

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. ПОЛУПРОВОДНИКИ

MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY. SEMICONDUCTORS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2016. Т. 19, № 3. С. 156–162.
ISSN 1609-3577. DOI: 10.17073/1609-3577-2016-3-156-162

УДК 621.315.592

РЫНОК МОНОКРИСТАЛЛОВ GaAs — ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

© 2016 г. Е. П. Маянов, С. Н. Князев, А. В. Наумов

АО «Гиредмет»,

Б. Толмачевский пер., д. 5, стр. 1, Москва, 119017, Россия

Приведен обзор современного состояния рынка монокристаллов и пластин GaAs, а также состояние и перспективы российского рынка. Дан краткий анализ современного состояния приборостроения на его основе. Приведена динамика мирового производства и цен за последние годы. Описаны способы получения монокристаллов GaAs и тенденции развития технологий выращивания. Рынок подложек GaAs к 2017 г., как ожидается, составит 3,6 млн кв. дюймов и 650 млн долл. При высоких финансовых показателях рынка арсенида галлия в физических показателях мировой рынок монокристаллического GaAs останется достаточно малым по мировым меркам: ~800 тн/год и ≥800 млн. долл./год к 2020 г. На данный момент мировой рынок монокристаллов и пластин GaAs характеризуется сравнительно небольшим объемом, высокой концентрацией производственных мощностей в Китае, наличием крупных игроков, способных пережить неблагоприятную конъюнктуру. Российский рынок специальных полупроводниковых материалов (GaAs и др.) имеет небольшой по мировым меркам объем. Однако существует понимание, что для выполнения программ импортозамещения и создания современной электронной компонентной базы в России необходимо развивать производство особо чистых соединений и исходных компонентов. С 2015 г. появляются проекты под эгидой Росэлектроники по производству пластин GaAs.

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

Роль GaAs в современной микроэлектронике

В начале 60-х годов XX в. появились первые оптоэлектронные приборы на основе GaAs — светодиоды (СД) со световой отдачей 1—2 Лм/Вт для использования, например, в дисплеях кварцевых часов. В середине 60-х годов под эгидой *US Department of defense (DoD)* начались исследования свойств GaAs для работы в интегральных схемах (ИС), которые завершились созданием ИС высокого быстродействия, используемых в «интеллектуальных» системах управления огнем и в суперкомпьютерах. В начале 90-х годов DoD финансировал программу разработки ИС типа *MIMIC (Microwave/Millimeter Wave Monolithic Integrated Circuits)*, и в последующем — *MAFET-схем (Microwave Analog front End Technology)*. Первой массовой гражданской сферой применения стало появление и широчайшее распространение мобильной

телефонии, где и в базовых станциях, и в мобильных телефонах используются ИС на основе GaAs. Это дало мощный толчок развитию отрасли. Число приборов в мире на основе арсенида галлия непрерывно растет (рис. 1) [1, 2]. Предельные характеристики СВЧ ИС (выходная мощность $P_{\text{вых}}$ (в Вт) и рабочая частота f (в ГГц)) для различных материалов приведены на рис. 2 [1, 4, 5].

СВЧ-техника. Полевые транзисторы с однородным легированием на арсениде галлия (GaAs **MESFET**) в XX в. были наиболее массовыми приборами для широкополосных усилителей СВЧ-диапазона. Они отличаются высокой надежностью и высокой линейностью передаточной характеристики. Рабочие температуры кристалла — до 175 °С, удельная выходная мощность — 0,4—0,6 Вт/мм. В дальнейшем они были вытеснены GaAs-псевдоморфными гетероструктурными полевыми транзисторами (GaAs **pHEMT**), с лучшими характеристиками по

Маянов Евгений Павлович — генеральный директор, e-mail: pyn@giredmet.ru; **Князев Станислав Николаевич** — канд. тех. наук, старший научный сотрудник, руководитель лаборатории монокристаллов арсенида галлия, e-mail: sn.kniazev@yandex.ru; **Наумов Аркадий Валерьевич** — старший научный сотрудник, аналитик-исследователь, e-mail: naumov_arkadii@mail.ru

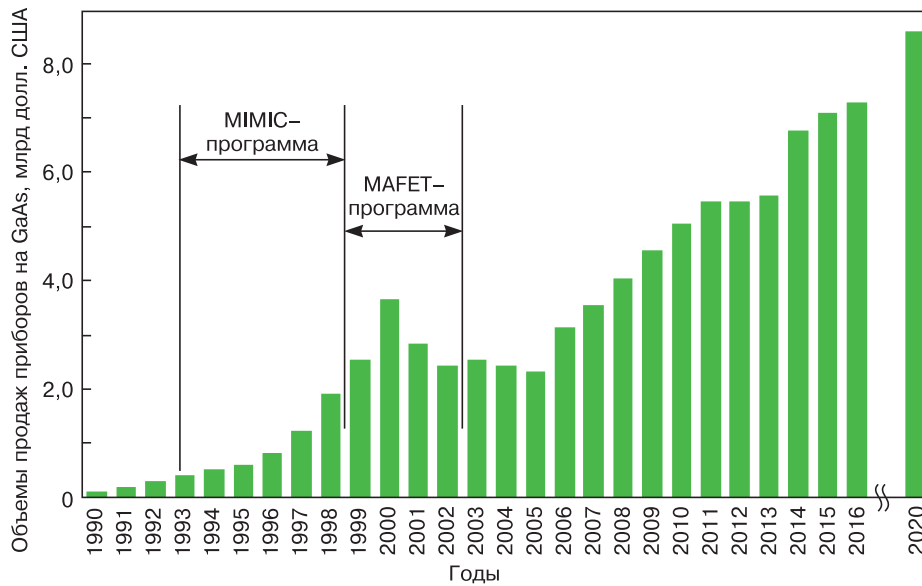


Рис. 1. Динамика развития рынка приборов на GaAs 1990—2016 гг. (млрд долл. США) и прогноз на 2020 г. [2, 3]

Fig. 1. GaAs device market development in 1990—2016 (bn. \$) and 2020 predictions [2, 3]

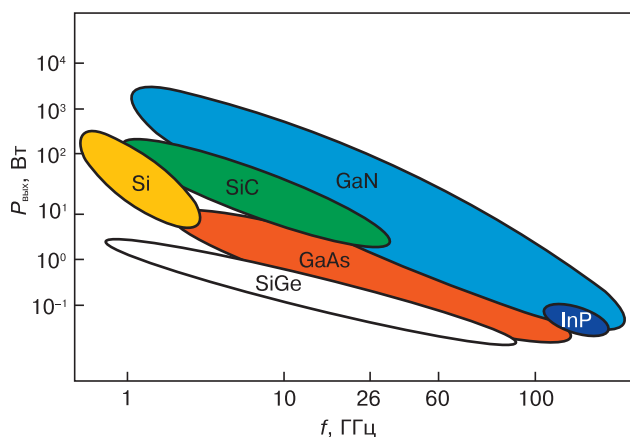


Рис. 2. Предельные характеристики СВЧ ИС (выходная мощность $P_{\text{вых}}$ и рабочая частота f) для различных материалов

Fig. 2. RF IC saturation parameters (output power P_{out} and working frequency f) for different materials

частотному диапазону, КПД и усилению. Мощные транзисторы и ИС по этой технологии выпускаются рядом российских производителей (ФГУП «НПП «Пульсар», ФГУП «НПП «Исток», АО «Октава»).

Технология GaAs гетероструктурных полевых транзисторов (HFET) обеспечивает высокие пробивные напряжения (22—25 В), высокий КПД (до 55 %) и хорошую линейность передаточной характеристики. Транзисторы этого типа, отличаясь высокой надежностью, применяются в высоколинейных усилителях.

В текущем десятилетии GaAs pHEMT стали самыми массовыми. С промышленным освоением процессов обработки пластин диаметром до 150 мм снизилась стоимость pHEMT-приборов с длиной затвора 0,1—0,25 мкм. Это обеспечило их распространение во все сектора применения — от мобильных телефонов и базовых станций до радаров, систем

связи мм-диапазона. Технология pHEMT стала стандартной, ее применение позволило наладить серийный выпуск усилителей в диапазонах до 32 ГГц с мощностями до 4—7 Вт.

Основными производителями полупроводниковых изделий из GaAs являются компании RFMD и Skyworks, Avago Technologies, TriQuint, SEI (Sumitomo Electric Industries), Sony, Panasonic и Mitsubishi Electric (Тайвань).

Спецификой российского рынка является низкая, по сравнению с мировой, доля гражданского рынка микроэлектроники. 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 продукции для военных устройств. На российских предприятиях чаще всего разработка, проектирование и промышленный выпуск ИС реализуются в рамках одной крупной компании. 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 [1, 2, 6, 7].

Светодиоды. На основе арсенида галлия также изготавливают СД, которые состоят из эпитаксиальных слоев GaAlAs, GaAsP или InGaAsP на подложке GaAs. До 80-х годов XX в. низкая яркость, отсутствие СД синего и белого цветов, а также высокие затраты на их производство ограничивали их применение: СД использовали в наружных электронных табло, в системах регулирования дорожного движения, применяли в оптоволоконных системах передачи данных и медицинском оборудовании. Появление сверхъярких, а также синих (в середине 1990-х годов) и белых СД (в начале XXI в.) и постоянное снижение стоимости позволили использовать СД в качестве индикаторов режимов работы электронных устройств для жидкокристаллических экранов различных приборов. Светодиодная индустрия вошла 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 [2, 8, 9].

Способы получения монокристаллов GaAs и тенденции развития

Основное применение нашли следующие материалы на основе GaAs.

1. Полупроводящий (ПИ) GaAs с высоким удельным сопротивлением (10^7 Ом·см). Используется при изготовлении высокочастотных ИС и дискретных микроэлектронных приборов. Для 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 GaAs. Роль компенсирующих мелких акцепторов выполняют атомы фоновой примеси углерода и антиструктурные дефекты AsGa. Помимо высокого удельного сопротивления, монокристаллы ПИ–GaAs должны иметь высокие значения подвижности носителей заряда и высокую макро- и микроскопическую однородность распределения свойств как в поперечном сечении, так и по длине выращенных слитков.

2. Легированный кремнием полупроводниковый (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. Пригодными для производства СД считают монокристаллы с $N_D < 10^4$ см $^{-2}$, а для лазеров — с $N_D < 2 \cdot 10^3$ см $^{-2}$. Используется в оптоэлектронике для изготовления инжекционных лазеров, свето- и фотодиодов, фотокатодов, являются материалом для генераторов СВЧ-колебаний, применяются для изготовления туннельных диодов [10].

3. Монокристаллы арсенида галлия, легированные хромом, используют в инфракрасной оптике.

4. Монокристаллы GaAs, легированные цинком или теллуром, применяют в производстве оптоэлектронных приборов.

Основными производителями кристаллов и пластин GaAs являются Sumitomo Electric (Япония), Freiberger (Германия), Hitachi Cable (Япония), AXT (США), DOWA (Япония), China Crystal Technology, Tianjin Jingming Electronic, Yunnan Germanium, GRINM Electro-optic Materials, Kunshan Dingjing Gallium, Xinxiang Shenzhou Technology (Китай) [3, 11–13].

Исходный поликристаллический GaAs обычно получают посредством реагирования паров As с металлом 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 атм, что необходимо для получения стехиометрического GaAs. Пары As взаимодействуют с 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. GaAs также может быть синтезирован в камере выращивания монокристалла путем введения As в расплавленный Ga или сплавления As и Ga при высоком давлении.

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).

Основным вариантом технологии LEC стал совмещенный процесс синтеза GaAs и выращивания монокристалла в установках высокого давления (60–70 атм. при синтезе и 20–30 атм. при выращивании). Для обеспечения необходимых электрофизических параметров используется галлий и мышьяк чистотой не менее 6N–7N, тигли из пиролитического нитрида бора и управление содержанием фонового углерода активными (контроль содержания CO в атмосфере) и пассивными (влажность борного ангидрида) методами. Важной особенностью метода является то, что выращивание осуществляется при достаточно больших осевых и радиальных градиентах температуры вблизи фронта кристаллизации, следствием этого является высокая плотность дислокаций (N_D от $1 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^5$ см $^{-2}$) (рис. 3, см. третью стр. обложки).

Наблюдается постоянное увеличение диаметра пластин GaAs, диаметр пластины растет от 50 до 150 мм, так как это снижает затраты на производство, как минимум, на 20–25 % при каждом переходе на большой диаметр. Динамика развития метода в части роста величины загрузки и диаметра выращиваемого кристалла приведена на рис. 4. Промышленность сейчас преимущественно использует пластины диаметром 150 мм. Использование пластины диаметром 150 мм, как ожидается, продолжится до 2020 г. за счет значительных инвестиций, осуществленных такими крупными производителями, как WIN Semiconductor (Тайвань), в модернизацию и строительство новых фабрик для пластин диаметром 150 мм. Однако отрасль движется в сторону развития технологии пластин диаметром 200 мм (8 дюймов), и опытное производство, как ожидается, появится к концу 2018 г. Исследователи из Стэнфордского университета работают над созданием производственного процесса на 200-мм пластине GaAs [8, 10, 14–16].

Широко используются также методы горизонтальной (HB и HGF) и вертикальной (VB и VGF) на-

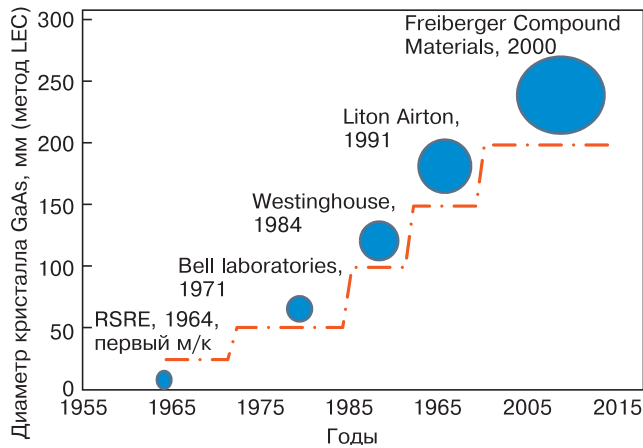


Рис. 4. Динамика развития выращивания GaAs методом Чохрального из-под слоя флюса (LE) — рост массы и диаметра слитка [8]
 Fig. 4. Flux Cz GaAs market dynamics (LE): available ingot weight and diameter curve [8]

правленной кристаллизации. На рис. 5, б приведена тенденция последних лет в развитии метода VGF — переход к групповому полунепрерывному выращиванию.

ЛЕС против VGF

Для производства ПИ GaAs обе технологии выращивания имеют свои плюсы и минусы. Материал, полученный методом вертикальной направленной кристаллизации (**ВНК**), имеет более низкую плотность дислокаций, но материал ЛЕС обладает более однородным распределением дислокаций по площади пластины. Что касается электрически активных комплексов EL2, то кристаллы, полученные ЛЕС-методом, имеют более однородное распределение этих дефектов и, как следствие, более однородное распределение удельного сопротивления по площади пластины [9, 10, 13, 17—19]. Кроме того, монокристаллы, выращенные методом ВНК, имеют более высокую себестоимость, чем выращенные методом ЛЕС. Это обусловлено в 4—5 раз меньшей скоростью кристаллизации и исключением операции повторного затравления. Именно поэтому современное развитие ВНК-метода идет в сторону применения группового выращивания для снижения удельной себестоимости выращенного кристалла. Сравнивая совокупность характеристик, присущих различным методам выращивания, можно полагать, что в ближайшие годы оба метода будут присутствовать на рынке [3, 8, 10—12, 20].

Методы горизонтальной и вертикальной направленной кристаллизации ис-

пользуются для получения монокристаллов GaAs с низкой плотностью дислокаций. Кристаллизация материала непосредственно в контейнере освобождает от необходимости поддерживать большие градиенты для формообразования кристалла. Главной тенденцией стало использование в промышленном производстве метода ВНК. Этим методом возможно получение как легированных монокристаллов GaAs(Si), так и получение нелегированного ПИ GaAs. Дополнительным следствием роста в условиях низких градиентов температуры (~1—10 °С) являются низкий уровень остаточных напряжений и большая механическая прочность кристаллов, что позволяет использовать более тонкие и дешевые пластины в производстве приборов [11, 15, 20, 21].

В производстве монокристаллов для оптоэлектроники альтернативы технологии ВНК уже не су-

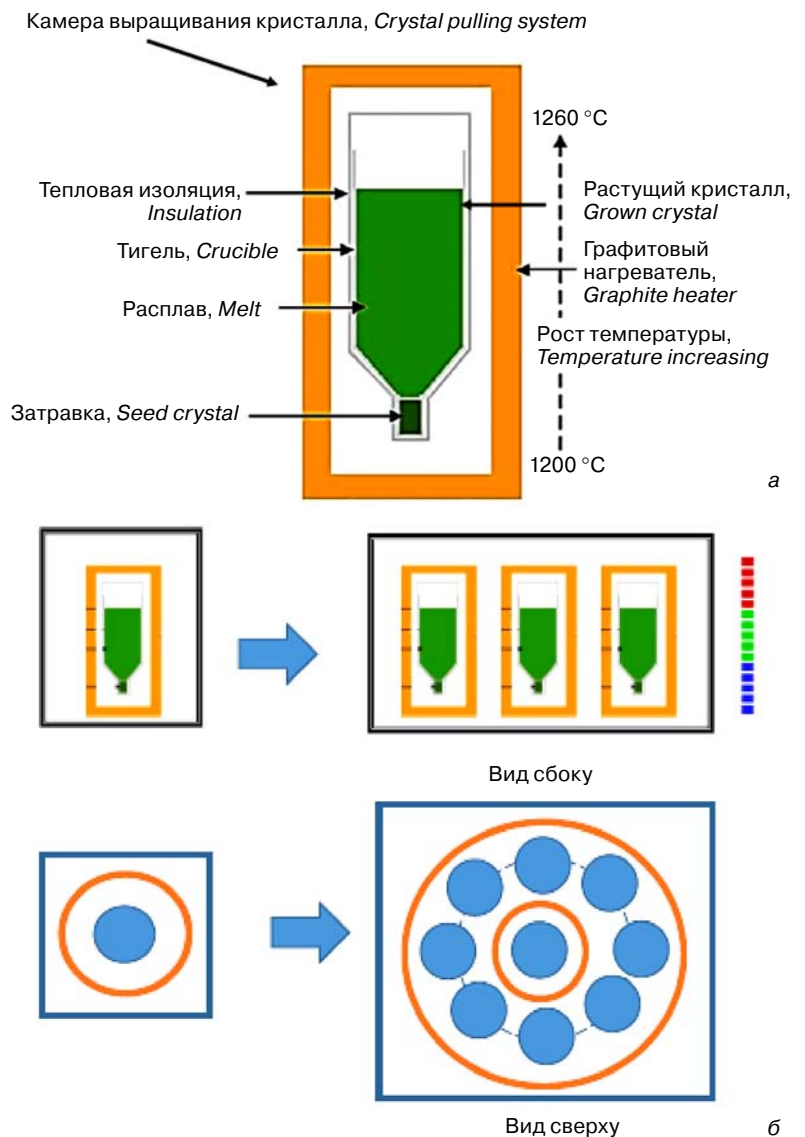


Рис. 5. Выращивание GaAs-методом VGF из-под флюса: а — принципиальная схема метода; б — тенденция развития — переход к групповому полунепрерывному выращиванию
 Fig. 5. Flux VGF GaAs technology: (a) general schematic and (b) transition to group semi-continuous growth

Применимость различных технологий выращивания GaAs [Application areas of different GaAs growth technologies]

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 или LEC
Лазерные диоды и светодиоды	Оптоэлектроника	ВНК

ществует. 90 % мирового производства ПП GaAs(Si) для оптоэлектроники производится методом ВНК (таблица).

Несмотря на высокие финансовые показатели мирового рынка арсенида галлия (рынок подложек GaAs в 2017 г., как ожидается, составит 650 млн долл. США и вырастет до ~800 млн долл. США к 2020 г.), в физических показателях мировой рынок монокристаллов арсенида галлия останется достаточно малым по мировым меркам (рис. 6). Его можно оценить в 800—900 т/год к 2020 г. [2, 20, 21].

Производство арсенида галлия в СССР и России

С конца 50–х годов прошлого века в Москве в Гиредмете (Государственный научно–исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности, ныне — предприятие госкорпорации «Росатом») были развернуты исследования по разработке технологий получения монокристаллов полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$, призванных обеспечить развитие элементной базы современной оптоэлектроники и СВЧ–техники. Остро стоял вопрос о разработке в кратчайшие сроки технологии получения монокристаллов арсенида галлия и об организации их крупномасштабного промышленного производства. Для решения этой

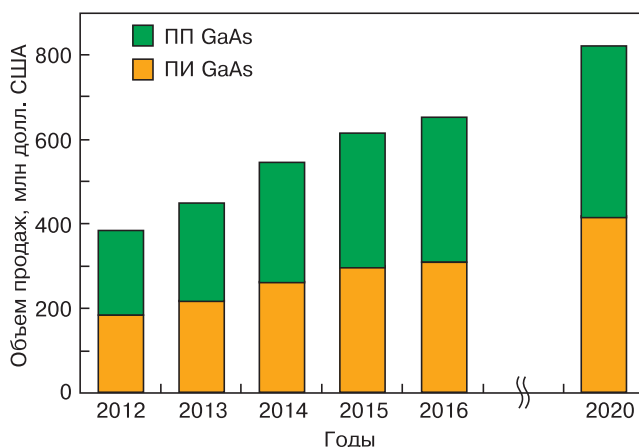


Рис. 6. Развитие рынка подложек GaAs и прогноз [3, 19]

Fig. 6. GaAs wafer market development and predictions [3, 19]

задачи в институте в 1963 г. была создана специализированная лаборатория. Потребовалось найти решение комплекса задач — от создания специализированного технологического оборудования, разработки методов контроля чистоты используемых материалов до контроля качества выращиваемых монокристаллов. Коллективом лаборатории был выполнен комплекс исследований физико–химических свойств GaAs, включающий изучение особенностей взаимодействия расплава с паровой фазой и различны-

ми контейнерными материалами; особенностей поведения легирующих примесей при выращивании монокристаллов, изучение фактов, определяющих устойчивый рост монокристаллов. Особое внимание было уделено изучению процессов дефектообразования, связанных с отклонением от стехиометрии, и условий выращивания однородных по свойствам монокристаллов. В результате к началу 70–х годов XX в. были разработаны высокоэффективные технологии синтеза арсенида галлия, выращивания монокристаллов методами горизонтальной направленной кристаллизации и Чохральского из–под слоя флюса, внедренные на Опытном химико–металлургическом заводе Гиредмета (ОХМЗ, г. Подольск, Московская область) и Заводе чистых металлов (ЗЧМ, г. Светловодск, Украина). В 1975 г. за разработку технологии и организацию промышленного производства монокристаллов арсенида галлия группа сотрудников Гиредмета, ЗЧМ и ОХМЗ была удостоена Государственной премии СССР. В последующие годы, в соответствии с общемировыми тенденциями, основное внимание было сосредоточено на совершенствовании технологии получения полуизолирующего GaAs и сильно легированных монокристаллов с низкой плотностью дислокаций для производства оптоэлектронных приборов, прежде всего светодиодов и лазеров. При этом одновременно решалась задача увеличения диаметра выращиваемых кристаллов GaAs. Была изучена роль фоновых примесей в достижении полуизолирующих свойств в монокристаллах GaAs выявлено существенное влияние плотности и характера распределения дислокаций на свойства в объеме выращиваемых кристаллов [6].

Одним из наиболее серьезных достижений начала 2000–х годов явилась разработка технологии и оборудования выращивания однородных и малодислокационных полуизолирующих и сильнолегированных монокристаллов диаметром до 75–80 мм методом вертикальной направленной кристаллизации. Разработанные в Гиредмете технологии обеспечивают получение монокристаллов арсенида галлия с качественными характеристиками, отвечающими всем требованиям отечественных производителей СВЧ– и оптоэлектронных приборов на GaAs.



Рис. 7. Установка выращивания GaAs LED–методом Чохральского (а) и станок полировки подложек GaAs (б)

Fig. 7. (a) Cz GaAs LED growth plant and (б) GaAs wafer polishing machine

Активную роль в решении проблемы GaAs сыграли М. Г. Мильвидский, В. Б. Освенский, А. В. Марков, В. В. Раков, И. Н. Шершакова, О. В. Пелевин, Л. П. Александрова, Б. И. Абаев и ряд других сотрудников института, а также сотрудники ЗЧМ во главе с директором ЗЧМ А. М. Тузовским.

В настоящее время АО «Гиредмет» продолжает разрабатывать технологии выращивания монокристаллов арсенида галлия больших диаметров, с последующей организацией промышленного производства. Создан участок механической обработки полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ с целью получения пластин. Закуплено оборудование и отработана технология проволочной резки и шлифовки пластин (рис. 7).

Сегодня в России крайне необходимо организовать промышленное производство монокристаллов и пластин ПП– и ПИ–GaAs [19]. С 2015 г. появляется ряд проектов — создание Центра коллективного пользования «Материалы для электроники», совместные проекты МИЭТ, НИИ материаловедения, НИИ особо чистых материалов, Росэлектроники и другие проекты. Проекты находятся в различной стадии готовности [7, 22].

Заключение

На сегодня мировой рынок монокристаллов и пластин GaAs характеризуется сравнительно небольшим объемом, высокой концентрацией производственных мощностей в Китае, наличием крупных игроков, способных пережить неблагоприятную конъюнктуру. Российский рынок специальных полупроводниковых материалов (GaAs и др.) имеет

небольшой по мировым меркам объем. С 2015 г. появляются проекты под эгидой Росэлектроники по производству пластин GaAs.

Однако существует понимание, что для выполнения программ импортозамещения и создания современной электронной компонентной базы в России необходимо развивать производства особо чистых соединений и исходных компонентов.

Библиографический список

1. Викулов, И. Н. GaN–технология — новый этап развития СВЧ–микросхем / И. Н. Викулов, Н. А. Кичаева // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2007. – № 4. – С. 80–85.
2. Гасанов, А. А. Современное состояние мирового рынка мышьяка и его соединений / А. А. Гасанов, Е. Е. Гринберг, А. В. Наумов // Вестн. РАЕН. – 2016. – № 1. – С. 25–32. DOI: 10.17073/0021-3438-2016-5-24-34
3. GaAs wafer market to exceed \$650 m by 2017 // Semiconductor today. – 2012. – V. 7, iss. 3. – P. 100–101. URL: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2012/APRIL/YOLE_170412.html (дата обращения: 21.04.2016)
4. Кищинский, А. В. Широкополосные транзисторные усилители СВЧ–диапазона: смена поколений / А. В. Кищинский // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2010. – № 2. – С. 5–10.
5. Лаврентьев, М. А. Новое поколение твердотельных усилителей мощности GaN НЕМТ в системах спутниковой связи и вещания / М. А. Лаврентьев, Д. Ю. Гелерман // Первая миля. – 2013. – № 2. – С. 18–21.
6. Гиредмет–85 лет, наша история / Под ред. Ю. Н. Пархоменко. – М., 2016. – 144 с.
7. Новые проекты Зеленоградского кластера. URL: <http://www.russianelectronics.ru/developer-r/news/russianmarket/doc/73391/> (дата обращения: 21.09.2016)
8. Наумов, А. В. Обзор мирового рынка арсенида галлия / А. В. Наумов // Изв. вузов. Материалы электронной техники. – 2005. – № 2. – С. 20–25.
9. LED suppliers to accelerate expansion into niche markets in 2017. URL: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2016/dec/ledinside_221216.shtml (дата обращения: 21.09.2016)
10. Марков, А. В. Монокристаллы полупроводниковых соединений III–V: современное производство и перспективы его развития / А. В. Марков // Изв. вузов. Физика. – 2003. – № 6. – С. 5–11.
11. GaAs bulk substrate market revenue shrank 8% in 2013. URL: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2014/JUL/STRATEGYANALYTICS_210714.shtml (дата обращения: 21.04.2016)
12. Compound semiconductor industry continues growth // Semiconductor Today. Compounds&Advanced Silicon. – 2011. – V. 6, iss. 5. – P. 114–117. URL: http://www.semiconductor-today.com/features/PDF/SemiconductorToday_JunJul_MANTECH.pdf (дата обращения: 21.04.2016)
13. The GaAs revolution. URL: <http://www.compoundsemiconductor.net/article/97973-the-gaas-revolution.html> (дата обращения: 21.10.2016)
14. Наумов, А. В. Современное состояние мирового рынка галлия / А. В. Наумов // Изв. вузов. Цветная металлургия. – 2014. – Т. 55, № 3. – С. 59–64. DOI: 10.17073/0021-3438-2014-2-59-64
15. Zhang, Jie. Gallium arsenide industry development study current climate and future prospects for the gallium market / Jie Zhang // Electronic Metals Conf. – Guangzhou (China), 2012. URL: <http://conferences.metal-pages.com/papers/electronic-metals-2012/> (дата обращения: 21.04.2016)
16. Military GaAs device market to grow at CAGR of 13% to over \$0.5bn by 2018. URL: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2014/OCT/STRATEGY-ANALYTICS_161014.shtml (дата обращения: 21.04.2016)

17. Market trends in GaAs RF ICs. URL: http://www.semiconductor-today.com/features/PDF/SemiconductorToday_AprMay2011_SAGaAs.pdf (дата обращения: 21.12.2015)

18. RF power semiconductor market growing at 9.8% CAGR from \$1.5bn in 2016 to \$2.5bn in 2022. URL: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2017/jul/yole_110717.shtml (дата обращения: 01.08.17)

19. GaAs component market to grow at over 4% to \$9.13bn in 2021. URL: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2017/jan/technavio_130117.shtml (дата обращения: 01.08.17)

20. GaAs epi production to grow from 29,000 to 31,600 ksi over 2012–2017. URL: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2013/OCT/STRATEGY-ANALYTICS2_041013.shtml (дата обращения: 21.10.2016)

21. Gallium demand to grow at 6% annually to 420t in 2020. URL: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2016/oct/merchantresearch_241016.shtml (дата обращения: 21.10.2016)

22. Ради российской электроники разовьют производство мышьяка. URL: <http://www.business-vector.info/?p=28933#respond> (дата обращения: 21.09.2016)

ISSN 1609–3577 Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki = Materials of Electronic Technics. 2016, vol. 19, no. 3, pp. 156–162.

GaAs single crystals market: development trends

E. P. Majanov¹, S. N. Kniazev¹, A. V. Naumov¹

¹Federal State Research and Design Institute of Rare Metals Industry «Giredmet»,
5–1 B. Tolmachevsky Per., Moscow 119017, Russia

Abstract. A review of the current state of the GaAs market as well as the state and the prospects of the Russian market have been provided. A brief analysis of the current state of RF–devices has been given. The dynamics of world GaAs production and prices for the recent years have been reported. Methods of single crystal GaAs growth and tendencies of growth technology development have been described. The market of GaAs substrates, as expected, will amount to 3.6 million sq. inches and \$650 million by 2017. Despite the high financial performance of the gallium arsenide market, the physical indicators of the world single-crystal GaAs market will remain rather small compared to worldwide figures, i.e. ~ 800 t/year by 2020. At the moment, the world market of GaAs single crystals and wafers exhibits a comparatively small volume, high concentration of production capacities in China and the presence of major players capable to endure adverse conditions. Russian market of special semiconductor materials (GaAs, etc.) has a volume that is small compared to worldwide figures. However, there is an understanding that the implementation of import substitution programs and the development of advanced electronic component base in Russia require the fabrication facilities for high purity compounds and initial components. Since 2015 GaAs plate production projects have emerged under the auspices of Roselektronika.

Keywords: gallium, arsenic, market, prices, demand, consumption, raw reserves, high purity gallium and arsenic, gallium arsenide

References

- Vikulov I. N., Kichaeva N. A. GaN–technology — a new stage in the development of RF–IC. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes*, 2007, no. 4, pp. 80–85. (In Russ.)
- Hasanov A. A., Grinberg E. E., Naumov A. V. Modern state of the world market of arsenic and its compounds. *Vestnik RAEN*, 2016, no. 1, pp. 25–32. (In Russ.). DOI: 10.17073/0021-3438-2016-5-24-34
- GaAs wafer market to exceed \$650 m by 2017. *Semiconductor Today*, 2012, vol. 7, no. 3, pp. 100–101. URL: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2012/APRIL/YOLE_170412.html (accessed: 21.04.2016)
- 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.)
- Lavrent'ev M. A., Gelerman D. Yu. A new generation of solid–state GaN HEMT power amplifiers in satellite communications and broadcasting systems. *Pervaya milya*. 2013, no. 2, pp. 18–21. (In Russ.)
- Giredmet–85 let, nasha istoriya [Giredmet–85 years old, our history]. Moscow, 2016. 144 p. (In Russ.)

Evgeny P. Majanov¹ — General Director (pyn@giredmet.ru); **Stanislav N. Kniazev¹** — Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Head of the Department GaAs monocrystals (sn.kniazev@yandex.ru); **Arkady V. Naumov¹** — Senior Researcher, Analyst–Researcher (naumov_arkadii@mail.ru)

7. New projects of Zelenograd cluster. URL: <http://www.russianelectronics.ru/developer-r/news/russianmarket/doc/73391/> (accessed: 21.09.2016) (In Russ.)

8. Naumov A. V. The review of the world market of arsenide of gallium. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki = Materials of Electronic Technics*, 2005, no. 2, pp. 20–25 (In Russ.)

9. LED suppliers to accelerate expansion into niche markets in 2017. URL: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2016/dec/ledinside_221216.shtml (accessed: 21.09.2016)

10. 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.)

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

12. Compound semiconductor industry continues growth. *Semiconductor Today. Compounds&Advanced Silicon*. 2011, vol. 6, no. 5, pp. 114–117. URL: http://www.semiconductor-today.com/features/PDF/SemiconductorToday_JunJul_MANTECH.pdf (accessed: 21.04.2016)

13. The GaAs revolution. URL: <http://www.compoundsemiconductor.net/article/97973-the-gaas-revolution.html> (accessed: 21.10.2016)

14. Naumov A. V. On current state of world gallium market. *Izvestiya Vuzov Tsvetnaya Metallurgiya = Proceedings of Higher Schools Nonferrous Metallurgy*. 2014, vol. 55, no. 2, pp. 59–64. (In Russ.). DOI: 10.17073/0021-3438-2014-2-59-64

15. Zhang Jie. Gallium arsenide industry development study current climate and future prospects for the gallium market. *Electronic Metals Conf. Guangzhou (China)*, 2012. URL: <http://conferences.metal-pages.com/papers/electronic-metals-2012/> (accessed: 21.04.2016)

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

17. Market trends in GaAs RF ICs. URL: http://www.semiconductor-today.com/features/PDF/SemiconductorToday_AprMay2011_SAGaAs.pdf (accessed: 21.12.2015)

18. RF power semiconductor market growing at 9.8% CAGR from \$1.5bn in 2016 to \$2.5bn in 2022. URL: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2017/jul/yole_110717.shtml (accessed: 01.08.17)

19. GaAs component market to grow at over 4% to \$9.13bn in 2021. URL: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2017/jan/technavio_130117.shtml (accessed: 01.08.17)

20. GaAs epi production to grow from 29,000 to 31,600 ksi over 2012–2017. URL: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2013/OCT/STRATEGY-ANALYTICS2_041013.shtml (accessed: 21.10.2016)

21. Gallium demand to grow at 6% annually to 420t in 2020. URL: http://www.semiconductor-today.com/news_items/2016/oct/merchantresearch_241016.shtml (accessed: 21.10.2016)

22. For the sake of Russian electronics will develop the production of arsenic. URL: <http://www.business-vector.info/?p=28933#respond> (accessed: 21.09.2016). (In Russ.)