

НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ДЛЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И ФОТОПРИЁМНИКОВ

УДК 535.247

ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ Ge/Si С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ Ge ДЛЯ ФОТОПРИЁМНИКОВ СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА*

А. И. Якимов

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: yakimov@isp.nsc.ru*

Представлен обзор исследований фотоэлектрических характеристик гетероструктур Ge/SiGe/Si, содержащих слои квантовых точек Ge в матрицах Si и SiGe. В экспериментах варьировались элементный состав плёнок SiGe и его профиль, уровень и профили легирования, положение легированных слоёв Si и SiGe относительно плоскости квантовых точек и число слоёв квантовых точек. На основе проведённых исследований реализованы инфракрасные фотоприёмные элементы, функционирующие при нормальном падении света в окнах прозрачности атмосферы 3–5 и 8–12 мкм. Фотодетекторы характеризуются высокими (до 10^3) фотоэлектрическим усилением, обнаружительной способностью в фотovoltaическом и фотопроводящем режимах (до $0,8 \cdot 10^{11}$ см \cdot Гц $^{1/2}$ /Вт на длине волны около 4 мкм), уровнем чувствительности по току до 1 мА/Вт, работают в режиме ограничения флуктуациями фонового излучения уже при температуре 110 К и способны встраиваться в монолитные матрицы фокальной плоскости на кремниевых подложках.

Ключевые слова: гетероструктуры, квантовые точки, фотодетекторы, кремний, германий.

Введение. При создании детекторов инфракрасного излучения наибольший практический интерес представляют спектральные диапазоны трёх окон прозрачности атмосферы: 1,3–1,55, 3–5 и 8–14 мкм. Успехи в реализации таких эффективных фотоприёмников связаны в основном с объёмными гетероструктурами на основе полупроводников III–V групп и HgCdTe. Помимо высокой стоимости данных элементов явным недостатком является требование их охлаждения до низких температур (<80 К) для уменьшения тепловой генерации носителей заряда. В системах на основе Si были получены удовлетворительные параметры детекторов монолитных матриц болометрических фотоприёмников [1]. Тем не менее широкое применение тепловых приёмников ограничено, поскольку они характеризуются невысокой чувствительностью и большой инерционностью (граничные частоты обычно составляют десятки герц). Фотопроводимость в области длин волн фотонных $\lambda = 8–30$ мкм наблюдалась в кремниевых структурах с заблокированной примесной зоной [2]. Однако и эти примесные детекторы вынуждены охлаждаться в замкнутых циклах трёхкаскадных холодильников до 10–20 К.

В последнее время наметился особый интерес к фотонным детекторам, содержащим в качестве активного элемента слои квантовых точек (КТ) [3]. Снятие запрета на оптические переходы, поляризованные в плоскости роста структур с КТ, обеспечило возможность поглощения электромагнитного излучения при нормальном падении света как дырками, так и электронами в отличие от структур с квантовыми ямами [4]. Массив КТ характеризуется большим временем жизни неравновесных носителей заряда по сравнению с систе-

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 11-02-12007-офи-м-2011 и № 13-02-12003-офи-м).

мами более высокой размерности вследствие снижения рассеяния на фононах. В ансамблях КТ уменьшаются скорость термической генерации носителей заряда (темновой ток) из-за дискретности энергетического спектра, растёт величина силы осциллятора для внутризонных и экситонных переходов по сравнению с системами большей размерности в результате локализации волновой функции во всех трёх направлениях. Повышенный интерес вызывают кремниевые фотодетекторы с квантовыми точками Ge [5]. Главное преимущество таких структур состоит в том, что они могут быть изготовлены на подложках Si, а значит, существует возможность производства матриц очень большого размера как результата монокристаллической интеграции с кремниевыми полевыми транзисторами и быстродействующей электроникой обработки сигналов. Другим важным достоинством фотодетекторов на основе Ge/Si с КТ Ge по сравнению с материалами A_2B_6 и A_3B_5 гибридных матриц является согласованность коэффициента теплового расширения с кремниевой схемой считывания.

Представлен обзор работ, выполненных в том числе и автором в областях разработки технологии и экспериментальных исследований наногетероструктур Ge/Si с КТ Ge, ориентированных на создание фотоприёмных устройств для среднего ИК-диапазона:

1) фотовольтаических детекторов ИК-излучения на основе гетероструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge в матрице Si;

2) фотодетекторов Ge/SiGe с квантовыми точками Ge, сформированными в матрице релаксированного твёрдого раствора $Si_{1-y}Ge_y$ на виртуальных подложках $Si_{1-x}Ge_x$.

Конструкция фотодетекторов. Во всех исследуемых образцах механизм фотоответа связан с внутризонными переходами дырок из связанных в квантовых точках состояний в состояния континуума валентной зоны объёмной полупроводниковой матрицы. Формирование гетероструктур Ge/Si и Ge/SiGe/Si осуществлялось с помощью высоковакуумной молекулярно-лучевой эпитаксии. Для синтеза массивов нанокластеров Ge использовалось явление самоорганизации полупроводниковых наноструктур в процессе гетероэпитаксиального роста материалов с большим несоответствием параметров решётки (механизм роста Странского — Крастанова). Осаждение слоёв Ge проводилось при температуре 500 °С. Фотодетекторы представляли собой вертикальные p^+-p-p^+ -диоды со встроенными в p -область слоями КТ Ge, разделёнными промежутками Si либо SiGe и заключёнными между двумя сильно легированными контактными слоями p -типа. Во всех случаях использовалось так называемое удалённое легирование путём введения дельта-легированного бором слоя Si или SiGe на некотором расстоянии от слоя КТ Ge. На рис. 1 схематически показана типичная гетероструктура на основе слоёв Ge/Si, поясняющая конструкцию вертикально-

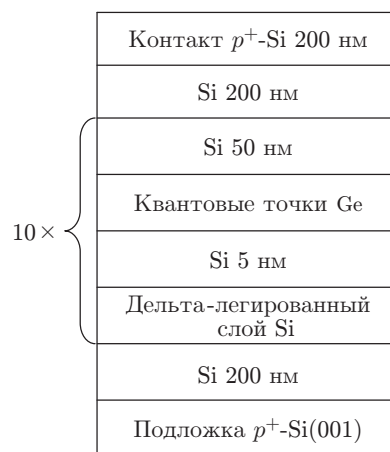


Рис. 1. Схематическое изображение гетероструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge, выращиваемых с помощью метода молекулярно-лучевой эпитаксии

го фотодетектора. Плотность нанокластеров составляет $(2-4) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, латеральные размеры 15–20 нм, высота на порядок меньше. По данным комбинационного рассеяния света содержание Ge в нанокластерах близко к 100 %.

Эксперимент. На начальном этапе работы основные усилия были сосредоточены на управлении спектральной полосой чувствительности детекторов с помощью контроля элементного состава нанокластеров Ge и изучения влияния уровня и профиля легирования на параметры фотодетекторов.

Измерение спектров фототока проводилось инфракрасным фурье-спектрометром "VERTEX 70" фирмы "Bruker", шумы детекторов как функция приложенного напряжения исследовались фурье-анализатором SR 770 в комбинации с усилителем тока SR 570. Для определения абсолютной величины ампер-ваттной чувствительности использовался отклик на излучение абсолютно чёрного тела с температурой 600 К.

На рис. 2 приведены результаты исследования структур, в которых десять слоёв КТ Ge формировались при температуре 500 °С и заращивались кремнием при различных температурах [6]. Дельта-легированный слой Si располагался на 5 нм ниже каждого из слоёв Ge. Уровень легирования был таков, что в среднем каждая квантовая точка содержала две дырки. Обнаружено, что с увеличением температуры покрытия T_{cap} от 300 до 750 °С положение максимума фотоотклика смещается от $\lambda = 2,3$ до 3,9 мкм, что связано с перемещением Ge и Si вблизи гетерограницы и уменьшением глубины потенциальной ямы для связанных дырок в КТ. Установлено, что лучшие параметры фотодетекторов в среднем окне пропускания атмосферы реализуются в структурах с температурой покрытия 600 °С. При этом максимальная обнаружительная способность D^* достигается в фотовольтаическом режиме и составляет величину $6,2 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2}/\text{Вт}$ при температуре измерения 90 К.

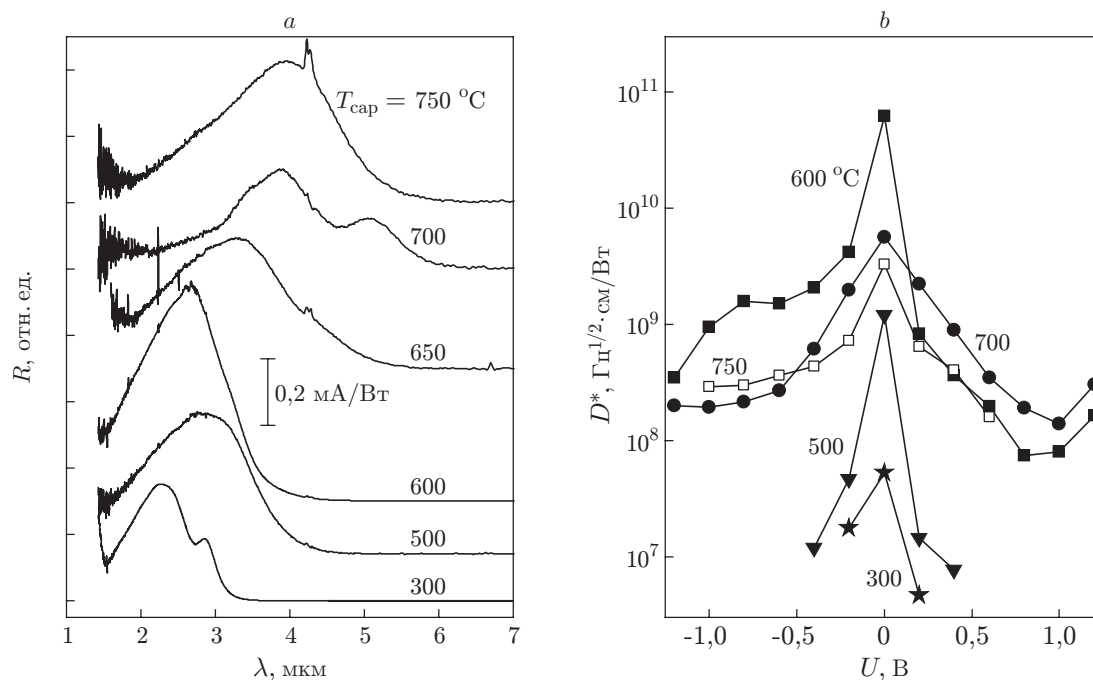


Рис. 2. Фотозлектрические характеристики гетероструктур Ge/Si с различной температурой заращивания слоёв Ge кремнием T_{cap} : *a* — спектры токовой чувствительности R , измеренные при нулевом приложенном напряжении и температуре 90 К; *b* — зависимость обнаружительной способности D^* в максимуме спектральной чувствительности от внешнего напряжения U

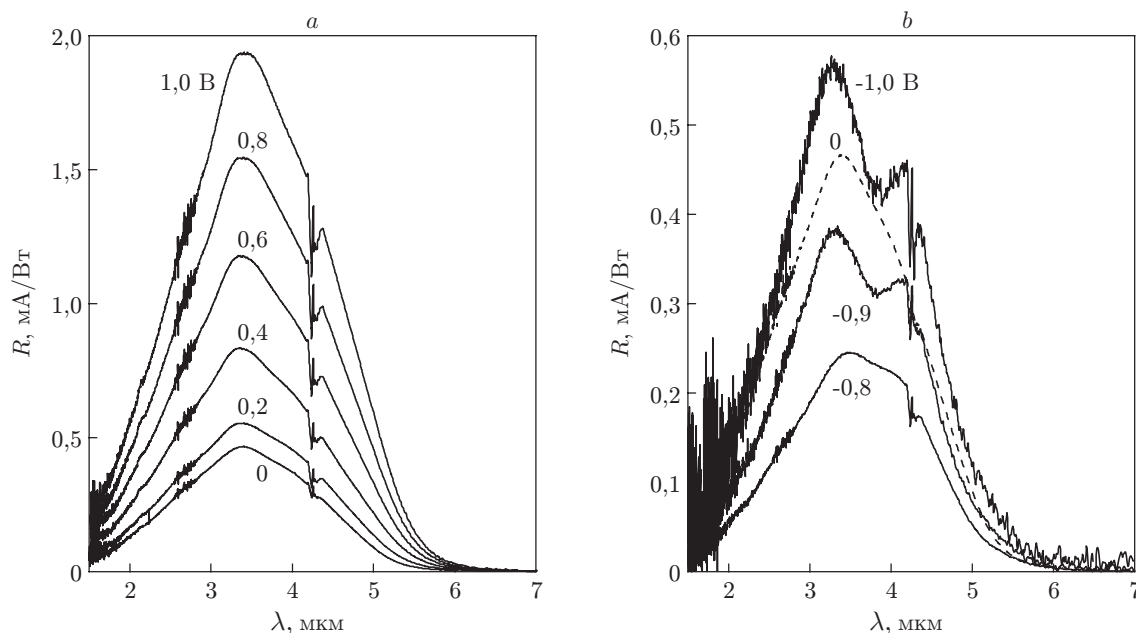


Рис. 3. Спектральные характеристики чувствительности гетероструктуры Ge/Si с десятью слоями квантовых точек Ge при различном напряжении: $U > 0$ (a), $U < 0$ (b). Концентрация легирующей примеси в дельта-слоях $8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, дельта-легирование осуществлялось на расстоянии $d = 5 \text{ нм}$ над каждым из слоёв квантовых точек. Температура измерения 90 К

Для выявления влияния легирования на параметры детекторов изготовлена серия структур, в которых варьировалось положение дельта-легированного слоя относительно плоскости КТ [7, 8]. Дельта-легированный слой мог быть расположен как ниже, так и выше слоя КТ. В последнем случае менялось ещё и расстояние d между дельта-легированным слоем и КТ. Типичный спектральный отклик детектора с верхним положением легированного слоя Si при различных полярностях приложенного напряжения приведён на рис. 3. Фототок наблюдается во всём средневолновом спектральном окне 3–5 мкм и имеет конечную величину при нулевом внешнем смещении.

На рис. 4 представлены пиковая чувствительность R и обнаружительная способность D^* для двух детекторов как функции приложенного напряжения U . В одном из детекторов дельта-легированный слой расположен ниже слоя КТ, во втором — выше. Видно, что при переносе дельта-слоя снизу вверх происходит почти зеркальное отражение относительно нулевого смещения зависимостей основных параметров от U . Это свидетельствует о том, что своим происхождением в фотовольтаическом режиме фототок обязан присутствию дельта-легированного слоя. Были проанализированы причины появления фототока при нулевом смещении детекторов. Установлено, что основными причинами фотовольтаического поведения является наличие пространственной асимметрии структуры и встроенного электрического поля, индуцированного зарядом в расположенном рядом с квантовыми точками дельта-легированном слое кремния. Возникшая при этом асимметрия профиля валентной зоны приводит к появлению преимущественного направления движения неравновесных дырок даже при отсутствии приложенного к образцу смещения, когда шум детектора минимален и ограничен тепловым шумом.

На рис. 5 показано изменение поведения детекторов при удалении дельта-слоя от КТ. Важным оказалось то, что на малых расстояниях d максимальная обнаружительная способность реализуется при конечных U (т. е. в фотопроводящем режиме), на больших d —

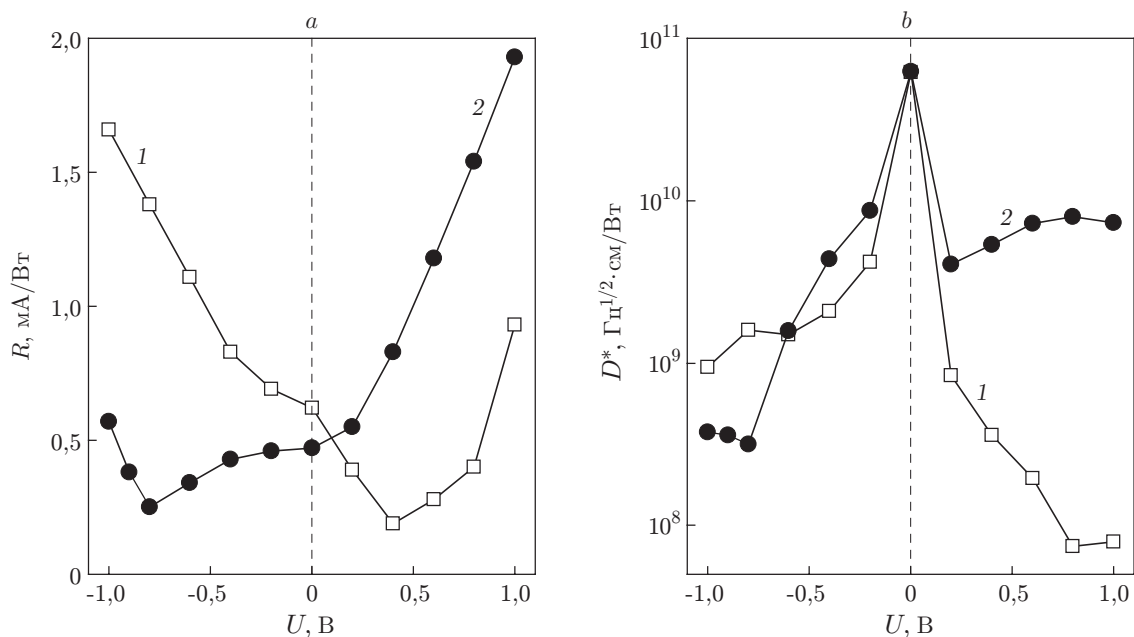


Рис. 4. Зависимости параметров фотодетектора на длине волны $\lambda = 3,5$ мкм от напряжения: *a* — чувствительность R , *b* — обнаружительная способность D^* (кривые 1 — дельта-легированный слой Si расположен под слоем квантовых точек, 2 — над слоем КТ)

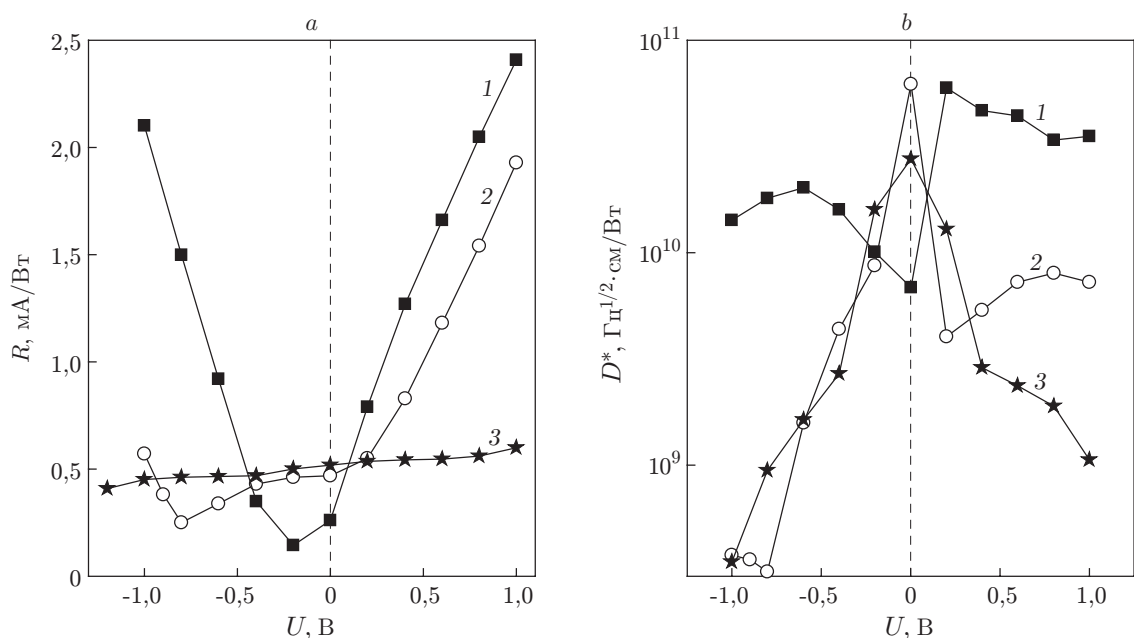


Рис. 5. Зависимости параметров фотодетектора на длине волны $\lambda = 3,5$ мкм от напряжения: *a* — чувствительность R , *b* — обнаружительная способность D^* (кривые 1 — $d = 2$ нм, 2 — 5 нм, 3 — 10 нм)

при $U = 0$ (в фотовольтаическом режиме). Установлено, что лучшие параметры фотодетекторов Ge/Si для среднего окна пропускания атмосферы (3–5 мкм) достигаются в фотовольтаическом режиме в структурах с $T_{\text{cap}} = 600$ °С концентрацией бора в дельта-легированных слоях $1,2 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$ и при расстоянии от квантовых точек до дельта-легированного слоя $d = 5$ нм. При этом для десяти слоёв квантовых точек Ge максимальная величина токовой чувствительности составила 0,83 мА/Вт, обнаружительная способность — $0,8 \cdot 10^{11}$ см \cdot Гц $^{1/2}$ /Вт на длине волны 3,4 мкм при температуре 90 К и угле поля зрения 53° .

Ограничение большинства характеристик ИК-детекторов определяется флуктуациями фонового излучения — так называемым режимом работы детектора BLIP (Background Limited Infrared Performance). В BLIP-режиме шум фундаментален в том смысле, что возникает по причине дискретного характера поля излучения. На рис. 6 приведены темновые вольт-амперные характеристики (ВАХ) для одного из детекторов, когда он окружён холодным экраном, и ВАХ при освещении детектора фоновым излучением с температурой 300 К при угле поля зрения 53° . Видно, что BLIP-режим реализуется уже при температуре 110 К. Следует отметить, что плотность темнового тока J в гетероструктурах Ge/Si p -типа с квантовыми точками Ge на 2–3 порядка меньше, чем в объёмных фотодиодах на основе твёрдых растворов теллурида кадмия и ртути [9, 10]. По-видимому, это связано с меньшим количеством дефектов в слоях самоорганизующихся квантовых точек Ge, когерентно сопряжённых с подложкой Si. Кроме того, темновые токи в слоях Ge/Si на 3–4 порядка меньше, чем в фотоприёмных устройствах на основе КТ InAs [11, 12], вследствие бóльших эффективной массы дырок и энергии фотоионизации КТ Ge/Si. Высокое темновое дифференциальное сопротивление при нулевом напряжении смещения ($r_0 \approx 20$ ГОм на площадке $A = 1 \times 1$ мм при $T = 90$ К) явилось причиной чрезвычайно низкого уровня шумов ($< 10^{-15}$ А/Гц $^{1/2}$). Полученные нами значения $r_0 A \sim 10^8$ Ом \cdot см 2 значительно превосходят результаты, приводимые в литературе для систем HgCdTe [10].

Коэффициент фотоэлектрического усиления G и вероятность обратного захвата фотодырок p определялись нами из измерений темнового тока и шума фотоприёмников. Установлено, что фотоэлектрическое усиление может достигать 1000, а вероятность обратного

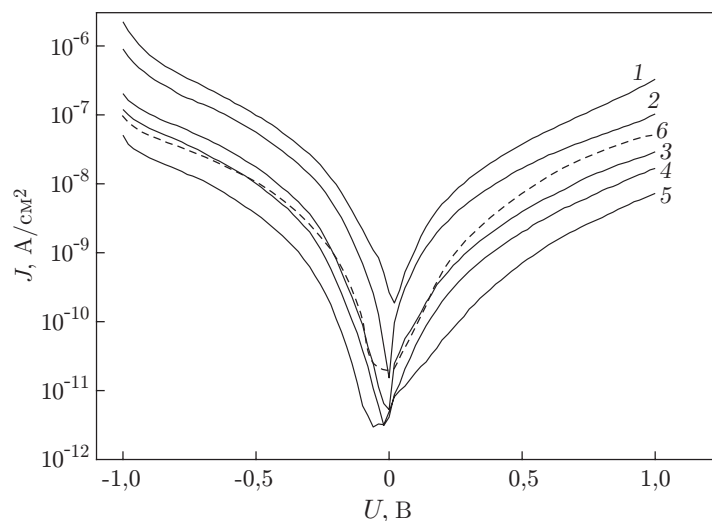


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики фотодетектора с холодным экраном при различных температурах детектора: кривая 1 — 140 К; 2 — 130 К; 3 — 120 К; 4 — 110 К; 5 — 90 К; кривая 6 — ВАХ образца, измеренная при $T = 90$ К для фоновой температуры 300 К

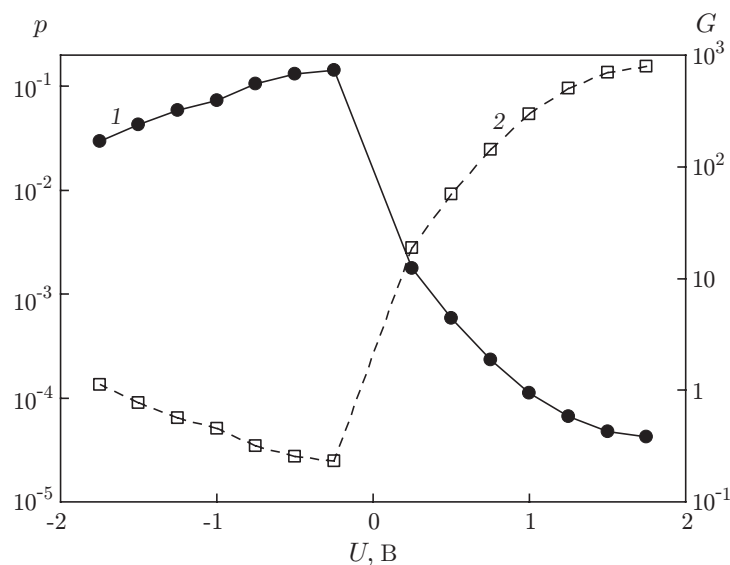


Рис. 7. Вероятность захвата p (кривая 1) и коэффициент фотоэлектрического усиления G (кривая 2) как функции приложенного смещения для фотодетектора Ge/Si с 30 слоями квантовых точек Ge

захвата в квантовые точки — всего лишь 10^{-4} (рис. 7) вследствие подавления рассеяния на оптических фонах и квантования энергетического спектра носителей заряда в КТ. Типичные же величины G для квантовых ям находятся в диапазоне 0,1–10 [13].

Для получения фотоотклика в длинноволновом окне пропускания атмосферы были реализованы детекторы, представляющие собой десять слоёв квантовых точек Ge, встроенных в матрицы релаксированного твёрдого раствора $\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y$ ($y = 0,3-0,4$) [14]. Для уменьшения плотности дислокаций в слоях $\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y$ использовался метод обратно градиентных виртуальных подложек в сочетании с низкотемпературным ростом [15]. Каждый из барьеров SiGe содержал дельта-легированный бором слой для поставки в КТ дырок.

Фотоприёмники Ge/Si $_{1-y}$ Ge $_y$ работают в фотовольтаическом режиме при $y < 0,4$ и в фотопроводящем режиме при $y = 0,4$. Спектральная полоса фотоотклика структур с $y = 0,3$ покрывает диапазон длин волн фотонов от 1 до 7 мкм с максимумом чувствительности в области 4,3 мкм. Величина обнаружительной способности в фотовольтаическом режиме составила $2 \cdot 10^{10}$ см \cdot Гц $^{1/2}$ /Вт на длине волны 4,3 мкм и при температуре детектора 90 К. При этом дифференциальное сопротивление несмещённого фотоприёмника имеет величину $> 0,1$ ГОм на площадке 0,07 см 2 , токовая чувствительность равна 0,3 мА/Вт.

Оказалось, что в отличие от структур, сформированных в матрице Si, фотоприёмники на виртуальной подложке с содержанием Ge $y = 0,4$ характеризуются широкой спектральной полосой чувствительности вплоть до 12 мкм и работают в обоих окнах прозрачности атмосферы 3–5 и 8–12 мкм (рис. 8). Отношение чувствительностей в среднем и дальнем атмосферных окнах контролируется приложением напряжения к детектору и может варьироваться в пределах двух порядков. Проведённое моделирование электронной структуры в рамках шестизонного **kp**-метода показало, что наблюдаемый сдвиг полосы чувствительности в сторону низких энергий связан с уменьшением разрыва валентной зоны на границе Ge/SiGe по сравнению с гетеропереходом Ge/Si и частичной релаксацией упругих деформаций в квантовых точках Ge.

Из сравнения экспериментальных спектров фототока и расчётной зонной структуры был сделан вывод о том, что наличие фототока на длинах волн фотонов меньше 2 мкм обусловлено межзонными переходами электронов из точки Γ валентной зоны нанокластеров

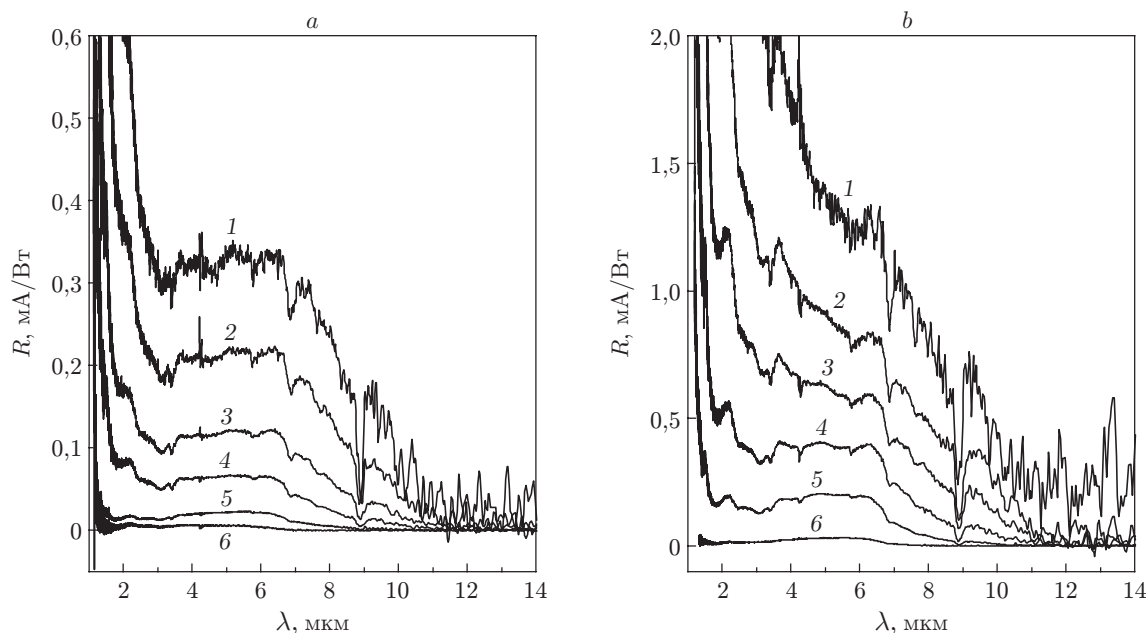


Рис. 8. Зависимости ампер-ваттной чувствительности фотодетектора $\text{Ge}/\text{Si}_{0,6}\text{Ge}_{0,4}/\text{Si}$ с десятью слоями КТ Ge от длины волны излучения: *a* — для положительного напряжения ($U = 2,5$ В (кривая 1), 2,0 В (2), 1,5 В (3), 1,0 В (4), 0,5 В (5), 0,05 В (6)); *b* — для отрицательного напряжения ($U = -3,0$ В (кривая 1), -2,0 В (2), -1,5 В (3), -1,0 В (4), -0,5 В (5), -0,05 В (6))

Ge в Δ -долины зоны проводимости слоёв SiGe. Фотоответ в среднем ИК-диапазоне 3–5 мкм связан с возбуждением дырок из связанных в КТ состояний в сплошной спектр валентной зоны SiGe, а сигнал в спектральной области 8–12 мкм является следствием межуровневых переходов дырок внутри квантовых точек и последующего туннелирования в валентную зону SiGe. Ампер-ваттная чувствительность достигает величины 1 мА/Вт на длине волны 8 мкм при температуре 90 К. Было установлено, что уже при температуре 100 К детектор находится в режиме ограничения флуктуациями фонового излучения, а доминирующим шумом в рабочем режиме является дробовой шум.

Пути дальнейшего развития фотодетекторов с КТ. В настоящее время квантовая эффективность ИК-фотодетекторов Ge/Si с десятью слоями КТ Ge составляет доли процента, что гораздо меньше квантовой эффективности объёмных материалов (например, HgCdTe). В результате чувствительность на два порядка меньше, чем в гетероструктурах на основе растворов теллурида кадмия и ртути. Основная причина — малая плотность состояний, связанных в КТ. Очевидный путь решения этой проблемы — увеличение числа слоёв квантовых точек в образце и их плотности. Другим сдерживающим фактором является то, что обеспечивающие фототок оптические переходы обусловлены переходами дырок из нуль-мерных состояний квантовых точек в трёхмерные состояния континуума SiGe/Si либо в двумерные подзоны квантовых ям SiGe. При этом из-за слабого перекрытия конечного и начального состояний сила осциллятора невелика. Её можно значительно повысить, окружив слой квантовых точек туннельно-прозрачными барьерами $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, где $x < y$ (y — содержание Ge в матрице $\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y$). При правильном выборе соотношения x и y вблизи края валентной зоны появится квазистационарное состояние, переход на которое даст большой коэффициент поглощения, а его дальнейший распад обеспечит повышенный фототок. Дополнительным положительным следствием введения ограничивающих барьеров должны стать уменьшение темнового тока и увеличение обнаружительной способ-

ности детектора. Одним из способов повышения фотовольтаической чувствительности и обнаружительной способности является введение искусственной пространственной асимметрии структуры. Возникшая при этом асимметрия профиля валентной зоны приведёт к появлению преимущественного направления движения неравновесных дырок даже при отсутствии приложенного к образцу смещения, когда шум детектора минимален и ограничен шумом Джонсона. В качестве такой асимметрии можно использовать градированный слой твёрдого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, расположенный над или под слоем квантовых точек, с увеличивающейся по мере удаления от КТ долей германия x . Роста чувствительности в фотовольтаическом режиме можно также добиться путём формирования асимметричных по высоте и/или ширине ограничивающих квантовые точки потенциальных барьеров $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, выбрав, например, разные значения x над и под квантовыми точками.

Таким образом, существует достаточно много возможностей повышения квантовой эффективности фотодетекторов с квантовыми точками.

Продвижению в дальний ИК-диапазон может служить использование напряжённых наногетероструктур с квантовыми точками Ge в матрице Si(001) с электронным типом проводимости. Принцип действия таких приборов основан на внутризонных переходах электронов в трёхмерных потенциальных ямах, сформированных за счёт упругой деформации слоёв Si, окружающих нанокластеры Ge. Деформация растяжения в плоскости структуры приводит к расщеплению шестикратно вырожденной Δ -долины зоны проводимости Si, в результате которого низшими минимумами в деформированном Si вблизи гетерограницы Si/Ge оказываются две из шести Δ -долин, расположенные вдоль оси роста [001] в зоне Бриллюэна. Для одного изолированного слоя островков Ge такие потенциальные ямы являются мелкими, а энергия связи составляет несколько миллиэлектронвольт, что даёт возможность детектирования сигналов в терагерцовой области. В многослойных структурах Ge/Si с вертикально совмещённым расположением квантовых точек Ge дальнедействующие поля механических напряжений в окрестности нанокластеров Ge будут накапливаться, и глубина потенциальной ямы для электронов в зоне проводимости Si увеличится [16]. Как следствие размерного ограничения в кремнии появляются локализованные электронные состояния с энергией связи, обеспечивающей поглощение света и возникновение фотопроводимости в диапазоне длин волн фотонов 8–20 мкм.

Заключение. Основу новизны полученных результатов составляют первые успешные разработки опытных фотодетекторов среднего ИК-диапазона на базе многослойных гетероструктур Ge/Si и Ge/SiGe/Si с квантовыми точками Ge. Нам удалось достаточно полно реализовать многие преимущества квантовых точек по сравнению с системами большей размерности. Снятие запрета на оптические переходы, поляризованные в плоскости роста структур с КТ, обеспечило возможность поглощения электромагнитного излучения при нормальном падении света в отличие от структур с квантовыми ямами. Большое время жизни неравновесных носителей заряда в квантовых точках, обусловленное снижением рассеяния на фононах, привело к реализации высокого (до 1000) коэффициента фотоэлектрического усиления. Подавленная скорость термической генерации носителей заряда вследствие дискретности энергетического спектра в КТ явилась причиной достижения малых темновых токов в фотодетекторах Ge/Si.

Необходимо отметить, что гетероструктуры с квантовыми точками вряд ли превзойдут объёмные материалы по величине квантовой эффективности и фототока. Однако их несомненным достоинством являются малые темновые токи, обеспечивающие низкий уровень шумов. Так, для систем с КТ InGaAs/InGaP [17] и InAs/InGaAs [3] уже реализованы матрицы фокальной плоскости с разностью температур, эквивалентной шуму, менее 100 мК для решения тепловизионных задач. В предлагаемой работе продемонстрированы значения фотовольтаической обнаружительной способности до 10^{11} см \cdot Гц $^{1/2}$ /Вт на длине волны 4 мкм для квантовых точек в системе Ge/Si, позволяющие надеяться на воз-

возможность использования таких элементов в монокристаллических матрицах фокальной плоскости с низким потреблением энергии.

Достоинством фотодетекторов на основе Ge/Si с КТ Ge является возможность применения устоявшейся кремниевой технологии для формирования на пластинах Si чувствительных в среднем ИК-диапазоне устройств с низким содержанием дефектов и высокой пространственной однородностью фотоэлектрических характеристик. Кроме того, для таких систем коэффициент теплового расширения может быть легко согласован с кремниевой схемой считывания, так что размер матриц не ограничен возникающими при охлаждении механическими напряжениями всей конструкции.

Автор выражает благодарность чл.-корр. РАН А. В. Двуреченскому, канд. физ.-мат. наук В. В. Кириенко, канд. физ.-мат. наук А. И. Никифорову, канд. физ.-мат. наук А. А. Блошкину, В. А. Тимофееву, В. А. Армбристеру за активное сотрудничество при выполнении работ, по результатам которых написан данный обзор, а также канд. физ.-мат. наук В. А. Володину за измерение спектров комбинационного рассеяния света.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рогальский А.** Инфракрасные фотодетекторы: Пер. с англ. Новосибирск: Наука, 2003. 636 с.
2. **Huffman J. E., Crouse A. G., Halleck B. L. et al.** Si:Sb blocked impurity band detectors for infrared astronomy // *Journ. Appl. Phys.* 1992. **72**, N 1. P. 273–275.
3. **Krishna S., Forman D., Annamalai S. et al.** Demonstration of a 320×256 two-color focal plane array using InAs/InGaAs quantum dots in well detectors // *Appl. Phys. Lett.* 2005. **86**, N 19. 193501.
4. **Phillips J.** Evaluation of the fundamental properties of quantum dot infrared detectors // *Journ. Appl. Phys.* 2002. **91**, N 7. P. 4590–4594.
5. **Yakimov A. I., Dvurechenskii A. V.** Germanium self-assembled quantum dots for mid-infrared photodetectors // *Intersubband Infrared Photodetectors* /Ed. V. Ryzhii. Singapore: World Scientific, 2003. P. 281–298.
6. **Yakimov A. I., Bloshkin A. A., Timofeev V. et al.** Effect of overgrowth temperature on the mid-infrared response of Ge/Si(001) quantum dots // *Appl. Phys. Lett.* 2012. **100**, N 5. 053507.
7. **Yakimov A. I., Timofeev V. A., Bloshkin A. A. et al.** Influence of delta-doping on the performance of Ge/Si quantum-dot mid-infrared photodetectors // *Journ. Appl. Phys.* 2012. **112**, N 3. 034511.
8. **Yakimov A., Timofeev V., Bloshkin A. et al.** Photovoltaic Ge/Si quantum dot detectors operating in the mid-wave atmospheric window (3 to 5 μm) // *Nanoscale Res. Lett.* 2012. **7**, N 1. P. 494–499.
9. **Овсюк В. Н., Сидоров Ю. Г., Васильев В. В., Шашкин В. В.** Матричные фотоприемники 128×128 на основе слоев HgCdTe и многослойных гетероструктур с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs // *Физика и техника полупроводников.* 2001. **35**, № 9. С. 1159–1166.
10. **Якушев М. В., Брунев Д. В., Варавин В. С. и др.** Гетероструктуры HgCdTe на подложках Si(310) для инфракрасных фотоприемников средневолнового спектрального диапазона // *Физика и техника полупроводников.* 2011. **35**, № 3. С. 396–402.
11. **Ye Z., Campbell J. C., Chen Z. et al.** Voltage-controllable multiwavelength InAs quantum-dot infrared photodetectors for mid- and far-infrared detection // *Journ. Appl. Phys.* 2002. **92**, N 1. P. 4141–4143.
12. **Chakrabarti S., Adhikary S., Halder N. et al.** High-performance, long-wave ($\sim 10.2 \mu\text{m}$) InGaAs/GaAs quantum dot infrared photodetector with quaternary InAlGaAs capping // *Appl. Phys. Lett.* 2011. **99**, N 18. 181102.

-
13. **Levine B. F.** Quantum-well infrared photodetectors // Journ. Appl. Phys. 1993. **74**, N 8. P. 1–81.
 14. **Yakimov A., Kirienco V., Armbrister V., Dvurechenskii A.** Broadband Ge/SiGe quantum dot photodetector on pseudosubstrate // Nanoscale Res. Lett. 2013. **8**, N 1. P. 217–222.
 15. **Capellini G., De Seta M., Busby Y. et al.** Strain relaxation in high Ge content SiGe layers deposited on Si // Journ. Appl. Phys. 2010. **107**, N 6. 063504.
 16. **Yakimov A. I., Nikiforov A. I., Dvurechenskii A. V.** Localization of electrons in multiple layers of self-assembled GeSi/Si islands // Appl. Phys. Lett. 2006. **89**, N 16. 163126.
 17. **Jiang J., Mi K., Tsao S. et al.** Demonstration of a 256×256 middle-wavelength infrared focal plane array based on InGaAs/InGaP quantum dot infrared photodetectors // Appl. Phys. Lett. 2004. **84**, N 13. P. 2232–2234.

Поступила в редакцию 24 июня 2013 г.
