

НАНОЭЛЕКТРОНИКА, КВАНТОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ И ЭЛЕКТРОННАЯ ОТРАСЛЬ В РОССИИ

РАССКАЗЫВАЕТ ДИРЕКТОР ФТИАН АКАДЕМИК А.А.ОРЛИКОВСКИЙ

Фундаментальная наука всегда была основой микроэлектроники, если не сказать – неотъемлемой ее частью. Успехи электроники на всем протяжении ее развития неразрывно связаны с именами выдающихся физиков. И сегодня во всем мире роль академической науки в развитии электроники только усиливается. Что происходит в российской научной составляющей электроники, о ближайших и чуть более отдаленных перспективах, о значении академических исследований для развития отрасли – наш разговор с директором Физико-технологического института РАН (ФТИАН), академиком Александром Александровичем Орликовским. Отметим, что ФТИАН – один из немногих отечественных академических институтов, занимающихся проблемами электроники.

Александр Александрович, кратко расскажите о вашем институте.

Физико-технологический институт Российской академии наук (ФТИАН) организован в соответствии с Постановлением ЦК КПСС и Совета Министров СССР от 28 апреля 1988 года и Постановлением Президиума АН СССР от 12 июля 1988 года. Он создавался на базе отдела микроэлектроники Института общей физики АН СССР, которым руководил академик Александр Михайлович Прохоров. Он и выступил с инициативой преобразовать отдел микроэлектроники в отдельный институт. Со дня организации и до февраля 2005 года ФТИАН возглавлял научный руководитель института академик РАН Камиль Ахметович Валиев.

Институт был создан для решения фундаментальных физико-технологических проблем субмикронной технологии сверхбольших и сверхскоростных интегральных схем на основе развития субмикронной литографии, математического мо-

делирования технологических процессов, разработки вакуумных и плазменных методов создания тонких пленок и их микроструктурирования, разработки и исследования субмикронных приборов микроэлектроники.

По сути, основная цель, ради которой изначально создавался институт – исследования в области технологий микроэлектроники. Но чтобы не ограничивать себя в одной области, институт был назван физико-технологическим. И это было очень правильным и прозорливым решением. Сейчас сфера интересов института сильно расширилась, прежде всего – в область квантовых компьютеров.

Конечно, мы продолжаем заниматься и глубоко субмикронной полупроводниковой (кремниевой) технологией. Так, лаборатория микроструктурирования и субмикронных приборов занимается плазменными технологиями. Это очень перспективное направление, такие методы получили признание во всем мире. Причем специалисты ФТИАН способны не только исследовать и создавать новые технологические процессы, но и установки для их реализации.

Еще одно направление, которое сформировалось в институте, – это микросистемная техника. В этой области мы достаточно интенсивно работали совместно с Ярославским институтом электроники и информатики РАН. С 2007 года этот институт решением Президиума РАН стал нашим филиалом. В ярославском институте отличный коллектив, хорошее, хоть и довольно серьезно устаревшее, оборудование. Но мы стараемся обновлять парк оборудования, и Президиум РАН идет нам навстречу.

Мы преследовали цель не просто присоединить этот институт, а реализовать научную интеграцию. И это удалось. Один из примеров успешной интеграции – исследования в области микросистемной техники. Совместными усилиями мы создаем технологии специальной обработки кремния и формирования микроструктур. Прежде всего речь идет о процессах плазменного травления и установках для их реализации.

Много внимания в ФТИАНе всегда уделялось моделированию технологических процессов и приборов микро- и нанoeлектроники. Ведь еще в 1999 году микроэлектроника стала нанoeлектроникой, преодолев рубеж технологического разрешения 100 нм. Сейчас передовые компании – Intel, IBM и др. –



Александр Александрович Орликовский,

доктор технических наук, профессор, академик РАН. Автор более 250 научных статей и монографии, председатель Научного совета "Перспективные технологии и приборы микро- и нанoeлектроники, элементы квантовых компьютеров" Отделения информационных технологий и вычислительных систем РАН.

До 1981 года А.А.Орликовский занимался физическими и схемотехническими проблемами полупроводниковой памяти, выполнил ряд пионерских работ в этой области. Результаты его трудов внедрены в электронной промышленности. С 1981 года работает в области физических основ технологических процессов микро- и нанoeлектроники, таких как технологии молекулярно-пучковой эпитаксии GaAs на кремнии, проблемы силидизации контактов в КМОП-технологии, технологии плазмохимического осаждения и травления (теория и эксперимент), мониторинг плазмохимических процессов, технологии имплантации сверхмелкозалегающих p-n-переходов, разработка широкоапертурных источников плотной плазмы и полностью автоматизированного плазмохимического оборудования, в том числе плазмо-иммерсионных имплантеров.

В ФТИАН Александр Александрович работает со дня его образования, возглавляя лабораторию микроструктурирования и субмикронных приборов, а с 2005 года – и сам институт. Последние годы в сфере его научных интересов – создание технологии твердотельных квантовых компьютеров, а также технологии МДП-транзисторов с длинами канала порядка 10 нм, включая квантовое описание характеристик таких транзисторов.



работают в области менее 100 нм. А Intel объявила о создании процессора с критическими размерами 45 нм. МДП-транзистор тоже претерпевает некую революцию. В частности, при уменьшении длины канала до 10 нм транзистор становится квантовым, т.е. квантовые эффекты начинают существенно влиять на его характеристики. Следовательно, чтобы смоделировать процессы в таком транзисторе, мы должны использовать уже совершенно другие модели, работать с уравнением Шредингера. Именно этим мы и занимаемся. В данной области ФТИАН находится на передовых рубежах, подтверждение чему – приглашения наших сотрудников выступить с докладами на международных конференциях.

Над моделированием технологических процессов работает лаборатория математического моделирования физико-технологических процессов микроэлектроники, которой руководит Т.М.Махвиладзе. Созданы крупные заделы в области моделирования процессов оптической, электронной и рентгеновской литографии.

Ведь микроэлектроника стала нанoeлектроникой благодаря развитию литографии. Самый современный инструмент в литографии – это степпер-сканер с длиной волны источника $\lambda = 193$ нм (эксимерные лазеры на молекулах ArF). Оказалось, что совершенствование оптических систем, применение иммерсии, специальной техники высокого разрешения при проектировании шаблонов позволяют достичь на этих установках критических размеров элементов до 30 нм и ме-

нее. Получается, что размер элемента – меньше 1/6 длины волны! В компании Intel есть сторонники иммерсионной литографии – их называют "подводниками" (submariners), – которые говорят, что способны довести разрешение до 16 нм, т.е. менее $\lambda/10$. И одна из основных ролей в развитии нанолитографии принадлежит именно моделированию, например, для проектирования оптических шаблонов, в том числе с фазовым сдвигом, моделированию процессов электронной литографии и др.

Помимо литографии, важно моделирование и других технологических процессов – осаждения из газовой фазы, процессов травления и т.д. Ведь все это – глубокая физика, которая позволяет предсказать результат в зависимости от параметров процесса. Например, для формирования микроструктур необходимо глубокое, высокоаспектное травление. Как его реализовать, подсказывает только моделирование, строящееся на понимании физики и химии этого процесса.

Лаборатория ионно-лучевых технологий под руководством Юрия Петровича Маишева занимается ионно-стимулированными процессами и ионными источниками. В этой области еще много проблем. Ведь если вы обрабатываете поверхность пластины заряженными ионами, то тонкие подзатворные диэлектрики могут деградировать, поскольку в диэлектрик с ионом вносится заряд. В МДП-транзисторе при рекордных размерах в плоскости кристалла 45 нм толщина подзатворного диэлектрика должна быть меньше 1 нм.

Через столь тонкий диэлектрик протекает туннельный ток. Проблема решается заменой SiO_2 на другие типы диэлектриков с высоким коэффициентом диэлектрической проницаемости ϵ . Если использовать двуокись гафния или циркония с $\epsilon \sim 20\text{--}25$, то толщину подзатворного диэлектрика можно сделать немного больше. Но все равно это – единицы нанометров, и ионы "портят" подзатворные диэлектрики. Поэтому возникла идея вместо заряженных ионов при обработке поверхности использовать атомы – электрически нейтральные, но обладающие энергией. Над этой проблемой мы сейчас работаем, она очень важна, поскольку удастся избежать деградации диэлектрика из-за его зарядки.

Какую роль в комплексе задач института играют квантовые компьютеры?

Это – центральная тематика института. Идея квантовых компьютеров, квантовых вычислений была впервые выдвинута, по-видимому, Ю.И.Маниным в 1980 году и стала активно обсуждаться после статьи Р.Фейнмана (1982 год). Лучшие физики мира стали работать над этой проблемой. Действительно, благодаря присущему квантовому миру параллелизму производительность таких вычислений существенно выше, чем любых мыслимых суперкомпьютеров.

Но квантовые компьютеры не заменяют собой классические суперкомпьютеры, а дополняют их. Квантовые компьютеры способны обеспечить радикальное ускорение решения таких важных задач, как шифровка и дешифровка данных при передаче секретной информации, обработка и хранение больших потоков информации в масштабе реального времени, решение задач квантовой физики, химии и биологии. Причина преимуществ квантовых информационных технологий в том, что квантовые алгоритмы решают задачи принципиально другими методами по сравнению с классическими алгоритмами.

В квантовом компьютере реализуется квантовый параллелизм. Его суть – изменение состояния отдельного квантового бита (кубита – элементарной ячейки квантового компьютера) вызывает изменение состояния всей системы кубитов, находящихся в так называемых запутанных (entangled) квантовых состояниях. Подобные состояния, характеризующиеся наличием специфических квантовых корреляций, свойственны только квантовым системам.

Направление квантовых компьютеров имеет огромное стратегическое значение. К.А.Валиев с присущей ему научной интуицией первым обратил внимание на эту область, в институте была организована лаборатория физики квантовых компьютеров, которую возглавил Камиль Ахметович. Сейчас в это направление вовлечены и другие лаборатории, в частности, экспериментальными работами в этой области занимается руководимая мной лаборатория микроструктурирования и субмикронных приборов.

Конечно, нам не хватает сил, чтобы охватить эту проблему полностью, мы кооперируемся с такими институтами, как Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, с Ярославским филиалом ФТИАН, с Институтом физики полупроводников (ИФП) СО РАН. Достигнуты определенные результаты. Но технологии твердотельных квантовых компьютеров – это моноатомные технологии. Необходимо "посадить" атом в нужное место кристалла, на очень близком расстоянии (порядка 10 нм) разместить еще один атом и т.д. Для реализации таких технологий нужны соответствующие инструменты.

Академик-секретарь Отделения информационных технологий и вычислительных систем академик Евгений Павлович Велихов, Президиум РАН и лично Президент РАН Юрий Сергеевич Осипов нам очень помогают. Мы сейчас создали чистые комнаты, получили электронный литограф высокого разрешения (Raith 150), один из самых современных электронных микроскопов компании Carl Zeiss. Часть оборудования мы проектируем и делаем сами. Например, установку для плазменной иммерсионной имплантации. Это позволяет реализовать режимы практически одноионной имплантации, что непросто – необходимо сделать маску с "окнами" размером 10×10 нм и попасть в них единичными ионами.

Есть и другие технологии создания квантовых компьютеров. Например, на сверхпроводниках – на неких кольцевых структурах с так называемыми π -контактами, над которыми работает в моей лаборатории небольшая группа Петра Можаяева в кооперации с ИРЭ РАН и с одним из университетов в Дании. Там размеры уже макроскопические, но проблемы все равно не становятся простыми. Очень важной является проблема квантовых измерений. У нас в институте различными ее аспектами занимаются Юрий Богданов, Владимир Вьюрков и др.

О квантовых компьютерах говорят уже достаточно давно, однако практических результатов пока нет. Произошли ли за последние годы в этой области какие-либо серьезные изменения?

Да, конечно. Прежде всего, очень серьезные результаты достигнуты в теории твердотельных квантовых компьютеров. Продвигается, хотя и медленнее, технология получения полномасштабных квантовых компьютеров, состоящих из тысяч кубитов. Причем не технология выступает сдерживающим фактором – в передовых лабораториях мира моноатомные технологии уже есть. Требуются глубокие исследования физики этих явлений. Вы должны измерить состояние спина одного электрона или ядра. Это очень сложно, но возможно. Необходимо обеспечить запутанные состояния между кубитами. Все это требует глубоких исследований, и они интенсивно ведутся. Нужно принципиально решить проблемы на 2–3-кубитных системах, а дальше их можно масштабировать.



Значимые успехи достигнуты и в разрешении проблемы декогерентизации. Кубиты в квантовом компьютере должны быть в когерентном состоянии, только тогда процесс и результат квантовых вычислений не разрушаются. Но когерентные состояния, к сожалению, подвергаются атакам со стороны внешнего мира, прежде всего – тепловым атакам. Для их предотвращения используется глубокое охлаждение, ниже 100 мК.

В результате возможно создать системы с достаточно большим временем декогерентизации – порядка секунд. За это время, благодаря высокой производительности, и удастся осуществить вычисления. Известны различные методы увеличения времени когерентности системы, предлагаются алгоритмы квантовой коррекции ошибок. В этих направлениях также идут поиски и достигнуты хорошие результаты. Поэтому отсутствие коммерческих результатов никого не смущает. Надо только работать.

Но чтобы работать, необходима финансовая поддержка – ведь коммерческой отдачи от квантовых компьютеров в ближайшее время ждать не приходится. Как решаются эти вопросы?

Действительно, работы в области квантовых компьютеров весьма высокочрезвычайны. Например, канадская компания D-Wave Systems недавно объявила о создании сверхпроводникового квантового компьютера на 16 кубитах. Это была невероятная сенсация, ведь весь мир работает с системами на одном-трех кубитах. Правда, никаких подтверждений результата не было, сообщений о реализации вычислений – тоже. Специалисты D-Wave Systems сами признали, что пока не понимают, что сделали. Но это событие стимулирует переход к исследованию многокубитовых устройств. На всю работу было затрачено 40 млн. долл. – более миллиарда рублей! У нас же во всей РАН из всех академических программ на проблемы квантовых компьютеров расходуется около 15 млн. руб. в год.

В США, если вы заявляете в рамках национальной программы "Наноинициатива" работу, направленную на создание квантового компьютера или связанную с этой темой, то вероятность получения на нее гранта – практически 100%. В Федеральной целевой программе Министерства образования, науки и инноваций РФ на 2005–2006 годы для проблемы квантового компьютеринга места не нашлось. Хотя в концепцию по нанотехнологиям – а я участвовал в этих дискуссиях – квантовые компьютеры были включены как перспективное направление.

Определенный оптимизм внушает создание Правительственного совета по нанотехнологиям, который возглавляет первый вице-премьер С.Б.Иванов. Уже принят федеральный закон "О Российской корпорации нанотехнологий". На развитие нанотехнологий в стране выделяется сви-

ше 120 млрд. руб. Это большие деньги, и мы надеемся, что часть из них будет направлена на решение технологических проблем создания квантовых компьютеров.

Кроме того, организована комиссия РАН по нанотехнологиям. Возглавляет ее Нобелевский лауреат академик Ж.И.Алферов, его заместитель – и.о. вице-президента РАН, член-корр. М.В.Ковальчук. В состав комиссии вошли известные специалисты, наше отделение там представляют академики В.Б.Бетелин, К.А.Валиев, Ю.В.Гуляев, В.И.Пустовойт. Задача комиссии – разработать академическую программу по нанотехнологиям. И уж в этой-то программе проблеме квантовых компьютеров мы постараемся обозначить, причем, надеюсь, уже не маленькими деньгами. Потому что, если опять будут копейки, то и результата не будет. Бесплатным бывает ведь только сыр в мышеловке.

Напомню, квантовые компьютеры – это стратегическое направление. И если экстраполировать тенденцию уменьшения размеров элементов в нанoeлектронике, то окажется, что одноатомные технологии для квантовых компьютеров будут реализованы в производстве примерно к 2030 году. То есть запас времени не столь велик – всего 23 года.

Насколько проблема квантовых компьютеров связана с развитием микроэлектроники в целом?

Все это взаимосвязано. Технологии твердотельных квантовых компьютеров – это технологии атомных масштабов. Но ведь и микроэлектроника стремится к таким масштабам. В 2015 году, по прогнозу International Technology Roadmap for Semiconductors, планируется реализовать длину канала транзистора 10 нм. Начиная с 2020 года, элементная база начнет изменяться. Транзисторы в современном виде перестанут быть основой интегральных схем. Им на смену придут квантовые приборы, молекулярная электроника и т.д. Но структурное подобие с современными системами на кристалле может сохраниться.

При уменьшении размеров мы неизбежно попадаем в квантовый мир. Транзистор становится квантовым прибором уже при 10 нм. Такие транзисторы будут реализованы в тонком нелегированном (1–5 нм) кремнии на изоляторе (КНИ). В столь тонком слое кремния проявляется поперечное квантование. Есть еще продольное квантование, ведь электрон распространяется в таком канале как волна Де Бройля, отражается, происходит интерференция падающей и отраженной волн. Это снижает ток в открытом состоянии – но транзистор работает!

С увеличением степени интеграции (ростом числа транзисторов на кристалле) возникает проблема увеличения энерговыделения, которое может достигать 1 кВт на см² кристалла. Дело в том, что с уменьшением размеров транзисторов возрастают токи утечки, в частности, ток через подзатворный диэлектрик, растет ток транзистора в закрытом состоянии.

Кроме того, если внешние электроды транзистора расположены слишком близко друг к другу, возникает ток прямого туннелирования между истоком и стоком. Ток туннелирования между стоком и истоком при длине канала 5 нм уже существенен, он увеличивает энерговыделение кристалла почти на 1 кВт. Значит, надо отводить тепло. Но в принципе природа не запрещает сделать ультраСБИС на таких транзисторах и отводить тепло до 1 кВт/см² и больше.

Какие материалы, помимо кремния, вы считаете наиболее перспективными для электронных приборов со столь малыми критическим размерами?

В диапазоне размеров менее 100 нм одного лишь кремния недостаточно даже для классической микроэлектроники. При этом подложка, конечно, останется кремниевой. Дело в том, что законы масштабирования транзистора обязывают по мере уменьшения длины канала увеличивать степень его легирования. Но вместе с ростом концентрации примесных атомов растет и рассеяние электронов и дырок на атомах примеси. Соответственно катастрофически падает подвижность носителей. И здесь начинают помогать другие материалы, например, твердые растворы кремний-германий. На SiGe-слоях формируются механически напряженные пленки кремния. Создавая одноосевые или биаксиальные напряжения в кремнии, можно нужным образом изменять зонную структуру полупроводника (это своего рода зонная инженерия). В результате формируются каналы, в которых подвижность носителей значительно растет. Для электронов – практически на 100%, для дырок меньше. Обсуждаются возможности применения для каналов МДП-транзисторов на кремниевой подложке материалов с более высокой, чем у кремния, подвижностью электронов, например, германия, германия-кремния и др.

Существуют также гетеропереходные ИС на SiGe с существенно более широким диапазоном рабочих частот. Это было убедительно показано работами компании IBM, которая совместно с фирмой Leybold-Heraeus создала высокопроизводительную установку и технологию высоковакуумного осаждения из газовой фазы (UHV CVD) для SiGe, освоила КМОП- и БиКМОП-процессы на этом материале и получила прекрасные результаты.

Однако при создании транзисторов с длиной затвора порядка 10 нм практически безальтернативной становится технология "кремний на изоляторе". При столь коротком канале легировать кремний уже нельзя – необходимая концентрация примеси становится абсурдно большой. Единственный выход – использовать тонкий слой нелегированного кремния на изоляторе. При этом канал становится баллистическим. Этой проблемой мы глубоко занимаемся, моделируя квантовый КНИ-транзистор. Работаем совместно с ИФП СО РАН – там проводят физические эксперименты. Правда, финанси-

рование этих работ очень невелико. Поскольку и во ФТИАНе появилась чистая комната, в недалеком будущем надеемся и сами заниматься экспериментальными исследованиями.

Очень важное направление – создание ИС на GaAs, GaN и вообще на полупроводниках типа A³B⁵. Конечно, это специализированные СВЧ ИС. Причем ИС на SiGe слегка потеснили GaAs в область частот до 10 ГГц, – об этом в вашем журнале довольно подробно писали. Во ФТИАН велись работы по эпитаксиальному выращиванию GaAs на Si, в том числе чтобы можно было организовать оптические связи внутри кристалла. Получили хорошие результаты, которые были опубликованы в ведущих мировых журналах, таких как Crystal Growth и т.п. Но события 1990-х годов все перечеркнули – специалисты уехали. И работают теперь в США.

Чрезвычайно интересный материал группы A³B⁵ – антимонид индия. Он привлекателен гигантской подвижностью носителей. Если мы научимся формировать высококачественные островки InSb на кремнии, то почему не делать на этом материале каналы транзисторов? Эффект будет значительным.

За счет каких технологий возможно создание приборов с планарными размерами порядка 10 нм?

Как я уже отмечал, определяющая технология при снижении минимальных размеров элементов – это литография. Ее разрешающая способность R определяется соотношением $R = k_1 \lambda / NA$ (формула Рэлея), где NA – числовая апертура оптической системы, λ – длина волны источника, k_1 – коэффициент, определяемый многими факторами. Таким образом, разрешение прямо пропорционально длине волны источника. Поэтому сейчас передовые компании используют установки с источником в глубоком ультрафиолете 193 нм. Еще больше увеличивает разрешающую способность техника иммерсии. В иммерсионных литографах между внешней линзой объектива и кристаллом непрерывно подается и отбирается жидкость, благодаря чему удается добиться более высоких значений числовой апертуры, значение которой пропорционально коэффициенту преломления среды между объективом и пластиной. Сейчас применяют воду, но уже предполагают использовать другие жидкости с коэффициентом преломления 1,6–1,8. Для перехода в область критических размеров порядка 10 нм разрешения литографии с длиной волны 193 нм уже недостаточно. Но на смену идет литография в области экстремального УФ (ЭУФ) с длиной волны 13,5 нм. В этой области очень активно работают компании ASML, Carl Zeiss и др. Уже созданы прототипы второго поколения (системы проекционной литографии с уменьшением). Один такой stepper установлен в нанотехнологическом центре в Олбани, второй – в европейском межуниверситетском микроэлектронном центре (IMEC) в Бельгии. Цель – разработать технологию ЭУФ-литографии.

Однако область 13,5 нм – это уже мягкий рентген. Традиционная преломляющая оптика здесь не применима, пос-



кольку такое излучение интенсивно поглощается всеми мыслимыми материалами. Необходимо использовать отражающие оптические системы на рентгеновских зеркалах, четыре-шесть зеркал составляют объектив. Но в системах с отражательной оптикой большой числовой апертуры достичь нельзя. Тем не менее, ее можно довести до 0,4. Кроме того, в формуле Релея множитель k_1 полностью определяется технологией. На его величину влияют дифракционные эффекты, параметры резистов (чувствительность, контраст, коэффициент преломления и др) и т.д. Оценки показывают, что, с помощью источников с $\lambda = 13,5$ нм, можно получить изображения с минимальными размерами 10–12 нм. Но почему в спектре лазерно-плазменных источников нельзя использовать излучение на меньшей длине волны? Технология останется той же самой. Ведь если природа этого не запрещает и есть потребность, инженерные умы обязательно решат такую задачу.

Рентгеновские зеркала – это многослойные структуры (сверхрешетки) кремний-молибден. Такие структуры формируют на подложке, например, кремниевой. При этом коэффициент отражения достигает 70%. Дело это очень тонкое. В России работы в области ЭУФ-литографии совместно с компаниями ASML, Karl Zeiss и др. ведутся в Институте физики микроструктур РАН (директор – член.-корр. РАН С.В.Гапонов) под руководством член.-корр. РАН Н.Н.Салашенко. И несмотря на многочисленные проблемы, в этом институте достигнуты очень хорошие результаты.

Я считаю, что исследования в области по ЭУФ-литографии – тот задел, который нельзя упустить. По существу, в нашей стране есть работа по источникам (Институт спектроскопии РАН), работа по рентгеновским зеркалам (ИФМ РАН), наконец, есть глубокое понимание того, что можно и нужно сделать. Поэтому в России должны быть выделены средства на создание собственного оборудования такого класса. Иммерсионные степперы-сканеры стоят около 30 млн. долл. Сколько будут стоить ЭУФ-степперы? Может, не покупать, а сделать самим? Немного времени пока есть – ведь речь идет о суб-30-нм технологии.

А как вы оцениваете ближайшие перспективы развития микроэлектроники в России?

Отечественная промышленность начала, наконец, продвигаться вперед. В 2007 году в "НИИМЭ и Микрон" (входит в концерн Sitronics) должна быть реализована технология 0,18 мкм французской компании STMicroelectronics. В 2008 году на том же оборудовании планируется освоить и 0,13 мкм. А в 2009 году предполагается уже переход к уровню 90 нм. Одновременно начнется внедрение 300-мм пластин.

Намерено модернизировать свое производство и другое отечественное предприятие – "Ангстрем". Еще во времена СССР для этого предприятия компанией Meissner&Wurst был создан производственный модуль со всей инженерной инфра-

структурой. "Ангстрем" получил, наконец, государственные гарантии для инвесторов и сейчас интенсивно работает над созданием нового производства с технологическим разрешением порядка 0,18 мкм.

Помимо "НИИМЭ и Микрона" и "Ангстрема" активно работает и Воронежский завод полупроводниковых приборов, также принадлежащий концерну Sitronics. Очень мобильным выглядит НИИ точного машиностроения (НИИТМ), готовый разрабатывать современное технологическое оборудование.

В Зеленограде создана фабрика по производству фотошаблонов. Теперь в России можно не только проектировать кристаллы, но и создавать весь комплект шаблонов. Конечно, это лишь первый шаг, и такая фабрика должна развиваться, поскольку техника шаблонов очень сложна, как и автоматизация их проектирования.

В отечественную электронику вкладывали бы деньги многие инвесторы, но у нас почти нет рынка сбыта продукции микроэлектронных производств. В стране известны лишь единичные примеры разработок новых радиоэлектронных устройств и систем. В то же время в мире рынок цифрового телевидения дает годовой прирост примерно в 50%. Рынок MP3-плееров также растет примерно на 50% в год, мобильных телефонов и сотовой связи – на 20% и т.д. Но в России собственного производства таких устройств нет, соответственно, нет и рынка для электронных компонентов для них. Ведь то, что сейчас планирует "Микрон" – это относительно небольшое производство. Высокопроизводительный зарубежный завод обрабатывает порядка 20 тыс. 300-мм пластин в месяц. Здесь пока речь идет о 10 тыс. 200-мм пластин. Больше в России и не нужно – внутреннего рынка для крупномасштабной продажи компонентов еще нет.

Очень хорошо, что у руководителей государства, в Правительстве РФ, в Роспроме появилось понимание того, что рынок радиоэлектроники нужно развивать. Этими вопросами серьезно занимается Управление радиоэлектронной промышленности и систем управления (УРЭП и СУ) и непосредственно его начальник Ю.И.Борисов. Решением Правительства РФ формируется отдельная федеральная целевая программа по развитию элементной базы и радиоэлектронной аппаратуры,



которая должна стартовать в 2008 году. По существу, это программа государственной поддержки развития внутреннего радиоэлектронного рынка. Выглядит программа очень привлекательно. Вот когда этот рынок начнет развиваться, микроэлектронные производства и станут расширяться.

Но вместе с тем, беспокоит тот факт, что создаваемые микроэлектронные фабрики пока не стимулируют развитие производства кремния в нашей стране. Даже если говорить о металлургическом кремнии – в мире его производится порядка миллиона тонн в год, в России – 50–60 тыс. т/год. А спрос очень велик. Я был на фабрике металлургического кремния в Иркутске. Замечательная фабрика. Она распродает абсолютно всю свою продукцию, вплоть до кремниевой пыли. Во времена СССР для производства металлургического кремния использовались кварциты, которые закупались в странах Южной Америки. Два года назад я был свидетелем, как в Бурятии было аттестовано месторождение кварцитов с очень высокой природной чистотой. Все это открывает перед нашей страной совершенно уникальные возможности. В то же время, производства поликристаллического кремния у нас практически нет, а в мире его производится порядка 30 тыс. тонн в год.

Самое главное – к 2010 году основным потребителем кремния станет солнечная энергетика. Мировое бизнес-сообщество собирается построить 10 суперфабрик по производству солнечных элементов. Каждая из них за год будет выпускать солнечные элементы общей мощностью 100 МВт. 10 таких заводов будут производить 1 ГВт в год – это атомная электростанция! Представьте, будет создаваться по одной АЭС в год.

Причем, к 2010 году по прогнозам себестоимость солнечной энергии упадет до 1,25–1,5 долл./Вт. Такие фирмы-производители полупроводникового технологического оборудования, как Applied Materials, уже адаптируют свое оборудование под заводы для солнечных элементов. Но один завод-гигант с объемами выпуска 1 ГВт/год будет потреблять тонну кремния в час. Может создаться огромный дефицит в кремнии. Уже сейчас мировое сообщество реагирует на это. Япония, Корея, Китай строят кремниевые заводы. России в этом раскладе пока нет. Надеюсь, пока. Ведь это очень прибыльное дело, и наши олигархи и государство начнут им заниматься.

А какова роль науки, в частности – ФТИАН, в процессе микроэлектроники в России?

Российская электроника пережила не лучшие времена. Но для того чтобы даже в ближайшем будущем оказаться "в нужное время в нужном месте", необходимо вести интенсивные фундаментальные исследования в области кремниевой микро- и нанoeлектроники. Их результаты уже оказываются востребованными.

Простой пример – в первые годы после перестройки мы предлагали руководству "Микрона" подключить нас к какой-либо работе. Особой нужды в нас тогда, надо сказать, не испытывали, хотя и были примеры очень эффективного взаимодействия. Сейчас настало время, когда уже "Микрон" сам предложил ряд совместных работ на базе наших заделов. Например, стала актуальной проблема диэлектриков с низким коэффициентом диэлектрической проницаемости ($\epsilon \sim 2-3$). Это могут быть пористые диэлектрики типа SiOCH . Технология формирования таких диэлектриков не очень ясна, ее надо создавать. Мы же обладаем ионными и плазменными методами нанесения диэлектриков, их можно использовать для получения таких диэлектрических слоев. Причем требуется не просто создать технологию, но и модернизировать технологическую установку. НИИТМ разработал кластерную машину, мы сделаем для нее свои модули.

Другой пример. Я упомянул о российской фабрике фотошаблонов. ФТИАН обладает заделами по использованию техники высокого разрешения при проектировании шаблонов. Сейчас они востребованы одной из ведущих американских компаний, а должны быть востребованы российскими компаниями. И это обязательно произойдет.

В области МЭМС мы занимаемся акселерометрами и спектрометрами на основе подвижных решеток. Для этих целей нами вместе с ярославским филиалом разработана технология и установка глубокого травления кремния. Кремниевые решетки уже сделаны, проводим их испытания. Работа по спектрометрам обязательно выльется в конечные изделия. Зеленоградский "Технологический центр МИЭТ" заказал нам установку плазменного травления для производства МЭМС-приборов. К нашим МЭМС-технологиям постоянно проявляют интерес белорусские производители ("Транзистор", "Интеграл"). Главное, чтобы был заказчик на подобные приборы.

Если резюмировать, то развитию российской электроники помогут именно опережающие исследования, причем ведущиеся широким фронтом. Мы не должны стесняться того, что у нас пока нет 45 нм, нужно заниматься суб-100-нм диапазоном, обрести в этой области глубокое понимание, создать пилотные технологии и образцы оборудования. И тогда, может быть в 2010–2015 годах, подобные промышленные технологии появятся и в России. По крайней мере, "НИИМЭ и Микрон" наметил себе именно такие сроки. Аналогичные показатели фигурируют и в программе по элементной базе, продвигаемой УРЭП и СУ.

Опережающие исследования обязательно обеспечат участие институтов РАН в промышленном развитии страны. Ведь подобных заделов у академических институтов много.

Спасибо за содержательный рассказ.

С А.А.Орликовским беседовал И.В.Шахнович