

Производство российских фотонных интегральных схем выходит на промышленный уровень

Визит в лабораторию интегральной фотоники и на кристалльное производство АО «ЗНТЦ»

В. Миронюк



АО «Зеленоградский нанотехнологический центр» (ЗНТЦ) обладает собственным кристалльным производством и возможностями корпусирования различных типов чипов. Он не только выпускает достойную продукцию по кремниевой технологии, но и развивает другие передовые направления – это производство элементов интегральной фотоники и электронных компонентов на нитриде галлия GaN(Si).

За последнее время ЗНТЦ совершил ряд шагов, усиливающих его позиции в российской электронной промышленности. В начале 2021 года здесь состоялся запуск обновленного участка сборки и корпусирования микросхем. В конце того же года открылась новая лаборатория для измерения оптических характеристик приборов интегральной фотоники. А в начале 2022 года в компании подходит к концу создание отдельного кристалльного производства изделий на GaN(Si).

Мы посетили ЗНТЦ, чтобы ознакомиться с особенностями производства изделий интегральной фотоники и возможностями лаборатории измерения их оптических характеристик. Нас сопровождали и подробно ответили на наши вопросы руководитель технологического направления интегральной фотоники Константин Эдуардович Певчих и начальник кристалльного производства Галина Анатольевна Ширкова.

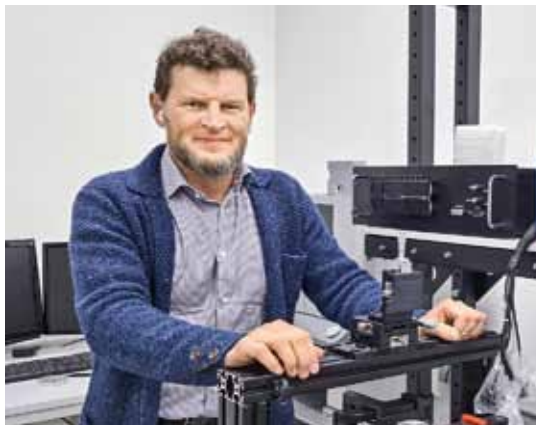
ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЦЕНТРА

О новом для предприятия векторе развития – интегральной фотонике – рассказал Константин Певчих. Фотоника охватывает множество направлений. ЗНТЦ развивает одно из них – производство фотонных интегральных схем (ФИС), в том числе базовые элементы: мультиплексоры, делители (сплиттеры), интерферометры и резонаторы. В настоящее время эти изделия не производятся в нашей стране.

Около двух лет назад компания своими силами и на собственные средства начала разрабатывать тему интегральной фотоники. Зеленоградский нанотехнологический центр предположил, что это будет актуально, и не ошибся. Необходимость развития фотоники для оптических систем связи стала общепризнанной, и нанотехнологический центр стал участником реализации сквозного проекта, якорным заказчиком которого выступает ПАО «Ростелеком», а партнером-производителем телекоммуникационной аппаратуры – компания «Т8».

«Мы получили полную поддержку развития направления интегральной фотоники от «Ростелекома» и «Т8». Но, когда еще не было сквозного проекта, ЗНТЦ осуществлял финансирование этого направления в основном из собственных средств, – рассказал Константин Певчих. – В частности, была начата разработка оптического разветвителя и мультиплексора, а производственная площадка была доукомплектована необходимым оборудованием. Один из первых измерительных стендов собран полностью на наши деньги, а еще один – на средства МИЭТ».

Разработка и освоение технологий фотоники – новое и одно из наиболее перспективных на сегодняшний день направлений развития Зеленоградского наноцентра. Его актуальность и востребованность подтверждается тем, что в настоящий момент в России не выпускается отечественная фотонная компонентная база, и производители телекоммуникационного оборудования вынуждены использовать зарубежную продукцию. ЗНТЦ – одно из первых



Константин Певчих



Галина Ширкова

предприятий, которое будет осуществлять производство ФИС.

Говоря о роли МИЭТ в развитии этой технологии, Константин отметил, что она заключается в первую очередь в том, что специалисты института занимаются технологиями, измерениями и, что важно – подготовкой кадров. «Нам очень скоро потребуется больше специалистов. В МИЭТ уже разрабатываются образовательные программы под эту специализацию, которую практически не преподают в стране. Конечно, есть в Физтехе, в ИТМО, но там упор на теорию, а в МИЭТ наши курсы будут с традиционно практическим уклоном – на производство и измерения», – дополнил Константин. По его словам, разработкой конструкции и базовой технологии занимаются сотрудники ЗНТЦ, а когда требуется углубиться в физические или математические основы



Стенд для исследования характеристик элементов интегральной фотоники

технологических процессов, обращаются к специалистам МИЭТ.

Системы связи – это лишь одна из ключевых областей применения технологии интегральной фотоники. Эффект от ее внедрения заключается в достижении такой скорости передачи информации по существующей оптической инфраструктуре, которая может в 100 раз превышать текущие показатели. Это уже отработанная технология, и используется она во всех телеком-компаниях мира, в том числе и отечественных. Где-то это применение массовое, где-то только опытное, а где-то промежуточное, но в любом случае интеграция этой технологии в системы связи будет продолжаться.

Это связано с неизбежной потребностью в наращивании объемов передаваемых данных, особенно для только начавшего свое глобальное развитие Интернета вещей. Сама технология работает следующим образом: мы берем множественные оптические сигналы и размещаем их на волнах разной длины, наподобие радуги, сворачиваем это все в единую нить, передаем на большое расстояние, а уже там расшифровываем обратно в цветные ленты (потoki) и раздаем их пользователям.

С точки зрения безопасности это тоже очень интересная технология, поскольку оптический сигнал невозможно считать удаленно. Электрический – считывается с помощью различных датчиков, антенн для определения слабых радиоволн и прочих излучений, а у оптической связи этого недостатка нет. Поэтому, не перерезав оптический провод и не присоединив к нему специальное устройство, считать данные не получится. Но повреждение провода определяется мгновенно, и передача информации по нему прекращается.

Для дополнительной защиты данных сейчас в технологию оптической передачи данных встраивают элементы оптической криптографии. При этом по еще одной цветной ленте идет специальный код. Учитывая, что все эти данные передаются не одновременно и шифр генерируется на постоянной основе, его считывание также практически бесполезно: ведь он оторван от той информации, которой он кодируется.

АО «ЗНТЦ» разрабатывает и производит несколько типов элементов фотонных интегральных схем для реализации механизма уплотнения информации. Конечно, сами устройства, реализующие передачу данных, гораздо сложнее, и зачастую в них присутствуют не только произведенные в России компоненты, но что касается именно интегральных схем для уплотнения информационного потока, они на 100% разработаны и произведены ЗНТЦ.

Помимо ЗНТЦ интегральной фотоникой занимаются и другие компании – но, как правило, на лабораторном оборудовании или на других технологиях. Однако, чтобы в случае успеха развернуть серийное производство, необходимо вложить огромные средства, которые

мало у кого есть. «Цена каждой единицы технологического оборудования начинается от миллиона долларов – а промышленному производству требуется 10, 20, 30 единиц, – отметил Константин. – Мы уже готовим здесь серийное производство и в ближайшем будущем сможем выпускать 20 тыс. изделий в год».

Достаточно ли производство массовое, чтобы быть по цене на уровне мировых конкурентов? На этот вопрос Константин ответил утвердительно: «На начальном этапе развертывания серийного производства разницу в цене немного помогает компенсировать сквозной проект. Однако выход на плановые объемы позволит цене наших изделий быть на рыночном уровне. А при таких количествах уже можно будет разговаривать и об экспортном потенциале».

КРИСТАЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

После ознакомления с лабораторией интегральной фотоники мы перешли на кристалльное производство, где Галина Ширкова рассказала об оснащенности участков для производства фотонных чипов и других реализуемых технологиях и проектах.

«В настоящее время одним из ключевых направлений в АО ЗНТЦ является изготовление изделий интегральной фотоники. Их технологические маршруты значительно отличаются от классических и привычных маршрутов кремниевой микроэлектроники», – рассказала Галина.

Предприятие работает с пластинами кремния диаметром 150 мм, которые получает от отечественных поставщиков. Часть из них выращивает слитки монокристаллического кремния и режет его на пластины, а часть – только режет, приобретая слитки у других компаний.

Поступающие на участок пластины проходят входной контроль внешнего вида и дефектности материала. Также подсчитывается количество инородных загрязнений на их поверхности. Если оно превышает определенную норму, пластины отправляют поставщику на перебивку. Бывают дефекты, которые невозможно сразу заметить. Производители пластин полируют их на финишной операции. Если там до этого были царапины, то они заполировываются, и этот дефект выявляется только после обтравки кремния, когда снимается его верхний слой. Если царапины очень глубокие, партию приходится признавать бракованной. Технологи стравливают этот кремний до полного исчезновения царапин и только после этого запускают пластины в работу.

Основное оборудование участка теххимии, с которого начинается маршрут изготовления изделий, – ванны жидкостного травления и установки спреевой отмывки. «В технологических процессах на этом участке нет ничего специфического – они такие же, как и на других производствах, только оборудование здесь, в частности ванны химтравления, преимущественно новое», – сказала

Галина и обратила наше внимание на микроскоп для контроля внешнего вида. Микроскоп подключен к компьютеру с соответствующим ПО, с помощью которого производятся измерения. По результатам измерений технолог заключает, пускать партию дальше или скорректировать процесс и, например, произвести дополнительное травление. «Хотя у нас применяются стандартные, отработанные процессы, их иногда приходится корректировать», – отметила Галина.

Затем мы перешли на участок плазмохимического травления (ПХТ) слоев после фотолитографии. Здесь пластины в кассетах через загрузочный шлюз передаются в ту или иную камеру одной из трех расположенных на этом участке установок ПХТ.

Для всесторонней оценки результатов ПХТ пользуются растровым электронным микроскопом (РЭМ). С его помощью можно не только посмотреть топографию, но и, наклонив пластину, измерить глубину травления, оценить гладкость стенки травления – очень важный параметр для многих изделий.

В производстве кристаллов также используется установка вертикального травления на основе Bosch-процесса, осуществляющая плазмохимическое высокоселективное травление кремния, диэлектрических и поликремниевых слоев, а также анизотропное травление с высокоаспектным соотношением. Она обеспечивает идеально гладкие стенки травления при аспектном соотношении 4:1 (отношении глубины отверстия к его диаметру). В ЗНТЦ отработана технология получения на этой установке аспектного соотношения 10:1. Минимальный диаметр вытравливаемого отверстия – 100 нм.

Такая технология травления обеспечивает возможность производства изделий интегральной фотоники. У волновода сложная геометрическая форма, очень малые размеры между его стенками, минимальный размер элементов 350 нм, и при этом высота волновода, в котором надо протравить рисунок, достигает 3 мкм.

На кристалльном производстве ЗНТЦ нам показали два участка фотолитографии – контактной и проекционной.

Технология контактной фотолитографии традиционна: на пластину ровным слоем наносят фоторезист, накладывают фотошаблон и производят экспонирование. Далее на операции проявления незасвеченные участки фоторезиста вымываются обычным растворителем, а засвеченные – остаются и формируют так



Участок плазмохимического травления

называемую фоторезистивную маску. Затем может быть ПХТ, жидкостное травление, нанесение тех или иных пленок, ионное легирование, разгонка примесей и т. д.

На участке проекционной фотолитографии стоит комплекс, состоящий из системы проекционной литографии и трека нанесения и проявления. Машины соединены в единое целое с помощью переходного шлюза. «В отличие от контактной фотолитографии, здесь участие человека в процессе заключается только в том, что он пишет рецепт, в библиотеке фотошаблонов выбирает шаблон, который будет здесь применяться, и нажимает кнопку „Пуск“ – далее нанесение фоторезиста, экспонирование, проявление и задубливание производятся автоматически, – рассказала Галина. – Кроме того, данная установка позволяет нам производить изделия интегральной



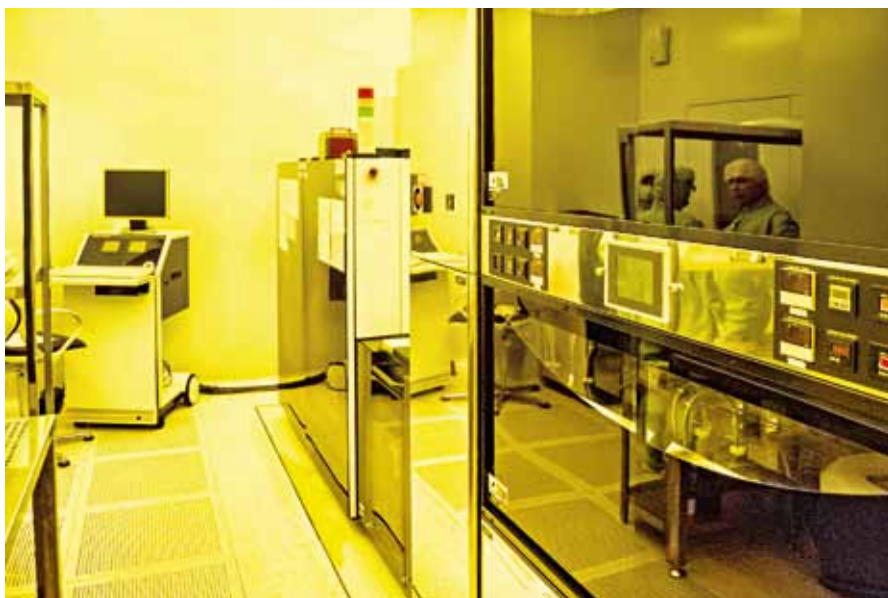
Участок контактной фотолитографии

фотоники и на нитриде галлия с топологической нормой 350 нм, причем с дефектностью в разы меньшей, чем на контактной фотолитографии, где сказывается человеческий фактор».

Участок проекционной фотолитографии пополнен еще одной установкой, у которой большой размер кадра – 44×44 мм. Благодаря этой особенности на ней технологично и удобно производить процесс без сшивки кадров, которая может вносить некоторую неточность. Установка находит свое применение, например, в производстве рентгеночувствительных детекторов, имеющих большие размеры.

На этой установке планируется изготавливать макетные образцы изделий фотоники, производство которых после отработки процессов будет передано на другую установку проекционной фотолитографии.

Особенность изделий фотоники в том, что, хотя их без проблем можно изготавливать на обычном кремниевом производстве, у них существенно меньше топологическая норма, что требует более высокого качества выполнения операций.



Комплекс проекционного оборудования, предназначенный для нанесения и проявления DUV-фоторезиста и экспонирования с минимальной топологической нормой 350 нм

На операциях фотолитографии важно проводить контроль дефектности и внешнего вида. Для оперативной оценки качества используются микроскопы. При топологической норме 1 мкм контроль можно осуществлять с помощью микроскопа. «Мы производим изделия интегральной фотоники и СВЧ и силовые транзисторы на подложках нитрида галлия на кремнии.

При топологических размерах менее 609 нм выполняется компьютеризированный контроль, – отметила Галина. – У нас есть установка, которая позволяет измерять топологию как одиночных пластин, так и партии пластин. Оператор пишет управляющую программу и создает элементы, которые машина должна проверить и проконтролировать. В итоге получаются цифры, определяющие, например, погрешность при фотолитографии. По полученным данным в программное обеспечение степера при необходимости вносят поправочные коэффициенты, корректирующие процесс переноса изображения».

Установка служит для контроля операций проекционной фотолитографии и численной оценки точности их выполнения, например, по рассовмещению слоев.



Введенные в эксплуатацию на новом участке установка нанесения и проявления фоторезиста (а) и система проекционной литографии (б) с размером запечатываемого кадра 44×44 мм



Электронно-оптический микроскоп для автоматического CD-контроля (измерения критических размеров)

«Таких установок автоматического контроля в России всего несколько. Данная установка отличается от остальных тем, что позволяет делать контроль по металлу, – сообщила Галина и добавила, – наше предприятие устанавливает еще одну подобную измерительную систему, на которой можно будет работать и с золотом. Это актуально для контрактного производства, когда другие предприятия заказывают у нас либо отдельные технологические услуги, либо проведение измерений».

Термические процессы выполняются на участке диффузии, где установлены две восьмиканальные печи зарубежного производства. Здесь производят осаждение некоторых видов диэлектриков, отжиг, нанесение поликремния, нитрида кремния.

Оборудование для производства изделий фотоники фактически такое же, как для кремниевой микроэлектроники. Здесь применяются классические процессы травления, осаждения, фотолитография. УЗНТЦ есть весь набор необходимого оборудования, которому потребовались лишь небольшие доработки, например подвели газ моногерман или модернизировали оснастку, в частности кассеты, под немного более толстые пластины интегральной фотоники. Однако технология имеет свою специфику. Например, для изделий фотоники очень сложно получить те толщины слоев, которые требуются, и с нужным коэффициентом оптического преломления. Специалисты предприятия, проводя эксперименты по использованию для создания пленок новых материалов, вместо TEOS вводят в технологический процесс моногерман – предполагается, выращенная пленка будет прозрачнее и будет обладать меньшими оптическими потерями.

«Недавно вместе с коллегами из НИИМЭ мы проводили работу по осаждению SiON – результаты были

хорошие, – сообщила нам Галина. – На нашем производстве предусмотрен достаточно большой объем инструментов и оборудования, чтобы сделать те или иные технологические процессы, среди которых есть и такие, которых нет на других предприятиях. У нас не совсем стандартная линейка оборудования – это связано с тем, что она первоначально предназначалась для изготовления МЭМС-датчиков, а они бывают самых разнообразных форм. Этим направлением мы занимаемся и по сей день. У нас очень хорошие гироскопы, а наш акселерометр в несколько раз лучше зарубежного аналога».

На участке ионной имплантации установлен ионно-лучевой имплантер, рассчитанный на низкие и средние энергии до 200 кэВ. Здесь производят имплантацию ионов бора, фтора и мышьяка. Наше внимание Галина обратила на расположенную рядом с имплантером измерительную установку, позволяющую с высокой точностью оценивать геометрию пластин, измерять осажденные пленки, контролировать их качество и создавать 3D-визуализацию. По словам Галины, это единственная в России установка с таким функционалом и комплектацией, которые привлекают заказчиков со всей страны. Они приезжают, чтобы исследовать свои пленки, измерить геометрию,



Восьмиканальная печь на участке диффузии для проведения термических операций



Ионно-лучевой имплантер (а), служащий для внедрения ионов примесей в кремниевую пластину, и его стойка управления (б)

составить 3D-визуализацию разброса толщины слоев по пластине, оценить равномерность нанесения пленок на своем оборудовании.

Участок нанесения металлических пленок оборудован магнетронной установкой нанесения пленок Al, Al-Si-Cu, Ti. Галина дополнила: «Мы работаем и с рядом специфических металлов, например хромом. В фотонике используется хромовая маска. Некоторые металлы выполняют функцию маски, они защищают ранее нанесенные слои и впоследствии совсем стравливаются. А некоторые после ряда операций служат проводниками для электрических сигналов».

Этот участок также расширяется. Заканчиваются приемочные испытания нового кластерного комплекса магнетронного напыления. С его помощью в технологию добавятся золото, медь и ряд других металлов.

Ознакомление с кристалльным производством Галина завершила небольшим комментарием по качеству кремния: «У изделий интегральной фотоники более строгие требования к изначальной дефектности пластин кремния – их поверхность и геометрия должны быть идеальными. Не должно быть царапин, которые приведут к нарушению работы изделия, а коробление пластин должно быть минимальным. Если для обычной интегральной микроэлектроники коробление 40–90 мкм вполне в норме, то для интегральной фотоники коробление, влияющее на передачу оптического сигнала внутри пленок, допускается не больше 10–30 мкм. Поэтому входной контроль подложек для интегральной фотоники очень жёсткий».

ЛАБОРАТОРИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

В гермозоне практически невозможно увидеть изделия в процесс выполнения той или иной операции – они скрыты в технологическом оборудовании. А вот в лаборатории измерения оптических характеристик элементов интегральной фотоники, где мы также побывали, нам удалось увидеть их в действии. Здесь мы могли проследить, как лазерный луч, введенный, например, в сплиттер, превращался на выходе в два луча. О назначении лаборатории и ее оснащении нам рассказал Константин Певчих.

Лаборатория существует всего несколько месяцев. По словам Константина, на сегодняшний день это самая укомплектованная в России лаборатория. В настоящее время специалисты Зеленоградского наноцентра от-

рабатывают технологию производства мультиплексора и на стендах исследуют его характеристики.



Установка для измерения методом электрохимического вольт-фарадного (CV) профилирования толщины пленок с точностью 1 нм и глубины p-n-переходов

Для изготовления мультиплексора сначала на кремниевой пластине создают слой SiO_2 , затем специальный слой SiO_2 с примесями, а затем укрывают слоем БФСС. Эти слои считаются основными рабочими. Пластины с наносенными слоями исследуют на эллипсомере. Если слои сделаны правильно, в них травлением формируют волноводные структуры.

Следующая стадия исследования продукта – измерение параметров полученных структур. На стенде направляют луч лазера в канал мультиплексора и исследуют его распространение в структуре, измеряя характеристики на выходе. Исследовав один канал, лазер сдвигают и делают замеры на следующем. Это кропотливая ручная работа.

На другом стенде, кроме мощности, можно еще исследовать спектральные характеристики лучей на выходе. Будущее качество прибора определяется мощностью и формой сигнала на выходе в сравнении с входным сигналом.

В мультиплексоре, исследуемом в настоящее время, 48 входных оптических каналов, сигналы которых объединяются, затем по единственному волокну передаются на большие расстояния и после этого в демультиплексоре разделяются по 48 выходным каналам. «Чип мультиплексора сложен в разработке, в изготовлении, и измерить его параметры также не просто, – рассказал Константин. – Даже присоединить волноводы к мультиплексору – задача не из простых: там требуется совмещение с точностью до полумикрона».

При измерении параметров сплиттера, например, надо убедиться, что на выходе два абсолютно идентичных сигнала – и по мощности, и по форме. Если сигналы различаются, то сплиттер бракуют. «Есть, правда, ряд приемов, – заметил Константин, – которые позволяют



Измерение оптических характеристик мультиплексора интегральной фотоники

в определенных пределах улучшить ситуацию, но их возможности ограничены. Оптические изделия исправить очень сложно. А говорить сейчас о проценте выхода наших элементов интегральной фотоники рано, поскольку они еще на стадии отработки технологии».

Рассказывая об оборудовании лаборатории, Константин обратил наше внимание на атомно-силовой микроскоп компании Asylum Research: «На нем можно видеть фактически атомную решетку материала. Он примечателен тем, что у него очень хорошая защита от вибрации, в том числе и за счет применения системы активной виброзащиты».

Когда технология отработана, нет необходимости использовать атомно-силовой микроскоп. Он нужен при разработке изделий. С его помощью отработывают нанесение слоев, плазменное травление, а также контролируют шероховатость поверхностей, которая влияет на потери в волноводах за счет переотражения.

Как было отмечено выше, лаборатория укомплектована современным оборудованием всемирно известных фирм. Здесь и измерительный комплекс компании Luna – первый в нашей стране оптический комплекс этой марки, и оборудование для измерения оптических характеристик марки Keysight. Последняя компания известна своей продукцией для электрических измерений. Оптического оборудования в Россию она поставляет мало. «Зеленоградский наноцентр – это первая компания, которой они поставили настолько полный комплект оптической измерительной аппаратуры», – подчеркнул Константин.

В лаборатории также используются приборы других известных марок, таких как Thorlabs, Yokogawa, GW Instek.

Такая оснащенность измерительной лаборатории, а также то, что мы увидели в гермозоне кристалльного производства, дают уверенность, что все инициативы ЗНТЦ непременно завершатся успешно. ●



Спектроскопический эллипсомер производства SENTECH Instruments для измерения толщин многослойных пленок и оптических характеристик пленочных структур