

## **Школьники заглянули в наномир во время экскурсии в новосибирский Институт физики полупроводников**

За два часа выпускники Специализированного учебно-научного центра НГУ (СУНЦ НГУ) узнали, как вырастить кристаллическую пленку для транзисторов с высокой подвижностью электронов, увидеть в наноструктуре отдельные атомы, «рисовать» с помощью электронного микроскопа, как сделать эталонную линейку для наномира, создать полупроводниковый прибор. Физматшкольники, посетив три лаборатории Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, познакомились с современными технологиями исследования и производства полупроводниковых материалов, посмотрели, как работает оборудование центра коллективного пользования «Наноструктуры».

*«ИФП СО РАН — один из крупнейших институтов в новосибирском Академгородке. Мы проводим исследования в области физики полупроводников. Как вы знаете, многие современные технологические успехи стали возможны благодаря развитию микроэлектроники. Исследованием физических свойств, явлений в материалах для полупроводниковой электроники, мы и занимаемся. В частности, одна из основных тематик в нашем институте связана с фотоприемными устройствами: разработкой и созданием инфракрасной техники, в том числе тепловизоров. Вы побываете в лаборатории, где вам покажут, как собираются фоточувствительные в инфракрасном диапазоне матрицы»,* — приветствовал участников экскурсии заместитель директора ИФП СО РАН по научно-организационной работе кандидат физико-математических наук **Александр Владимирович Каламейцев**.

Первой точкой визита школьников стала лаборатория молекулярно-лучевой эпитаксии соединений №37  $A_3B_5$  ИФП СО РАН. Здесь экскурсанты увидели установку молекулярно-лучевой эпитаксии — сверхвысоковакуумное оборудование, позволяющее синтезировать полупроводниковые материалы с новыми свойствами. **Ведущий инженер лаб. № 37 Тимур Валерьевич Малин** рассказал, как устроена работа в лаборатории, институте, как отличаются подходы в случае выполнения фундаментальных и прикладных исследований.

*«В Институте есть лаборатории, которые занимаются фундаментальными исследованиями: изучением природы явлений в полупроводниках, процессов в области физики твердого тела. Другие лаборатории специализируются на материаловедении, например, на синтезе материалов с заданными свойствами, которые используются для создания приборов микроэлектроники — транзисторов, детекторов, диодов. Наша лаборатория занимается получением полупроводниковых структур  $A_3B_5$  — это такие соединения, как арсенид галлия и нитрид галлия. Мы создаем структуры для транзисторов с высокой подвижностью электронов, эти транзисторы используются в сверхвысокочастотных усилителях, а СВЧ-усилители нужны для создания приёмопередающих модулей.*

*В лаборатории № 37 установка аммиачной молекулярно-лучевой эпитаксии предназначена для синтеза нитридных материалов, т.е. соединений металлов (алюминия, галлия, индия) и азота. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии можно сравнить с напылением. Представьте зеркало — это стекло, на которое напылен металл, но, когда вы напыляете металл на стекло, он ложится аморфно, не кристаллически, то есть, расположение атомов металла не имеет дальнего порядка и симметрии. А здесь мы напыляем, или, как у нас принято говорить,*

*выращиваем, так, чтобы получались кристаллы, точнее, тонкие кристаллические пленки. Полупроводники — кристаллические материалы, в них проявляются квантово-механические эффекты, на которых основана работа приборов микроэлектроники», — сказал исследователь.*

Тимур Малин объяснил, как строится работа сотрудников ИФП СО РАН при выполнении научно-исследовательских работ для предприятий или проведении фундаментальных исследований.

*«Как правило, предприятию для реализации определённого элемента схемы или прибора нужен материал с заданными свойствами: гетероструктура — слоистый полупроводниковый “пирожок”, где каждый слой обладает определёнными свойствами и выполняет свою функцию. Причем, если бы технология создания такого материала ранее уже была бы известна, потребность в финансировании разработки такой структуры у заказчика не возникала. Подобная задача предполагает проведение фундаментальных материаловедческих исследований, но на выходе мы должны получить материал с конкретными параметрами, которые строго прописаны в техническом задании.*

*В случае если мы работаем по гранту, то есть ведем научную работу в чистом виде, предлагаемая нами идея исследования сначала проходит рецензирование, — так устроена научная жизнь. Нельзя просто что-то придумать и сказать: “Я буду это исследовать”. Если научный работник что-то придумал, то он должен обосновать актуальность данного исследования, его новизну, сформулировать научные методы и подходы, затем научное сообщество рецензирует его заявку, выявляет слабые моменты, научный задел, оценивает достижимость прогнозируемых научных результатов. По аналогии с выполнением заказа для предприятия, где на выходе есть структура с параметрами соответствующими техническому заданию; при работе по научному гранту, требуется провести законченное научное исследование, критерием выполнения которого является определенное количество публикаций в рецензируемых научных журналах», — подчеркнул Тимур Малин.*

**«Мы изготавливаем и улучшаем такие полупроводниковые приборы, как тепловизоры»**

Следующая лаборатория, в которую попали школьники, как раз занимается разработкой и созданием тепловизионной техники. **Дмитрий Витальевич Горшков, младший научный сотрудник** лаборатории № 28 физико-технических основ создания полупроводниковых приборов на основе соединений  $A_2B_6$  рассказал об устройстве тепловизоров, о разных сферах применения тепловизионной техники: для изучения дальнего космоса, мониторинга лесных пожаров, выявления людей с повышенной температурой в местах большого скопления людей (тепловизоры применялись для этих целей задолго до пандемии Covid-19), инспекции электросистем, мониторинга быстропротекающих химических реакций и других.

*«Тепловизоры делятся на два типа: болометрические и полупроводниковые. В болометрических используется способность материалов изменять свое сопротивление при нагреве. Преимущество болометров, в том, что они не требуют дополнительного охлаждения, работая при комнатной температуре, но эти приборы не способны “увидеть” быстропротекающие процессы. Второй тип тепловизоров, тот с которым мы работаем — это фотозлектронные приемники,*

*в них инфракрасные фотоны преобразуются в электроны. Электроны мы можем зафиксировать разными методами, а значит и детектировать инфракрасное излучение, — объяснил исследователь.*

Как и в обычном фотоаппарате, в тепловизоре самая важная часть — это фоточувствительная матрица. Матрицу для тепловизора так же сложно произвести, как и матрицу фотоаппарата, а в некоторых случаях, пожалуй, и сложнее. Дмитрий Горшков подчеркнул, что одна из основных задач, которую решают сотрудники лаборатории № 28 — уменьшение физических размеров фотоприемной матрицы, с сохранением большого числа пикселей. Чем меньше физический размер матрицы, тем миниатюрнее будет и готовый прибор — тепловизор, но для этого нужно уменьшить размер каждого пикселя.

*«Когда мы начинаем уменьшать размер пикселя, электроны, рожденные в одном пикселе, с помощью диффузии могут перейти в соседние пиксели, и происходит уменьшение частотно-контрастной характеристики или, говоря проще, изображение становится “мыльным”. Чтобы этого не случилось, мы должны физически отделять каждый фотодиод (пиксель) друг от друга при помощи травления. Лучше всего для этого подходит плазмохимическое травление. С его помощью можно делать вертикальные узкие, глубокие канавки. Но материал, из которого производятся тепловизионные матрицы, очень капризный. Когда мы травим его плазмохимическим методом, материал меняет тип проводимости (в большинстве режимов) — происходит конверсия, поэтому нужно подбирать специальный режим, чтобы травление происходило качественно и без конверсии», — добавил Д. Горшков.*

### **Разглядеть и изменить полупроводниковую структуру поможет электронный микроскоп**

В лаборатории нанодиагностики и нанолитографии № 20 ИФП СО РАН ученики СУНЦ НГУ узнали о современных способах изучения и модификации поверхности.

*«Массовый интерес к изучению наноструктур во многом связан с появлением в последние 15-20 лет доступного, удобного инструментария для исследования наноразмерных объектов. Одним из таких удобнейших инструментов является сканирующая электронная микроскопия (СЭМ). С появлением электронных микроскопов стало возможным преодолеть дифракционный предел, и “разглядеть” объекты размером меньше микрона, а современные электронные микроскопы позволяют “увидеть” объекты размерами до долей нанометра. Более того, системы на основе СЭМ позволяют изменять поверхность, воздействуя на нее. Например, это можно сделать на двухлучевой станции CrossBeam — СЭМ с дополнительной ионной пушкой или электронном литографе на основе СЭМ. Если первый прибор позволяет проводить манипуляции над одиночным объектом, то на электронном литографе можно тиражировать наноструктуры. Оба прибора сделаны на основе СЭМ и имеют похожее устройство. Электронный микроскоп схож с оптическим: также есть источник освещения — его роль выполняет электронная пушка, система увеличения — система линз, а вместо предметного столика — вакуумная камера и электромеханический стол», — объяснил научный сотрудник лаб. № 20 Дмитрий Александрович Насимов.*

Электронная пушка лучевой станции CrossBeam используется для получения изображения, а ионная пушка позволяет «препарировать» нанообъекты: диаметр

ионного пучка — один нанометр (миллиардная доля метра). «Поверхность нанообъекта можно резать, как ножом», — подчеркнул Дмитрий Насимов.

Принцип работы литографа чем-то похож на плёночный фотоаппарат, только роль света, экспонирующего фотографическую пленку, выполняет электронный пучок: «Материал покрывают резистом — веществом, которое меняет свои свойства под действием электронного пучка, затем “засвечивают” электронным пучком, электроны рвут часть связей и растворимость материала меняется на несколько порядков. Электронный пучок создает требуемый рисунок будущей наноструктуры, затем резист проявляют и начинают травление — химическое или плазменное — убирают участки полупроводниковой пленки, где резиста нет. Так создаются структуры, в которых можно исследовать физические процессы в квантовом мире, новые квантовые эффекты, и при этом не требуется огромный ускоритель, как, например, для исследований в области физики высоких энергий», — сказал ученый.

### **«Идем» по поверхности кристалла: что происходит?**

Чтобы вырастить полупроводник с прогнозируемыми заранее свойствами, нужно понимать, как происходит рост — увидеть, как атомы распределяются на поверхности «вживую», во время процесса, а не после, когда все уже готово.

«Всегда остается вопрос: что происходит на реальной кристаллической поверхности, — подчеркнул аспирант ИФП СО РАН, **сотрудник лаб. № 20 Алексей Сергеевич Петров**. — Наблюдая взаимодействие электронов, нейтронов, рентгеновского излучения с кристаллом, можно понимать, как устроена его поверхность. Здесь мы это делаем с помощью отражательной электронной микроскопии. На поверхность кристалла кремния, под углом менее градуса к ней, падает высокоэнергетичный пучок электронов. Кристаллическая решетка — это периодическая структура, электронный пучок от нее отражается, и благодаря дифракции и интерференции, можно наблюдать происходящее на поверхности образца. Но, что есть поверхность? Казалось бы, можно взять кристалл, рассеять его пополам, и будет нам счастье, — в виде поверхности. Однако нет. Чтобы получить идеальную поверхность, надо рассеять кристалл точно поперек химических связей между отдельными атомами. Резать с такой точностью пока еще не научились, и всегда будет некоторая разориентация: поверхность будет представляться равноотстоящими друг от друга по высоте участками плоских террас, разделённых атомными ступенями».

При высокой температуре атомные ступени поверхности кремния движутся. Этот процесс специалисты лаборатории № 20 ИФП СО РАН могут наблюдать с помощью сверхвысоковакуумного отражательного микроскопа — прибора, который в России есть только в Институте физики полупроводников. «При температуре в 1200 градусов Цельсия атомы приобретают достаточно энергии, чтобы выйти из ступени, “пробежать” по террасе и улететь, происходит процесс сублимации — ряд за рядом ступень сдвигается. Если мы выращиваем полупроводниковый кристалл методом молекулярно-лучевой эпитаксии, во время роста будет происходить обратный процесс: атомы осаждаются, “бегут” по поверхности, встраиваются в ступень», — прокомментировал Алексей Петров.

Кроме наблюдения за атомными ступенями, сотрудники лаборатории №20, умеют управлять ими: собирать вместе или, наоборот, создавать сравнительно большую, атомно-гладкую площадку без ступеней. «Пропуская через образец ток,

или, меняя температуру, можно создать участки поверхности, свободные от атомных ступеней, размерами от 10 микрон и выше. (Микрон — тысячная доля миллиметра, площадь в 1 квадратный микрон — это практически футбольное поле в наном мире. — прим. авт.). *Широкая атомно-гладкая терраса — идеальная отражающая поверхность, свет как падает, так и отражается: поверхность можно использовать, как опорное зеркало в интерферометрах, или в качестве эталона для калибровки атомно-силового микроскопа по высоте*, — добавил ученый.

**Сергей Артемьевич Пономарев, инженер лаб. № 20 ИФП СО РАН** исследует строение слоистых материалов, в частности, селенида висмута, перспективного для создания гибких электронных устройств.

*«Внутри слоя селенида висмута атомы связаны ковалентными связями, а между слоями — вандерваальсовыми. За счет того, что энергия вандерваальсовых связей меньше, чем у ковалентных, такие слои могут скользить друг по другу. Толщина слоев порядка 1 нанометра, поэтому достигается высокая гибкость структур. Можно создавать гибкие девайсы, и недавно в Китае был изобретен галлий-селеновый фотодетектор, который можно мять, как бумагу, и он продолжает работать. В нашей лаборатории мы изучаем способы роста других слоистых халькогенидов металлов на полупроводниковых подложках: селенида индия и селенида висмута. Эти процессы изучены слабо, но зная свойства материалов, в будущем возможна разработка уже наших фотодетекторов*», — сказал исследователь.

### **Нанорельеф поверхности: как «пощупать»?**

Когда полупроводниковая структура готова, быстро ее «ощупать», диагностировать рельеф помогает атомно-силовой микроскоп.

*«Это относительно дешевый, простой в эксплуатации прибор, который стоит в любом вузе, институте, где занимаются физикой полупроводников или физикой других твердых тел. Атомно-силовой микроскоп показывает, как выглядит поверхность, включая объекты на ней, размером меньше нанометра. Проведу аналогию: мы можем, закрыв глаза, пощупать стол пальцами и определить, что на нем располагается ниже, что выше, оценить размер деталей. Этот прибор работает точно так же, только вместо пальцев у него нанометровая кремниевая иглолка. С ее помощью можно не только ощупывать рельеф, но и формировать, “выцарапывать” нужные структуры, затем прикладывать к ним напряжение, измерять параметры*», — рассказал кандидат физико-математических наук **научный сотрудник лаб. № 20 Дмитрий Игоревич Роголо**.

Атомно-силовой микроскоп используется для визуализации разных образцов: от биологических — клеточных мембран, отдельных клеток, оболочек вирусов до эталонных объектов в физике твердого тела — нанометровых стандартов, которые умеют делать специалисты ИФП СО РАН.

*«Когда мы хотим проводить измерения в наном мире, нам нужен эталон: объект длиной в один нанометр. Он должен быть одинаковым везде: в Новосибирске, Москве, Стэнфорде и т. д. Для изготовления такого эталона было решено использовать кристалл кремния, и мы, в нашем Институте, научились делать своеобразную линейку для наномира на основе кремниевых ступенек. Три ступени*

— ровно один нанометр, такой объект можно вставить в любой микроскоп и откалибровать прибор, что очень удобно.

Кроме того, нигде в мире, не умеют делать настолько плоские поверхности, как можем мы. При измерении высоты объекта ее нужно измерять относительно какой-то плоскости. Мы можем сделать абсолютно плоскую поверхность, где единственной неидеальностью будет один атом — выступающий или отсутствующий. В масштабах привычного большого мира, можно представить это, как абсолютно гладкое футбольное поле с отдельными песчинками на нем», — пояснил Дмитрий Рогило.

В завершение экскурсии школьники на простом примере увидели, как эффекты наномира проявляются в большом мире: ребята попробовали сломать кремниевые пластины и выяснили, что они ломаются лишь по определенным кристаллографическим направлениям, где химические связи наиболее слабые.

Пресс-служба ИФП СО РАН