

ПРЕДИСЛОВИЕ К ТЕМАТИЧЕСКОМУ ВЫПУСКУ «ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРЫ»

Предлагаемый выпуск журнала является продолжением тематической публикации результатов междисциплинарных научных исследований (Автометрия. 2013. Т. 49, № 5), 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.

Фундаментальные проблемы эпитаксии, численное моделирование процессов роста, полей деформации и энергетического спектра, фундаментальные проблемы фотонных устройств на основе полупроводниковых наногетероструктур, СВЧ-электроники и спинтроники, многослойные гетерофазные электронные материалы — это комплекс проблем, вклад в решение которых вносят результаты работ, включённых в тематический выпуск предлагаемого издания.

Современная полупроводниковая электроника базируется главным образом на кремнии. Кремний является материалом № 1 в производстве микросхем и устройств на их базе: компьютеры, навигационные системы и системы связи, цифровое телевидение, мобильные телефоны, солнечная энергетика, силовая электроника. Стремительное развитие полупроводниковой электроники, основанное на востребованности производимых изделий в массовом масштабе, обеспечило устойчивую модернизацию современной кремниевой технологии, уровень которой в настоящее время значительно превышает уровень технологий других полупроводниковых материалов. Именно поэтому для расширения спектра необходимых функциональных возможностей проводятся работы по сращиванию кремния с другими материалами с последующим использованием достижений кремниевой технологии.

В данном выпуске приводятся работы по гетероэпитаксии GaAs, CdTe/ZnTe и Ge на кремнии. Методом молекулярно-лучевой эпитаксии плёнки GaAs можно выращивать либо непосредственно на поверхности кремния, либо через переходные слои, например GaP/Si. Привлекательность фосфида галлия обусловлена тем, что постоянная его кристаллической решётки близка к постоянной решётки кремния. Это позволяет разделить задачу зарождения эпитаксиального слоя полярного полупроводника GaP на неполярном Si и задачу перехода от постоянной решётки Si к постоянной решётки GaAs (Е. А. Емельянов, О. П. Пчеляков, В. В. Преображенский и др.). Выявлены механизмы зарождения на начальных стадиях формирования гетероэпитаксиальных структур CdTe/ZnTe/Si(301) и CdTe/ZnTe/GaAs(301) в методе молекулярно-лучевой эпитаксии, обеспечивающие снижение плотности прорастающих дислокаций (Ю. Г. Сидоров и др.). Методом дифракции быстрых электронов и сканирующей электронной микроскопии, построена кинетическая диаграмма роста Ge на Si. Определены энергии активации, соответствующие переходу от двумерного к трёхмерному росту плёнки Ge (А. И. Никифоров и др.).

Одна из приоритетных задач физики низкоразмерных систем — создание пространственно упорядоченных ансамблей полупроводниковых квантовых точек. Эффективным путём решения проблемы неоднородного распределения квантовых точек по размерам и их случайного пространственного распределения является создание мест преимущественного зарождения при последующей гетероэпитаксии. Результаты на базе метода молекулярной динамики позволили описать механизм атомной диффузии на структурированной поверхности (П. Л. Новиков и др.). Разработан инструментарий (модели, алгоритмы и программное обеспечение) оптимизации выполнения параллельных программ на мультиархитектурных распределённых вычислительных системах (К. В. Павский и др.).

Исследования мезоскопических структур на основе квантовых точек Ge в Si при слабых потоках ИК-света выявили фотостимулированные переключения тока. Малые размеры канала (порядка 70–200 нм) дают возможность наблюдать гигантские флуктуации фотопроводимости, которые обусловлены сильной зависимостью туннельного тока от заполнения квантовых точек носителями заряда. Замена кремниевой подложки структурами кремний-на-изоляторе позволила повысить температуру фотодетектирования от 4,2 приблизительно до 100 К. Полученные результаты являются основанием для создания детектора одиночных фотонов в широком диапазоне длин волн (Н. П. Степина и др.).

Механизмы СВЧ-потерь в *pin*-диодах AlGaAs/GaAs исследовались численными методами с помощью программно-технологического комплекса "Sentaurus TCAD" (фирма "Synopsys"). Определены СВЧ-потери в *pin*-диодах AlGaAs/GaAs в зависимости от толщины *i*-области и установлены механизмы возникновения потерь (К. С. Журавлев и др.).

К экстремальным методам формирования наноструктур можно отнести облучение ионами высоких энергий (до 700 МэВ, ионы Xe и Bi) стехиометрических слоёв SiO₂ и слоёв диоксида кремния с различным содержанием избыточного кремния. После облучения в слоях окисла происходит фазовое расслоение с образованием нанокристаллов кремния. Такие структуры оказались эффективными источниками излучения в видимой области спектра (С. Г. Черкова и др.).

Альтернативные (более простые и менее затратные) методы получения подобных структур (нанокристаллы в диэлектрических матрицах) базируются на химических подходах, в частности на методе Ленгмюра — Блоджетт. Особенность этого метода заключается в возможности организовать молекулярную двумерную систему с упорядоченными массивами нанокристаллов фактически любой пространственной плотности на различных поверхностях. Методом Ленгмюра — Блоджетт установлены условия формирования кристаллов CuS со средним размером 3 нм и проведены электронно-микроскопические исследования их структуры (Л. Л. Свешникова и др.).

На основе химической функционализации графена предложен и реализован метод получения массивов проводящих островков графена и мультиграфена (квантовых точек) в матрице фторированного графена (И. В. Антонова и др.).

При создании микро- и нанофлюидных систем, применяемых в биологии и медицине, всё чаще возникает потребность в универсальном высокотехнологичном материале, с помощью которого возможно изготовление элементов биоаналитических комплексов: фильтров, смесителей, концентраторов. На роль такого материала идеально подходит макропористый кремний. Отработанная технология его получения позволяет формировать совершенные матрицы каналов различных длины и поперечного сечения с последующим их применением в сенсорных устройствах, микрореакторах, молекулярных и клеточных фильтрах. Работа С. И. Романова с коллегами посвящена созданию и исследованию функциональных характеристик электроосмотического насоса на базе асимметричных кремниевых микроканальных мембран. В экспериментах с использованием деионизованной воды впервые была обнаружена ярко выраженная зависимость скорости потока (расхода жидкости) от структурной асимметрии микроканалов. Определён расход жидкости насосом в зависимости от прикладываемого напряжения и ориентации матрицы по отношению к прокачиваемому объёму воды.

Приведённые результаты будут использованы для улучшения характеристик существующих полупроводниковых приборов, оптимизации методов их создания, более глубокого понимания особенностей функционирования приборов и взаимосвязи с характеристиками наногетероструктур.

Член-корреспондент РАН
А. В. Двуреченский