

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

© А.И. Якимов, А.В. Двуреченский, В.В. Кириенко, А.И. Никифоров

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

E-mail: yakimov@isp.nsc.ru

На основе многослойных гетероструктур Ge/Si с квантовыми точками Ge реализованы фотоприемные элементы для волоконно-оптических линий связи (диапазон длин волн 1.3–1.55 μm), способные встраиваться в комплекс фотонных компонентов на едином кремниевом чипе. Слоевая плотность квантовых точек составляет $(0.3-1) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, размеры точек в плоскости роста $\sim 10 \text{ nm}$. Структуры выращивались с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии. Достигнута наименьшая из известных в литературе для Ge/Si-фотоприемников величина темного тока при комнатной температуре ($2 \cdot 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ при обратном смещении 1 V). В фотодиодах и фототранзисторах с засветкой со стороны плоскости *p-n*-переходов квантовая эффективность составила 3% на длине волны 1.3 μm . Показано, что максимальная величина квантовой эффективности реализуется в волноводных структурах с засветкой со стороны торца волноводов и достигает значений 21 и 16% на длинах волн 1.3 и 1.5 μm соответственно.

Работа выполнена при поддержке грантов Президента РФ по поддержке молодых докторов наук (МД-28.2003.02) и INTAS (N 03-51-5051).

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. 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 высокочистого кварца характеризуется наличием трех окон прозрачности вблизи длин волн 0.85, 1.3 и 1.55 μm . 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 ИК-область 1.3–1.55 μm .

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, в простую, надежную и легко воспроизводимую оптоэлектронную интегральную схему [1]. Однако сам кремний прозрачен для фотонов с длиной волны более 1.1 μm . Хорошей чувствительностью в области длин волн $\lambda \sim 1.5 \mu\text{m}$ обладают германиевые ФП. В связи с этим возникает проблема создания гетроструктур Ge/Si, фоточувстви-

тельных при комнатной температуре в диапазоне телекоммуникационных длин волн 1.3–1.55 μm . С точки зрения перспективы встраивания гетеропереходов Ge/Si в кремниевую парадигму СБИС, по-видимому, наиболее интересными являются гетероструктуры Ge/Si с когерентно введенными нанокластерами Ge (квантовыми точками — КТ), поскольку в них возможно наращивание 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, из-

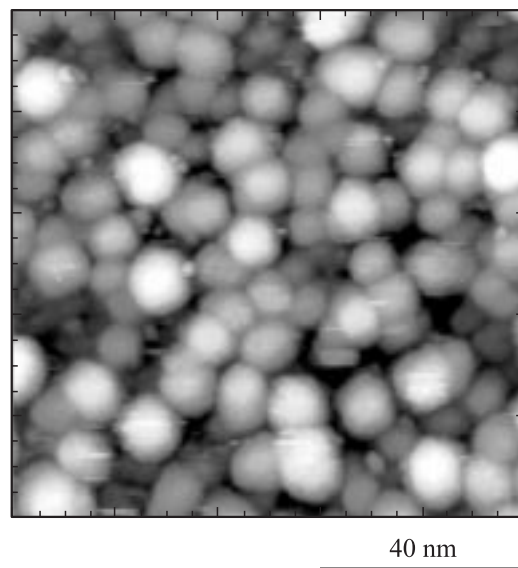


Рис. 1. Изображение массива островков Ge на окисленной поверхности Si(001), полученное с помощью сканирующего туннельного микроскопа. Температура осаждения Ge 650°C, средняя толщина покрытия 3 ML Ge.

лучающие при комнатной температуре в диапазоне длин волн $1.3\text{--}1.5\ \mu\text{m}$ и обладающие квантовым выходом на уровне 0.015% [2].

В настоящей работе сообщается о создании Ge/Si-фотодетекторов для ближней ИК-области спектра, содержащих в качестве активного элемента слои нанокластеров Ge, выращенные с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Средние размеры нанокластеров в плоскости составляли $\sim 10\ \text{nm}$, слоевая плотность равна $(0.3\text{--}1) \cdot 10^{12}\ \text{cm}^{-2}$ в зависимости от условий роста, число слоев Ge в структурах варьировалось от 12 до 36. В ряде случаев для увеличения плотности островков Ge использовался режим роста Фольмера-Вебера на предварительно окисленной поверхности кремния [3]. Изображение массива нанокластеров Ge, сформированных при $T = 650^\circ\text{C}$ на окисленной поверхности Si(001) после напыления 3 ML Ge, приведено на рис. 1. По данным комбинационного рассеяния света содержание Ge в островках составляло около 100% при выращивании слоев Ge при низкой температуре (300°C) и уменьшалось до 65% при увеличении температуры до 650°C . Спектры фотолуминесценции от островков имели максимумы в районе $1.5\ \mu\text{m}$ при $T = 4.2\ \text{K}$. Фотодетекторы представляли собой либо $p\text{--}i\text{--}n$ -фотодиоды, либо $n\text{--}p\text{--}n$ -биполярные фототранзисторы, в базу которых была встроена многослойная Ge/Si-гетероструктура с самоорганизующимися наноостровками Ge [4]. Конструктивно фотоприемники реализовались в виде обычных вертикальных устройств с засветкой со стороны $p\text{--}n$ -перехода или гетероперехода Ge/Si либо в виде латеральных волноводов на подложках „кремний на изоляторе“ (КНИ), освещаемых со стороны торца [5].

2. Фотодиоды для засветки со стороны плоскости $p\text{--}n$ -перехода

На начальном этапе $n^+i\text{--}p^+$ Ge/Si-фотодиоды с тридцатью слоями КТ Ge формировались на подложках n -типа КЭМ-0.01 и засвечивались со стороны плоскости $p\text{--}n$ -перехода. Плотность темнового тока в таком приборе практически не зависит от площади диода и при обратном смещении 1 V имеет наименьшую из известных в литературе величину $2 \cdot 10^{-5}\ \text{A/cm}^2$. Фоточувствительность в ближней ИК-области спектра фотонов простирается вплоть до длин волн $1.6\text{--}1.7\ \mu\text{m}$. Квантовая эффективность в условиях нормального падения света на фотодиод растет с увеличением обратного смещения U и достигает максимального значения 3% при $U > 2\ \text{V}$ (рис. 2) на длине волны $1.3\ \mu\text{m}$. Объяснить рост квантовой эффективности в электрическом поле можно на основе следующих соображений. Известно, что гетеропереход Ge/Si принадлежит ко второму типу, поскольку низшее энергетическое состояние для электронов находится в зоне проводимости Si, а низшее состояние для дырок — в Ge [6]. Поглощение фотонов

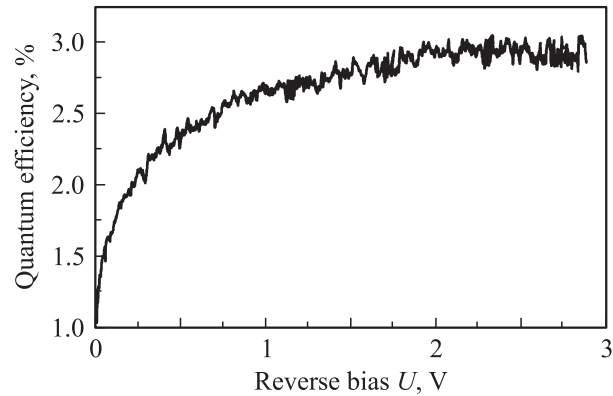


Рис. 2. Зависимость квантовой эффективности $p^+i\text{--}n^+$ -фотодиода на длине волны $1.3\ \mu\text{m}$ от обратного смещения при нормальном падении света.

с энергией, меньшей ширины запрещенной зоны Si, приводит к переходу электронов из валентной зоны Ge в зону проводимости Si. При этом в зоне проводимости Si появляются свободные электроны, а в островках Ge — дырки. Поскольку дырки локализованы в КТ Ge, в слабых электрических полях основной вклад в фототок вносят только электроны. При больших напряжениях дырки могут эффективно туннелировать из локализованных в КТ состояний в валентную зону Si, увеличивая тем самым фототок. Ясно, что в достаточно сильных полях, когда все фотодырки имеют возможность оторваться от КТ, произойдет насыщение величины фотоотклика.

3. Биполярный $n^+p\text{--}n^+$ -фототранзистор для засветки со стороны плоскости $p\text{--}n$ -перехода

В качестве альтернативного варианта фотоприемника на ближний ИК-диапазон нами были предложены и изготовлены биполярные $n^+p\text{--}n^+$ Ge/Si-фототранзисторы, в которых роль плавающей базы выполняли двенадцать слоев нанокластеров Ge, встроенные в p -область Si. Концентрация легирующей примеси в n^+ -областях кремния (As или Sb) была на уровне $10^{18}\ \text{cm}^{-3}$, концентрация бора в p -слое — $5 \cdot 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$. Действие такого прибора основано на уменьшении потенциального барьера для электронов между сильнолегированными областями $n^+\text{--}Si$ вследствие фотогенерации дырок в КТ Ge в результате межзонных переходов и появления в них локализованного положительного заряда. Уменьшение барьера при освещении приводит к увеличению тока инжекции из эмиттера в коллектор, т.е. к появлению фототока, величина которого определяется положительным зарядом базы. Освещение фототранзисторов осуществлялось также со стороны $p\text{--}n$ -переходов.

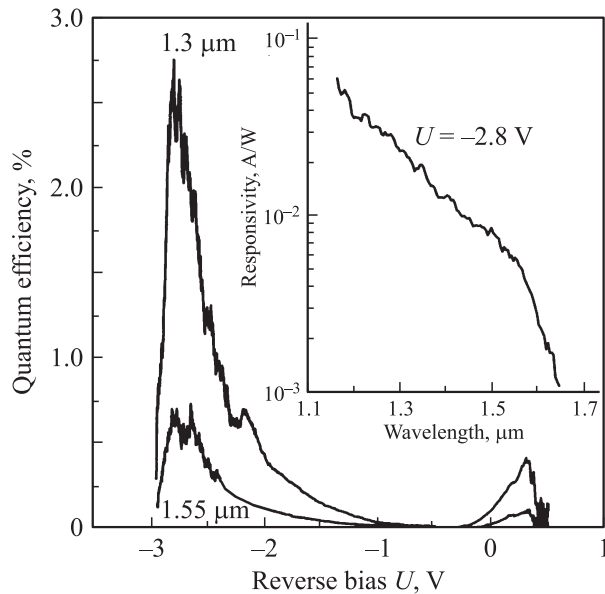


Рис. 3. Зависимость квантовой эффективности фототранзистора от приложенного напряжения. На вставке показана спектральная характеристика фотоотклика при напряжении $U = -2.8$ V.

Спектральная характеристика фотоотклика и зависимость квантовой эффективности от напряжения для одного из приборов приведены на рис. 3. Асимметрия фототока относительно приложенного напряжения связана с различием в уровнях легирования эмиттера и коллектора. В данном случае стимулированная электрическим полем эмиссия дырок из нанокластеров Ge в валентную зону Si приводит к уменьшению положительного заряда в базе фототранзистора и как следствие к падению квантовой эффективности фотопреобразования при больших напряжениях. Оказалось, что, как и в случае $p^+ - i - n^+$ -фотодиодов, максимальная квантовая эффективность фототранзистора находится на уровне 3% для длины волны $1.3 \mu\text{m}$.

4. Волноводные $n^+ - i - p^+$ Ge/Si-фотодиоды

Дальнейшее увеличение квантовой эффективности было 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, такая конструкция прибора удачно сочетается с требованием возможности засветки детектора со стороны его торца [1]. Фоточувствительные слои были сформированы методом МЛЭ на подложках КНИ и выполнены в виде латеральных волноводов с засветкой торца волноводов в плоскости чипа. Ширина волновода составляла $50 \mu\text{m}$, длина варьировалась от $100 \mu\text{m}$ до 5mm . Фотодетекторы представляли

собой кремниевые $n^+ - i - p^+$ -диоды со встроенными в базовую область 36 слоями островков Ge, разделенными прослойками Si толщиной 30nm . Один и тот же прибор сочетал в себе вертикальный фотодиод и латеральный волновод (рис. 4). Пластины КНИ были приготовлены по технологии SMART CUT (производство Wafer World, In.). Толщина отсеченного кремниевого слоя КНИ-структуры составляла 280nm , толщина захороненного окисла 380nm . Ориентация поверхности верхнего слоя кремния (100). Перед процессом МЛЭ кремниевый слой утончался до 250nm с помощью термического окисления и последующего удаления окисла в растворе плавиковой кислоты.

На рис. 5 приведена зависимость квантовой эффективности η на длинах волны 1.3 и $1.55 \mu\text{m}$ от обратного смещения для длины волновода $L = 4 \text{mm}$. Оказалось, что максимальная квантовая эффективность реализуется в структурах с длиной волновода $L < 3 \text{mm}$ при величине обратного смещения $U > 3 \text{V}$ и достигает значений 21 и 16% на длинах волн 1.3 и $1.55 \mu\text{m}$ 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.

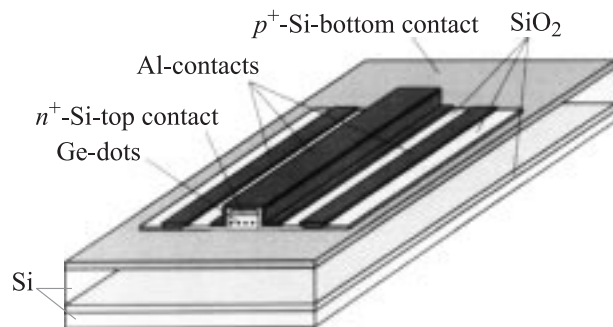


Рис. 4. Схематическое изображение латерального фотодетектора, сформированного на подложке КНИ.

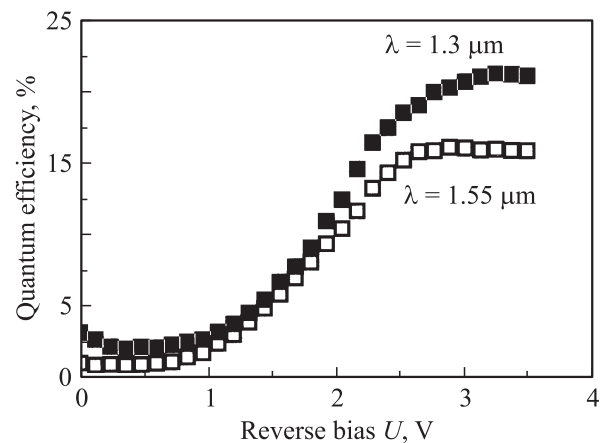


Рис. 5. Зависимость квантовой эффективности на длинах волны 1.3 и $1.55 \mu\text{m}$ от величины обратного смещения при длине волновода $L = 4 \text{mm}$.

5. Заключение

Разработана технология создания кремниевых $p-i-n$ -фотодиодов и $n-p-n$ -фототранзисторов со встроенными слоями КТ Ge для ближней ИК-области ($1.3-1.5 \mu\text{m}$), в которых слоевая плотность КТ составляет порядка 10^{12} cm^{-2} , размеры точек менее 10 nm. Квантовая эффективность в условиях нормального падения света на фотодетектор достигает 3% и возрастает до значений 21 и 16% на длинах волн 1.3 и $1.55 \mu\text{m}$ соответственно в волноводных структурах фотодетектора, использующих эффект многократного внутреннего отражения и реализованных на подложках КНИ.

Список литературы

- [1] H. Presting. Thin Solid 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] А.И. Никифоров, В.В. Ульянов, О.П. Пчеляков, С.А. Тийс, А.К. Гутаковский. ФТТ **46**, 80 (2004).
- [4] А.И. Якимов, А.В. Двуреченский, А.И. Никифоров, С.В. Чайковский, С.А. Тийс. ФТП **37**, 1383 (2003).
- [5] M. El Kurdi, P. Boucaud, S. Sauvage, G. Fishman, O. Ker-marrec, Y. Campidelli, D. Bensahel, G. Saint-Girons, G. Patriarche, I. Sagnes. Physica E **16**, 523 (2003).
- [6] A.I. Yakimov, N.P. Stepina, A.V. Dvurechenskii, A.I. Nikiforov, A.V. Nenashev. Phys. Rev. B **63**, 045 312 (2001).