

ОТ СОСТАВИТЕЛЯ ВЫПУСКА

Развитие возможностей создания твердотельных материалов в нанометровом масштабе (0,1–100 нм) и их диагностики обеспечило открытие новых представлений о природе веществ. Основу изменений свойств наноматериалов составляют эффекты размерного квантования электронного энергетического спектра, частотного спектра фононов (оптические моды), эффекты туннелирования и кулоновской блокады туннелирования электронов. Последовательное уменьшение размера по одной из координат в трехмерной системе (объемный материал) обеспечивает получение наноструктур, относящихся к двумерным (квантовые ямы), одномерным (квантовые проволоки) и нульмерным системам (квантовые точки). Эффект размерного квантования электронного энергетического спектра приводит к сильному изменению электрических, оптических и магнитных свойств наноструктур. Эти свойства используются для разработки приборов (наноприборов) с качественно новыми и количественно более высокими параметрами по сравнению с параметрами существующих приборов на объектах макроскопических размеров.

В области полупроводниковых материалов движущей силой перехода к характерным нанометровым размерам в производстве изделий твердотельной электроники (интегральные схемы) является повышение быстродействия и объема памяти широко используемых устройств вычислительной техники, видеосистем и систем связи, а также повышение эффективности преобразования и передачи энергии. Сочетание высоких требований к функциональным характеристикам широко используемых устройств и современных методов достижения поставленных целей обеспечило развитие нанотехнологий в твердотельной электронике, привело к получению нового вида материалов: сверхрешетки; наноструктуры с квантовыми ямами, проволоками, квантовыми точками; структуры с нанотрубками, наноспиральями и нанопористыми слоями; многослойные структуры, сочетающие магнитные и немагнитные материалы. Основные технологии, используемые для создания таких структур, — молекулярно-лучевая эпитаксия, газофазная эпитаксия, плазменное осаждение/травление, ионная имплантация, литография (оптическая, рентгеновская, электронная, ионная, наноимпринт), а также технологии, основанные на процессах самоорганизации.

На базе современных нанотехнологий проводится разработка уникальных по своим характеристикам датчиков. Достижение предельных параметров как по функциональным характеристикам, так и по массе и размерам сенсоров обеспечивает возможность их применения в различных областях жизни. Так, в настоящее время активно ведутся работы по созданию высокочувствительных медицинских биосенсоров для экспресс-диагностики заболеваний на ранних стадиях их проявления. Примером может служить изложенный в предлагаемом выпуске журнала метод формирования кремниевых кристаллических нанопроволочных транзисторов для электронных биосенсоров. Ансамбль кристаллических нанопроволок формируется на структурах кремний-на-изоляторе с помощью электронной литографии. Основой функционирования датчика на нанопроволочных транзисторах служит высокая чувствительность электрического сопротивления нанопроволок к изменению окружающего электрического поля, что происходит при захвате вирусов на нанопроводники. Процесс захвата сопровождается изменением проводимости кристаллических нанопроволок, что фиксируется электрическими измерениями. В последнее время ведутся интенсивные исследования кремниевых кристаллических нанопроволочных транзисторов с целью широкомасштабного внедрения систем, обеспечивающих одновременное обнаружение большого числа видов вирусов с чувствительностью на уровне индивидуального вируса. Использование кремния в качестве материала для кристаллических нанопроволок позволяет применить развитую кремниевую технологию высочайшего уровня для создания многофункциональных систем на одном чипе, объединяющих разнообразные сенсоры, сигнальные и цифровые процессоры с устройствами беспроводной связи.

Другой подход к формированию кристаллических нанопроволок заключается в выращивании их на специально приготовленных местах нанометрового размера. Результаты изучения механизма и процессов роста нановискеров (кристаллических нанопроволок) кремния на основе моделирования методом Монте-Карло приводятся в данном выпуске журнала.

В последние годы для экспресс-диагностики генетических заболеваний и идентификации личности конкретного индивидуума развиваются технологии создания наноканальных мембран, обеспечивающих фильтрацию одиночных молекул (например, ДНК) через нанопоры диаметром 3–5 нм в слоях диэлектрика (Si_3N_4), углеродных нанотрубок. Использование наноотверстий в неорганических пленках вместо менее стабильных органических материалов для создания наноканальных мембран дает возможность привлечения высоко развитой кремниевой технологической базы. Разработка метода создания наноканальных мембран на основе кремния обсуждается в предлагаемом выпуске журнала.

Развитие современной полупроводниковой электроники вот уже более сорока лет следует закону Мура. Г. Мур, один из основателей корпорации "Intel", в 1965 году установил, что число транзисторов на квадратный дюйм удваивается каждый год со времени начала производства интегральных схем. В последующие годы темп приращения плотности транзисторов немного снизился, но плотность записываемой информации удваивалась приблизительно каждые 18 месяцев, и это стало современным определением закона Мура. Характерный размер элемента (минимальный размер элемента маски, используемой в процессе литографии) при создании микросхемы в настоящее время для наиболее распространенных технологий находится в области 45–90 нм. Одна из ключевых проблем при последовательном переходе к элементам меньших размеров заключается в появлении туннельного тока, протекающего через широко используемый в полупроводниковой электронике диэлектрик — двуокись кремния. В результате рассеиваемая в интегральных схемах мощность возрастет до неприемлемых для работы устройств значений. Создание технологии получения и применение диэлектриков с большой диэлектрической проницаемостью (например, диоксиды гафния, циркония, Al_2O_3) приводит к подавлению туннельного тока, что обеспечивает снижение тепловых нагрузок микросхем. Подавление туннельных токов также принципиально важно в элементах памяти для обеспечения достаточно продолжительного времени хранения информации. Современные требования к элементам флэш-памяти включают время хранения записанной информации в течение 10 лет. В представленном выпуске обсуждается проблема оптимизации диэлектрической проницаемости блокирующего изолирующего слоя в элементах энергонезависимой памяти.

В последовательности понижения размерности системы и переходе от объемного материала к наноструктурам с квантовыми ямами и наноструктурам с квантовыми точками удалось значительно снизить пороговые токи для обеспечения лазерной генерации в твердотельных лазерах. Дальнейшее развитие лазерного направления в части повышения быстродействия (скорости передачи информации) и снижения пороговых значений тока осуществляется разработками и созданием высокочастотных лазеров с вертикальным резонатором на основе наноструктур $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$ с квантовыми ямами для использования в прецизионных стандартах частоты и для высокоскоростных систем передачи информации. На базе лазеров с вертикальным резонатором разработаны и созданы высокоэффективные излучатели одиночных фотонов с токовой накачкой на основе одиночных InAs квантовых точек для систем квантовой криптографии и квантовых вычислений. В предлагаемом выпуске журнала приводятся результаты разработки и роста многослойных прецизионных наноструктур на основе InGaAs и AlGaAs полупроводниковых материалов для лазерных излучателей с вертикальным резонатором, используемых в миниатюрных атомных стандартах частоты нового поколения.

Обнаруженный в конце прошлого столетия эффект самоорганизации полупроводниковых наноструктур при гетероэпитаксии является основой получения объектов с квантовыми точками. Эффекты самоорганизации (упорядочения) заключаются в появлении в системе нанокристаллов предпочтительных значений их характеристик: размеров, формы, расстояний между нанокристаллами и их взаимного расположения на поверхности в условиях осаждения материала из молекулярных пучков. Происходящие процессы упорядочения связаны с минимизацией свободной суммарной энергии системы. Управление процессами зарождения и роста квантовых точек, выявление условий образования в них дефектов составляет основу получения совершенного по структуре ансамбля упорядоченных квантовых точек. Ожидаемые достоинства таких систем — узкие линии поглощения/излучения, температурная стабильность работы приборов. Здесь приводится новый подход к расчету критического размера трехмерного нанокристалла Ge (островок) на кристаллической кремниевой подложке, при котором зарождение дислокации становится энергетически выгодным. Подход учитывает реальную форму GeSi-островка и зависимость энергии дислокации от ее положения в островке.

Гетероструктуры на основе твердого раствора кадмий—ртуть—теллур (КРТ) являются базовым материалом для фотоприемников инфракрасного диапазона. Разработка подходов, обеспечивающих создание гетероструктур КРТ на кремниевых пластинах способно решить многие проблемы на пути формирования монолитных фотоприемных устройств, совмещающих на одной подложке фотоприемники и устройства считывания/обработки фотосигнала. Некоторые подходы роста гетероструктур КРТ на кремнии обсуждаются в этом выпуске.

чл.-корр. РАН А. В. Дзуреченский