

Волноводные Ge/Si-фотодиоды со встроенными слоями квантовых точек Ge для волоконно-оптических линий связи

© А.И. Якимов[†], А.В. Двуреченский, В.В. Кириенко, Н.П. Степина, А.И. Никифоров, В.В. Ульянов, С.В. Чайковский, В.А. Володин, М.Д. Ефремов, М.С. Сексенбаев, Т.С. Шамирзаев, К.С. Журавлев

Институт физики полупроводников Сибирского отделения Российской академии наук, 630090 Новосибирск, Россия

(Получена 3 февраля 2004 г. Принята к печати 11 февраля 2004 г.)

Сообщаются результаты исследований, направленных на создание высокоэффективных фотоприемников на основе гетероструктур Ge/Si для применения в волоконно-оптических линиях связи. Фотоприемники выполнены в виде вертикальных $p-i-n$ -диодов на подложках кремний-на-изоляторе в сочетании с волноводной латеральной геометрией и содержат слои квантовых точек Ge. Слоевая плотность квантовых точек составляет $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, размеры точек в плоскости роста $\sim 8 \text{ нм}$. Достигнута наибольшая из известных в литературе для Ge/Si-фотодиодов с квантовыми точками величина квантовой эффективности в диапазоне телекоммуникационных длин волн, которая при засветке со стороны торца волноводов составила 21% на длине волны 1.3 мкм и 16% на длине волны 1.55 мкм.

1. Введение

Одним из важнейших направлений развития перспективных способов передачи информации в телевизионных и телефонных сетях, Интернете, оптических компьютерах является разработка волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). ВОЛС содержат передающее устройство, приемное устройство, коммутационные элементы и волоконные световоды. В передающем устройстве электрические сигналы через электронную схему управления поступают на полупроводниковый излучатель (лазер или светодиод) и преобразуются в нем в оптические сигналы, которые в виде оптического излучения вводятся через устройства согласования в волоконный световод и распространяются по нему до необходимого адресата. Фотоприемное устройство (ФП) осуществляет детектирование излучения, преобразование оптических сигналов в электрические и их последующее усиление.

Материалом для световодов в ВОЛС преимущественно служит кварц. Типичный спектр поглощения высококочистого кварца характеризуется наличием трех окон прозрачности вблизи длин волн 0.85, 1.3 и 1.55 мкм. В этом же диапазоне находится и ближнее окно пропускания атмосферы. В настоящее время принято, что актуальным для применения в ВОЛС диапазоном длин волн излучения является ближняя инфракрасная (ИК) область 1.3–1.55 мкм.

Широкое распространение ВОЛС затрудняется высокой стоимостью оптических приемопередатчиков, функционирующих в ближней ИК области спектра. Ожидается, что переход на совместимую с кремнием технологию для изготовления фотонных элементов ВОЛС будет сопровождаться значительным снижением стоимости таких элементов, что приведет к монолитной интеграции всех компонентов, включающих элементы радиоусилительной и смещающей электроники, на простой, надежной и легко воспроизводимой оптоэлектронной

интегральной схеме [1]. Однако сам кремний прозрачен для фотонов с длиной волны больше 1.1 мкм. Достаточно высокой чувствительностью в области длины волны $\lambda \approx 1.5 \text{ мкм}$ обладают германиевые ФП. В связи с этим возникает проблема создания гетероструктур Ge/Si, фоточувствительных при комнатной температуре в диапазоне телекоммуникационных длин волн 1.3–1.55 мкм.

С точки зрения перспективы встраивания гетеропереходов Ge/Si в кремниевую идеологию СБИС, по-видимому, наиболее интересными являются гетероструктуры Ge/Si с когерентно введенными нанокластерами Ge (квантовыми точками), поскольку в них есть возможность зарращивания упругонапряженных германиевых слоев совершенными по структуре слоями Si, на которых затем можно формировать и другие элементы СБИС. Кроме того, именно на основе такой системы уже изготовлены светодиоды, излучающие при комнатной температуре в диапазоне длин волн 1.3–1.55 мкм и обладающие квантовым выходом на уровне 0.015% [2].

Первоначально фотодиоды Ge/Si с квантовыми точками Ge проектировались для нормального падения света, когда засветка осуществлялась со стороны плоскости $p-n$ -перехода [3,4]. Были получены значения квантовой эффективности $\eta = 3-8\%$ для $\lambda = 1.3-1.46 \text{ мкм}$. Увеличение квантовой эффективности может быть достигнуто за счет реализации волноводной структуры фотодетектора, использующей эффект многократного внутреннего отражения света от стенок волновода. Поскольку оптические лучи должны распространяться вдоль плоскости интегральной схемы, на которой собраны все необходимые элементы ВОЛС [1], такая конструкция прибора удачно сочетается с требованием возможности засветки детектора со стороны его торца. О создании волноводных фотодетекторов на основе гетероструктур Ge/Si с когерентно введенными наноостровками Ge сообщалось в работах [5,6]. Максимальная квантовая эффективность на длине волны $\lambda = 1.3 \text{ мкм}$ составила $\eta = 5.3\%$ для конфигурации ФП в виде $p-i-n$ -диола [5] и $\eta = 9.5\%$ для биполярного $n-p-n$ -фототранзистора [6]. Следует отме-

[†] E-mail: yakimov@isp.nsc.ru
Факс: (3832) 332771

туть, что в работах [5,6] слоевая плотность островков Ge составляла величину $1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и менее. Очевидно, что дальнейшего повышения квантовой эффективности фотопреобразования в таких структурах можно достичь, увеличив плотность нанокластеров Ge. Цель нашей работы заключалась в создании волноводного фотодетектора Ge/Si, содержащего массивы квантовых точек Ge со слоевой плотностью на уровне 10^{12} см^{-2} , обладающего высокой чувствительностью в телекоммуникационном диапазоне длин волн.

2. Технологический процесс изготовления фотоприемников

Фотодетекторы представляли собой кремниевые $p-i-n$ -диоды со встроенными в базовую область 36 слоями островков Ge, разделенными промежутками Si толщиной 30 нм. Один и тот же прибор сочетал в себе и вертикальный фотодиод, и латеральный волновод (рис. 1). Для увеличения плотности островки германия формировались с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) в режиме роста Фольмера–Вебера на предварительно окисленной поверхности кремния [7]. Ранее нами было показано, что такая процедура позволяет получать слои нанокластеров Ge, когерентно сопряженных с Si и характеризующихся слоевой плотностью до 10^{12} см^{-2} и размерами менее 10 нм [4,7,8].

В качестве подложек для изготовления фотодетекторов использовались пластины кремний-на-изоляторе (КНИ), приготовленные по технологии SMART CUT (производство Wafer World, Inc.). Толщина отсеченного кремниевого слоя КНИ структуры составляла 280 нм, толщина захороненного окисла — 380 нм. Ориентация поверхности верхнего слоя кремния (100). Перед процессом МЛЭ кремниевый слой утоньшался до 250 нм с помощью термического окисления и последующего удаления окисла в растворе плавиковой кислоты. Дифракционная картина, полученная от поверхности кремниевого слоя, свидетельствовала о высоком кристаллическом совершенстве рабочего слоя пластин КНИ и его пригодности для проведения эпитаксиального роста. В ближнем ИК диапазоне разность показателей

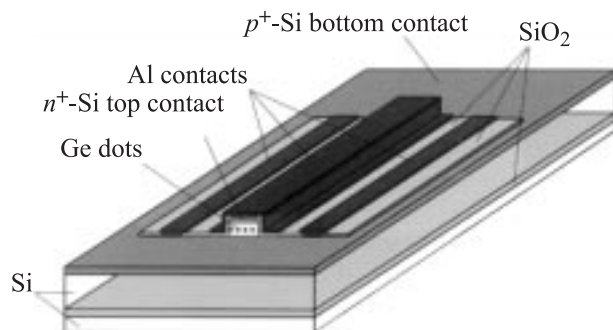


Рис. 1. Схематическое изображение фотодетектора, сформированного на подложке кремний-на-изоляторе.

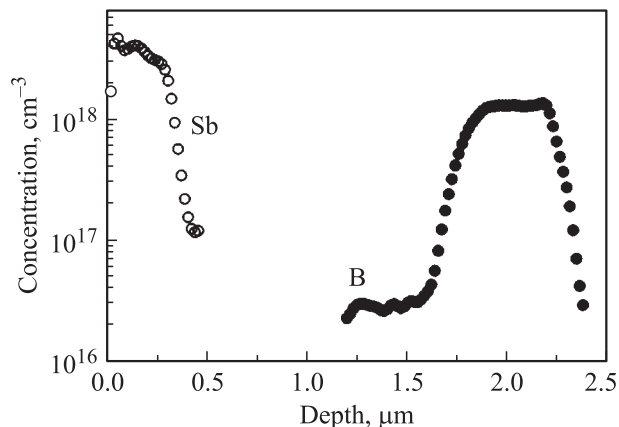


Рис. 2. Распределение примесей бора и сурьмы по толщине эпитаксиального слоя, начиная от поверхности, полученное с помощью вторичной ионной масс-спектрометрии.

преломления Si и SiO_2 достаточно велика и составляет 2. Это обстоятельство и позволяет добиться эффективной пространственной фокусировки луча света, распространяющегося по волноводу вдоль плоскости подложки.

Температура роста слоев как Si, так и Ge составляла 500°C . Скорость роста поддерживалась на уровне 0.3 нм/с для Si и 0.03 нм/с для Ge. Вначале после стандартной процедуры очистки поверхности КНИ выращивался слой p^+ -Si толщиной 500 нм, легированный бором до концентрации $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, затем осаждался буферный слой намеренно не легированного Si толщиной 100 нм. После этого в камеру роста подавался кислород, и при давлении кислорода 10^{-4} Па проводилась процедура окисления поверхности Si в течение 10 мин при температуре подложки 500°C . При этом формировался слой SiO_x толщиной несколько ангстрем. Затем осуществлялись откачка кислорода до давления в камере 10^{-7} Па , осаждение Ge с толщиной покрытия 0.5 нм и зарращивание германия слоем кремния толщиной 30 нм. Перед зарращиванием германия кремнием проводилось кратковременное (на 2 мин) повышение температуры образца до 600°C . Такой отжиг необходим для дальнейшего роста бездефектных слоев Si. Последние четыре процедуры (окисление, осаждение 0.5 нм Ge, 2-минутный отжиг при 600°C и нанесение 20 нм Si) повторялись последовательно 36 раз. Многослойная структура Ge/Si закрывалась Si толщиной 100 нм. Концентрация фоновой примеси бора в слоях намеренно не легированного Si составляла $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Формирование $p-i-n$ -диода завершалось ростом 300 нм n^+ -Si (концентрация Sb в слое $4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$). Профили распределения бора и сурьмы в структуре, полученные с помощью вторичной ионной масс-спектрометрии, приведены на рис. 2.

Поверхность выращенных слоев Ge контролировалась с помощью сканирующей туннельной микроскопии. Статистическая обработка профилей поверхности дала среднее значение размеров островков Ge в плоскости роста $\sim 8 \text{ нм}$ и плотность островков $\sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

Для проведения измерений комбинационного рассеяния света (КР) и фотолюминесценции (ФЛ) выращивались контрольные образцы на кремниевых подложках — спутниках. Последовательность всех слоев была такой же, как и для образцов на подложках КНИ, за исключением верхнего слоя n^+ -Si, который отсутствовал в контрольных структурах. Кроме того, число слоев Ge в контрольных образцах составляло не 36, а 10.

Дальнейшее изготовление фотоприемника происходило на кремниевой линейке с использованием специально разработанного комплекта фотошаблонов. Ширина волноводов составляла 50 мкм, длина варьировалась от 100 мкм до 5 мм. Формирование вертикальных стенок фотодиодов осуществлялось с помощью стандартной фотолитографии и плазмохимического травления на глубину 1.6 мкм. В качестве отражающих покрытий со стороны подложки служил захороненный слой SiO_2 , а со стороны стенок волновода пленка алюминия толщиной 70 нм, выполняющая одновременно функцию электрического контакта к верхнему слою n^+ -Si. Торцы волновода, через который осуществлялась засветка, так же как и все остальные стенки, был покрыт пленкой пиролитического SiO_2 толщиной 225 нм, выполняющей функцию просветляющего покрытия на длине волны 1.3 мкм.

3. Комбинационное рассеяние света

Структура нанокластеров Ge анализировалась из данных спектроскопии комбинационного рассеяния света. Спектры регистрировались при комнатной температуре на автоматизированной установке на базе спектрометра ДФС-52 (ЛОМО, Санкт-Петербург) при возбуждении КР излучением Ar-лазера ($\lambda = 514.5$ нм). Использовалась геометрия квазиобратного рассеяния. Применялась поляризационная геометрия рассеяния XY: вектор поляризации падающего излучения был направлен вдоль кристаллографического направления структур [001] (ось X), рассеянный свет регистрировался в поляризации [010] (ось Y). Выбор такой геометрии обусловлен тем, что она является разрешенной для рассеяния на LO-фононах в германии и кремнии и запрещенной для двухфононного рассеяния на TA-фононах от подложки кремния. Это позволило избавиться от сложностей в интерпретации спектров КР, рассмотренных в работе [9].

На рис. 3 приведены спектры КР образца с островками Ge и кремниевой подложки в геометрии XY, а также спектр кремниевой подложки без анализа поляризации рассеянного света. В последнем спектре видны пики, соответствующие двухфононному КР на TA-фононах кремния, схожие с наблюдавшимися в работе [9]. Видно, что в поляризационной геометрии XY эти пики имеют другую форму и ослаблены по интенсивности более чем на порядок (для удобства восприятия и для сравнения спектр в геометрии XY от Si-подложки умножен на 10). В спектре образца с нанокластерами Ge видны пики, соответствующие КР света на оптических колебаниях связей Ge–Ge и Ge–Si, а также на оптических

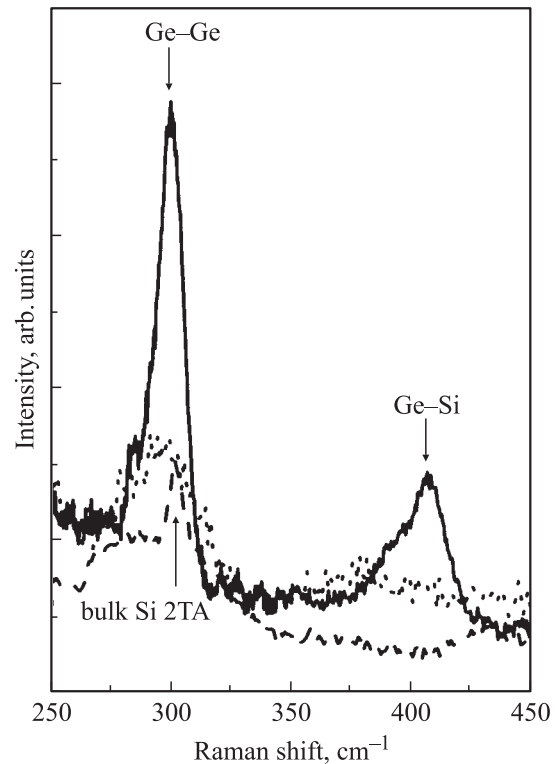


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния света в образце с нанокластерами Ge (сплошная линия) и в подложке Si (пунктирная линия, интенсивность умножена на 10) в геометрии рассеяния XY. Штриховая линия — спектр от кремниевой подложки без анализа поляризации рассеянного света.

колебаниях связей Si–Si (от подложки). Из анализа положения и интенсивностей пиков КР были оценены стехиометрический состав и механические напряжения в островках Ge.

Отношение интегральных интенсивностей рассеяния на связях Ge–Ge и Ge–Si составляет

$$\frac{I_{\text{GeGe}}}{I_{\text{SiGe}}} \approx B \frac{x}{2(1-x)}, \quad (1)$$

где $B = 3.2$ [10]. На основе этих данных было установлено, что относительное содержание германия x в островках составляет примерно 0.65–0.70.

Анализ положения пиков КР можно провести на основе подхода, изложенного в работах [11,12]. Так как частота оптических фононов в центре зоны Бриллюэна для объемного германия равна 302 см^{-1} , частоты колебаний связей Si–Si, Ge–Si, Ge–Ge можно аппроксимировать как

$$\begin{aligned} \omega_{\text{SiSi}} &= 520.5 - 62x - 8.15\varepsilon, \\ \omega_{\text{GeSi}} &= 400.5 + 14.2x - 5.75\varepsilon, \\ \omega_{\text{GeGe}} &= 302 - 18(1-x) - 3.85\varepsilon, \end{aligned} \quad (2)$$

где x — содержание Ge в островках, ε — относительное рассогласование постоянных решетки. В работе [12]

приводятся зависимости этих частот (в см^{-1}) от состава (для x , не превышающих 0.4) и от относительного рассогласования постоянных решетки в плоскости роста (100) ϵ (в процентах). Смещение берется для германия, и при напряжениях сжатия оно имеет отрицательный знак. Написав выражения (2), мы экстраполировали эти зависимости в область нанокластеров с содержанием Ge x , близким к единице.

Положение максимума сигнала от связей Ge–Ge составляет 300 см^{-1} (рис. 3). С учетом того, что из-за квантово-размерного эффекта положение пика для островков высотой 1.4 нм смещается на 4 см^{-1} в сторону меньших частот, в ненапряженных нанокластерах состава $\text{Ge}_{0.7}\text{Si}_{0.3}$ положение данного пика составило бы 292.5 см^{-1} . Таким образом, общее смещение за счет механических напряжений равно 7.5 см^{-1} . Максимальная относительная величина разности постоянных решетки в полностью напряженных, нерелаксированных островках $\text{Ge}_{0.7}\text{Si}_{0.3}$ и Si-матрицы составляет 2.9%. Таким образом, максимальное смещение пика КР за счет механических напряжений в нерелаксированных островках имело бы величину 11 см^{-1} . Это означает, что в данном случае релаксация механических напряжений в германиевых нанокластерах составляет $\sim 30\%$.

4. Фотолюминесценция

Спектры стационарной фотолюминесценции измерялись на установке, собранной на основе двойного монохроматора СДЛ-1 с решетками 300 штр/мм (фокусное расстояние 600 мм). Фотолюминесценция возбуждалась излучением аргонового лазера ($\lambda = 488\text{ нм}$) с плотностью мощности возбуждения 25 Вт/см^2 . Излучение регистрировалось с помощью охлаждаемого жидким азотом германиевого $p-i-n$ -фотодиода фирмы „Edinburgh Instruments“. На рис. 4 представлен спектр ФЛ, измеренный при температуре 4.2 К. В спектре наблюдаются группа линий рекомбинации экситонов в кремнии с энергиями в диапазоне 1.05–1.1 эВ и широкая полоса в области 0.8 эВ ($\lambda = 1.55\text{ мкм}$), обусловленная непрямой

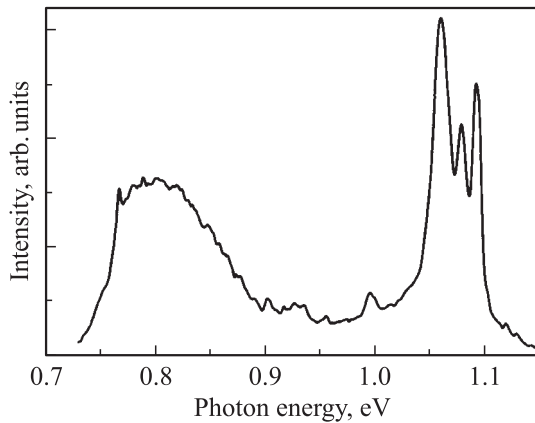


Рис. 4. Спектр фотолюминесценции. Температура измерения $T = 4.2\text{ К}$.

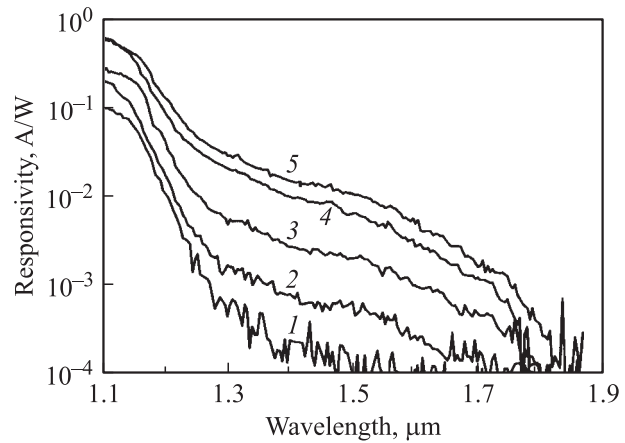


Рис. 5. Спектральные зависимости чувствительности фотодетекторов с различной длиной волновода L в режиме тока короткого замыкания: $L = 0.2$ (1), 0.5 (2), 1 (3), 2 (4), 3 мм (5). Температура измерения комнатная.

в реальном пространстве оптической рекомбинацией между дырками, локализованными в островках Ge, и электронами, находящимися в Si на гетерогранице II типа. Низкоэнергетичный край сигнала ФЛ от островков определяется границей спектральной характеристики Ge-детектора. Наличие эффективной ФЛ в интересующем диапазоне длин волн позволяло надеяться на получение высокой квантовой эффективности фотообразования в волноводном фотодетекторе.

5. Фотоэлектрические характеристики фотодетектора

Типичные спектральные зависимости ампер-ваттной чувствительности фотодетектора в режиме тока короткого замыкания (смещение $U = 0$) в условиях засветки торца волноводов показаны на рис. 5. Различные кривые соответствуют различным длинам волновода L . Температура образца комнатная. Измерения фотоотклика осуществлялись с помощью инфракрасного спектрометра ИКС-31 и фазочувствительного нановольтметра на частоте модуляции излучения 560 Гц. Спектральные характеристики освещенности были получены с помощью охлаждаемого CdHgTe-фоторезистора. Для исключения проникновения света в исследуемый ФП через подложку, которое может привести к ошибке в расчете величины освещенности из-за увеличения реальной площади засветки, луч света направлялся на детектор сверху под углом $\sim 5^\circ$ по отношению к нормали, направленной к торцу детектора. В качестве площади фоточувствительного элемента бралась величина $50 \times 400\text{ мкм}^2$, где 50 мкм — ширина волновода, 400 мкм — полная толщина структуры включая подложку. Такая процедура не учитывает оптическое связывание света в волноводе и при расчете чувствительности и квантовой эффективности дает оценку снизу.

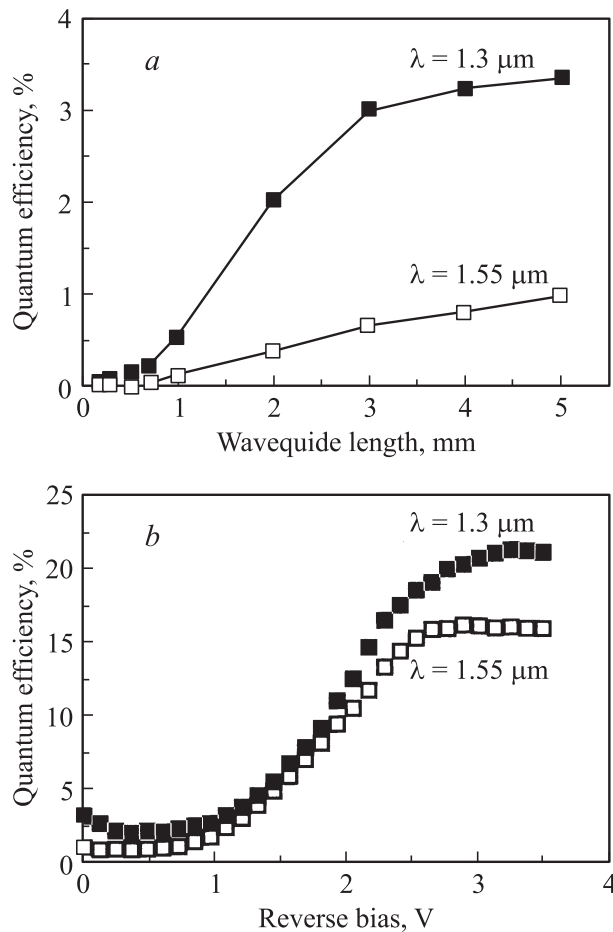


Рис. 6. Зависимость квантовой эффективности на длинах волн 1.3 и 1.55 мкм от длины волновода в режиме тока короткого замыкания (а) и от величины обратного смещения при длине волновода $L = 4$ мм (б).

На рис. 6 приведена зависимость квантовой эффективности η на длинах волн $\lambda = 1.3$ и 1.55 мкм от длины волновода и величины обратного смещения. Величина η рассчитывалась на основе соотношения между чувствительностью R , энергией фотона $h\nu$ и зарядом электрона e : $R = (e h\nu)\eta$. Оказалось, что максимальная квантовая эффективность реализуется в структурах с длиной волновода $L > 3$ мм (рис. 6, а) при величине обратного смещения $U > 3$ В (рис. 6, б) и достигает значений 21 и 16% на длинах волн 1.3 и 1.55 мкм соответственно. Насыщение величины η в длинных волноводах, по-видимому, означает, что в этом случае происходит поглощение всего света, проникающего через торец ФП и проходящего вдоль германиевых слоев. Насыщение фотоотклика с ростом обратного смещения наблюдалось нами ранее и в традиционной геометрии $p-i-n$ -фотодиодов на основе Ge/Si, освещаемых со стороны $p-n$ -переходов [4], и обусловлено стимулированным электрическим полем выбросом фотодырок, локализованных в островках Ge, в валентную зону.

6. Заключение

Основные результаты работы состоят в следующем.

1) Разработан метод создания волноводных кремниевых $p-i-n$ -фотодиодов со встроенными слоями квантовых точек Ge на подложках кремний-на-изоляторе для телекоммуникационных длин волн (1.3–1.55 мкм). Слоевая плотность квантовых точек составляет 10^{12} см^{-2} , размеры точек менее 10 нм.

2) За счет высокой плотности нанокластеров Ge в активной области фотодетектора и эффекта многократного внутреннего отражения достигнута квантовая эффективность 21 и 16% на длинах волн 1.3 и 1.55 мкм соответственно.

Работа выполнена при поддержке грантов Президента РФ по поддержке молодых докторов наук (МД-28.2003.02), INTAS 2001-0615.

Список литературы

- [1] H. Presting. *Thin Sol. Films*, **321**, 186 (1998).
- [2] W.-H. Chang, A.T. Chou, W.Y. Chen, H.S. Chang, T.M. Hsu, Z. Pei, P.S. Chen, S.W. Lee, L.S. Lai, S.C. Lu, M.-J. Tsai. *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 2958 (2003).
- [3] S. Tong, J.L. Wan, K. Wang. *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 1189 (2002).
- [4] А.И. Якимов, А.В. Двуреченский, А.И. Никифоров, С.В. Чайковский, С.А. Тийс. *ФТП*, **37**, 1383 (2003).
- [5] M. Elcurdi, P. Boucaud, S. Sauvage, G. Fishman, O. Kermarrec, Y. Campidelli, D. Bensahel, G. Saint-Girons, G. Patriarche, I. Sagnes. *Physica E*, **16**, 523 (2003).
- [6] A. Elfving, G.V. Hansson, W.-X. Ni. *Physica E*, **16**, 528 (2003).
- [7] А.И. Никифоров, В.В. Ульянов, О.П. Пчеляков, С.А. Тийс, А.К. Гутаковский. *ФГТ*, **46**, 80 (2004).
- [8] A.I. Yakimov, A.V. Dvurechenskii, A.I. Nikiforov, V.V. Ulyanov, A.G. Milekhin, A.O. Govorov, S. Schulze, D.R.T. Zahn. *Phys. Rev. B*, **67**, 125 318 (2003).
- [9] A.V. Kolobov. *J. Appl. Phys.*, **87**, 2926 (2000).
- [10] P.M. Mooney, F. Dacol, J.C. Tsang, J.O. Chu. *Appl. Phys. Lett.*, **62**, 2069 (1993).
- [11] F. Cerdeira, C.J. Buchenauer, F.H. Pollak, M. Cardona. *Phys. Rev. B*, **5**, 580 (1972).
- [12] J. Groenen, R. Carles, S. Christiansen, M. Albrecht, W. Dorsch, H.P. Strunk, H. Wawra, G. Wagner. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 3856 (1997).

Редактор Л.В. Шаронова

Waveguide Ge/Si photodiodes with embedded arrays of Ge quantum dots for optical fibre communications

A.I. Yakimov, A.V. Dvurechenskii, V.V. Kirienko, N.P. Stepina, A.I. Nikiforov, V.V. Ulyanov, S.V. Chaikovskii, V.A. Volodin, M.D. Efremov, M.S. Seksenbaev, T.S. Shamirzaev, K.S. Zhuravlev

Institute of Semiconductor Physics,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
630090 Novosibirsk, Russia