

Усиленная фотолюминесценция сильно легированных слоев Ge/Si(001) *n*-типа проводимости

© Д.С. Прохоров¹, В.Г. Шенгуров¹, С.А. Денисов¹, Д.О. Филатов¹, А.В. Здравейцев¹,
В.Ю. Чалков¹, А.В. Зайцев¹, М.В. Ведь¹, М.В. Дорохин¹, Н.А. Байдакова²

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

² Институт физики микроструктур Российской академии наук,
607680 Нижний Новгород, Россия

E-mail: dprokhrov95@mail.ru

Поступила в Редакцию 24 апреля 2019 г.

В окончательной редакции 29 апреля 2019 г.

Принята к публикации 29 апреля 2019 г.

Исследованы спектры фотолюминесценции эпитаксиальных структур n^+ -Ge:P/Si(001), выращенных методом горячей проволоки и легированных фосфором из источника на базе термически разлагаемого GaP до максимальной концентрации электронов $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Изучено влияние на спектры фотолюминесценции уровня легирования слоев n^+ -Ge:P, а также быстрого термического отжига. Продемонстрирована перспективность использования эпитаксиальных слоев n^+ -Ge:P/Si(001), выращенных методом горячей проволоки, в качестве активных областей светоизлучающих оптоэлектронных приборов ближнего инфракрасного диапазона.

Ключевые слова: эпитаксиальные слои германия на кремнии, метод горячей проволоки, легирование, фотолюминесценция.

DOI: 10.21883/FTP.2019.09.48142.26

1. Введение

В последние годы наблюдается значительный прогресс в кремниевой оптоэлектронике (Si нанофотонике), в частности, в связи с применением гетероструктур Ge/Si(001). Одной из важнейших задач кремниевой оптоэлектроники является создание оптоэлектронных приборов на базе Si, которые могут быть монолитно интегрированы в интегральные схемы обработки информации. Необходимо отметить, что проблема реализации светоизлучающих приборов на основе Si еще остается нерешенной. Альтернативным Si и совместимым с ним материалом является Ge, который считается перспективным кандидатом для использования его в качестве материала активной области оптоэлектронных приборов. Деформация растяжения в совокупности с высокой концентрацией легирующей донорной примеси $N_d > (5-7) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ позволяют получить квазипрямозонное поведение Ge [1]. Ранее идея совместного использования деформации растяжения в Ge-слоях и высокого уровня легирования донорной примесью для заполнения Г-долины в зоне проводимости Ge была развита в работах [2,3]. Была продемонстрирована электролюминесценция Ge-светодиодов и получен лазер с оптической накачкой [4], однако его квантовая эффективность оставалась еще довольно низкой, что, возможно, связано с недостаточно высоким уровнем легирования активной области.

Для роста высококачественных эпитаксиальных слоев (ЭС) Ge/Si(001) значительной толщины (до 5 мкм) с плотностями прорастающих дислокаций $\sim 10^5 \text{ см}^{-2}$

нами был развит метод горячей проволоки (англ. Hot Wire Chemical Vapor Deposition — HW CVD) [5]. Также была разработана методика легирования ЭС Ge/Si(001) потоком молекул фосфора (P_2), формируемого путем термического разложения соединения GaP в эффузионной ячейке, в процессе выращивания методом горячей проволоки [6], что позволило достичь концентраций электронов в ЭС n^+ -Ge:P/Si(001) $n \sim 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ с сохранением высокого структурного совершенства ЭС.

В настоящей работе сообщается об исследовании люминесцентных свойств ЭС n^+ -Ge:P/Si(001), выращенных с использованием вышеуказанных методов.

2. Методика эксперимента

Рост ЭС n^+ -Ge:P/Si(001) осуществляли в сверхвысоковакуумной установке, аналогичной описанной в [7]. В камеру роста напускался моногерман GeH_4 до давления $\sim 2 \cdot 10^{-4}$ Торр, который разлагался на полоске из Ta, разогретой до 1400–1500°C пропусканием через нее постоянного электрического тока. Температура подложки в ходе осаждения Ge составляла $\sim 325^\circ\text{C}$. Легирование фосфором (P_2) проводилось путем его селективного испарения (сублимации) из твердой фазы GaP, находящегося в BN тигле стандартной эффузионной ячейки, нагреваемой до 750–785°C.

Кристаллическая структура ЭС n^+ -Ge:P/Si(001) изучалась методом двухкristальной рентгеновской дифрактометрии при помощи дифрактометра Discover D8 производства компании Bruker (Германия). Концентрацию

Условия роста, структурные и электрофизические параметры ЭС n^+ -Ge:P/Si(001)

| Образец | T_{Ta} , °C | T_c , °C | d , мкм | FWHM, угл.мин | N_P , 10^{19} см $^{-3}$ | n , 10^{19} см $^{-3}$ | μ , см 2 /В·с |
|---------|---------------|------------|-----------|---------------|------------------------------|----------------------------|----------------------|
| 716 | 1400 | 775 | 1.06 | 3.24 | 4.8 | 8.3 | 171 |
| 717 | —/— | —/— | 1.60 | 2.47 | 3.1 | 3.1 | 141 |
| 718 | —/— | 785 | 1.00 | 3.72 | 13 | 9.7 | 139 |
| 739 | 1500 | 750 | 1.35 | 3.7 | 3.6 | 7.4 | 160 |
| 741 | —/— | 760 | 1.65 | 3.56 | 4.2 | 5.5 | 117 |
| 742 | —/— | —/— | 1.10 | 1.85 | 7.9 | 11 | 144 |
| 744 | —/— | 770 | 1.10 | 3.54 | 3.7 | — | — |

и подвижность носителей заряда (электронов) находили из измерений эффекта Холла методом Ван дер Пау. Измерения эффекта Холла проводились с использованием установки Nanometrics HL5500PC. Измерения фотолюминесценции (ФЛ) гетероструктур n^+ -Ge:P/Si(001) проводились при 300 К в диапазоне длин волн 1.0–2.1 мкм с использованием монохроматора ACTON 2300i и InGaAs-фотодиода (Hamamatsu G12182-110K). В качестве источника возбуждающего излучения использовался полупроводниковый лазер с длиной волны излучения 445 нм и мощностью излучения ≈ 250 мВт.

3. Результаты эксперимента и их обсуждение

Был проведен ряд экспериментов по росту ЭС n^+ -Ge:P/Si(001), в которых варьировались такие технологические параметры, как температура горячей проволоки T_{Ta} и температура эффузионной ячейки T_c . Условия роста, а также толщина слоев и полученные из рентгеноструктурного анализа значения ширины кривых качания на полувысоте (FWHM) приведены в таблице. Результаты рентгенодифракционных исследований показали, что ЭС n^+ -Ge:P/Si(001) были практически полностью релаксированными. Значения FWHM кривых качания были сопоставимы со значениями, полученными ранее для нелегированных ЭС Ge/Si(001) [8]. В таблице также приведены значения концентрации электронов n и подвижности электронов μ в ЭС n^+ -Ge:P/Si(001), определенные из холловских измерений.

Спектры ФЛ образцов, легированных до различных концентраций легирующей примеси P, приведены на рис. 1. Интенсивность ФЛ повышается с увеличением концентрации P в ЭС n^+ -Ge:P. Наблюдаемые линии ФЛ с максимумами вблизи значений энергии квантов люминесценции $h\nu \approx 0.77$ эВ обусловлены прямыми (в обратном пространстве) переходами в точке Γ зоны Бриллюэна Ge. Следует отметить, что положения пиков ФЛ на рис. 1 смещены в длинноволновую область по сравнению со значением ширины прямой энергетической щели Ge в точке Γ $E_{\Gamma 2}$ (~ 0.8 эВ при 300 К [9]), при этом смещение наиболее выражено в образце с наибольшим значением n (рис. 1, кривая 1). Указанное красное смещение пиков ФЛ может быть связано с

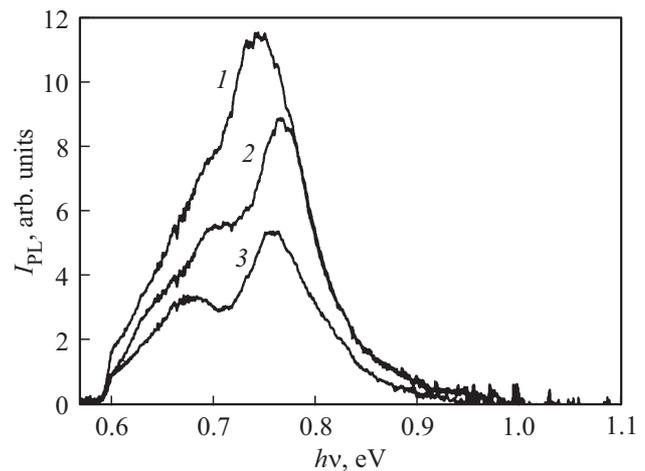


Рис. 1. Спектры ФЛ (300 К) слоев Ge с различными концентрациями электронов, n , см $^{-3}$: 1 — $1.1 \cdot 10^{20}$, 2 — $7.4 \cdot 10^{19}$, 3 — $5.5 \cdot 10^{19}$.

сужением запрещенной зоны в сильно легированном полупроводнике. В таблице помимо значений концентрации электронов в ЭС n^+ -Ge:P/Si(001), определенных из холловских измерений (n), приведены значения концентрации P, определенные из спектрального положения пиков краевой ФЛ в ЭС n^+ -Ge:P (N_P), используя выражение для сужения ширины запрещенной зоны в сильно легированном Ge [10]:

$$\Delta E [\text{МэВ}] \approx 8.22 \sqrt{\frac{N_P}{10^{18} \text{ см}^{-3}}}. \quad (1)$$

Как видно из таблицы, значения концентрации примеси в ЭС n^+ -Ge:P N_P , рассчитанные из значения красного смещения пиков ФЛ согласно (1), по порядку величины согласуются со значениями концентрации электронов n , полученными из холловских измерений, что свидетельствует, в частности, о практически полной электрической активации примеси P в ЭС Ge.

Следует отметить незначительное голубое смещение пика ФЛ на кривой 2 (рис. 1) по сравнению с соответствующим пиком на кривой 3, которое может быть обусловлено случайными причинами (например, различными значениями остаточных упругих напряжений в ЭС n^+ -Ge/Si(001) в соответствующих образцах).

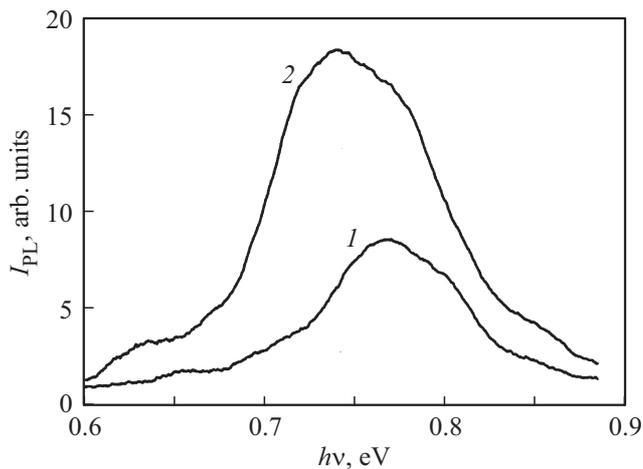


Рис. 2. Спектры ФЛ (300 К) структуры n^+ -Ge:P/Si(001) № 744, до (1) и после (2) быстрого термического отжига.

Также исследовалось влияние быстрого термического отжига ЭС n^+ -Ge:P/Si(001) при $\sim 800^\circ\text{C}$ в течение 15 с на спектры ФЛ. На рис. 2 приведены спектры ФЛ образца n^+ -Ge/Si(001) № 744 до и после отжига. После отжига наблюдается красное смещение, а также повышение интенсивности пика краевой ФЛ Ge, что может быть связано с возникновением дополнительных растягивающих напряжений в процессе высокотемпературного отжига вследствие разности коэффициентов термического расширения Ge и Si [1] ($5.9 \cdot 10^{-6}$ и $2.6 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ при 300 К соответственно [11]). Отжиг способствует более полной релаксации упругой деформации в ЭС Ge за счет увеличения подвижности дислокаций несоответствия. Если ЭС Ge/Si(001) полностью отрелаксирует при температуре отжига, то при остывании образца до комнатной температуры ЭС Ge окажется в упругорастянутом состоянии. Оценка максимальной деформации растяжения ЭС Ge/Si(001), возникающей при остывании от 800 до 20°C , $\varepsilon \sim -2.6 \cdot 10^{-3}$. В свою очередь растяжение приводит к уменьшению ширины запрещенной зоны Ge, при этом ширина прямой щели E_{Γ_2} уменьшается с ростом деформации растяжения быстрее, чем ширина запрещенной зоны (непрямой щели) E_g [12]. Так, в рассматриваемом случае уменьшение прямой щели ΔE_{Γ_2} под действием термонапряжений оставляет ~ 40 мэВ, а непрямой $\Delta E_g \sim 16$ мэВ. Указанное обстоятельство наряду с соответствующим красным смещением линии ФЛ, обусловленной прямыми межзонными переходами, способствует также росту интенсивности данной линии ввиду увеличения заполнения долины Γ_2 электронами вследствие уменьшения разности энергий между минимумами долин Γ_2 и L .

4. Заключение

Результаты настоящей работы показывают, что эпитаксиальные слои n^+ -Ge:P/Si(001), выращенные методом

горячей проволоки и легированные из источника Р на основе термически разлагаемого GaP, демонстрируют фотолюминесценцию при 300 К, связанную с прямыми межзонными рекомбинационными излучательными оптическими переходами в точке Γ зоны Бриллюэна Ge, что свидетельствует о перспективности применения слоев n^+ -Ge:P/Si(001), выращенных указанным методом, в качестве основы для источников излучения инфракрасного диапазона. Выращенные слои n^+ -Ge:P/Si(001) характеризуются высоким кристаллическим совершенством, максимальная концентрация электронов, полученная в слоях n^+ -Ge:P, достигает $\sim 1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Интенсивность ФЛ увеличивается с ростом концентрации электронов в n^+ -Ge:P, что связано с увеличением заполнения долины Γ_2 . Обнаружено усиление ФЛ слоев n^+ -Ge:P/Si(001) в результате быстрого термического отжига, связанное с возникновением в слое n^+ -Ge:P упругой деформации растяжения в ходе остывания образца до комнатной температуры вследствие разности коэффициентов термического расширения Ge и Si.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-72-10061).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J. Liu, X. Sun, D. Pan, X. Wang, L.C. Kimerling, T.L. Koch, J. Michel. *Opt. Express*, **15**, 11272 (2007).
- [2] S.-L. Cheng, J. Lu, G. Shambat, H.-Y. Yu, K. Saraswat, J. Vuckovic, Y. Nishi. *Opt. Express*, **17**, 10019 (2009).
- [3] J. Liu, X. Sun, R. Camacho-Aguilera, L.C. Kimerling, J. Michel. *Optics Lett.*, **35**, 679 (2010).
- [4] C. Mukherjee, H. Seitz, B. Schroeder. *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 3457 (2001).
- [5] В.Г. Шенгуров, В.Ю. Чалков, С.А. Денисов, Н.А. Алябина, Д.В. Гусейнов, В.Н. Трушин, А.П. Горшков, Н.С. Волкова, М.М. Иванова, А.В. Круглов, Д.О. Филатов. *ФТП*, **49**, 1411 (2015).
- [6] Д.С. Прохоров, С.А. Денисов, В.Ю. Чалков, В.В. Постников, А.В. Кудрин, М.М. Иванова, В.В. Сдобняков, В.Н. Трушин, Ю.Н. Бузынин, В.Г. Шенгуров. *Матер. XXII Междунар. симп. „Нанофизика и нанoeлектроника“* (Нижний Новгород, Россия, 2018) т. 2, с. 741.
- [7] В.Г. Шенгуров, В.Ю. Чалков, С.А. Денисов, С.П. Светлов, Д.В. Шенгуров. *Вакуумная техника и технология*, **21**, 45 (2011).
- [8] S.A. Matveev, S.A. Denisov, D.V. Guseinov, V.N. Trushin, A.V. Nezhdanov, D.O. Filatov, V.G. Shengurov. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **541**, 012026 (2014).
- [9] NSM Archive — Physical Properties of Semiconductors. http://matprop.ru/Ge_bandstr.
- [10] L. Jiang, J.D. Gallagher, C.L. Senaratne. *Semicond. Sci. Technol.*, **29**, 115028 (2014).

- [11] С.И. Новикова. *Тепловое расширение твердых тел* (М., Наука, 1974).
- [12] Y. Ishikawa, K. Wada, D. D. Cannon, J. Liu, H.-C. Luan, L.C. Kimerling. *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 2044 (2003).

Редактор Г.А. Оганесян

Enhanced photoluminescence in heavily doped n -type conductivity Ge/si(001) layers

D.S. Prokhorov¹, V.G. Shengurov¹, S.A. Denisov¹,
D.O. Filatov¹, A.V. Zdroveishev¹, V.Yu. Chalkov¹,
A.V. Zaitsev¹, M.V. Ved¹, M.V. Dorokhin¹,
N.A. Baidakova²

¹ Lobachevskii State University of Nizhny Novgorod,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

² Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
607680 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The photoluminescence spectra of the epitaxial n^+ -Ge:P/Si(001) structures grown by Hot Wire Chemical Vapor Deposition and doped by phosphorus from the GaP thermal decomposition source GaP to the highest electron concentration up to $1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ have been studied. The effects of the doping level in the n^+ -Ge:P layers as well as of the rapid thermal annealing on the photoluminescence spectra have been investigated. The n^+ -Ge:P/Si(001) epitaxial layers grown by Hot Wire Chemical Vapor Deposition have been demonstrated to be promising for application as the active regions of the light-emitting photonic devices of the near-infrared band.