

Тенденции развития рынка монокристаллов GaAs

Е. Маянов¹, А. Гасанов¹, С. Князев¹, А. Наумов¹

УДК 621.315.592 | ВАК 05.27.06

Журнал «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» ранее обращался к базовым вопросам полупроводникового производства – методам получения объемных монокристаллов (прежде всего кремния и германия), на страницах издания анализировалось современное состояние дел в этой сфере в мире и России [1, 2]. Настоящий обзор мирового и российского рынка арсенида галлия – основного материала современной СВЧ-техники – приурочен к 55-летию организации первой в СССР отраслевой лаборатории арсенида галлия в институте Гиредмет.

ИСТОРИЯ ПОЯВЛЕНИЯ GaAs

Арсенид галлия (GaAs) занимает первую строчку в перечне всех полупроводниковых соединений как по масштабам производства, так и по широте использования в различных сферах. В начале 1960-х годов появились первые оптоэлектронные приборы на основе GaAs – светодиоды (СД) для применения, например, в дисплеях кварцевых часов. В середине 1960-х под эгидой US Department of defense (DoD) начались исследования свойств GaAs и возможности использования арсенида галлия в интегральных схемах (ИС), которые завершились созданием быстродействующих ИС для интеллектуальных систем управления военной техникой и суперкомпьютеров. В начале 1990-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).

В развитии мирового производства монокристаллического GaAs с 1960-х годов по настоящее время можно выделить два периода. **Первый** – военно-промышленный (от начала массовых разработок в середине 1960-х годов до окончания холодной войны на рубеже 1980–1990-х), когда основной движущей силой развития технологий были потребности производителей военной техники. В середине 1980-х годов свыше 90% всего мирового объема производства GaAs использовалось в военной технике. Каковы итоги военно-промышленного периода развития? Были определены сферы применения монокристаллов арсенида галлия, выбраны и освоены основные технологии получения монокристаллов, создана развитая промышленная инфраструктура для массового производства.

Второй период развития – гражданский (от начала 1990-х годов до наших дней) – характеризуется

преимущественным использованием монокристаллов арсенида галлия в гражданской продукции. Первой массовой сферой применения стала мобильная телефония: и в базовых станциях, и в мобильных телефонах используются ИС на основе GaAs. Это дало мощный толчок развитию отрасли. В настоящее время только 6–8% всего производимого в мире арсенида галлия потребляется в оборонных сегментах промышленности. Гражданский этап привел к смене философии развития: от требования «рекордные параметры любой ценой» к парадигме «требуемое качество с минимальными издержками».

Переход к экономически эффективному производству потребовал от производителей немалых усилий, прежде всего значительного увеличения производственных мощностей. Начался быстрый рост производства – за десять лет (1990–1999 гг.) объем производства увеличился более чем в два раза, и к 2000 году достиг 235 млн долл. В 2017 году, по предварительным данным, рынок подложек GaAs составил около 650 млн долл.

Наращивание производственных мощностей в начале 1990-х годов было профинансировано преимущественно из госбюджетов ведущих стран. Адресная государственная поддержка привела к переделу рынка в начале 1990-х годов: сформировалась относительно небольшая группа компаний (в основном в США, Японии, ФРГ), на долю которых приходилось около 90% мирового объема производства арсенида галлия. США – Litton Airtron, M/A-COM Inc., American Xtal Technology (AXT), Япония – Sumitomo Electric Industries (SEI), Hitachi Cable, Mitsubishi Chemical Corporation, ФРГ – Freiberger Compound Materials (FCM).

В 2000–2001 годах разразился первый в истории развития технологии GaAs кризис перепроизводства. Кризис возник в результате совпадения по времени внутриотраслевых проблем (вызванных прежде всего

¹ АО «Гиредмет».



Рис. 1. Развитие рынка приборов на GaAs в 1990–2016 годах (млрд долл.) и прогноз на 2021 год. *Источник: Strategy Analytics' Advanced Semiconductor Applications. 2017 год*

ошибочным прогнозом применения мобильной связи как основного источника спроса на аналоговые СВЧ-микросхемы на основе GaAs) и общего экономического

кризиса того времени, сильнее всего затронувшего именно ИТ-индустрию («доткомовский» кризис). Так, если в 2000 году рост продаж GaAs составил более 60%,

то уже к концу 2000 года стало ясно, что реальное потребление арсенида галлия не превысит 65% от реализованного и что по всей цепочке от производителей материалов до производителей ИС накоплены огромные складские запасы. Как следствие, по итогам 2001 года производство арсенида галлия сократилось примерно на 40% (рис. 1). Спад наблюдался до 2005 года.

Главной особенностью периода восстановления и роста, который продолжался с 2005 по 2011 год, стал выход на рынок ряда новых производителей, почти исключительно китайских. Предприятия Китая того времени были сосредоточены в основном на производстве монокристаллов арсенида галлия для оптоэлектроники как наиболее быстро растущего сегмента потребления.

Современное производство приборов на основе арсенида галлия четко структурировано по областям применения и по видам используемого материала.

Основные области применения арсенида галлия:

- приборы СВЧ-микросхемотехники (цифровые и аналоговые интегральные схемы, дискретные полевые транзисторы и диоды Ганна);
- оптоэлектронные приборы (светодиоды, фотоприемники и лазеры инфракрасного и красного диапазонов спектра);
- производство оптики (окна, линзы и т. п.) для лазеров.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА GaAs СВЧ-микросхемотехника

Полевые транзисторы с однородным легированием на арсениде галлия (GaAs MESFET) в 20 веке были наиболее массовыми приборами для широкополосных усилителей СВЧ-диапазона. Они отличались высокими надежностью и 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 частотному диапазону, КПД и усилению. Технология GaAs гетероструктурных полевых транзисторов (HFET) обеспечивает высокие пробивные напряжения (22–25 В), КПД (до 55%) и хорошую линейность передаточной характеристики. В текущем десятилетии GaAs псевдоморфные гетероструктурные полевые транзисторы (GaAs pHEMT) стали самыми массовыми. По мере промышленного освоения технологических процессов обработки пластин диаметром до 150 мм снижалась стоимость pHEMT-приборов с длиной затвора 0,1–0,25 мкм, что стимулировало их распространение во все сферы применения: от мобильных телефонов и базовых станций до радаров,

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

Сегодня основные производители полупроводниковых изделий из GaAs – это компании RFMD и Skyworks, Avago Technologies, TriQuint, SEI (Sumitomo Electric Industries), Sony, Panasonic и Mitsubishi Electric, Win Semiconductor (Тайвань). Характеристики СВЧ ИС (рабочая частота f) для различных технологий приведены на рис. 2.

Полированные пластины GaAs стандартных размеров являются той товарной продукцией, в виде которой арсенид галлия и реализуется на рынке. В массовом производстве GaAs в настоящее время наблюдается паритет пластин диаметром 100 и 150 мм, доля пластин диаметром 2 и 3 дюйма не превышает 5–6%.

Спецификой российского рынка является низкая по сравнению с мировой доля гражданского рынка микросхемотехники. 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. Мощные транзисторы и ИС по этой технологии выпускаются рядом

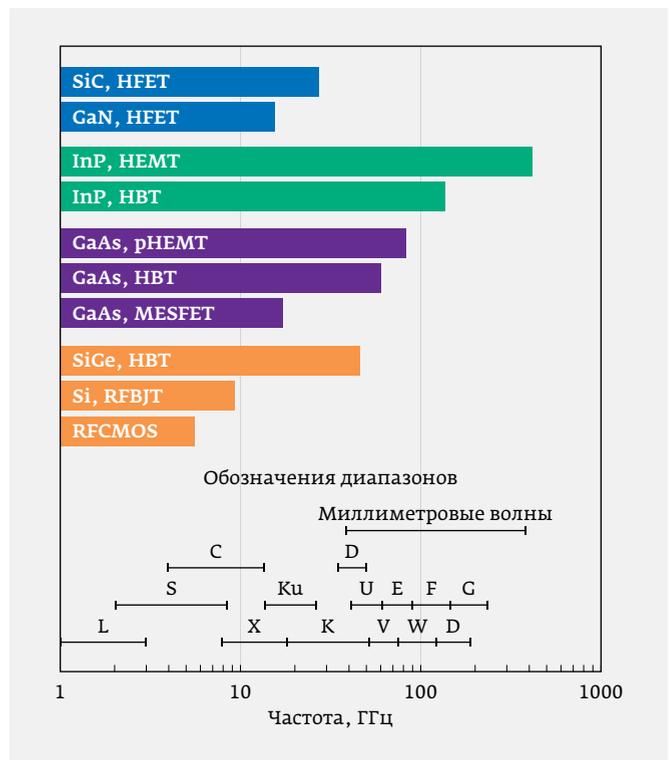


Рис. 2. Характеристики СВЧ ИС (рабочая частота f) для различных технологий

российских производителей (НПП «Пульсар», НПП «Исток», АО «Октава»). На отечественных предприятиях разработка, проектирование и промышленный выпуск ИС чаще всего реализуются в рамках одной крупной компании. В нашей стране промышленно выпускаемые и разрабатываемые СВЧ ИС на частоты выше 6 ГГц базируются на полевых транзисторах MESFET. В настоящее время ряд российских предприятий продолжает разработку и налаживает выпуск более современных СВЧ ИС, преимущественно для нужд оборонно-промышленного комплекса. Проекты находятся в различной стадии готовности [3, 4].

Светодиоды

На основе арсенида галлия также изготавливаются светодиоды. СД состоит из эпитаксиальных слоев GaAlAs, GaAsP или InGaAsP на подложке GaAs (рис. 3). До 1980-х годов низкая яркость, отсутствие СД синего и белого цветов, высокие затраты на производство ограничивали их применение – СД использовали только в наружных электронных табло, в системах регулирования дорожного движения, в оптоволоконных системах передачи данных и медицинском оборудовании. Появление сверхъярких, а также синих (в середине 1990-х годов) и белых СД (в начале 21 века), постоянное снижение стоимости позволили применять СД в качестве индикаторов режимов работы электронных устройств для жидкокристаллических экранов различных приборов.

Начался новый этап развития светодиодной индустрии, обусловленный выбором ярких и сверхъярких СД для создания систем общего освещения нового поколения, где они заменяют традиционные лампы накаливания и люминесцентные лампы.

Особенностью производства оптоэлектронных приборов по сравнению с производством СВЧ ИС является то, что преобладающая часть себестоимости прибора приходится на операции, выполняемые после разделения структуры на отдельные чипы. Соответственно, при

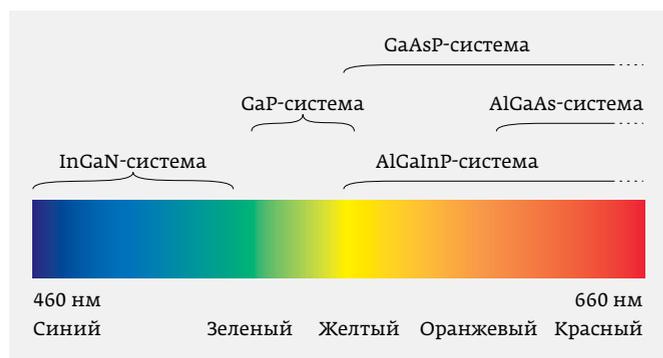


Рис. 3. Системы на основе GaAs для СД различных цветов

производстве оптоэлектронных приборов увеличение площади пластин не столь актуально. Вследствие этого в мировой индустрии светодиодов и лазеров до сих пор в больших объемах используются пластины диаметром 2 дюйма, несмотря на то, что промышленностью освоено производство монокристаллов с низкой плотностью дислокаций диаметром 100–150 мм, а в опытном производстве – 200 мм.

ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ GaAs И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

В настоящее время существует несколько видов монокристаллов GaAs.

- **Полуизолирующий (ПИ) GaAs** с высоким удельным сопротивлением ($10^7 \text{ Ом} \cdot \text{см}$). Он используется при изготовлении высокочастотных ИС и дискретных микроэлектронных приборов. 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.
- **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. Пригодными для производства светодиодов считаются монокристаллы с $N_D < 10^4 \text{ см}^{-2}$, а для лазеров – с $N_D < 2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$. ПП GaAs используется в оптоэлектронике для изготовления инжекционных лазеров, свето- и фотодиодов, фотокатодов, служит материалом для генераторов СВЧ-колебаний, применяется для изготовления туннельных диодов.
- **Монокристаллы арсенида галлия, легированные хромом**, используют в инфракрасной оптике. Кроме того, монокристаллы GaAs, легированные цинком или теллуром, применяют в производстве оптоэлектронных приборов.

Основными производителями кристаллов и пластин GaAs являются Sumitomo Electric, Hitachi Cable и DOWA (Япония), Freiburger (Германия), АХТ (США), Neosemitech Corporation, Waferkorea (Ю. Корея), China Crystal Technology, Tianjin Jingming Electronic, Yunnan Germanium, GRINM Electro-optic Materials, Kunshan Dingjing Gallium, Xinxiang Shenzhou Technology (Китай) и ряд других.

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) [5, 6].

МЕТОД ЧОХРАЛЬСКОГО

В настоящее время основной вариант технологии LEC – совмещенный процесс синтеза GaAs и выращивания монокристалла в установке «высокого давления» (HP LEC с рабочим давлением 60–70 атм (атмосфер) при синтезе и 20–30 атм при выращивании). Следует отметить, что, в отличие от ситуации 1980-х – начала 1990-х годов, когда в массовом производстве доминировали ростовые установки, выпущенные специализированными машиностроительными фирмами, сегодня ведущие производители, как правило, используют ростовые установки собственной разработки (рис. 4).

Для обеспечения необходимых электрофизических параметров применяются галлий и мышьяк чистотой не менее 6N–7N, тигли из пиролитического нитрида бора. Особенность метода – 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).

По мере увеличения диаметра пластин GaAs (от 50 до 150 мм) постоянно снижаются затраты на производство – как минимум на 20–25% при каждом переходе на больший диаметр. Динамика развития метода в части увеличения загрузки и диаметра выращиваемого кристалла приведена на рис. 5. Промышленность сегодня использует преимущественно пластины диаметром 150 мм. Прогнозируется, что такая тенденция продолжится до 2020 года благодаря значительным инвестициям, осуществленным такими крупными производителями, как WIN Semiconductor (Тайвань), в модернизацию и строительство новых фабрик для 150-мм

пластин. Однако отрасль движется в сторону развития технологии пластин диаметром 200 мм (8 дюймов), опытное производство, как ожидается, появится к концу 2018 года. Исследователи из Стэнфордского университета работают над созданием производственного процесса на 200-мм пластине GaAs.

МЕТОДЫ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Широко используется метод горизонтальной направленной кристаллизации (ГНК) в вариантах «по Бриджмену» (Horizontal Bridgman – HB), или «кристаллизации в движущемся градиенте температуры» (Horizontal Gradient Freeze – HGF), и метод вертикальной направленной кристаллизации (ВНК) в тех же вариантах (Vertical Bridgman – VB и Vertical Gradient Freeze – VGF).

В последние годы широкое распространение получил метод ВНК. Кристаллизация расплава в тигле цилиндрической формы и в направлении <100> устраняет проблемы, присущие методу ГНК, сохраняя вместе с тем возможность проведения процесса при очень низких температурных градиентах у фронта кристаллизации (–1–10 °С/см).



Рис. 4. Получение монокристаллов GaAs методом Чохральского: а – принципиальная схема, б – внешний вид установки выращивания

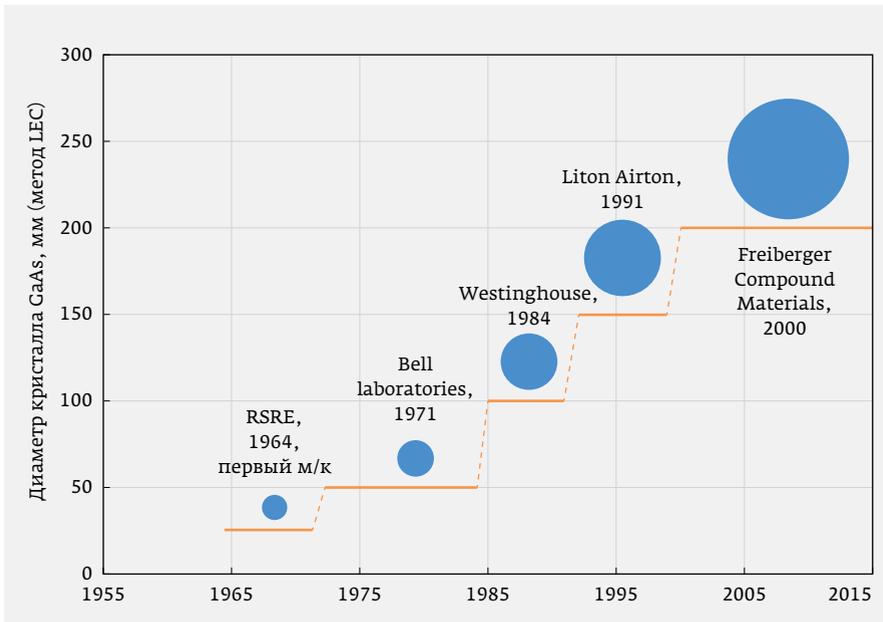


Рис. 5. Динамика развития выращивания GaAs методом Чохральского из-под флюса (LEC) – рост массы и диаметра слитка

К настоящему времени такой технологией владеют почти все ведущие производители GaAs. Первоначально технология ВНК развивалась в обоих вариантах (VGF – кристаллизация в движущемся температурном поле при неподвижном тигле, VB – кристаллизация за счет перемещения тигля через область температурного градиента). Сейчас предпочтение отдается методу VGF.

Применение в технологии ВНК тиглей из пиролитического нитрида бора позволяет получать не только сильно легированный материал, но и нелегированный полуизолирующий арсенид галлия. В оборудовании закрытого типа используются те же способы регулирования содержания фонового углерода, что и в методе LEC. Получаемый на основе ВНК полуизолирующий арсенид галлия по уровню содержания фоновых примесей и электрофизическим параметрам практически не отличается от материала, изготавливаемого по LEC-технологии. Типичные значения подвижности для ПИ-материала составляют $(6-8) \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$.

Кристаллы ПИ GaAs, изготавливаемые по технологии ВНК, отличаются от аналогичных кристаллов, полученных по технологии LEC, уровнем совершенства кристаллической структуры. Для кристаллов диаметром 100 и 150 мм величина плотности дислокаций находится на уровне $< 5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$ и менее (AXT, Freiberg Compound Materials). Интересно отметить, что для технологии ВНК не характерна присущая методу LEC сильная зависимость уровня плотности дислокаций от диаметра слитка: величина $N_D < 5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$ характерна и для нелегированных кристаллов диаметром 2 и 4 дюйма.

Причина, по всей видимости, заключается в том, что в методе LEC дислокационная структура формируется преимущественно под действием высоких термоупругих напряжений, в то время как в методе ВНК уровень термоупругих напряжений низкий, и структура формируется под действием других факторов. Дополнительным следствием роста ВНК-кристаллов в условиях малых температурных градиентов являются низкий уровень остаточных напряжений и, соответственно, более высокая механическая прочность монокристаллов. В частности, это позволяет использовать при производстве приборов более тонкие, а значит, более дешевые пластины.

Очевидным конкурентным преимуществом технологии ВНК является то, что оборудование для

выращивания монокристаллов по этой технологии в пять-семь раз дешевле установок «высокого давления», применяемых для метода LEC, занимает значительно меньше места и, кроме того (что очень важно), позволяет производителю выращивать монокристаллы как ПИ GaAs, так и легированного GaAs, гибко реагируя на изменения спроса.

Как и в случае с технологией LEC, основной доминантой развития технологии ВНК является повышение производительности ростового оборудования – увеличение длины слитков диаметром 2–3 дюйма для оптоэлектроники (компания Hitachi Cable выпускает слитки диаметром 3 дюйма длиной свыше 300 мм) и диаметра слитков нелегированного GaAs (компания FCM продемонстрировала наличие технологий, позволяющих выращивать слитки диаметром 150 и 200 мм весом до 30 кг). Ситуация изменилась кардинально с появлением многотигельных установок роста, когда под колпаком одной установки располагаются шесть и более тиглей, каждый в своем контейнере с независимо регулируемой температурой. Тенденция последних лет в развитии метода VGN – переход к групповому выращиванию (рис. 6).

В настоящее время по этой технологии получают слитки «оптоэлектронного» качества диаметром от 2 до 8 дюймов. Производство пластин из монокристаллов арсенида галлия, выращенных по методу VCF, занимает до 70% всего рынка этой продукции.

Несмотря на высокие финансовые показатели рынка арсенида галлия (рынок подложек GaAs в 2017 году, по

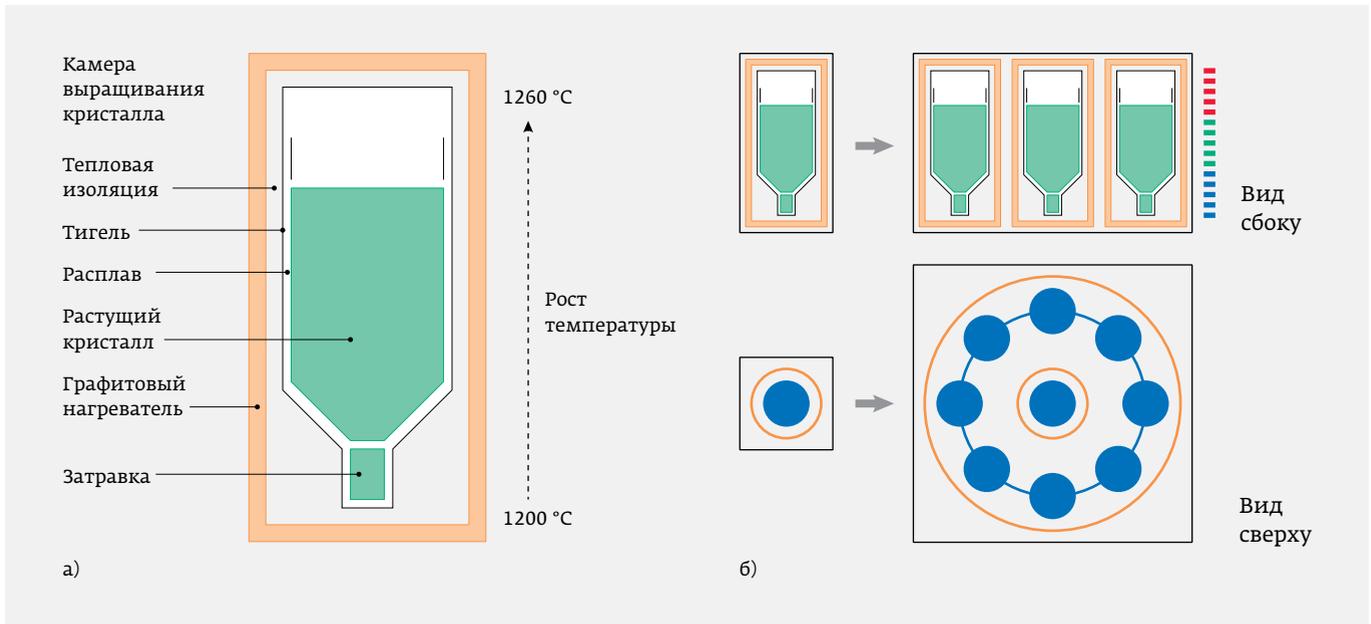


Рис. 6. Выращивание GaAs по методу VGH из-под флюса: принципиальная схема метода (а), тенденция развития – переход к групповому выращиванию (б)

предварительным данным, составил 650 млн долл. и увеличится до ~800 млн долл. к 2020 году), в физических показателях рынок монокристаллов арсенида галлия останется достаточно скромным по мировым меркам (рис. 7). Его можно оценить в 800–900 т / год к 2020 году.

ПРОИЗВОДСТВО АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ В СССР И РОССИИ

С конца 1950-х годов прошлого века в Москве в Государственном научно-исследовательском и проектно-институте редкометаллической промышленности (Гиредмет), ныне – предприятие Госкорпорации «Росатом»,

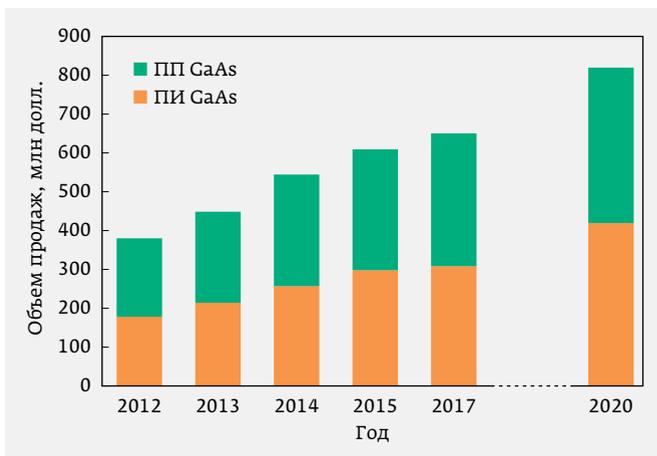


Рис. 7. Развитие рынка подложек GaAs и прогноз.

Источник: Strategy Analytics, оценки авторов

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 стояли вопросы создания в кратчайшие сроки технологии получения монокристаллов арсенида галлия и организации их крупномасштабного промышленного производства. В 1963 году в институте открылась специализированная лаборатория. Специалистам нужно было найти решение широкого круга задач – от создания специализированного технологического оборудования, разработки методов контроля чистоты используемых материалов до контроля качества выращиваемых монокристаллов. Коллектив лаборатории выполнил комплекс исследований физико-химических свойств GaAs, включающий изучение особенностей взаимодействия расплава с паровой фазой и различными контейнерными материалами, особенностей поведения легирующих примесей при выращивании монокристаллов, изучение фактов, определяющих устойчивый рост монокристаллов. Особое внимание было уделено исследованию процессов дефектообразования, связанных с отклонением от стехиометрии, и изучению условий выращивания однородных по свойствам монокристаллов.

К началу 1970-х годов были разработаны высокоэффективные технологии синтеза арсенида галлия, выращивания монокристаллов методом Чохральского из-под слоя флюса и горизонтальной направленной кристаллизации и внедрены на Опытном химико-металлургическом

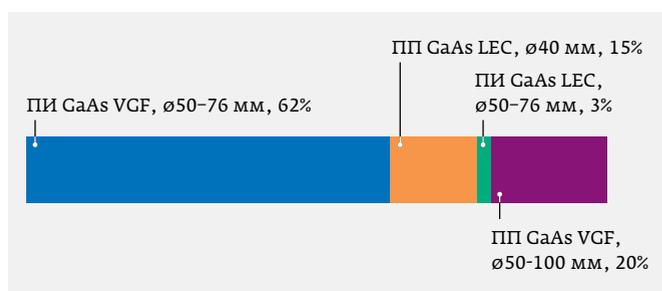


Рис. 8. Структура импорта монокристаллов/подложек арсенида галлия в России в последние годы. По данным ФТС РФ

заводе Гиредмета (ОХМЗ, г. Подольск Московской обл.) и Заводе чистых металлов (ЗЧМ, г. Светловодск, Украина). В 1975 году 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 полупроводящего 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 полупроводящих свойств в монокристаллах GaAs, выявлено значительное влияние плотности и характера распределения дислокаций на свойства в объеме выращиваемых кристаллов. Разработанные в Гиредмете технологии обеспечивают получение монокристаллов арсенида галлия с качественными характеристиками, отвечающими всем требованиям отечественных производителей оптоэлектронных и СВЧ-приборов на основе GaAs. Большую роль в решении проблемы GaAs сыграли Л. П. Александрова, М. Г. Мильвидский, В. В. Раков, И. Н. Шершакова, О. В. Пелевин, Б. И. Абаев, В. В. Освенский, А. В. Марков и ряд других сотрудников института, а также сотрудники Завода чистых металлов под руководством директора А. М. Тузовского.

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 $A^{III}B^V$ в целях получения пластин. Закуплено оборудование и отработана технология проволоочной резки и шлифовки пластин [7].

Сегодня в России крайне необходимо организовать промышленное производство монокристаллов

и пластин ПП и ПИ GaAs. Структура импорта монокристаллов / подложек арсенида галлия в России в последние годы (по данным ФТС РФ) показана на рис. 8. С 2015 года реализуется ряд проектов – создание Центра коллективного пользования «Материалы для электроники», совместные проекты МИЭТ, НИИ материаловедения, НИИ особо чистых материалов, Росэлектроники и др. Начатые проекты находятся в различной стадии готовности.

* * *

В настоящее время 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.) отличается незначительным по мировым меркам объемом. С 2015 года под эгидой «Росэлектроники» реализуется несколько проектов по производству пластин GaAs.

Для выполнения принятых программ импортозамещения и создания современной электронной компонентной базы в России необходимо развивать производство как полупроводниковых соединений, так и исходных особо чистых компонентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Наумов А.** Метод создания Мира. К 100-летию открытия метода Чохральского и 60-летию получения первого кристалла германия в России // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2016. № 9. С. 157–167.
2. **Маянов Е., Пархоменко Ю., Наумов А.** Краеугольный кремний: промышленное полупроводниковое материаловедение в России // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2017. № 4. С. 98–104.
3. **Кищинский А. В.** Широкополосные транзисторные усилители СВЧ-диапазона: смена поколений // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2010. №2. С. 5–10.
4. **Кульчицкий Н. А., Маянов Е. П., Наумов А. В.** Арсенид галлия и приборы нано-, микро- и оптоэлектроники на его основе // Нано- и микросистемная техника. 2017. Т. 19. №4. С. 207–211.
5. Электронный ресурс: Compound semiconductor market to grow at 8.47% CAGR to 2021 // www.semiconductor-today.com/news_items/2017/jun/technavio_270617.shtml
6. Электронный ресурс: GaAs component market to grow at over 4% to \$9.13bn in 2021 // www.semiconductor-today.com/news_items/2017/jan/technavio_130117.shtml
7. Гиредмет – 85 лет, наша история // Сб. под ред. Ю. Н. Пархоменко. М., 2016. 144 с.