

1971 Опубликована классическая монография А. В. Ржанова, посвященная электронным процессам на поверхности полупроводников

Границы раздела кристаллов Ge (а) и InSb (б) с пленками оксида на поверхности. Электронный микроскоп с высоким разрешением

Спектры энергетических потерь электронов для различной степени интенсивности покрытия цезием поверхности GaAs

зонной плавки обеспечивает отсутствие дислокаций, а также низкое содержание

электрически активных примесей (в концентрации менее 10^{12} см^{-3} при содержании электрически неактивных примесей (кислород, углерод) в концентрации, не превышающей 10^{16} см^{-3}). Сегодня эти монокристаллы используются для создания элементов силовой электроники с предельными по величине переключаемой мощности параметрами (сотни кВт).

Не менее значимые результаты получены в институте и при решении проблем не только химической чистоты и совершенства поверхности полупроводников, но также границ раздела «полупроводник-диэлектрик» и «полупроводник-полупроводник». Важную роль в этом сыграли разработка и применение нового поколения методов и инструментов для изучения электронных свойств и атомной структуры поверхности поистине с фантастическими возможностями по пространственному и энергетическому разрешению.

Важным шагом по оптимизации технологии получения совершенных границ раздела явилось развитие лазерной эллипсометрии. Этот метод, основанный на измерении углов поляризации отраженного света, был доведен в институте до высокой степени совершенства по следующим показателям: чувствительность (доли монослоя), быстродействие (микросекунды) и уровень автоматизации. Применение этого метода и совершенствование техники измерения вольт-фарядных характеристик структур «металл-диэлектрик-полупроводник» позволили разработать технологию, с помощью которой можно получить границу раздела InAs-диэлектрик с исключительно низкой плотностью поверхностных состояний (менее $10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$).

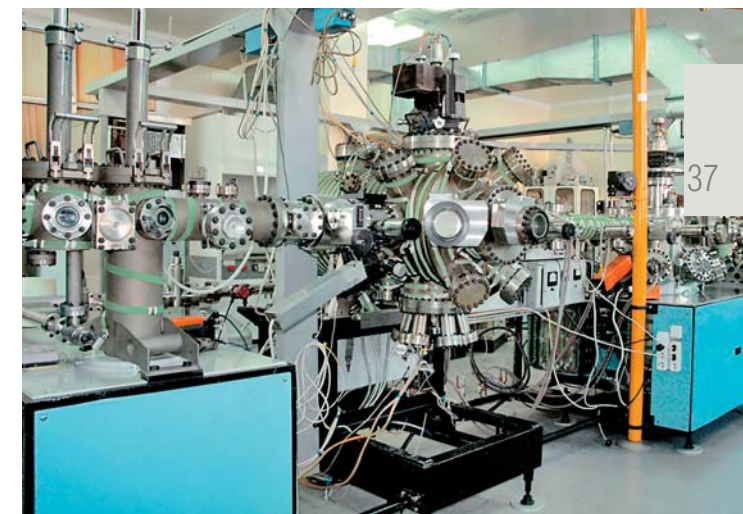
На основе этих структур были разработаны фоточувствительные

Установка МЛЭ «Обь-М» для выращивания эпитаксиальных слоев соединений кадмий-ртуть-теллур

элементы для матричных фотоприемных устройств среднего ИК-диапазона (2,5–3,0 мкм), применяемых в тепловизорах медицинского назначения; а в дальнейшем — для ИК-микроскопов и быстродействующих ИК-спектрометров.

Использование поверхностно-чувствительных методов электронной спектроскопии позволило получить впечатляющие результаты в процессе изучения элементарных механизмов фотогенерации электронов полупроводниковыми системами с отрицательным электронным средством. Эти методы легли в основу технологий, разработанных в ИФП для получения полупроводниковых электронно-оптических преобразователей нового поколения, использующихся в современной технике ночного видения.

Самый мощный импульс развитию физики поверхности полупроводников дали ускоренные темпы совершенствования технологии молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Ее основой является метод последовательного наращивания из молекулярных пучков отдельных атомных слоев кристаллических материалов на поверхности полупроводниковой подложки; при



Открытия на поверхности полупроводников

Десять лет назад мало кто мог предположить, что словосочетание «нанoeлектроника» прочно войдет не только в научный оборот, но и в лексикон государственных деятелей развитых стран, в том числе и России

Вставшей классической монографии «Электронные процессы на поверхности полупроводников» (1971) академик А. В. Ржанов — первый директор Института физики полупроводников СО РАН, которому недавно присвоено имя ученого, — изложил результаты примерно сорокалетнего периода исследований поверхности полупроводников. Начало этим исследованиям положили работы академика И. Е. Тамма, который теоретически показал возможность существования особых состояний электронов на поверхности кристаллов. В конце 1940-х гг. в процессе

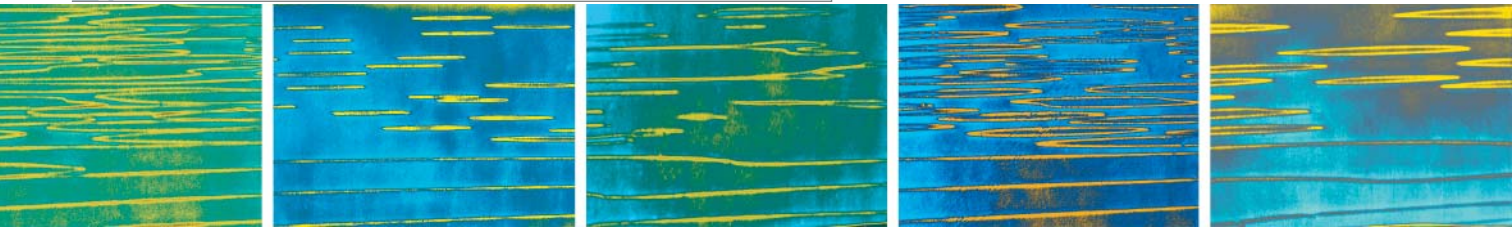
А. В. Ржанов — академик АН СССР, организатор и директор Института физики твердого тела и полупроводниковой электроники СО АН СССР (впоследствии — Институт физики полупроводников СО РАН)

дальнейшего экспериментального изучения был открыт транзисторный эффект — одно из величайших достижений науки XX века.

В предисловии к своей книге А. В. Ржанов, которого мы с полным правом можем назвать одним из основателей физики поверхности полупроводников, сформулировал основные проблемы развития этой области науки и наметил пути их решения, которыми и руководствовались его ученики и последователи.

По мнению ученого, основные результаты в физике полупроводников можно было получить в процессе увеличения химической чистоты и структурного совершенства кристаллической решетки исходных веществ. Таким образом, усилия исследователей в 70–80-е гг. прошлого столетия были направлены на развитие технологии выращивания совершенных монокристаллов полупроводников.

К примеру, в Институте физики полупроводников СО РАН была освоена технология выращивания высококачественных монокристаллов кремния диаметром до 125 мм. Используемый при этом метод бестигельной



Монослой кремния формируется путем роста и объединения двумерных островков.

Отражательная электронная микроскопия

и точное определение механизмов формирования отдельных атомных слоев на атомно-чистой поверхности полупроводника дополнительно достигается за счет применения таких сложных и высокочувствительных методов, как: дифракция медленных электронов, отражательная электронная микроскопия, сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопия.

Комплексное использование всех этих подходов дало возможность применить метод МЛЭ для получения сложных тонкопленочных структур, состоящих из десятков и сотен отдельных слоев атомной и нанометровой толщины. По этой технологии в ИФП созданы многослойные эпитаксиальные структуры с квантовыми ямами, которые используются в ряде устройств современной электроники в сверхвысокочастотных транзисторах, фотоприемных устройствах, миниатюрных полупроводниковых лазерах с вертикальным резонатором и т. д.

Новый этап в развитии физики поверхности полупроводников и ее приложений в современной микро- и нанoeлектронике начался в 1990-е гг. Были открыты квантовые эффекты в полупроводниковых системах пониженной размерности: в квантовых ямах, квантовых нитях и квантовых точках, а также в наноструктурах сложной геометрии, включая кольцевые электронные интерферометры и наноболочки произвольной формы.

На основе эпитаксиальных структур с квантовыми точками германия и арсенида индия были созданы образцы фотоприемных устройств ИК-диапазона, одноэлектронных транзисторов и однофотонных излучателей. Результаты исследований и моделирования процессов переноса носителей

этом с помощью дифракции быстрых электронов и лазерной эллипсометрии проводится одновременная диагностика состава и структуры растущих слоев. Исследование

заряда в многослойных структурах кремний-оксид с квантовыми точками открывает пути для улучшения основных параметров элементов электрически перепрограммируемых постоянных запоминающих устройств нового поколения, а также для перехода к схемам памяти терабитной емкости.

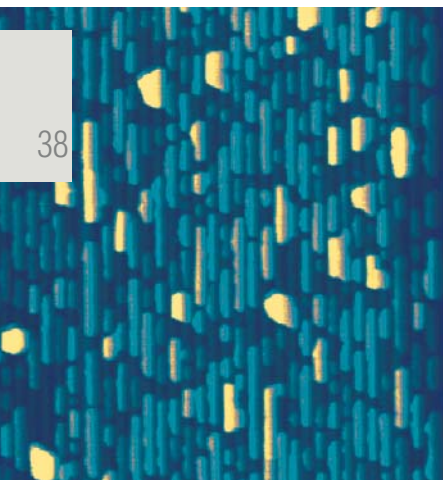
К приоритетным результатам последнего времени можно отнести разработку в ИФП метода молекулярной самосборки напряженных тонкопленочных структур, выращиваемых методом МЛЭ. Метод получения полупроводниковых нанотрубок открывает перспективы для производства отдельных наноструктур сложной формы и их массивов с предельно высокой точностью (до значения, равного толщине отдельного монослоя!).

По данной технологии уже изготовлены: нанотрубки полупроводниковых материалов, предназначенные для изучения свойств двумерного электронного газа на цилиндрических поверхностях; трубки микронного диаметра, предназначенные для микротермоанометров, а также для использования в клеточной биологии и медицине в качестве микро- и наношприцев.

Дальнейшее развитие подобных технологий будет сопровождаться расширением сферы применения нанобъектов в электронике, биологии, медицине и других практически важных областях. И в этом — немалая заслуга сибирского ученого, академика А. В. Ржанова.

Островковые структуры серебра (а) и германия на поверхности кремния (б).

Сканирующий туннельный микроскоп



*Академик А. Л. Асеев
(Институт физики полупроводников
им. А. В. Ржанова СО РАН,
Новосибирский научный
центр)*