

# 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  $\mu\text{m}$ , а в перспективе и инжекционных лазеров [2]. Другое важное направление исследований — изучение фотопроводимости GeSi-структур в области длин волн 1–2  $\mu\text{m}$  — 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  $\mu\text{m}$ , легированный бором с концентрацией  $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , затем слабелегированный слой  $n$ -Si толщиной 0.8  $\mu\text{m}$ , легированный фосфором ( $\sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ), и

слой  $n^+$ -Si толщиной 0.2  $\mu\text{m}$  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  $\text{GeH}_4$ , 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  $\mu\text{m}$  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  $\text{Ar}^+$  (энергия ионов 1 keV, ток пучка

5  $\mu$ 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  $\mu$ m) с окном в верхнем контакте диаметром 150  $\mu$ 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  $\sim 10^8$   $\text{cm}^{-2}$ , высотой  $\approx 120$  nm и диаметром  $\approx 800$  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  $30 \pm 5$  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.

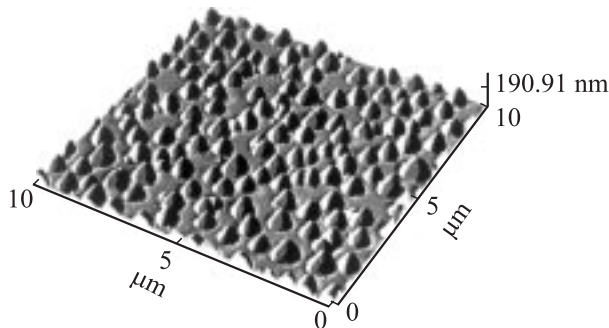


Рис. 1. АСМ-изображение поверхностных нанокластеров GeSi/Si.

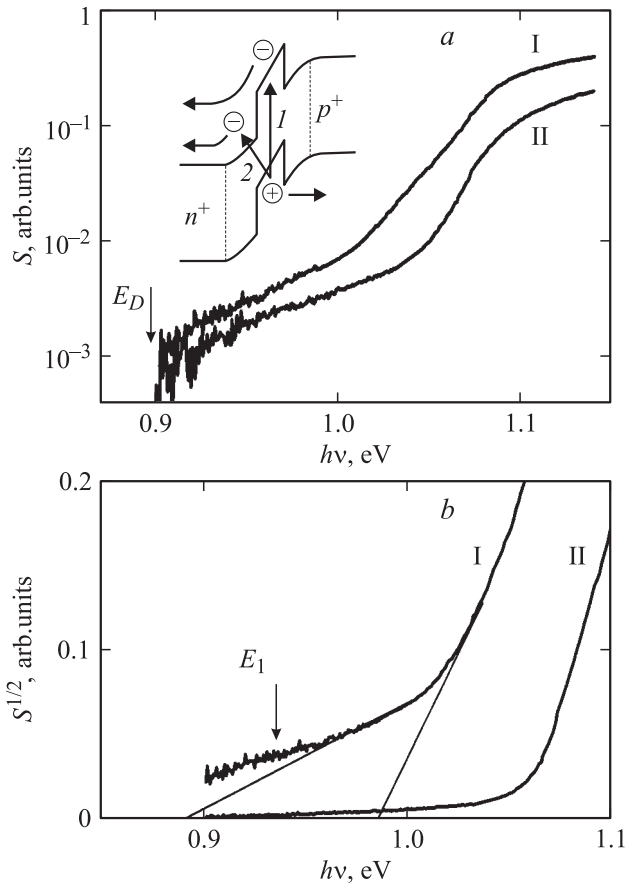


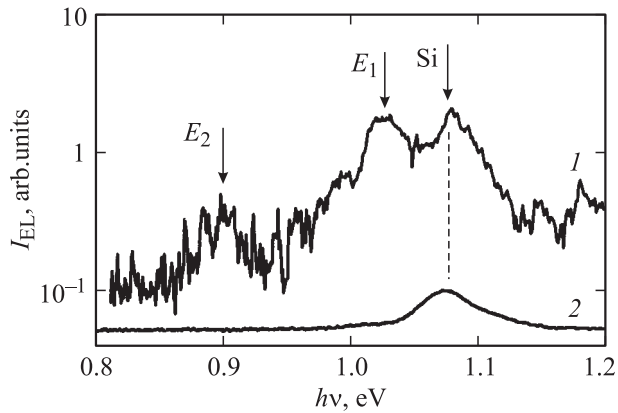
Рис. 2. Спектры fotocувствительности (300 K)  $p-i-n$ -диодов (I — с нанокластерами GeSi в  $i$ -области, II — без кластеров) (a) и те же спектры в координатах  $S^{1/2}-h\nu$  (b).

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  $\delta$ -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  $\approx 1.07$  eV, обусловленный межзонными переходами в Si с участием фонона. На кривой 1 наблюдаются также пики с энергией максимумов  $\approx 1.02$  и  $\approx 0.9$  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).