

ПРЕДИСЛОВИЕ К ТЕМАТИЧЕСКОМУ ВЫПУСКУ «ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРЫ»

Предлагаемый тематический выпуск журнала включает публикации результатов междисциплинарных научных исследований, направленных на решение фундаментальных проблем в области полупроводниковых наногетероструктур с квантовыми ямами, квантовыми проволоками, квантовыми точками и их комбинациями, ориентированных на создание приборов и устройств нанофотоники, СВЧ-электроники, спинтроники, сенсорики и фотоэлектрических преобразователей.

Фундаментальные проблемы эпитаксии; численное моделирование процессов роста, полей деформации и энергетического спектра; фундаментальные проблемы фотонных устройств на основе полупроводниковых наногетероструктур, включая наногетероструктуры для фотоэлектрических преобразователей, фотоприёмников и спинтроники; фундаментальные проблемы биосенсоров на основе наногетероструктур; многослойные гетерофазные электронные материалы — это комплекс проблем, вклад в решение которых вносят результаты работ, включённых в предлагаемый выпуск.

В настоящее время широко исследуются полупроводниковые наногетероструктуры, состоящие из кристаллических материалов с различными значениями постоянной решётки, начиная от элементарных полупроводников (Si, Ge), полупроводниковых соединений (GaAs, InAs, AlAs, GaN, AlN, CdTe, HgTe, PbTe, SnTe) и завершая твёрдыми растворами (двойными, тройными и четверными) на основе полупроводниковых материалов. Рассогласование параметров решёток в области контакта двух материалов приводит к возникновению встроенных полей упругих деформаций, с которыми связаны несколько следствий (В. А. Ненашев, В. А. Зиновьев и др.): 1) деформации являются движущей силой перехода от сплошной плёнки к островкам и самоорганизации островков по размерам и форме в процессе роста гетероструктуры; 2) деформации во многом определяют электронные свойства полученных гетероструктур; 3) релаксация упругих деформаций приводит к генерации дислокаций. Одна из важных проблем гетероэпитаксии — формирование бездефектных (бездислокационных) гетероструктур. Во многих случаях полностью устранить введение дефектов не удаётся и тогда решается задача максимального уменьшения их плотности в рабочей области гетероструктуры для минимизации ухудшения электрофизических и оптических свойств материала.

Практически бездефектными являются гетероструктуры с близкими значениями постоянной решётки (например, AlGaAs/GaAs). Бездислокационными можно синтезировать наногетероструктуры с квантовыми точками вследствие малых размеров нанокристаллов, когерентно встроенных в кристаллическую решётку другого материала. Такие материалы по сравнению с системами более высокой размерности характеризуются большим временем жизни неравновесных носителей заряда вследствие снижения рассеяния на фонах, в них уменьшается скорость термической генерации носителей заряда (темновой ток) из-за дискретности энергетического спектра, растёт величина силы осциллятора для внутризонных и экситонных переходов в результате локализации волновой функции во всех трёх направлениях. Особый интерес вызывают кремниевые фотодетекторы с квантовыми точками Ge. Низкая плотность дефектов в гетероструктурах Ge/Si с квантовыми точками обеспечивает рекордно низкие значения плотности темнового тока ($<10^{11}$ А/см²) в фотоприёмниках на основе таких гетероструктур и с высоким (до 10^3) фотоэлектрическим усилением (А. И. Якимов). Важное преимущество таких структур состоит в том, что они могут быть изготовлены на подложках Si, а значит, существует возможность производства матриц очень большого размера как результат монолитной интеграции с быстродействующей электроникой обработки сигналов.

Высокие значения квантовой эффективности и фототока материала на основе твёрдого раствора теллурида кадмия и ртути (КРТ) выдвигают его на первый план по применению в инфракрасных матричных фотоприёмных устройствах, предназначенных для комплектации «смотрящих» систем технического зрения. Незначительное различие параметров кристаллической решётки позволяет выращивать многослойные гетероструктуры КРТ с различными составами высокого качества и обеспечивать получение фоточувствительного материала для многоспектральных фотоприёмников. Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) является более гибким при создании гетероструктур КРТ по сравнению с жидкофазной эпитаксией и газофазной эпитаксией из металлоорганических соединений: позволяет прецизионно контролировать состав КРТ и его изменения в процессе роста, управлять процессами легирования при формировании $p-n$ -переходов, получать структуры с резкими границами между слоями различных составов КРТ и любыми типами $p-n$ -переходов (от резких до плавных). Приводятся результаты формирования гетероструктур для двухспектральных фотоприёмников в областях 3–5 и 8–12 мкм с использованием метода МЛЭ (С. А. Дворецкий, Г. Ю. Сидоров и др.).

Спектроскопия одиночных квантовых точек представляет большой интерес для понимания строения их электронной энергетической структуры и колебательных мод. В предлагаемом выпуске журнала описываются результаты, демонстрирующие монотонное увеличение расщепления экситонных состояний с увеличением размера квантовых точек InAs до значений $\sim 10^{-4}$ эВ. Показано, что в интервале энергий экситонов 1,3–1,4 эВ величина расщепления экситонных состояний сравнима с естественной шириной экситонных линий, и это представляет большой интерес для разработки излучателей пар запутанных фотонов на основе квантовых точек InAs (В. А. Гайслер и др.).

Исследование колебательных мод в нанокристаллах с малой пространственной плотностью приводится на основе метода гигантского комбинационного рассеяния (ГКРС). Обнаружено и исследовано ГКРС оптическими и поверхностными фононами в нанокристаллах CdS, GaN, CuS и нанопроволоках AlN. Установлено, что присутствие нанокластеров металлов (Ag, Au и Pt) существенным образом меняет спектры комбинационного рассеяния наноструктур и приводит к резонансному усилению мод оптических фононов в нанокристаллах CdS, CuS и возникновению поверхностных мод нанокристаллов GaN и нанопроволок AlN (А. Г. Милехин и др.).

Разработка физических основ создания базовых элементов для проведения квантовых логических операций базируется на пяти критериях: 1) масштабируемость, т. е. система должна содержать достаточно большое количество кубитов ($N \gg 1000$); 2) в системе может быть реализован универсальный набор логических операций; 3) должна существовать возможность измерить каждый кубит; 4) каждый кубит может быть инициализирован, т. е. приведён в начальное состояние; 5) время декогеренции в системе должно быть намного больше, чем время выполнения отдельных квантовых операций. Одно из перспективных направлений создания таких элементов основано на гетероструктурах с квантовыми точками, в которых ожидается достаточно большое время декогеренции спиновых состояний. В данном выпуске приводятся результаты прямых экспериментальных измерений времени спиновой релаксации долгоживущих экситонов в ансамбле (In, Al)As/AlAs непрямозонных квантовых точек первого рода. Показано, что время жизни экситона в непрямозонных полупроводниковых гетероструктурах (In, Al)As/AlAs с квантовыми точками первого рода, в которых электрон и дырка локализованы внутри квантовой точки, возрастает вплоть до сотен микросекунд (Т. С. Шамирзаев и др.).

Актуальность направления биосенсоров в современном мире определяется возрастанием роли систем регистрации данных о состоянии и поддержании высокого уровня жизни человечества и дальнейшем его росте. Приводятся данные об использовании нанопроволочных (НП) транзисторов в качестве биосенсоров. Принцип действия НП-биосенсоров

основан на регистрации модуляции тока, протекающего через НП при адсорбции на её поверхность анализируемых молекул. Адсорбированные молекулы выступают в таких биосенсорах в виде виртуального затвора, а сам НП с омическими контактами на концах — в виде полевого нанотранзистора. Высокая чувствительность нанопроволочного сенсорного элемента определяется большим аспектным соотношением поверхность/объём. Показано, что такой биосенсор позволяет достичь чувствительности порядка 10^{-15} М (В. П. Попов, О. В. Наумова и др.).

Приведённые результаты будут способствовать улучшению характеристик существующих полупроводниковых приборов, оптимизации методов их создания, более глубокому пониманию особенностей функционирования приборов и взаимосвязи с характеристиками наногетероструктур, а также созданию принципиально новых полупроводниковых устройств за счёт использования возможностей зонной инженерии, свойств систем с пониженной размерностью, интеграции различных материалов, применению новых методов синтеза полупроводниковых гетероструктур в сочетании с новыми способами обработки материалов.

*Член-корреспондент РАН
А. В. Дзуреченский*