

07

Телеграфный шум в туннельных $\text{Si } p-n$ -переходах с наноструктурами GeSi

© Д.О. Филатов, И.А. Казанцева, В.Г. Шенгуров, В.Ю. Чалков,
С.А. Денисов, Н.А. Алябина

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород
E-mail: dmitry_filatov@inbox.ru

Поступило в Редакцию 10 декабря 2015 г.

Экспериментально обнаружена генерация телеграфного шума в туннельных p^+-n^+ -переходах на базе Si со встроенными в них самоформирующимися наноструктурами GeSi. Эффект связывается с блокированием туннелирования электронов через индивидуальные наноструктуры GeSi вследствие генерации и термической эмиссии дырок в/из наноструктур.

Телеграфный шум (англ. Random Telegraph Signal, RTS) наблюдается в различных полупроводниковых электронных приборах малых размеров (МДП-транзисторах, туннельных МДП-диодах и т. п.) и проявляется в хаотическом изменении сопротивления прибора во времени между двумя дискретными значениями [1]. Природа телеграфного шума обычно связывается с перезарядкой глубоких ловушек в полупроводнике или диэлектрике [2]. В настоящее время интерес к данному эффекту обусловлен тем, что перезарядка единичных глубоких уровней в подзатворных диэлектриках современных МДП-транзисторов (с размерами канала ~ 100 nm и менее) может существенно ухудшать характеристики интегральных схем на их основе [3].

В данной работе телеграфный шум экспериментально наблюдался в туннельных p^+-n^+ -переходах на базе Si со встроенными в них самоформирующимися наноструктурами GeSi. Задачей работы являлось экспериментальное исследование процессов межзонного туннелирования электронов через наноструктуры GeSi, встроенные в туннельный p^+-n^+ -переход. Структуры для исследований были выращены на подложке $n^+-\text{Si}(001)$ марки КЭМ-0.005 комбинированным методом сублиминационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ) Si и газофазной эпитаксии (ГФЭ) Ge при низком давлении [4]. Базовое давление в росто-

вой камере составляло $\sim 1 \cdot 10^{-8}$ Торр. Слои Si n - и p -типа выращивались из сублимационных источников, легированных примесями соответствующего типа. Осаждение буферного слоя n^+ -Si толщиной ≈ 200 nm, легированного Р (концентрация примеси $N_P \approx 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), производилось при температуре подложки $T_g \approx 1000^\circ\text{C}$. Самоформирующиеся nanoостровки GeSi выращивались на поверхности буферного слоя путем напуска в ростовую камеру германа (GeH_4) под давлением $p_g \approx 9 \cdot 10^{-4}$ Торр, где он разлагался пиролизически на поверхности роста, нагретой до $T_g \approx 700^\circ\text{C}$. Как было установлено ранее методом обратного резерфордского рассеяния [4], номинальная толщина осажденного слоя Ge в условиях роста, при которых формировались nanoостровки GeSi в диодных p^+ - n^+ -структурах, составляла ≈ 10.3 ML (ML — монослой, для псевдомоночного слоя Ge/Si(001) $1 \text{ ML} \approx 0.303 \text{ nm}$).

Состав материала nanoостровков GeSi/Si(100), выращенных комбинированным методом СМЛЭ–ГФЭ в различных условиях, ранее изучался методом конфокальной рамановской микроскопии [4]. Было установлено, что атомная доля Ge x в материале nanoостровков $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ /Si(001), выращенных при $T_g \approx 700^\circ\text{C}$, составляет 0.5 ± 0.1 . Наличие Si в материале nanoостровков обусловлено диффузией из подложки в процессе роста, что понижает упругую энергию системы „островок–подложка“ [5].

Nanoостровки GeSi зарастивались покровным слоем p^+ -Si толщиной ≈ 30 nm, легированным В (концентрация примеси $N_B \approx 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), при $T_g \approx 450^\circ\text{C}$. Для определения морфологии nanoостровков GeSi выращивались структуры, в которых nanoостровки GeSi формировались на поверхности буферного слоя в тех же условиях, что и в соответствующих диодных p^+ - n^+ -структурах. Морфология поверхностных nanoостровков GeSi изучалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) в контактном режиме в атмосферных условиях при помощи АСМ Solver Pro производства компании NT-MDT (Россия). Использовались Si АСМ-зонды NT-MDT CSG-01 с радиусом кривизны острия < 10 nm. Установлено, что поверхностные nanoостровки GeSi/Si(001), выращенные в указанных выше условиях, имеют бимодальное распределение по размерам (рис. 1). Наряду с куполообразными островками (dome-островками) с типичными для островков данной формы латеральными размерами $D \approx 100$ nm, высотой $h = 12\text{--}15$ nm и поверхностной плотностью $N_s \approx 4 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-2}$, на

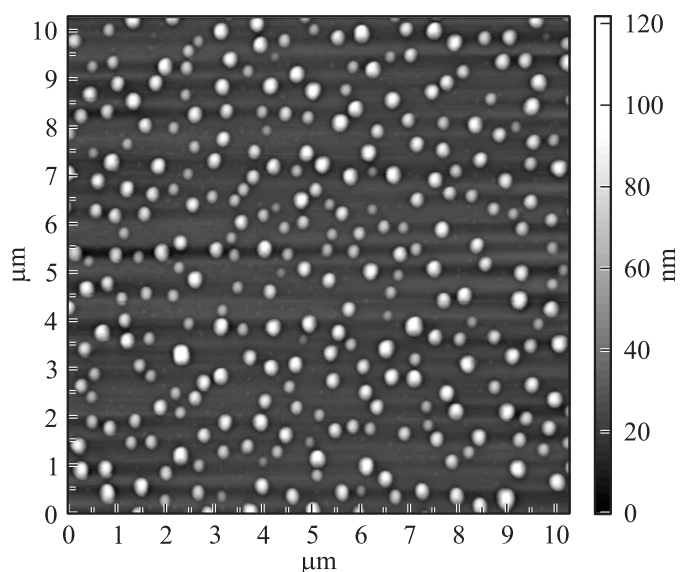


Рис. 1. АСМ-изображение гетероструктуры с поверхностными наноструктурами GeSi/Si(001).

поверхности наблюдаются более крупные дислоцированные островки (super-dome-островки) с латеральными размерами $D \approx 230$ nm, высотой $h \approx 120$ nm и поверхностной плотностью $N_s \approx 1 \cdot 10^8$ cm⁻².

На базе диодных $p^+ - n^+$ -структур с наноструктурами GeSi стандартным методом оптической фотолитографии с применением жидкостного травления были изготовлены меза-диоды с диаметром мез 300 μm. Электрические параметры диодов измерялись с использованием АСМ-контроллера NT-MDT Solver BL022MT. Измерения силы тока через диод I проводились при помощи преобразователя ток–напряжение на базе прецизионного малошумящего операционного усилителя Burr Brown OPA 124U, выход которого подключался к пользовательскому входу контроллера Solver BL022MT. Уровень собственных шумов измерительной цепи составлял ~ 1 pA. В качестве источника напряжения U использовался прецизионный 22-разрядный цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) контролле-

ра Solver BL022MT. Осциллограммы силы тока через диод $I(t)$ регистрировались при помощи цифрового осциллографа в составе программного обеспечения NT-MDT Nova v. 1138, управляющего контроллером Solver BL BL022MT.

На рис. 2, *a* приведена вольт-амперная характеристика (ВАХ) диода при обратном смещении. В области небольших обратных напряжений $U = -20 \div -40$ мВ на ВАХ наблюдается гистерезис. На рис. 2, *b* приведена осциллограмма силы тока через диод $I(t)$ при обратном смещении $U \approx -23$ мВ, на которой наблюдается хаотическое переключение между двумя значениями I , характерное для телеграфного шума. Наличие гистерезиса на ВАХ и вид осциллограммы на рис. 2, *b* можно объяснить с помощью зонной диаграммы.

На рис. 3 приведена расчетная зонная диаграмма $p^+ - n^+$ -перехода со встроенным наноструктуром $\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ высотой $h = 10$ нм (для случая, когда координатная ось z проходит через вершину островка) в равновесии при 300 К. Зонная диаграмма рассчитывалась на основании известного решения уравнения Пуассона для $p - n$ -перехода в приближении полностью обедненной области пространственного заряда (ОПЗ) [6]. Граничные условия для потенциала на границах ОПЗ определялись из уравнений электронейтральности для квазинейтральных областей $n^+ - \text{Si}$ и $p^+ - \text{Si}$ [7]. Значения разрывов зоны проводимости ΔE_c и валентной зоны ΔE_v на границе GeSi/Si вычислялись по модели [8] с учетом значений упругой деформации материала островков, полученных в [5]. Размерным квантованием дырок в наноструктурах GeSi пренебрегали, поскольку оценки показывают, что при $h > 10$ нм эффект размерного квантования не оказывает существенного влияния на энергетический спектр плотности состояний тяжелых дырок [5].

Как видно из рис. 3, при определенных размерах наноструктур возможна ситуация, когда энергия потолка валентной зоны в наноструктурах GeSi близка к энергии дна зоны проводимости в квазинейтральной области $n^+ - \text{Si}$. Таким образом, при небольших значениях обратного смещения на диоде возможны туннельные межзонные переходы электронов из занятых состояний вблизи потолка валентной зоны в наноструктурах GeSi в свободные состояния вблизи дна зоны проводимости в квазинейтральной области $n^+ - \text{Si}$ (показано прямой стрелкой на рис. 3). При этом оставшаяся в валентной зоне GeSi дырка остается локализованной в островке. Заряд избыточной дырки приводит к понижению энергии потолка валентной зоны островка GeSi ,

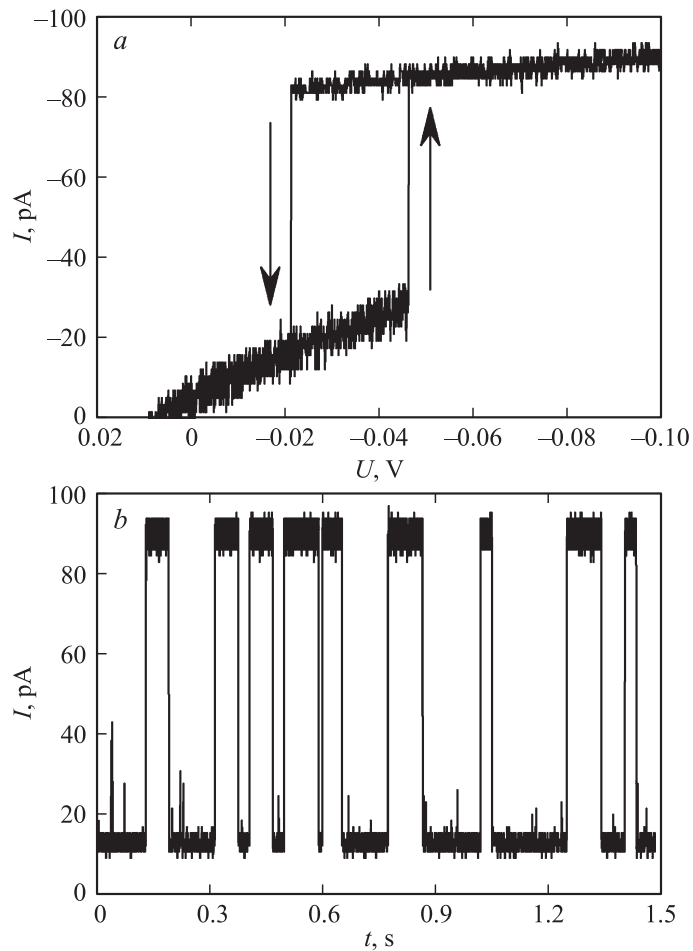


Рис. 2. Генерация телеграфного шума $p^+ - n^+$ -диода на базе Si со встроенными наноструктурами GeSi (300 K): *a* — вольт-амперная характеристика; *b* — осциллограмма силы электрического тока при смещении $U = 23$ mV.

так что она становится ниже дна зоны проводимости Si в n^+ -области. Как следствие, туннелирование электронов из островка GeSi в n^+ -Si становится невозможным, до тех пор пока избыточная дырка не

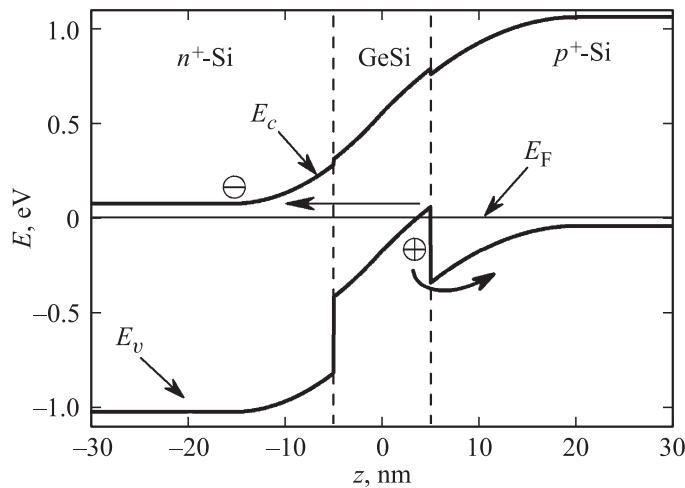


Рис. 3. Расчетная зонная диаграмма структуры $p^+ \text{-Si}/\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}/n^+ \text{-Si}(001)$ в равновесном состоянии (300 K).

будет выброшена из островка за счет термической эмиссии (показано изогнутой стрелкой на рис. 3). Следует подчеркнуть, что здесь и далее речь идет об избыточной концентрации носителей, усредненной по промежутку времени, значительно превышающему время термической генерации/рекомбинации. Время жизни избыточной дырки в наноструктуре GeSi относительно термической эмиссии τ можно оценить, используя основное уравнение нестационарной спектроскопии глубоких уровней [9]

$$\tau = \frac{g}{v_t \sigma N_v} \exp\left(\frac{\Delta E_v}{kT}\right), \quad (1)$$

где g — фактор вырождения в вершине валентной зоны в островках GeSi, N_v — эффективная плотность состояний в валентной зоне Si, v_t — средняя тепловая скорость дырок в валентной зоне Si, σ — сечение захвата дырки островком GeSi, T — температура, k — постоянная Больцмана. Следует подчеркнуть, что наноструктуры GeSi_{1-x} имеют естественную дисперсию как по размерам, так и по x . С увеличением модуля напряжения обратного смещения $|U|$ в первую очередь начинается туннелирование из наноструктурки с наибольшим

значением ΔE_v (т.е. с наибольшим значением x в материале островка). Принимая для $x = 0.6$ $\Delta E_v = 0.55$ eV [8], $g = 4$, $\sigma \sim 10^{-15}$ cm² [10], получаем оценку $\tau \approx 5 \cdot 10^{-2}$ s, что по порядку величины согласуется со значениями среднего периода переключения силы тока через диод I между двумя значениями ($\sim 10^{-2}$ s, рис. 2, *b*).

Величину понижения потенциала наноструктуры GeSi $\Delta\phi$ при зарядке его избыточной дыркой можно оценить по известной формуле для потенциала кулоновской блокады (в асимметричной схеме кулоновского острова между двумя берегами): $\Delta\phi \sim e/C$ [11], где e — элементарный заряд, C — емкость наноструктуры GeSi. Оценка последней по известной формуле для емкости уединенного шара $C = 2\pi\epsilon\epsilon_0 D$, где ϵ — статическая диэлектрическая проницаемость среды (для Si $\epsilon \approx 11.8$ [12]), ϵ_0 — электрическая постоянная, D — диаметр шара, дает для $D = 10$ nm $C \approx 6.6 \cdot 10^{-18}$ F и соответственно $\Delta\phi \approx 24$ mV. Данное значение $\Delta\phi$ хорошо согласуется со значением ширины петли гистерезиса на ВАХ (рис. 2, *a*).

Таким образом, вышеприведенные оценки показывают, что наличие гистерезиса на ВАХ $p^+ - n^+$ -диода с наноструктурами GeSi и телеграфный шум в осциллограммах силы тока через диод могут быть связаны с процессами зарядки наноструктур GeSi дырками и термической эмиссии дырок из островков.

Работа выполнялась в рамках государственного задания № 2014/134, проект 3423 Министерства образования и науки РФ. При выполнении работы использовано оборудование Центра коллективного пользования — Научно-образовательного центра „Физика твердотельных наноструктур“ Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Список литературы

- [1] *Simoen E., Kaczer B., Toledano-Luque M., Claeys C.* // ECS Transactions. 2011. V. 39. N 1. P. 3.
- [2] *Kogan Sh.* Electronic Noise and Fluctuations in Solids. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 376 p.
- [3] *Luo M., Wang R., Guo S.* et al. // IEEE Trans. Electron Devices. 2015. V. 62. N 6. P. 1725.

- [4] *Filatov D.O.* et al. // Photoluminescence: Applications, Types and Efficacy. New York: Nova Science, 2012. P. 1.
- [5] *Novikov A.V., Andreev B.A., Vostokov N.V.* et al. // Mat. Sci. Eng. B. 2002. V. 89. N 1–3. P. 62.
- [6] *Шалимова К.В.* Физика полупроводников. М.: Энергоатомиздат, 1985. 392 с.
- [7] *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. Т. 1. 456 с. / *Sze S.M.* Physics of Semiconductor Devices. Hoboken: Wiley-Interscience, 1981. 880 p.
- [8] *Алёшкин В.Я., Бекин Н.А.* // ФТП. 1997. Т. 31. В. 2. С. 171.
- [9] *Lang D.V.* // J. Appl. Phys. 1974. V. 45. N 7. P. 3023.
- [10] *Yakimov A.I., Dvurechenskii A.V., Nikiforov A.I., Pchelyakov O.P.* // Phys. Low-Dim. Struct. 1999. N 3/4. P. 99.
- [11] *Лухарев К.К.* // Микроэлектроника. 1987. Т. 16. N 3. С. 195.
- [12] <http://matprop.ru/>