

НАНОТЕХНОЛОГИИ, НАНОМЕТРИЯ

УДК 621.3.049.77

**Ю. Г. Сидоров, А. И. Торопов, В. В. Шашкин, В. Н. Овсюк,
В. А. Гайслер, А. К. Гутаковский, А. В. Латышев,
В. А. Ткаченко, З. Д. Квон, А. В. Двуреченский,
О. П. Пчеляков, В. Я. Принц, В. П. Попов, А. Л. Асеев**

(Новосибирск)

**РАЗВИТИЕ НАНОТЕХНОЛОГИЙ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ
ДЛЯ РАЗРАБОТКИ УСТРОЙСТВ
ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ**

Представлен краткий обзор результатов развития технологии молекулярно-лучевой эпитаксии и технологии создания структур кремний–на–изоляторе применительно к разработке нового поколения фотоприемных устройств ИК-диапазона, лазеров с вертикальным резонатором, транзисторов и фотоприемников на квантовых точках, квантовых электронных интерферометров и нанотранзисторов. Показаны результаты использования метода самосборки напряженных эпитаксиальных гетероструктур и зондовой нанолитографии для получения нанобъектов. Приведены данные о структуре нанобъектов, полученные методами просвечивающей электронной микроскопии, атомно-силовой микроскопии и сканирующей туннельной микроскопии атомного разрешения. Проведен анализ возможностей нанотехнологий для решения основных задач современной полупроводниковой электроники.

Введение. Последние достижения в физике низкоразмерных полупроводниковых структур открыли возможности конструирования методами зонной инженерии и инженерии волновых функций наноструктур с электронным спектром и свойствами, определенными квантово-механической природой элементарных возбуждений в твердом теле, с принципиально новыми функциональными возможностями для микро-, опто- и нанoeлектроники, средств связи, новых информационных технологий, измерительной техники и т. д.

Достижения в разработке и изготовлении наноструктур различного назначения определяются уровнем развития нанотехнологий, которые позволяют с атомной точностью получать наноструктуры с необходимым химическим составом и конфигурацией, а также методов комплексной диагностики наноструктур, включая контроль в процессе изготовления (*in situ*) и управление на этой основе технологическими процессами. Нанотехнологии призваны решить следующие основные задачи современной полупроводниковой

электроники: повышение производительности вычислительных систем и в перспективе создание квантового компьютера; увеличение пропускной способности каналов связи; увеличение информационной емкости и качества систем отображения информации с одновременным снижением энергозатрат; расширение возможностей сенсорных и энергосберегающих устройств; увеличение доли использования электронных и оптоэлектронных компонент в биологических, медицинских, химических, машиностроительных и других технологиях [1].

В предлагаемой работе представлены результаты исследований развития нанотехнологий и методов диагностики для создания нового поколения устройств и приборов современной микро-, опто- и наноэлектроники, проведенных в Институте физики полупроводников СО РАН.

Фоточувствительные слои для ИК-фотоприемников. Для создания полупроводниковых элементов современных систем инфракрасной техники необходимым является развитие технологии молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) – одной из основных технологий современной физики полупроводников. Работы по технологии МЛЭ начаты в Институте физики полупроводников по инициативе академика А. В. Ржанова и продолжены при решающем вкладе члена-корреспондента РАН К. К. Свиташева и профессора С. И. Стенина. В последние годы основным направлением в развитии МЛЭ явилось создание эпитаксиальных структур на основе соединений кадмий–ртуть–теллур (КРТ). Возможность формирования фоточувствительных слоев этого соединения при осаждении слоев заданного состава нанометровой толщины позволила реализовать варизонные структуры с увеличенной шириной запрещенной зоны у границы раздела с подложкой и у свободной поверхности. Ключевым при этом явилось применение в процессе МЛЭ измерений параметров растущей пленки методом лазерной эллипсометрии с высоким быстродействием (время одного измерения 200 мкс) и с рекордными параметрами разрешения по толщине (0,2–0,3 нм) и по составу (до 0,05 мольных долей). В результате удалось резко уменьшить рассеяние носителей заряда у поверхностей и получить слои КРТ с высокими значениями времени жизни носителей заряда. Полученные фоточувствительные слои использовались для создания большеформатных матриц и линеек фотоприемных устройств дальнего ИК-диапазона [2].

Фотоприемники на основе возбуждения носителей заряда из слоев с размерным квантованием (квантовых ям) многослойных эпитаксиальных гетероструктур AlGaAs/GaAs становятся другим основным типом фотоприемников для широкоформатных матричных тепловизионных систем в диапазоне 8–12 мкм благодаря более высокой однородности фоточувствительных свойств по сравнению со слоями КРТ. Фотоприемники на квантовых ямах имеют меньшее значение квантовой эффективности по сравнению с КРТ-фотодиодами. Однако для указанного диапазона длин волн ИК-излучения величина квантовой эффективности фотоприемников менее существенна, так как, вследствие фоновых ограничений и ограничения зарядовой емкости устройств ввода кремниевых процессоров, считывающих ИК-изображение, время накопления t_n в тепловизионных системах с фотоприемниками, имеющими высокую квантовую эффективность, как правило, много меньше кадрового времени t_k , $t_n \sim 0,01 t_k$. Поэтому потери в фотосигнале из-за меньшей (в 5–10 раз) квантовой эффективности фотоприемников на структурах с квантовыми ямами AlGaAs/GaAs по сравнению с фотодиодами HgCdTe

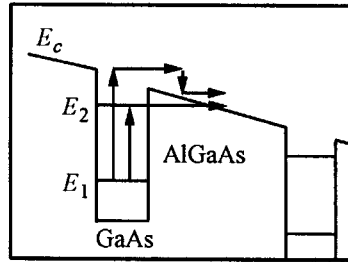


Рис. 1. Энергетическая диаграмма зоны проводимости многослойной системы из квантовых ям: E_1, E_2 – уровни квантования для поперечного движения электронов; E_c – край зоны проводимости объемного материала. Стрелками обозначены возможные пути выброса электрона из ямы при поглощении фотона

могут быть полностью компенсированы путем увеличения времени накопления [3].

Зонная диаграмма структуры на основе многослойной системы из квантово-размерных слоев GaAs и барьеров AlGaAs (AlGaAs/GaAs) изображена на рис. 1. Слои GaAs легируются донорной примесью Si с концентрацией $N_{Si} \approx 3 \cdot 10^{17} - 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Фотопроводимость в такой структуре обеспечивается носителями, возбужденными непосредственно со связанного основного уровня в состоянии квазинепрерывного спектра над барьером, либо возбуждением на связанный уровень в яме с последующим туннелированием в состоянии квазинепрерывного спектра. Схематически эти переходы изображены на рис. 1. Параметры фотоприемника (спектральная зависимость коэффициента поглощения, пороговая обнаружительная способность, темновой ток) зависят от положения уровней квантования ϵ_n относительно друг друга и относительно потенциального барьера (края зоны проводимости AlGaAs), величины тянущего электрического поля, рабочей температуры и размеров отдельного фотоприемного элемента. Состав $Al_xGa_{1-x}As$ выбирается таким образом, чтобы уровень ϵ_2 находился вблизи края барьера V_b и удовлетворялось условие $W(V) \gg 1/t_{21}$, где $W(V)$ – вероятность туннелирования, а $t_{21} \approx 10^{-13} \text{ с}$ – время жизни на возбужденном уровне по отношению к испусканию оптического фотона.

На рис. 2 представлено полученное с помощью высокоразрешающего электронного микроскопа (ВРЭМ) изображение фрагмента поперечного среза эпитаксиальной гетероструктуры AlGaAs/GaAs, выращенной методом МЛЭ. Видно совершенство структуры слоев и границ раздела. С помощью

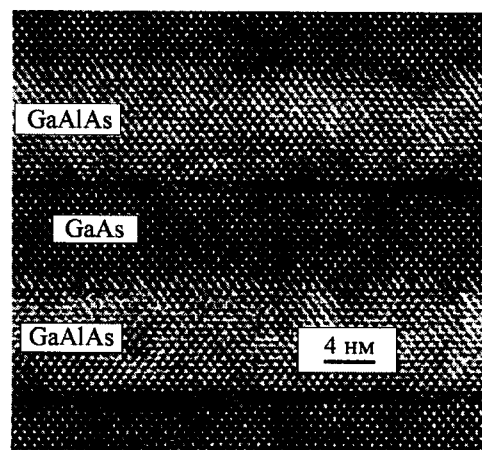


Рис. 2. ВРЭМ-изображение поперечного среза эпитаксиальной гетероструктуры AlGaAs/GaAs

ВРЭМ обнаружено различие в атомной шероховатости верхней и нижней границы раздела для каждого слоя, что связано с различием в коэффициентах миграции атомов Ga и Al при росте монослоев. При отклонении от оптимальных условий выращивания данное обстоятельство приводит к морфологической нестабильности поверхности роста и разрыву сплошности слоев нанометровой толщины.

Созданные на основе эпитаксиальных многослойных структур с квантовыми ямами матричные фотоприемники размера 128×128 представляют собой набор столбчатых фоторезисторов на подложке полуизолирующего GaAs. Фоторезисторы имеют общий контактный нижний слой из n^+ -GaAs толщиной 0,6 мкм и In-столбы на каждом фоторезистивном элементе для создания омического контакта между фотоприемной матрицей и входными ячейками кремниевого мультиплексора, осуществляющего регистрацию фототока и формирование видеосигнала. Под каждым In-столбом в контактном слое n^+ -GaAs толщиной 0,8 мкм находится двумерная дифракционная решетка с периодом субмикронного размера, созданная при помощи электронной литографии и закрытая сверху вплавленным омическим контактом GaAs. Засветка анализируемым излучением осуществляется со стороны подложки. На рис. 3 приведено тепловизионное изображение, полученное с помощью AlGaAs/GaAs фотоприемного модуля, имеющего максимум фоточувствительности на длине волны 7,8 мкм.

Полупроводниковые лазеры с вертикальным резонатором. В последние годы прогресс в развитии полупроводниковых лазеров в значительной мере определяется разработкой и созданием лазеров с вертикальным резонатором (ЛВР). Высокие значения параметров порогового тока, частоты токовой модуляции и расходимости излучения, полученные на ЛВР, существенно расширяют возможности полупроводниковых излучателей и стимулируют дальнейшие исследования в этой области. В данном разделе представлены результаты исследования генерационных характеристик ЛВР, структура которых оптимизирована для достижения высокой внешней квантовой эффективности и больших мощностей излучения.

Исходные лазерные структуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках n^+ -GaAs(001). Эти структуры содержат нелегированные активные области шириной λ , включающие в себя три 8-нанометровые квантовые ямы $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$, а также зеркальные области p - и n -типов легирования, образующие интерферометр Фабри – Перо и состоящие из многократно повторяемых $(\lambda/4)$ -слоев GaAs и $\text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}$ (по 20 и 22,5 периода для p - и n -зеркал соответственно). Инжекция носителей в активную область осуществляется через p - и n -зеркала. Слои GaAs и $\text{Al}_{0,9}\text{Ga}_{0,1}\text{As}$ зеркал легировались до уровня $1,0 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Верхнее p -зеркало заканчивается дополнительным сильнолегированным (концентрация $\text{Be} \approx 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) слоем GaAs толщиной 47 нм, выполняющим функцию контактной области и обеспечиваю-

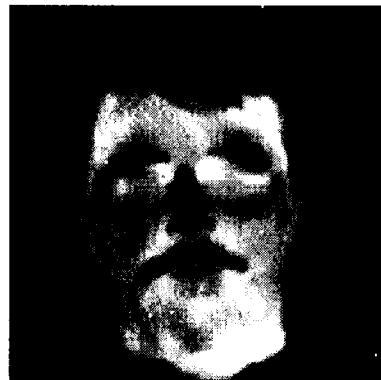


Рис. 3. Тепловизионное изображение в спектральном диапазоне 5,0–8,5 мкм

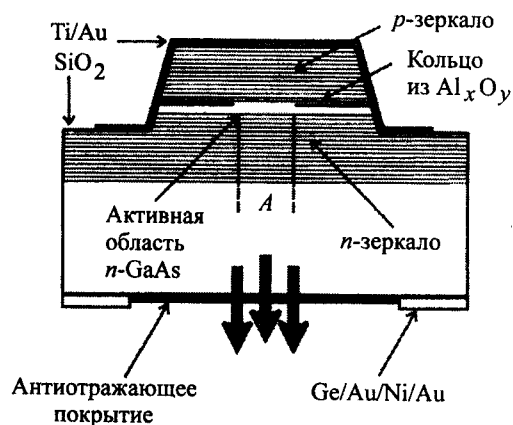


Рис. 4. Схема лазера с вертикальным резонатором

щим согласование фаз оптических лучей, отраженных от металлического покрытия Ti (2 нм)/Au (120 нм) и полупроводниковых гетерограниц. Схема ЛВР представлена на рис. 4. Апертура A ЛВР задается внутренним диаметром кольца из Al_xO_y , получаемого селективным окислением слоев AlAs [4]. Для этой цели предусмотрен слой AlAs толщиной 66 нм, расположенный вблизи активной области. Параметр A варьировался в широком интервале значений от 2 до 10^3 мкм. Излучение ЛВР выводится через просветленную подложку GaAs.

На рис. 5 представлены спектры отражения лазерной структуры R , электролюминесценции E и излучения ЛВР G . Измеренный спектр отражения хорошо соответствует расчетному и содержит резонанс интерферометра Фабри – Перо вблизи 965 нм, положение которого совпадает с максимумом спектра электролюминесценции. Длина волны генерации ЛВР соотносится с резонансом интерферометра.

Максимальное значение внешней дифференциальной квантовой эффективности η_e на уровне 60 % получено на ЛВР с $A = 4$ мкм. Высокая η_e обеспечивается большим значением внутренней квантовой эффективности $\eta_i > 0,9$, а также оптимальным соотношением коэффициентов отражения зеркал: верхнее зеркало характеризуется предельно высоким значением коэффициента отражения R_t , близким к 1, а нижнее (выходное) – относительно невысоким ($R_b = 0,99$).

Излучение всех исследованных ЛВР характеризуется узкой диаграммой направленности. Для ЛВР с апертурой $A = 3$ мкм расходимость лазерного излучения по уровню половины мощности (полуширина на полувысоте) составляет $\Gamma = 4,7^\circ$, а для ЛВР с большей апертурой этот параметр не

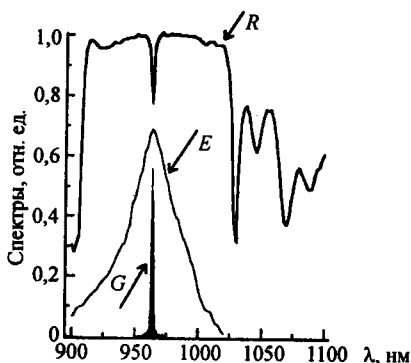


Рис. 5. Отражение, электролюминесценция и спектр излучения лазера с вертикальным резонатором

Рис. 6. Ватт-амперные характеристики ЛВР с апертурой $A = 500$ мкм, $\tau = 0,5$ мкс, $f = 1$ кГц

превышает 3° . Важно отметить, что излучение лазеров большой апертуры, работающих в режиме высокой мощности, также характеризуется узкой диаграммой направленности.

На рис. 6 приведены ватт-амперные зависимости для лазера с большой апертурой ($A = 500$ мкм), на котором получено наиболее высокое значение выходной мощности для ЛВР (до 10 Вт при $T = 300$ К и 20 Вт при $T = 250$ К в импульсном режиме).

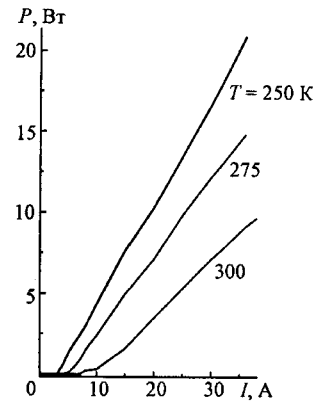
ЛВР с малой апертурой (3–4 мкм) демонстрируют устойчивую генерацию в одномодовом режиме (TEM_{002}) с линейной поляризацией вдоль кристаллографических направлений типа [110]. Лазеры с большей апертурой работают в одномодовом режиме лишь при незначительном превышении порогового тока либо изначально работают в многомодовом режиме при $A > 5$ мкм.

Созданы также матрицы, содержащие 64 ЛВР с $A \approx 4$ мкм. Элементы матрицы демонстрируют удовлетворительную однородность параметров. Значения порогового тока для элементов матрицы составляют $I_{th} = 0,6 \pm 0,1$ мА, выходная мощность (при токе 3 мА) $P = 1,2 \pm 0,2$ мВт и длина волны излучения элементов матрицы $\lambda = 957,5 \pm 2,5$ нм.

Таким образом, разработанные и изготовленные с помощью метода МЛЭ ЛВР демонстрируют хорошие возможности для их использования в современных быстродействующих системах отображения, передачи и обработки информации.

Квантовый электронный интерферометр. Гетероструктуры AlGaAs/GaAs с двумерным электронным газом, полученные с помощью МЛЭ, использовались для изготовления кольцевых баллистических интерферометров ультрамалого размера [5, 6]. Типичные значения концентрации и подвижности электронов в двумерном газе составили 10^{12} см⁻² и $10^4 - 10^5$ см²/В·с (при $T = 4,2$ К) соответственно. Геометрия интерферометра задавалась реактивно-ионным травлением, латеральный профиль которого определялся электронно-лучевой литографией острофокусированным электронным пучком с диаметром менее 100 нм. Использовалась также нанолитография с помощью зонда атомно-силового микроскопа. При этом производилось локальное прокисление гетероструктур AlGaAs/GaAs с двумерным электронным газом. Достигнуто латеральное разрешение до 40 нм при сравнимом с этой величиной значении толщины окисленного слоя [5]. На основе метода зондовой нанолитографии получены кольцевые интерферометры с эффективным радиусом до 90 нм на поверхности гетероструктур с двумерным электронным газом (рис. 7).

Проводимость кольцевых структур столь малых размеров обнаруживает наряду с мезоскопическими вариациями магнитопольные осцилляции Ааронова – Бома, вызванные интерференцией электронов, распространяющихся по различным рукавам интерферометра. Период осцилляций кондактанса в зависимости от величины приложенного магнитного поля B соответствует



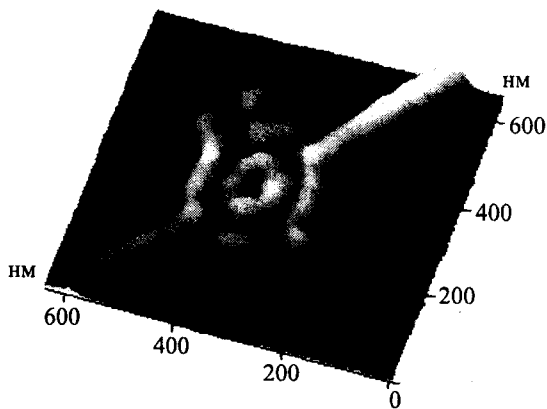


Рис. 7. Изображение интерферометра в атомно-силовом микроскопе

кванту магнитного поля $\Phi_0 = hc/e: \pi r^2 \Delta B = \Phi_0$, где r – эффективные радиусы колец (100–200 нм).

Для исследования одноэлектронного транспорта в интерферометре использовались образцы с сопротивлением 10^5 – 10^6 Ом [6]. В отсутствие магнитного поля проводимость кольцевых структур обнаруживает осцилляции от величины напряжения на расщепленном затворе, в качестве которого выступают области с двумерным электронным газом по обе стороны от кольцевого интерферометра (рис. 8). Периодический характер осцилляций и дуб-

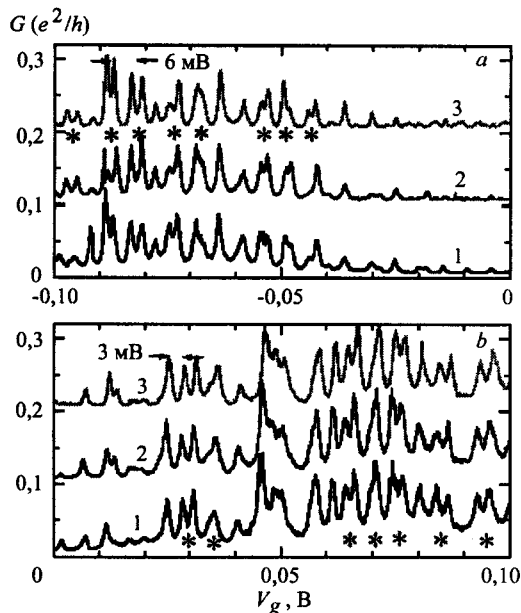


Рис. 8. Зависимости кондактанса ($G = I/V$) малого интерферометра от напряжения на затворе V_g при $T = 0,1$ К (рис. *b* является продолжением рис. *a*). Эффекты расщепления кулоновских пиков приведены для последовательных измерений в одном из мезоскопических состояний (кривые 1–3). Дублеты указаны звездочками. Стрелками обозначены основной период кулоновских осцилляций (6 мВ) и величина дублетного расщепления (3 мВ)

летное расщепление пиков соответствуют предсказаниям теории кулоновской блокады для структур с одноэлектронной зарядкой двух кулоновских островков, в качестве которых выступают квантовые точки треугольной формы на входе и выходе интерферометра. Этот вывод подтверждается результатами численного моделирования электростатики, энергетического спектра и одноэлектронного транспорта в устройстве [6]. Результаты моделирования представлены на рис. 9 вместе с эквивалентной схемой устройства: основной период затворных осцилляций (6 мВ) отвечает последовательной зарядке квантовых точек одиночными электронами, а дублетное расщепление кулоновских пиков (1,5–3 мВ) связано с зарядовым взаимодействием квантовых точек.

Системы с квантовыми точками. Предельным случаем систем с пониженной размерностью являются нуль-мерные системы, состоящие из массива атомных кластеров, или островков, нанометровых размеров в полупроводниковой матрице. Дискретный спектр энергетических состояний в таких кластерах подобен энергетическому спектру отдельных атомов, что позволяет говорить об «искусственных атомах», несмотря на большое количество атомов в кластерах (островках). Хотя кластеры, или островки, обладают определенной формой и конечными размерами в единицы или десятки нанометров, для данного типа структур принят термин «квантовые точки» (КТ).

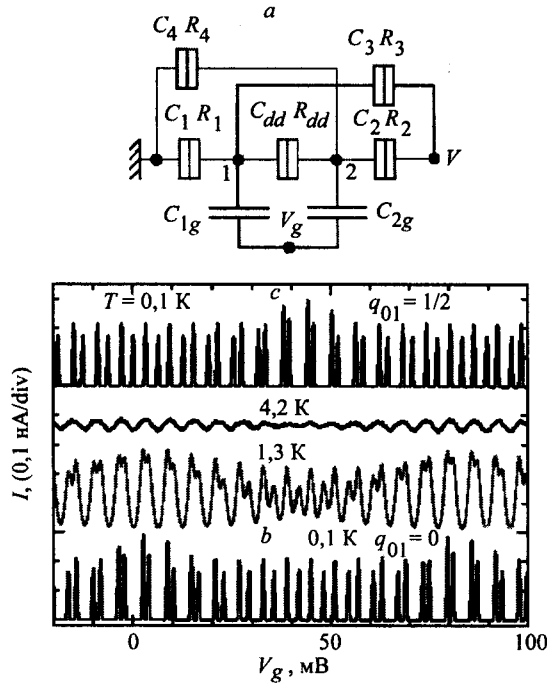


Рис. 9. Моделирование одноэлектронной зарядки квантовых точек интерферометра. *a* – эквивалентная схема устройства. Узлы 1, 2 обозначают квантовые точки. $C_i R_i$ – эффективные туннельные переходы, имеющие емкости C_i и сопротивления R_i . *b*, *c* – вычисленные методом Монте-Карло зависимости тока зарядки от затворного напряжения $I(V_g)$ для различных величин остаточного поляризационного заряда q_{01} и для различных температур. $C_{1g} = 25$, $C_{2g} = 27$, $C_{dd} = 30$, $C_1 = C_2 = 50$, $C_3 = C_4 = 10$ аФ; $R_{dd} = 2$, $R_1 = 0,1$, $R_2 = 0,4$, $R_3 = 0,2$, $R_4 = 0,8$ МОм; $V = 0,25$ мВ

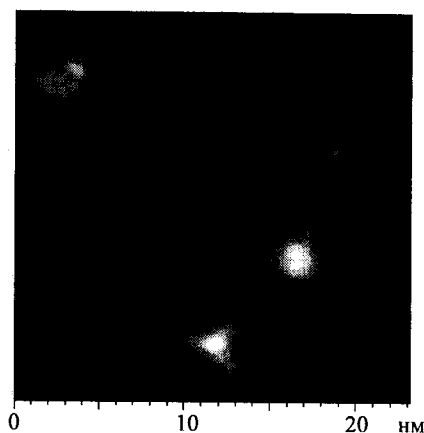


Рис. 10. СТМ-изображение нанокластеров Ge на поверхности Si(111) со структурой (7×7)

работах [7, 8] по разработке технологии МЛЭ получены результаты пионерского характера для приготовления нового класса полупроводниковых структур с наноразмерными островками германия в кремнии.

В основе метода приготовления эпитаксиальных структур германий-кремний с КТ лежат результаты исследования начальных стадий осаждения германия на атомарно-чистую поверхность кремния методом сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) в сверхвысоком вакууме [9]. На рис. 10 представлено СТМ-изображение поверхности Si(111) со структурой (7×7) с нанокластерами германия размером менее 5 нм. Установлено, что образование зародышей германия происходит преимущественно внутри половины элементарной ячейки со структурой (7×7) , находящейся в позиции дефекта упаковки. Такие кластеры обладают значительной температурной устойчивостью. Даже после отжига при 350°C в течение 2 ч на поверхности кремния между островками германия относительно больших размеров остаются фрагменты нанокластеров. Установлено также, что управление плотностью и размерами островков германия можно осуществлять при росте германия на атомарно-чистой окисленной поверхности, которая подготавливается непосредственно в установке МЛЭ. Так, при толщине пленки до пяти монослоев размеры островков составляют в основании менее 10 нм с плотностью более $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ [10].

Предсказываемое теоретически и наблюдаемое экспериментально квантование энергетического спектра носителей заряда (дырок) в островках германия формирует особенности в транспорте носителей заряда, вольт-фарадных характеристиках и фотопроводимости структур с КТ. Так, в субмикронном полевом транзисторе с массивом КТ, реализованном на структуре кремний-на-изоляторе, обнаружены осцилляции проводимости канала нанотранзисторов в зависимости от затворного напряжения при температуре измерения от гелиевой до $T \approx 150 \text{ K}$, обусловленные квантованием энергетического спектра дырок (рис. 11) [11].

Другой важный результат состоит в разработке конструкции и исследовании фотоприемников на основе эпитаксиальных структур кремния с массивом квантовых точек германия [12]. Предложена конструкция кремниевого фотоприемника для диапазона длин волн 10–20 мкм с плавающей базой, которая выполнена в виде $p^+ - i - p^+$ -структуры с восемью слоями КТ Ge в

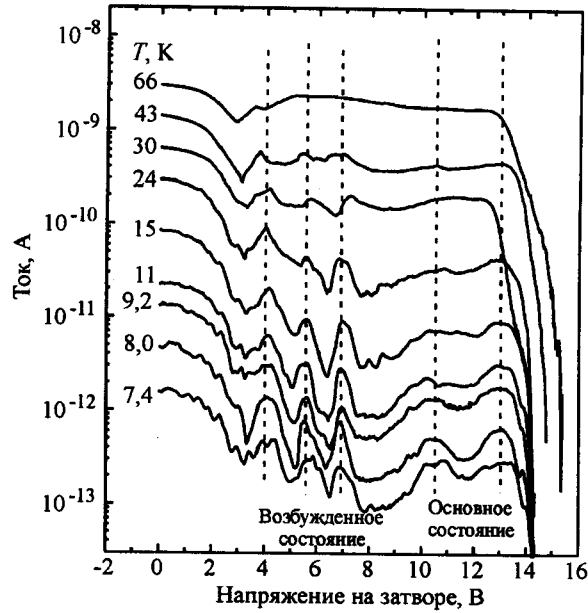


Рис. 11. Затворные характеристики нанотранзистора с КТ при различных температурах

Si и δ -легированными бором слоями. В такой структуре при комнатной температуре наблюдаются два пика фотопроводимости, связанные с переходом дырок на первое и третье возбужденные состояния (рис. 12). Установлено, что обнаружительная способность такого фотодетектора при комнатной температуре достигает величины $(0,7-1,7) \cdot 10^8 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} / \text{Вт}$. Квантовая эффективность фототранзистора составила 0,1 %, что сравнимо со значением кван-

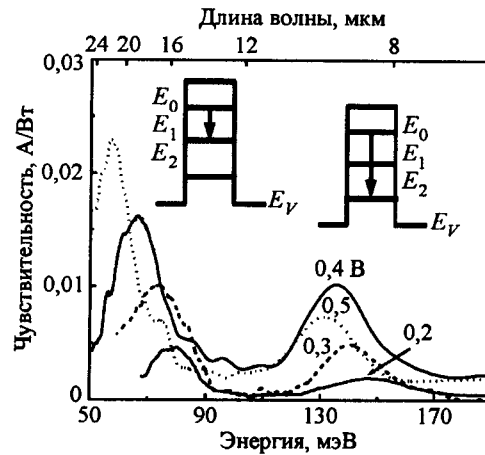


Рис. 12. Спектры фототока при различных напряжениях, приложенных между эмиттером и коллектором. В верхней части рисунка показаны оптические переходы дырок в валентной зоне КТ Ge, соответствующие наблюдаемым максимумам фототока

товой эффективности, достигнутой в настоящее время для квантовых точек в гетероструктурах на основе соединений A^3B^5 .

Разработана технология создания кремниевых $p-i-n$ -фотодиодов со встроенными слоями квантовых точек Ge для ближней ИК-области (1,3–1,5 мкм). Число слоев с КТ составило 30, слоевая плотность квантовых точек более 10^{12} см^{-2} , размеры точек менее 10 нм. В таких детекторах достигнута наименьшая из известных в литературе величина темнового тока ($2 \cdot 10^{-5} \text{ А/см}^2$ при обратном смещении 1 В). Квантовая эффективность в условиях нормального падения света на фотодиод достигает значения 3 %, что близко к значениям, полученным для фотоприемника на основе напряженных многослойных сверхрешеток $\text{Ge}_x/\text{Si}_{1-x}$. Она возрастает до значений 21 и 16 % на длинах волн 1,3 и 1,55 мкм соответственно в волноводных структурах фотодетектора, использующего эффект многократного внутреннего отражения на подложке кремний–на–изоляторе.

Полупроводниковые нанотрубки. Успешное развитие метода МЛЭ послужило основой для нового оригинального метода изготовления полупроводниковых наноструктур различных форм и геометрии. Принцип метода изготовления полупроводниковых нанотрубок контролируемого размера и состава предложен в [13, 14]. В его основе лежит освобождение напряженной полупроводниковой пленки с помощью селективного травления жертвенного слоя в эпитаксиальной гетероструктуре, предварительно приготовленной методом МЛЭ. Такой метод относится к разновидности методов молекулярной сборки и открывает перспективы изготовления отдельных наноструктур сложной формы и их массивов с предельно высокой точностью (до значения, равного толщине отдельного монослоя).

Рис. 13 иллюстрирует суть метода на примере полупроводниковой эпитаксиальной гетероструктуры Ge/Si, разница параметров кристаллических решеток $\Delta a/a$ для которой составляет 4 %. В процессе эпитаксиального наращивания на подложке n -Si слой p^+ -SiGe оказывается сжатым. Если между указанной гетероструктурой и подложкой есть дополнительно жертвенный слой n -Si, то при его удалении в селективном травителе бипленка SiGe освобождается от связи с подложкой. Сжатый слой SiGe в освободившейся пленке

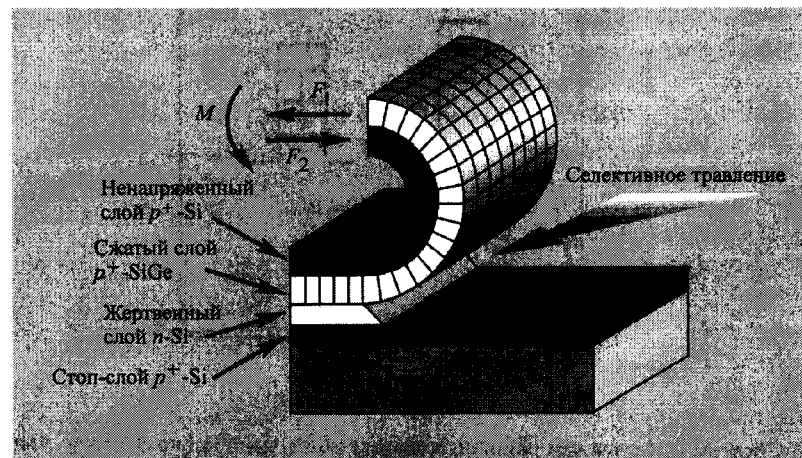


Рис. 13. Схема сворачивания эпитаксиальной гетероструктуры Ge/Si при удалении жертвенного слоя n -Si

Рис. 14. Изображение нанотрубки InAs/GaAs в высокоразрешающем электронном микроскопе

ке удлиняется, изгибая бипленку. Возникающие при этом силы межатомного взаимодействия F_1 и F_2 направлены противоположно и создают момент сил M , в результате которого первоначально плоская бипленка SiGe/Si сворачивается в трубку. Диаметр D свернутых гетероструктур определяется толщиной сворачиваемой структуры d и величиной упругих напряжений в ней. В простейшем случае гетероструктуры из двух слоев одинаковой толщины $D \approx d/(\Delta a/a)$. Толщина и состав слоев задаются технологией МЛЭ с высокой точностью, что позволяет создавать атомно-гладкие полупроводниковые трубки сантиметровой длины с прецизионно заданным диаметром микронного и нанометрового диапазонов. В качестве примера на рис. 14 приведено изображение изготовленной подобным образом нанотрубки InAs/GaAs (разница параметров кристаллических решеток для которой составляет 7,2 %) в просвечивающем электронном микроскопе высокого разрешения.



С помощью данной технологии изготовлены нанотрубки для изучения свойств двумерного электронного газа на цилиндрических поверхностях, а также трубки микронного диаметра для микротермоанемометров. Один из неожиданных эффектов – высокая устойчивость нанотрубок к окислению при комнатной температуре. Возможно создание более сложных нанообъектов в виде нанооболочек, спиралей, колец, нановолокон, массивов этих нанообъектов и т. д. [13, 14]. Развитие предложенной технологии будет сопровождаться расширением сферы применения полупроводниковых нанотрубок и других нанообъектов в электронике, биологии, медицине и других практически важных областях.

Нанотранзисторы на основе структур кремний–на–изоляторе. МОП-транзистор на кремнии остается на обозримое будущее основным элементом полупроводниковой электроники. При этом размеры транзистора уменьшаются в соответствии с эмпирически найденным законом Мура и в ближайшие годы составят величину менее 100 нм. Появление проблем, обусловленных столь малыми размерами транзисторов и других элементов интегральных схем, стимулирует поиск новых, отличных от объемного кремния, материалов и конструкций полевых транзисторов. Единственной альтернативой объемному кремнию в настоящее время являются структуры кремний–на–изоляторе со слоями кремния субмикронной и нанометровой толщины. Разработана оригинальная технология отщепления и переноса слоев кремния при прямом сращивании кремниевых пластин, одна из которых предварительно имплантирована ионами водорода, а другая термически окислена (метод DeleCut) [15]. Толщина отсеченного слоя кремния составляла 480 нм, толщина скрытого диэлектрика 320–450 нм. Отсеченный слой структур КНИ легировался бором либо фосфором до концентраций $1 \cdot 10^{16} - 2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и утоньшался путем многократного окисления при температурах 900–1000 °С до толщины 40–8 нм. Возможность получения практически

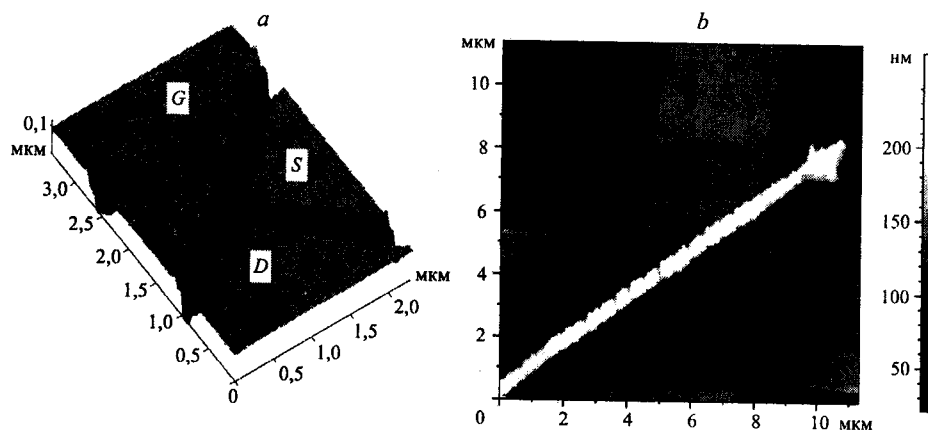


Рис. 15. Различные конструкции транзисторов на КНИ: транзистор с одним латеральным затвором *G* (размер канала 100×200 нм) (*a*), многоканальный транзистор с трехмерным затвором (*b*). Изображения получены в атомно-силовом микроскопе

любых комбинаций толщин слоя кремния и скрытого оксида – одно из основных достоинств метода DeleCut.

Преимуществом использования КНИ в качестве подложек является возможность формирования транзисторов с латеральными затворами на КНИ, когда и канал и затворы создаются из одного и того же слоя кремния, а их форма определяется в случае электронной литографии только рисунком, создаваемым электронным лучом (рис. 15, *a*). После электронной литографии проводится вытравливание экспонированного электронным лучом слоя кремния до диэлектрика. Такая технология в принципе неосуществима на объемном кремнии [16].

Другие из проработанных вариантов создания транзисторных элементов на КНИ состоят в реализации трехмерных металлических затворов для одно- и многоканальных кремниевых структур (рис. 15, *b*). На рис. 16 представлены затворные характеристики многоканального транзистора, демонстрирующие работоспособность прибора (следует отметить, что конструктивно-технологические параметры транзистора не оптимизированы по толщине канала и концентрации легирующей примеси). Важным при этом является подавление короткоканальных эффектов. Кроме того, особенность приборов на КНИ состоит еще и в том, что в отличие от классического МОП-транзистора один и тот же транзистор может работать как на электронах, так и на дырках, если создавать условия аккумуляции либо инверсии напряжением на дополнительном затворе, в качестве которого в данном случае выступает подложка кремния [17]. Таким образом, представленная конструкция многоканального транзистора с трехмерным затвором на однородно легированной структуре КНИ перспективна с точки зрения альтернативы классическому МОП-транзистору конструкции на КНИ. Важной особенностью транзисторов на структурах КНИ является их повышенная температурная и радиационная стойкость [18].

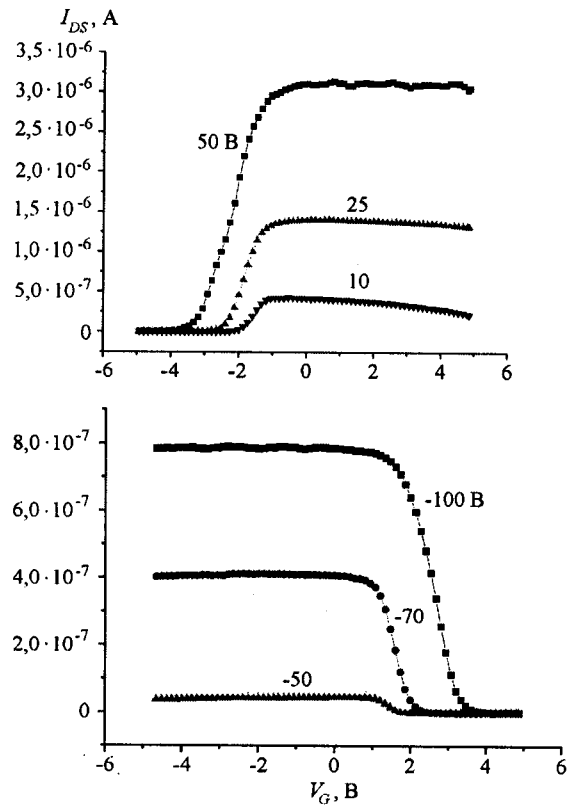


Рис. 16. Сток-затворные характеристики структуры на подложке 10 нм $SiO_2/44$ нм $Si/327$ нм SiO_2 , представленной на рис. 15, *b* при различных значениях напряжений V_{sub} : $N_0 = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $V_{DS} = 0,15 \text{ В}$

Закключение. Показано, что развитие нанотехнологий, основными из которых для полупроводниковой электроники являются молекулярно-лучевая эпитаксия и технология создания структур КНИ, вместе с использованием современных методов электронно-лучевой литографии и диагностики полупроводниковых нанообъектов методами просвечивающей электронной микроскопии, сканирующей туннельной микроскопии атомного разрешения и атомно-силовой микроскопии обеспечивает качественно новый уровень разработки элементов кремниевой и гетероструктурной электроники. Оказывается возможным не только улучшение основных параметров таких известных устройств, как фотоприемники ИК-диапазона на соединениях $II-VI$ и кремниевые транзисторы, но и создание таких принципиально новых элементов, как лазеры с вертикальным резонатором и фотоприемники на эпитаксиальных гетероструктурах с квантовыми ямами. Новый этап в развитии полупроводниковой наноэлектроники открывается с созданием транзисторов и фотоприемников на квантовых точках, квантовых электронных интерферометров и нанотранзисторов. Перспективным представляется развитие методов самосборки напряженных эпитаксиальных гетероструктур и зондовой нанолитографии для создания полупроводниковых нанообъектов. Полученные данные свидетельствуют о больших потенциальных возможностях

нанотехнологий для решения основных задач развития информационных технологий, телекоммуникаций, индустриальной и медицинской электроники.

Авторы выражают благодарность всем сотрудникам ИФП СО РАН, принимавшим участие в получении представленных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферов Ж. И., Асеев А. Л., Гапонов С. В. и др. Наноматериалы и нанотехнологии // Микросистемная техника. 2003. Вып. 8. С. 3.
2. Varavin V. S., Vasiliev V. V., Dvoretzky S. A. et al. HgCdTe epilayers on GaAs: growth and devices // Opto-Electron. Rev. 2003. 11, N 2. P. 99.
3. Овсянко В. Н., Торопов А. И., Шашкин В. В. Матричные ИК-фотоприемники на основе многослойных гетероструктур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs // Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона /Под ред. С. П. Синицы. Новосибирск: Наука, 2001.
4. Гайслер В. А., Торопов А. И., Бакаров А. К и др. Генерационные характеристики лазеров с вертикальным резонатором на основе $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ квантовых ям // Письма в ЖТФ. 1999. 25, вып. 19. С. 40.
5. Ткаченко В. А., Квон З. Д., Щеглов Д. В. и др. Амплитуда осцилляций Ааронова – Бома в малых баллистических интерферометрах // Письма в ЖЭТФ. 2004. 93, вып. 3. С. 168.
6. Ткаченко В. А., Быков А. А., Бакшеев Д. Г. и др. Одноэлектронная зарядка треугольных квантовых точек кольцевого интерферометра // ЖЭТФ. 2003. 124, вып. 2. С. 351.
7. Yakimov A. I., Markov V. A., Dvurechenskii A. V., Pchelyakov O. P. Coulomb staircase in a Si/Ge structure // Phil. Mag. B. 1992. 65, N 4. P. 701.
8. Yakimov A. I., Dvurechenskii A. V., Proskuryakov Yu. Yu. et al. Normal-incidence infrared photoconductivity in Si $p-i-n$ diode with embedded Ge self-assembled quantum dots // Appl. Phys. Lett. 1999. 75, N 10. P. 1413.
9. Teys S. A., Olshanetsky B. Z. Formation of the wetting layer in Ge/Si(111) epitaxy at low growth rates studied with STM // Phys. of Low-Dimensional Struct. 2002. N 1/2. P. 37.
10. Nikiforov A. I., Cherepanov V. A., Pchelyakov O. P. et al. In situ RHEED control of self-organized Ge quantum dots // Thin Solid Films. 2000. 380. P. 158.
11. Yakimov A. I., Dvurechenskii A. V., Kirienko V. V., Nikiforov A. I. Ge/Si quantum-dot metal-oxide-semiconductor field-effect transistor // Appl. Phys. Lett. 2002. 80, N 25. P. 4783.
12. Yakimov A. I., Dvurechenskii A. V., Nikiforov A. I., Proskuryakov Yu. Yu. Interlevel Ge/Si quantum dot infrared photodetector // Journ. Appl. Phys. 2001. 89. P. 5676.
13. Prinz V. Ya. A new concept in fabricating building blocks for nanoelectronic and nanomechanic devices // Microelectron. Eng. 2003. 69. P. 466.
14. Prinz V. Ya., Seleznev V. A., Gutakovsky A. K. et al. Free standing and overgrowth InGaAs/GaAs nanotubes, nanohelices and their arrays // Phys. E. 2000. 6. P. 828.

15. Пат. 2164719 РФ. Способ изготовления структур кремний–на–изоляторе /В. П. Попов, И. В. Антонова, В. Ф. Стась, Л. В. Миронова. Оpubл. 2001, БИ № 9;
Пат. 2217842 РФ. Способ изготовления структуры кремний–на–изоляторе /В. П. Попов, И. Е. Тыщенко. Оpubл. 2003, БИ № 11.
16. Nastaushev Y. V., Gavrilova T. A., Kachanova M. M. et al. 20-nm resolution of electron lithography for the nano-devices on ultrathin SOI film // Mat. Sci. and Eng. C. 2002. 19. P. 189.
17. Наумова О. В., Антонова И. В., Попов В. П. и др. Нанотранзисторы кремний–на–изоляторе: перспективы и проблемы реализации // Физика и техника полупроводников. 2003. 37, вып. 10. С. 1253.
18. Асеев А. Л., Попов В. П., Володин В. П., Марютин В. Н. Перспективы применения структур кремний–на–изоляторе в микро-, нанoeлектронике и микросистемной технике // Микросистемная техника. 2002. Вып. 9. С. 3.

*Институт физики полупроводников СО РАН,
E-mail: aseev@thermo.isp.nsc.ru*

*Поступила в редакцию
12 января 2004 г.*