



## Фотоника – новый драйвер арсенида галлия

Н. А. Кульчицкий<sup>1</sup>, А. В. Наумов<sup>2</sup>, В. В. Старцев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Государственный научный центр РФ, Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Орион», Москва, Россия

<sup>2</sup> Акционерное общество «Опτικο-механическое конструкторское бюро Астрон», Лыткарино, Моск. обл., Россия

В статье показаны результаты краткого анализа рынка GaAs-пластин, представлен обзор основных продуктов оптоэлектроники, перечислены мировые производители-лидеры изделий (слитков, пластин и эпитаксиальных слоев) GaAs и рассмотрена ситуация российской базы производства GaAs-материалов. Двойное полупроводниковое соединение арсенид галлия (GaAs) – традиционный материал СВЧ-электроники. До недавних пор одним из наиболее быстрорастущих сегментов рынка применений этого материала были высокочастотные интегральные схемы (ИС) на GaAs для мобильной телефонии. Однако парадигма развития рынка GaAs меняется. Новым двигателем развития мирового рынка арсенида галлия становится фотоника.

**Ключевые слова:** арсенид галлия, светодиоды, лазерные диоды, VCSEL, EEL, радары

Статья получена: 19.02.2020

Статья принята к публикации: 23.03.2020

### АРСЕНИД ГАЛЛИЯ (GaAs) – ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Производство GaAs появилось и развивалось как внедрение технологий создания материала СВЧ-электроники. В середине 60-х годов прошлого века одновременно в США и в СССР начались исследования свойств GaAs. Они завершились разработкой интегральных схем (ИС) высокого быстродействия, используемых в «интеллектуальных» системах управления огнем и в суперкомпьютерах. Промышленное освоение процессов обработки пластин GaAs диаметром 150 мм привело к существен-

## Photonic is a New Driver of Gallium Arsenide Market

N. A. Kulchitsky<sup>1</sup>, A. V. Naumov<sup>2</sup>, V. V. Startsev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> State Research Center of the Russian Federation, Joint-Stock Company “Scientific-Production Association “Orion”, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Joint-Stock Company “Optical Mechanical Design Bureau “Astron”, Lytkarino, Moscow region, Russia

The article presents the results of a brief analysis of the GaAs wafers market, provides an overview of the main products of optoelectronics, lists the world leading manufacturers of GaAs products (ingots, wafers and epitaxial layers) and considers the situation of the Russian base for the production of GaAs materials. The double semiconductor gallium arsenide (GaAs) compound is a traditional microwave electronics material. Until recently, one of the fastest growing market segments for the use of this material was GaAs high-frequency integrated circuits (ICs) for mobile telephony. However, the paradigm for the development of the GaAs market is changing. Photonics is becoming a new engine for the development of the global gallium arsenide market.

**Keywords:** gallium arsenide, LEDs, laser diodes, VCSEL, EEL, radars

Received: 19.02.2020

Accepted: 23.03.2020

### ARSENID GALLIUM (GaAs): HISTORY AND PROSPECTS

GaAs production appeared and developed as the introduction of technologies for creating microwave electronics material. In the mid-60s of the last century, studies of the properties of GaAs began simultaneously in the USA and the USSR. They culminated in the development of high-speed integrated circuits (ICs) used in “smart” fire control systems and in supercomputers. The industrial development of the processing of GaAs wafers with a diameter of 150 mm led to a significant reduction in the cost of microwave transistors. This ensured their widespread distribution in all sectors of application:

ному снижению стоимости СВЧ-транзисторов. Это обеспечило их широкое распространение во все сектора применения: от мобильных телефонов и базовых станций до радаров и систем связи миллиметрового диапазона [1-2]. GaAs также широко используется в оптоэлектронике – на основе арсенида галлия изготавливаются светодиоды (СД). Изобретение первых СД, излучающих монохроматический свет при подключении к источнику тока, относится к 1960-м годам. С тех пор СВЧ-применения и СД-применения поделили между собой рынок GaAs. Однако похоже, вектор развития GaAs окончательно меняется: от СВЧ-электроники к фотонике. Рубежом можно считать 2017 год – момента появления в смартфонах iPhone X функции 3D-сканирования лиц с использованием лазерных диодов с вертикальным излучающим резонатором (VCSEL) на базе GaAs (рис. 1). Основные типы приборов на основе GaAs приведены в табл. 1 [1].

## СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ GaAs

Промышленные монокристаллы GaAs можно разделить на 2 большие группы:

- Полуизолирующий (ПИ) GaAs с высоким удельным сопротивлением/собственной проводимостью ( $10^7$  Ом·см). Используется при изготовлении высокочастотных ИС и дискретных микроскопических приборов. Помимо высокого удельного сопротивления, монокристаллы ПИ-GaAs должны иметь высокие значения подвижности носителей заряда

from mobile phones and base stations to radars and millimeter-wave communication systems [1-2]. GaAs is also widely used in optoelectronics – light-emitting diodes (LEDs) are made on the basis of gallium arsenide. The invention of the first LEDs emitting monochromatic light when connected to a current source relates to the 1960s. Since then, microwave applications and LED applications have divided the GaAs market. However, it seems that the GaAs development vector is finally changing: from microwave electronics to photonics. The year 2017 can be considered a milestone – the moment the appearance of the 3D face scanning function in iPhone X smartphones using GaAs laser diodes with a vertical emitting resonator (VCSEL) (Fig. 1). The main types of devices based on GaAs are given in Table 1 [1].

## METHODS FOR PRODUCING GaAs SINGLE CRYSTALS

Industrial GaAs single crystals can be divided into 2 large groups:

- Semi-insulating (SI) GaAs with high resistivity/intrinsic conductivity ( $10^7$  Ohm·cm). It is used in the manufacture of high-frequency ICs and discrete microelectronic devices. In addition to high resistivity, SI GaAs single crystals must have high carrier mobility and high macro- and microscopic uniformity of the distribution of properties both in the cross section and along the length of the grown ingots.
- Doped (SC) GaAs n-type conductivity with a low dislocation density. Single crystals of heavily doped ( $10^{17}$ – $10^{18}$  cm<sup>-3</sup>) GaAs, in addition to high conductivity, should have a fairly perfect crystalline structure. They are used in optoelectronics for the manufacture of injection lasers, light and photodiodes, photocathodes, and are material for microwave oscillators. Chromium-doped gallium arsenide single crystals are used in IR optics.

They are used in optoelectronics for the manufacture of injection lasers, light and photodiodes, photocathodes, and are material for microwave oscillators. Chromium-doped gallium arsenide single crystals are used in IR optics.

Three methods of growing are used in the industrial production of GaAs single crystals: the Czochralski method with liquid encapsulation of the melt with a layer of boric anhydride (Liquid Encapsulated Czochralski – LEC), the Bridgman method of horizontal directional crystallization (Horizontal Bridgman – HB) or “crystallization in a moving temperature gradient”

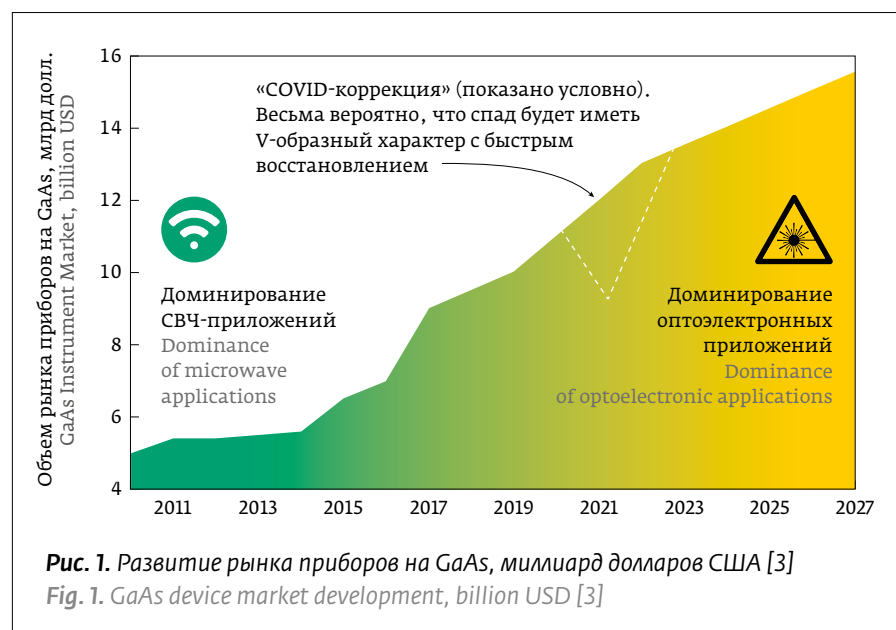


Рис. 1. Развитие рынка приборов на GaAs, миллиард долларов США [3]

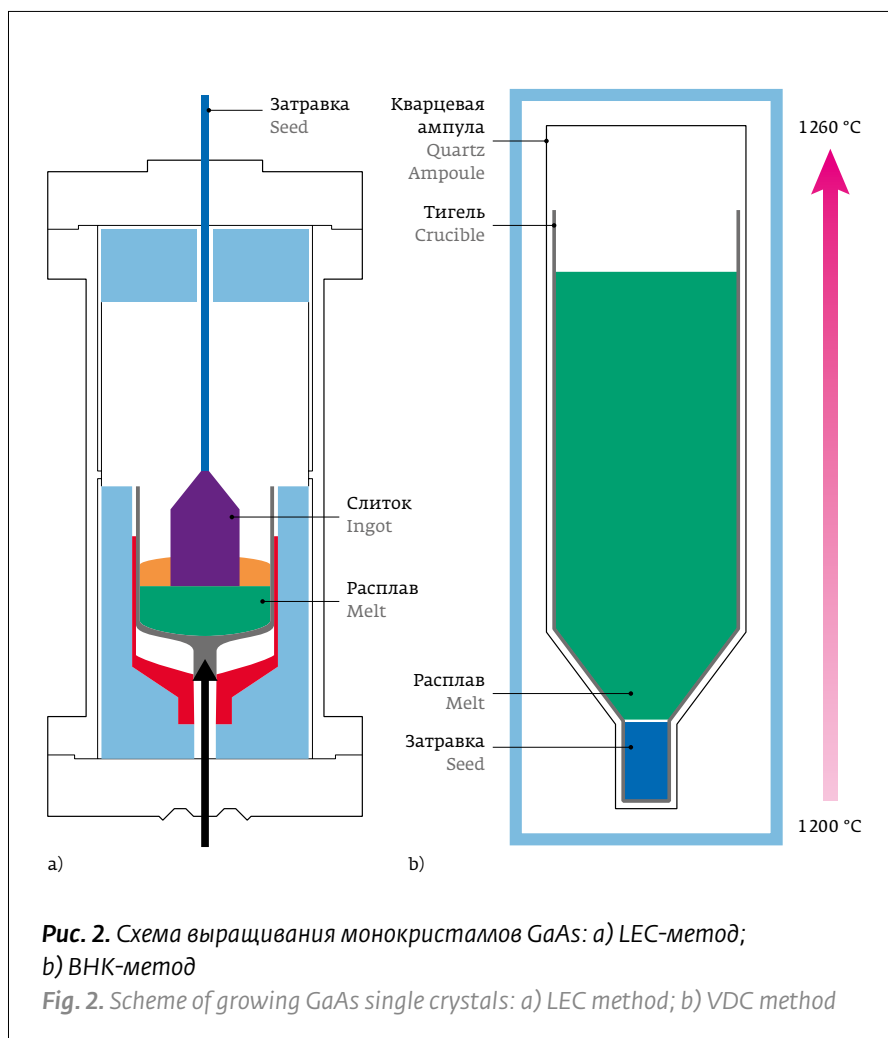
Fig. 1. GaAs device market development, billion USD [3]

и высокую макро- и микроскопическую однородность распределения свойств как в поперечном сечении, так и по длине выращенных слитков.

- Легированный (ПП) GaAs p-типа проводимости с низкой плотностью дислокаций. Монокристаллы сильно легированного ( $10^{17}$ – $10^{18}$  см<sup>-3</sup>) GaAs, помимо высокой проводимости, должны обладать достаточно совершенной кристаллической структурой. Они используются в оптоэлектронике для изготовления инжекционных лазеров, свето- и фотодиодов, фотокатодов, являются материалом для генераторов СВЧ-колебаний. Монокристаллы арсенида галлия, легированные хромом, используют в ИК-оптике.

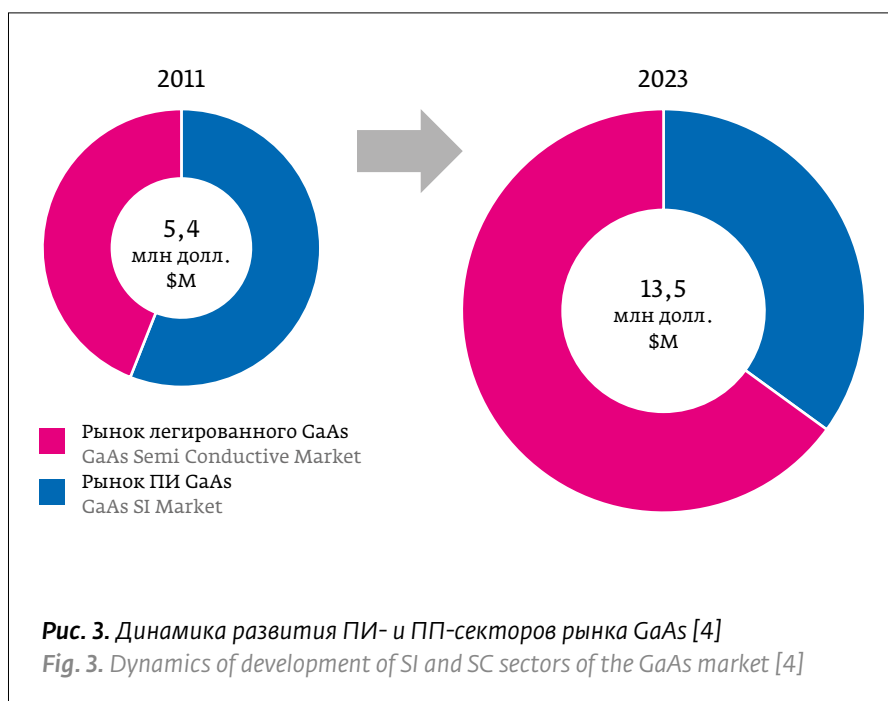
В промышленном производстве монокристаллов GaAs используют три метода выращивания: метод Чохральского с жидкостной герметизацией расплава слоем борного ангидрида (Liquid Encapsulated Czochralski - LEC), метод горизонтальной направленной кристаллизации в вариантах «по Бриджмену» (Horizontal Bridgman - HB) или «кристаллизации в движущемся градиенте температуры» (Horizontal Gradient Freeze - HGF) и метод вертикальной направленной кристаллизации (ВНК) в тех же двух вариантах (Vertical Bridgman - VB и Vertical Gradient Freeze - VGF).

Важнейшей особенностью метода LEC (рис. 2а) является то, что выращивание монокристалла осуществляется при достаточно больших осевых и радиальных градиентах температуры вблизи фронта кри-



**Рис. 2.** Схема выращивания монокристаллов GaAs: а) LEC-метод; б) ВНК-метод

**Fig. 2.** Scheme of growing GaAs single crystals: а) LEC method; б) VDC method



**Рис. 3.** Динамика развития ПИ- и ПП-секторов рынка GaAs [4]

**Fig. 3.** Dynamics of development of SI and SC sectors of the GaAs market [4]



**Таблица 1.** Основные типы приборов на основе GaAs  
**Table 1.** Main types of GaAs-based devices

Приборы Devices	Структура Structure	Назначение Purpose	Метод получения – GaAs-подложки Method of obtaining – GaAs substrates
Светодиоды (СД) видимого диапазона, в т. ч. микро-СД Visible LEDs, including micro- LEDs	Эпитаксиальные слои GaAlAs, GaAsP или InGaAsP на подложке GaAs Epitaxial GaAlAs, GaAsP, or InGaAsP layers on a GaAs substrate	СД стандартной яркости – для индикаторов, циф- ровых дисплеев и ИК-излучателей; СД повышенной яркости – для подсветок, иллюминации, сигналь- ных устройств, указателей, автомобильных огней и прочие Standard brightness LED – for indicators, digital displays and infrared radiation; High brightness LED – for illumination, illumination, signaling devices, indicators, car lights and others	ВНК, LEC
Лазерные диоды в т. ч. VCSEL, EEL, ИК, УФ и др. Laser diodes including VCSEL, EEL, IR, UV, etc.	Эпитаксиальные слои GaAlAs, GaAsP и др. на подложке GaAs Epitaxial layers of GaAlAs, GaAsP, etc. on a GaAs substrate	Для устройств записи и считывания CD и DVD-дисков, в телекоммуникационных устройствах, ВОЛС, медицине, принтерах, для накачки твердотельных лазеров, оптическая лока- ция LiDAR For recording and reading CD and DVD discs, in telecommunication devices, fiber optic links, medicine, printers, for pumping solid-state lasers, LiDAR optical location	ВНК
Солнечные батареи Solar panels	Эпитаксиальные слои легированного GaInAs или AlGaInP на Ge Epitaxial layers of doped GaInAs or AlGaInP on Ge	Для бортовых источников питания космических аппаратов; растет рынок наземных батарей такого типа For onboard power supplies for spacecraft; growing market for this type of ground battery	ВНК, LEC
Аналоговые и цифровые интегральные схемы Analog and digital ICs	Эпитаксиальные слои GaInP, GaInAs, AlGaInP и др. на подложке GaAs Epitaxial layers of GaInP, GaInAs, AlGaInP, etc. on a GaAs substrate	Высокоскоростные логические блоки, коммуни- кационные блоки для телекоммуникационных систем; усилители мощности для мобильных теле- фонов High-speed logic blocks, communication blocks for telecommunication systems; power amplifiers for mobile phones	LEC
ИК-матричные фотоприемные устройства «смо- трящего» типа Focal Plane Array (FPA) photodetectors	Структуры с «кванто- выми ямами», GaInAs, и др. на подложке GaAs Structures with "quan- tum wells", GaInAs, etc. on a GaAs substrate	Инфракрасные и тепловизионные приборы ноч- ного видения IR and thermal imaging night vision devices	ВНК

сталлизации, 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 составляют до  $(1-2) \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$  при диаметрах слитка 100–200 мм. Материал ЛЕС обладает более однородным распределением удельного сопротивления по площади пластины.

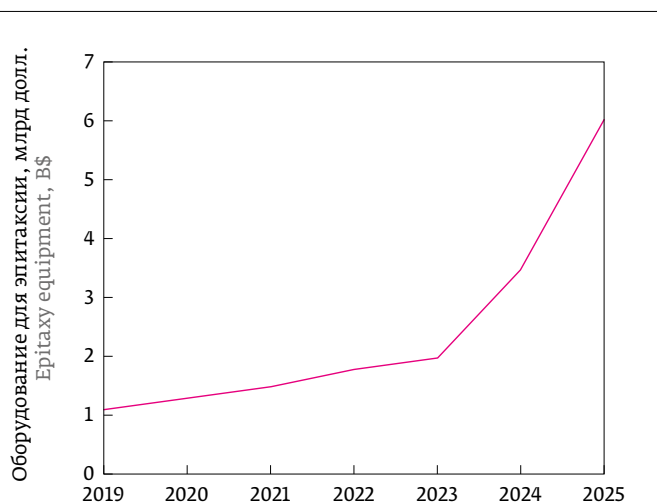
(Horizontal Gradient Freeze – HGF) and the method of vertical directional crystallization (VDC) also in two versions (Vertical Bridgman – VB and Vertical Gradient Freeze – VGF).

The most important feature of the LEC method (Fig. 2a) is that the single crystal is grown at sufficiently large axial and radial temperature gradients near the crystallization front, i. e. in the field of maximum plasticity of the material. A consequence of crys-

Материал, полученный методом ВНК (рис. 2б), имеет более низкую плотность дислокаций. Основными требованиями к качеству легированного полупроводникового (ПП) арсенида галлия, как подложечного материала, являются низкое удельное сопротивление. Это достигается введением примеси кремния (n-тип) или цинка (p-тип) в необходимой концентрации. Высокое структурное совершенство является ключевым требованием, поскольку в процессе эпитаксии происходит наследование дислокаций из подложки в эпитаксиальный слой, являющийся активным элементом будущего светоизлучающего прибора. В отличие от СВЧ-приборов, в приборах, генерирующих излучение, 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 к сильно легированному материалу, используемому в качестве подложки для светоизлучающих структур. На практике сложилась следующая градация: в производстве светодиодов используются кристаллы с плотностью дислокаций  $N_D < 5 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$ , а в производстве лазеров – с  $N_D < 5 \cdot 10^2 \text{ см}^{-2}$ .

Стоимостной особенностью производства оптоэлектронных приборов в сравнении с производством СВЧ ИС является различие вклада операций изготовления в стоимость изделий, что преобладающая часть себестоимости прибора приходится на операции, выполняемые уже после разделения структуры на отдельные чипы. Соответственно, в производстве оптоэлектронных приборов не столь актуально увеличение площади пластин. Поэтому в мировом производстве светодиодов и лазеров до сих пор в больших объемах используются пластины диаметром до 100 мм. И это происходит повсеместно, несмотря на то, что промышленно освоено производство монокристаллов с низкой плотностью дислокаций большего диаметра 200 мм.

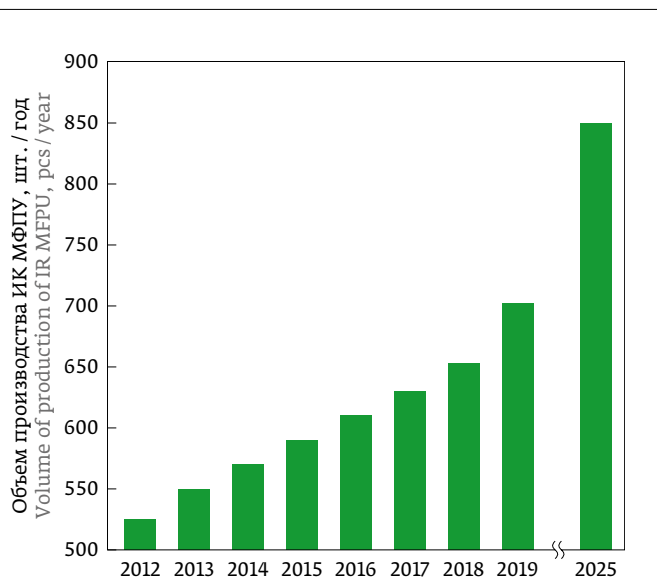
Двумя методами, ЛЕС-методом и ВНК-методом, можно выращивать как ПП GaAs-, так и ПИ GaAs-кристаллы. Важно подчеркнуть, что монокристаллы, выращенные методом ВНК, имеют более высокую себестоимость, чем выращенные методом ЛЕС. Это обусловлено меньшей скоростью кристаллизации (в 4–5 раз) и исключением из технологического цикла операции повторного затравления. Сравнивая совокупность характеристик, присущих приборам, полученных различными методами выращивания, можно видеть разницу. Для большин-



**Рис. 4.** Динамика рынка оборудования для эпитаксии (MOCVD, CVD, МЛЭ), млрд долл. США [5, 6]

**Fig. 4.** Dynamics of the market for epitaxy equipment (MOCVD, CVD, MBE), billion USD [5, 6]

tal growth at high temperature gradients in LEC technology is a high dislocation density. Typical  $N_D$  values in undoped single crystals are up to  $(1-2) \cdot 10^5 \text{ cm}^{-2}$  at an ingot diameter of 100–200 mm. The LEC material has a more uniform distribution of resistivity across the plate area.







**Рис. 5.** Развитие рынка ИК МФПУ на квантовых ямах в структурах GaAs и прогноз, шт. / год [7]

**Fig. 5.** Development of the market of quantum-well infrared array photodetectors in GaAs structures and forecast, pcs/year [7]



**Таблица 2.** ИК-модули ряда производителей с охлаждаемыми МФПУ на квантовых ямах на GaAs

**Table 2.** IR modules from a number of manufacturers with cooled GaAs-based quantum-well array photodetectors

Марка ФПУ PD Type	IRnova320ER-LW IDCA	IRnova640 integral cooler DDCA	IRnova640-ER split cooler DDCA	АСТРОН-640КЯ20А89
				
Формат матрицы, элементов Matrix format, elements	320×256	640×480	640×512	640×512
Шаг матрицы, мкм Matrix pitch, μm	30	25	25	20
Спектральный диапазон, мкм Spectral range, μm	7,5–9	7,5–9	7,5–9	8,3–8,7
Максимум спектральной чувствительности, мкм Maximum spectral sensitivity, μm	8,6	8,6	8,6	8,7
Временная NETD, мК Temporary NETD, mK	25	35	30	30
Кадровая частота, Гц Frame frequency, Hz	60	30	107	50
Система охлаждения Cooling system	Интегральный Стирлинг Integral Stirling	Интегральный Стирлинг Integral Stirling	Сплит-Стирлинг Split stirling	Интегральный Стирлинг АСТРОН-МКС500 Integral Stirling

ства 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. Эти технические решения, полученные благодаря большому практическому опыту, безальтернативны (табл. 1). Поэтому оба метода присутствуют на рынке, но с существенным преобладанием ВНК. Если в 2011 году на рынке преобладал ЛЕС-GaAs кристаллы, то в 2016 году материал, полученный VGF-методом, составлял 62,93% в то время, как ЛЕС-материал составлял только 26,97%. В дальнейшем, по мнению аналитиков, эта тенденция будет продолжаться (рис. 3)

### ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ GaAs Светодиоды

Появление синих (в середине 1990-х годов) и белых СД (в начале 21 века) и постоянное снижение стоимости позволили расширить использование СД

The material obtained by the VDC method (Fig. 2b) has a lower dislocation density. The main quality requirements for doped semiconductor (SC) gallium arsenide as a substrate material are low resistivity. This is achieved by introducing an impurity of silicon (n-type) or zinc (p-type) in the required concentration and high structural perfection. The latter quality is due to the fact that in the process of epitaxy, dislocations from the substrate are inherited into the epitaxial layer, which is an active element of the future light-emitting device. Unlike microwave devices, in devices that generate radiation, the presence of dislocations in the active regions of light-emitting structures is undesirable, since it leads to rapid degradation of the characteristics of the device. Accordingly, the requirement of a low dislocation density ( $N_D$ ) is a basic requirement for a heavily doped material used as a substrate for light-emitting structures. In practice, the following gradation has developed: in the production of LEDs, crystals with a dislocation density  $N_D < 5 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-2}$  are used, and in the manufacture of lasers with  $N_D < 5 \cdot 10^2 \text{ cm}^{-2}$ .

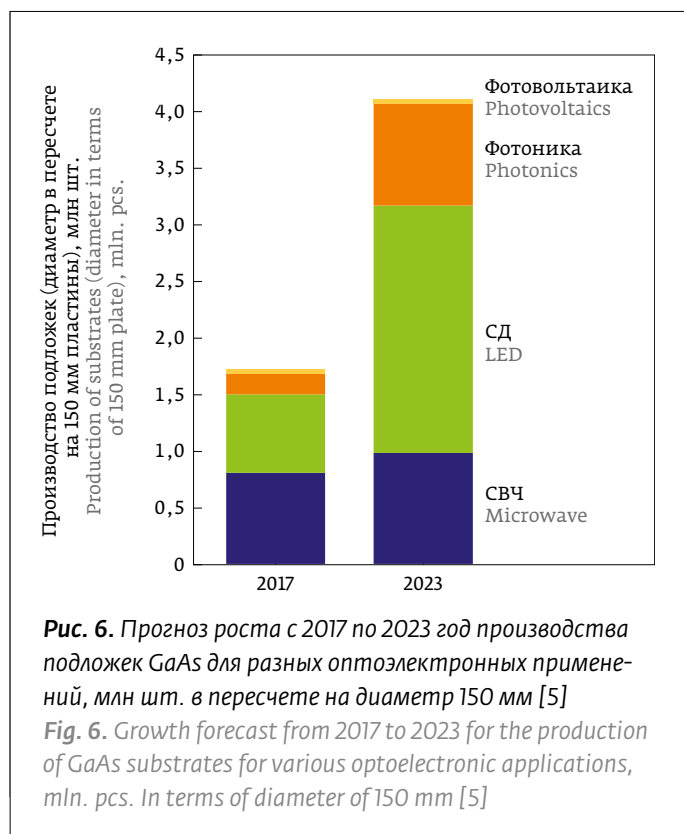
в качестве индикаторов режимов работы электронных устройств, для подсветки жидкокристаллических экранов различных приборов. Впоследствии применение СД основных цветов (красного, синего и зеленого) позволило конструировать из них дисплеи с выводом полноцветной графики и анимации. Срок службы СД, превышающий в 6–8 раз долговечность люминесцентных ламп, относительная простота в работе с ними на этапе сборки изделий, отсутствие необходимости в регулярном обслуживании сделали – все это превратило источники света в лидеров на этапе соревнования с более традиционными источниками: газоразрядными и люминесцентными лампами, а также лампами накаливания.

СД состоит из эпитаксиальных слоев GaAsP или InGaAsP, выращенных на GaAs-подложке. Диапазон их излучения простирается от бледно-зеленого до красного света. СД из AlGaAs на подложках GaAs излучают свет от красного до ИИК. В начале 2000-х годов СД-индустрия вступила в новый этап развития. Это было вызвано тем, что на яркие и сверхяркие СД пал выбор при использовании их в качестве источников систем общего освещения нового поколения, где они заменяют традиционные лампы накаливания и люминесцентные лампы. Недавно появились новые приборы – микро-СД. Они соединяют в себе преимущества высокой эффективности, яркости и надежности с более коротким временем отклика, что позволяет создавать более легкие, тонкие и гибкие дисплеи с преимуществами энергосбережения. Такие устройства пользуются популярностью в таких приложениях, как носимые устройства, автомобили, большие телевизоры, дополненная реальность (AR) и многое другое.

Приборы на базе GaAs получают методом эпитаксии металлоорганических соединений из газовой фазы (MOCVD), высокотемпературной газовой эпитаксии (HT CVD), либо методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложку GaAs. Всего в мире сегодня работают эпитаксиальные реактора общей стоимостью более 1 миллиард долларов США. Для обеспечения их работы используется свыше 100 т галлия и мышьяка в год в виде соединений высокой чистоты. К 2025 году, как ожидается, количество реакторов вырастет более чем в 6 раз (рис. 4), преимущественно под влиянием роста лазерных СД и микро-СД применений [5, 6].

### Лазерные диоды (VCSEL, EEL и другие)

Смартфон iPhone X корпорации Apple стал первым потребительским прибором, в котором стала применяться технология распознавания лиц – ИК-СД

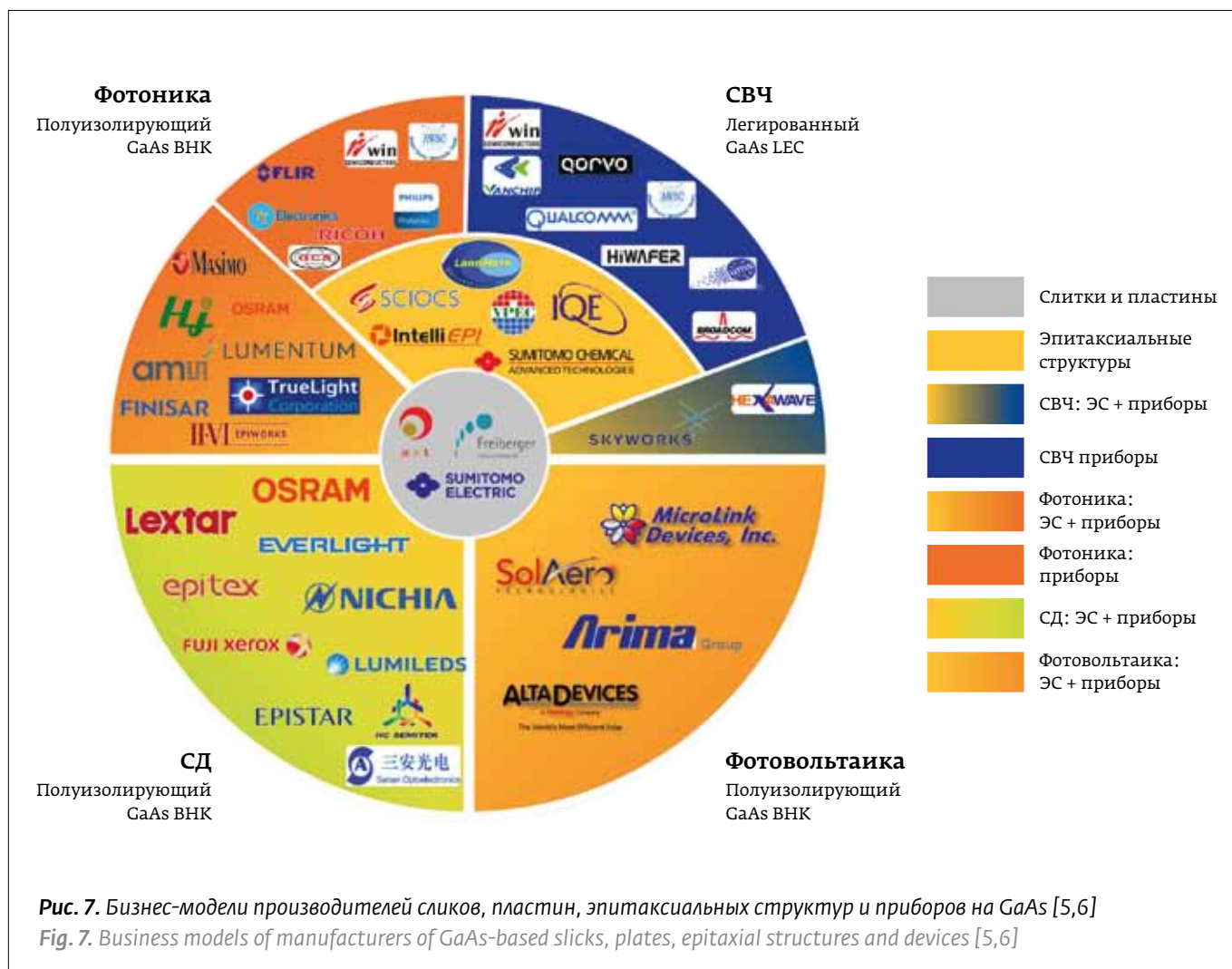


**Рис. 6.** Прогноз роста с 2017 по 2023 год производства подложек GaAs для разных оптоэлектронных применений, млн шт. в пересчете на диаметр 150 мм [5]

**Fig. 6.** Growth forecast from 2017 to 2023 for the production of GaAs substrates for various optoelectronic applications, mln. pcs. In terms of diameter of 150 mm [5]

A cost feature of the production of optoelectronic devices in comparison with the production of microwave ICs is the difference in the contribution of manufacturing operations to the cost of products, that the predominant part of the cost of the device is accounted for by operations performed after the structure is divided into separate chips. Accordingly, in the production of optoelectronic devices, increasing the area of plates is not so relevant. Therefore, in the global production of LEDs and lasers, plates with a diameter of up to 100 mm are still used in large volumes. And this is happening everywhere, despite the fact that industry has mastered the production of single crystals with a low dislocation density of a larger diameter of 200 mm.

Using two methods, the LEC method and the VDC method, both SC GaAs and SI GaAs crystals can be grown. It is important to emphasize that single crystals grown by the WNC method have a higher prime cost than those grown by the LEC method. This is due to a lower crystallization rate (4–5 times) and the exclusion of re-seeding operations from the technological cycle. Comparing the set of characteristics inherent in the devices obtained by different methods of cultivation, you can see the difference. For most microwave applications, it is preferable (at least economically) to use LEC-GaAs, while for the manufacture of LEDs, as well as for all optoelectronic applications, it is preferable to



сканирует лицо пользователя и строит 3D-модель. В iPhone X 150-мм GaAs-подложки используются для изготовления VCSEL и фотодетекторов, применяемых при распознавании лиц. Учитывая потенциальное внедрение этой технологии всеми платформами Android, аналитики ожидают, что этот сегмент рынка пластин GaAs для VCSEL будет расти на 58% ежегодно в период до 2023 года, а сам рынок VCSEL вырастет до 3775 миллионов долларов США в 2024 году. Следует вспомнить, что всего два года тому назад, в 2018 году, он составлял 783 миллиона долларов США.

Технология получения и обработки информации об удаленных объектах с помощью лидаров (активных оптических систем, LiDAR – Light Identification Detection and Ranging – обнаружение, идентификация и определение дальности с помощью света») – ключевая технология. Она позволяет создавать 3D-карту окрестностей для автономных транспортных средств и широких областей приме-

use GaAs obtained by the VDC method. These technical solutions, obtained thanks to great practical experience, are uncontested (Table 1). Therefore, both methods are present on the market, but with a significant predominance of VDC. If in 2011, LEC-GaAs crystals dominated the market, in 2016 the material obtained by the VGF method was 62.93%, while the LEC material was only 26.97%. Later, according to analysts, this trend will continue (Fig. 3)

### GaAs OPTOELECTRONIC APPLICATIONS LEDs

The appearance of blue (in the mid-1990s) and white LEDs (at the beginning of the 21st century) and a constant decrease in cost made it possible to expand the use of LEDs as indicators of the operation modes of electronic devices to illuminate liquid crystal screens of various devices. Subsequently, the use of LED primary colors (red, blue and green) made it possible to design displays from them with the output of full-color graph-





нения робототехники. В этом новом применении используются высокоомощные и крупногабаритные лазерные устройства на основе GaAs с «краевым излучением» (EEL), которые, как ожидается, также дадут большой импульс роста для рынка «фотонных» пластин GaAs. В 2024 году рынок EEL, как ожидается, вырастет до 5100 миллионов долларов США, при том что в 2018 году он составлял 2500 млн долл. США.

Ожидается, что сектор ИК-светодиодов на подложках GaAs будет демонстрировать сильный рост. Инфракрасные светодиоды на основе GaAs, используемые в медицинских датчиках артериального давления и уровня сахара в крови, а также датчики для распознавания жестов в смартфонах и автомобилях, также составляют заметный сегмент растущего рынка.

В дальнейшем, при анализе сфер применения GaAs, для определенности, будем выделять традиционные СД видимого диапазона в отдельную категорию, а VCSEL-, EEL-, ИК- и другие излучатели мы будем относить к категории «оптоэлектроника».

### Тепловизионные приборы с фотоприемными устройствами на квантовых ямах

Растущий спрос на ИК-системы, вызванный как военными, так и гражданскими применениями, вызовет рост мирового рынка тепловых камер в ближайшие годы. Рынок тепловых камер для военных и охранных применений, как предсказывают аналитики, превысит 2,4 млрд долл. США к 2023 году, вследствие возрастающих проблем безопасности. Использование ИК-систем коротковолнового ИК-диапазона спектра (0,9–1,7 мкм) потребовало охлаждения приборов при их эксплуатации. Это привело к значительному расширению областей их применения, что привело к появлению охлаждаемых матричных фотоприемных устройств (МФПУ) на основе квантовых ям (QWIP) (рис. 5). В табл. 2 дан краткий обзор ИК-модулей некоторых зарубежных и отечественных производителей с охлаждаемыми МФПУ на квантовых ямах на базе GaAs.

### РАЗВИТИЕ РЫНКА GaAs ПОСЛЕ 2017 ГОДА

Для рынка СД на GaAs аналитики прогнозируют 21% ежегодного прироста, что даст более половины объема пластин GaAs к 2023 году. Если говорить в финансовых терминах о общем рынке пластин GaAs, то ожидается, что рынок, составляющий в 2019 году 260 миллионов долларов США, продемонстрирует ежегодный темп роста в ближайшие 5 лет 4,5%, и достигнет 330 миллионов дол-

ларов и анимации. Срок службы светодиодов, который в 6–8 раз превышает срок службы люминесцентных ламп, относительная простота работы с ними на этапе сборки изделий, и отсутствие необходимости регулярного обслуживания, все это сделало светодиодные источники света лидерами на этапе конкуренции с более традиционными источниками: газоразрядными и люминесцентными лампами, а также лампами накаливания.

LED состоит из эпитаксиальных слоев GaAsP или InGaAsP, выращенных на GaAs подложке. Диапазон их излучения extends from pale green to red light. AlGaAs LED на GaAs подложке излучают свет от красного до инфракрасного. В начале 2000-х годов SD индустрия вошла в новую стадию развития. Это было связано с тем, что яркие и супер-яркие светодиоды были выбраны в качестве источников нового поколения общего освещения, где они заменяют традиционные лампы накаливания и люминесцентные лампы. Недавно появились новые устройства – микро-LED. Они сочетают преимущества высокой эффективности, яркости и надежности с более коротким временем отклика, что позволяет создавать более легкие, тонкие и более гибкие дисплеи с преимуществами экономии энергии. Такие устройства популярны в приложениях, таких как носимые устройства, автомобили, большие телевизоры, дополненная реальность (AR), и многое другое.

GaAs-устройства производятся методом газовой фазы эпитаксии органических соединений (MOCVD), высокой температуры газовой эпитаксии (HT CVD), или молекулярной пучковой эпитаксии (MBE) на GaAs подложке. В целом, эпитаксиальные реакторы с общей стоимостью более 1 миллиарда долларов работают в мире сегодня. Чтобы обеспечить их работу, более 100 тонн галлия и арсеника в год используются в форме высокоочищенных соединений. К 2025 году ожидается, что количество реакторов увеличится более чем в 6 раз (рис. 4), в основном под влиянием роста производства лазерных светодиодов и микро-LED приложений [5, 6].

### Лазерные диоды (VCSEL, EEL, и др.)

Apple's iPhone X смартфон был первым потребительским устройством, использующим технологию распознавания лица – IR-SD сканы лица пользователя и строит 3D модель. В iPhone X, 150 мм GaAs подложки используются для изготовления VCSEL и фотодетекторов, используемых в распознавании лица. Учитывая потенциальное принятие этой технологии всеми Android платформами, аналитики ожидают, что этот сегмент рынка GaAs для VCSEL вырастет на 58% ежегодно до 2023 года, а рынок VCSEL достигнет 3,775 миллиарда долларов США в 2024 году. Следует помнить, что всего два года назад, в 2018 году, он составил 783 миллиона долларов США.

Технология получения и обработки информации об удаленных объектах с помощью лидаров (активные



**Fig. 8.** Epi-ready GaAs plates  
**Рис. 8.** Epi-ready пластины GaAs

ларов США в 2024 году. Динамика роста рынка в натуральных единицах (млн шт.) приведена на рис. 6.

### Производители GaAs в мире и в России и существующие бизнес-модели

Основными производителями изделий (слитков, пластин и эпитаксиальных слоев) GaAs являются компании: Freiburger Compound Materials, AXT, Sumitomo Electric, China Crystal Technologies, Shenzhou Crystal Technology, Tianjin Jingming Electronic Materials, DOWA Electronics Materials, II-VI Incorporated, IQE Corporation и Wafer Technology. В области поставок объемных кристаллов GaAs, Sumitomo Electric, Freiburger Composite Materials и AXT лидируют на рынке с общей долей рынка около 95%.

До недавнего времени в России сохранялось несколько небольших производителей монокристаллов арсенида галлия различной формы собственности, которые в совокупности могли удовлетворять большую часть отечественных потребностей в этом материале. Однако в 2007 году было ликвидировано производство монокристаллов в ЗАО «Элма-Малахит» (г. Зеленоград), производившем по технологии ЛЕС монокристаллы нелегированного полуизолирующего и легированного GaAs. В 2008 году аналогично завершилась история существования двух других компаний, растивших GaAs-кристаллы, – ОАО «НИИ материалов электронной техники» (г. Калуга), выпускавшего по технологии ЛЕС монокристаллы легированного GaAs, и ООО «Гирмет» (г. Москва), производившем монокристаллы по технологии ВНК. В настоящее время монокристаллы арсенида галлия в России

optical systems, LiDAR – Light Identification Detection and Ranging – detection, identification and range determination using light) is a key technology. It allows you to create a 3D-map of the surroundings for autonomous vehicles and wide areas of application of robotics. This new application uses high-power and large-sized GaAs laser devices with “edge emission” (EEL), which are also expected to give a large growth impulse for the market for photon GaAs wafers. In 2024, the EEL market is expected to grow to 5,100 million USD, while in 2018 it was 2,500 million USD.

The IR LED sector on GaAs substrates is expected to show strong growth. GaAs-based infrared LEDs used in medical sensors for blood pressure and blood sugar, as well as sensors for recognizing gestures in smartphones and cars, also make up a prominent segment of the growing market.

In the future, in analyzing the applications of GaAs, for definiteness, we will single out the traditional visible-band LEDs into a separate category, and we will classify VCSEL-, EEL-, IR- and other emitters as “optoelectronics”.

### Thermal imaging devices with photodetectors in quantum wells

The growing demand for infrared systems, caused by both military and civilian applications, will cause the growth of the global market for thermal cameras in the coming years. The market for thermal chambers for military and security applications, analysts predict, will exceed 2.4 billion USD by 2023, due to increasing security concerns. The use of infrared systems of the short-wave infrared range of the spectrum (0.9–1.7  $\mu\text{m}$ ) required the cooling of devices during their operation. This led to a significant expansion of their areas of application led to the appearance of cooled matrix photodetector devices (MFPs) based on and quantum wells (QWIP) (Fig. 5). Table 2 gives a brief overview of the IR modules of some foreign and domestic manufacturers with cooled MFPs on GaAs-based quantum wells.

### GaAs MARKET DEVELOPMENT AFTER 2017

For the GaAs DM market, analysts forecast 21% annual growth, which will yield more than half the volume of GaAs wafers by 2023. Speaking in financial terms about the general market for GaAs wafers, it is expected that the market, amounting to 260 million USD in 2019, will demonstrate an annual growth rate of 4.5% in the next 5 years, and will reach 330 million USD in 2024. The market growth dynamics in physical units (million units) is shown in Fig. 6.



изготавливаются в АО «Гиредмет» (Москва, предприятие Росатома) методом ЛЕС и в ООО «Лассард» (г. Обнинск) методом ВНК. В АО «Гиредмет» и в ООО «Лассард» сегодня осуществляются инвестиционные проекты, направленные на развитие технологии GaAs. Также в 2019 году запущено производство гетероструктур на основе арсенида галлия. АО «Экран-оптические системы», опираясь на разработки Института физики полупроводников им. А.В.Ржанова (ИФП) СО РАН, ввело в эксплуатацию установку молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [8].

Поскольку новые лазерные приложения диктуют очень высокие технические требования к пластинам GaAs, которые постоянно ужесточаются, аналитики полагают, что метод ВНК в этом секторе будет главенствующим, а упомянутые игроки сохраняют свое техническое преимущество, по крайней мере, в течение еще 3-5 лет. Ожидается, что китайские поставщики пластин GaAs, такие как Violent Materials, которые захватили часть рынка СД от ведущих поставщиков, увеличат свою долю.

Что касается производства эпитаксиальных структур GaAs и приборов на GaAs, то там существуют различные бизнес-модели (рис. 7). Рынок СД GaAs в основном вертикально интегрирован, с хорошо зарекомендовавшими себя интегрированными производителями устройств, такими как Osram, Sanan, Epistar и Changelight. За последние несколько лет сектор эпитаксиальных структур GaAs прошел через большую консолидацию, в результате чего осталось четыре основных игрока: IQE, VPEC, Sumitomo Chemicals (включая Sumitomo Chemical Advanced Technologies и SCOCs) и IntellipEPI.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным двигателем развития рынка GaAs становится фотоника. В средне- и долгосрочной перспективе мировые рынки пластин и эпитаксиальных структур GaAs будут расти. Рынок пластин GaAs, как ожидается, достигнет 1,3 миллиарда долларов США к 2023 году с ежегодным темпом роста 11,5%. На данный момент российский рынок полупроводниковых соединений для развития фотоники и электронно-компонентной базы (GaAs и др.) имеет незначительный объем. В то же время, существует понимание, что для создания современной электронной компонентной базы в России необходимо развивать производства исходных материалов [7]. Представляется также, что, если говорить о развитии GaAs в России, в первую очередь необ-

## GaAs manufacturers in the world and in Russia and existing business models

The main manufacturers of GaAs products (ingots, plates and epitaxial layers) are: Freiberger Compound Materials, AXT, Sumitomo Electric, China Crystal Technologies, Shenzhou Crystal Technology, Tianjin Jingming Electronic Materials, DOWA Electronics Materials, II-VI Incorporated, IQE Corporation and Wafer Technology. In the field of bulk crystal supply, GaAs, Sumitomo Electric, Freiberger Composite Materials and AXT are leading the market with a total market share of about 95%.

Until recently, several small manufacturers of gallium arsenide single crystals of various forms of ownership remained in Russia, which together could satisfy most of the domestic needs for this material. However, in 2007, the production of single crystals in CJSC “Elma-Malachit” (Zelenograd) was liquidated, which produced single crystals of undoped semi-insulating and doped GaAs using LEC technology. In 2008, the story of the existence of two other companies that grew GaAs crystals ended in the same way – OJSC “Research Institute of Materials of Electronic Technology” (Kaluga), which produced single crystals of doped GaAs using LEC technology, and LLC “Girmet” (Moscow), which produced single crystals according to VDC technology. Currently, gallium arsenide single crystals in Russia are manufactured by JSC “Giredmet: (Moscow, Rosatom Group enterprise) using the LEC method and by LLC “Lassard” (Obninsk) using the VDC method. Today JSC “Giredmet” and LLC “Lassard” are implementing investment projects aimed at developing GaAs technology. Also, in 2019, the production of heterostructures based on gallium arsenide was launched. JSC “Screen – Optical systems”, based on the development of the A. V. Rzhhanov Institute of Semiconductor Physics (ISCP) of the SB of RAS, commissioned a molecular beam epitaxy (MBE) unit [8].

Since new laser applications dictate very high technical requirements for GaAs wafers, which are constantly being tightened, analysts believe that the WNK method will be dominant in this sector, and the mentioned players will retain their technical advantage for at least another 3-5 years. Chinese GaAs plate suppliers such as Violent Materials, which have captured part of the DM market from leading suppliers, are expected to increase their share.

As for the production of GaAs epitaxial structures and devices based on GaAs, various business models exist there (Fig. 7). The GaAs LED market is mostly vertically integrated, with well-established integrated device manufacturers such as Osram, Sanan,



ходимо развивать технологии ВНК-производства монокристаллов и epi-ready пластин GaAs.

## REFERENCES

1. **Маянов Е., Гасанов А., Кныазев С., Наумов А.** GaAs. monocrystals' market trends (Mayanov E., Gasanov A., Knyazev S., Naumov A. Tendencii razvitiya rynka monokristallov GaAs. In Russ). *Electronics: Science, Technology, Business*. 2018; 2 (00173): 172–184. DOI: 10.22184/1992-4178.2018.173.2.172.184.
2. **Марков А. В.** Монокристаллы полупроводниковых соединений III–V: современное производство и перспективы его развития. *Известия ВУЗов. Физика*. 2003; 6: 5–11.  
Markov A. V. Monokristally poluprovodnikovykh soedinenij III–V: sovremennoe proizvodstvo i perspektivy ego razvitiya. *Izvestiya VUZov. Fizika*. 2003; 6: 5–11.
3. GaAs wafer market growing at 15% CAGR to 2023, driven by photonics applications growing at 37%. URL: [www.semiconductor-today.com/news\\_items/2018/jul/yole\\_240718.shtml](http://www.semiconductor-today.com/news_items/2018/jul/yole_240718.shtml).
4. GaAs Wafer & Epiwafer Market: RF, Photonics, LED and PV application. URL: <https://www.i-micronews.com/products/gaas-wafer-and-epiwafer-market-rf-photonics-led-and-pv-applications/?cn-reloaded=1>.
5. GaAs Market Overview. URL: <https://anysilicon.com/gaas-market-overview-apple-changing-future/>.
6. Apple Is Changing GaAs Future. URL: [https://compoundsemiconductor.net/article/104852/Apple\\_Is\\_Changing\\_GaAs\\_Future](https://compoundsemiconductor.net/article/104852/Apple_Is_Changing_GaAs_Future)
7. URL: [www.astrohn.com](http://www.astrohn.com).
8. Электронный ресурс: «Экран-оптические системы» запустил первое в России промпроизводство наногетероструктур на основе арсенида галлия // <http://www.sib-science.info/ru/institutes/v-novosibirske-zapuscheno-proizvodstvo-02102019>.

## ОБ АВТОРАХ

- Кульчицкий Николай Александрович, докт. техн. наук,  
e-mail: [n.kulchitsky@gmail.com](mailto:n.kulchitsky@gmail.com), главный специалист, ГНЦ РФ, АО «Научно-производственное объединение «Орион», Москва, Россия.  
ORCID: 0000-0003-4664-4891
- 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

Epistar and Changelight. Over the past few years, the GaAs epitaxial structure sector has gone through great consolidation, leaving four major players left: IQE, VPEC, Sumitomo Chemicals (including Sumitomo Chemical Advanced Technologies and SCOCs) and IntelliEPI.

## CONCLUSION

The main engine for the development of the GaAs market is photonics. In the medium and long term, global markets for GaAs wafers and epitaxial structures will grow. The GaAs wafer market is expected to reach 1.3 billion USD by 2023, with an annual growth rate of 11.5%. At the moment, the Russian market for semiconductor compounds for the development of photonics and the electron-component base (GaAs and others) has a small volume. At the same time, there is an understanding that in order to create a modern electronic component base in Russia, it is necessary to develop the production of raw materials [7]. It also seems that, if we talk about the development of GaAs in Russia, first of all, it is necessary to develop technologies for VDC production of single crystals and epi-ready GaAs wafers.

## ABOUT AUTHORS

- Kulchitsky Nikolai Alexandrovich, Doctor of Technical Sci.,  
e-mail: [n.kulchitsky@gmail.com](mailto:n.kulchitsky@gmail.com), Chief Specialist, SSC RF, JSC Orion Scientific-Production Association, Moscow, Russia.  
ORCID ID: 0000-0003-4664-4891
- 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



**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](mailto:info@astrohn.ru), [www.astrohn.ru](http://www.astrohn.ru)