

# В РОССИИ ВОЗМОЖНА СВОЯ ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКА

РАССКАЗЫВАЕТ ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА СВЧ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ РАН  
ВЛАДИМИР ГРИГОРЬЕВИЧ МОКЕРОВ



*Владимир Григорьевич Мокеров – член-корреспондент РАН, профессор, доктор физ. мат. наук, прошел путь от инженера до зав. отделением НИИ МЭ, заведующего отделом и зам. директора ИПЭ РАН, а сегодня возглавляет созданный им Институт СВЧ полупроводниковой электроники РАН. Владимир Григорьевич – известный специалист и зачинатель отечественной гетероструктурной электроники, автор более 300 научных работ. Он возглавляет известную научную школу в области наногетероструктурной электроники, среди его учеников – 6 докторов и 8 кандидатов наук.*

*Среди основных научных достижений В.Г. Мокерова – разработка архитектуры и принципов проектирования 32-разрядного однокристалльного сверхскоростного арсенидгаллиевого RISC-процессора на  $\delta$ -легированных слоях; первых гетероструктурных БИС ОЗУ с субнаносекундным быстродействием и самой большой в мире GaAs СБИС (100 тыс. компонентов). На основе эффекта резонансного туннелирования в квантовых ямах под руководством и при непосредственном участии В.Г. Мокерова созданы новые нанoeлектронные ИС (АЦП, умножители частоты, логические вентили), превосходящие по быстродействию и функциональной емкости приборы "классической" микрoeлектроники. Разработаны не имеющие аналогов принципиально новые нанотранзисторы на квантовых точках, на основе которых возможно создание высокоскоростной n-канальной комплементарной логики и АЦП ИС и многое другое.*

Слово "гетероструктура" знают сегодня даже журналисты, главным образом благодаря присуждению Ж.И.Алферову Нобелевской премии за исследования в этой области. Опять-таки благодаря Жоресу Ивановичу многие ассоциируют гетероструктуры в основном с лазерами, светоизлучающими диодами, оптоэлектроникой. При этом забывается, что именно гетероструктуры дали мощный импульс к развитию современной твердотельной СВЧ-электроники, к созданию нового поколения телекоммуникационных и локационных систем.

Бурное развитие гетероструктурной электроники происходит сейчас во всем мире, но, к сожалению, не в России, – несмотря на то, что в нашей стране достигнуты результаты мирового уровня в этой новейшей технологии. К счастью, сегодня возможно изменение ситуации, поскольку недавно был организован новый Институт СВЧ полупроводниковой электроники Российской академии наук, ориентированный на это важнейшее научное и технологическое направление. С его директором – одним из пионеров в области СВЧ-электроники на основе гетероструктур – Владимиром Григорьевичем Мокеровым наш сегодняшний разговор.

**Владимир Григорьевич, расскажите немного о вашем институте.**

Институт СВЧ полупроводниковой электроники (ИСВЧПЭ) РАН был создан в 2002 году. Его основные задачи – фундаментальные и прикладные исследования в области транзисторных наногетероструктур, исследования и разработки транзисторов и микросхем на их основе, моделирование и проектирование (САПР) гетероструктурных СВЧ-приборов для телекоммуникационных и локационных систем, внедрение научных разработок в производство. Необходимость в таком институте назрела давно, поскольку в российском "гетероструктурном мире" сложилась парадоксальная ситуация. С одной стороны, в институтах РАН достигнуты выдающиеся научные результаты в области физики и технологии наногетероструктур. Россия является одним из лидеров в фундаментальных исследованиях низкоразмерных электрон-

ных явлений в наногетероструктурах, таких как целочисленный и дробный квантовый эффект Холла, вигнеровская кристаллизация электронного газа, эффекты расслоения электронного газа низкой плотности и многие другие. За выдающиеся научные достижения в области физики и технологии гетероструктур Ж.И.Алферову присуждена Нобелевская премия. С другой стороны, реального применения в промышленной электронике этой технологии пока нет: у нас не производятся ни транзисторы, ни, тем более, микросхемы на гетероструктурах.

Именно для "сращивания" высокой "гетероструктурной" науки с электроникой и потребовался институт, который наряду с фундаментальными исследованиями физики и технологии гетероструктур и разработкой новых гетероструктурных приборов призван способствовать внедрению новых научных разработок в производство. Именно так это и происходит в передовых странах мира, где лидерами в разработке новейших технологий и приборов (с изготовлением экспериментальных партий приборов) выступают университеты – аналог нашей академической системы, которые затем внедряют свои разработки на промышленные фирмы.



## Сейчас не самые благоприятные времена для организации в электронике новых научных учреждений — их в основном закрывают. Как удалось добиться появления нового института?

Действительно, в РАН, как и вообще в стране, ситуация не простая. Наш институт создавался, естественно, не без труда. К большому сожалению, Академия наук в свое время (это происходило на рубеже 50-х и 60-х годов) не вписалась должным образом в твердотельную электронику. В противоположность, например, ядерной физике, АН не возглавила разработки новых поколений транзисторов и интегральных схем. В отличие от зарубежной периодики, в отечественной академической печати трудно разыскать публикации по новым практически полезным транзисторным технологиям, новым классам транзисторов и микросхем с рекордными характеристиками.

Вместе с тем, мы — лидеры в области разного рода "новейших" псевдозелектроник, быстро возникающих и исчезающих. Псевдозелектроника — это когда интересные физические эффекты необоснованно выдаются за реальные приборные направления. Такие "мелкотравчатые" электроники засоряют перечень приоритетных технологических направлений, зачастую неправильно ориентируя научно-техническую стратегию государства. В результате наносится ущерб действительно приоритетным направлениям, реально определяющим научный, технологический, экономический и оборонный потенциал страны. По этой причине гетероструктурная электроника, которой обязан современный бум в сфере телекоммуникаций (быстрый Интернет, широкополосные системы связи и т.д.) и электронных средств вооружений, у нас просто замалчивалась. Сейчас, кажется, приходит понимание важности этой приоритетной, наукоемкой технологии, тесно переплетающейся с нанотехнологией. Толщины активных слоев в приборах здесь составляют около 10 нм и менее, в производстве уже осваиваются литографические размеры (длина затвора транзисторов) 50 нм, а в научных разработках — 20 нм. Хочу подчеркнуть, что степень развитости данной технологии, тем более — в эпоху информационной революции — характеризует не только научный, экономический и оборонный потенциал страны, но и степень развитости и цивилизованности государства в целом.

Хотя за фундаментальной наукой, безусловно, должен сохраняться приоритет, без нее Россия просто не может существовать, но и не следует забывать, что в современном мире все большую и большую роль играют высокие наукоемкие технологии, тесно связанные с фундаментальной наукой.

## Ваш институт возник не на пустом месте — что было в его основе?

Разумеется, наш институт возник не из воздуха. Он базируется на научной школе, основы которой закладывались еще 30 лет назад, когда я работал в Зеленограде в НИИ молекулярной электроники (НИИМЭ). Все начиналось с исследования фазовых переходов полупроводник-металл (ФППМ) в окислах ванадия, с изучения их оптических и электрических свойств. Нами тогда был впервые обнаружен эффект аномально сильного изменения оптических свойств при ФППМ в двуокиси ванадия, который затем мы применили для голографической памяти. Напомню, что в то время (на рубеже 60-х и 70-х годов) научный мир переживал бум в области голографии. Но с начала 80-х годов мы переклонулись на гетероструктурную электронику, уже тогда осознав чрезвычайную перспективность этого только зарождающегося направления — хотя многие "маститые профессора" считали его ошибочным. Быстро освоив технологию молекулярно-лучевой эпитаксии гетероструктур AlGaAs/GaAs, мы разработали первые отечественные гетероструктуры с электронной подвижностью выше  $10^6$  см<sup>2</sup>/Вс (при  $T = 4,2$  К), что в то время соответствовало лучшим ми-

ровым достижениям. С использованием наших образцов были выполнены первые отечественные исследования квантового эффекта Холла и квантового эффекта Фарадея на модулированно-легированных гетероструктурах с двумерным электронным газом. В этих системах обнаружен новый тип плазмонов — краевые магнитные плазмоны. Также изготовили первый отечественный НЕМТ (high electron mobility transistor) — транзистор с высокой подвижностью электронов и логические вентили с рекордной для того времени (1983 год) задержкой распространения сигнала  $\tau_{BA} < 30$  пс. Нами также была разработана технология первых НЕМТ-БИС ОЗУ с субнаносекундным быстродействием (время выборки адреса  $\tau_{BA} < 0,8$  нс). Подчеркну, что наши научные изыскания с самого начала были нацелены на применение в электронике.

В эти же годы мне посчастливилось встретиться с будущим нобелевским лауреатом, нашим выдающимся ученым академиком Жоресом Ивановичем Алферовым. Я вошел тогда в состав возглавляемой им академической секции "Полупроводниковые гетероструктуры". Через эту секцию Жорес Иванович и осуществлял руководство и координацию фундаментальных и прикладных исследований в этой области по всей стране, возложив на меня, как представителя электронной промышленности, работы в области гетероструктурной электроники.

В начале 1989 года в связи со сменой руководства НИИМЭ и сворачиванием работ по гетероструктурам я по приглашению академика Ю.В.Гуляева перешел в Институт радиотехники и электроники (ИРЭ) Академии наук. Мой приход в ИРЭ (начало 90-х годов) как раз совпал со стремительным развалом экономики, в том числе и электроники. Эти потрясения, естественно, затронули и Академию наук. Начался массовый отток российских ученых за рубеж, разрушались когда-то знаменитые и, казалось бы, несокрушимые научные коллективы, НИИ и заводы. И на фоне такого развала мы "набирали обороты", формировали и укрепляли научный коллектив, оборудовали лаборатории, исследовали физику и технологию гетероструктур, вели приборные разработки, будучи абсолютно уверенными в правильности выбранного направления и веря в подъем страны. Не получив, к большому нашему сожалению, за весь постсоветский период ни одного цента валютных поступлений, даже на самое необходимое оборудование (хотя немалые средства при этом вливались и продолжают вливаться во множество "псевдозелектроник"), нам тем не менее удалось собрать (с миру по нитке) по всей России и развернуть у себя экспериментальную технологическую линию по изготовлению гетероструктурных приборов с минимальным размером элемента 200 нм. Эта уникальная, единственная в стране линия охватывает весь цикл — от выращивания эпитаксиальных наногетероструктур до изготовления транзисторов и микросхем.

Необходимо подчеркнуть, что технология приборов на гетероструктурах существенно отличается от стандартной арсенид-галлиевой технологии. Причем для различного типа транзисторов (мощные, маломощные) и для различного частотного диапазона требуются различные типы гетероструктур. Особых усилий потребовало создание технологии грибообразного затвора с применением многослойной системы электронорезистов. Разработана САПР, включающая все стадии — от моделирования исходной гетероструктуры до топологического проектирования интегральных схем. Но самое главное наше достижение — это, безусловно, создание уникальной для нашей страны научной школы специалистов по всем направлениям наногетероструктурной электроники.

## А в каком положении сегодня твердотельная СВЧ-электроника в России?

Ситуация такова, что действующие у нас радиолокаторы пока работают на вакуумных электронных "лампах", а это — большие массо-

габариты и гигантские напряжения. За рубежом же переходят на "твердотельные" радиолокаторы на активных фазированных антенных решетках (АФАР), приемо-передающие модули (ППМ) которых базируются на гетероструктурных ИС.

Что касается промышленной отечественной твердотельной электроники, то у нас выпускаются СВЧ-транзисторы мирового уровня на частоты до 2–3 ГГц (ФГУП "Пульсар") – в этом диапазоне еще неплохо работает кремниевая электроника. Однако весь мир стремительно движется к все более и более высоким частотам: до сотен гигагерц в сверхскоростной передаче данных, и до 10–40 ГГц и даже выше, в радиолокации и широкополосных телекоммуникациях. В России на частоты свыше 10 ГГц пока выпускаются лишь дискретные транзисторы с длиной затвора порядка 0,3 мкм, изготавливаемые на простейших арсенидгаллиевых структурах. Они соответствуют уровню 1985–1987 годов и по своим параметрам, естественно, уступают современным гетероструктурным приборам.

Похоже, что сейчас все же удалось заострить важность проблемы гетероструктурной электроники, на которую уже давно перешел весь мир. Многие и у нас, наконец, поняли, что без технологии наногетероструктур отечественную твердотельную электронику не поднять. Однако далеко не все осознают важность подключения Академии наук к этой новейшей и чрезвычайно наукоемкой электронике, где эффекты размерного квантования определяют основные характеристики транзисторов. Наилучшее понимание проблемы пока проявили генеральные конструкторы систем – разработчики радиолокаторов. Они хорошо знают, на какой элементной базе создаются зарубежные радиолокаторы на АФАР. И именно через них оказывается воздействие на наших консерваторов от СВЧ-электроники. А пока, к сожалению, наши системщики вынуждены закупать зарубежную элементную базу и опробовать на ней функционирование создаваемых ими систем. Но для промышленного производства систем, естественно, нужна отечественная элементная база, которую мы, безусловно, в состоянии разработать.

Следует отметить, что в нашей СВЧ-электронной промышленности бытует ошибочное мнение о применимости некой базовой технологии изготовления приборов на простейших арсенид-галлиевых структурах для приборов на гетероструктурах. Однако это не так. Гетероструктуры отличаются рядом специфических особенностей, проявляющихся в различном химическом составе слоев и высокой чувствительности двумерного газа в канале транзистора к технологическим воздействиям при изготовлении приборов. Это касается и селективного травления, и операций, связанных с нанесением диэлектрических слоев, и операции двойного заглабления канавок под затвор и т.д. К большому сожалению, некоторые предприятия, своевременно не осознав важности гетероструктурного направления, свернули работы по эпитаксии гетероструктур. Сейчас ситуация, похоже, начинает выправляться. Намечается альянс ученых и специалистов РАН и РАСУ. Это очень правильно, поскольку нерентабельно порознь и параллельно выполнять одну и ту же разработку, причем на устаревшей элементной базе.

Складывающаяся сейчас кооперация ИСВЧПЭ РАН и НПО "Светлана" с привлечением Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе РАН позволяет снять с повестки дня, как надуманную, "проблему" изготовления самых современных гетероструктур, необходимых для ИС СВЧ-модулей АФАР, и технологии изготовления гетероструктурных транзисторов и ИС малой степени интеграции (МИС). Наши коллективы уже сейчас готовы приступить к совместному выполнению НИОКР по разработке гетероструктурных МИС для СВЧ-модулей АФАР X-диапазона. К этим НИОКР целесообразно подключить и такие предприятия, как "Исток" и "Пульсар", не обладающие гетероструктурной тех-

нологией, но владеющие такими необходимыми для серийного производства возможностями, как корпусирование и интегрирование СВЧ МИС в приемопередающий модуль, с проведением всего комплекса испытаний и тестирования.

Только комплексный подход, на основе взаимного дополнения друг друга своими достижениями, а не дублирование одной и той же разработки разными предприятиями, как это происходит сейчас, позволит наиболее эффективно реализовать имеющиеся в стране ресурсы. Только так можно на самом высоком мировом уровне решить, наконец, задачу создания и последующего производства отечественной унифицированной элементной базы СВЧ-модулей АФАР X-, а затем и K-диапазона.

Большую помощь в продвижении работ по гетероструктурной СВЧ-электронике оказывают генеральный конструктор концерна "Алмаз-Антей" академик Вениамин Павлович Ефремов, Совет Главных конструкторов по проблемам АФАР во главе с Сергеем Алексеевичем Муравьевым и его рабочая группа во главе с Анатолием Исаковичем Синани.

### **Когда вы говорите об альянсе, речь идет о какой-то конкретной программе?**

Основные заказчики СВЧ-приборов твердотельной электроники в России – это разработчики нового поколения бортовых и наземных радиолокаторов на АФАР. Именно они, под эгидой Совета Главных конструкторов по проблемам АФАР и его рабочей группы, с участием других заинтересованных ведомств, и формируют Программу по элементной базе СВЧ-модулей АФАР. Главные "закоперщики" программы – концерн "Алмаз-Антей" (разработчик ЗРК), куда входит около 40 предприятий, НИИ приборостроения имени В.В.Тихомирова (бортовые радары) и ряд других крупных объединений.

Важно, что в процессе формирования этой программы неформально сложилась вертикальная интеграция, объединяющая генерального конструктора системы (разработчики радаров в целом), разработчиков СВЧ-модулей АФАР и, наконец, разработчиков гетероструктур и МИС на их основе. Если складывающаяся вертикальная структура получит материальную поддержку, то она, несомненно, заработает, и успех будет обеспечен.

### **Но ведь организация производства ИС стоит сотен миллионов, если не миллиардов, долларов. Где взять такие деньги?**

Вы совершаете типичную ошибку. Если говорить о цифровых СБИС, то там, действительно, и оборудование, и сверхчистые технологические помещения стоят примерно столько. Но здесь речь идет об СВЧ МИС. Если в цифровых СБИС степень интеграции уже достигает нескольких сотен миллионов транзисторов на чипе, то в СВЧ МИС – лишь несколько десятков транзисторов. Вследствие низкой степени интеграции снижаются и требования к чистоте помещений – здесь достаточно технологических модулей класса 100–1000 против модулей класса 1–10 для производства цифровых СБИС. Соответственно, стоимость современной технологической линии для изготовления гетероструктурных СВЧ МИС, даже с размером элемента 50 нм, составляет около 15 млн. долларов.

Твердотельная СВЧ-электроника, действительно, опережает цифровую в части предельно малых размеров элементов. Уже сейчас ведущие зарубежные компании осваивают в производстве технологию формирования затворов транзисторов с длиной 50 нм, а в лабораториях разрабатываются транзисторы с длиной затвора 20 нм. То есть эта новейшая электроника наиболее тесным образом переплетается с нанотехнологией. Но степень интеграции, во многом и определяющая стоимость технологического оборудования, здесь совершенно иная, нежели в цифровых СБИС.





В дополнение, что касается затрат, отмечу, что численность нашего института не превышает полсотни человек, при этом накладные расходы – 20%, так что практически все средства идут на научные разработки.

Поэтому разговоры о том, что отечественные гетероструктурные СВЧ ИС – фантастика, что организация их производства обойдется в миллиарды долларов, что мы здесь навсегда отстали, – это все неправда.

**Складывается ощущение, что судьба вашего института напрямую зависит от финансирования работ по АФАР.**

Конечно, средняя бюджетная зарплата сотрудников в институте – 2,5 тыс. рублей. Немалых денег стоит приобретение материалов для технологических разработок (подложки GaAs, газы, резисты, фотомаски), компьютеры, ремонт и поддержание оборудования и т.д. Поэтому без дополнительных источников финансирования не прожить.

Хочу заметить, что коллектив у нас достаточно молодой. Средний возраст основного научно-технологического персонала не превышает 40 лет. Активно набираем молодых специалистов. У нас несколько дипломников из МИФИ. Заключен учебно-научный договор с МИФИ. Там готовят хороших специалистов. Регулярно пополняем свой состав выпускниками МИРЭА, где я веду кафедру.

**А рынок гражданской продукции не нуждается в отечественных СВЧ-приборах на гетероструктурах?**

Наиболее массовый гражданский рынок, потребляющий приборы гетероструктурной электроники, – это сотовая телефония (~58%), за ней следует высокоскоростная оптоволоконная связь (~24%) и цифровое ТВ (~10%). Остальная доля падает на набирающие обороты беспроводные системы связи широкополосного доступа с предоставлением услуг мультимедиа, локальные сети и т.д. К сожалению, у нас этот рынок занят иностранными компаниями. Для внедрения сюда отечественной электроники нужна специальная совместная программа с Министерством связи и информатизации РФ, посвященная созданию отечественных систем связи. Но пока, к сожалению, такой программы почему-то нет.

**А на зарубежный рынок выход вам заказан?**

Из-за неоснащенности современным технологическим оборудованием нам трудно выдержать конкуренцию с ведущими зарубежными производителями. Но эту задачу можно решить за два–три года, если приобрести высококлассное технологическое оборудование (необходима новейшая электронная литография под размеры до 20–30 нм и т.д.). У нас для этого создан весь необходимый научный и технологический задел. Однако конкуренция в этой области в мире все более ужесточается. В связи с кризисом на Западе имеющиеся там производственные мощности недогружены из-за падения спроса на рынке. Поэтому за рубежом многие с надеждой смотрят на Россию, на наш рынок.

Но, с другой стороны, следует обратить внимание, что даже в таких странах, как Тайвань, промышленная гетероструктурная технология находится на высочайшем уровне – все благодаря великолепной оснащенности оборудованием и правильной политике в области наукоемких технологий. А ведь там наука не на столь высоком уровне, как в России, не говоря уже о наличии нобелевских лауреатов.

**Какие направления в современной гетероструктурной электронике наиболее перспективны?**

Сейчас в гетероструктурной технологии наиболее модны, в хорошем смысле, два направления. Первое – это широкозонные гетеросистемы на основе GaN и твердых растворов AlGaInN. У нитрида галлия ширина запрещенной зоны ~3,4 эВ, т.е. в 2,5 раза больше, чем у GaAs. В результате напряжение пробоя транзисторов, определяемое эффектом ударной ионизации "зона–зона", здесь достигает сотен

вольт против 20–30 В в GaAs. Рабочие токи в обоих случаях одного порядка – ~1 А/мм. Поэтому максимальная выходная мощность приборов на нитридах на порядок выше, чем в транзисторах на GaAs. Именно с этим направлением и связывают грядущую революцию в "твердотельной" радиолокации на АФАР. Хотя, безусловно, для перехода этой новой технологии в стадию производства еще должен быть решен сложный комплекс проблем, связанных с надежностью приборов, на что, по прогнозам специалистов, может понадобиться около трех лет. Замечу, что нами совместно с ЗАО "Светлана-оптоэлектроника" уже в 2001 году были получены первые отечественные транзисторы на этом перспективном широкозонном материале.

Второе направление, которое также стремительно развивается последние три–четыре года, базируется на изоморфной и псевдоморфной гетеросистемах InAlAs/InGaAs, выращиваемых на подложках InP. Транзисторы на этих гетероструктурах – самые высокоскоростные из всех существующих в мире твердотельных трехэлектродных приборов. Их рабочие частоты уже перешагнули за 100–200 ГГц и приближаются к субмиллиметровому диапазону. На гетеросистеме InAlAs/InGaAs с использованием 50-нм технологии за рубежом сейчас разрабатываются самые высокоскоростные оптоволоконные линии связи – до 100 Гбайт/с и выше. В ИСВЧПЭ также ведутся работы по этому перспективному направлению, нами уже разработана технология первых отечественных транзисторов с предельной частотой 110 ГГц.

**Вы считаете, основания для оптимизма есть?**

Уверен, что прогресс в России, безусловно, должен быть. Для этого у нас есть все основания. Благодаря активизации в последние два года сотрудничества РАН и РАСУ в этой области, деятельности Совета Главных конструкторов по проблемам АФАР и МО РФ, на всех уровнях растет понимание ключевой роли СВЧ гетероструктурной технологии в современных телекоммуникационных системах и электронных средствах вооружений. Необходимо укрепить складывающийся пока еще хрупкий альянс институтов РАН и предприятий РАСУ и ликвидировать сложившийся здесь за долгие годы катастрофический разрыв между наукой и промышленностью. Объединение всех имеющихся в стране научных и производственных ресурсов в этой области, безусловно, может дать мощный эффект.

При постановке фундаментальных исследований ученым РАН необходимо отдавать предпочтение разработке новых приоритетных технологий и доводить исследования до того уровня, когда их результаты могут быть востребованы промышленностью, т.е. до создания экспериментальных образцов приборов – как это делают ведущие западные университеты. Ведь известно, что на Западе (где умеют считать деньги) наука в значительной мере финансируется промышленными компаниями. Если мы этого не сделаем, то просто превратимся в фабрику подготовки научных кадров для зарубежных фирм.

С другой стороны, электронной промышленности необходимо избавиться от необоснованных амбиций былого величия, реально посмотреть на сложившуюся далеко не блестящую ситуацию и повернуться, наконец, лицом к академической науке для самого тесного, на равных, взаимодействия. Без этого нам не создать промышленного производства, базирующегося на этой чрезвычайно наукоемкой современной технологии. И до тех пор, пока мы этого не сделаем, у нас не будет передовой и конкурентоспособной промышленности самого высокого мирового класса. Без подъема нашей промышленности ничего хорошего нас не ждет, и допустить этого мы просто не имеем права.

**Удачи вам в вашей работе.**

С В.Г.Мокеровым беседовали Б.И.Казуров и И.В.Шахнович