

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. ПОЛУПРОВОДНИКИ

MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY. SEMICONDUCTORS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2020. Т. 23, № 3. С. 167—176.
DOI: 10.17073/1609-3577-2020-3-167-176

УДК 621.315.592

Фотонные и терагерцовые применения как следующий драйвер рынка арсенида галлия

© 2020 г. Н. А. Кульчицкий¹, А. В. Наумов^{2,§}, В. В. Старцев²

¹ Государственный научный центр РФ АО «Научно–производственное объединение «Орион»,
Косинская ул., д. 9, Москва, 111538, Россия

² АО «Опτικο–механическое конструкторское бюро Астрон»,
Парковая ул., д. 1, Лыткарино, Московская обл., 140080, Россия

Аннотация. Продолжен предпринятый ранее в ряде работ анализ современного состояния рынка GaAs и приборов на его основе. 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 на GaAs для мобильной телефонии. Однако, парадигма развития рынка GaAs меняется. Новым двигателем развития мирового рынка арсенида галлия становится фотоника и терагерцовая техника. Это означает, что в технологиях выращивания монокристаллов GaAs произойдет смена акцентов в сторону кристаллов «оптоэлектронного качества», получаемых методом вертикальной направленной кристаллизации. В средне– и долгосрочной перспективе мировые рынки пластин и эпитаксиальных структур GaAs будут расти. В ближайшей перспективе необходимо учитывать последствия пандемии COVID. Пока рынок GaAs тесно связано с разработками на рынке смартфонов. Очень вероятно, что после длительного периода роста рынок GaAs будет второй год подряд сокращаться — производство GaAs в 2020 году может снизиться на 11—12 %. Если предположить, что пандемия будет как–то взята под контроль в 2021 году, общее производство смартфонов вероятно, вырастет начиная с 2021 г. На данный момент российский рынок полупроводниковых соединений для развития фотоники и электронно–компонентной базы (GaAs и др.) имеет незначительный объем и в ближайшей перспективе не достигнет уровня, необходимого для появления конкурентоспособного отечественного производителя, даже при условии выполнения программ импортозамещения. В то же время, существует понимание, что для создания современной электронной компонентной базы в России необходимо развивать производства исходных материалов.

Ключевые слова: арсенид галлия, метод Чохральского, вертикальная направленная кристаллизация, эпитаксиальные пластины GaAs, рынок, цены, спрос, потребление

Введение

Настоящая работа является продолжением работы [1] по анализу тенденций развития рынка монокристаллического GaAs до 2025 г. Арсенид

Кульчицкий Николай Александрович¹ — доктор техн. наук, главный специалист, <https://orcid.org/0000-0003-4664-4891>, e-mail: n.kulchitsky@gmail.com; **Наумов Аркадий Валерьевич**^{2,§} — инженер–аналитик, <https://orcid.org/0000-0001-6081-8304>, e-mail: naumov_arkadii@mail.ru; **Старцев Вадим Валерьевич**² — главный конструктор, <https://orcid.org/0000-0002-2800-544X>

§ Автор для переписки

галлия был разработан как основной материал СВЧ–электроники, однако, в настоящее время направление развития рынка GaAs меняется. Развитие фотоники и терагерцовой (ТГц) техники достигло таких масштабов, что большая часть GaAs к 2025 г. будет производиться для этих отраслей. Из этого следует важный вывод. Требования к GaAs для СВЧ–электроники отличаются по ряду важных параметров от требований к GaAs для фотоники и ТГц–техники. Кроме того, различна также логика развития этих отраслей. Следовательно, неизбежны

изменения в соотношении долей различных технологий получения слитков и пластин GaAs, установившемся сегодня на рынке. Это, в свою очередь, означает, что технологии выращивания слитков GaAs «оптоэлектронного качества» методом вертикальной направленной кристаллизации с необходимыми параметрами, а также соответствующее оборудование будут развиваться в первую очередь.

Арсенид галлия — новые перспективы

В середине 60-х гг. XX века в США и СССР начались исследования свойств монокристаллов GaAs, которые завершились разработкой интегральных схем (ИС) высокого быстродействия, используемых в «интеллектуальных» системах управления огнем и в суперкомпьютерах. С промышленным освоением уже в 2010-х годах процессов обработки пластин GaAs диаметром 150 мм существенно снизилась стоимость СВЧ-транзисторов. Это обеспечило их широкое распространение во все сектора применения: от мобильных телефонов и базовых станций до радаров и систем связи мм-диапазона. В 2019 г. СВЧ-приложения составляли 33 % рынка по объему и 37 % рынка по стоимости. Так, GaAs широко используется в оптоэлектронике — на основе арсенида галлия изготавливаются светодиоды (СД). Однако, похоже, вектор развития GaAs меняется: от СВЧ-электроники к фотонике. Рубежом можно счи-

тать 2017 г., т. е. с момента появления в смартфонах iPhoneX функции 3D-сканирования с использованием лазерных диодов с вертикальным излучающим резонатором (VCSEL) на базе GaAs. Немаловажным фактором также является развитие рынка матричных фотоприемных устройств «смотрящего типа» на квантовых ямах на базе GaAs. Приборы, в том числе на базе GaAs, действующие в ТГц-диапазоне, приобретают все большее значение в разнообразных практических приложениях (например, в охранной деятельности и медицине для формирования изображений) [1—4]. Основные типы приборов на основе GaAs и соответствующие им технологии получения GaAs приведены в табл. 1.

Мировой рынок приборов на арсениде галлия, составляя в 2019 г. 10 млрд долл. США, по прогнозам в 2027 г. превысит 15 млрд долл. США (рис. 1) [3].

Особенности получения монокристаллов GaAs

Как отмечалось ранее в работах [1, 2], промышленные монокристаллы GaAs можно разделить на две большие группы.

I. Полуизолирующий (ПИ) GaAs с высоким удельным сопротивлением/собственной проводимостью (10^7 Ом·см), который используется при изготовлении высокочастотных ИС и дискретных микроэлектронных приборов.

Таблица 1

Основные типы приборов на основе GaAs и технологии получения GaAs-подложки
[Main types of devices based on GaAs and technology]

Приборы	Структура	Назначение	Тип технологии получения GaAs-подложки
СД видимого диапазона, в т. ч. микро-СД	Эпитаксиальные слои GaAlAs, GaAsP или InGaAsP на подложке GaAs	СД стандартной яркости — индикаторы, цифровые дисплеи и ИК-излучатели; СД повышенной яркости — подсветка, иллюминация, сигнальные устройства, указатели, автомобильные огни и пр.	ВНК
Лазерные диоды в т. ч. VCSEL, EEL, ИК, УФ и др.	Эпитаксиальные слои GaAlAs, GaAsP и др. на подложке GaAs	Устройства записи и считывания CD и DVD-дисков, в телекоммуникационных устройствах, ВОЛС, медицине, принтерах, для накачки твердотельных лазеров, оптическая локация LiDAR	ВНК
Солнечные батареи	Эпитаксиальные слои легированного GaInAs или AlGaInP на Ge	Бортовые источники питания космических аппаратов; растет рынок наземных батарей такого типа	ВНК, ЛЕС
Аналоговые и цифровые интегральные схемы	Эпитаксиальные слои GaInP, GaInAs, AlGaInP и др. на подложке GaAs	Высокоскоростные логические блоки, коммуникационные блоки для телекоммуникационных систем; усилители мощности для мобильных телефонов	ЛЕС
ИК-матричные фотоприемные устройства, ТГц генераторы и детекторы	Эпитаксиальные структуры, также структуры с «квантовыми ямами», GaInAs, и др. на подложке GaAs	Инфракрасные тепловизионные приборы ночного видения, а также генераторы и датчики ТГц-диапазона	ВНК

II. Легированный (ПП) GaAs n -типа проводимости с низкой плотностью дислокаций. Монокристаллы сильно легированного (10^{17} – 10^{18} см $^{-3}$) 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- и ТГц-колебаний.

По-прежнему, в промышленном производстве монокристаллов GaAs используются 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**);

- метод вертикальной направленной кристаллизации (**ВНК**) в тех же двух вариантах (*Vertical Bridgman* — **VB** и *Vertical Gradient Freeze* — **VGF**).

Важнейшей особенностью метода LEC 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 LEC является высокая плотность дислокаций N_D . Типичные значения N_D в нелегированных монокристаллах

составляют до $(1–2) \cdot 10^5$ см $^{-2}$ при диаметре слитков 100–200 мм. Материал LEC обладает более однородным распределением удельного сопротивления по площади пластины.

Материал, полученный методом ВНК, имеет более низкую плотность дислокаций. В отличие от СВЧ-приборов присутствие дислокаций в активных областях светоизлучающих структур нежелательно, поскольку приводит к быстрой деградации характеристик прибора. Следовательно, требование низкой плотности дислокаций является основным требованием к сильно легированному материалу, используемому в качестве подложки. На практике сложилась следующая градация: в производстве СД используются кристаллы с $N_D < 5 \cdot 10^3$ – $1 \cdot 10^4$ см $^{-2}$, а в производстве лазеров — с $N_D < 5 \cdot 10^2$ см $^{-2}$.

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. Таким образом, в производстве оптоэлектронных приборов не столь актуально наращивание площади пластин. Вследствие этого в мировом производстве СД 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 диаметром 200 мм.

И LEC- и ВНК-методом возможно выращивать как ПП, так и ПИ GaAs-кристаллы. Важно отметить, что монокристаллы, выращенные ме-

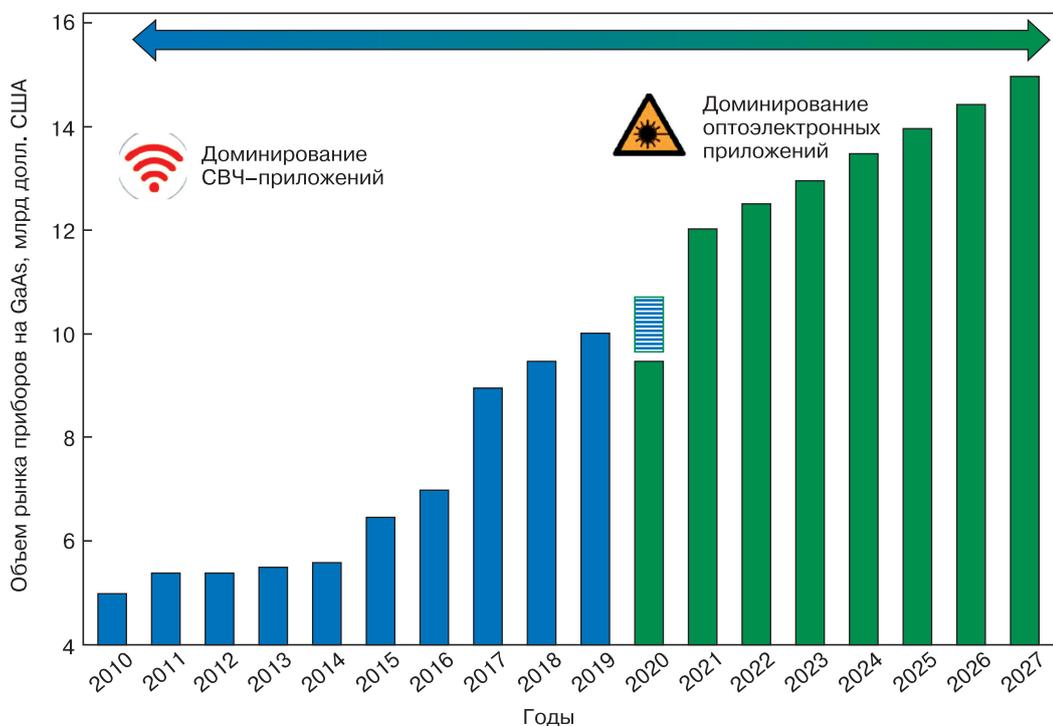


Рис. 1. Развитие и прогноз рынка приборов на GaAs, млрд долл. [3]

Fig. 1 World GaAs device market development and prediction, \$ bn [3]

Таблица 2

ИК-модули некоторых производителей с охлаждаемыми ФПУ на квантовых ямах на GaAs
 [IR modules of some manufacturers with cooled GaAs quantum well photodetectors]

Характеристики	Марка ФПУ			
				
	IRnova320ER-LW IDCA	Irnova640 integral cooler DDCA	Irnova640-ER split cooler DDCA	АСТРОН-640КЯ20А89
Формат матрицы фоточувствительного элемента	320 × 256	640 × 480	640 × 512	640 × 512
Шаг матрицы, мкм	30	25	25	20
Спектральный диапазон, мкм	7,5—9,0	7,5—9,0	7,5—9,0	8,3—8,7
Максимум спектральной чувствительности, мкм	8,6	8,6	8,6	8,7
Временная NETD, мК	25	35	30	30
Кадровая частота, Гц	60	30	107	50
Система охлаждения	Интегральный Стирлинг	Интегральный Стирлинг	Сплит-Стирлинг	Интегральный Стирлинг АСТРОН-МКС500.

тодом 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 предпочи-

тельно (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 (табл. 2). Поэтому оба метода присутствуют на рынке, но с существенным преобладанием ВНК. Если в 2011 г. на рынке преобладал ЛЕС-GaAs,

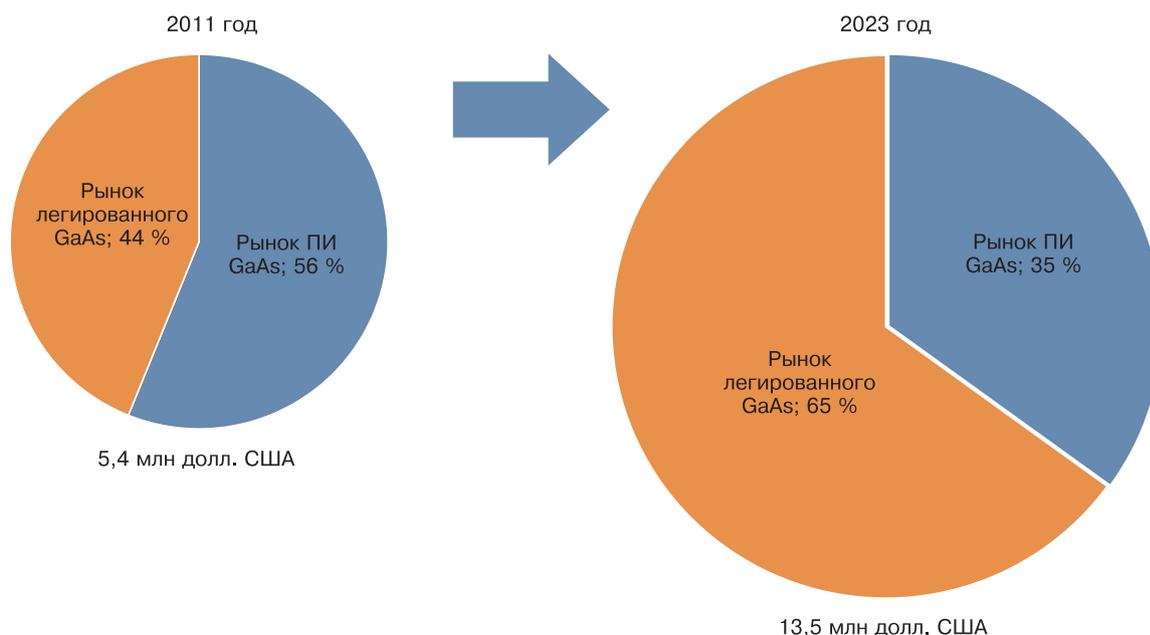


Рис. 2. Динамика развития PI- и ПП-секторов рынка GaAs [3]
 Fig. 2. SI and SC GaAs market segment dynamics [3]

то в 2023 г. материал, полученный VGF-методом, как ожидается, составит 65 % (рис. 2).

Эпитаксия арсенида галлия

Приборы на основе GaAs получают методом эпитаксии металлоорганических соединений из газовой фазы (MOCVD-эпитаксии) или методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложку GaAs (рис. 3) [5, 6]. Всего в мире сегодня работают более 2500 реакторов для производства светодиодных структур общей стоимостью более 1 млрд дол. США. Для обеспечения их работы используется свыше 100 т галлия и мышьяка в год в

виде соединений высокой чистоты. Ожидается, что к 2025 г. количество реакторов вырастет более чем в 6 раз, что преимущественно обусловлено ростом лазерных СД и микро-СД. Оба метода обеспечивают получение структур с заданными профилями легирования в широком диапазоне концентрации легирующих примесей (10^{15} — $5 \cdot 10^{18}$ см⁻³ для структур *n*-типа проводимости и 10^{16} — 10^{20} см⁻³ для структур *p*-типа проводимости). Кроме того, они также позволяют получать трех- и четырехкомпонентные твердые растворы соединений $A^{III}B^V$ с точностью контроля состава на уровне 1 %. Однако резкость профилей изменения состава и легирования для структур, выращенных методом МЛЭ, несколько лучше, чем для структур, выращенных методом MOCVD, и при оптимальных условиях составляет величину в 1—2 периода кристаллической решетки. В то же время технология MOCVD обеспечивает более высокие скорости роста слоев (до 5—10 мкм/ч) по сравнению с технологией МЛЭ (типичные скорости ~1 мкм/ч), а также свободна от проблемы постепенного опустошения источников металлов, характерной для технологии МЛЭ. Промышленный синтез лазерных гетероструктур методами МЛЭ и MOCVD в условиях промышленного производства осуществляется на многоподложечных установках, обеспечивающих высокую однородность параметров по площади структуры (не хуже 1—2 % на 6 пластинах диаметром 76,2 мм), высокую воспроизводимость параметров структуры от процесса к процессу, низкую плотность дефектов. Последние достижения в развитии эпитаксиальных технологий позволяют создавать как резкие, так и плавные гетеропереходы с высокой воспроизводимостью параметров [3, 5].

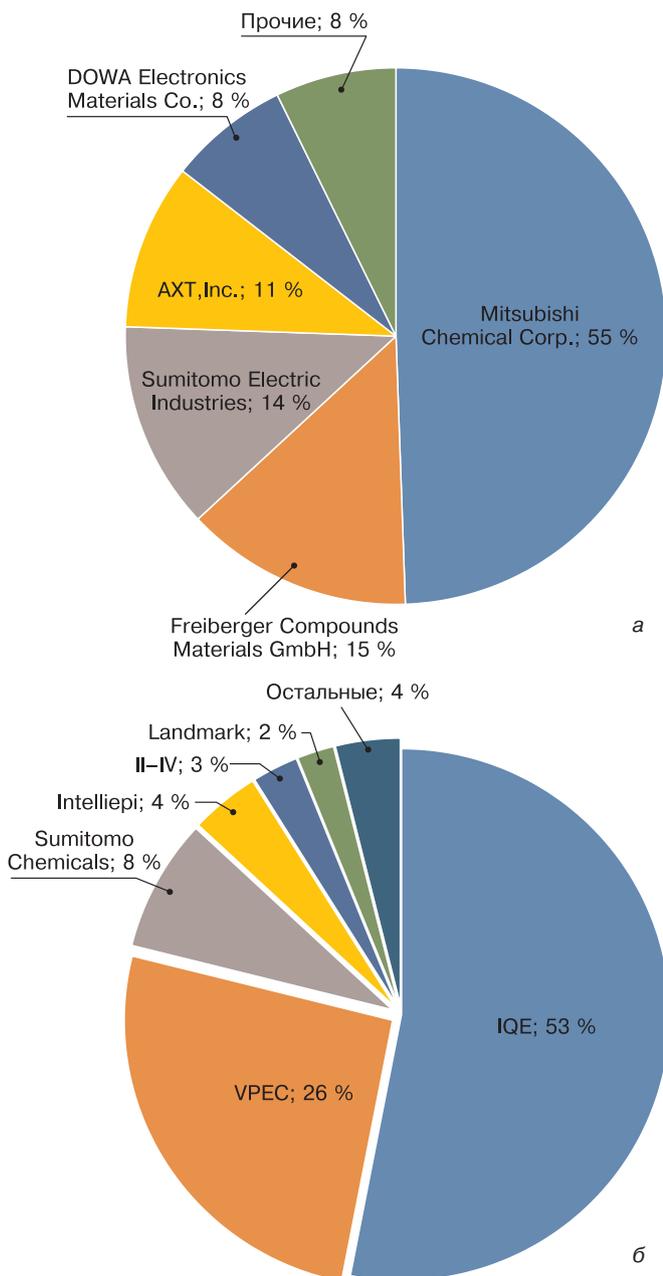


Рис. 3. Основные производители (а) слитков и пластин GaAs [5], (б) эпитаксиальных структур GaAs [6]

Fig. 3. Major manufacturers of (a) GaAs ingots and wafers [5] and (b) epitaxial GaAs structures [6]

Новые оптоэлектронные применения GaAs

Лазерные диоды (VCSEL и др.). Смартфон iPhoneX корпорации Apple — первый массовый потребительский прибор, в котором стала применяться технология распознавания лиц — ИК-СД сканирует лицо пользователя и строит 3D-модель. В iPhoneX 150-мм GaAs-подложки используются для изготовления VCSEL- и фотодетекторов, применяемых при распознавании лиц, и этот рынок будет расти (рис. 4, а).

Технология получения и обработки информации об удаленных объектах с помощью активных оптических систем (LiDAR — *Light Identification Detection and Ranging* — обнаружение, идентификация и определение дальности с помощью света) — ключевая технология, позволяющая создать 3D карту окрестностей для автономных транспортных средств и широких областей применения робототехники. В этом новом приложении используются высокоомощные и крупногабаритные лазерные устройства на основе GaAs с «краевым излучени-

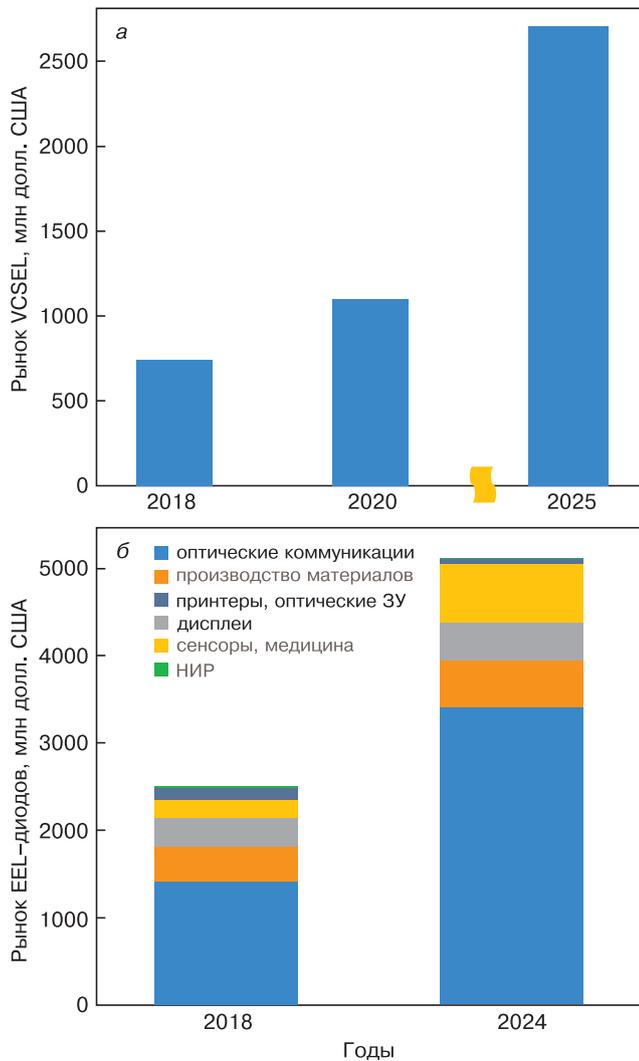


Рис. 4. Динамика и прогноз роста рынка (а) VCSEL-светодиодов [6] и (б) EEL-светодиодов [7]
 Fig. 4. Market dynamics and growth prediction for (a) VCSEL LEDs [6] and (б) EEL LEDs [7]

ем» (**EEL**), которые, как предполагают, дадут большой импульс роста для рынка «фотонных» пластин GaAs (рис. 4, б).

Ожидается, что сектор ИК-СД на подложках GaAs также будет демонстрировать сильный рост, вплоть до 2025 г. ИК-СД на основе GaAs, используемые в медицинских датчиках артериального давления и сахара в крови, а также в датчиках для распознавания жестов в смартфонах и автомобилях являются заметными сегментами растущего рынка [6—10].

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

Тепловизионные приборы с фотоприемными устройствами на квантовых ямах. Растущий спрос на ИК-системы, как военного, так и гражданского применения, определит 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 г, вследствие возрастающих проблем безопасности. Значительное расширение областей применения ИК-систем коротковолнового ИК-диапазона спектра (0,9—1,7 мкм) привело к появлению охлаждаемых матричных фотоприемных устройств и на основе квантовых ям (**QWIP**) (рис. 5) [11, 14, 16].

В табл. 2 представлены ИК-модули некоторых зарубежных и отечественных производителей с охлаждаемыми фотоприемными устройствами (**ФПУ**) на квантовых ямах на GaAs.

Терагерцовая оптоэлектроника. ТГц-излучение — это электромагнитного излучения, спектр частот

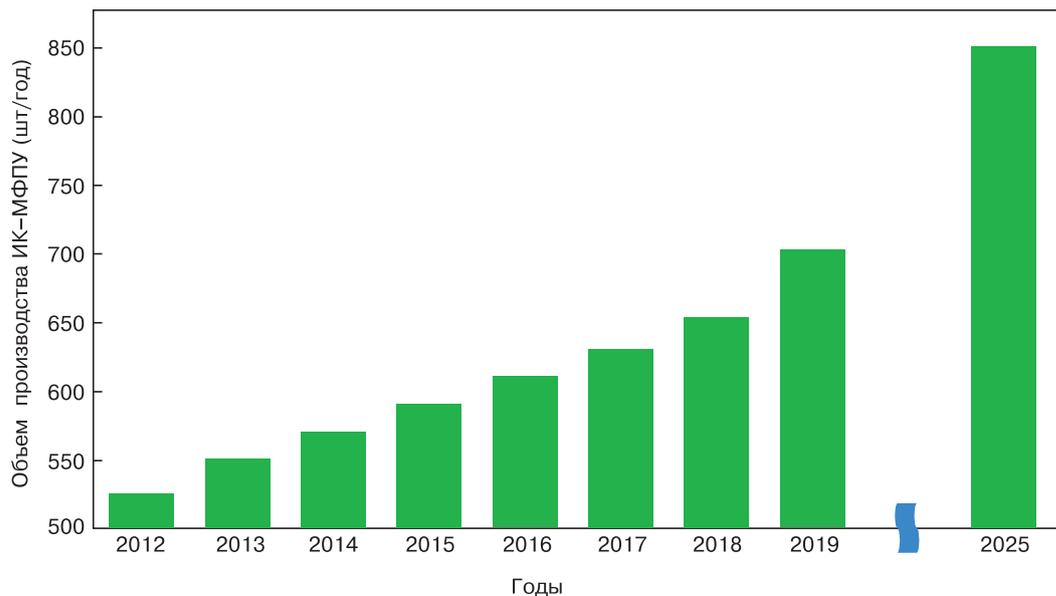


Рис. 5. Развитие рынка ИК МФПУ на квантовых ямах в структурах GaAs и прогноз, (шт/г) [3]
 Fig. 5. GaAs IR photodetector market development and prediction (pcs/g) [3]

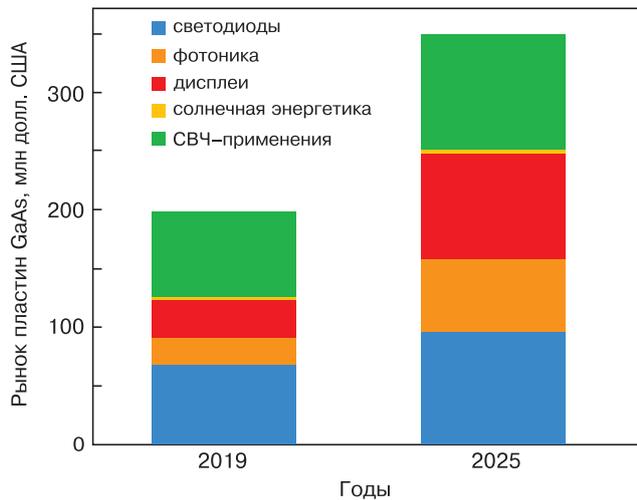


Рис. 6. Прогноз роста рынка подложек GaAs, 2019—2025 гг., млн долл. США [6]

Fig. 6. GaAs wafer market growth prediction for 2019—2025, \$ mln [6]

которого расположен между ИК- и миллиметровым диапазонами. Границы между этими видами излучения в разных источниках определяются по-разному. Для определенности примем, что ТГц-диапазон находится в пределах 0,1—10 ТГц (30—3000 мкм), частично перекрываясь со средним ИК (2,5—50 мкм) и миллиметровым (30—300 ГГц, 1—10 мм) диапазонами, а также включает в себя более узкие субмиллиметровый и субтерагерцовый диапазоны. Приборы, действующие в ТГц-диапазоне, приобретают все большее значение в разнообразных приложениях (например, в охранных, медицинских, астрофизика и др.).

Несмотря на то, что область ТГц-технологий в последние годы переживает бурное развитие, создание компактных высокочувствительных детекторов и генераторов ТГц-излучения по-прежнему представляет собой сложную научную задачу.

Развитие ТГц-технологий затруднено, поскольку их рабочие частоты лежат в диапазоне между традиционными радиочастотной и оптической областями электромагнитного спектра. При детектировании ТГц-излучения перестают действовать некоторые принципы работы фотонных и электронных устройств. Это излучение характеризуется малой энергией фотона (4 мэВ для излучения частотой 1 ТГц), и поэтому фотонные ТГц-устройства с квантовыми переходами могут работать только при пониженных температурах. Предельная частота работы электронных устройств определяется временем пролета электрона в активной области прибора, которая, в свою очередь, зависит от скорости носителей. Для гетероструктур на основе GaAs максимальная скорость пролета электронов активной области составляет порядка нескольких единиц 10^7 см/с, в то время как скорость плазменных волн в подзатворном канале транзистора на два порядка

выше, что позволило разработать детекторы ТГц-излучения на основе GaAs.

ТГц-детекторы на барьерах Шотки GaAs.

Структуры, основанные на барьерах Шотки, являются одними из основных элементов ТГц-технологий. В отличие от обычных диодов на основе *pn*-перехода, диоды Шотки обладают существенно большим быстродействием, благодаря чему возможно их использование при частотах до нескольких терагерц. Диоды Шотки обладают этим свойством вследствие того, что транспорт заряда в них обусловлен главным образом термоэмиссией электронов через энергетический барьер, возникающий в контакте металл—полупроводник. Как правило, такие приемники конструируются на основе диодов Шотки с балочными выводами, встроенными в антенны. Эпитаксиальный GaAs является наиболее часто используемым материалом для изготовления смесителей на основе планарных диодов Шотки [14].

ТГц-детекторы на основе полевых транзисторов GaAs.

Еще одним широко используемым классом детекторов ТГц-излучения являются детекторы на основе полевых транзисторов (*FET* — *Field Effect Transistor*) на основе GaAs с высокой подвижностью электронов. Исток и сток такого транзистора связывает плоский канал, заполненный двумерным электронным газом, в котором могут распространяться плазменные волны ТГц-частоты. Нелинейные свойства плазменных возбуждений (волн электронной плотности) в наноразмерных полевых транзисторах делают возможным их отклик при частотах, значительно более высоких, чем граничная частота прибора, что обусловлено баллистическим транспортом электронов.

Эти приемники могут действовать в широком диапазоне температур, вплоть до комнатной температуры [15].

ТГц-детекторы на основе квантовых ям.

Возможность детектирования ТГц-излучения приемниками на основе квантовых ям на структурах GaAs основана на использовании межподзонных переходов в периодических структурах GaAs на квантовых ямах — сверхрешетках. Эти структуры могут быть использованы как широкополосные ТГц-детекторы.

Сегодня рынок ТГц-техники находится в начальной стадии развития, поэтому невозможно точно сказать, какая доля произведенного GaAs будет приходиться на ТГц-применения. Однако, несомненно, что в среднесрочной перспективе она будет достаточно высока.

Развитие рынка GaAs до 2025 года

Для всего рынка пластин GaAs аналитики прогнозируют 10 % ежегодного прироста до 2025 г. Если говорить в финансовых терминах о рынке пластин

GaAs, то ожидается, что рынок, составляющий в 2019 г. 200 млн долл. США, достигнет к 2025 г. 348 млн долл. США [12, 13]. Динамика роста рынка в USD 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 следующие 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 ~95 %.

В настоящее время монокристаллы арсенида галлия в России изготавливаются в АО «Гиредмет» (г. Москва, предприятие Росатома) методом ЛЕС и в ООО «Лассард» (г. Обнинск) методом ВНК. В настоящее время в АО «Гиредмет» и в ООО «Лассард» осуществляются инвестиционные проекты, направленные на развитие технологии GaAs. Также в 2019 г. 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 [17]. В 2020 г. исследователи ИФП СО РАН подготовили к контрольно-доводочным испытаниям

опытный образец комплекса научной аппаратуры для синтеза полупроводниковых структур на Международной космической станции. Для создания полупроводникового производства на орбите Земли реализуется проект «Экран», участники которого — ИФП СО РАН, ПАО «РКК «Энергия», ООО НПФ «Электрон» (г. Красноярск). Установка спроектирована так, чтобы синтез полупроводникового материала происходил автоматически. Установку для выращивания полупроводников планируется разместить на Международной космической станции за специальным экраном. Его можно представить, как диск из нержавеющей стали,двигающийся вместе со станцией с первой космической скоростью. В кильватере диска образуется сверхвысокий вакуум с характеристиками, недостижимыми в земных условиях. Поэтому предполагается, что «космические» полупроводниковые материалы во время синтеза будут защищены от попадания чужеродных атомов и, как следствие, практически бездефектны. Эти материалы могут использоваться, в частности, для производства солнечных батарей, которые востребованы, в том числе, на международной космической станции. Ученые предполагают, что КПД таких устройств будет выше, чем у аналогичных панелей полностью земного происхождения благодаря высокому качеству материала [18].

Поскольку новые приложения (лазерные и терагерцовые) диктуют очень высокие постоянно ужесточающиеся технические требования к пластинам GaAs, аналитики полагают, что метод ВНК в этом секторе будет главенствующим, а упомянутые игроки сохраняют свое техническое преимущество, по

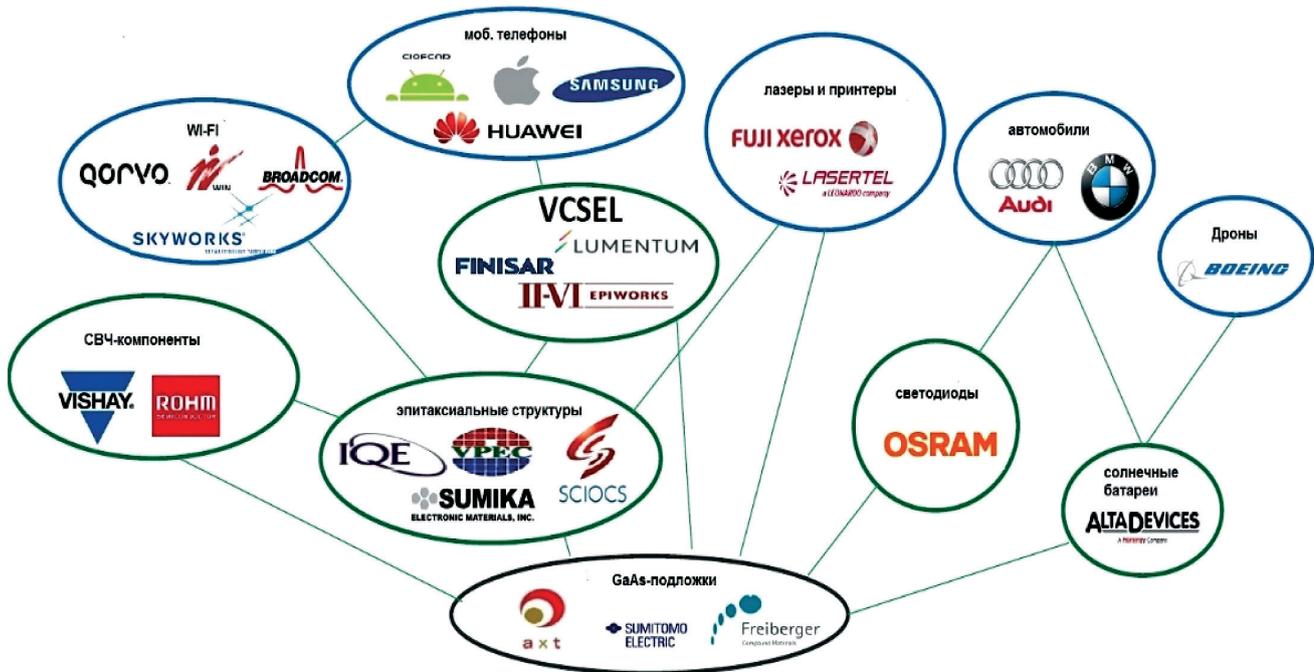


Рис. 7. Бизнес-карта производителей слитков, пластин, эпитаксиальных структур и приборов на GaAs [3]
 Fig. 7. GaAs ingot, wafer, epitaxial structure and device business card [3]

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 [3, 17].

Что касается производства эпитаксиальных структур GaAs и приборов на основе 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 IntelliEPI.

Заключение

Основным двигателем развития рынка арсенида галлия становится фотоника. В средне- и долгосрочной перспективе мировые рынки пластин и эпитаксиальных структур GaAs будут расти.

В ближайшей перспективе необходимо учитывать последствия пандемии COVID. Это важно для оценки объемов производства GaAs, поскольку пока рынок тесно связан с разработками на рынке смартфонов. В работе [7] прогнозируется производство смартфонов 1,24 млрд штук на 2020 г. (снижение на 11,3 % в годовом исчислении). Однако, если предположить, что пандемия может быть как-то взята под контроль в 2021 г., общее производство смартфонов, вероятно, вырастет в следующем году.

Пока же очень вероятно, что после длительного периода роста рынок GaAs будет испытывать второй год подряд сокращение — GaAs в 2020 г. может снизиться на 11—12 % [19].

На данный момент российский рынок полупроводниковых соединений для развития фотоники и электронно-компонентной базы (GaAs и др.) имеет незначительный объем и в ближайшей перспективе не достигнет уровня, необходимого для появления конкурентоспособного отечественного производителя, даже при условии выполнения программ импортозамещения. В то же время существует понимание, что для создания современной электронной компонентной базы в России необходимо развивать производство исходных материалов.

Если говорить о направлениях развития производства GaAs в России, куда должны быть приложены основные усилия, то в первую очередь необходимо развивать технологии ВНК-производства низкодислокационных монокристаллов и пластин GaAs для эпитаксии.

Библиографический список

1. Маянов Е. П., Князев С.Н., Наумов А. В. Рынок монокристаллов GaAs и тенденции развития // Известия вузов. Материалы электронной техники. 2016. Т. 19, № 3. С. 156—162. DOI: 10.17073/1609-3577-2016-3-156-162
2. Марков А. В. Монокристаллы полупроводниковых соединений III-V: современное производство и перспективы его развития // Известия вузов. Физика. 2003. № 6. С. 5—11.
3. Кульчицкий Н. А., Наумов А. В., Старцев В. В. Новые тенденции развития рынка приборов на арсениде галлия // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8, № 2. С. 136—147.
4. Хлудков С. С., Толбанов О. П., Вилисова М. Д., Прудаев И. А. Полупроводниковые приборы на основе арсенида галлия с глубокими примесными центрами / Под ред. О. П. Толбанова. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2016. 145 с.
5. Кишинский А. В. Широкополосные транзисторные усилители СВЧ-диапазона: смена поколений // Электроника: наука, технология, бизнес. 2010. № 2. С. 5—10.
6. 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 (дата обращения: 23.10.2020).
7. GaAs Wafer & Epiwafer Market: RF, Photonics, LED и PV приложения. URL: <https://www.i-micronews.com/products/gaas-wafer-and-epiwafer-market-rf-photonics-led-and-pv-applications/?cn-reloaded=1> (дата обращения: 23.10.2020).
8. Dietrich C. P., Fiore A., Thompson M. G., Kamp M., Hofling S. GaAs integrated quantum photonics: Towards compact and multi-functional quantum photonic integrated circuits // Laser Photonics Rev. 2016. V. 10, Iss. 6. P. 1—25. DOI: 10.1002/lpor.201500321
9. GaAs Market Overview. URL: <https://anysilicon.com/gaas-market-overview-apple-changing-future/> (дата обращения: 23.10.2020).
10. Apple Is Changing GaAs Future. URL: https://compound-semiconductor.net/article/104852/Apple_Is_Changing_GaAs_Future (дата обращения: 23.10.2020).
11. Yoon J., Jo S., Chun I. S., Jung I., Kim H.-S., Meitl M., Me-nard E., Li X., Coleman J. J., Paik U., Rogers J. A. GaAs photovoltaics and optoelectronics using releasable multilayer epitaxial assemblies // Nature. 2010. V. 465. P. 329—333. DOI: 10.1038/nature09054
12. How Will COVID-19 Affect GaAs Revenue. URL: <https://www.strategyanalytics.com/strategy-analytics/blogs/components/advanced-semiconductors/advanced-semiconductors/2020/05/04/how-will-covid-19-affect-gaas-revenue?slid=1066895&spg=8> (дата обращения: 23.10.2020).
13. GaAs wafer market growing at 10% CAGR to more than \$348m by 2025 // Semiconductor Today. Compounds & Advanced Silicon. 2020. V. 15, Iss. 5. P. 56—57. URL: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2020/jun/yole-020620.shtml
14. Sizov F. THz radiation sensors // Opto-Electronics Review. 2010. V. 18, N 1. P. 10—36. DOI: 10.2478/s11772-009-0029-4
15. Sizov F., Rogalski A. THz detectors // Progress in Quantum Electronics. 2010. V. 34, Iss. 5. P. 278—347. DOI: 10.1016/j.pquantelec.2010.06.002
16. Стафеев В. И. Теллуриды кадмия-ртути: фотоприемники инфракрасного диапазона, другие приборы. М.: ФГУП «НПО «Орион», 2011. 204 с.
17. АО «Экран-оптические системы» запустило первое в России промпроизводство наногетероструктур на основе арсенида галлия. URL: <http://www.ratm.ru/press-center/news/ao-ekran-opticheskie-sistemy-zapustilo-pervoe-v-rossii-promproizvodstvo-nanogeterostruktura-na-osnove/> (дата обращения: 23.10.2020).
18. Новосибирские ученые изготовили опытный образец установки для выращивания полупроводников в космосе. URL: https://infopro54.ru/news/novosibirskie-uchenye-izgotovili-opytnyj-obrazec-ustanovki-dlya-vyrashhivaniya-poluprovodnikov-v-kosmose/?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop (дата обращения: 23.10.2020).
19. Smartphone production falls a record 16.7% year-on-year in Q2/2020 // Semiconductor Today. Compounds & Advanced Silicon. 2020. V. 15, Iss. 7. P. 76—77. URL: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2020/aug/trendforce-260820.shtml

Статья поступила в редакцию 23 октября 2020 г.

Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering. 2020, vol. 23, no. 3, pp. 167—176.
DOI: 10.17073/1609-3577-2020-3-167-176

Photonic and terahertz applications as a next driver of gallium arsenide market

N. A. Kulchitsky¹, A. V. Naumov^{2,§}, V. V. Startsev²

¹ *Joint-Stock Company “Scientific and Production Association “Orion” (JSC “SPA “Orion”),
9 Kosinskaya Str., Moscow 111538, Russia*

² *Astrohn Technology Ltd., 1 Parkovaya Str., Lytkarino, Moscow Region 140080, Russia*

Abstract. Analysis of current GaAs and related device market initiated in a number of earlier works has been continued. Binary semiconductor GaAs compound is a conventional MW electronics material. Until recently GaAs based HF ICs for mobile phones were among the most rapidly growing segments of GaAs market. However the GaAs market development trend is changing. Photonics and Terahertz engineering are becoming the new world GaAs market drivers. This means that the current emphasize of GaAs single crystal technologies will shift toward vertical directional crystallization of “optoelectronic quality” crystals. In the medium and longer terms the world GaAs wafer and epitaxial structure markets will continue growing. In the shorter term we all will have to take into account COVID epidemic consequences. Still the GaAs market is closely related to Smartphone market novelties. Quite probably after a long growth period the GaAs market will keep on shrinking for the second consecutive year: GaAs production may decline by 11—12 % in 2020. Assuming that the epidemic will be somehow taken under control in 2021 the overall Smartphone production can probably be expected to grow starting from 2021.

Currently the Russian market of semiconductor compounds for photonics and electronic components (GaAs etc.) is but moderate and in predictable terms is not expected to achieve a level that is required for the emergence of a competitive domestic manufacturer, even though all importation replacement programs are accomplished. Meanwhile there is understanding that developing an advanced electronic components industry in Russia requires larger production of source materials.

Keywords: gallium arsenide, Czochralski method, vertical directional crystallization, epitaxial GaAs wafers, market, prices, demand, consumption

References

1. Majanov E. P., Kniazev S. N., Naumov A. V. GaAs single crystals market: development trends. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*, 2016, vol. 19, no. 3, pp. 156—162. (In Russ.) DOI: 10.17073/1609-3577-2016-3-156-162
2. Markov A. V. Single crystals of semiconductor compounds III–V: modern production and prospects for its development. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 2003, no. 6, pp. 5—11. (In Russ.)
3. Kulchitsky N. A., Naumov A. V., Startsev V. V. New trends in the development of the gallium arsenide devices market. *Adv. Appl. Phys.*, 2020, vol. 8, no. 2, pp. 136—147. (In Russ.)
4. Khludkov S. S., Tolbanov O. P., Vilisova M. D., Prudaev I. A. *Poluprovodnikovye pribory na osnove arsenida galliya s glubokimi primesnymi tsestrami* [Semiconductor devices based on gallium arsenide with deep impurity centers]. Tomsk: Izdatel'skii Dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2016, 145 p. (In Russ.)
5. Kishchinskii A. V. Broadband transistor amplifiers of the microwave range: the generation change. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*, 2010, no. 2, pp. 5—10. (In Russ.)
6. 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 (accessed: 23.10.2020).
7. GaAs Wafer & Epiwafer Market: RF, Photonics, LED и PV приложения. URL: <https://www.i-micronews.com/products/gaas-wafer-and-epiwafer-market-rf-photonics-led-and-pv-applications/?cn-reloaded=1> (accessed: 23.10.2020).
8. Dietrich C. P., Fiore A., Thompson M. G., Kamp M., Höfling S. GaAs integrated quantum photonics: Towards compact and multifunctional quantum photonic integrated circuits. *Laser Photonics Rev.*, 2016, vol. 10, no. 6, pp. 870—894. DOI: 10.1002/lpor.201500321
9. GaAs Market Overview. URL: <https://any silicon.com/gaas-market-overview-apple-changing-future/> (accessed: 23.10.2020).
10. Apple Is Changing GaAs Future. URL: https://compound-semiconductor.net/article/104852/Apple_Is_Changing_GaAs_Future (accessed: 23.10.2020).
11. Yoon J., Jo S., Chun I. S., Jung I., Kim H.-S., Meitl M., Menard E., Li X., Coleman J. J., Paik U., Rogers J. A. GaAs photovoltaics and optoelectronics using releasable multilayer epitaxial assemblies. *Nature*, 2010, vol. 465, pp. 329—333. DOI: 10.1038/nature09054
12. How Will COVID-19 Affect GaAs Revenue. URL: <https://www.strategyanalytics.com/strategy-analytics/blogs/components/advanced-semiconductors/advanced-semiconductors/2020/05/04/how-will-covid-19-affect-gaas-revenue?slid=1066895&spg=8> (accessed: 23.10.2020).
13. GaAs wafer market growing at 10% CAGR to more than \$348m by 2025. *Semiconductor Today. Compounds & Advanced Silicon*, 2020, vol. 15, no. 5, pp. 56—57. URL: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2020/jun/yole-020620.shtml
14. Sizov F. THz radiation sensors. *Opto-Electronics Rev.*, 2010, vol. 18, no. 1, pp. 10—36. DOI: 10.2478/s11772-009-0029-4
15. Sizov F., Rogalski A. THz detectors // *Progress in Quantum Electronics*, 2010, vol. 34, no. 5, pp. 278—347. DOI: 10.1016/j.pquan-telec.2010.06.002
16. Stafeev V. I. *Telluridy kadmiya-rtuti: fotopriemniki infrakrasnoo diapazona, drugie pribory* [Cadmium-mercury tellurides: infrared photodetectors, other devices]. Moscow: FGUP «NPO “Orion”», 2011, 204 p. (In Russ.)
17. JSC “Screen-optical systems” launched the first industrial production of nanoheterostructures based on gallium arsenide in Russia. URL: <http://www.ratm.ru/press-center/news/ao-ekran-opticheskie-sistemy-zapustilo-pervoe-v-rossii-promproizvodstvov-nanogeterostruktur-na-osnove/> (accessed: 23.10.2020). (In Russ.)
18. Novosibirsk scientists have made a prototype installation for growing semiconductors in space. URL: https://infopro54.ru/news/novosibirskie-uchenye-izgotovili-opytnyj-obrazec-us-tanovki-dlya-vyrashhivaniya-poluprovodnikov-v-kosmose/?utm_source=yxnews&utm_medium=desktop (accessed: 23.10.2020). (In Russ.)
19. Smartphone production falls a record 16.7% year-on-year in Q2/2020. *Semiconductor Today. Compounds & Advanced Silicon*, 2020, vol. 15, no. 7, pp. 76—77. URL: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2020/aug/trendforce-260820.shtml

Received October 23, 2020

Information about authors:

Nikolay A. Kulchitskiy¹: Dr. Sci. (Eng.), Chief Specialist (n.kulchitsky@gmail.com); **Arkady V. Naumov**^{2,§}: Analytical Engineer (naumov_arkadii@mail.ru); **Vadim V. Startsev**²: Chief Designer

[§] Corresponding author