалс» (Москва);
- нелинейно-оптические материалы: ИГМ СО РАН (Новосибирск).

Существует ряд модификаций метода Чохральского в зависимости от решаемых задач. Для достижения более равномерного распределения примесей по длине и сечению кристалла используется метод плавающего тигля. При этом в основной тигель с расплавом помещается контейнер меньшего размера, из которого и производится выращивание кристалла. Малый объем расплава сообщается с основным объемом расплава, обеспечивая дополнительные порции расплава с заданной концентрацией легирующих примесей.

Для увеличения производительности расходный при кристаллизации объем расплава может пополняться за счет подпитки постепенным подплавлением в периферической области тигля (или вне плавающего тигля) поликристаллического стержня или засыпкой гранул. Также практикуются и промежуточные дозагрузки – выращенные монокристаллы выводятся через специальные шлюзовые устройства, а в тигель добавляется очередная порция шихты для выращивания следующего кристалла. В данной работе метод Чохральского вместе со всеми его вариантами (табл. 2) рассматривается как единое целое.

Семейство методов Бриджмена (Бриджмена-Стокбаргера)

При направленной кристаллизации фронт медленно перемещается вдоль расплавленной системы, а за фронтом растет монокристалл. В результате преимущественного отвода тепла в одном направлении происходит направленная кристаллизация расплава. Метод технически сравнительно прост и позволяет выращивать кристаллы заданного диаметра подбором соответствующего тигля. Процесс может осуществляться в вертикальном и горизонтальном вариантах и относится к группе методов, для которых характерно наличие в процессе кристаллизации только одной границы раздела жидкой и твердой фаз.

Метод Бриджмена наиболее часто используется для получения металлических, органических, а также ряда диэлектрических монокристаллов:

- various non-linear optical materials: Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the RAS (Novosibirsk).

There are a number of modifications of the Czochralski method depending on the tasks to be solved. In order to achieve a more uniform distribution of impurities along the crystal length and cross section, the floating-crucible technique is used. In this case, a smaller container is placed in the main crucible with the melt, from which the crystal is grown. A small melt volume is connected with the main melt volume, providing the additional portions of the melt with a given concentration of dope additives.

To increase efficiency, the volume of melt consumed during crystallization can be replenished by feeding using the gradual melting in the peripheral area of the crucible (or outside the floating crucible) of a polycrystalline rod or by filling granules. The intermediate additional loads can also be applied. The grown single crystals are removed through the special linking devices, and the next furnace-charge portion is added to the crucible to grow the following crystal. In this paper, the Czochralski method, together with all its versions (Table 2), is considered as a whole.

Family of Bridgman (Bridgeman-Stockbarger) Methods

In the case of directed crystallization, the front-line slowly moves along the molten system, and a single crystal is grown behind the front-line. As a result of preferential heat removal in one direction, the directional crystallization of the melt occurs. This method is technically relatively simple and makes it possible to grow the crystals with a given diameter by selecting an appropriate crucible. The process can be performed in vertical and horizontal versions. It belongs to the group of techniques that are characterized by only one available interface between the liquid and solid phases during the crystallization process.

The Bridgman method is most often used to obtain metallic, organic, and also a number of dielectric single crystals, such as oxides, fluorides, sulfides, halides, etc. However, the method has a number of disadvantages:

- the method is based on a crucible; therefore, the single crystals take the form of a crucible. Therefore, the stresses in them are inevitable that sometimes lead to their decrepitation;
- the thermal-expansion coefficients of materials of the crystal and the container in the crystal may lead to the significant internal stresses;
- it is impossible to directly observe the shape and position of the crystallization front-line;



Таблица 2. Некоторые разновидности метода Чохальского

Table 2. Some versions of the Czochalski method

№	Разновидности метода Чохральского	Примечание
1	В магнитном поле МСЗ в т. ч.: magnetic liquid encapsulated Czochralski (MLEC), transverse magnetic Czochralski growth (TMCZ), axial magnetic Czochralski growth (VMCZ), inhomogeneous (CUSP) magnetic Czochralski growth	В 1966 г. [Chedzey и Utech et al] первый кристалл InSb выращен в вертикальном постоянном магнитном поле. В 1970 г. [Witt] вырастил InSb в горизонтальном магнитном поле. В 1980 г. выращен первый кристалл Si
2	Полунепрерывный (с дозагрузкой) ССз	Примеры: Si («Солар Системс» Подольск)
3	Низкоградиентный LTG-Cz, (ИОНХ СО РАН, 1992 г.)	Пример: выращивание ВГО, Новосибирск
4	Способ «холодного тигля», или гарниссажа. Спрессованная исходная шихта плавится под действием индукционных токов, при этом в периферийном слое, который соприкасается с холодным контейнером, остается так называемый гарниссаж, не проницаемый для расплава.	Метод разработан (1970 г.) для кристаллов диоксида циркония в ФИАН (Москва).
5	Выращивание из «плавающего тигля»	В основной тигель с расплавом помещается контейнер меньшего размера, из которого производится выращивание кристалла. Малый объем расплава сообщается с основным объемом расплава, обеспечивая дополнительные порции расплава с заданной концентрацией легирующих примесей
6	Выращивание из-под флюса, Hurlle 1987 Liquid Encapsulated Czochralski – LEC	Пример: выращивание GaAs, Гиредмет, Росатом
7	Выращивание «с пьедестала» (по Хорну)	LHPG-laser heated pedestal growth – если плавление производится лучом лазера

окислов, фторидов, сульфидов, галогенидов и др. Но метод имеет ряд недостатков:

- метод тигельный, следовательно монокристаллы принимают форму тигля. Поэтому в них неизбежны напряжения, которые иногда приводят к их растрескиванию;
- коэффициенты термического расширения материалов кристалла и контейнера в кристалле могут возникать значительные внутренние напряжения;
- невозможно непосредственно наблюдать за формой и положением фронта кристаллизации;
- в трубчатом контейнере сложно выращивать кристаллы большого диаметра, например, более 200 мм;
- проблема контроля ориентации кристалла.

Создателями метода вертикальной направленной кристаллизации (ВНК/VGF) являются Л. В. Шубников и И. В. Обреимов (1924 год), а также Тамманн (1914 год) и Stöber (1925 год). П. Бриджмен внес в 1923 году изменения в метод ВНК. Контейнер перемещается относительно фиксированного тем-

- it is difficult to grow the crystals with large diameter in a tubular container, for example, more than 200 mm;
- the problem of crystal orientation control.

The authors of the vertical directional crystallization method (VGF) are L. V. Shubnikov and I. V. Obreimov (1924), as well as Tammann (1914) and Stöber (1925). In 1923, P. Bridgman made changes to the VGF method. The container is moved relative to a fixed temperature gradient (as the crystal grows, the container is descended and gradually exits the heated furnace, being cooled by the environmental air). The difference between the Bridgman method and the Obreimov-Shubnikov method is that in the first case the capsule with the melt is moved in a temperature gradient, while in the Obreimov-Shubnikov technique the melt is cooled in a temperature gradient. D. Stockbarger (1936) proposed new changes in the VGF process. In the Stockbarger technique, the heater is divided into two areas. A heat shield is installed between these areas to increase the temperature gradient. At present, the VGF method, together with all its versions, is considered as a whole [5, 6].

пературного градиента (по мере роста кристалла контейнер опускается вниз и постепенно выходит наружу из нагретой печи, охлаждаясь окружающим воздухом). Различие между методом Бриджмена и методом Обреимова-Шубникова состоит в том, что в «Бриджмене» происходит перемещение ампулы с расплавом в градиенте температуры, тогда как в методе Обреимова-Шубникова осуществляется охлаждение расплава в градиенте температуры. Д. Стокбаргер (1936 год) предложил новые изменения в процессе ВНК. В методе Стокбаргера нагреватель разделен на две зоны. Между этими зонами устанавливается тепловой экран для увеличения градиента температур. В настоящее время метод ВНК вместе со всеми его вариантами рассматривается как единое целое [5, 6].

Сегодня в России методом Бриджмена получают (список неполный):

- CaF_2 , BaF_2 , MgF_2 и др.: «Электростекло» (Москва);
- кадмий-цинк-теллур: Гиредмет (Москва);
- $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$: ИФТТ (Черноголовка);
- LICAF-кристаллы: Казанский государственный университет (Казань);
- GaAs: «Лассард» (Обнинск);
- кристаллы галогенидов KPb_2Hgl_5 – KPC-5 и др.: Гиредмет (Москва);
- нелинейно-оптические материалы, кристаллы двойных галогенидов: ИГМ СО РАН, (Новосибирск).

НЕКОТОРЫЕ ВАЖНЫЕ АСПЕКТЫ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ В РОССИИ

Критическим моментом, представляющим неотложную задачу для российского промышленного производства кристаллов фотоники, являются обеспечение исходными отечественными особо чистыми материалами на уровне 7N-8N с соответствующей аналитикой.

В России существует достаточно мощная производственная база для изготовления ростового оборудования современного уровня. Производственные мощности существуют в Черноголовке на базе ЕЗАН, в Брянске на базе ООО «НПО ГКМП», в Санкт-

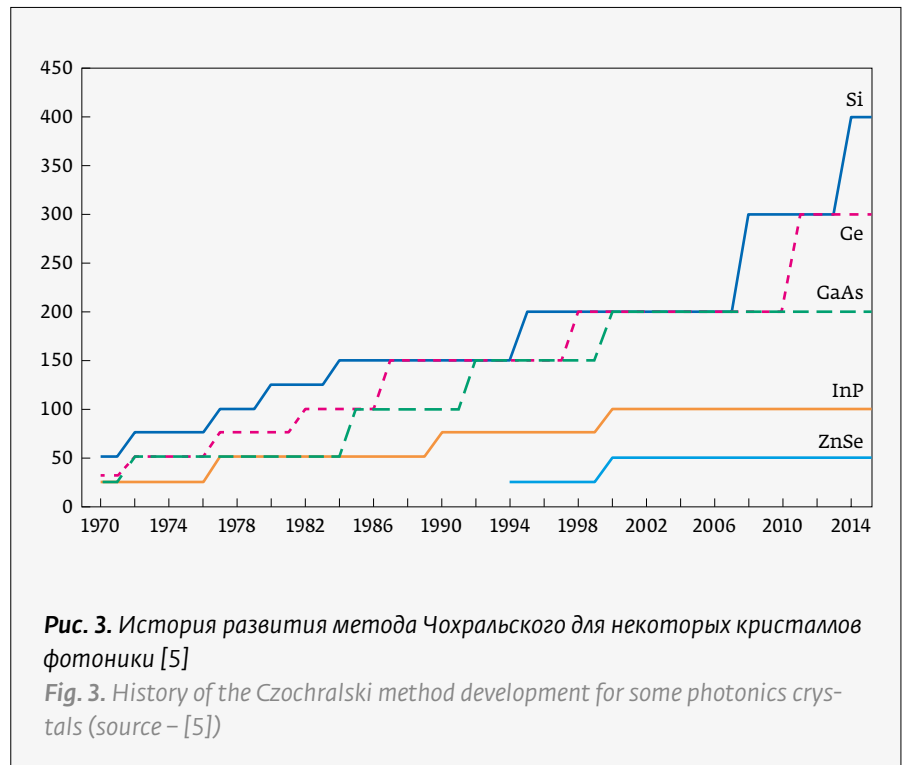


Рис. 3. История развития метода Чохральского для некоторых кристаллов фотоники [5]

Fig. 3. History of the Czochralski method development for some photonics crystals (source – [5])

At present, the following substances are obtained in Russia by the Bridgman method (non-exhaustive list):

- CaF_2 , BaF_2 , MgF_2 , etc.: Electrosteklo (Moscow);
- cadmium-zinc-tellurium: Giredmet (Moscow);
- $\text{A}^{\text{II}}\text{-B}^{\text{VI}}$: Institute of Solid State Physics (Chernogolovka);
- LICAF-crystals (Kazan University);
- GaAs: Lassard (Obninsk);
- crystals of halides KPb_2Hgl_5 – KRS-5, etc.: Giredmet (Moscow);
- nonlinear optical materials, double halide crystals (Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk).

SOME IMPORTANT CONSIDERATIONS OF THE CURRENT STATE-OF-THE-ART IN RUSSIA

The critical moment being a pressing challenge for the Russian industrial production of photonics crystals, is the provision with initial domestic high-purity materials at the level of 7N-8N with the appropriate analytics.

In Russia, there are fairly powerful production capacities for the manufacture of the current-level growth equipment. The production facilities are available in Chernogolovka on the basis of the Experimental Plant of Scientific Instrumentation,

Петербурге на базе ООО «Апекс», в Волгограде на базе ООО Cristars и др. Представляется возможным изготовление ростовых установок в достаточно короткие сроки в необходимом количестве в соответствии с индивидуальными особенностями необходимых фотонных материалов. Следует отметить своевременность проекта «Листопад» – по заданию Минпромторга компания ООО «Лассард» с 2021 года разрабатывает установку для получения GaAs методом VGF.

Есть компании, которые производят материалы для изготовления различной оснастки.

Высокоочищенный графит производится в Росатоме (НИИ Графит, Москва), ООО «Эталон-деталь», ООО «Донкарб Графит» (Челябинск), «КРИТ» (Москва). Уровень чистоты достаточен для изготовления элементов тепловых узлов установок выращивания (нагреватели, экраны), но часто оказывается недостаточным для изготовления тиглей, контактирующих с расплавом.

Высокоочищенный кварц для изготовления тиглей, лодочек, труб (особенно с прецизионными размерами) и пр. в промышленных масштабах производится только из природной кварцевой крупки с уровнем чистоты 2N-4N. Производство синтетического особоочищенного кварца для оптики с уровнем чистоты 7N и выше отсутствует. Разработанная в Советском Союзе (Подольский ХМЗ) технология получения синтетического кварца, базирующаяся на высокотемпературном гидролизе тетраоксида кремния, позволяет получать этот материал с уровнем суммарного содержания примесей не более 10^{-4} - 10^{-5} (по массе). Такой кварц примерно на один-два порядка чище кварца, полу-



Рис. 4. Монокристаллы: а) монокристаллы кремния, CCz, $\varnothing 200$ мм (Источник: «Солар системз»); б) монокристаллы германия, Cz, $\varnothing 100$ мм (Источник: «ОКБ «Астрон»); в) ниобат лития, д) лантангаллиевый силикат, Cz (Источник: «Фомос материалс»); е) монокристалл GaAs, LEC, (Источник: Гиредмет); ф) монокристалл InAs, LEC (Источник: Гиредмет)

Fig. 4. Single crystals of: а) silicon single crystals, CCz, with a diameter of 200 mm (source: Solar Systems); б) single crystals of germanium, Cz, with a diameter of 100 mm (source: Mechano-optical Design Bureau «Astron»); в) lithium niobate; д) lanthanum gallium silicate, Cz (source: Fomos Materials); е) single crystal of GaAs, LEC (source: Giredmet); ф) single crystal of InAs, LEC (source: Giredmet).



ченного из природного сырья. Необходима разработка процессов получения кремнезема по методу парофазного высокотемпературного гидролиза для создания промышленных производств изделий из кварцевого стекла степени чистоты 8N – 10N.

Отсутствуют отечественные тигли из пиролитического нитрида бора высокой чистоты для выращивания GaAs.

Эксплуатация тиглей для выращивания тугоплавких кристаллов из платины, иридия и прочих драгоценных металлов является скорее чисто экономической проблемой для сравнительно некрупных частных предприятий, особенно при разработке технологий выращивания кристаллов большого диаметра. Государственная поддержка в этом случае может заключаться в создании механизма аренды драгметаллов либо увеличении оборотных средств для предприятий [7].

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЛУЧЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ А^{III}В^V В РОССИИ НА ПРИМЕРЕ GaAs

Выращивание кристаллов из расплава вызывает ряд трудностей, связанных с высокой температурой плавления соединений А^{III}В^V и значительными давлениями диссоциации этих соединений при температуре плавления, заставляющих использовать в камере роста высокие давления инертного газа или компонент с целью «задавливания» диссоциации соединения, со сложностью подбора материала контейнера, не загрязняющего выращиваемые монокристаллы неконтролируемыми примесями. Это требует использования сложного технологического оборудования: камер высокого давления, механизмов вращения и перемещения, высокотемпературных тиглей и нагревательных элементов. К достоинствам методов роста из расплава можно отнести высокие скорости роста, позволяющие получать крупные объемные монокристаллы практически любых соединений А^{III}В^V. Обычно используемые скорости роста составляют несколько мм/час.

При повышении температуры возрастающее давление паров выращиваемого соединения над расплавом препятствует его дальнейшей диссоциации. Движение реактора в градиенте температур в холодную зону создает условия для кристаллизации расплава [7, 8].

В промышленном производстве монокристаллов GaAs используются два метода выращивания: метод Чохральского с жидкостной герметизацией расплава слоем борного ангидрида (Liquid Encapsulated Czochralski – LEC) и метод верти-

in Bryansk on the basis of the Scientific and Production Association “Group of Companies for Mechanical Engineering and Instrumentation Engineering” LLC, in Saint-Petersburg on the basis of Apex LLC, in Volgograd on the basis of Cristars LLC, etc. It seems possible to produce the growth facilities in a fairly short period of time and in the required quantity in accordance with the individual specifications of the required photonic materials. The timeliness of the Listopad project should be noted. On the instructions of the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation, Lassard LLC has been developing a GaAs production facility by the VGF method since 2021.

There are companies that produce materials for the manufacture of various equipment.

The high-purity graphite is produced by Rosatom (Research Institute “Graphite”, Moscow), Etalon-detal LLC, Donkarb Grafит LLC (Chelyabinsk), KRIT LLC (Moscow). The purity level is sufficient for the manufacture of the heating unit elements of growth setups (heaters, shields), but is often insufficient for the manufacture of crucibles being in contact with the melt.

The high-purity quartz for the manufacture of crucibles, boats, pipes (especially with the precision dimensions), etc. on a commercial scale is produced only from natural quartz grits with a purity level of 2N-4N. There is no production of synthetic high-purity quartz for optics with a purity level of 7N and higher. The synthetic quartz production technology, developed in the Soviet Union (Podolsky Chemicometallurgical Plant) and based on the high-temperature hydrolysis of silicon tetrachloride, makes it possible to obtain this material with a total impurity content of no more than 10⁻⁴ – 10⁻⁵ (by weight). Such quartz is about one or two orders cleaner than quartz obtained from the natural raw materials. It is necessary to develop the silica production processes by the vapor-phase high-temperature hydrolysis technique to provide for the industrial production of devices made of the quartz glass with a purity of 8N-10N.

There are no domestic crucibles made of high-purity pyrolytic boron nitride for GaAs growth.

Operation of crucibles for growing the hard-melting crystals from platinum, iridium, and other precious metals is rather a purely economic issue for the relatively small private enterprises, especially when developing the growth techniques for the large-diameter crystals. In this case, the state support may consist in establishment of a rental mechanism for precious metals or increase in the working capital for enterprises [7].



Таблица 3. Некоторые разновидности метода Бриджмена

Table 3. Some versions of the Bridgman method

	Разновидности метода Бриджмена	Примечание
1	Горизонтальный HB	Капица, 1928 г.
2	Вертикальный VB	По Бриджмену и Стокбаргеру
	VB в магнитном поле	
	С вращением тигля ACRT accelerated crucible rotation technique	Scheel, 1972 г.
	С наложением на расплав УЗ-колебаний	
4	Bridgman LP – метод Бриджмена при низком давлении	
5	HZM horizontal zone melting – горизонтальная зонная плавка	
6	HPVZM high-pressure vertical zone melting – то же при высоком давлении	Ramsberger и Malvin 1927,
7	GF gradient freezing – направленная кристаллизация	Tammann 1914 / Stöber 1925
8	VGF vertical gradient freezing – вертикальная направленная кристаллизация	Обреимов-Шубников, 1924 г.

кальной направленной кристаллизации (ВНК) или Vertical Gradient Freeze (VGF), также из-под флюса.

Важнейшей особенностью метода ЛЕС является то, что выращивание монокристалла осуществляется при достаточно больших осевых и радиальных градиентах температуры вблизи фронта кристаллизации, т.е. в области максимальной пластичности материала. Следствием роста кристалла при высоких градиентах температуры в технологии ЛЕС является высокая плотность дислокаций. Типичные значения N_D в нелегированных монокристаллах ЛЕС-GaAs составляют до $(1-2) \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ при диаметрах слитка 100–200 мм. Материал ЛЕС обладает более однородным распределением уд. сопротивления по площади пластины. Материал, полученный методом VGF, имеет более низкую плотность дислокаций, но их распределение по площади пластины более неоднородное. Присутствие дислокаций в активных областях светоизлучающих структур нежелательно, поскольку приводит к быстрой деградации характеристик прибора. Соответственно, требование низкой плотности дислокаций (N_D) является основным требованием материалу, используемому в качестве подложки. На практике сложилась следующая градация: в производстве светодиодов используются кристаллы с $N_D < 5 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$, а в производстве лазеров – с $N_D < 5 \cdot 10^2 \text{ см}^{-2}$.

CURRENT SITUATION IN THE PRODUCTION OF A^{III}B^V SINGLE CRYSTALS IN RUSSIA ON THE EXAMPLE OF GaAs

The crystal growth from a melt causes a number of difficulties related to the high melting point of A^{III}B^V compounds and significant dissociation pressures of these compounds at the melting point, forcing to use the high inert gas pressures or component in the growth chamber in order to suppress the compound dissociation, the complicated selection of the container material, not contaminating the grown single crystals with uncontrolled impurities. It requires an application of comprehensive process equipment, such as the high-pressure chambers, rotation and displacement mechanisms, high-temperature crucibles and heating elements. The advantages of melt growth methods include the high growth rates that make it possible to obtain the large bulk single crystals of almost any A^{III}B^V compounds. The commonly used growth rates are a few mm/hour.

As the temperature rises, the growing vapor pressure of the compound being grown above the melt prevents its further dissociation. The reactor movement in the temperature gradient to the cold area provides the conditions for melt crystallization [7, 8].

During the industrial production of GaAs single crystals, two growing methods are used: the Czochralski method with liquid encapsulation of the

Таблица 4. Технология получения монокристаллов GaAs

Table 4. Preparation process for GaAs single crystals

Кристалл	Сырье	Рафинирование	Оснастка	Выращивание кристалла	Установки выращивания
GaAs	Ga – 99,9% производство Русал (10–15 т/год)	Гиредмет (Москва) до 6N Остро требуется повышение до уровня 7N-8N Экспорт	Тигли – пиролитический нитрида бора (PBN)	LEC – АО Гиредмет (Росатом)	Отечественные
	As – не производится	Остро требуется собственная технология уровня 7N-8N	Экспорт	VGF – ООО «Лассард»	Отечественные – в стадии разработки (проект Минпромторга «Листопад»)
Оценка состояния (условно)	++	+/-	-	+	+

Особенностью производства оптоэлектронных приборов в сравнении с производством СВЧ ИС является то, что преобладающая часть себестоимости прибора приходится на операции, выполняемые после разделения структуры на отдельные чипы. Соответственно в производстве оптоэлектронных приборов не столь актуально наращивание площади пластин. Вследствие этого в мировом производстве светодиодов и лазеров до сих пор в больших объемах используются пластины диаметром до 100 мм, несмотря на то, что промышленностью освоено производство монокристаллов с низкой плотностью дислокаций диаме-

т melt with a boric anhydride layer (Liquid Encapsulated Czochralski – LEC) and the vertical directional crystallization method (VDC) or Vertical Gradient Freeze (VGF), also the flux growth.

The most important feature of the LEC method is that a single crystal is grown at the sufficiently large axial and radial temperature gradients near the crystallization front-line, i.e. in the area of maximum material plasticity. In the case of LEC technique, a consequence of crystal growth at the high temperature gradients is a high dislocation density. Typical N_D values in the undoped LEC-GaAs single crystals are up to $(1-2) \cdot 10^5 \text{ cm}^{-2}$ for the



АСТРОН
Оптико-механическое конструкторское бюро

ПРОИЗВОДСТВО ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ
140080, МО, г. Лыткарино, ул. Парковая, д.1; тел: +7 (495) 215-13-82; info@astrohn.ru, www.astrohn.ru



тром 200 мм. Важно отметить, что монокристаллы, выращенные методом ВНК, имеют более высокую себестоимость, чем выращенные методом ЛЕС. Это обусловлено в 4–5 раз меньшей скоростью кристаллизации и исключением операции повторного затравления. Сравнивая совокупность характеристик, присущих различным методам выращивания, можно видеть, что для большинства СВЧ-применений предпочтительно (по крайней мере экономически) использование ЛЕС-GaAs, в то время как для изготовления СД, а также для всех оптоэлектронных применений использование GaAs, полученного методом ВНК, безальтернативно. Поэтому оба метода присутствуют на рынке, но с существенным преобладанием ВНК. Ситуация в России по элементам технологической цепочки приведена в табл. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Международное разделение труда в области выращивания кристаллов высоко развито, что неудивительно: большие издержки на разработку технологии и организацию производства новых материалов часто не позволяют осуществить проекты силами отдельной коммерческой структуры. Подобные проекты сегодня реализуются крупнейшими корпорациями либо исследовательскими центрами с привлечением целого ряда льгот и налоговых преференций со стороны поддерживающих проекты национальных правительств.

Общее состояние дел в области промышленного получения объемных «традиционных» кристаллов фотоники сегодня в России можно охарактеризовать как «удовлетворительное с отдельными существенными недостатками». (Мы не обсуждаем в данной статье проблемы отсутствия выращивания кремния «электронного качества» диаметром более 100 мм). Практически все методы получения объемных кристаллов, разработанные в 60–80-е годы прошлого века, сохранились и развивались на достаточно современном уровне, что говорит о высоком уровне заложенной в те годы научной и инженерной школы.

Что касается разработки технологий «новых» объемных материалов фотоники (например Ga_2O_3 , как материал для создания солнечно-слепых УФ-датчиков), то скорость разработки таких технологий сегодня совершенно недостаточна.

Условия в отрасли, сложившиеся после 24 февраля сего года, требуют решительных действий. Несмотря на прилагаемые в последние годы усилия по восстановлению российской оптоэлектронной промышленности, налицо наличие

ingot diameters of 100–200 mm. The LEC material has a more uniform impact resistance distribution across the plate area. The material obtained by the VGF method has a lower dislocation density, however, their distribution over the plate area is more inhomogeneous. The availability of dislocations in the active areas of light-emitting structures is undesirable, since it leads to a rapid degradation of device specifications. Accordingly, the requirement for a low dislocation density (N_D) is a basic requirement for the material used as a substrate. In practice, the following gradation has developed: the crystals with $N_D < 5 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-2}$ are used in the production of LEDs, and the crystals with $N_D < 5 \cdot 10^2 \text{ cm}^{-2}$ are used in the production of lasers.

The production feature of the optoelectronic devices in comparison with the production of SHF integrated circuits is that the predominant part of the device cost falls on operations performed after the structure is divided into individual chips. Accordingly, it is not so important to increase the plate area during the production of optoelectronic devices. As a result, the plates with a diameter of up to 100 mm are still heavily used in the world production of LEDs and lasers, despite the fact that the industry has mastered the production of single crystals with a low dislocation density and a diameter of 200 mm. It is important to note that the single crystals grown by the VDC method have a higher cost than those grown by the LEC method. This is due to a 4–5 times lower crystallization rate and prevention of the repeated etching operation. When comparing the set of characteristics inherent in various growth methods, it can be seen that it is preferable (at least economically) to use LEC-GaAs for the most SHF applications, while the use of GaAs obtained by the VDC method has no alternative for production of LEDs, as well as for all optoelectronic applications. Therefore, both methods are available on the market, but with a significant predominance of VDC. The situation in Russia with indication of the process chain elements is shown in Table 4.

CONCLUSION

The international labor differentiation in the field of crystal growing is highly developed that is not surprising, since the high costs of process development and arrangement of new material production often do not allow the projects to be implemented by a separate commercial entity. Such projects are now being implemented by major corporations or research centers with the use of a number of benefits and tax preferences



РОССИЙСКИЙ ФОРУМ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2022



2-8 октября

Роза Хутор



7 дней

1000+ участников

12 научно-технических секций

Деловая программа

Демонстрационная зона



+7(495) 641-57-17

www.microelectronica.pro

Email: info@microelectronica.pro



научно-технических проблем с рядом важнейших материалов микро- и оптоэлектроники. Основные участники рынка материалов фотоники: государственные корпорация Швабе, корпорация по атомной энергии «Росатом» (АО «Гиредмет»), институты РАН, частные структуры – обладают обширной базой данных и значительными компетенциями в области создания оптических и фоточувствительных материалов, техники и технологий и их производства и могут решить проблему организации малотоннажного производства материалов оптического качества. Но решение этой проблемы возможно только при создании технологического базиса, позволяющего предприятиям отечественной промышленности выпускать материалы, соответствующую мировому уровню.

В части 2 будет проведен анализ преимуществ и недостатков тех или иных методов выращивания. Задача достижения паритета с мировым уровнем, а также создания научно-технического и технологического заделов для развития технологий получения объемных кристаллов могут быть решены проведением комплекса мероприятий технического, финансового и организационного характера в рамках более смелого использования механизма государственно-частного партнерства.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Subashini B., Geetha M.** Introduction to Crystal Growth Techniques. *International Journal of Engineering and Techniques*. 2017; 3 (5): 1–5.
2. **Bendow B.** Optical properties of infrared transmitting materials. *J. Electron. Mater.* 1974; 3(1): 101–135.
3. **Fal'kevich E. S., Pul'ner E. O., Chervonij I. F., Shvarcman L. YA.** *Tekhnologiya poluprovodnikovogo kremniya*. – M.: Metallurgiya. 1992. 408 p
4. **SHashkov YU. M.** *Vyrashchivanie monokristallov metodom vytyagivaniya*. – M.: Metallurgiya. 1982. 214 p.
5. **Müller G., Review G.** The Czochralski Method – where we are 90 years after Jan Czochralski's invention. *Cryst. Res. Technol.* 2007; 42(12): 1150–1161. DOI: 10.1002/crat.200711001.
6. **Size S. M., Lee M. K.** *Semiconductor Devices: Physics and Technology*. John Wiley & Sons, Inc., США, 2012, с. 578
7. **Naumov A. V., Orekhov D. L., Kul'chickij N. A.** Progress v tekhnologiyah poluprovodnikovogo kremniya. *Uspekhi prikladnoj fiziki*. 2022;10(1):32–49, DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-1-32-50.
8. **Kulchitsky N. A., Naumov A. V., Startsev V. V.** Photonics is a new driver of gallium arsenide market. *Photonics Russia*. 2020;14(2): 138–149. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.2.138.149
9. **R. Kremer R., Teichert St.** GaAs-based devices: How to choose a suitable substrate. *Compound Semiconductor Magazine*. 2003;05:35–38.

АВТОРЫ

Наумов Аркадий Валерьевич инженер-аналитик,

АО «Оптико-механическое конструкторское бюро Астрон»,
<https://astrohn.ru>, г. Лыткарино, Моск. обл., Россия.
ORCID: 0000-0001-6081-8304

Старцев Вадим Валерьевич, канд. техн. наук, главный конструктор,
АО «Оптико-механическое конструкторское бюро Астрон»,
<https://astrohn.ru>, г. Лыткарино, Моск. обл., Россия.
ORCID: 0000-0002-2800-544X

from the national governments supporting the projects.

At present, the general situation in the field of industrial production of bulk traditional photonics crystals in Russia can be characterized as “satisfactory with some significant shortcomings” (we do not discuss the lack of growth of electronic grade silicon with a diameter of more than 100 mm in this article). On a practical level, all methods for preparing bulk crystals developed in the 60s-80s of the last century have been preserved and developed at a fairly modern level that indicates the high level of the scientific and engineering school built up in those years.

As for the process development for new bulk photonics materials (for example, Ga₂O₃, as a material for manufacturing the solar-blind UV sensors), the current development speed of such technologies is completely insufficient.

The industrial conditions occurred since February 24, 2022 require decisive actions. Despite the efforts made in recent years to restore the Russian optoelectronic industry, there are obvious scientific and technical issues with a number of important materials for micro- and optoelectronics. The main market participants in relation to the photonics materials are the Shvabe State Corporation, the Rosatom Atomic Energy Corporation (Giredmet JSC), institutes of the Russian Academy of Sciences, private entities that have an extensive database and significant competencies in the field of optical and photosensitive materials, equipment, technologies and their production and are able to solve the problem of arranging the small-tonnage production of optical quality materials. However, this problem can be solved only with the establishment of a technological capability that allows the domestic enterprises to produce the world-class materials.

Part 2 will provide the analysis of advantages and disadvantages of certain growing methods. The task of achieving parity with the world level, as well as doing the scientific, technical and technological groundwork for the bulk crystal preparation technology, can be solved by performance of a set of technical, financial and organizational measures within the framework of a more daring use of the public-private partnership mechanism.

AUTHORS

Naumov Arkady Valerievich, engineer-analyst, ASTROHN Technology Ltd,
<https://astrohn.ru>, Lytkarino, Moscow region, Russia.
ORCID: 0000-0001-6081-8304

Startsev Vadim Valerievich, Cand. of Technical Sciences,
ASTROHN Technology Ltd, <https://astrohn.ru>, Lytkarino, Moscow region, Russia.
ORCID ID: 0000-0002-2800-544X



АО «НПК «СПП» РАЗРАБАТЫВАЕТ, ПРОИЗВОДИТ И ИСПЫТЫВАЕТ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СРЕДСТВА С ПРЕДЕЛЬНО ВЫСОКОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ, ПРЕЦИЗИОННЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ, НАЗЕМНЫХ, МОРСКИХ И АВИАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ, ЛИДАРНЫЕ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА, СПУТНИКОВЫЕ И НАЗЕМНЫЕ СИСТЕМЫ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ.



АО «НПК «СПП»

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ
«СИСТЕМЫ ПРЕЦИЗИОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»

111024, МОСКВА, УЛ. АВИАМОТОРНАЯ, Д. 53,

ТЕЛ.: (495) 234-98-47, ФАКС: (495) 234-98-59

WWW.NPK-SPP.RU; SPP@NPK-SPP.RU