

Пятая школа молодых ученых «Актуальные проблемы полупроводниковых наносистем» прошла в Новосибирске

Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (ИФП СО РАН) при поддержке Российского научного фонда провел [Школу молодых ученых «Актуальные проблемы полупроводниковых наносистем»](#) — АППН-2023. В двухдневном мероприятии приняли участие 75 человек.

Слушателями школы стали студенты, аспиранты, молодые специалисты Новосибирского государственного университета, Новосибирского государственного технического университета, Томского государственного университета, Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.

Лекторами Школы выступили ведущие ученые ИФП СО РАН, НГУ и Университета г. Авейро (Португалия).

Двадцать один молодой ученый представил результаты собственных исследований в формате стендового доклада, перед этим анонсировав суть работы в двухминутном устном сообщении. Эксперты Школы выбрали лучших докладчиков:

диплом I степени получил **Дмитрий Егоров** (НГУ),

II степени — **Кирилл Капогузов** (ИФП СО РАН) и **Снежана Манцурова** (НГТУ),

III степени — **Владимир Хорошилов** (ИФП СО РАН), **Анна Бузмакова** (НГТУ), **Никита Манцуров** (НГТУ).

«В этом году у школы “Актуальные проблемы полупроводниковых наносистем” — юбилей, мы собрались в пятый раз. На первой конференции обсуждались вопросы, связанные с тонкими пленками, поверхностью, границами раздела — это наносистемы, гетероструктуры, именно в них протекают процессы, лежащие в основе новых технологий.

В свое время исследования, связанные с полупроводниками, изменили мир. Дальнейшие глобальные трансформации будет определять современная молодежь, поэтому на пятой Школе мы старались представить слушателям широкий спектр тем, современных разработок. На каждой сорокаминутной лекции молодые ученые узнают о той или иной научной проблеме, представление которой подготовлено экспертом и изложено доступным языком. Участникам не нужно читать большой объем литературы, определять авторитетные источники — такую работу уже провели лекторы.

*Кроме того, на АППН каждый “школьник” презентует результаты собственных исследований, что очень важно: когда вы рассказываете о своей деятельности, вы обучаетесь, видите недостатки и сможете сделать хорошие работы в дальнейшем. Рост специалиста как ученого начинается в том числе и с таких мероприятий», — подчеркнул председатель оргкомитета Школы, директор ИФП СО РАН академик РАН **Александр Васильевич Латышев.***

АППН — в первую очередь Школа молодых ученых, но кроме того, у мероприятия есть и профориентационная составляющая.

«Лекции руководителей лабораторий, научных групп — хорошая возможность понять, чем занимаются ведущие ученые, какие мировые работы ведутся по этим тематикам. Таких мероприятий, как наша Школа, не много, особенно для студентов третьего курса, которые только определяются с

тем, какой институт, направление выбрать, под чьим руководством делать свой научный проект — курсовую, а затем дипломную работу.

Конечно, существуют экскурсии по лабораториям, но не всегда на них представляется понятная студентам информация. Курс лекций АППН — дополнительный источник сведений, к тому же адаптированный: мы всех лекторов просим учитывать опыт и квалификацию слушателей. Докладчики освещают не только теоретические аспекты темы или открытие новых эффектов, но и рассказывают о прикладных применениях, собственных исследованиях, их приложениях. Соответственно, участники школы получают представление о научных интересах докладчика, спектре работ лаборатории и могут выбрать близкую для себя тематику.

Проект РФ, в рамках которого проводится Школа, продлен до 2025 г, есть намерение развивать мероприятие и дальше, продолжать его регулярно», — рассказала секретарь АППН-23 старший научный сотрудник лаборатории нанодиагностики и нанолитографии ИФП СО РАН кандидат физико-математических наук **Екатерина Евгеньевна Родякина**.

Единство измерений в наномире

Первую лекцию Школы «Кремниевые меры высоты от микрона до пикометра» прочел заместитель директора ИФП СО РАН по развитию кандидат физико-математических наук **Дмитрий Владимирович Щеглов**. Он подчеркнул, что от обеспечения единства метрологических стандартов, методов измерения зависит взаимопонимание и оценка результатов учеными из разных стран и научных групп.

Сегодня такое единство требуется при исследованиях, проводимых в наномасштабах — здесь сконцентрирован интерес ученых из разных сфер: физиков, химиков, биологов, материаловедов.

«Метрология — область, которая в некоторой мере показывает технологическое развитие страны. В мире есть всего несколько государств с собственной системой стандартизации — сводом правил и законов, определяющих, как измерять и сравнивать между собой разные величины. Если говорить о наглядных примерах, когда стандартизация в измерениях привела к кардинальным прорывам в развитии цивилизации, то это, например, успех Великобритании в промышленной революции первой половины 19 века. Он был, в частности, основан на стандартизации универсальной резьбы для винтов. Последние требовались в миллионных количествах на всех промышленных объектах, при производстве крупных станков, поездов, пароходов, и именно стандартизация позволила тысячам мануфактур производить винты и гайки, подходящие друг к другу. Сейчас то же самое происходит в области наномира: мы создаем нанообъекты и их измеряем, но каждый по-своему. Любой исследователь, который занимается измерениями в наномире, сталкивался с сильно отличающимися результатами измерений, сделанных коллегами, — отсюда возникали разночтения в оценке получаемых результатов», — отметил лектор.

Дмитрий Щеглов объяснил, что стремление к миниатюризации электронных устройств, исследования объектов с характерным размером в несколько нанометров, а иногда и того меньше, требует создания и применения соответствующего эталона (единой линейки). Он позволит измерять объекты с погрешностью много меньшей одного нанометра.

Создать такой эталон методами «сверху вниз» — в частности, литографией, на данном этапе развития технологий невозможно. Максимальная точность мер, получаемых литографическим травлением по определённым кристаллографическим направлениям — один нанометр.

«Множество научных работ, в числе которых и наши, привели к тому, что в 2019 году [Международным бюро мер и весов в Париже было решено принять](#) моноатомную ступень на поверхности кремния (111) в качестве вторичного эталона длины. Такое решение позволяет уйти от сложных литографических процедур, а в качестве эталона использовать межплоскостное расстояние на поверхности кремния. К тому времени в ИФП СО РАН уже были разработаны и запатентованы меры, в основе которых лежат атомные ступени, и меры были приняты в России (причем впервые в мире), как средство измерений».

Разработка мер стала возможной благодаря использованию эффекта эшелонирования ступеней, открытого А.В. Латышевым: *«Так можно создать протяженные атомно-гладкие поверхности (террасы) или собирать атомные ступени в плотные кластеры. Точность определения высоты каждой террасы по средней точке — пикометры, а по ширине на полувысоте — половина ангстрема. В двадцать раз меньше нанометра!»*, – объяснил Д. Щеглов.

Ученые сделали и меру, где одновременно существуют несколько элементов: собранные в плотный кластер сотни ступеней, полностью свободный от монокристаллических ступеней участок сингулярной поверхности кристалла (атомно-гладкая плоскость) и участок с тем же количеством ступеней (что и в плотном кластере), но разреженных — так, чтобы их можно было легко посчитать. Такая мера позволяет одновременно сопоставлять малые объекты (в доли и единицы нанометров) и более крупные, величиной в десятки и сотни нанометров.

«Мы создали меру, которая позволяет определять размеры объектов в широком интервале высоты с точностью до 0,4 пикометра. При этом зеркала на основе таких мер позволили сделать интерферометрические микроскопы, которые дают возможность наблюдать атомные ступени на поверхности кристалла оптическими методами», — резюмировал Дмитрий Щеглов.

Селенид висмута, выращенный на графене — для гибкой электроники

Из курса лекций молодые исследователи узнали и о результатах, полученных в ходе выполнения крупного научного проекта «Квантовые структуры для посткремниевой электроники».

Ведущий научный сотрудник ИФП СО РАН доктор физико-математических наук **Ирина Вениаминовна Антонова** рассказала о создании многослойных наноструктур на основе селенида висмута (Bi_2Se_3) и графена.

Они могут использоваться для гибкой и носимой электроники. Ученые синтезировали тонкие слои селенида висмута на графене и обнаружили изменение механических свойств пленок селенида висмута: повысилась устойчивость к деформации — растяжению при изгибе, и, при этом, сохранилась высокая проводимость.

«Селенид висмута — соединение, известное как топологический изолятор. При осаждении из газовой фазы селенида висмута на графеновых пленках, он растет с более высокой скоростью и более высоким качеством пленки, по сравнению с ростом, например, на слюде. Такой слой, толщиной 20-40 нанометров, устойчив к механическим воздействиям: структуру можно

согнуть до формирования прямого угла (радиус изгиба менее полутора миллиметров), и ее электрофизические характеристики сохраняются. Пленки Bi_2Se_3 , осажденные на графене (в сравнении с пленками, выращенными на слюде и перенесенными на гибкую подложку) — более качественные, с низкой дефектностью, с хорошей границей раздела между слоями графена и селенида висмута.

Кроме того, пленки Bi_2Se_3 , выращенные на графене, обладают хорошей проводимостью, высокой подвижностью носителей заряда.

Потенциальное применение селенида висмута в комбинации с графеном — создание многослойных гибких наноструктур, с вертикальной интеграцией. Наше исследование позволяет перейти к следующему шагу в развитии гибкой электроники и, в частности, рассматривать гетероструктуры Bi_2Se_3 /графен как материал и для гибкой спинтроники», — пояснила Ирина Вениаминовна.

Кроме того, научная группа И.В. Антоновой создает композиты для печатной электроники — использование специальных чернил позволяет напечатать на 2D принтере гибкие платы. Ученые научились управлять проводимостью в слоях графена, добавляя в состав композитных чернил небольшие количества полимера и этиленгликоля.

«Добавки полимера PEDOT:PSS (в сверхнизкой концентрации) с небольшим количеством этиленгликоля приводят к резкому падению проводимости. Управление проводимостью открывает возможности для конструирования новых материалов на основе композитных пленок», — отметила Ирина Антонова.

Курс лекций школы [включал 13 докладов](#). В них освещались темы, связанные с современными методиками сканирующей зондовой микроскопии для полупроводниковых наноматериалов, исследованием углеродных нанотрубок для создания приемников терагерцового излучения, инфракрасной термографией, как методом исследования твердотельных наносистем, изучением точечных дефектов в кремниевых солнечных элементах и другие.

Пресс-служба ИФП СО РАН

Иллюстрации: https://disk.yandex.ru/d/j97qI_74HemsTg

Все фотографии, кроме 4 и 5 - Владимира Трифутина
Фото 4 – Надежды Небогатиковой,
Фото 5- Никиты Гришина