ФИЗИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА
И ЕЁ ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 621.38; 669.015.5 PACS: 85.60.Gz, 81.10.bk, 78.30.FS

Новые тенденции развития рынка приборов на арсениде галлия

Н. А. Кульчицкий, А. В. Наумов, В. В. Старцев

В работе обсуждается современное состояние технологии получения, а также особенности мирового рынка арсенида галлия, дан анализ тенденций его развития. Рассмотрены особенности различных технологий выращивания кристаллов арсенида галлия; проведен анализ характеристик получаемых материалов, приборов на их основе, а также основных производителей.

Ключевые слова: арсенид галлия, методы получения, рынок, цены, спрос, потребление, сырьевые резервы, особочистые галлий и мышьяк.

Ссылка: *Кульчицкий Н. А., Наумов А. В., Старцев В. В.* // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 2. С. 136.
Reference: N. A. Kulchitsky, A. V. Naumov, and V. V. Startsev, Usp. Prikl. Fiz. **8** (2), 136 (2020).

Введение

До последнего времени одним из наиболее быстрорастущих сегментов рынка были интегральные схемы (ИС) на GaAs для мобильной телефонии. В последнее годы рынок мобильной связи демонстрирует некоторое насыщение. Новым двигателем мирового рынка арсенида галлия стала фотоника. Рынок подложек GaAs к 2023 г., согласно прогнозам, превысит 4 млн шт. в пересчете на диаметр 150 мм. В денежном измерении рынок пластин GaAs, как ожидается, достанет $1,3 млрд к 2023 г. с ежегодным темпом роста 11,5 % в период с 2018 г. до 2023 г. Предпринята попытка прогноза влияния пандемии COVID-19 на рынок GaAs. Отмечается, что на данный момент российский рынок GaAs имеет незначительный объем и в ближайшей перспективе не достигнет уровня, необходимого для появления конкурентоспособного на мировом уровне отечественного производителя. Спецификой российского рынка является низкая, по сравнению с мировой, доля гражданского рынка микроэлектроники. В то же время, существует понимание, что для создания материалов современной электронной компонентной базы в России необходимо развивать производства особо чистых соединений и исходных компонентов.

Кульчицкий Николай Александрович[1,2], зам. начальника управления, д.т.н.
Наумов Аркадий Валерьевич[3], инженер-аналитик.
Старцев Вадим Валерьевич[3], главный конструктор.
[1] АО «НПО «Орион».
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
E-mail: orion@orion-ir.ru
[2] МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА).
Россия, 119454, Москва, просп. Вернардского, 78.
[3]АО «Оптико-механическое конструкторское бюро «Астрон».
Россия, 140080, Московская область, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1.
E-mail: info@astrohn.ru

Статья поступила в редакцию 6 мая 2020 г.

© Кульчицкий Н. А., Наумов А. В., Старцев В. В., 2020

Арсенид галлия – история и перспективы

Рынки пластин и эпитаксиальных структур GaAs вступают в новую эру оптоэлектроники. До 2017 г. фотоника на GaAs была относительно незначительным сектором применения. Но с момента появления функции 3D сканирования с использованием VCSEL (vertical-cavity surface-emitting laser – лазер с вертикальным резонатором) на базе GaAs в смартфонах iPhone X компании Apple, GaAs-VCSEL и аналогичные оптоэлектронные приборы на GaAs привлекли огромное внимание.

Традиционно GaAs являлся основным материалом СВЧ-электроники. В середине 60-х гг. XX века в США под эгидой US Department of defense (DoD) начались исследования свойств GaAs, которые завершились разработкой интегральных схем (ИС) высокого быстродействия, используемых в «интеллектуальных» системах управления огнем и в суперкомпьютерах. DoD финансировал программу разработки ИС типа MIMIC (Microwave/Millimeter Wave Monolitic Integrated Circuits), в последующем – MAFET-схем (Microvave Analog front End Technology) (рис. 1). В настоящее время промышленность GaAs-ИС, в основном, выпускает приборы на полевых транзисторах с управляющим *p–n*-переходом (JFET), полевые транзисторы с затвором Шоттки (MESFET – Metal Semiconductors Field Effect Transistor) и GaAs-псевдоморфные гетероструктурные полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов (GaAs *p*-HEMT). С промышленным освоением процессов обработки пластин GaAs диаметром 150 мм существенно снизилась стоимость *p*-HEMT-приборов. Это обеспечило их широкое распространение во все сектора применения, от мобильных телефонов и базовых станций до радаров и систем связи миллиметрового диапазона [1, 2, 18, 20]. Прогноз роста производства подложек GaAs представлен на рис. 2.

Основные типы приборов на основе GaAs приведены в табл. 1 [12–15].

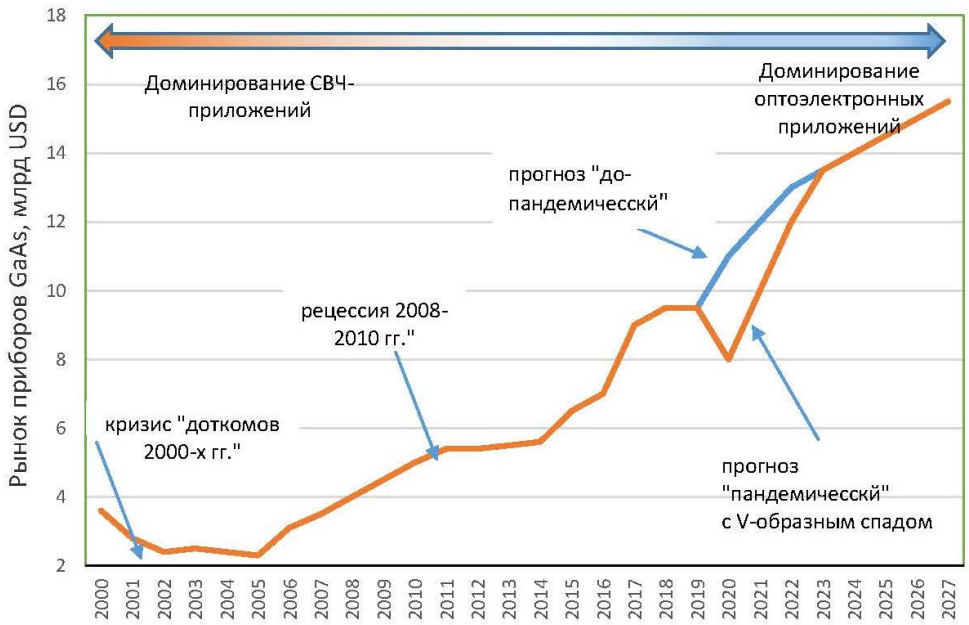


Рис. 1. Динамика развития рынка приборов на GaAs 2000–2019 гг. и прогноз до 2027 г. (млрд долл. США). Источник [14], оценки авторов.

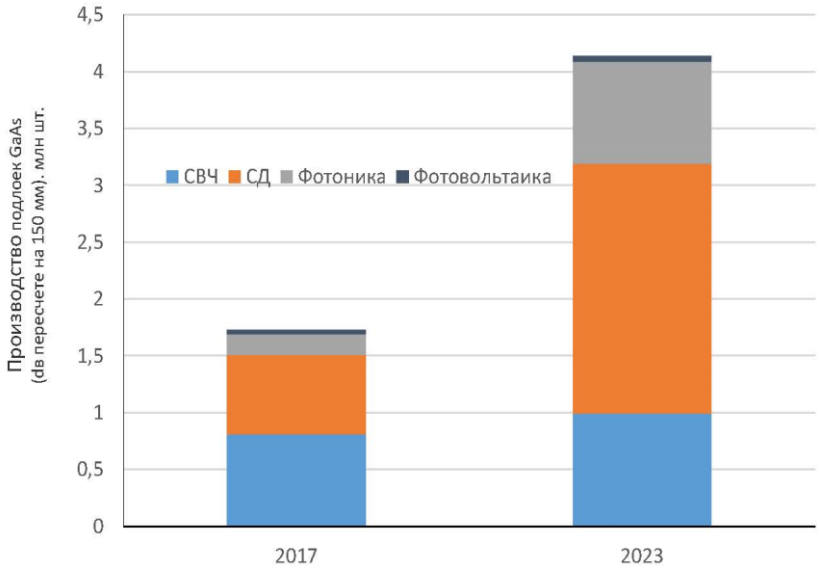


Рис. 2. Прогноз роста производства подложек GaAs, 2017–2023 г., млн шт. (в пересчете на 150 мм). Источник – «GaAs Wafer & Epiwafer Market: RF, Photonics, LED и PV приложения» от Yole Dévelopement.

Таблица 1

Основные типы приборов на основе GaAs

Приборы	Структура	Назначение	Технология получения GaAs-подложки
Светодиоды (СД) видимого диапазона, в т ч. микро-СД	Эпитаксиальные слои GaAlAs, GaAsP или InGaAsP на подложке GaAs	СД стандартной яркости – для индикаторов, цифровых дисплеев и ИК-излучателей; СД повышенной яркости – для подсветок, иллюминации, сигнальных устройств, указателей, автомобильных огней и пр.	ВНК
Лазерные диоды в т. ч. VCSEL, EEL, ИК, УФ и др.	Эпитаксиальные слои GaAlAs, GaAsP и др. на подложке GaAs	Для устройств 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	Для бортовых источников питания космических аппаратов; растет рынок наземных батарей такого типа	ВНК, LEC
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	LEC
ИК-матричные фотоприемные устройства «смотрящего» типа	Структуры с «квантовыми ямами», GaAlAs, GaInAs и др. на подложке GaAs	Инфракрасные и тепловизионные приборы ночного видения	ВНК
Фотонные интегральные схемы	Структуры с квантовыми точками InAs на подложках GaAs	Генераторы неразличимых одиночных фотонов для протоколов квантовой криптографии, лазеры терагерцевого диапазона, одноэлектронные фотонные транзисторы и др. Элементная база для квантовых компьютеров.	ВНК

Методы получения монокристаллов GaAs

Для производства полупроводниковых приборов в основном используются следующие кристаллы GaAs:

Полуизолирующий (ПИ) GaAs с высоким удельным сопротивлением (10^7 Ом см). Монокристаллы используется при изготовлении высокочастотных ИС и дискретных микроэлектронных приборов. В ПИ-GaAs высокое удельное сопротивление обеспечивается тем, что уровень Ферми в середине запрещенной зоны закрепляется благодаря существованию

глубокого донорного центра, известного как EL2 и связанного с собственными антиструктурными дефектами. Роль компенсирующих мелких акцепторов выполняют атомы фоновой примеси углерода и антиструктурные дефекты. Помимо высокого удельного сопротивления, монокристаллы ПИ-GaAs должны иметь высокие значения подвижности носителей заряда и высокую макро- и микроскопическую однородность распределения параметров как в поперечном сечении, так и по длине выращенных слитков.

Легированный кремнием (ПП) GaAs *n*-типа проводимости с низкой плотностью дислокаций.

Монокристаллы сильно легированного кремнием (10^{17}–10^{18} см$^{-3}$) GaAs, помимо высокой проводимости, должны обладать достаточно совершенной кристаллической структурой. Для производства светодиодов пригодными считаются монокристаллы с $N_D < 10^4$ см$^{-2}$, а для лазеров – с $N_D < 2\times10^3$ см$^{-2}$. Такие кристаллы используется в оптоэлектронике для изготовления инжекционных лазеров, свето- и фотодиодов, фотокатодов, являются материалом для генераторов СВЧ-колебаний, применяются для изготовления туннельных диодов, способных работать при более высоких температурах, чем кремниевые и на более высоких частотах, чем германиевые.

Исходный поликристаллический GaAs обычно получают посредством реагирования паров As с металлическим Ga при высокой температуре в запаянных кварцевых ампулах. Как правило, емкость с As, помещенную у одного конца ампулы, нагревают до температуры 618 С. В результате в ампуле образуется давление паров As в 1 атмосферу, что необходимо для получения стехиометрического GaAs. Пары As взаимодействуют с металлическим Ga, который поддерживается при температуре 1238 С и находится у другого конца ампулы в лодочке из кварца или пиролитического нитрида бора (PBN). После того, как As полностью прореагирует, образуется поликристаллическая загрузка (рис. 3).

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) и метод вертикальной направленной кристаллизации в тех же двух вариантах (Vertical Bridgman – VB и Vertical Gradient Freeze – VGF).

В установку для вытягивания кристаллов методом Чохральского загружают поликристаллический слиток GaAs в тигле с наружным графитовым элементом (рис. 4). GaAs расплавляют при температуре, близкой к 1238 С, и кристалл вытягивают в атмосфере, под давлением, изменяемым от нескольких до 100 атмосфер. Расплав полностью заключен в оболочку из B_2O_3, которая предотвращает распад расплава, когда давление паров As совпадает или его превышает давление инертного газа (обычно аргона или азота), введенного в камеру установки. Монокристаллический GaAs также может быть синтезирован в камере путем введения As в расплавленный Ga или сплавления As и Ga при высоком давлении. Динамика развития метода в части роста величины загрузки и диаметра выращиваемого кристалла приведена на рис. 5.

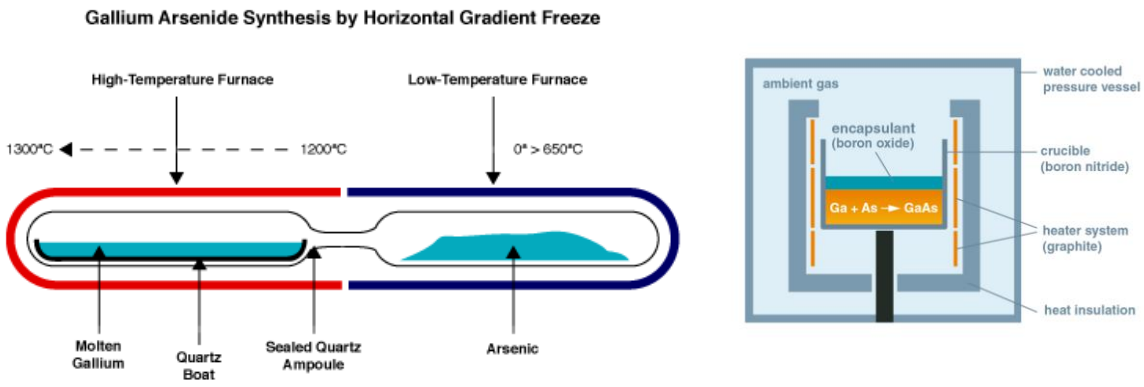


Рис. 3. Синтез поликристаллического арсенида галлия.

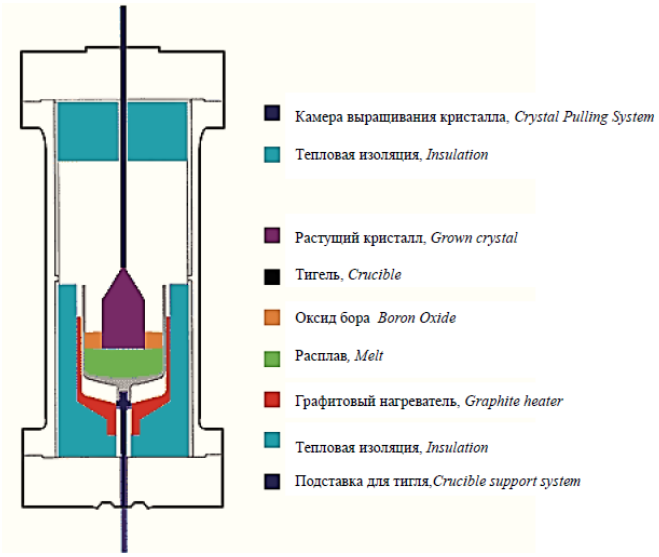


Рис. 4. Метод Чохральского получения монокристаллов GaAs из-под флюса.

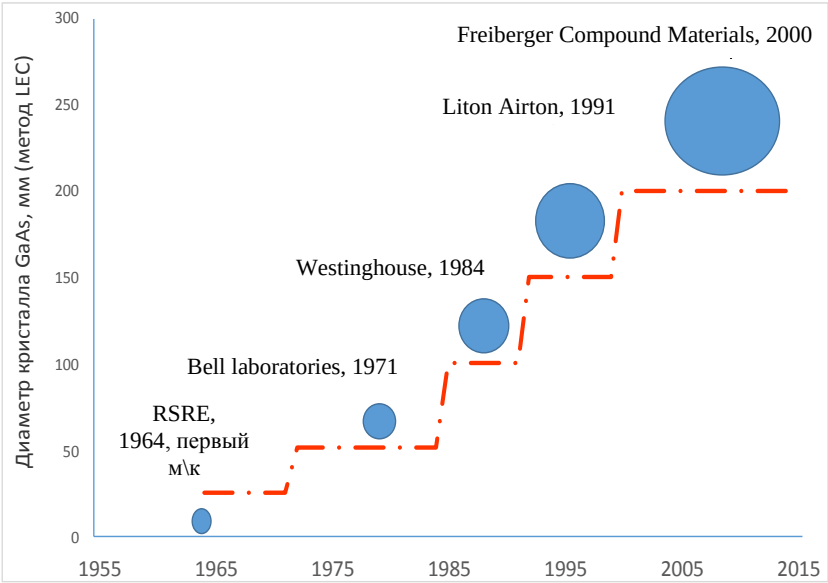


Рис. 5. Динамика развития выращивания GaAs методом Чохральского из под флюса – рост массы и диаметра слитка.

За последние 50 лет, в СВЧ-полупроводниковой промышленности наблюдается увеличение диаметра пластин GaAs, диаметр пластины растут от 50 до 150 мм, так как это снижает затраты на производство как минимум на 20–25 % при каждом переходе на большой диаметр. Промышленность сейчас преимущественно использует пластины диаметром 150 мм. Использование 150мм пластины, как ожидается, продолжится в прогнозируемом периоде за счет значительных инвестиций, осуществленных такими круп-

ными производителями, как WIN Semiconductor (Тайвань) в модернизацию и строительство новых фабрик для 150 мм пластин. Однако, отрасль движется в сторону развития технологии пластин 200 мм (8 дюймов). Исследователи из Стэнфордского университета разработали производственный процесс на 200 мм пластине GaAs.

Широко используется также 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 в тех же двух вариантах (Vertical Bridgman – VB и Vertical Gradient Freeze – VGF) (рис. 6). На рис. 7 приведена проявившаяся тенденция последних лет в развитии метода VGH – переход к групповому полунепрерывному выращиванию.

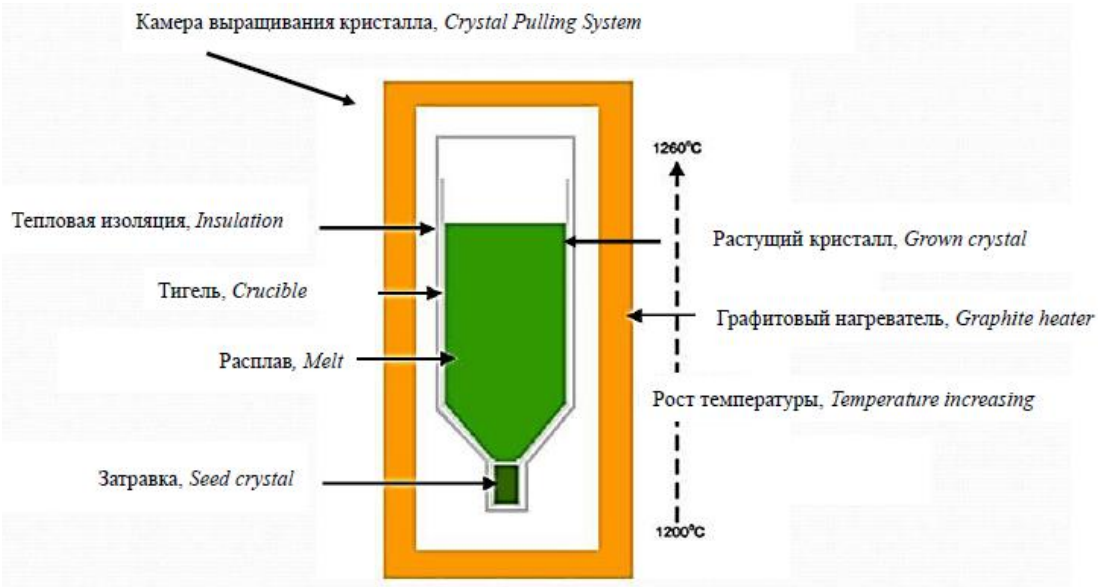


Рис. 6. Схема метода VGF выращивания монокристаллов GaAs.

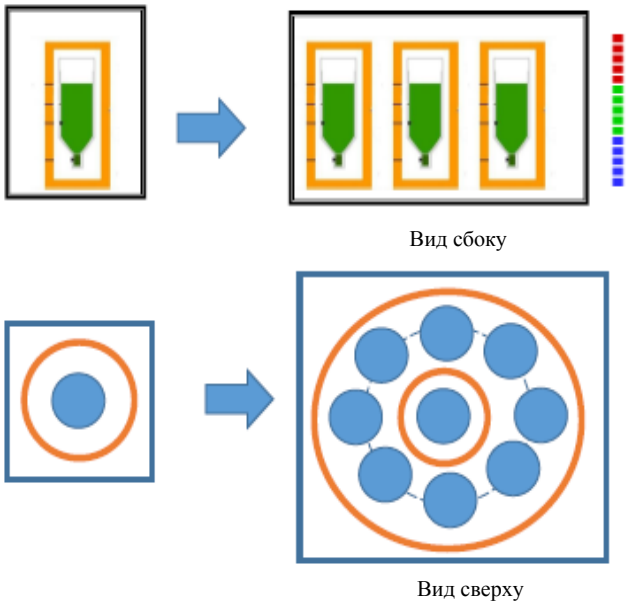


Рис. 7. Динамика развития выращивания GaAs методом VGH – переход к групповому полунепрерывному выращиванию.

Материал, полученный методом ВНК, имеет более низкую плотность дислокаций, но материал LEC обладает более однородным распределением дислокаций по площади пластины. Что касается электрически активных комплексов EL2, то кристаллы, полученные LEC-методом имеют более однородное распределение этих дефектов и, как следствие, более однородное распределение удельного сопротивления по площади пластины. Кроме того, монокристаллы, выращенные методом ВНК, имеют более высокую себестоимость, чем выращенные методом LEC. Это обусловлено в 4–5 раз меньшей скоростью кристаллизации и исключением операции повторного затравления. Сравнивая совокупность характеристик, присущих различным методам выращивания, можно полагать, что в ближайшие годы оба метода будут присутствовать на рынке с преобладанием ВНК (табл. 2, рис. 8) [5–8].

Таблица 2

Применимость различных технологий выращивания GaAs

Приборы	Тип прибора	Предпочтительная технология
Полевые транзисторы металл-полупроводник (MESFET)	Униполярный транзистор	LEC
СВЧ-транзисторы (HEMT)	Униполярный транзистор	LEC
Транзисторы с гетеропереходом (HBT)	Биполярный транзистор	ВНК либо LEC
Лазерные и светодиоды	оптоэлектроника	ВНК

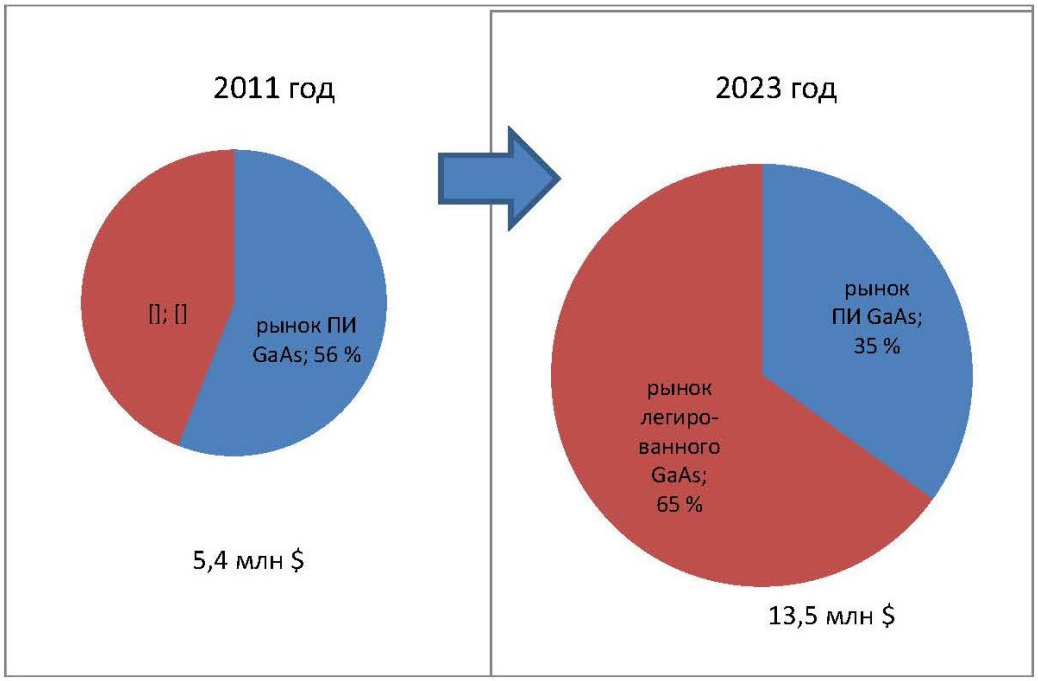


Рис. 8. Соотношение долей ПИ- и ПП GaAs на рынке, млн $.

На основе арсенида галлия также изготавливаются светодиоды (СД). Изобретение первых СД, выделяющих монохроматический свет при подключении к источнику тока, относится к 1960-м годам. До 1980-х низкая яркость, отсутствие СД синего и белого цветов, а также высокие затраты на их производство ограничивали их применение – СД использовали в наружных электронных табло, ими оборудовали системы регулирования дорожного движения, применяли в оптоволоконных системах передачи данных и медицинском оборудовании. Появление сверх ярких, а также синих (в середине 1990-х годов) и белых СД (в начале XXI века) и постоянное снижение стоимости позволили использовать СД в качестве индикаторов режимов работы электронных устройств, в подсветке жидкокристаллических экранов различных приборов. Впоследствии применение светодиодов 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 эти источники света лидерами в соревновании с более

традиционными –газоразрядными, люминесцентными лампами и лампами накаливания.

СД состоит из эпитаксиальных слоев GaAlAs, GaAsP или InGaAsP на подложке их GaAs либо GaP. СД из AlGaInP, GaAsP на подложках GaP излучают свет от бледно-зеленого до красного. СД из AlGaAs на подложках GaAs излучают свет от красного до инфракрасного. СД-индустрия еще в начале 2000-х гг вступила в новый этап развития, что обусловлено выбором ярких и сверхъярких СД для создания систем общего освещения нового поколения, где они заменяют традиционные лампы накаливания и люминесцентные лампы. Всего в мире сегодня работают более 2500 реакторов для производства светодиодных структур методом эпитаксии металлоорганических соединений из газовой фазы (MOCVD-эпитаксии). Для обеспечения их работы используется более 100 т галлия/год в виде металлоорганических соединений (триметилгаллий и проч.) высокой чистоты. Тоже относится к особочистому мышьяку [17]

Основными производителями полупроводниковых изделий GaAs являются компании: Skyworks Solutions, Qorvo, Broadcom, Advanced Wireless Semiconductor Co (AWSC), Analog Devices, MACOM, и Murata Manufacturing (рис. 9) [9–12].

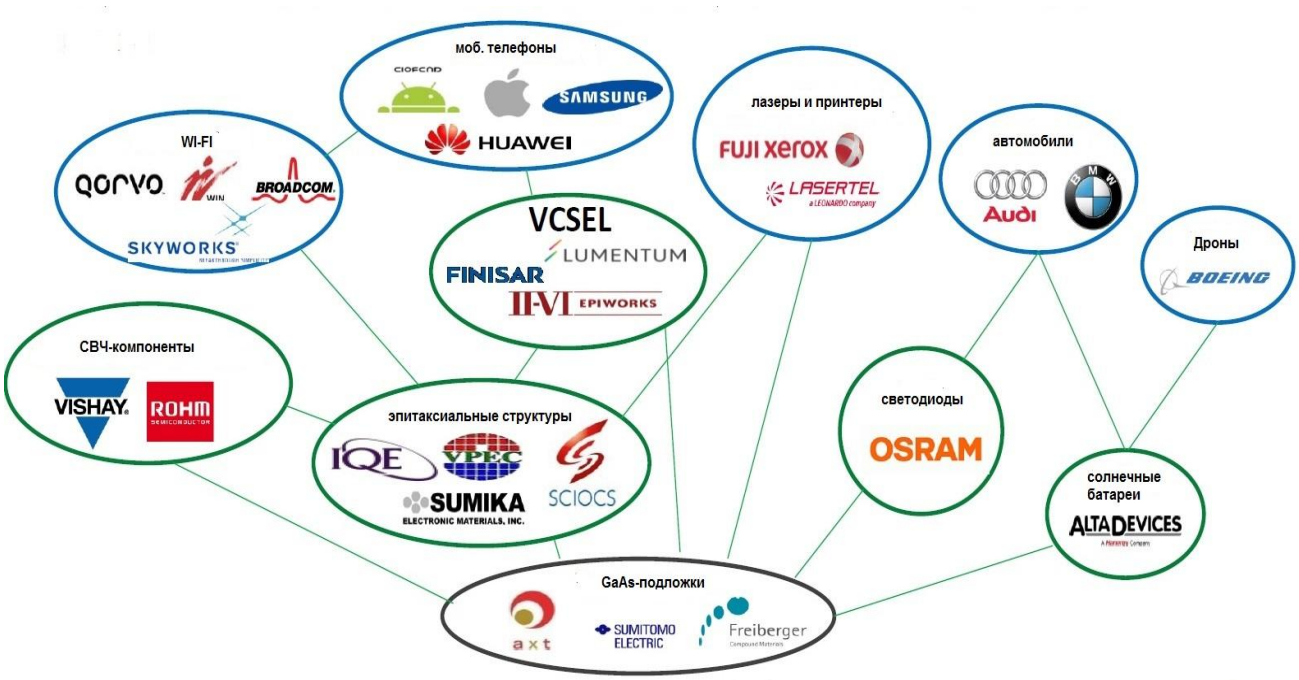


Рис. 9. Структура рынка GaAs.

Ситуация в РФ

Спецификой российского рынка является низкая, по сравнению с мировой, доля гражданского рынка. До недавнего времени, основная потребность отечественных производителей радиоэлектронных и телекоммуникационных систем в СВЧ-ИС покрывалась за счет зарубежных поставок. При этом отечественные производители занимали на рынке нишу полупроводниковой продукции для военных устройств [18, 19]. В России, промышленно выпускаемые и разрабатываемые СВЧ ИС на частоты выше 6 ГГц базируются на полевых транзисторах MESFET. В настоящее время рядом российских предприятий ведется работа по разработке и организации выпуска ряда более современных СВЧ ИС, преимущественно для нужд оборонно-промышленного комплекса. Проекты находятся в различной стадии готовности.

В России существует производство объемного GaAs и пластин GaAs в АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности» (г. Москва, госкорпорация Росатом), предприятии «Лассард» (г. Обнинск) [10, 16]. Вместе с тем, потребность отечественных предприятий в арсениде галлия растет. Потребности в значительной мере покрыва-

ются за счет импорта.

Основные драйверы развития GaAs после 2017 года

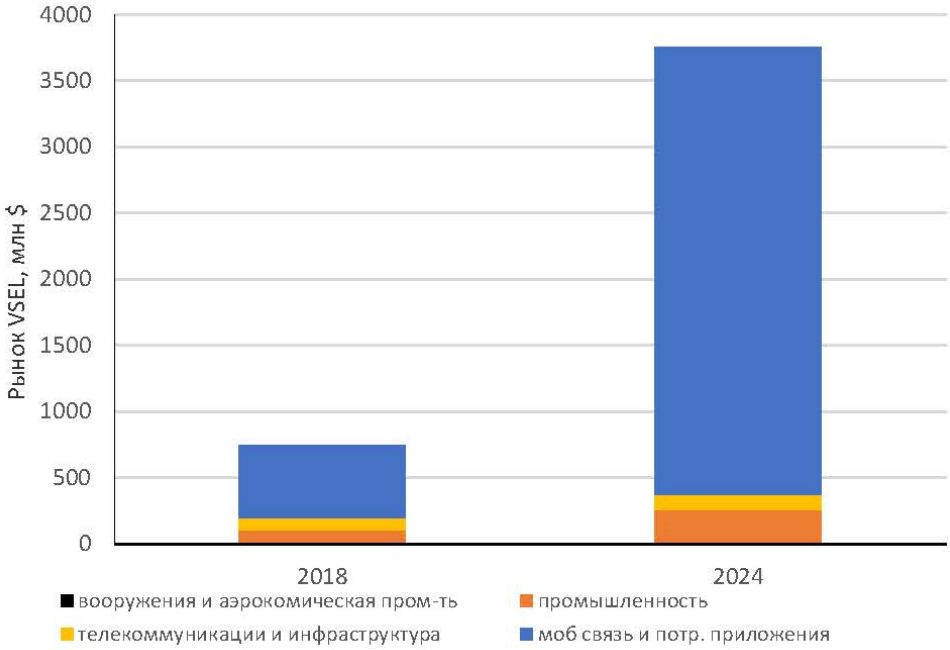
С 2017 года пластины GaAs особенно заметны в фотонике. Когда компания Apple представила свой новый айфон с функцией 3D сканирования с использованием лазеров с вертикальными резонаторами (VCSEL) на основе GaAs, это открыло путь к значительному росту сегмента рынка полупроводниковых пластин GaAs для фотоники, который должен вырасти с ежегодным темпом роста 37 % до 150 млн $ к 2023 году.

Другие приложения к смартфонам с использованием красно-оранжево-желтого и инфракрасного светодиода на основе GaAs также обеспечивают рост рынка GaAs. Для всего рынка СД на GaAs аналитики прогнозируют 21 % ежегодного прироста, что даст более половины объема пластин GaAs к 2023 году. 3 сенсорных модуля на основе GaAs VCSEL используются в iPhone X для распознавания лиц и др. Учитывая потенциальное внедрение этой технологии платформами Android, аналитики ожидают, что этот сегмент рынка пластин GaAs для VCSEL вырастет на 58 % ежегодно в период 2017–2023 гг.

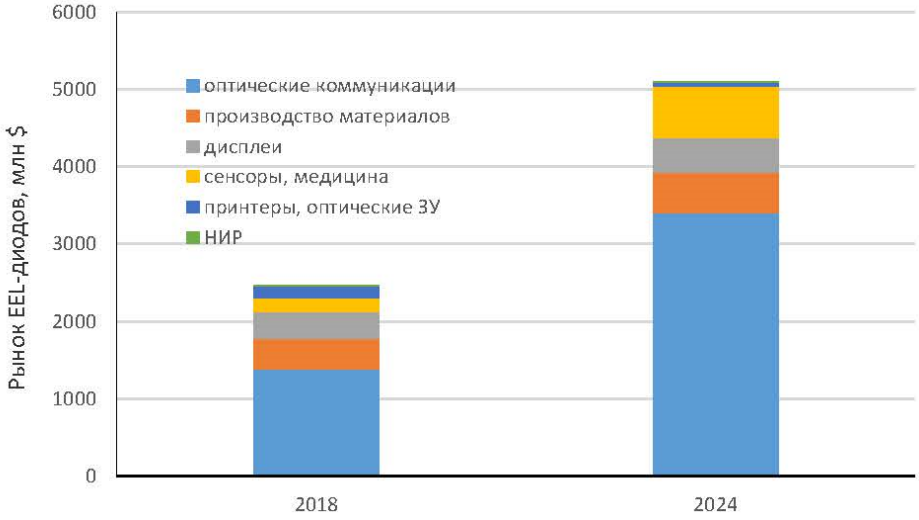
Кроме того, рынок фотоники GaAs не ограничивается приложениями VCSEL. Светоотражение и дальнометрия (LiDAR) – ключевая технология, позволяющая создать 3D карту окрестностей для автономных транспортных средств и робототехники. В этом новом приложении используются высокомощные и крупногабаритные лазерные устройства на основе GaAs с краевым излучением (EEL), которые будут представлять невероятный импульс для рынка фотонных полупроводниковых пластин GaAs.

Наряду с значительным ростом рынка пластин GaAs ожидается, что инфракрасные светодиоды на подложках GaAs будут демонстрировать сильный потенциал роста. В 2017–2023 годах, инфракрасные светодиоды на основе GaAs, используемые в медицинских датчиках артериального давления и сахара в крови, а также датчики для распознавания жестов в смартфонах и автомобилях, также являются сегментами роста рынка (рис. 10).

Растущий спрос на ИК-системы, вызванный как военными, так и гражданскими применениями, вызовет рост мирового рынка тепловых камер в ближайшие годы. Рост степени интеграции тепловых камер в смартфоны и их коммерческое применение, вместе с уменьшающимися ценами на тепловизионные камеры, как ожидают, стимулирует отраслевой рост в целом. Рынок тепловых камер для военных и охранных применений, как предсказывают аналитики, превысит 2,4 миллиарда долларов США к 2023 году, вследствие возрастающих проблем безопасности. Значительное расширение областей применения ИК-систем коротковолнового ИК-диапазона спектра (0,9–1,7 мкм) привело к развитию тройного полупроводникового соединения индий-галлий-мышьяк (InGaAs), появлению охлаждаемых МФПУ на основе сверхреше-
ток (InAs/GaSb Type II SL) и квантовых ям (QW, QD).



а



б

Рис. 10. Динамика роста и структура производства: а – VCSEL-диодов; б – EEL-диодов.

С точки зрения цепочки создания стоимости, значительный потенциал роста рынка фотоники GaAs откроет множество возможностей для поставщиков пластин и эпитаксиальный структур, а также для поставщиков исходных компонентов металлоорганического химического осаждения из паровой фазы (MOCVD). С точки зрения поставок объемных кристаллов GaAs, Sumitomo Electric, Freiberger Composite Materials и AXT лидируют на рынке с общей долей рынка около 95 %. Кроме того, поскольку новые лазерные приложения диктуют очень высокие технические требования к пластинам GaAs, которые постоянно развиваются, аналитики полагают, что метод ВНК в этом секторе будет главенствующим, а упомянутые игроки сохранят 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, существуют различные бизнес-модели. Рынок СД GaAs в основном вертикально интегрирован, с хорошо зарекомендовавшими себя интегрированными производителями устройств (IDM), 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. [13–18].

Заключение

Последствия появления вируса COVID-19 глобальны, но реакция очень специфична для каждой отдельной страны и отрасли. Это особенно важно для оценки рынка GaAs, поскольку он тесно связан с состоянием дел на рынке смартфонов и фотонных устройств. Недавно опубликованный прогноз Strategy Analytics Group продаж телефонов для 88 стран с 2007 г. до 2025 г оценивает снижение поставок смартфонов на ~ 21 % в 2020 г., но обещает относительно быстрое последующее восстановление. С учетом того, что более 50 % выручки СВЧ-GaAs поступает с рынка мобильных телефонов, 21%-е снижение поставок смартфонов негативно скажется на выручке кристаллов и пластин GaAs. Так что очень вероятно, что после очень длительного периода роста выручки GaAs рынок будет наблюдать второй год подряд сокращение. Исходя из этого прогноза и наших оценок, продажи кристаллов и пластин GaAs в 2020 году могут снизиться на 11–12 %. Падение поставок мобильных телефонов, видимо, будет все-таки слишком большим, чтобы преодолеть спад полностью, поэтому общая выручка, похоже, сократится в 2020 году, но трудные времена в отрасли компонентов GaAs должны быть кратковременными (т. н. «V-образный» спад – с быстрым падением и быстрым восстановлением). В конечном счете, как только цепочка поставок и спрос вернутся в нормальное русло, 5G сети и фотонные устройства станут движущей силой будущего роста рынка GaAs. В средне- и долгосрочной перспективе мировые сектора рынка пластин и эпитаксиальных структур GaAs будут расти. Рынок пластин GaAs, как ожидается, достанет $1,3 млрд к 2023 г. с ежегодным темпом роста от 11,5 % в период с 2018 г. до 2023 г. На данный момент российский рынок специальных материалов для производства полупроводниковых соединений для 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 особо чистых соединений [19, 20].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Наумов А. В.*// Изв. ВУЗов. Материалы электронной техники. 2005. № 2. С. 20.

2. *Марков А. В.* // Изв. ВУЗов. Физика. 2003. № 6. С. 5.

3. Электронный ресурс: The GaAs revolution // http://www.compoundsemiconductor. net/article/97973-the-gaas-revolution.html

4. GaAs wafer market to exceed $650 m by 2017 // Seniconductor today. 2012. Vol. 7. Iss. 3. P. 100.

5. Электронный ресурс: GaAs epi production to grow from 29,000 to 31,600 ksi over 2012-2017 // www.strategyanalytics.com (дата обращения: 21.12.2019).

6. Электронный ресурс: GaAs RF device revenue to grow from another record of $7bn in 2015 to peak of $8bn in 2018 // http://www.semiconductor-today.com/news_items/2015/oct/strategy-analytics_081015.shtml (дата обращения: 21.12.2019).

7. Электронный ресурс: Market trends in GaAs RF ICs // http://www.semiconductor-today.com/features/PDF/SemiconductorToday_AprMay 2011_ SAGaAs.pdf (дата обращения: 21.12.2015).

8. *Jie Zhang* /Electronic Metals Conference, Гуаньчжоу, сентябрь, 2012 // http://conferences.metal-pages.com/papers/electronic-metals-2012/ (дата обращения: 21.04.2019).

9. *Гасанов А. А., Наумов А. В., Петров И. М.* // Минеральные ресурсы России. 2016. № 1-2. С. 6.

10. Электронный ресурс «COVID-19 to reduce GaAs revenue in 2020, but recovery could be swift» // http://www.semiconductor-today.com/news_items/2020/may/strategy-analytics-060520.shtml (accessed 21.04.2016).

11. Электронный ресурс “Global and China GaAs-based Device Market “ // http://www.powerwaywafer.com/Global-and-China-GaAs-based-Device-Market.html (accessed 21.04.2020).

12. GaAs RF device revenue to grow from another record of $7bn in 2015 to peak of $8bn in 2018 // http://www.semiconductor-today.com/news_items/2015/oct/strategy-analytics_081015.shtml (accessed 21.04.2020).

13. Электронный ресурс: Market trends in GaAs RF ICs // http://www.semiconductor-today.com/features/PDF/SemiconductorToday_AprMay2011_SAGaAs.pdf (accessed 21.04.2020).

14. Электронный ресурс: VCSEL market growing at 31% CAGR to $3.7bn in 2024, driven by new smartphone

and automotive functionalities // http://www.semiconductor-today.com/news_items/2019/jun/yole-280619.shtml (accessed 21.04.2020).

15. Электронный ресурс: Military GaAs device market to grow at CAGR of 13% to over $0.5bn by 2018 // http://www.semiconductor-today.com/news_items/2014/OCT/STRATEGY-ANALYTICS_161014.shtml (accessed 21.04.2020).

16. "Compound semiconductor industry continues growth" // "Semiconductor Today. Compounds & Advanced Silicon". 2011. Vol. 6. Iss. 5. P. 114.

17. Электронный ресурс: GaAs Wafer and Epiwafer Market: RF, Photonics, LED and PV // https://anysilicon.com/gaas-market-overview-apple-changing-future/ (accessed 21.04.2020).

18. *Хлудков С. С., Толбанов О. П., Вилисова М. Д., Прудаев И. А.* Полупроводниковые приборы на основе арсенида галлия с глубокими примесными центрами / под ред. Толбанова О. П. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2016.

19. 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 (accessed 21.04.2020).

20. *Кульчицкий Н. А., Маянов Е. П., Наумов А. В.* // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. № 4. С. 207.

PACS: 85.60.Gz, 81.10.bk, 78.30.FS

New trends in the development of the gallium arsenide devices market

N. A. Kulchitsky[1,2], A. V. Naumov[3], and V. V. Startsev[3]

[1] Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

[2] MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA)
78 Vernardsky Ave., Moscow, 119454, Russia

[3] Experimental Design Bureau "ASTROHN", JSC
1 Park st., Lytkarino, Moscow region, 140080, Russia
E-mail: info@astrohn.ru

Received May 6, 2020

The paper discusses the current state of production technology gallium arsenide and GaAs-devices, the features of the global market, an analysis of its development trends. Until recently, high frequency integrated circuits (ICs) on mobile telephony GaA was one of the fastest growing market segments for applications of this material. However, the paradigm of GaAs-market development is changing. Photonics is becoming the new engine of development of the world market for gallium arsenide. The world market of gallium arsenide continues to develop - amounting to $2019 million in 260, it will demonstrate the annual growth rate of 4.5 %, and will reach $330 million in 2024. It is noted that at the moment the Russian market of such materials (GaAs, etc.) still has a small volume and in the short term will not reach the level necessary for the emergence of a world-competitive domestic producer. It is understood that in order to create materials of the modern electronic component base in Russia it is necessary to develop the production of particularly pure compounds, taking into account the peculiarities of the development of the world market, first of all it is necessary to develop the technologies of GaAs production of single crystals and epi-ready plates.

Keywords: gallium arsenide, production methods, market, prices, demand, consumption, photonics, gallium and arsenic high purity.

REFERENCES

1. A. V. Naumov, Izv.Vyssh. Uchebn. Zaved., Materialy electronnoy techniki, No. 2, 20 (2005).

2. A. V. Markov, Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Materialy electronnoy techniki, No. 6, 5 (2003).

3. *The GaAs revolution*, http://www.compoundsemiconductor.net/article/97973-the-gaas-revolution.html (accessed 21.12.2015).

4. *GaAs wafer market to exceed $650 m by 2017*, Semiconductor today, **7**, issue 3,100 (2012).

5. *GaAs epi production to grow from 29,000 to 31,600 ksi over 2012-2017*. www.strategyanalytics.com (accessed 21.12.2019).

6. *GaAs RF device revenue to grow from another record of $7bn in 2015 to peak of $8bn in 2018*, http://www.semiconductor-today.com/news_items/2015/oct/strategy-analytics_081015.shtml (accessed 21.12.2019).

7. *Market trends in GaAs RF ICs*, http://www.semiconductor-today.com/features/PDF/SemiconductorToday_AprMay2011_SAGaAs.pdf (accessed 21.12.2019).

8. Jie Zhang, *Electronic Metals Conference*, (Guangzhou, September 2012), http://conferences.metalpages.com/papers/electronic-metals-2012/ (accessed 21.04.2020).

9. A. A. Gasanov, A. V. Naumov, and I. M. Petrov, Mineral'nye resursy Rossii, No. 1-2, 6 (2016).

10. *COVID-19 to reduce GaAs revenue in 2020, but recovery could be swift* // http://www.semiconductor-today.com/news_items/2020/may/strategy-analytics-060520.shtml (accessed 21.04.2016).

11. *Global and China GaAs-based Device Market*, // http://www.powerwaywafer.com/Global-and-China-GaAs-based-Device-Market.html (accessed 21.04.2016).

12. *GaAs RF device revenue to grow from another record of $7bn in 2015 to peak of $8bn in* 2018, http://www.semiconductor-today.com/news_items/2015/oct/strategy-analytics_081015.shtml (accessed 21.04.2016).

13. *Market trends in GaAs RF ICs*, http://www.semiconductor-today.com/features/PDF/SemiconductorToday_AprMay2011_SAGaAs.pdf (accessed 21.04.2016).

14. *GaAs bulk substrate market revenue shrank 8% in 2013*, http://www.semiconductor-today.com/news_items/2014/JUL/STRATEGYANALYTICS_210714.shtml (accessed 21.04.2016).

15. *Military GaAs device market to grow at CAGR of 13% to over $0.5bn by 2018*, http://www.semiconductor-today.com/news_items/2014/OCT/STRATEGY-ANALYTICS_161014.shtml (accessed 21.04.2016).

16. *Compound semiconductor industry continues growth*, Semiconductor Today. Compounds & Advanced Silicon **6** (5), 114 (June/July, 2011).

17. *Novye proekty zelenogradskogo klastera*, http://www.russianelectronics.ru/developer-r/news/russianmarket/doc/73391/ (accessed 21.04.2016).

18. S. S. Hludkov, O. P. Tolbanov, M. D. Vilisova, and I. A. Prudaev, *Poluprovodnikovye pribory na osnove arsenida galliya s glubokimi primesnymi centrami*, (Tomsk : Izdatel'skij Dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2016).

19. *Ekran-opticheskie sistemy zapustil pervoe v Rossii promproizvodstvo nanogeterostruktur na osnove arsenida galliya*, http://www.sib-science.info/ru/institutes/v-novosibirske-zapuscheno-proizvodstvo-02102019

20. N. A. Kul'chickij, E. P. Mayanov, and A. V. Naumov, Nano- i mikrosistemnaya tekhnika **19** (4), 207 (2017).