



ОТ ЛИТОГРАФИИ К НАНОИНЖИНИРИНГУ: РАСТИТЕ ВМЕСТЕ С RAITH

Рассказывает исполнительный директор компании Raith P. Йеде



ПРИСУТСТВИЕ НЕМЕЦКОЙ КОМПАНИИ Raith в России можно достаточно точно охарактеризовать как "широко известна в узких кругах". Между тем ее продукция действительно популярна и массово востребована во множестве научных и производственных центров всего мира, от США до Китая. Это не удивительно, ведь Raith выпускает достаточно широкий спектр уникального оборудования – от законченных систем электронно-ионно-лучевой литографии, наноинженерии до приставок к стандартным растровым электронным микроскопам. О продукции компании, ее задачах и перспективах – наш разговор с исполнительным директором компании Raith, доктором Ральфом Йеде (Ralf Jeide).

Господин Йеде, как образовалась компания Raith?

Raith – это научная и технологическая компания, которая более 32 лет работает на рынке высокотехнологичного оборудования. В 1980 году доктор Герман Райт (Hermann Raith) организовал ее как небольшую семейную фирму. Изначально компания занималась вспомогательным оборудованием и программным обеспечением для растровых электронных микроскопов (РЭМ). В частности, одним из первых коммерческих продуктов стал выпущенный в 1984 году 5-дюймовый предметный столик для нового поколения РЭМ. Через год на рынок была представлена первая коммерчески доступная система компьютерного управления для 5-осевого эвцентрического предметного

столика. Уже в 1986 году в США было открыто представительство Raith.

Все это время Г.Райт работал над решением, позволяющим превратить растровый электронный микроскоп в устройство электронно-лучевой литографии. И к 1988 году такая система – ELPHY – была создана. Это был программно-аппаратный комплекс управления стандартными РЭМ. Аппаратная часть ELPHY представляла собой плату, встраиваемую в персональный компьютер (в слот шины PCI). Программная часть, а именно программа управления засветкой, устанавливалась на тот же компьютер. В результате стандартный РЭМ – производства компании Carl Zeiss или других фирм – становится инструментом для электронно-лучевой литографии. Более того, поскольку



электронно-лучевая система РЭМ обладает существенно большей мощностью, чем того требует именно литография как процесс формирования изображений на резисте, с помощью ELPHY растровый электронный микроскоп превращается в инструмент для формирования (инженеринга) любых микро- и наноструктур. На их поверхности можно "писать" электронным лучом, формируя определенный микрорельеф. С развитием ионных микроскопов, систем на основе фокусированных ионных лучей (FIB – focused ion beam) системы ELPHY позволили превратить и стандартные FIB-системы в установки ионно-лучевой литографии и инжиниринга.

ELPHY стал первым "прорывным" продуктом Raith. Эта система была настолько востребованной на рынке, что ее продажи не просто обеспечили финансовую устойчивость компании, но и ее перманентное динамическое развитие. Именно с ELPHY как базового продукта начался рост компании в сторону нанолитографии и нанотехнологий в целом. За ELPHY последовали другие продукты, например, усовершенствованный 5-осевой эвцентрический столик, столик с лазерной интерференционной системой позиционирования, разрабатывалось все больше и больше программного обеспечения.

К 1995 году количество этих отдельных решений, приставок и приложений к РЭМ перросло в качество, что позволило нам построить полноценную систему электронно-лучевой литографии. На рынок был представлен электронно-лучевой литограф RAITH150, обладавший сверхвысоким разрешением. Эта система в первую очередь предназначалась для исследований и разработок, а также для прототипного производства. Ее первыми покупателями стали такие лидирующие в мире научные центры, как компания Infineon Technologies, Массачусетский технологический институт, Королевский

технический университет в Стокгольме и др. Уже в 2006 году такая система появилась и в России – в Институте физики полупроводников СО РАН в Новосибирске.

Система RAITH150 стала первой среди установок литографии и наноинженерии Raith. В 2004 году появилась новая серия оборудования e_LINE – первая многофункциональная система, объединившая в себе средства электронно-лучевой литографии, РЭМ, зондовых измерений и других наноманипуляций. Еще через два года была представлена система ионно-лучевой литографии ionLiNE.

О динамике роста Raith говорит тот факт, что если в момент выхода на рынок системы ELPHY в компании работало 25 человек, то уже к 2000 году, в связи с развитием массовых продаж RAITH150, коллектив сотрудников в головном офисе возрос до 50 специалистов. В 2002 году открылась наша дочерняя фирма в Гонконге, поскольку требовалась постоянная поддержка пользователей в этом регионе. Сегодня в компании Raith в Дортмунде работает свыше 100 специалистов. Штат дочерней компании в США составляет 15 человек, в Гонконге – 5 человек. Кроме того, у компании есть широкая сеть представительств в различных странах. В частности, в России наши интересы представляет компания "ОПТЭК". Среди наших клиентов – ведущие исследовательские центры



Штаб-квартира компании Raith в Дортмунде



во всем мире, такие как Массачусетский технологический институт, Стэнфордский университет, компания IBM и т.п.

Мы стремимся постоянно находиться на переднем фронте инноваций в области инжиниринга наноструктур – разрабатываем новое оборудование, модернизируем, добавляем новые функции к уже существующим системам.



Электронно-лучевой литограф RAITH150^{TWO}

Ваши системы предназначены для научных или производственных задач?

Все наше оборудование предназначено в первую очередь для научно-исследовательских задач и изготовления прототипов. Однако один из основных векторов нашего развития направлен

в сторону создания более производительного оборудования, которое востребовано в промышленном производстве. Этот путь продолжит историю нашего роста и успеха в ближайшие годы.

Уже сегодня около 20% нашей продукции используется в целях, близких к производственным. Так, помимо создания прототипов, в отдельных случаях на производстве используется комбинация электронно-лучевой литографии с классической технологией фотолитографии. Электронно-лучевая литография позволяет создавать сверхмалые, критически важные малоразмерные структуры, в то время как классическая фотолитография используется для формирования более крупных структур. Например, в микроэлектронике при производстве интегральных СВЧ-схем отдельные элементы СВЧ-транзисторов, такие как области канала, Т-образные затворы эффективно формировать с помощью электронно-лучевой литографии, тогда как оставшуюся часть схемы – посредством классических фотолитографических методов. Тем самым преодолевается основной "врожденный недостаток" систем электронно-лучевой литографии – низкая

производительность по сравнению с методиками на основе фотошаблонов. В этой нише у нас уже есть несколько клиентов, в частности, в Швейцарии в Институте технологий Цюриха (ETH Zurich).

Какие системы сегодня выпускает компания Raith?

С точки зрения производительности, отмечу появившуюся порядка четырех лет назад установку RAITH150^{TWO} – развитие системы RAITH150. RAITH150^{TWO} – универсальный инструмент для создания прототипов и исследований микро- и наноструктур. Это наш наиболее производительный электронно-лучевой литограф, в нем максимально автоматизированы все процессы, обеспечена высокая воспроизводимость результатов благодаря специальным системам контроля микроклимата, предприняты специальные меры защиты от вибраций, электромагнитных полей, акустических воздействий и т.п. Система позволяет рисовать линии с гарантированной шириной менее 10 нм. Благодаря предметному столику с лазерной интерференционной системой контроля можно работать с пластинами диаметром 200 мм. Сам столик может перемещаться в пределах 150×150×20 мм. Точность позиционирования при этом составляет 1 нм. Благодаря вертикальным пьезоприводам экспонируемая поверхность постоянно удерживается в фокусе электронно-лучевой системы. Достаточно сказать, что гарантированная статистическая точность совмещения, обеспечиваемая прибором, – не хуже 35 нм, что на практике означает точность не ниже 10 нм в 80% случаев.

Параметры литографического процесса можно варьировать в очень широких пределах. Так, диапазон тока луча изменяется от 5 пА до 20 нА, энергия электронов – от 100 эВ до 30 кэВ. В приборе использован новый 20-МГц цифровой генератор изображений, что позволяет использовать высокочувствительные резисты и большие токи. При этом не деградирует разрешение – при токе в 3 нА



обеспечивается диаметр пятна луча не более 4 нм.

RAITH150^{TWO} – это своеобразный мост, который сближает исследовательские работы и производство. Так, компании Infineon и IBM использовали эту машину для разработки нового поколения микросхем памяти.

Семь лет назад мы сделали весьма значительный шаг, выпустив установку e_LiNE. В ней к классической электронной литографии и РЭМ добавились функции наноинжениринга – электронно-лучевое осаждение и травление, наноманипуляции, а также контактные измерения и рентгеновский микроанализ. Помимо создания структур, система позволяет проводить различные виды измерений непосредственно на образце. С помощью такой комбинации различных возможностей инструмента можно не только создавать структуры, задавать им определенные свойства, но и измерять их. Это уникальное, новое решение. Примерно год назад мы существенно улучшили возможности этой системы, представив на рынок установку e_LiNE plus.

Какими возможностями наноинжениринга обладает система e_LiNE plus?

Наноинжениринг подразумевает набор различных инструментов. В частности, установка оснащена системой электронно-лучевого осаждения и травления (реактивное ионное травление). Осаждаемое вещество в газообразном виде подается к образцу, где под воздействием пучка электронов ионизируется и осаждается на поверхность. При реактивном травлении происходит химическое взаимодействие ионов активных газов (как правило, галогенов) с материалами образца, образовавшиеся при этом продукты уносятся газовой струей. Система e_LiNE plus оснащена газовым инжектором с пятью независимыми соплами и системой их трехмерного позиционирования. Среди наиболее востребованных практических применений этой технологии – ремонт фотолитографических масок, формирование масок для травления, изготовление

кантилеверов для атомно-силовых микроскопов и т.п. Установка позволяет формировать весьма сложные трехмерные наноструктуры. В системе e_LiNE plus предусмотрена установка различной оснастки, например, нагревающий/охлаждающий держатель образца, детектор для энергодисперсионного микроанализа, криоловушка для улучшения вакуума, система плазмохимической очистки поверхности и т.п.

Уникальная особенность установки e_LiNE plus – она оснащена системой из четырех наноманипуляторов (вольфрамовых игл) с размером наконечников менее 100 нм. Они могут использоваться как зонды для точечных электрических измерений свойств образца, оснащаться такими инструментами, как нанозахваты, "ножи" и т.п. Ключевая особенность – все манипуляции можно проводить при непосредственном визуальном контроле в режиме РЭМ. Это позволяет очень точно и аккуратно подвести зонды и манипуляторы к исследуемому объекту.

Например, система e_LiNE plus позволяет изготовить токопроводящую воздушную перемычку, подвести к ней зонды и непосредственно измерить ее электрическое сопротивление. Одно из интересных приложений – операции с нанотрубками, когда к ним можно аккуратно подводить зонды и проводить электрические измерения. То же самое можно делать с графеном и другими наноструктурами. Это позволяет создавать устройства наноэлектроники с новыми свойствами.

Недавно мы представили уникальное решение на базе e_LiNE plus – интегрированный в систему атомно-силовой микроскоп (АСМ). Благодаря чрезвычайно высокой точности управления предметным столиком можно интегрировать АСМ непосредственно под электронно-оптической колонной, что



Установка электронно-лучевой литографии и наноинжениринга e_LiNE plus



позволяет проводить электронно-лучевую литографию с непосредственным контролем процесса в режиме АСМ. Отмечу, что создавалось это решение в рамках консорциума с нашими партнерами – немецкой компанией Attocube systems AG и Институтом Вальтера Шоттки технического университета в Мюнхене.



Предметный столик с лазерной интерферционной системой управления

Еще одна уникальная особенность системы e_LiNE plus – возможность литографии в режиме неподвижного луча (FBMS). В этом режиме перемещается только предметный столик с образцом, а электронный луч остается неподвижным. Это важно для формирования достаточно крупноразмерных

структур, порядка нескольких миллиметров, с нанометровой точностью, например, массивы волноводов. Такие структуры могут формировать все современные электронно-лучевые литографы, но традиционно при этом используется следующая схема. Сначала в режиме сканирования луч рисуется небольшой фрагмент размерами порядка 50–200 мкм. Затем предметный столик с объектом смешается и рисуется следующий фрагмент и т.д. Такая процедура называетсястыковкой полей. Основная проблема здесь – точность совмещения отдельных фрагментов, ведь на границе рабочего поля сканирования ошибки максимальны. Вносит ошибки и дискретное перемещение предметного столика.

Мы предложили другой подход, лишенный этого недостатка в принципе. При прорисовке крупных структур луч остается неподвижным, а перемещается именно столик с образцом. Точность процесса обеспечивает система управления с лазерным интерферометром. Такой режим принципиально лишен ошибокстыковки,

это – единственное сегодня решение на рынке электронно-лучевой литографии, которое позволяет формировать длинные непрерывные плавные линии с любой кривизной. Такие возможности востребованы, в частности, при изготовлении оптических волноводов, рентгеновских линз, катушек сверхпроводящих квантовых интерференционных датчиков (SQUID). Это хорошая технология для различных приложений фотоники – создания оптических структур, волноводных массивов, оптических мультиплексоров для DWDM-систем и т.д. Применима она и для микро- и наноэлектромеханических систем (МЭМС и НЭМС), и, в меньшей степени, для полупроводниковых структур, где эффективны классические методы сканирования лучом.

Отмечу еще один продукт компании – систему Pioneer. Она представляет собой полнофункциональный растровый электронный микроскоп, который дополнен функциями литографа. Можно сказать, что это младший брат системы e_LiNE – в Pioneer нет набора инструментов для инженеринга структур и измерений. Такая система хорошо подходит для лабораторий начального уровня, рабочих групп в университетах, для работы с небольшими образцами, в то время как e_LiNE позволяет работать даже с 6-дюймовыми пластинами.

Компания работает в области ионно-лучевых систем?

Это – одно из наших перспективных направлений. Приставки серии ELPHY для работы с FIB-системами мы продаем достаточно давно. Около трех лет назад мы представили свою новую разработку – систему ионно-лучевой литографии ionLiNE. Эта система по функциональным возможностям аналогична e_LiNE, поскольку создана на ее программно-аппаратной платформе. Однако ключевая особенность ionLiNE – применение ионно-лучевой литографии. Поскольку ионы существенно тяжелее электронов, ионно-лучевые системы обладают



гораздо более широкими возможностями в плане формирования поверхности, включая формирование трехмерных структур.

Использование ионов вместо электронов позволяет создавать трехмерные структуры непосредственно на подложке. Открываются широкие возможности для ионной имплантации, ионно-лучевого напыления из газовой фазы и травления, а также ионно-лучевой резки (прецзионного ударного разрушения структур).



Установка ионно-лучевой литографии ionLiNE

Система ionLiNE – это первая на рынке система трехмерной ионно-лучевой литографии. Она создана не только для литографии, но и для непосредственного формированияnano-структур. В качестве примеров можно привести создание такой разновидности

МЭМС как системы

микро- и нанофлюидики, мембранные микропорами, волноводные структуры, метаматериалы, прецизионные оптические структуры, структуры фотонных кристаллов, различные элементы для плазмоники и фотоники, которые требуют точного трехмерного дизайна.

Принципиально, что система ionLiNE – высокоавтоматизированная. Это обеспечивает непрерывность формирования сложных трехмерных структур, как методомстыковки, так и в режиме неподвижного луча. За три года порядка 10 этих систем уже установлено в научных центрах США, Китая, Израиля, Австралии, в ряде европейских стран.

Как реализован контроль процесса, например, параметры рисуемых линий?

Наши устройства оснащены специальным измерительным модулем. В частности, для измерения ширины линии используется сканирование низкоэнергетическим электронным лучом.

Как при таком электронно-лучевом сканировании решается проблема загрязнений (контаминации)?

Мы столкнулись с этой проблемой, когда строили свои первые установки. Если не вдаваться в детали, она решается снижением уровня энергии луча до 1 кэВ и ниже. Конечно, при измерениях такого рода необходим глубокий вакуум. И разумеется, должна использоваться плазмохимическая очистка – соответствующая опция предлагается в нашем оборудовании.

Продолжает ли развиваться система ELPHY?

Безусловно. Мы продолжаем поддерживать и совершенствовать эту линейку продуктов. Сегодня мы предлагаем три продукта семейства ELPHY – ELPHY Quantum, ELPHY Plus и ELPHY MultiBeam. Дополненная нашим предметным столиком с лазерной интерферометрической системой управления эта линейка по сути представляет собой конструктор, позволяющий превращать стандартные РЭМ и FIB-микроскоп в совершенное литографическое оборудование, в системы для наноинжениринга. Все приставки ELPHY комплектуются нашим программным обеспечением для персональных компьютеров, предоставляющим удобный графический интерфейс, систему визуализации, управления и т.п. О популярности приставок для стандартного оборудования говорит тот факт, что если за все годы работы мы продали порядка 700 систем, то примерно 500 из них – это именно приставки и 200 – законченные литографические установки.

Аппаратная часть ELPHY Quantum представляет собой плату, встраиваемую в персональный компьютер (в слот шины PCI). Она позволяет превратить стандартный РЭМ или FIB-систему в электронно- или ионно-лучевой литограф. При этом открываются широкие возможности по автоматизации процесса литографии, управлению процессом. Предусмотрено выравнивание по уже существующим фрагментам структуры за счет отклонений луча и т.п.



ELPHY Plus – это уже внешняя приставка к РЭМ/FIB-системам, выполненная в 19-дюймовом корпусе. Для управления используется персональный компьютер. В ELPHY Plus встроен процессор цифровой обработки сигналов компании Raith, что позволяет существенно увеличить скорость прорисовки линий. Тем самым сокращается время экспонирования, что, в частности, важно при работе с высокочувствительными резистами. Кроме того, чем меньше время прорисовки, тем ниже вероятность ошибок из-за неизбежных системных отклонений луча и всей механики установки.

Недавно мы представили новый продукт семейства ELPHY – систему ELPHY MultiBeam, сверхбыстрый генератор изображений. Эта приставка к РЭМ-FIB-микроскопам создавалась специально для задач трехмерной ионно-лучевой литографии и комбинированных методов электронной и ионно-лучевой литографии. С помощью ELPHY MultiBeam стандартное аналитическое оборудование превращается в технологические установки ионно- и электронно-лучевой литографии и наноинженерии. Система позволяет реализовывать не только литографию, но и ионно-лучевое осаждение, травление и т.п.

Как организован процесс разработки продуктов Raith?

Около 10-12% нашей прибыли мы постоянно тратим на НИОКР. Видимо, с этим и связан наш неуклонный рост. У нас есть собственная группа, порядка 35 специалистов, в штаб-квартире в Дортмунде, которая занимается только исследованиями и разработками. Кроме того, мы работаем в тесной кооперации с другими партнерами, а также с потребителями нашей продукции. Например, у нас очень тесные связи с университетом ETH в Цюрихе, с IMEC, другими научными центрами. В частности, ионно-лучевая система для нашей установки ionLINE создавалась в кооперации с рядом европейских научных центров в рамках программы ЕС NanoFIB.

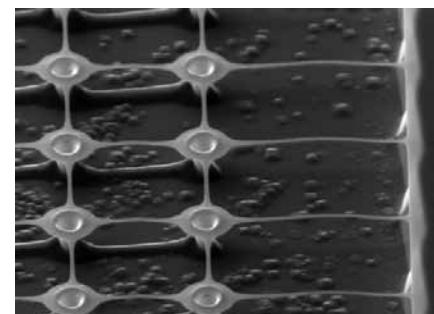
В области программного обеспечения мы взаимодействуем с российскими научными центрами, в частности, в 1990-х годах мы тесно работали с ИПТМ РАН в Черноголовке. У нас есть ряд партнерских проектов с другими российскими институтами, например, с Институтом физики полупроводников СО РАН. Достигнутые в ходе этих проектов результаты используются в нашем оборудовании.

Несколько лет назад мы построили новое здание в технопарке, расположенному на территории бывшего стеклолитейного предприятия в Дортмунде, и сейчас создаем там современное производство. В этом здании уже действует наш головной офис со всеми службами, демонстрационными помещениями и т.п. Примечательно, что буквально напротив находится один из крупнейших в Германии технологических кластеров – iX-factory, где базируется масса молодых развивающихся фирм, работающих, в том числе, в области МЭМС, полупроводниковых технологий и т.п. Понятно, что такое соседство окажется весьма взаимовыгодным.

Насколько компаний Raith важен российский рынок?

Последние годы это растущий, интересный рынок. Мы работаем в России около шести лет, за это время мы инсталлировали более 20 наших систем, из них восемь литографических установок RAITH150^{TWO} и e_LiNE. В этом году мы уже работаем по трем проектам, связанным с поставками наших машин.

Основные потребители оборудования Raith в России – академические



Пример формирования трехмерной структуры с помощью приставки ELPHY и FIB-микроскопа CrossBeam 1540XB компании Carl Zeiss (Джорди Йобет (Jordi Llobet), IMB-CNM (CSIC), Испания). С помощью ионного луча галлий непосредственно имплантировался в поверхностный слой кремниевого кристалла (доза облучения меньше, чем при прямом ионном травлении). При последующем травлении (ионно-реактивными и химическими методами) облученный (легированный галлием) кремний выступал в качестве маски. Необлученные фрагменты вытравливались, формируя трехмерные структуры



институты и исследовательские центры в вузах. Первым стал Институт физики полупроводников в Новосибирске, были инсталляции в Москве (ФТИАН, ИСВЧПЭ), в Томске (НПФ "Микран") и Владивостоке (Дальневосточный университет) и других городах. Основные области применения нашего оборудования в России - исследования полупроводниковых устройств и прикладная физика.

Развивается и другое направление - оптика и телекоммуникации, в этой области мы взаимодействуем, например, с Санкт-Петербургским университетом информационных технологий, механики и оптики (ИТМО).

В России наши интересы представляет компания "ОПТЭК" - она реализует все процедуры, связанные с продажами, продвижением продукции, сервисным обслуживанием, обучением пользователей.

А какой рынок является крупнейшим для компании Raith?

В прошлом году это был Китай, порядка 15 инсталляций.

Какие задачи в области совершенствования оборудования станут для компании основными в ближайшие пять лет?

Основное направление нашей работы - увеличение производительности литографического оборудования, конечно, не забывая про улучшение их разрешения. Если не выдавать секретов, то первое направление - это работы в области программного обеспечения, алгоритмов цифровой обработки сигналов для ускорения процессов литографии. Мы вкладываем существенные средства в это направление. Второе направление - оптимизация собственно электронно- и ионно-лучевых колонн.

Разумеется, наши системы никогда не будут использоваться в массовом производстве. Тем не менее, в ближайшие годы мы намерены перейти от задач

производства прототипов к нишевым приложениям. Характерный пример - смешанные полупроводниковые технологии при создании фрагментов структур СВЧ-транзисторов. Мы видим нишу применения нашего оборудования в задачах формирования микроструктур для импринт-технологии, а также при производстве МЭМС. Современные МЭМС зачастую отличаются очень сложными трехмернымиnanoструктурами, которые весьма проблематично реализовать в рамках классических полупроводниковых технологий. Одно из направлений в этой области - оптические МЭМС-системы, в том числе для задач безопасности.

Не менее интересное направление - микробиология и биомедицина. Здесь одно из возможных применений нашего оборудования - формирование искусственных нанопор, например, для биосенсоров. Для этого нужны средства создания структур с точно установленным диаметром отверстий, например, 10 или 50 нм. Это большое направление в биомедицине. Для таких задач прекрасно подходят системы ионно-лучевого наноинжениринга. Подобные технологии используются и для производства тонких фильтров, в том числе для систем очистки.

Конечно, наше оборудование уже сегодня используется для разработки массовой продукции. СВЧ-транзисторы, системы магнитной памяти - все это отрабатывалось с помощью наших систем. Наши решения всегда используются на первом этапе в сложной цепи выпуска массовой продукции. Так, работы в области получения графена, удостоенные Нобелевской премии 2010 года, проводились при помощи нашего оборудования, равно как и оборудования Carl Zeiss. Пройдет 3-5 лет, и приборы на основе графена станут массовыми, для их производства в больших объемах потребуются новые технологии.

Спасибо за интересный рассказ

С Р.Йеде беседовали Н.Истомина
и И.Шахнович



Приставка ELPHY MultiBeam