

Исследование пространственного распределения фототока в плоскости Si- $p-n$ -фотодиода с наноструктурами GeSi методом сканирующей ближнепольной оптической микроскопии

© Д.О. Филатов¹, И.А. Казанцева¹, В.Г. Шенгуров¹, В.Ю. Чалков¹, С.А. Денисов¹,
А.П. Горшков¹, В.П. Мишкин²

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

² Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева,
430005 Саранск, Россия

E-mail: Dmitry_filatov@inbox.ru

(Получена 4 октября 2016 г. Принята к печати 14 октября 2016 г.)

Методом сканирующей ближнепольной оптической микроскопии исследовано пространственное распределение фототока в плоскости p^+-n -перехода на базе Si со встроенными самоформирующимися наноструктурами $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ ($x \approx 0.35$) при локальном фотовозбуждении зондом микроскопа на длине волны излучения 1310 нм, большей красной границы собственной фоточувствительности Si. На изображениях фототока (картах пространственного распределения фототока в плоскости фотоприемного окна p^+-n -фотодиода) обнаружены неоднородности, связанные с межзонным оптическим поглощением в наноструктурах GeSi. Результаты работы показывают возможность визуализации индивидуальных наноструктур GeSi на изображениях фототока с пространственным разрешением ~ 100 нм.

DOI: 10.21883/FTP.2017.04.44353.8420

1. Введение

Сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия (СБОМ) [1] — один из методов сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), предназначенный для измерения пространственного распределения различных оптических параметров (коэффициентов оптического поглощения, отражения и др.) в субмикрометровом масштабе размеров с пространственным разрешением, существенно превосходящим дифракционный предел разрешения традиционных оптических микроскопов (предел Аббе), который составляет $\sim \lambda/2$, где λ — длина волны тестирующего излучения [2]. В настоящее время наиболее распространена разновидность метода СБОМ, основанная на ограничении области взаимодействия тестирующего излучения с поверхностью исследуемого образца посредством апертуры диаметром $a \ll \lambda$, которая удерживается при помощи, например, датчика сдвиговой силы на расстоянии $d \ll \lambda$ от поверхности образца (т.е. в пределах области ближнего поля). В этом случае пространственное разрешение СБОМ составляет $\sim a \ll \lambda$ [3].

Среди различных оптических параметров поверхности образца наряду с вышеупомянутыми коэффициентами оптического поглощения и отражения метод СБОМ применяется для исследования пространственного распределения интенсивности электромагнитного излучения в активных областях различных оптоэлектронных приборов и элементов интегральной оптики (волоконных, интегрально-оптических волноводах и т.п.). Кроме того, метод СБОМ применяется для исследования

пространственного распределения интенсивности фотолюминесценции (ФЛ), электролюминесценции (ЭЛ), в том числе распределения интенсивности излучения в излучающей апертуре различных светоизлучающих приборов (светодиодов, полупроводниковых, твердотельных и волоконных лазеров и т.п.), комбинационного рассеяния света и др. Соответственно различают методы СБОМ на пропускание, на отражение и на собирание, флуоресцентную, рамановскую СБОМ и др. В то же время сравнительно редко в СБОМ используется эффект изменения электросопротивления образца при фотовозбуждении СБОМ-зондом (фотопроводимость, ФП) [4]. В [5] метод ФП-СБОМ использовался, наряду со СБОМ на собирание, для изучения модового состава излучения в волноводе полупроводникового лазера на основе структуры $\text{AlGaInP}/\text{Ga}_{0.4}\text{In}_{0.6}\text{P}$ с множественными квантовыми ямами (МКЯ). Было показано, что зависимости фототока через лазерный диод (ЛД) от положения возбуждающего СБОМ-зонда относительно излучающей апертуры ЛД дают ту же информацию о профиле интенсивности излучения в модах волновода ЛД, что и СБОМ на собирание на работающем ЛД. Кроме того, было получено распределение сигнала примесной ФП, обусловленной донорными примесями с энергиями возбуждения 60–380 мэВ в покровном слое лазерной структуры $n^+-(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$. В [6] метод ФП-СБОМ со спектральным разрешением использовался для измерения профилей основной и высележащих мод в лазерных волноводах $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$ ЛД при различных длинах волн тестирующего излучения. В [7] метод ФП-СБОМ на поперечных сколах был применен

для изучения процессов собирания фотовозбужденных носителей заряда в солнечных элементах на базе GaAs. В [8] методом ФП-СБОМ изучался эффект локального усиления эффективности преобразования в фотопреобразователях на базе GaAs за счет возбуждения плазмонов в наночастицах Au, осажденных на поверхность фотоприемного окна.

В настоящей работе методом ФП-СБОМ исследована зависимость фототока Si-фотоиода с $p^+ - n$ -переходом со встроенными самоформирующимися наноструктурами GeSi при локальном фотовозбуждении СБОМ-зондом на длине волны излучения 1310 нм (большой красной границы собственной фоточувствительности Si) от положения СБОМ-зонда на поверхности фотоприемного окна фотоиода. Целью работы являлось экспериментальное исследование возможности регистрации фотоотклика индивидуального наноструктура GeSi при межзонном фотовозбуждении и визуализации наноструктур GeSi на СБОМ-изображении фототока.

2. Методика эксперимента

Диодная Si- $p^+ - n$ -структура с наноструктурами GeSi была выращена на подложке $n^+ - \text{Si}(001)$ КЭФ-0.005 комбинированным методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ) Si и газовой эпитаксии (ГФЭ) Ge при низком давлении с использованием оригинальной СМЛЭ-установки [9]. Базовое давление в ростовой камере составляло $\sim 10^{-8}$ Торр. Перед началом роста подложка Si отжигалась при 1200°C в течение 10 мин. Затем температура подложки снижалась до 800°C и на поверхность осаждался буферный слой $n^+ - \text{Si}$, легированный P (концентрация фосфора $N_D \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$) толщиной ~ 200 нм. На поверхность буферного слоя осаждался слой $n - \text{Si}$, слабо легированный P (концентрация фосфора $N_D \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$) толщиной ~ 200 нм. На поверхности слабо легированного слоя $n - \text{Si}$ с использованием механизма Странски–Крастанова [10] формировался массив наноструктур GeSi. Для этого в ростовую камеру напускался герман (GeH_4) с парциальным давлением $p_g \approx 9 \cdot 10^4$ Торр, который пиролизически разлагался на поверхности Si. Температура подложки во время осаждения Ge составляла $T_g = 700^\circ\text{C}$. Номинальная толщина осаждаемого слоя Ge d_{Ge} определялась (при заданных T_g и p_g) временем напуска Ge в ростовую камеру t_g и составляла ~ 10.3 монослоев (1 монослой (МС) Ge/Si(001) соответствует ~ 0.14 нм) [11]. Затем наноструктуры GeSi заравнивались покровным слоем $p^+ - \text{Si}$ толщиной ~ 50 нм, легированным В (концентрация бора $N_A \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$).

Данные о морфологических параметрах наноструктур GeSi (средняя высота островков $\langle h \rangle$, средний диаметр $\langle D \rangle$ и поверхностная плотность N_s) были получены методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на образцах с поверхностными островками, выращенными

при тех же параметрах ростового процесса (p_g , t_g и T_g), что и островки в диодной структуре, с использованием сканирующего зондового микроскопа НТ-МДТ Solver Pro. Данные об элементном составе и упругой деформации материала островков GeSi были получены методом конфокальной рамановской микроскопии (КРМ) с использованием микроспектроскопического комплекса НТ-МДТ „Интегра Спектра“ [12]. Было установлено, что наноструктуры состоят из твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, несмотря на то что на поверхность подложки осаждался чистый Ge. Наличие Si в материале наноструктур связано с диффузией Si из подложки в объем островков в процессе роста, что понижает общую упругую энергию системы „островки–подложка“ [13]. Атомная доля Ge x в материале островков, выращенных при $T_g \approx 700^\circ\text{C}$, составляла ~ 0.35 [12]. Более подробно результаты исследований зависимости морфологии, состава и оптических свойств островков GeSi/Si(001), выращенных комбинированным методом СМЛЭ–ГФЭ, от условий роста изложены в [14,15].

На основе $p^+ - n - n^+$ -структур с наноструктурами GeSi стандартным методом фотолитографии были сформированы мезафотоиоды цилиндрической формы с кольцевыми верхними контактами. Диаметр мез составлял 300 мкм, диаметр окон в верхнем контакте — 150 мкм. Измерения спектров фоточувствительности (ФЧ) фотоиодов при фотовозбуждении широким пучком излучения проводились при 300 К по стандартной селективной методике с модулированным фотовозбуждением и синхронным детектированием. В качестве источника монохроматического излучения использовался решеточный монохроматор Acton SP-500i „Acton Research“ с галогеновой лампой мощностью 350 Вт. Регистрация фотоотклика проводилась при помощи синхронного детектора SR-810 Stanford Research. Частота модуляции составляла ~ 128 Гц. В эксперименте измерялись спектры фототока короткого замыкания $I_{SC}(h\nu)$, где $h\nu$ — энергия кванта возбуждающего излучения, которые нормировались на спектры интенсивности фотовозбуждения $L_{\text{ph}}(h\nu)$, и таким образом получали спектры ФЧ

$$S_{\text{ph}}(h\nu) = \frac{I_{SC}(h\nu)}{L_{\text{ph}}(h\nu)}. \quad (1)$$

СБОМ-измерения проводились при 300 К с использованием сканирующей головки и контроллера „Солвер СБОМ“ НТ-МДТ. Схема эксперимента представлена на рис. 1. В эксперименте использовались СБОМ-зонды производства НТ-МДТ, интегрированные с датчиком сдвиговой силы типа „вилка“. Диаметр апертуры зондов составлял ~ 100 нм. В качестве источника тестирующего излучения использовался одномодовый полупроводниковый ЛД ДМПО131-14 „Дилаз“, излучающий на длине волны $\lambda \approx 1310$ нм, питаемый от источника питания PILOT4-DC „Дилаз“. Ток накачки ЛД модулировался прямоугольными импульсами с частотой повторения ~ 670 Гц при помощи оптического реле,

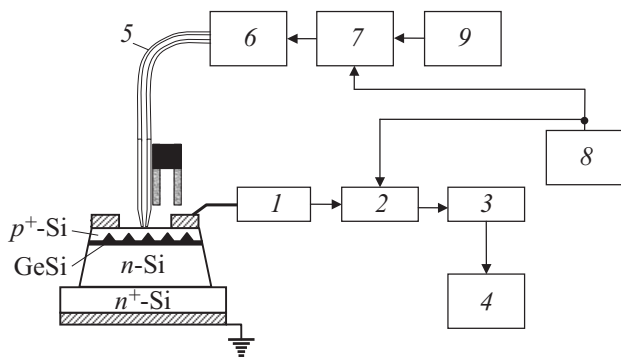


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения фототока короткого замыкания Si-p-n-фотодиода с наноструктурами GeSi при локальном фотовозбуждении СБОМ-зондом. 1 — предусилитель тока (преобразователь ток–напряжение), 2 — синхронный детектор, 3 — контроллер СБОМ „Солвер“, 4 — управляющий компьютер, 5 — оптоволоконный СБОМ-зонд, 6 — лазерный диод, 7 — модулятор, 8 — задающий генератор импульсов, 9 — блок питания лазерного диода.

на которое подавался сигнал с задающего генератора импульсов Г5-63. Мощность излучения в волокне ограничивалась 200 мкВт.

Исследуемые фотодиоды укреплялись на держателе, выполненном в виде печатной платы из фольгированного текстолита, с предусилителем тока (преобразователь ток–напряжение) на базе прецизионного малошумящего операционного усилителя ОРА-124U „Burr Brown“. Сканирующая СБОМ-головка и держатель образца с предусилителем помещались в свето- и шумоизолирующий заземленный экран из оцинкованной стали.

В ходе эксперимента поверхность фотоприемного окна фотодиода сканировалась СБОМ-зондом. Зонд регистрировал распределение амплитуды первой гармоники фототока короткого замыкания I_{SC} на частоте модуляции излучения ЛД по поверхности фотоприемного окна. Сигнал фотоотклика с выхода предусилителя подавался на вход синхронного детектора SR-530 Stanford Research, при помощи которого измерялась амплитуда компоненты фотоотклика на частоте задающего генератора. Сигнал с выхода синхронного детектора подавался на пользовательский вход контроллера „Солвер СБОМ“.

3. Результаты и обсуждение

На рис. 2,а приведено АСМ-изображение гетероструктуры с поверхностными наноструктурами GeSi/Si, выращенными при тех же условиях, что и наноструктуры в кремниевых p⁺-n-мезафотодиодах. Из АСМ-изображения видно, что поверхностные наноструктуры GeSi/Si(001) имеют бимодальное распределение по размерам. Наряду с куполообразными (dome) островками

с типичными для островков данной формы латеральными размерами $D \approx 100–130$ нм, высотой $h = 10–13$ нм и поверхностной плотностью $N_s \approx 5 \cdot 10^8$ см⁻², на поверхности структуры присутствуют более крупные содержащие дислокации островки пирамидальной формы (так называемые super dome), ограниченные плоскостями (101) с латеральными размерами $D \approx 250–300$ нм, высотой $h \approx 120–150$ нм и поверхностной плотностью $N_s \sim 10^8$ см⁻².

На рис. 3 представлена расчетная зонная диаграмма кремниевой p⁺-n-n⁺-структуры с наноструктурами Ge_{0,35}Si_{0,65}/Si(001) в равновесии при 300 К. Зонная диаграмма рассчитана на основе решения уравнения Пуассона: приближение плоских зон в квазинейтральной области, параболический потенциал в приближении полного обеднения носителями заряда в областях

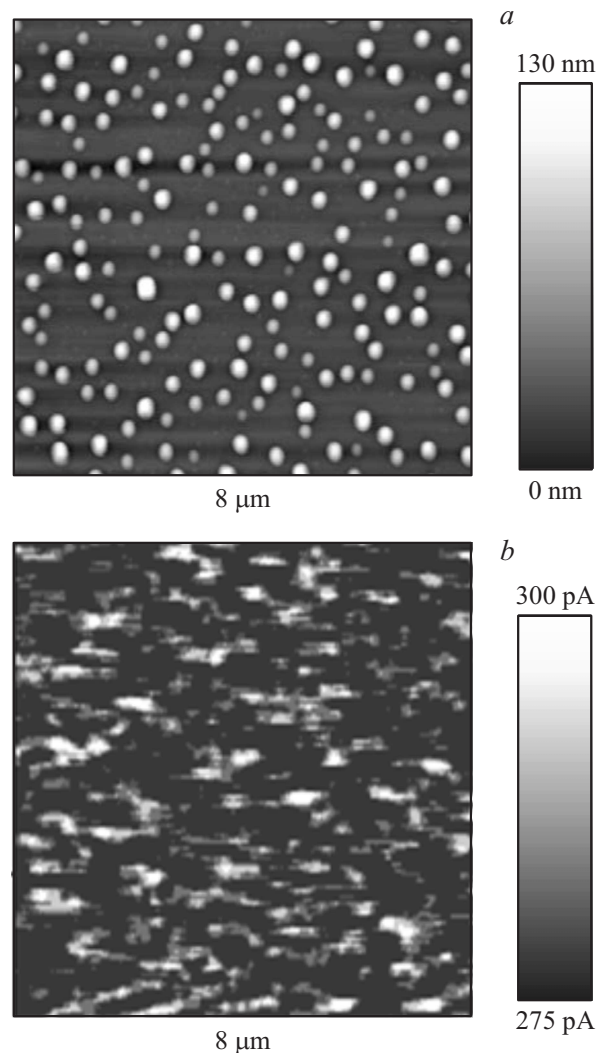


Рис. 2. АСМ-изображение поверхности гетероструктуры с поверхностными наноструктурами GeSi/Si(001) (а) и ФП-СБОМ-изображение (300 К) поверхности фотоприемного окна Si-p⁺-n-n⁺-фотодиода с наноструктурами GeSi, выращенными в тех же условиях. Длина волны фотовозбуждения 1310 нм.

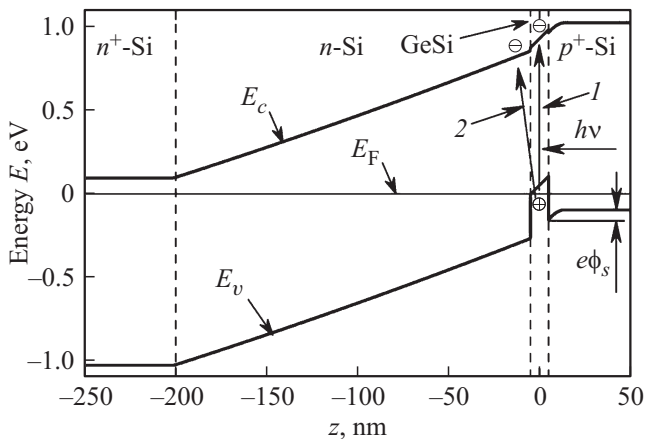


Рис. 3. Расчетная зонная диаграмма в равновесии при 300 К Si- $p^+ - n - n^+$ -структуры с нанодошками Ge_{0.35}Si_{0.65}/Si(001). 1, 2 — соответственно пространственно прямые и непрямые межзонные оптические переходы в нанодошках GeSi/Si. E_c — край зоны проводимости, E_v — край валентной зоны, E_F — уровень Ферми, z — координата в направлении роста структуры.

пространственного заряда (ОПЗ). Значения разрывов зоны проводимости, ΔE_c , валентной зоны для тяжелых и легких дырок, ΔE_{vhh} и ΔE_{vhl} соответственно, на гетерограницах островков GeSi с окружающей матрицей Si были рассчитаны по модели [16] для $x = 0.35$ с учетом частичной релаксации упругих напряжений в материале островков (средние значения относительной упругой деформации материала островков $\sim 3.6 \cdot 10^{-2}$ были получены из данных КРМ в [12]). Эффектом размерного квантования дырок в островках пренебрегали, поскольку оценки по модели [16] показали, что при $h \geq 10$ нм размерное квантование не оказывает существенного влияния на энергетический спектр дырок в островках (при $h = 10$ нм энергия основного состояния тяжелых дырок при 300 К составляет ~ 10 мэВ).

При расчете зонной диаграммы учитывалось, что островки GeSi заряжены дырками вследствие того, что потолок валентной зоны в GeSi находится выше уровня Ферми в условиях равновесия (см. рис. 3). Это приводит к дополнительному изгибу зон в области подконтактного слоя p^+ -Si, прилегающей к слою островков [17]. Расчет дополнительного изгиба зон проводился на основании условия баланса заряда: $n_s = n_l$, где n_s — поверхностная плотность дырок в нанодошках GeSi, n_l — плотность ионизованных акцепторов в ОПЗ слоя p^+ -Si, приведенная к поверхностной: $n_l = N_A w$, где

$$w = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0\phi_s}{eN_A}} \quad (2)$$

— ширина ОПЗ. Здесь e — элементарный заряд, ϵ — диэлектрическая проницаемость Si, ϵ_0 — электрическая постоянная, ϕ_s — высота дополнительного потенциального барьера на границе островков GeSi и p^+ -Si

(см. рис. 3). В предположении $h \ll w$ плотность заряда дырок, локализованных в островках GeSi, n_s , может быть вычислена по формуле

$$n_s = N_s V_1 N_v F_{1/2} \left(\frac{\Delta E_v - e\phi_s - E_v}{k_B T} \right), \quad (3)$$

где V_1 — объем единичного нанодошка, N_v — эффективная плотность состояний в валентной зоне GeSi, $F_{1/2}$ — интеграл Ферми порядка 1/2, E_v — энергия потолка валентной зоны в квазинейтральной области слоя p^+ -Si, k_B — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура. Окончательно из (2) и (3) имеем

$$\sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0\phi_s N_A}{e}} = N_s V_1 N_v F_{1/2} \left(\frac{\Delta E_v - e\phi_s - E_v}{k_B T} \right). \quad (4)$$

Данное уравнение является трансцендентным относительно ϕ_s и решалось численно методом Ньютона. Для гетерограницы Ge_{0.35}Si_{0.65}/Si(001) расчет по модели [17] дает $\Delta E_{vhh} \approx 260$ мэВ при $T = 300$ К. Для $N_A = 10^{18}$ см⁻³ имеем $E_v \approx -96$ мэВ. Полагая для куполообразных островков $h = 10$ нм, $D = 100$ нм, $N_s = 5 \cdot 10^8$ см⁻², получаем $\phi_s \approx 0.15$ В и $w \approx 14$ нм. Таким образом, предположение $h \ll w$ оказалось грубым, так что полученные значения ϕ_s и w носят оценочный характер.

На рис. 4 приведен спектр ФЧ S_{ph} при 300 К Si- $p^+ - n - n^+$ -фотодиода с нанодошками Ge_{0.35}Si_{0.65}/Si(001), измеренный при помощи решеточного монохроматора (в дальнем поле при размере пучка возбуждающего излучения ~ 3 мм). Полоса ФЧ в диапазоне энергии квантов фотовозбуждения $h\nu \approx 0.8 - 1.0$ эВ (что меньше ширины запрещенной зоны Si $E_g \approx 1.1$ эВ при 300 К) обусловлена межзонным оптическим поглощением в нанодошках GeSi (прямые и непрямые переходы 1 и 2 на рис. 3). Действительно, со-

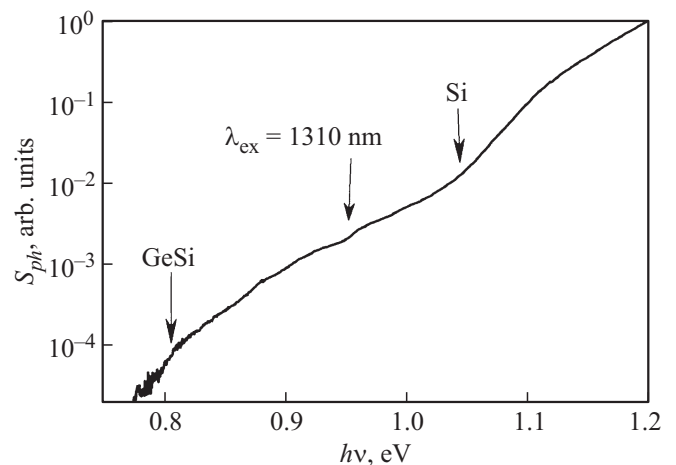


Рис. 4. Спектр фоточувствительности в дальнем поле при 300 К Si- $p^+ - n - n^+$ -фотодиода с нанодошками Ge_{0.35}Si_{0.65}/Si(001).

гласно расчетам [17], край полосы ФЧ в наноструктурах GeSi составляет ~ 0.78 эВ при $x \approx 0.37$, что соответствует пространственно непрямым переходам из вершины подзоны тяжелых дырок островков GeSi в состоянии дна зоны проводимости Si вблизи основания островков с поглощением поперечных оптических (ТО) фононов с энергией ~ 63 мэВ. Указанное значение x [17] достаточно хорошо согласуется с нашими данными КРМ [12] $x \approx (0.35 \pm 0.05)$ для наноструктур Ge_xSi_{1-x}. Это свидетельствует о том, что ФЧ исследуемого p^+n-n^+ -диода в спектральной области $h\nu \approx 0.8-1.0$ эВ действительно обусловлена межзонным оптическим поглощением в наноструктурах GeSi. Отметим, что значение энергии фотона $h\nu \approx 0.954$ эВ, соответствующее длине волны излучения ЛД, используемого в качестве источника фотовозбуждения в СБОМ-эксперименте, $\lambda_{\text{ex}} \approx 1310$ нм (показано стрелкой на рис. 4), находится в пределах спектральной полосы ФЧ наноструктур GeSi.

На рис. 2, *b* приведено ФП-СБОМ-изображение поверхности фотоприемного окна фото диода (карта распределения фототока по поверхности окна $I_{\text{ph}}(x, y)$, где x, y — координаты СБОМ-зонда в плоскости поверхности окна), на котором наблюдаются особенности в виде локального увеличения I_{ph} относительно практически постоянного фона. Данные особенности были связаны с межзонными оптическими переходами из локализованных дырочных состояний островков GeSi в нелокализованные состояния зоны проводимости островков GeSi и в окружающую островки матрицу Si — переходы 1 и 2 на рис. 3 соответственно. В то же время наблюдаемый фон может быть связан с межзонным оптическим поглощением в смачивающем слое Ge: согласно [17], расчетная энергия пространственно непрямого оптического перехода из основного размерно-квантованного двумерного состояния тяжелых дырок в псевдоморфном слое Ge толщиной 5 нм в состоянии вблизи дна зоны проводимости Si при 300 К с поглощением ТО-фонона составляет ~ 810 мэВ. Кроме того, существенный вклад в фон может вносить поглощение излучения, прошедшее через слой островков GeSi и отраженное назад от нижнего металлизированного омического контакта мезоструктуры (см. рис. 1).

Одним из аргументов, позволяющих связать особенности в ФП-СБОМ-изображении с оптическим поглощением в островках GeSi, является характер распределения особенностей на ФП-СБОМ-изображении, схожий с характером распределения по размерам наноструктур GeSi на АСМ-изображении (ср. рис. 2, *a* и *b*). При этом поверхностная плотность особенностей больших и меньших размеров распределения фототока на СБОМ-изображении (рис. 2, *b*) по порядку величины соответствует поверхностной плотности куполообразных (dome) и крупных (super-dome) островков на рис. 2, *a*, что также может считаться дополнительным аргументом в пользу того, что наблюдаемые особенности на СБОМ-изображениях действительно связаны с

наноструктурами GeSi. В то же время наименьшие размеры особенностей, наблюдаемых на ФП-СБОМ-изображении (рис. 2, *b*), составляют ~ 100 нм, что, с одной стороны, соответствует типичным размерам куполообразных наноструктур GeSi/Si(001), а с другой — соответствует паспортным значениям диаметра апертуры a используемого СБОМ-зонда. Данный факт свидетельствует о возможности визуализации индивидуальных куполообразных наноструктур GeSi/Si(001) на ФП-СБОМ-изображениях.

Оценим величину фототока, генерируемого в результате межзонного поглощения излучения, исходящего из апертуры СБОМ-зонда, в единичном наноструктуре Ge_{0.35}Si_{0.65} в матрице Si. При мощности излучения в оптоволокне $P \approx 300$ мкВт и энергии фотона $h\nu \approx 0.954$ эВ (соответствующей длине волны возбуждающего излучения $\lambda_{\text{ex}} \approx 1310$ нм) для коэффициента оптического пропускания СБОМ-зонда $T \approx 10^{-3}$ (согласно паспортным данным) имеем оценку числа фотонов, исходящих из апертуры СБОМ-зонда в единицу времени, $\Phi = PT/h\nu \approx 1.2 \cdot 10^{12} \text{ с}^{-1}$. С другой стороны, считая, что все фотоны, исходящие из апертуры СБОМ-зонда, взаимодействуют с материалом островка (поскольку диаметр основания островка $D \sim a \sim 100$ нм), и принимая для частично релаксированного твердого раствора Ge_{0.35}Si_{0.65} значение коэффициента оптического поглощения на длине волны $\lambda_{\text{ex}} \approx 1310$ нм (300 К) $\alpha \approx 6.5 \text{ см}^{-1}$ [18] и эффективную высоту островка $h \approx 10$ нм, получаем долю излучения, поглощаемого островком, $ah \approx 6.5 \cdot 10^{-6}$. Согласно результатам работы [19], эффективность термической эмиссии дырок из наноструктур Ge_{0.35}Si_{0.65}/Si(001) при 300 К близка к 100%. В свою очередь, считая, что все фотовозбужденные в наноструктуре электроны достигают границы буферного слоя n^+ -Si, окончательно получаем оценку величины фототока при межзонном фотовозбуждении единичного куполообразного наноструктура GeSi $I_{\text{ph}} \sim e\Phi ah \approx 2$ пА, что по порядку величины соответствует уровню собственных шумов используемого предусилителя тока. Таким образом, проведенная оценка фототока показывает принципиальную возможность регистрации фотоотклика при фотовозбуждении единичного наноструктура GeSi/Si(001) при помощи аппаратных средств, использованных в настоящей работе. В то же время полученная оценка ожидаемого сигнала фотоотклика на уровне собственных шумов электронной схемы регистрации показывает необходимость использования синхронного детектирования. Действительно, в экспериментах без синхронного детектора (без модуляции интенсивности излучения ЛД) не удалось выявить никакого контраста на СБОМ-изображениях на фоне шумов.

Таким образом, вышеприведенные оценки, а также сопоставление данных, полученных методами АСМ, спектроскопии ФП и ФП-СБОМ, позволяют сделать вывод, что наблюдаемые на ФП-СБОМ-изображении особенности обусловлены межзонным оптическим поглощением в индивидуальных наноструктурах GeSi.

4. Заключение

В настоящей работе экспериментально демонстрируется возможность измерения фотоотклика индивидуальных наностроек GeSi/Si(001), встроенных в $p^+ - n$ -переход, при межзонном фотовозбуждении с энергией квантов, меньшей ширины запрещенной зоны Si, при помощи зонда сканирующего ближнепольного оптического микроскопа. Визуализированы отдельные наностройки на СБОМ-изображении поверхности $p^+ - n - n^+$ -фотодиода в режиме регистрации фототока короткого замыкания (ФП-СБОМ) с пространственным разрешением ~ 100 нм (порядка диаметра апертуры используемого СБОМ-зонда) при комнатной температуре. Результаты настоящей работы показывают, что СБОМ является перспективным универсальным методом исследования фотоэлектрических свойств индивидуальных полупроводниковых нанобъектов (наностроек, квантовых точек и т.п.).

Работа выполнялась в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ на выполнение НИР № 2014/134, проект № 3423.

При выполнении работы использовано оборудование Центра коллективного пользования — Научно-образовательного центра „Физика твердотельных наноструктур“ Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Список литературы

- [1] *Nano-Optics and Near-Field Optical Microscopy*, ed. by A.V. Zayats, D. Richards (Artech House, 2008).
- [2] М. Борн, Э. Вольф. *Основы оптики* (М., Наука, 1973) с. 439.
- [3] М.А. Paesler, P.J. Moyer. *Near-Field Optics: Theory, Instrumentation, and Applications* (Wiley Interscience, 1996) p. 7.
- [4] A. Cricenti, R. Generosi, C. Barchesi, M. Luce, M. Rinaldi. *Rev. Sci. Instrum.*, **69**, 3240 (1998).
- [5] N.H. Lu, Din Ping Tsai, C.S. Chang, T.T. Tsong. *Appl. Phys. Lett.*, **74**, 2746 (1999).
- [6] T. Guenther, V. Malyarchuk, J.W. Tomm, R. Müller, C. Lienau, J. Luft. *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 1463 (2001).
- [7] M.K. Herndon, W.C. Bradford, R.T. Collins, B.E. Hawkins, T.F. Kuech, D.J. Friedman, S.R. Kurtz. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 100 (2000).
- [8] Y. Harada, K. Imura, H. Okamoto, Y. Nishijima, K. Ueno, H. Misawa. *J. Appl. Phys.*, **110**, 104306 (2011).
- [9] В.Г. Шенгуров, В.Ю. Чалков, С.А. Денисов, С.П. Светлов, Д.В. Шенгуров. *Вакуумная техника и технология*, **21**, 45 (2011).
- [10] О.П. Пчеляков, Ю.Б. Болховитянов, А.В. Двуреченский, Л.В. Соколов, А.И. Никифоров, А.И. Якимов, Б. Фойхтлендер. *ФТП*, **34**, 1281 (2000).
- [11] Д.О. Филатов, М.В. Круглова, М.А. Исаков, С.В. Сипрова, М.О. Марычев, В.Г. Шенгуров, С.П. Светлов, В.Ю. Чалков, С.А. Денисов. *Изв. РАН. Сер. физ.*, **72**, 267 (2008).
- [12] А.И. Машин, А.В. Нежданов, Д.О. Филатов, М.А. Исаков, В.Г. Шенгуров, В.Ю. Чалков, С.А. Денисов. *ФТП*, **44**, 1552 (2010).
- [13] X.Z. Liao, J. Zou, D.J.H. Cockayne, J. Qin, Z.M. Jiang, X. Wang, R. Leon. *Phys. Rev. B*, **60**, 15605 (1999).
- [14] Д.О. Филатов, М.В. Круглова, М.А. Исаков, С.В. Сипрова, М.О. Марычев, В.Г. Шенгуров, В.Ю. Чалков, С.А. Денисов. *ФТП*, **42**, 1116 (2008).
- [15] D.O. Filatov, M.A. Isakov, V.G. Shengurov, M.O. Marychev, A.V. Nezhdanov, A.I. Mashin. In: *Photoluminescence: Applications, Types and Efficacy* (Nova Science, 2012) p. 1.
- [16] В.Я. Алешкин, Н.А. Бекин. *ФТП*, **31**, 171 (1997).
- [17] В.Я. Алешкин, Е.В. Демидов, Б.Н. Звонков, А.В. Мурель, Ю.А. Романов. *ФТП*, **25**, 1047 (1991).
- [18] J. Humlicek, M. Garriga, M.I. Alonso, M. Cardona. *J. Appl. Phys.*, **65**, 2827 (1989).
- [19] Д.О. Филатов, А.П. Горшков, Н.С. Волкова, Д.В. Гусейнов, Н.А. Алябина, М.М. Иванова, В.Ю. Чалков, С.А. Денисов, В.Г. Шенгуров. *ФТП*, **49**, 399 (2015).

Редактор Л.В. Шаронова

Investigation of photocurrent spatial distribution in the plane of Si $p-n$ junction with GeSi nanoislands by scanning near-field optical microscopy

D.O. Filatov¹, I.A. Kazantseva¹, V.G. Shengurov¹, V.Yu. Chalkov¹, S.A. Denisov¹, A.P. Gorshkov¹, V.P. Mishkin²

¹Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, 603950 Nizhniy Novgorod, Russia

²Ogarev Mordovia State University, 430005 Saransk, Russia

Abstract The spatial distribution of photocurrent in the plane of Si-based $p^+ - n$ junction with embedded self-assembled Ge_xSi_{1-x} ($x \approx 0.35$) nanoislands has been studied by scanning near-field optical microscopy (SNOM) with local photoexcitation by microscope probe at the emission wavelength 1310 nm (greater than the intrinsic photosensitivity red edge for Si). The inhomogeneities related to the interband optical absorption in separate GeSi nanoislands have been observed in the photocurrent images (the maps of spatial distribution of the photocurrent in the input window plane of the $p^+ - n$ -photodiodes). The results of the present study demonstrate the possibility of visualization of individual GeSi nanoislands in the photocurrent images with the spatial resolution ~ 100 nm.