

# ПЕРСПЕКТИВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ В РОССИИ

## ГЕТЕРОСТРУКТУРНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И АКУСТОЭЛЕКТРОНИКА



Ж.Алферов

В прошлом номере мы опубликовали первую часть статьи Жореса Ивановича Алферова, посвященную проблемам полупроводниковой электроники России. Предлагаемая вашему вниманию ее вторая часть посвящена наиболее перспективным направлениям отечественной микроэлектроники, в которых, с одной стороны, у российских специалистов есть определенный научный и технологический задел, а с другой — для развития которых требуются не столь большие инвестиции, как для производства СБИС.

### ГЕТЕРОСТРУКТУРНАЯ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА

В отличие от технологии кремниевых СБИС, доминирующей в системах обработки информации, наногетероструктурная электроника становится доминирующей в системах передачи информации. Эта новейшая наукоемкая технология определяет стремительный прогресс современных средств связи, а также современных электронных средств вооружений (бортовых и наземных радиолокаторов, средств радиоэлектронной борьбы и т.д.). Она базируется на высокоточных наногетероструктурах и обеспечивает наивысшие скорости пролета электронов в приборах и минимальные диссипативные потери, позволяет управлять шириной запрещенных зон в наногетероструктурах. Именно наногетероструктурная технология позволяет создавать самые высокоскоростные и высокочастотные твердотельные приборы, с рекордным усилением, с минимальными шумами (для приемных устройств) и максимальной выходной мощностью и КПД (для передающих устройств). Ширина затвора у современных наногетероструктурных транзисторов достигает 20–30 нм, т.е. меньше де-бройлевской длины волны электрона, что позволяет называть такие приборы первыми продуктами промышленной нанoeлектроники, а наногетероструктурную электронику — фактически первой приборной электронной нанотехнологией.

Созданный в последние десятилетия научный и технологический задел по физике и технологии наногетероструктур и по технологии изготовления приборов на их основе придал мощный импульс стремительному промышленному освоению этой новейшей технологии. Пока, к сожалению, за рубежом. Объем мировых продаж только самих наногетероструктурных транзисторов и монолитных ИС (МИС) уже приблизился к 7–8 млрд. долларов в год, ежегодно увеличиваясь более чем на 30%. По всем прогнозам, рынок этих изделий в ближайшие 12–15 лет будет оставаться наиболее привлекательным для инвестиций.

Наиболее массовой областью применения технологии наногетероструктур является сотовая связь. Она занимает около 57% "гетероструктурного" рынка — гетеротранзисторы содержат почти каждый сотовый телефон. Около 23% рынка занимает быстропрогрес-

сирующая высокоскоростная волоконно-оптическая связь, потребляющая наногетероструктурные МИС на частоты до 60 ГГц и выше. Ведутся разработки приборов на частоты свыше 100 ГГц.

Около 12% рынка принадлежит так называемой потребительской электронике, связанной с цифровым ТВ (частоты от 12 до 30–40 ГГц). Кроме того, быстро растет рынок наногетероструктурных МИС на частоты 70–77 ГГц для автомобильных радаров (системы предотвращения столкновений), а также рынок СВЧ МИС для спутниковой связи на частоты до 60 ГГц. Перспективно применение наногетероструктурной СВЧ-электроники и в беспроводных системах широкополосного доступа в диапазоне 40–60 ГГц и выше (например, системы стандарта IEEE 802.16).

3–4% рынка наногетероструктур занимает военная электроника. В основном, это бортовые и наземные радиолокаторы на активных фазированных антенных решетках X-диапазона (около 10 ГГц).

Жизнь показывает, что там, где требуются рабочие частоты выше 4–5 ГГц, наногетероструктурная технология быстро вытесняет кремниевую и классическую GaAs MESFET-технологии (MESFET — metalized semiconductor field-effect transistor, полевой транзистор с затвором Шотки), завоевывая все большую долю мирового телекоммуникационного и радиолокационного рынков.

В России современной промышленной наногетероструктурной технологии пока нет — ни в части массового производства наногетероструктур, ни производства гетеротранзисторов, и тем более — микросхем. Сквозного, унифицированного и лицензированного СВЧ САПР также нет. Коммерческий рынок в стране не сформирован, доминирует оборонный госзаказ. То есть ситуация близка к тому, что было за рубежом в 80-х годах. Текущее финансирование полностью расходуется на НИОКР, необходимого обновления технологической базы не происходит уже более 15 лет.

В последние годы ситуация начинает меняться к лучшему. В ФГУП "Исток" на выделенные Правительством инвестиции создана современная промышленная технологическая линия по производству СВЧ-микросхем с проектными нормами до 0,1 мкм и с объемом выпуска до 1 млн. шт. в год. Ввод ее в эксплуатацию планируется в ближайшие 2–3 года. Отечественный рынок для наногетероструктурной электроники относительно небольшой — потребность около 200 тыс. приборов в год. В основном это наногетероструктурные СВЧ-приборы для приемно-передающих модулей АФАР X- и K-диапазонов. Наиболее крупные их потребители — ОАО ОКБ "Сухой", корпорация "Фазотрон" и концерн ПВО "Алмаз-Антей". Гражданский сегмент рынка для отечественной СВЧ-гетероэлектроники пока отсутствует.

В то же время в РАН (Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе, Институт СВЧ-полупроводниковой электроники, Институт физики полупроводников СО РАН и др.) работы в области



наногетероструктурной электроники не прекращались даже в самые тяжелые времена. Российскими учеными создан достаточно мощный научный и технологический задел по всем ее направлениям: от физики и технологии самых современных гетероструктур до исследований в области моделирования и проектирования приборов и технологии изготовления наногетероструктурных СВЧ МИС с размерами элемента до 0,2 мкм. Что особенно важно, имеются высококвалифицированные кадры ученых, известные научные школы, способные в кооперации со специалистами промышленности в кратчайшие сроки (3–5 лет) решить задачу создания в России промышленной наногетероструктурной электроники мирового уровня.

Однако для этого необходимо организовывать несколько специализированных научных и промышленных центров, оснащенных самым современным технологическим и исследовательским оборудованием: в Санкт-Петербурге на базе ФТИ им. А.Ф.Иоффе, в Москве на базе ИСВЧПЭ РАН, возможно, и в других городах. Стоимость одного комплекта оборудования для такого центра составляет около 20–25 млн. евро.

### ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ НА ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

Оптоэлектронные приборы на основе полупроводниковых гетероструктур являются основной элементной базой для ряда динамично развивающихся направлений современной электронной техники. Важнейшие среди них – системы связи и телекоммуникаций (спутниковые, мобильные, волоконно-оптические); навигационные и радиолокационные системы; космические системы различного назначения, в том числе – источники энергии для космических аппаратов; сверхбыстродействующие вычислительные устройства и системы обработки информации; датчики и сенсоры различного типа.

В наиболее технологически развитых странах (США, Японии, Франции, Германии, ряде восточно-азиатских государств) производство оптоэлектронных полупроводниковых гетероструктурных приборов вышло из фазы лабораторных исследований и представляет собой самостоятельное направление полупроводниковой промышленности. Российской науке принадлежит ряд приоритетных результатов в области физики полупроводниковых гетероструктур. К сожалению, по известным причинам, широкого внедрения соответствующих технологий в отечественную промышленность не произошло. Сегодня отставание российской промышленности от передового зарубежного уровня в области полупроводниковых гетероструктурных приборов весьма существенно. Однако, по сравнению с технологией кремниевых СБИС, его преодоление потребует на порядок меньших средств.

Назовем основные направления в области гетероструктурных оптоэлектронных приборов.

### Солнечные элементы на гетероструктурах

Фотоэлектрический метод преобразования солнечной энергии наиболее перспективен среди нетрадиционных методов получения электроэнергии. Солнечные батареи являются основными источниками электроэнергии на космических аппаратах и получают все большее применение на Земле. Самый многообещающий путь повышения эффективности солнечных батарей – использование гетероструктурных солнечных элементов из арсенида галлия и родственных ему соединений группы  $A^3B^5$ . Такие солнечные элементы впервые в мире были предложены и созданы в ФТИ им. А.Ф.Иоффе в 1969 году. С тех пор в ФТИ выполнен большой объем исследований и разработок, многие из которых имеют приоритетный характер. Одним из результатов этих работ явилась организация в стране производства гетероструктурных солнечных батарей, уста-

новленных на ряде космических аппаратов, в том числе на орбитальной станции "Мир".

Разработанные в последние годы каскадные солнечные элементы обеспечивают повышенное значение КПД (в условиях космоса – до 30%); увеличение удельного энергопотребления с солнечных батарей до 300 Вт/м<sup>2</sup>; улучшение радиационной стойкости (срок эксплуатации таких батарей – 10–15 лет на геосинхронной орбите); возможность работы при высокой концентрированности солнечного излучения. Объем производства (в основном в США) гетероструктурных космических батарей превышает 1 тыс. м<sup>2</sup>/год. В РФ выпуск гетероструктурных батарей прекращен из-за отсутствия в стране современного технологического оборудования и недостаточного финансирования разработок перспективных их типов.

КПД "наземных" каскадных солнечных элементов, созданных как в ФТИ, так и в других исследовательских центрах, достигает значений более 33% при концентрированной засветке. При степени концентрирования излучения 100–1000 крат площадь солнечных элементов, необходимая для выработки эквивалентной электрической мощности, пропорционально уменьшается. Это обеспечивает существенное снижение стоимости электроэнергии, вырабатываемой солнечными батареями с концентраторами. В ФТИ разработаны высокоэффективные концентраторы – линзы Френеля, выполненные из композиции "силикон-стекло", обладающие высокой устойчивостью к воздействию ультрафиолетового облучения и хорошими термическими и механическими свойствами. На основе разработанных каскадных фотопреобразователей и линз Френеля в ФТИ созданы высокоэффективные концентраторные модули на земного и космического базирования и энергоустановки на их основе. В дальнейшем ожидается увеличение КПД гетероструктурных фотопреобразователей до 40% при 100–1000-кратном концентрировании солнечного излучения.

Организация в РФ производства гетероструктурных солнечных элементов и батарей позволит существенно увеличить энергообеспеченность отечественных космических аппаратов, что будет способствовать укреплению обороноспособности страны и принесет значительный технико-экономический эффект, поскольку обеспечит автономное электропитание наземных изделий специальной техники и других потребителей, лишенных централизованного энергоснабжения. При этом потребности в наземных солнечных энергоустановках практически не ограничены. К числу основных потребителей солнечных элементов относятся Российское авиационно-космическое агентство, Минэнерго РФ, Космические войска и РВСН МО РФ.

### Сверхъяркие светодиоды

Полупроводниковые светоизлучающие диоды (СИД) – это исторически первые гетероструктурные приборы, широко используемые на практике. В последние годы появилось новое направление, связанное с созданием так называемых сверхъярких СИД видимого диапазона. Основные области применения приборов на основе сверхъярких СИД – это устройства освещения и подсветки, автомобильная светотехника, светодиодные экраны и табло, сигнальные устройства, мобильные телефоны, фото- и видеокамеры. Быстрое внедрение твердотельных источников света в различные области промышленности связано с их принципиальными преимуществами по сравнению с традиционными осветительными приборами. К ним относятся длительный срок службы, экономичность, экологическая безопасность, быстрое срабатывание, широкие возможности по управлению световым потоком и цветом излучения. Объем мирового рынка сверхъярких светодиодов в 2002 году составил 1,8 млрд. долл.

и по прогнозу компании Strategies Unlimited (США) к 2007 году достигнет 4,5 млрд. долл., а в 2010 году в США и Японии начнется повсеместная замена ламп накаливания светодиодами источниками света.

Сине-зеленые и белые светодиоды на основе сочетания синего излучения кристалла и желтого люминофора или ультрафиолетового излучения чипа и RGB-люминофора изготавливают на основе гетероструктур нитрида галлия (AlInGaN), желто-красные – на основе гетероструктур фосфида галлия (AlInGaP) и частично арсенида галлия. Основными производителями светодиодов и приборов на их основе выступают компании Японии (Nichia Chemical, Toyoda Gosei) и США (Lumiled, Cree). Быстрыми темпами растет производство светодиодов в странах Юго-Восточной Азии, прежде всего на Тайване, в Южной Корее и в Китае.

Российский рынок светодиодов сегодня составляет около 100 миллионов СИД в год, и более половины из них покупаются за рубежом. Основные препятствия развития светодиодных технологий в России – это полное отсутствие роста промышленного производства светодиодных гетероструктур и практически полное отсутствие современных технологических линий для изготовления чипов.

В нашей стране несколько предприятий занимаются сборкой светодиодов на основе импортных кристаллов: ОАО "ОКБ "Планета" (Новгород), ЗАО "Протон" (Орел), ЗАО "Корвет-Лайтс" (Москва). Изготовление чипов СИД на основе нитрида галлия начато в ЗАО "Светлана-Оптоэлектроника" (Санкт-Петербург). Однако изделия на основе покупных материалов заведомо неконкурентоспособны на мировом рынке. Причина тому – высокая цена, а также невозможность приобрести высококачественные светодиодные пластины или чипы.

Вместе с тем, уровень научных разработок в области МOCVD-роста (газофазное химическое осаждение металлорганических соединений) гетероструктур на основе нитрида галлия в ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН в целом сопоставим с мировым уровнем, а в некоторых направлениях опережает его. Это также касается ряда "ноу-хау" в области повышения эффективности и интенсивности электролюминесценции, что является основной тенденцией развития светодиодных технологий. В частности, для применения светодиодных источников в освещении необходимо создавать белые светодиоды с высокой световой отдачей и высоким значением светового потока с одного светодиода. Поэтому ряд крупных зарубежных компаний, в первую очередь Samsung и Siemens, проявляют повышенный интерес к выращенным в ФТИ структурам. Развитию технологий МOCVD-роста гетероструктур GaN в ФТИ во многом способствовало приобретение в 2002 году современного реактора АIX-2000НТ производства фирмы Aixtron (Германия), позволяющего производить эпитаксиальный рост нитрида галлия одновременно на шести двухдюймовых подложках. Однако этот реактор предназначен для проведения научных исследований и разработки ресурсосберегающих технологических процессов. Наладить промышленное производство светодиодных пластин на его основе невозможно.

### Полупроводниковые инжекционные лазеры

Полупроводниковые лазерные диоды относятся к числу наиболее сложных гетероструктурных приборов. Только наиболее передовые в технологическом отношении государства (США, Япония, Германия, Франция, Ю.Корея, Тайвань) располагают полным технологическим комплексом, достаточным для производства различных типов таких приборов. Области применения полупроводниковых лазеров весьма разнообразны и включают оптические устройства записи, хранения и считывания данных, системы волоконно-оптической связи, системы накачки твердотельных лазеров, датчики

различного типа и т.д. Общая сумма продаж полупроводниковых лазеров составила в 2003 году 2,8 млрд. долл. Первое место в денежном выражении занимают лазерные диоды для записи и считывания информации (1,5 млрд. долл.), затем следуют телекоммуникационные лазеры (900 млн. долл.) и лазеры для систем накачки (100 млн. долл.). В ближайшие три года прогнозируется рост объема продаж полупроводниковых лазеров не менее 10% в год.

В России, несмотря на сложности финансирования, сохраняется научный паритет с развитыми странами на всех основных направлениях разработки лазерных диодов. Он выражается в достижении параметров мирового уровня (в том числе – рекордных) для приборов, изготовленных в условиях мелкосерийного или лабораторного производства. Некоторое отставание наблюдается в области разработки приборов, излучающих в диапазоне менее 700 нм, что обусловлено практически полным отсутствием интереса к таким изделиям на российском рынке и высокой конкуренцией дешевых приборов на рынке международном.

Полный цикл производства полупроводниковых лазеров сохранился на таких российских предприятиях, как НИИ "Полюс" (Москва), "Инжек" (Саратов) и НПО "Север" (Новосибирск). Дополнительно к этому, ряд малых предприятий располагают технологией сборки и корпусирования кристаллов полупроводниковых лазеров (например, в Санкт-Петербурге – компании "ФТИ-Оптроник", "Полупроводниковые приборы" и др.). Общий российский рынок лазерных диодов оценивается в 8–12 млн. долл. в год при ежегодном приросте 8–10%, что соответствует общемировым тенденциям.

Для организации отечественного производства полупроводниковых лазерных диодов в промышленных масштабах в первую очередь необходимо найти внутренних и внешних потребителей, готовых в достаточных масштабах использовать эту наукоемкую продукцию.

### Фотоприемные приборы и устройства

В ближайшее время ожидается создание систем "искусственного" (технического) зрения с расширенным по сравнению с биологическим зрением спектральным диапазоном в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра. Это стало возможным благодаря интеграции на одном кристалле функций восприятия и обработки изображения, причем системы восприятия строятся на основе квантоворазмерных фоточувствительных наноструктур. Системы технического зрения и фотонные компоненты на наноструктурах, способные получать и обрабатывать огромные массивы информации, станут основой принципиально новых телекоммуникационных устройств, систем экологического и космического мониторинга, тепловидения, нанодиагностики, робототехники, высокоточного оружия, средств борьбы с терроризмом и т.д. Применение полупроводниковых наноструктур значительно уменьшит габариты устройств наблюдения и регистрации, снизит энергопотребление, улучшит стоимостные характеристики и позволит использовать преимущественно массового производства в микро- и нанoeлектронике ближайшего будущего.

В развитых странах широким фронтом ведутся работы по созданию фоточувствительных структур с предельными параметрами по чувствительности (до одного фотона), пространственному разрешению порядка длины волны и быстрдействию на основе квантоворазмерных эффектов в полупроводниках для принципиально новых систем гражданского и военного назначения. В России эти работы сосредоточены в институтах РАН (ФТИ, Физический институт, Институт радиотехники и электроники, Институт физики полупроводников (Новосибирск)) и на некоторых промышленных предприятиях (НПО "Орион", НИИ "Полюс", НПП "Пульсар", ЦНИИ "Электрон").



В 2003 г. в Институте физики полупроводников СО РАН с помощью технологии молекулярно-лучевой эпитаксии изготовлены экспериментальные образцы матричных фотоприемных модулей форматом 320x256 элементов на основе многослойной эпитаксиальной структуры AlGaAs/GaAs с квантовыми ямами с максимумом спектральной чувствительности в диапазоне 7–9 мкм и температурным разрешением 40–70 мК. На основе эпитаксиальных гетероструктур Ge/Si на подложке "кремний-на-изоляторе" созданы фотодетекторы для диапазона длин волн 1,3–1,55 мкм с активной областью, включающей 36 слоев нанокластеров германия (квантовых точек). За счет эффекта многократного внутреннего отражения достигнуты значения квантовой эффективности 21 и 16% для длин волн 1,3 и 1,55 мкм, соответственно. Фотодетекторы на квантовых точках представляют несомненный интерес как фотонные компоненты волоконно-оптических линий связи с повышенной пропускной способностью.

### РАЗВИТИЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ АКУСТОЭЛЕКТРОНИКИ

Акустоэлектронные устройства – принципиально незаменимые базовые элементы всех перспективных систем и средств связи, навигации, радиолокации, мониторинга, робототехники. Они позволяют обеспечить обработку сложных сигналов в реальном масштабе времени при высокой чувствительности, широком динамическом диапазоне и высокой помехозащищенности. Акустоэлектронные устройства нового поколения позволяют осваивать более высокочастотные диапазоны, обладают низким энергопотреблением, отличаются уникально малыми массогабаритными характеристиками и невысокой стоимостью.

Отечественные специалисты более 25 лет работают в этой области. Им принадлежит одно из ведущих мест в мире и ряд приоритетов в разработке акустоэлектронных устройств. Впервые предложены в СССР и России и запатентованы в России, США, Японии, Англии, Франции, Германии методы взвешивания и локализации поверхностных акустических волн. Однако последние 5–10 лет отечественные специалисты работают в данном направлении по контрактам с зарубежными фирмами. В то же время имеющаяся материально-техническая база и опыт позволяют переориентировать отечественных разработчиков на собственные исследования и в ближайшее время разработать ряд перспективных акустоэлектронных приборов. Основные из них:

- фильтры промежуточной частоты с высокими характеристиками для современных систем связи и цифрового интерактивного телевидения, включая высокоизбирательные ВЧ-устройства частотной селекции на поверхностных и приповерхностных волнах и волнах Гуляева-Блюштейна с предельно низким уровнем внешнего затухания;
- высокоизбирательные тонкопленочные СВЧ-устройства частотной селекции и резонаторы для стабилизации частоты. Они могут быть реализованы на объемных акустических волнах (в диапазоне до 10 ГГц), на подложках из кремния и арсенида галлия, а также на основе новых диэлектрических материалов с высокой акустической прозрачностью. Эти устройства важны для решения современных задач связи, навигации и радиолокации;
- акустоэлектронные датчики температуры, давления, газового состава, влажности, ускорений и т.д., перспективные для задач мониторинга, робототехники и контроля функционирования различных механизмов;
- системы радиочастотной идентификации объектов для персонализированной регистрации, учета и контроля объектов различ-

ного назначения, в том числе подвижных, на основе акустоэлектронных компонентов;

- системы автоматизированного проектирования (САПР) и автоматизированного изготовления фотомасок (САИФ) акустоэлектронной компонентной базы (АЭКБ).

Отечественные специалисты способны развить методы выращивания высококачественных ориентированных и монокристаллических пленок пьезоэлектриков, диэлектриков и полупроводников, новых пьезоэлектрических кристаллов для акустоэлектроники и акустооптики, а также методы контроля их параметров как основы создания перспективной акустоэлектронной элементной базы.

Все это позволит эффективно использовать имеющийся в России научно-технический задел, признанный во всем мире акустоэлектронную школу и, при наличии финансирования, создать самые передовые технологии и разработать широкую гамму акустоэлектронных устройств, организовать их серийное производство.

### ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

Ускоренное развитие электроники в России возможно лишь при условии, что эта наукоемкая область промышленности будет признана одним из основных приоритетов национальной политики, требующим государственной поддержки. Прежде всего, необходимо:

- приобрести и построить на территории России микроэлектронные предприятия с самой передовой на сегодняшний день технологией при предоставлении инвесторам гарантий государства;
- создать технопарки на базе имеющегося научно-технического, кадрового и образовательного потенциала;
- предоставить налоговые и таможенные льготы предприятиям и инвесторам в области электроники и оказать поддержку малым высокотехнологическим компаниям.

Реализация этих предложений приведет не только к восстановлению научно-технического паритета России с развитыми странами, но и позволит российским компаниям более активно работать на внутреннем рынке страны. Наличие отечественной элементной базы полупроводниковой электроники несомненно будет способствовать решению стратегически важных проблем силовых ведомств, в том числе при разработке нового поколения высокоточного оружия, оборудовании государственной границы, борьбе с терроризмом, развитию энергетики и решению проблем энергосбережения в промышленности, на транспорте, в жилищно-коммунальном хозяйстве. Это повысит эффективность использования уже вложенных Россией средств в организацию современных производств вычислительной и телекоммуникационной техники, которые сейчас полностью зависят от поставок импортных комплектующих. ○