

07.3

Планарные (латеральные) светоизлучающие диоды с Ge(Si)-наноструктурами, встроенными в фотонный кристалл

© В.Б. Шмагин¹, А.В. Новиков^{1,2}, А.Н. Яблонский¹, М.В. Степихова¹, Д.В. Юрасов¹, А.Н. Михайлов², Д.И. Тетельбаум², Е.Е. Родякина^{3,4}, Е.Е. Морозова¹, Д.В. Шенгуров¹, С.А. Краев¹, П.А. Юнин¹, М.В. Шалеев¹, А.И. Белов²

¹ Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

³ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

⁴ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

E-mail: shm@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 29 августа 2023 г.

В окончательной редакции 29 августа 2023 г.

Принято к публикации 25 сентября 2023 г.

С помощью локальной ионной имплантации на основе структур с самоформирующимися Ge(Si)-островками получены латеральные $p-i-n$ -светодиоды. Использование предварительной аморфизации и твердофазной рекристаллизации имплантированных областей позволило снизить температуру активации введенной примеси до 600°C , что существенно уменьшило негативное влияние постимплантационного отжига на сигнал люминесценции Ge(Si)-островков при комнатной температуре в области $1.3-1.55\ \mu\text{m}$. Сигнал электролюминесценции Ge(Si)-островков увеличен более чем на порядок за счет встраивания фотонных кристаллов в i -область диодов.

Ключевые слова: кремний, светодиоды, Ge(Si)-островки, фотонные кристаллы, имплантация.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.22.56592.19713

Одной из проблем, стоящих на пути развития современной кремниевой оптоэлектроники, является необходимость создания источника излучения в спектральном диапазоне $1.3-1.55\ \mu\text{m}$, совместимого с кремниевой интегральной технологией. Для решения этой задачи рассматриваются различные светоизлучающие гетероструктуры IV группы, среди которых можно выделить структуры с самоформирующимися Ge(Si)-наноструктурами. Во-первых, данные структуры демонстрируют сигнал люминесценции при комнатной температуре в указанном спектральном диапазоне [1]. Во-вторых, структуры с Ge(Si)-островками не требуют для своего формирования толстых буферных слоев и могут быть выращены непосредственно на подложках „кремний на изоляторе“ [2], что значительно упрощает их интеграцию с кремниевыми планарными волноводами.

Однако из-за непрямозонного характера строения зон Si и Ge эффективность излучательной рекомбинации в структурах с Ge(Si)-наноструктурами невысока. Для ее повышения предлагается использовать различные резонаторы, включая двумерные фотонные кристаллы (ФК) [3–5]. Продемонстрировано, что взаимодействие Ge(Si)-наноструктур с модами ФК позволяет на порядок увеличить интенсивность сигнала люминесценции островков при их оптической накачке [5]. Однако для практических приложений необходимо реализовать электрическую накачку ФК, сформированных на структурах с Ge(Si)-наноструктурами. При этом желательно, чтобы толщина структур была сопоставима с толщиной планарного кремниевых волновода ($220-250\ \text{nm}$). Ранее

для решения этой задачи было предложено использовать планарные $p-i-n$ -диоды, в i -область которых встраивались ФК с микрорезонатором [6]. Создание легированных областей диодов было выполнено посредством локальной имплантации примесей [6]. Но используемые в [6] высокие ($\geq 1000^\circ\text{C}$) температуры постимплантационного отжига привели к диффузионному размытию Ge(Si)-островков, падению интенсивности их сигнала люминесценции при комнатной температуре и его спектральному сдвигу в область люминесценции Si [6]. Кроме того, использование ФК с микрорезонатором ограничивало излучающий объем структуры и, следовательно, мощность созданных светодиодов [6].

В настоящей работе сообщается о формировании планарных (латеральных) светоизлучающих p^+-i-n^+ -диодов с Ge(Si)-наноструктурами, в i -область которых были встроены ФК без микрорезонатора. Использование таких ФК значительно увеличивает излучающий объем, а взаимодействие островков с модами ФК приводит к существенному росту интенсивности их электролюминесценции (ЭЛ) при комнатной температуре. За счет предварительной аморфизации и последующей твердофазной рекристаллизации температура постимплантационного отжига контактных областей диодов была снижена до 600°C . Это позволило существенно снизить негативное влияние технологических этапов формирования диода на излучательные свойства Ge(Si)-островков и получить светодиоды, излучающие при комнатной температуре в диапазоне длин волн $1.3-1.55\ \mu\text{m}$.

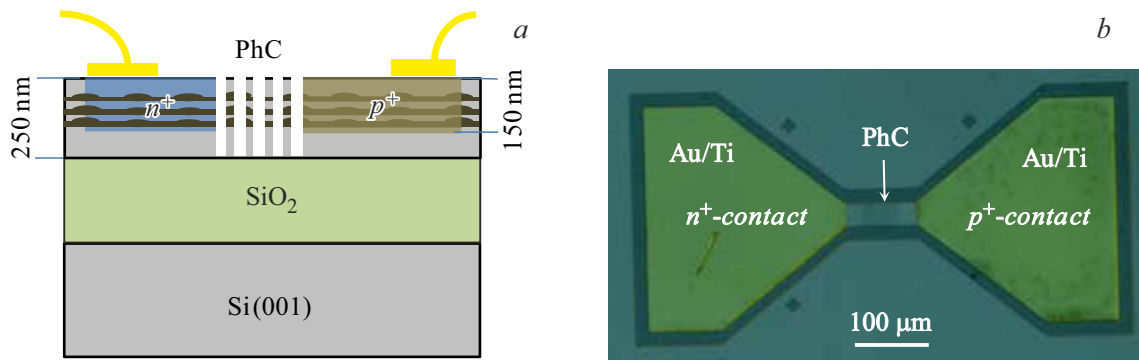


Рис. 1. *a* — схематическое представление сформированных планарных диодов. Указана общая толщина структуры над окислом и толщина аморфизованного слоя. *b* — полученный с помощью сканирующего электронного микроскопа снимок диодов с встроенным в *i*-область ФК (PhC).

Планарные $p^+ - i - n^+$ -диоды с ФК, встроенными в *i*-область, были сформированы на структуре с Ge(Si)-наноостровками, выращенной методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке „кремний на изоляторе“. Выращенная структура содержала буферный и покровный слои Si, между которыми была сформирована решетка из пяти слоев Ge(Si)-наноостровков, разделенных слоями Si толщиной 15 nm. Структура была выращена при температуре 600°C, оптимальной для получения максимального сигнала люминесценции Ge(Si)-островков при комнатной температуре [1]. Суммарная толщина структуры над слоем окисла составляла 250 nm (рис. 1, *a*).

Локальные n^+ - и p^+ -области для омических контактов к планарным диодам создавались имплантацией ионов фосфора и бора соответственно через маску из фоторезиста. При формировании n^+ -областей энергия и доза ионов P^+ ($15 \text{ keV}/4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2} + 60 \text{ keV}/1.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) выбирались таким образом, чтобы в результате имплантации был аморфизован приповерхностный слой структуры толщиной $\sim 150 \text{ nm}$ (рис. 1, *a*). При формировании p^+ -областей перед имплантацией ионов B^+ ($20 \text{ keV}/1.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) осуществлялась предварительная имплантация ионов фтора F^+ ($35 \text{ keV}/3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$), обеспечивающая аморфизацию p^+ -области на такую же глубину. Кристаллический слой толщиной $\sim 100 \text{ nm}$, оставшийся после имплантации на границе структуры и захороненного окисла (рис. 1, *a*), выступал в качестве затравочного при твердофазной рекристаллизации в процессе постимплантационного отжига [7]. Согласно рентгенодифракционным и электрофизическим измерениям, использование твердофазной рекристаллизации позволило понизить температуру восстановления кристаллического качества имплантированных областей и активации введенной примеси со стандартных для Si-технологии 800–1100°C до 600°C — температуры роста Ge(Si)-островков.

Металлические контакты к имплантированным областям формировались после термического отжига с использованием „взрывной“ литографии и осаждения

слоев Au/Ti. Слоевое сопротивление p^+ - и n^+ -областей в диодах, отожженных при 600°C, составляло 100–150 и 40–45 Ω/\square соответственно. Увеличение температуры отжига до 1000°C приводило к уменьшению сопротивления p^+ -областей в ~ 1.5 раза и не меняло сопротивление n^+ -областей. После формирования контактов с помощью электронной литографии и плазмохимического травления в *i*-областях части диодов были сформированы ФК. Параметры ФК (период a и радиус отверстий r) выбирались таким образом, чтобы в спектральный диапазон люминесценции Ge(Si)-островков попадало несколько мод ФК [5]. Размер ФК ($50 \times 50 \mu\text{m}$) превышал размер *i*-области диодов ($20 \times 30 \mu\text{m}$), поэтому ФК занимал не только всю *i*-область, но и часть n^+ - и p^+ -областей. На финальном шаге по периметру диодов на всю глубину структуры (до слоя SiO_2) протравливались меза-канавки, которые ограничивали область протекания тока (рис. 1, *b*). Спектры ЭЛ диодов измерялись в режиме постоянного тока с использованием $10\times$ оптического объектива, фурье-спектрометра и охлаждаемого Ge-детектора.

Полученные диоды демонстрируют диодные вольт-амперные характеристики как до, так и после формирования ФК (рис. 2, *a*). Было обнаружено, что формирование ФК сопровождается существенным (до порядка величины) уменьшением прямого тока через диод при том же напряжении на нем (рис. 2, *a*). Это уменьшение тока связывается с уменьшением поперечного сечения *i*-области (вследствие формирования ФК) и с дополнительной рекомбинацией носителей заряда на развитой поверхности ФК. Приложение положительного смещения к подложке (относительно p^+ - и n^+ -областей диода) позволяет значительно увеличить ток через диод (рис. 2, *a*).

Было обнаружено, что постимплантационный отжиг диодов при 600°C оказывает незначительное влияние на люминесценцию Ge(Si)-островков при комнатной температуре и в спектрах ЭЛ таких диодов без ФК наблюдается широкий сигнал в области 1.3–1.7 μm (рис. 2, *b*). В то же время даже кратковременный отжиг

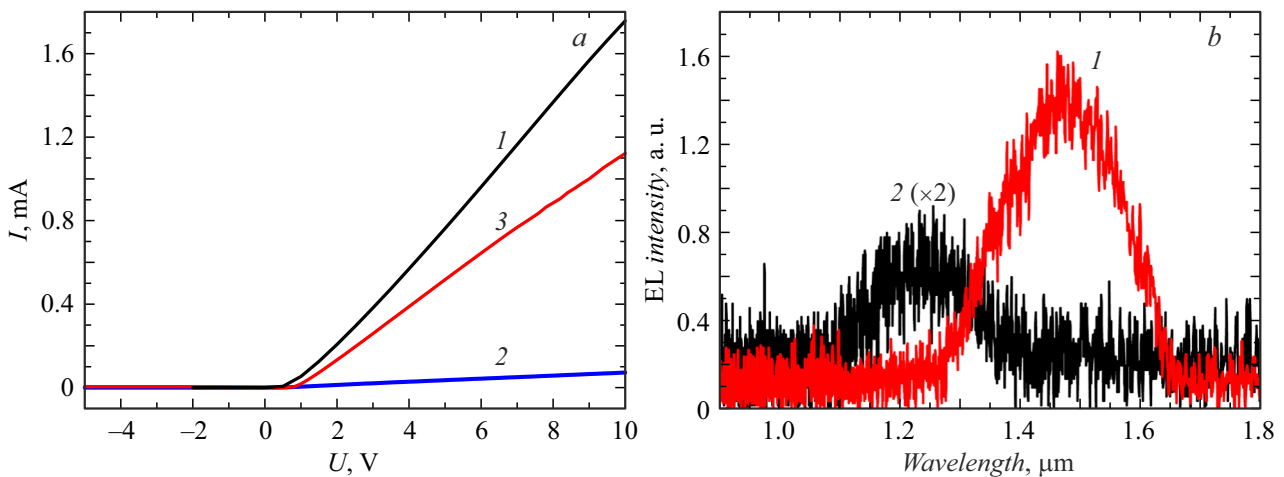


Рис. 2. *a* — вольт-амперные характеристики диодов до (1) и после (2, 3) формирования ФК при нулевом смещении на подложке (1, 2) и при подаче на подложку положительного смещения 100 В (3). Диоды отожжены при 600°C. *b* — спектры микро-ЭЛ диодов без ФК, отожженных при 600°C (1) и 1000°C (2), измеренные при комнатной температуре при токе 2 мА. Спектр диода, отожженного при 1000°C, для наглядности умножен на 2.

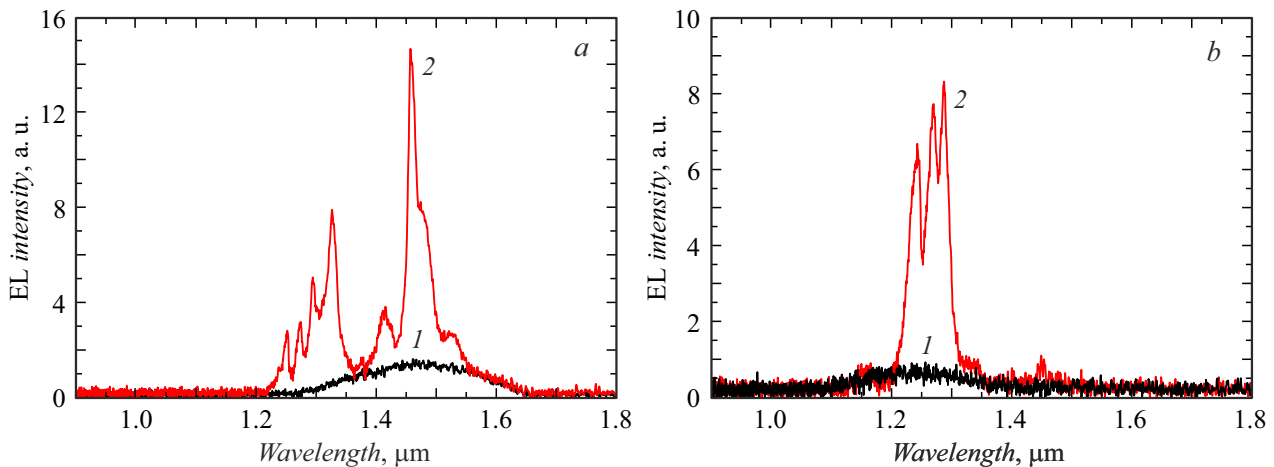


Рис. 3. Спектры микро-ЭЛ диодов без ФК (1) и с ФК (2), отожженных при 600 (*a*) и 1000°C (*b*). Спектры измерены при комнатной температуре при токе накачки 2 мА. Спектры диодов с ФК измерялись при подаче положительного смещения на подложку. Параметры ФК: тип решетки — гексагональная, период $a = 675$ нм, соотношение $r/a = 0.15$ (r — радиус отверстий ФК).

диодов при 1000°C приводит к существенному падению интенсивности сигнала ЭЛ островков и его смещению в коротковолновую область спектра (рис. 2, *b*). Данные изменения вызваны диффузионным размытием наноструктур в процессе отжига [8]. Формирование ФК в *i*-области диодов приводит к значительному (более чем на порядок) возрастанию интенсивности сигнала ЭЛ Ge(Si)-островков на длинах волн, соответствующих различным модам ФК (рис. 3). Снижение температуры постимплантационного отжига с 1000 до 600°C позволило получить интенсивный сигнал ЭЛ Ge(Si)-островков не только в области 1.3 μm , как в работе [6], но и в области 1.5 μm (рис. 3, *a*). При этом наиболее интенсивные линии ЭЛ в диодах с ФК наблюдаются вблизи максимума полосы люминесценции островков в диодах без ФК (рис. 3). Из-за коротковолнового сдвига

сигнала ЭЛ островков при увеличении температуры отжига в диодах с одинаковыми ФК, отожженных при разных температурах, наибольшая интенсивность наблюдается для разных линий (мод) ФК. Так, в диоде, отожженном при 600°C, наиболее интенсивной является линия, расположенная в области 1.5 μm (рис. 3, *a*), в то время как остальные, более коротковолновые линии ФК ($\leq 1.3 \mu\text{m}$) обладают гораздо меньшей интенсивностью, поскольку соответствуют краю полосы люминесценции островков (рис. 3, *a*). В то же время для диода, отожженного при 1000°C, именно эти (коротковолновые) линии ФК соответствуют максимуму полосы ЭЛ островков (рис. 3, *b*), поэтому являются наиболее интенсивными, тогда как длинноволновые ($> 1.3 \mu\text{m}$) линии ФК для данного диода практически не наблюдаются (рис. 3, *b*). Таким образом, изменение температуры отжига струк-

тур позволяет менять спектральное положение полосы ЭЛ Ge(Si)-островков, а за счет выбора параметров ФК получать интенсивный сигнал ЭЛ на модах ФК в практически важном спектральном диапазоне 1.3–1.55 μm .

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственных заданий № 0030-2021-0019 и FWGW-2022-0007 с использованием оборудования ЦКП „Физика и технология микро- и наноструктур“ ИФМ РАН, ЦКП „Наноструктуры“ ИФП СО РАН и ЦКП ВТАН НГУ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Н.В. Востоков, Ю.Н. Дроздов, З.Ф. Красильник, Д.Н. Лобанов, А.В. Новиков, А.Н. Яблонский, Письма в ЖЭТФ, **76** (6), 425 (2002). [N.V. Vostokov, Yu.N. Drozdov, Z.F. Krasil'nik, D.N. Lobanov, A.V. Novikov, A.N. Yablonskii, JETP Lett., **76** (6), 365 (2002). DOI: 10.1134/1.1525038].
- [2] M. Brehm, M. Grydlik, Nanotechnology, **28**, 392001 (2017). DOI: 10.1088/1361-6528/aa8143
- [3] V. Rutckaia, F. Heyroth, A. Novikov, M. Shaleev, M. Petrov, J. Schilling, Nano Lett., **17**, 6886 (2017). DOI: 10.1021/acs.nanolett.7b03248
- [4] M. Schatzl, F. Hackl, M. Glaser, P. Rauter, M. Brehm, L. Spindlberger, A. Simbula, M. Galli, Th. Fromherz, F. Schäffler, ACS Photon., **4**, 665 (2017). DOI: 10.1021/acsphotonics.6b01045
- [5] S.A. Dyakov, M.V. Stepikhova, A.A. Bogdanov, A.V. Novikov, D.V. Yurasov, M.V. Shaleev, Z.F. Krasilnik, S.G. Tikhodeev, N.A. Gippius, Laser Photon. Rev., **15**, 2000242 (2021). DOI: 10.1002/lpor.202000242
- [6] X. Xu, T. Chiba, T. Nakama, T. Maruizumi, Y. Shiraki, Appl. Phys. Express, **5**, 102101 (2012). DOI: 10.1143/APEX.5.102101
- [7] L. Pelaz, L.A. Marqués, J. Barbolla, J. Appl. Phys., **96**, 5947 (2004). DOI: 10.1063/1.1808484
- [8] G. Capellini, M. De Seta, F. Evangelisti, Appl. Phys. Lett., **78**, 303 (2001). DOI: 10.1063/1.1339263