

0,35-МКМ КМОП-ПРОЦЕСС В РОССИИ – В 2004 ГОДУ

РАССКАЗЫВАЮТ АКАДЕМИКИ РАН Е.П. ВЕЛИХОВ, К.А. ВАЛИЕВ И В.Б. БЕТЕЛИН



Евгений Павлович Велихов.

Президент Российского научного центра "Курчатовский институт", академик-секретарь Отделения информационных технологий и вычислительных систем РАН, академик РАН, профессор, Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской и Государственной премий.



Камиль Ахметович Валиев.

Директор физико-технологического института РАН, заместитель академика-секретаря Отделения информационных технологий и вычислительных систем РАН, академик РАН, профессор. Первый директор НИИ молекулярной электроники (Зеленоград).



Владимир Борисович Бетелин.

Директор Научно-исследовательского института системных исследований (НИИСИ) РАН и Института микротехнологий РНЦ "Курчатовский институт", академик РАН, профессор.

Какова предыстория проекта, почему он возник?

К.А.Валиев. В конце 80-х годов был ряд попыток организовать производство персональных ЭВМ. Этой идеей увлекался, много работал над ней академик Е.П.Велихов. Под его руководством и при его прямом участии в 1985–1990 годах совместными усилиями Академии наук и ПО ЗИЛ была решена комплексная задача проектирования и производства магистрально-модульных ЭВМ в стандарте VME на импортной элементной базе, в том числе рабочих станций для решения задач автоматизации проектирования и управления производством в автомобильной отрасли. НИИСИ РАН выступал главным исполнителем этого проекта со стороны Академии наук.

Следующим шагом стала собственная разработка основных комплектующих ЭВМ – процессоров, контроллеров и т.п. – и их производство на зарубежных кремниевых фабриках. Логическим продолжением этой работы явилось создание собственного микрозлектронного производства. Ключевые идеи реализации проекта выработал Евгений Павлович Велихов – он его инициатор. Основным исполнителем был НИИСИ РАН.

Е.П.Велихов. Надо понимать, что, исходя из экономической ситуации в России в начале 90-х, завод для массового производства мы построить не могли. Однако и малосерийное, прототипное производство, на котором производственный цикл, включая подготовительные

Пожалуй, ни одна производственная площадка в последние годы не была окружена таким ореолом слухов и домыслов, такой завесой молчания, как микрозлектронный производственный участок, создаваемый совместно Российским научным центром "Курчатовский институт" (НЦ КИ) и Научно-исследовательским институтом системных исследований Российской академии наук (НИИСИ РАН). Нет, говорили о ней многие, но о реальном положении дел никто конкретно рассказать не мог. Отдельные фрагментарные сведения – не в счет.

Чтобы выяснить истину, мы встретились с непосредственными идеологами и исполнителями этого проекта – академиками РАН Евгением Павловичем Велиховым, Камилем Ахметовичем Валиевым и Владимиром Борисовичем Бетелиным.

операции, занимает несколько дней, крайне необходимо России, прежде всего для обеспечения перспективных исследований в области современных информационных технологий. Интерес к подобным производственным линейкам сегодня во всем мире очень велик – массовое производство их не заменяет.

Кроме того, появление подобной линейки означает, что теперь наши специалисты могут учиться, осваивать современную полупроводниковую технологию непосредственно в России. Очень важно, чтобы у нас в стране были люди, которые своими руками ощутили бы, что значит 0,5-; 0,35-мкм процесс. Не теоретически, а на практике.

Почему Курчатовский институт вдруг взялся за создание микроэлектронного производства?

Е.П.Велихов. Говорить "вдруг" – неправильно. Во-первых, подчеркну, это – совместный проект Российской академии наук и Российского научного центра "Курчатовский институт", который на всех этапах активно поддерживали Президент РАН академик Ю.С.Осипов и вице-президент РАН, лауреат Нобелевской премии академик Ж.И.Алферов. Кроме того, в свое время еще И.В.Курчатов способствовал разработке установок ионной имплантации для электронной промышленности. В Курчатовском институте проводились разработки оборудования для ионной литографии. То, что они впоследствии не были востребованы электронной промышленностью, – другой вопрос. Был и ряд других работ в области электронных технологий. Немаловажно, что одно из направлений деятельности института – создание сверхчистых материалов – имеет непосредственное отношение к микроэлектронике. Ведь освоенное нами получение сверхчистых изотопов сопоставимо по сложности с получением химических веществ, необходимых для полупроводниковой технологии. Работы в этом направлении ведутся. Так что электроника для Курчатовского института – не чуждая область, она органически сочетается с его тематикой.

На каких принципах и для каких задач разрабатывался проект?

В.Б.Бетелин. Прежде всего, мы были ограничены финансово. Необходимо было уложиться в сумму, в 15–20 раз меньшую стоимо-

сти аналогичного серийного завода. Производство должно было обеспечить выпуск малых серий СБИС (десятки тысяч штук в год) с очень широкой номенклатурой. Причем речь шла о достаточно сложных СБИС – микропроцессорах, контроллерах и т.д.

Мы сформулировали несколько основополагающих принципов. Во-первых, каждая пластина обрабатывается индивидуально. В результате операционная зона ограничивается размерами одной пластины, что упрощает стабилизацию параметров технологического процесса и гарантирует высокое качество. Второй принцип – минимальный объем сверхчистой зоны. Это также повышает стабильность, упрощает оборудование. Наконец, для нас было важно, чтобы вся работа по интеграции технологического оборудования была выполнена за границей. В 1996 году, когда начинался проект, сделать что-то подобное в России, даже из готовых установок, было невозможно. Камиль Ахметович Валиев, один из крупнейших российских специалистов в области полупроводникового производства, осуществлял научное руководство проектом в части разработки и реализации технологического процесса, а также методологии аттестации как собственно процесса, так и технологического оборудования.

Е.П.Велихов. Особенность реализации технологической линии в том, что все работы по интеграции основного технологического оборудования проводились за рубежом, в Швейцарии. Это был единственный вариант создания подобного производства. В России собрать из отдельных установок подобную линейку было бы совершенно невозможно в силу таможенных, транспортных и прочих проблем. Одну установку нам пришлось собирать самим – на это ушел год: поставлялась она по частям, процесс прохождения границ был крайне сложным и длительным. В то же время в Швейцарии полная интеграция всего комплекса оборудования в одну кабину требовала в среднем около трех месяцев.

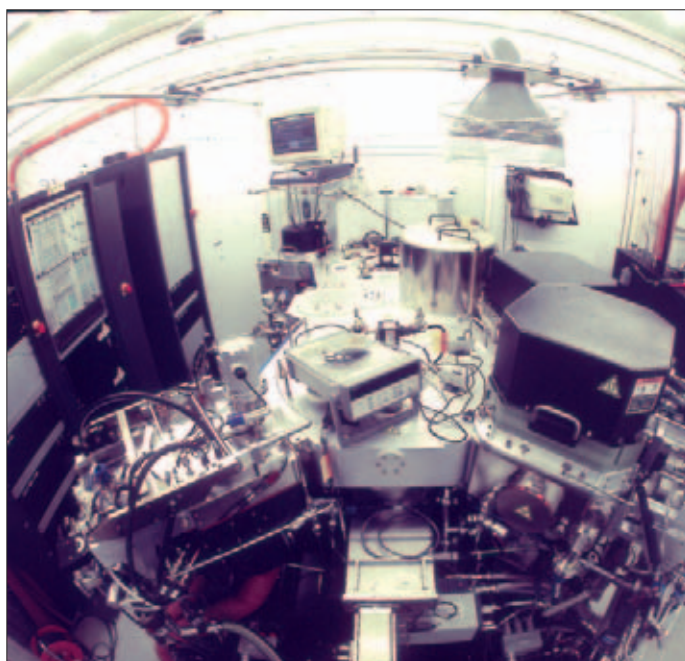
К.А.Валиев. Идея проекта – реализация технологической линии в мобильных контейнерах – не нова. Еще в начале 90-х годов фирма Laser Ray поставила небольшой полупроводниковый завод в контейнерах для НИИ научного приборостроения в Санкт-Петербурге. Оборудование позволяло лазерным пучком формировать рисунок непосредственно по слою фоторезиста. Пластины покупались с готовыми транзисторными структурами, формировались только межсоединения в слоях металлизации.

В.Б.Бетелин. Действительно, сам подход был апробирован еще тогда. Собственно, во всех наших решениях технической новизны как таковой нет. Напротив, мы стремились использовать испытанные подходы, поскольку у нас не было права на ошибку. Остановились же в конечном счете на кластерном производстве, позволяющем за относительно небольшие деньги создать заверченный современный завод. Огромный вклад в реализацию проекта на всех его этапах внес К.А.Валиев: концепция технологического маршрута, рекомендации по выбору технологического оборудования, экспертиза проекта, возникавшие по ходу реализации непростые технические проблемы – далеко не полный перечень вопросов, при решении которых высочайший профессионализм и опыт Камилля Ахметовича были незаменимы. Один из основных соисполнителей проекта – Физико-технологический институт РАН.

Сам наш завод – это 10 микроклиматических кабин, размещенных в производственной зоне, чистота атмосферы в которой не влияет на технологический процесс. Все технологическое оборудование находится только в кабинах. Объем арматуры при этом минимизируется, газовые магистрали не превышают 1,5–2 метров, что способствует чистоте и стабильности параметров реагентов. Извне подается только воздух, азот, электроэнергия, деионизованная вода и тех-



Микроклиматические кабины



Технологический кластер в микроклиматической кабине

нологические газы. В каждой кабине установлен свой кондиционер, который доводит параметры атмосферы – влажность, температуру. Специальные фильтры обеспечивают необходимую чистоту.

В каждой микроклиматической кабине несколько процессных камер объединены роботом в кластер. За счет этого пластина в вакууме, без извлечения, проходит многократную обработку. Оборудование кабин изготовлено из стандартных узлов компаний Applied Materials и Semitool (отмывка), но специально для нас. Между кластерами пластины переносятся оператором в специальном контейнере, способном в течение 2–2,5 часов поддерживать внутри атмосферу с классом чистоты 1. Каждая кабина оснащена загрузчиком, с помощью которого робот помещает пластины в контейнер. В целом производство реализует КМОП-процесс, включающий около 300 операций. Кремниевые пластины с уже сформированным эпитаксиальным слоем – импортные, но в России, на "Маяке", начинают делать 200-мм пластины, в принципе можем работать и с ними.

Общая площадь производственной зоны – 750 м², все разместили очень компактно. Важно отметить, что производство оборудовано специальными химическими поглотителями, по выбросам мы удовлетворяем самым жестким европейским требованиям, что подтверждает соответствующий сертификат. То, что остается после поглотителей, сгорает в специальном кислородно-водородном дожигателе. Кислород и водород мы не храним, а по мере потребности производим из деионизованной воды. Все технологические газы с чистотой 5–6 девятка мы покупаем за рубежом, за исключением азота.

Очень важно, что организован полный мониторинг работы системы. В каждой установке от 5 до 10 тыс. датчиков. Из них в системе мониторинга реально задействовано порядка 1000 в технологическом оборудовании и около 600 – в инженерных установках. Все это сведено на единый компьютер. Я у себя в кабине могу видеть, что происходит с инженерным оборудованием (вода, электричество и т.д.) и с технологическим процессом на каждой машине. Вся информация записывается в базу данных. Она чрезвычайно важна, прежде всего – для обеспечения должного выхода годных. Для любой пластины мы можем посмотреть, как проходил техпроцесс, каковы были параметры деионизованной воды и т.п. Примечательно, что даже за рубежом подобные системы мониторинга есть далеко не везде.

Как вы решали вопросы контроля за изготовлением кабин и проводили приемо-сдаточные работы?

В.Б.Бетелин. Интеграция технологического оборудования осуществлялась при непосредственном участии наших специалистов, которые в дальнейшем проводили и приемку микроклиматических кабин. Кроме того, основные этапы процесса интеграции фиксировались на цифровых фотографиях, которые мы получали по электронной почте. При проектировании кабин особое внимание наши специалисты уделяли проблеме прочности, поскольку кабины предстояло перевозить из Швейцарии в Россию на автотрейлере. Отмечу, что самая тяжелая из них весила 14 тонн.

Как я уже говорил, микроклиматическая кабина – вещь самодостаточная. После монтажа каждую кабину испытывали посредством так называемого электромеханического пуска, т.е. без технологических газов. По результатам этих испытаний и проводилась приемка. Самая большая сложность заключалась в том, что после приемки фирма снимала с себя гарантии на работоспособность оборудования. Мы застраховали его на то, что после транспортировки электромеханический пуск воспроизведется. К счастью, все прошло удачно, выплачивать страховку не потребовалось.

Драматический момент наступил, когда отправились первые машины с нашими кабинами. Выехали они в начале августа 1998 года, а приехали уже после 17 августа. В стране – дефолт. Это был чрезвычайно сложный момент, фактически он задержал нас на два года. Но пережили.

Наверное, произвести отдельные кластеры и доставить их в Россию – это еще не все?

Действительно, проект предусматривал несколько этапов. Начальный этап – разработка проекта, выбор соответствующего оборудования – это 1995–1997 годы. Первый контракт с компанией Applied Materials мы заключили в октябре 1996 года, монтаж и пусконаладочные работы за рубежом проводились в 1997–1999 годы. Столь растянутый срок был вызван проблемами с финансированием. Демонтаж и транспортировка в Россию – 1998–1999 годы, параллельно с работами за рубежом.

Существенный объем работ потребовался в отведенном для производства здании РНЦ КИ – подготовка и переоборудование помещения, организация электро-, водо- и газоснабжения. С качеством воды и электричества были проблемы, пришлось ставить специальные источники бесперебойного электропитания (ИБП). Общая мощность потребления производства: пиковая – 1,6 МВт, средняя – 800 кВт. ИБП поддерживает потребление 800 кВт в течение 15 минут до штатного отключения. Один раз на два часа электропитание уже пропадало. С чистой водой тоже пришлось помучиться.

В 2003 году мы произвели опытную партию 32-разрядных RISC-микропроцессоров 1890BM1T по 0,5-мкм процессу с тремя слоями металлизации.

Какова производительность вашей технологической линии?

Проектная мощность линии – до 100 тыс. СБИС в год.

Но при такой производительности себестоимость кристаллов оказывается весьма высокой? Не окажется ли ваше производство убыточным?

В.Б.Бетелин. В этом вопросе все зависит от того, к чему отнести себестоимость. Если к цене ПК – да, это дорого. А если к стоимости разработки современной СБИС, которая составляет несколько миллионов долларов, то она вполне приемлема и сопоста-

вима со стоимостью изготовления прототипа на любой зарубежной фабрике.

Конечно, по себестоимости мы не можем конкурировать с массовым производством, но ведь и линия задумывалась как мелкосерийная, для изготовления пилотных, прототипных партий.

Е.П.Велихов. Судите сами – если установка стоимостью в сотни миллионов долларов не может эксплуатироваться из-за отсутствия чипа – оправдано ли создание линейки стоимостью в десятки миллионов для его производства? А сколько будет стоить изменение электроники в действующей установке, если зарубежный производитель снимет с производства используемые в ней СБИС? Особенно, если постоянное функционирование этой установки критически важно. Я уже не говорю о том, сколько стоит безопасность критически важных информационных систем. Конечно, для массового производства СБИС линейка не предназначена, в этом сегменте она никогда не окупится. Но ее и нельзя рассматривать с этих позиций. Поэтому я не считаю, что подобное производство – убыточное.

Означает ли сказанное, что производство предназначено для сугубо заказных, штучных изделий, и ни о каком коммерческом его использовании речь не идет?

В.Б.Бетелин. Конечно, это не так. Потенциальный рынок для нашей продукции достаточно широк. В любом индустриальном приложении, будь то завод, электростанция, железная дорога и т.п., от элементной базы требуются особые свойства. Тираж подобных систем невелик: десятки, сотни, максимум – тысячи. Удельная же стоимость СБИС в этих системах очень мала. Любой индустриальный контроллер гораздо дороже ПК. А на любом заводе требуется несколько тысяч контроллеров. В этой нише рынка мы можем быть вполне конкурентны, в том числе с зарубежными компаниями. Но многое, конечно, зависит от государства и его стремления поддерживать национального производителя.

В целом, если говорить о занимаемой нами рыночной нише, – это prototyping, прототипирование. Развивающееся и востребованное во всем мире направление. Здесь мы тоже сами ничего не изобрели.

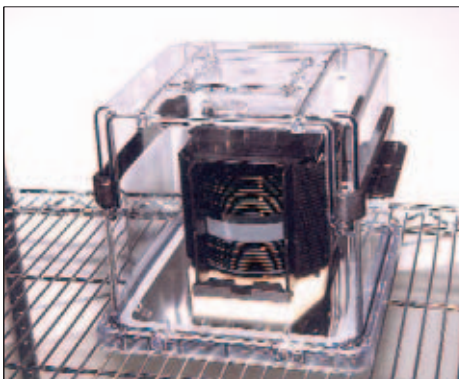
Микропроцессор 1890BM1T – это тоже ваша разработка?

В.Б.Бетелин. Да, ее выполнил наш дизайн-центр. Это – 32-рядный RISC-процессор с тактовой частотой 33 МГц (до 50 МГц) при 0,5-мкм техпроцессе. При его модернизации и изготовлении по 0,35-мкм процессу рассчитываем на тактовую частоту 100–150 МГц. В своем классе он соответствует среднему мировому уровню.

Для чего нужен этот процессор?

В.Б.Бетелин. Коммерческие аппаратно-программные платформы, на основе которых построено большинство современных информационных систем, – наиболее слабое звено с точки зрения информационной безопасности. Конкурентная борьба требует от производителей этих платформ форсированного сокращения времени жизни производимого продукта путем сокращения сроков разработки нового продукта с новыми функциональными возможностями. Это ведет к снижению качества тестирования и выпуску продуктов с различными дефектами, в том числе – с дефектами защиты. Другими словами, требования рынка доминируют над требованиями безопасности платформы.

Аппаратно-программная платформа "Багет" разрабатывалась исходя из первичности требования информационной безопасности. Она обеспечивает минимум функциональности аппаратуры и ОС, до-



Контейнер для переноски пластин

статочной для основных сервисов безопасности. Разработка таких сервисов безопасности на базе МП1890BM1T ведется НИИСИ РАН в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН "Разработка фундаментальных основ создания научной распределенной информационно-вычислительной среды на основе технологии GRID".

Очевидно, что продукт данного класса будет гораздо дороже коммерческих решений, но за безопасность надо платить. НИИСИ РАН разрабатывает и аппаратную, и программную составляющую этих сервисов.

Используется процессор и в традиционно разрабатываемых НИИСИ РАН VME-модулях и контроллерах.

За рубежом свои проекты вы больше не изготавливаете?

В.Б.Бетелин. Не совсем так. Мы можем производить СБИС с технологическими нормами 0,5 мкм. С этого года переходим на 0,35 мкм. То есть проекты с необходимым технологическим разрешением 0,35 мкм и менее мы вынуждены реализовывать за рубежом. Дальше по мере развития нашей технологии мы будем переводить их на собственное производство.

Принимаете ли вы заказы на производство от сторонних разработчиков?

В.Б.Бетелин. Принимаем. Скажем, сейчас по 0,5-мкм процессу мы собираемся запустить один из контроллеров семейства "Мультикор"*. Но проблема в том, что для работы со сторонними заказчиками у фабрики должно быть специальное подразделение. У нас его пока нет, и на нормальную работу с заказчиками сил не хватает. Надеюсь, это – вопрос времени.

Кроме того, многие чипы для коммерческого применения требуют минимизации себестоимости, следовательно – проектных норм. Мы еще только запускаем 0,35-мкм процесс, а многим уже нужно 0,25; 0,18; 0,13 мкм. В этом смысле мы ограничены.

Будут ли эти ограничения преодолены?

В.Б.Бетелин. Технологическую линию можно развивать и дальше, тем более, что нас постоянно к этому призывают. Фотолитографический комплекс в принципе позволяет формировать элементы топологии с точностью 0,18 мкм. Однако понятно, что для 0,18-мкм процесса помимо фотолитографии нужно и другое оборудование, технологическое и измерительное. Есть и принципиальные ограничения. Например, металлизация возможна только алюминием, меди не будет.

Довести производство до уровня 0,18 мкм реально. Но в целом все зависит от вложенных денег. Конечно, речь не идет о серийном производстве – но небольшие партии вполне возможны.

*См.: Технологии опережают все. Интервью с директором ГУП НПЦ "ЭЛВИС" Я.Я. Петричковичем – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2004, №1, с.4–10.



Е.П.Велихов. Важно отметить, что линейка создавалась с конкретной целью. Сначала – на 0,5-мкм процесс, сегодня осваиваем 0,35 мкм. В перспективе переход на 0,18 мкм. Но действующий завод нельзя совершенствовать бесконечно – иначе он не будет работать.

Владимир Борисович, НИИСИ РАН сегодня обладает полным циклом создания сложных систем – от разработки ЭВМ до дизайн-центра кристалльного уровня и полупроводникового производства. Насколько способствует работе тесное взаимодействие разработчиков СБИС и специалистов производственного участка?

В.Б.Бетелин. Поскольку у нас плотно работают разработчики СБИС и технологи, в их сотрудничестве возникает новое качество – например, разработчик микропроцессора может прийти к главному технологу и обсудить с ним изменение конкретных технологических параметров для достижения заданных характеристик процессора. Собственно, так работает весь мир – для сторонних заказчиков есть стандартный, типовый маршрут, библиотека элементов. Для своего же изделия, например микропроцессора, маршрут оптимизируется. Именно так и мы работаем. Поле экспериментальной работы большое.

Вы называете производство экспериментальным, опытным, пилотным. Однако подразумеваете вполне промышленный, хоть и малосерийный, выпуск кристаллов. В чем экспериментальность технологической линии?

В.Б.Бетелин. Да, для нас линия не экспериментальная. Однако она и не чисто серийная. На базе этой линейки уже виден путь достижения уровня 0,18 мкм. Но чтобы двинуться дальше, нужно ставить серии экспериментов. Скорее линия носит производственно-экспериментальный характер. Мы изготавливаем партии пластин по уже устоявшемуся технологическому маршруту, но параллельно ведём экспериментальную работу.

Кроме того, сама возможность построения производства кластерно-кабинным методом, при полной сборке модулей за рубежом, требовала доказательств, и по сути проект сам по себе был экспериментом.

Вы удовлетворены его результатами?

К.А.Валиев. Идея сработала. Линия заработала практически сразу после сборки. В первой же партии при приемке линии (!) выход годных – более 50%. Для нас это был невиданный результат. Но он показывает современное состояние технологии микроэлектроники. Разумеется, для работы на таком оборудовании специалистов обучали. Привлекались и опытные кадры, технологи из Зеленограда, в том числе с "Микрона".

Успешный эксперимент ярко демонстрирует, что на современном этапе развития микроэлектроники (наверное, это справедливо и для других областей) уже нет деления на оборудование и технологию. Сегодня это – единый комплекс. Покупается технологическая единица, которая реализует определенную встроенную в нее технологию. Как было раньше? – поставляешь некое универсальное оборудование, под которое, с учетом индивидуальных особенностей, разрабатывался техпроцесс. Все было отдано на откуп технологу. Теперь же приобретается оборудование вместе с технологией – все уже настроено и запрограммировано. Более того, вмешиваться в процесс не позволено. Весь мониторинг системы настроен на то, чтобы обеспечить стабильную работу, отследить стабильность реагентов, температуры. Вот этот подход и обеспечил успех.

Следовательно, если мы хотим развивать технологию, необходимо стремиться к тем же целям, которых уже достигли создатели дан-

ной линейки. Прежде всего следует развивать оборудование. На рынок можно выходить лишь с машинами именно такого класса, с уже встроенной технологией. В России разработок оборудования на этом уровне абсолютно нет. Никто в данной области не работает. Конечно, по уровню машиностроения мы отстали очень сильно. Даже спроектировать подобные установки вручную невозможно – требуются специальные САПР, которых у нас тоже нет.

В целом же, эта успешная и очень красивая работа заслуживает самой высокой оценки. Она хоть и заняла довольно много времени, но исключительно в силу финансовых и организационных проблем, успешно преодоленных Владимиром Борисовичем Бетелиным. Огромную роль в этом сыграл и Евгений Павлович Велихов. Один из главных итогов работы – демонстрация того, что в принципе возможно приобрести готовую линейку, и она будет работать. Одно это делает эксперимент успешным и рентабельным.

Есть ли надежда, что подобное оборудование когда-нибудь будет производиться или разрабатываться и в России?

К.А.Валиев. В относительно далекой перспективе – ведь Россия поднимается в экономическом смысле, появляются новые инвестиционные возможности – надо искать пути участия в международном разделении труда при создании технологического оборудования. У нас совершенно нет связи с международным сообществом именно в этой области. Ведь участвует же Курчатовский институт в международном проекте создания термоядерного реактора. Этот реактор делает весь мир, в том числе и в плане финансирования.

В области полупроводниковых технологий этим путем идут все развитые страны. Скажем, в разработку нового поколения фотолитографических машин на дальнем УФ совместно вкладывают деньги ведущие потребители этого оборудования – компании Motorola, Intel и т.д., – хотя они и конкуренты. На мой взгляд, единственный способ присоединиться к процессу создания полупроводниковых технологий – вклиниться в этот международный процесс. Подобные примеры уже есть – так, в Нижнем Новгороде Институт физики микроструктур РАН (директор – Виктор Сергеевич Гапонов) активно участвует в создании оптики для разрабатываемой европейским консорциумом фотолитографической машины с длиной волны излучения 13 нм, полностью на зеркальной оптике. Но наши разработчики, изготавливающие многослойные зеркала, – полностью на подхвате, работают за относительно небольшие деньги и никакого авторства на конечный продукт у них нет. А ведь подобные машины разрабатываются всего в трех местах – в Европе, США и в Японии. Но все же отдельные ростки участия в международной интеграции у нас есть, осталось осознать, как войти в международный альянс развития микроэлектронной технологии.

В заключение, откуда такая завеса секретности и слухов вокруг успешного проекта?

В.Б.Бетелин. Ждали завершения работ. Причина – только в этом. Ведь судьба проекта, поверьте, складывалась очень непросто, особенно в конце 1998 года. Мы фактически потеряли два года. Только сегодня, когда уже надежно отработан 0,5-мкм процесс, осваивается 0,35 мкм и виден путь к 0,18 мкм, мы можем ответственно говорить о возможности сотрудничества с другими организациями.

Желаем успехов в вашем важном и очень непростом деле.

Беседу провели Б.И.Казуров и И.В.Шахнович