

Фотоэлектрические свойства и электролюминесценция $p-i-n$ -диодов на основе гетероструктур с самоорганизованными нанокластерами GeSi/Si

© Г.А. Максимов, З.Ф. Красильник*, Д.О. Филатов, М.В. Круглова, С.В. Морозов*, Д.Ю. Ремизов*, Д.Е. Николичев, В.Г. Шенгуров

Научно-образовательный центр „Физика твердотельных наноструктур“
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

* Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

E-mail: Filatov@phys.unn.ru

Исследованы фотоэлектрические свойства и электролюминесценция $p-i-n$ -диодов на основе гетероструктур GeSi/Si с нанокластерами GeSi в i -области, выращенных методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии с газофазным источником Ge. В спектрах фотоэда $p-i-n$ -диодов (300 K) наблюдалась полоса fotocувствительности, связанная с межзонными переходами в нанокластерах GeSi. Разработан подход к анализу спектров fotocувствительности в структурах, содержащих тонкие слои GeSi, и определена энергия края полос fotocувствительности, связанных с этими слоями. Наблюдалась электролюминесценция при 77 K, обусловленная излучательными межзонными переходами в кластерах GeSi.

Работа выполнена при поддержке совместной Российско-американской программы Министерства образования РФ и Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF) „Фундаментальное исследование и высшее образование“ (REC-NN-001), Российского фонда фундаментальных исследований (№ 03-02-17085) и Министерства образования РФ (№ E02-3.4-238 и A03-2.9-473).

Структуры с нанокластерами GeSi/Si, получаемыми методом самоорганизованного роста, в течение последних десяти лет являлись объектами интенсивных исследований и разработок в области физики и технологии полупроводников [1]. Интерес к подобным структурам обусловлен потенциальными возможностями создания интегральных оптоэлектронных устройств на базе кремниевой технологии: светодиодов, излучающих в практически важной области длин волн 1.3–2 μm , а в перспективе и инжекционных лазеров [2]. Другое важное направление исследований — изучение фотопроводимости GeSi-структур в области длин волн 1–2 μm — связано с расширением спектрального диапазона фотоприемников на основе Si в инфракрасную область.

Обычно структуры GeSi/Si с самоорганизованными нанокластерами получают методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [3]. В данной работе исследовались фотоэлектрические свойства и электролюминесценция $p-i-n$ -диодов на основе гетероструктур с нанокластерами GeSi, выращенных методом сублимационной МЛЭ с газофазным источником Ge [4].

1. Методика эксперимента

Образцы для исследования выращивались на подложках Si (001) марки КДБ-0.005. Осаждение слоев Si проводилось с использованием сублимационного источника. Сначала на подложке выращивался слой p^+ -Si толщиной 0.6 μm , легированный бором с концентрацией $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, затем слабелегированный слой n -Si толщиной 0.8 μm , легированный фосфором ($\sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), и

слой n^+ -Si толщиной 0.2 μm с концентрацией доноров $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. В середину базового n -слоя Si встраивался слой GeSi с номинальной толщиной Ge 20 nm. Для осаждения Ge в ростовую камеру напускался GeH_4 , создававший в ней парциальное давление $5 \cdot 10^{-5} \text{ Torr}$. Температура подложки при осаждении Ge составляла 800°C, остальные слои структуры выращивались при 600°C. В качестве контрольных образцов были использованы $p-i-n$ -структуры с теми же параметрами слоев Si, но без осаждения Ge. Для исследования морфологии и состава кластеров были выращены образцы-спутники с поверхностными кластерами. Для этого осаждение Ge проводилось на поверхность сильнолегированного буферного слоя p^+ -Si ($\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) толщиной 0.5 μm при тех же условиях, при которых осаждался Ge в $p-i-n$ -структурах.

Морфология поверхности образцов-спутников исследовалась с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) TopoMetrix® TMX-2100 Accurex™ на воздухе в контактном режиме. Исследование состава кластеров проводилось методом растровой Оже-микроскопии (РОМ) на сверхвысоковакуумной установке Omicron® MultiProbe S™. Диаметр электронного зонда составлял $\sim 10 \text{ nm}$, энергия электронов 25 keV, ток пучка 10 nA. Оже-спектры регистрировались полусферическим энергоанализатором. Поскольку образцы подвергались воздействию атмосферного воздуха при переносе из ростовой установки в РОМ, поверхность образца была покрыта слоем окисла толщиной $\approx 2 \text{ nm}$. Поверхностный окисел перед РОМ-исследованиями удалялся ионным травлением Ar^+ (энергия ионов 1 keV, ток пучка

5 μ A, диаметр пучка 18 mm). Момент полного удаления окисла с поверхности структуры определялся по исчезновению линии кислорода в Оже-спектре образцов.

На основе $p-i-n$ -структур были изготовлены меза-фотодиоды (диаметр мезы 250 μ m) с окном в верхнем контакте диаметром 150 μ m. Фотоэлектрические свойства диодов исследовались на спектральном комплексе КСВУ-23 с помощью стандартной селективной методики с модулированным возбуждением и синхронным детектированием. В эксперименте измерялась спектральная зависимость малосигнальной фотоэдс холостого хода $V_{ph}(h\nu)$, которая затем нормировалась на спектральное распределение интенсивности возбуждающего света $L_{ph}(h\nu)$, что позволяло получить спектр fotocувствительности диодов $S(h\nu) = V_{ph}(h\nu)/L_{ph}(h\nu)$.

Спектры электролюминесценции диодов измерялись при 77 и 300 K в импульсном режиме. Длительность импульсов тока составляла 4 ms, частота повторения 40 Hz. Спектр излучения регистрировался InGaAs фотодетектором при помощи монохроматора МДР-23.

2. Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлено АСМ-изображение структуры с поверхностными нанокластерами. Наблюдается система кластеров с поверхностной плотностью $\sim 10^8$ cm^{-2} , высотой ≈ 120 nm и диаметром ≈ 800 nm.

РОМ-исследования показали, что кластеры состоят из твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, при этом концентрация Ge в объеме кластера составляет 30 ± 5 at.%. Электронный зонд в процессе измерения наводился на вершину кластера. Значительное содержание Si в объеме кластеров объясняется его диффузией из подложки в объем кластера в процессе роста [1].

На рис. 2, a представлены спектры fotocувствительности при 300 K $p-i-n$ -диодов с нанокластерами GeSi в i -области и без них. Край fotocувствительности $p-i-n$ -диода с нанокластерами GeSi (кривая I) сдвинут в длинноволновую область относительно спектра fotocувствительности диода без кластеров (кривая II). Указанное смещение связано, по-видимому, с поглощением света в кластерах GeSi.

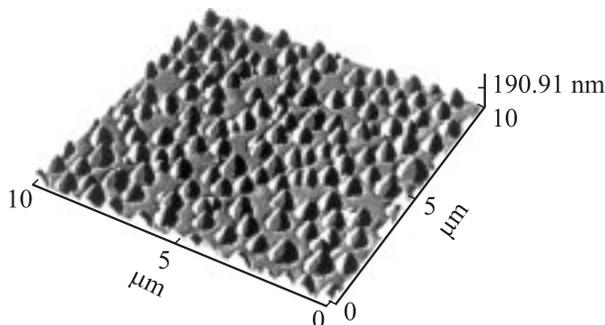


Рис. 1. АСМ-изображение поверхностных нанокластеров GeSi/Si.

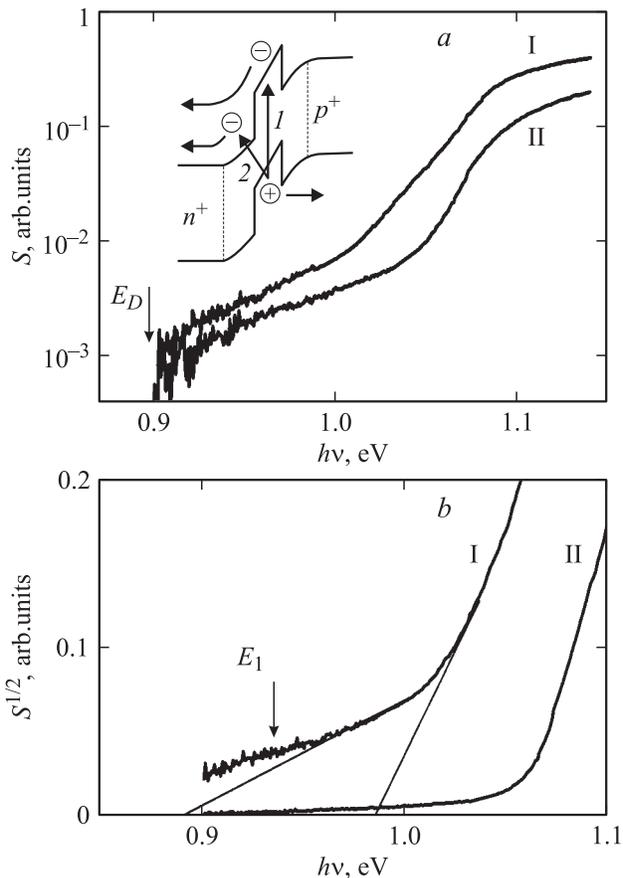


Рис. 2. Спектры fotocувствительности (300 K) $p-i-n$ -диодов (I — с нанокластерами GeSi в i -области, II — без кластеров) (a) и те же спектры в координатах $S^{1/2}-h\nu$ (b).

Спектральная зависимость fotocувствительности $p-n$ -переходов на базе Si вблизи края собственного оптического поглощения имеет вид [5]

$$S(h\nu) \sim \frac{\alpha(h\nu)L_n}{1 + \alpha(h\nu)L_n}, \quad (1)$$

где $\alpha(h\nu)$ — спектральная зависимость коэффициента собственного поглощения, L_n — длина диффузии неосновных носителей (в данном случае электронов). Коэффициент межзонного поглощения Si вблизи края достаточно мал, так что значительная часть света поглощается в глубине структуры за пределами $p-n$ -перехода. В связи с этим значительную роль в механизме фотоэдс играют процессы диффузии неосновных носителей из квазинейтральной области, где они генерируются, к $p-n$ -переходу.

В случае поглощения в тонком слое GeSi, встроенном в $p-n$ -переход, носители возникают в этом слое, который можно рассматривать как δ -образный источник электронно-дырочных пар. При этом процесс диффузии неосновных носителей к $p-n$ -переходу отсутствует, и можно считать fotocувствительность пропорциональ-

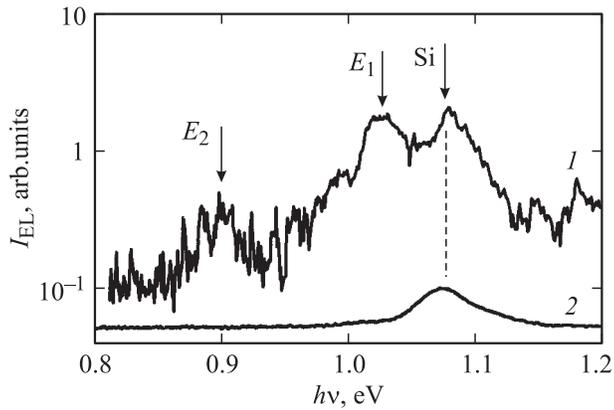


Рис. 3. Спектры электролюминесценции (77 К) $p-i-n$ -диодов. 1 — с нанокластерами GeSi в i -области, 2 — без кластеров.

ной коэффициенту поглощения:

$$S_{ph}(hv) \sim \alpha(hv). \quad (2)$$

Это позволяет применить методику, используемую для анализа формы края спектров собственного поглощения, к анализу спектров фоточувствительности структур с нанокластерами. Для непрямых переходов с участием фононов спектральная зависимость $\alpha(hv)$ вблизи края собственного поглощения имеет вид [6]

$$\alpha(hv) \propto (hv - \Delta E_g \pm \hbar\Omega)^2, \quad (3)$$

где $\hbar\Omega$ — энергия фонона. В координатах $\alpha^{1/2}-hv$ зависимость (3) будет представлять собой две прямые, пересекающие ось абсцисс в точках $\Delta E_g + \hbar\Omega$ и $\Delta E_g - \hbar\Omega$. Как видно из рис. 2, b , край полосы фоточувствительности, связанной с поглощением света в кластерах GeSi, в координатах $S^{1/2}-hv$ также представляет собой две прямые, что соответствует непрямым оптическим переходам с поглощением и испусканием фононов. Определенная таким образом энергия оптического перехода $E_1 \approx 0.94$ eV, энергия фононов $\hbar\Omega \approx 46$ meV. Последнее значение немного меньше энергии LO-фонона в Si (52.1 meV).

На рис. 3 представлены спектры электролюминесценции при 77 К $p-i-n$ -диодов с кластерами GeSi в i -области и без них. На обеих кривых наблюдается пик с энергией максимума ≈ 1.07 eV, обусловленный межзонными переходами в Si с участием фонона. На кривой 1 наблюдаются также пики с энергией максимумов ≈ 1.02 и ≈ 0.9 eV, связанные соответственно с переходами в кластерах GeSi (обратными переходу 1 на вставке к рис. 2, a) и переходами из зоны проводимости материала, окружающего кластеры (Si), в состояния валентной зоны GeSi (обратного переходу 2), как это следует из расчетов энергий переходов в кластерах по модели [7]. В предположении, что оба перехода в кластерах GeSi происходят с участием фононов, расчетные значения

доли Ge в кластерах составляют 0.25 для перехода 1 и 0.28 для перехода 2, что согласуется с данными РОМ о содержании Ge внутри кластера.

Ранее электролюминесценция, связанная с кластерами Ge и GeSi, наблюдалась в структурах, выращенных методом МЛЭ [8,9]. Результаты данной работы показывают, что структуры с нанокластерами GeSi, выращенными методом сублимационной МЛЭ с газофазным источником Ge, также могут проявлять электролюминесценцию, что свидетельствует о практической применимости данного метода для выращивания приборных структур кремниевой оптоэлектроники.

В соответствии с изложенным выше полоса фоточувствительности с энергией края $E_0 = 0.94$ eV (рис. 3) может быть сопоставлена межзонному переходу в кластерах GeSi (переход 1 на вставке к рис. 2, a) с учетом температурного сдвига. Переходы из состояний Si в спектрах фотоэдс не наблюдались. Возможно, они не проявляются на фоне полосы с энергией края $E_D \approx 0.9$ eV при 300 К (показана стрелкой на рис. 2, a). Эти полосы наблюдаются в спектрах фотоэдс как диодов с кластерами GeSi, так и без них и связаны, по-видимому, с дислокациями.

Список литературы

- [1] З.Ф. Красильник, А.В. Новиков. УФН **170**, 3 (2000).
- [2] G. Abstreiter, P. Schittenhelm, C. Engel, E. Silveira, A. Zrenner, D. Meertens, W. Jäger. *Semicond. Sci Technol.* **11**, 1525 (1996).
- [3] О.П. Пчеляков, Ю.Б. Болховитянов, А.В. Двуреченский, Л.В. Соколов, А.И. Никифоров, А.И. Якимов, Б. Фойхтлендер. ФТП **34**, 11 (2000).
- [4] С.П. Светлов, В.Г. Шенгуров, В.Ю. Чалков, З.Ф. Красильник, Б.А. Андреев, Ю.Н. Дроздов. Изв. РАН. Сер. физ. **65**, 2, 204 (2001).
- [5] Л.П. Павлов. Методы определения основных параметров полупроводниковых материалов. Высш. шк., М. (1975). С. 112.
- [6] В.П. Грибковский. Теория поглощения и испускания света в полупроводниках. Наука и техника, Минск (1975). С. 86.
- [7] В.Я. Алешкин, Н.А. Бекин. ФТП **31**, 171 (1997).
- [8] M. Stoffel, U. Denker, O.G. Schmidt. *Appl. Phys. Lett.* **82**, 3236 (2003).
- [9] R. Apetz, L. Vescan, C. Dieker, H. Luth. *Appl. Phys. Lett.* **66**, 445 (1995).