

Светоизлучающие структуры на основе слоев Ge/Si(001), выращенных методом HW CVD, для кремниевой оптоэлектроники

Д.С. Прохоров^{1,2}, В.Г. Шенгуров¹, С.А. Денисов¹, А.В. Здоровейшев¹, М.В. Вель¹,
М.В. Дорохин¹, А.В. Рыков¹, Н.А. Байдакова³, А.В. Зайцев¹

¹Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Гагарина 23/3, Нижний Новгород, Россия, 603950

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Гагарина 23/3, Нижний Новгород, Россия, 603950

³Институт физики микроструктур РАН, Академическая 7, Нижний Новгород, Россия, 603087

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты исследований легированных фосфором эпитаксиальных слоев n⁺-Ge/Si(001), выращенных методом Hot wire chemical vapor deposition (HW CVD) с использованием разложения фосфора из соединения GaP. По данным рентгеновской дифракции выращенные слои имеют высокое структурное совершенство. Максимальная, достигаемая этим методом, концентрация электронов в слоях составляет $(8-10) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. В работе показана роль уровня легирования в люминесцентном отклике слоев Ge и условиях наблюдения в них прямых излучательных переходов. Обсуждается влияние постростового отжига и условий роста, в частности, роста на не легированных, буферных слоях Ge на люминесцентный отклик выращенных структур.

1. Введение

В последние годы наметился значительный прогресс на пути к созданию интегральной оптоэлектроники на Si, что в значительной степени связано с разработкой эффективно излучающих структур на кремнии, в частности, структур с растянуто-деформированными, сильно легированными донорной примесью эпитаксиальными слоями германия [1,2]. Растяжение уменьшает энергетическое расстояние между L и Г долинами в зоне проводимости Ge, в то время как легирование донорной примесью с концентрацией $> 4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ способствует достижению инверсной заселенности долин Г6 и Г8 в зоне проводимости, и в валентной зоне соответственно [3,4,5]. Возможности управления зонной структурой Ge вызывают в последнее время значительный интерес, поскольку создание прямозонного материала, совместимого с Si, открывает путь к созданию оптоэлектронных приборов, интегрируемых на кремниевой подложке. Преимуществами таких приборов являются дешевизна и возможности их применения в схемах оптических межсоединений на кремниевом чипе. Кроме того, прямозонный Ge может быть использован в качестве усиливающей среды для создания лазерных структур на материалах IV группы таблицы Менделеева. Однако величину упругих

напряжений, необходимых для прямого перехода, трудно достичь вследствие требований когерентного роста Ge на материале с адекватно большой постоянной решетки. Ранее идея совместного использования деформации растяжения в Ge слоях и высокого уровня легирования донорной примесью для заполнения L-долины была разработана в работах Sun [6] и Cheng [7]. Была продемонстрирована электролюминесценция на Ge диодах и получен лазер с оптической накачкой [8], однако его квантовая эффективность оказалась довольно низкой, что, возможно, связано с недостаточно высоким уровнем легирования.

В данной работе приводятся результаты исследований люминесцентных свойств гетероструктур n^+ -Ge/Si(001), выращенных методом Hot wire chemical vapor deposition (HW CVD), in situ легированных фосфором испарением соединения GaP из эффузионной ячейки.

Возможность выращивания этим методом при низкой ($\sim 350^\circ\text{C}$) температуре высококачественных слоев Ge с малой плотностью прорастающих дислокаций ($\leq 1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$) была впервые продемонстрирована нами в работах [9,10]. На слоях, полученных этим методом, были изготовлены макеты фотодетекторов телекоммуникационного диапазона длин волн $\lambda = 1,3 - 1,55 \text{ мкм}$ [10].

2. Методика эксперимента

Гетероструктуры n^+ -Ge/Si(001) выращивались методом HW CVD, как это описано в работе [9]. Дополнительно в ростовой камере была установлена эффузионная ячейка, из которой испаряли фосфор из соединения GaP. Температура ячейки варьировалась от 730 до 760 °C. Послойный элементный анализ выращенных слоев n^+ -Ge/Si(001) проводился методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) на установке TOF SIMS-5 фирмы IONTOF (Германия). Структурное совершенство слоев исследовалось методом двухкristальной рентгеновской дифрактометрии (РД). Рентгеноструктурный анализ проводился на дифрактометре Discover D8 производства компании Bruker (Германия). Качество поверхности образцов определялось методом атомно-силовой микроскопии. Плотность прорастающих дислокаций оценивалась методом химического травления. Электрофизические параметры слоев определяли методом эффекта Холла при 300 К. Измерения фотолюминесценции (ФЛ) проводились при комнатной температуре в диапазоне длин волн от 1,3 мкм до 2,1 мкм с использованием InGaAs-фотодиода (Hamamatsu G12182-110K). В качестве источника возбуждающего излучения в работе использовался полупроводниковый лазер с длиной волны излучения 445 нм и мощностью накачки $\approx 250 \text{ мВт}$. Ряд люминесцентных измерений осуществлялся с использованием монохроматора АСТОН 2300i и охлаждаемого детектора ОМА-V на основе линейки InGaAs фотодиодов в диапазоне 1 – 2.2 мкм. Сигнал ФЛ возбуждался излучением диодного лазера с длиной волны 808 нм.

3. Результаты и обсуждение

Исследования легированных атомами фосфора слоев Ge/Si(001) методом РД показали, что по структуре они являются эпитаксиальными. Ширина кривой качания на половине высоты максимальной интенсивности для таких слоев не превышала 3-х угловых минут. Дополнительный отжиг слоев в камере роста при 700 °C снижает эту величину до 1,8 угловых минут. Этот результат говорит о том, что легированные фосфором слои по структурному совершенству даже превосходят нелегированные слои Ge [10].

Плотность ямок травления (которую мы рассматриваем как плотность прорастающих дислокаций) в слоях n^+ -Ge толщиной $\sim 1 \text{ мкм}$ была близка к их плотности в нелегированных слоях [10].

По данным Холловских измерений максимальная концентрация электронов в слоях составляла $(8-10) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Эта величина выше, чем в случае легирования слоев Ge сурьмой в методе молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) или роста методом CVD и легирования фосфором из газового источника.

ВИМС-анализ слоев Ge свидетельствует об однородном легировании фосфором по всей толщине слоя.

На рисунке 1 приведены типичные спектры ФЛ слоев n^+ -Ge/Si(001), которые были легированы фосфором до разной концентрации. Видно, что с повышением концентрации фосфора в слоях интенсивность сигнала ФЛ возрастает. Наблюдаемый отклик в диапазоне энергий ~ 0.77 эВ описывается прямыми переходами в запрещенной зоне германия [6,7].

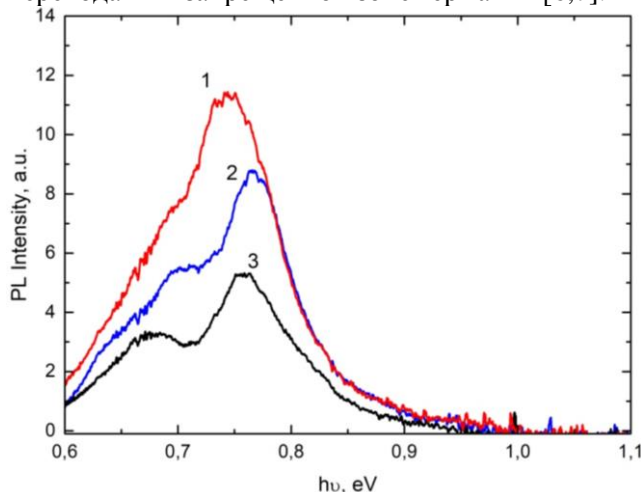


Рисунок 1. Спектры ФЛ слоев Ge, легированных до разных концентраций (1 – $1,1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$, 2 – $7,4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, 3 – $5,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$).

В работе было исследовано влияние отжига на ФЛ слоев n^+ -Ge/Si(001). На рисунке 2 приведены спектры ФЛ от такого слоя. Спектры получены до быстрого термического отжига (RTA) и после него. Наблюдается повышение интегральной интенсивности ФЛ после термического отжига, а также красное смещение спектра.

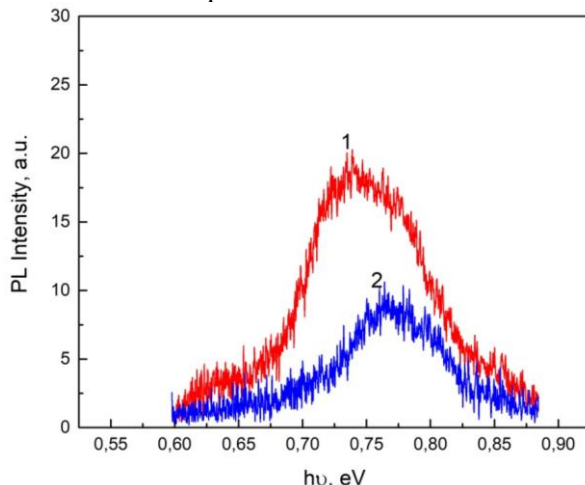


Рисунок 2. Влияние быстрого термического отжига (RTA) на спектр ФЛ. Кривая 1 – спектр ФЛ, полученный после RTA, кривая 2 – до RTA.

Дополнительно исследовались структуры, выращенные на предварительно не легированном, буферном слое германия. Спектр ФЛ такого образца приведен на рисунке 3 (кривая 1). Для сравнения приведен также спектр ФЛ образца, выращенного без буферного слоя (кривая 2). Как видно из рисунка, выращивание структур на буферном слое приводит к увеличению интенсивности сигнала ФЛ, сужению и смещению спектра в область, соответствующую области прямых переходов в Ge.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о возможности выращивания методом HW CVD, с использованием методики легирования из соединения GaP, эпитаксиальных слоев Ge, представляющих интерес для кремниевой оптоэлектроники. Развитая технология позволяет выращивать совершенные по структуре слои с высоким

уровнем легирования, демонстрирующие эффективный сигнал ФЛ в диапазоне длин волн, соответствующих прямым переходам в германии.

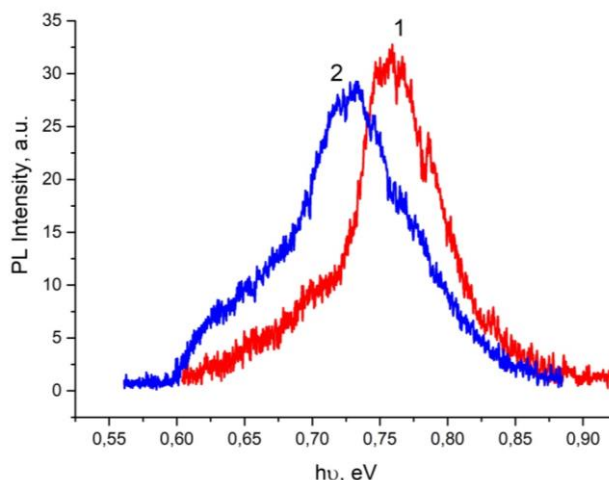


Рисунок 3. Спектр ФЛ структуры n^+ -Ge/Si(001) с буферным слоем Ge (кривая 1) и без него (кривая 2).

4. Заключение

Низкотемпературным методом HW CVD были выращены сильнолегированные фосфором слои n^+ -Ge/Si(001) с высоким структурным совершенством. Максимальная концентрация электронов в слоях составляла $(8-10) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. В работе показана роль уровня легирования в условиях наблюдения интенсивного сигнала ФЛ и вклада в сигнал прямых переходов в запрещенной зоне германия. Обсуждается роль процедуры постростового отжига и влияния условий роста, в частности, роста на не легированных, буферных слоях Ge в увеличении интенсивности люминесцентного отклика структур. Рассматриваемые слои Ge представляются перспективными для создания лазера на материалах IV группы Периодической таблицы Менделеева.

5. Литература

- [1] Ishikawa, Y. The impact of donors on recombination mechanisms in heavily doped Ge/Si layers / Y. Ishikawa, S. Saito // *IEICE Electronic Exp.* – 2014. – Vol. 11. – P. 1-17.
- [2] Liu, J. Ge-on-Si optoelectronics / J. Liu, R. Camacho-Aguilera, J.T. Bessette, X. Sun, X. Wang, Y. Cai, L.C. Kimerling, J. Michel // *Thin Solid Films.* – 2012. – Vol. 520. – P. 3354-3360.
- [3] Liu, J. High-performance, tensile-strained Ge p-i-n photodetectors on a Si platform / J. Liu, J. Michel, W. Giziewicz, D. Pan, K. Wada, D.D. Cannon, S. Jongthammanurak, D.T. Danielson, L.C. Kimerling // *Appl. Phys. Lett.* – 2005. – Vol. 87. – P. 103501.
- [4] Liu, J. Tensile-strained, n-type Ge as a gain medium for monolithic laser integration on Si / J. Liu, X. Sun, D. Pan, X. Wang, L.C. Kimerling, T.L. Koch, J. Michel // *Opt. Exp.* – 2007. – Vol. 15. – P. 11272-11277.
- [5] Barget, M.R. The impact of donors on recombination mechanisms in heavily doped GeSi layers / M.R. Barget, M. Virgilio, G. Capellini, Y. Yamamoto, T. Schroeder // *J. Appl. Phys.* – 2017. – Vol. 121. – P. 245701.
- [6] Sun, X. Room-temperature direct bandgap electroluminescence from Ge-on-Si light-emitting diodes / X. Sun, J. Liu, L.C. Kimerling, J. Michel // *Opt. Lett.* – 2009. – Vol. 34. – P. 1198.
- [7] Cheng, S.L. Room temperature 1.6 μm electroluminescence from Ge light emitting diode on Si substrate / S.L. Cheng, J. Lu, G. Shambat, H-Y. Yu, K. Saraswat, J. Vuckovic, Y. Nishi // *Opt. Express.* – 2009. – Vol. 17. – P. 10019.
- [8] Liu, J. Ge-on-Si laser operating at room temperature / J. Liu, X. Sun, R. Camacho-Aguilera, L.C. Kimerling, J. Michel // *Opt. Lett.* – 2010. – Vol. 35. – P. 679.

- [9] Denisov, S.A. High-quality Ge epilayers grown on a Si substrate in one step process via hot wire chemical vapor deposition / S.A. Denisov, S.A. Matveev, V.Yu. Chalkov, V.G. Shengurov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2016. – Vol. 690. – P. 012014.
- [10] Shengurov, V.G. Photodetectors on the basis of Ge/Si(001) heterostructures grown by the hot-wire CVD technique / V.G. Shengurov, V.Yu. Chalkov, S.A. Denisov, N.A. Alyabina, D.V. Guseinov, V.N. Trushin, A.P. Gorshkov, N.S. Volkova, M.M. Ivanova, A.V. Kruglov, D.O. Filatov // *Semicond.* – 2015. – Vol. 49. – P. 1365.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-72-10061).

Light-emitting structures based on Ge/Si(001) layers grown by the HW CVD method for silicon optoelectronics

D.S. Prokhorov^{1,2}, V.G. Shengurov¹, S.A. Denisov¹, A.V. Zdoroveyshchev¹, M.V. Ved'1, M.V. Dorokhin¹, A.V. Rykov¹, N.A. Baidakova³, A.V. Zaycev¹

¹Research Institute of Physics and Technology, Lobachevsky State University, Gagarin Avenue 23/3, Nizhni Novgorod, Russia, 603950

²Lobachevsky State University, Gagarin Avenue 23/3, Nizhni Novgorod, Russia, 603950

³Institute for Physics of Microstructures RAS, Akademicheskay street 7, Nizhni Novgorod, Russia, 603087

Abstract. This paper presents the results of the investigation of phosphorus doped n^+ -Ge/Si(001) epitaxial layers grown by the Hot wire chemical vapor deposition (HWCVD) method and using phosphorous decomposition of the GaP compound. According to X-ray study the layers have high structural perfection. The maximum electron concentration in the layers achieved by this method is $(8-10) \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. The paper shows the role of the doping level in the luminescent response of Ge layers and the conditions of observation of direct radiative transitions in them. The effect of post-growth annealing and growth conditions, in particular, growth on non-doped, buffer Ge layers, on the luminescent response of the grown structures is discussed.