

СТРУКТУРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ $\text{Si/Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:Er/Si}$, ОБЛУЧЕННЫХ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

С.Л. Прокопьев¹⁾, Е.И. Гацкевич²⁾, М.В. Степихова³⁾,
В.Ю. Чалков³⁾, В.Г. Шенгуров³⁾, П.И. Гайдук¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Беларусь, тел. 278-97-00, e-mail: st-prokopyev@yandex.ru, gaiduk@bsu.by

²⁾Институт физики НАН Беларуси, Логойский тракт, 22, 220090, Минск, Беларусь, e-mail: gatskevich@inel.bas-net.by

³⁾Институт физики микроструктур РАН, ГСП – 105, Нижний Новгород, Российская Федерация, e-mail: mst@ipm.sci-nnov.ru, chalkov@nifti.unn.ru, shengurov@phys.unn.runnet.ru

Методами просвечивающей электронной микроскопии и фотолюминесценции исследованы структурные и оптические свойства структур $\text{Si/Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:Er/Si}$ после эпитаксиального выращивания и последующей обработки импульсным лазерным излучением. Структуры выращивались методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии на кремниевых подложках с ориентацией (001) и подвергались лазерному отжигу импульсами длительностью 80 нс с плотностью энергии 0,95 Дж/см² и 1,5 Дж/см² на длине волны 694 нм. Измерения методом фотолюминесценции проводились при температуре 77 К. Результаты обсуждаются с учетом влияния дефектной структуры слоев $\text{Si/Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:Er/Si}$ на их оптические свойства.

Введение

Поиск эффективных светоизлучающих приборных структур на основе кремния является актуальной задачей [1, 2]. В этой связи, большой научно-практический интерес представляет выращивание слоев Si и SiGe сплавов, легированных редкоземельными примесями, в частности, Er [3-10]. С этой точки зрения наиболее интересен излучательный переход в ионе Er^{3+} на длине волны 1,54 мкм, что хорошо согласуется со спектральным окном в кварцевом оптоволокне. Показано [11], что на основе структуры $\text{Si/Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{:Er}$ возможно формирование волноводов с высокой степенью локализации излучения (более 80 %) в активном слое. Однако, у Si и SiGe сплавов различие параметров решеток составляет 4,17%, поэтому в ряде случаев остаются нерешенными вопросы улучшения структурного качества слоев SiGe необходимой толщины (более 0,5 мкм). Это связано с тем, что осаждение толстых эпитаксиальных слоев SiGe на Si приводит к их частичной релаксации с образованием дефектов дислокационного типа. Для улучшения структурного качества таких слоев может быть использована их рекристаллизация под воздействием импульсного излучения. Для таких целей, как модификация свойств материалов, электрическая активация примесей, рекристаллизация слоев и др. показана высокая эффективность импульсного лазерного отжига (ИЛО) [12]. В настоящей работе исследуются структурные и оптические свойства слоев SiGe, легированных Er, в том числе и после импульсного лазерного отжига.

Методика эксперимента

Структуры для исследований выращивались методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ). Технология выращивания структур подробно описана в [13].

В качестве исходных подложек использовались подложки Si ориентации (001). На первом

этапе с целью повышения чистоты процесса СМЛЭ выращивался буферный слой Si толщиной 200 нм. Затем выращивался слой $\text{Si}_{75}\text{Ge}_{25}$, легированный Er до концентрации $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Толщина SiGe:Er слоя составляла для одного типа структур – 30 нм, для другого – 880 нм. Затем для всех структур выращивался поверхностный слой Si толщиной 200 нм. Контроль элементного и композиционного состава слоев, а также их толщины и степени релаксации (RES – residual elastic strain) проводился методом рентгеновской дифракции. Выращенные структуры подвергались импульсному лазерному отжигу (ИЛО) на длине волны 694 нм. Длительность импульсов составляла 80 нс при плотности энергии в импульсе $W_1=0,95 \text{ Дж/см}^2$ и $W_2=1,5 \text{ Дж/см}^2$. Неоднородность интенсивности лазерного излучения по пятну диаметром $d=4,5 \text{ мм}$ не превышала 5%. Исследования структуры Si/SiGe:Er/Si слоев непосредственно после выращивания, а также после ИЛО проводились с использованием просвечивающего электронного микроскопа ЭМ-125, работающего при ускоряющем напряжении 100 кВ. Оптические исследования проводились методом фотолюминесценции (ФЛ) на Фурье-спектрометре BOMEM DA3 с разрешением 1 см^{-1} . В качестве источника возбуждения использовался Nd:YAG лазер мощностью 200 мВт, излучающий на длине волны 532 нм. Лазерный пучок после прохождения через светофильтр фокусировался при помощи линзы на образец в пятно диаметром $\sim 1 \text{ мм}$. Спектры ФЛ регистрировались с использованием Ge фотодетектора модели Edinburgh Instruments EO-817A при температуре 77 К.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены ПЭМ микрофотографии в режиме светлого поля структур Si/SiGe:Er/Si с толщиной SiGe:Er слоя 30 нм.

На рис. 1а показана область структуры Si/SiGe:Er/Si, включающая буферный слой Si, слой SiGe:Er и поверхностный слой Si.

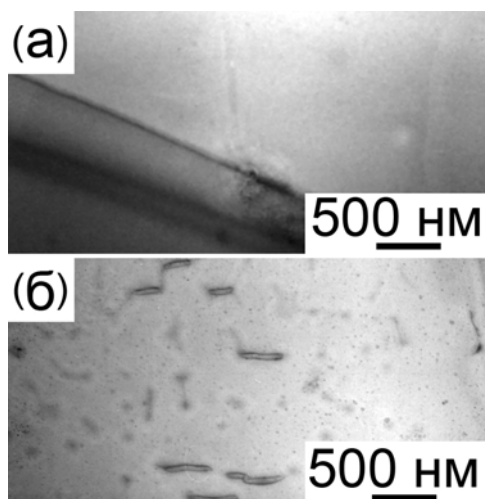


Рис. 1. ПЭМ микрофотографии в режиме светлого поля структур Si/SiGe:Er/Si с толщиной SiGe:Er слоя 30 нм: а – после выращивания, б – после ИЛО с плотностью энергии $W_1=0,95 \text{ Дж/см}^2$

Можно отметить высокое структурное совершенство слоев после выращивания. Измерения методом рентгеновской дифракции показали, что структура является напряженной ($\text{RES} \sim 100 \%$). Обнаружено, что облучение импульсами лазера с плотностью энергии $W_1=0,95 \text{ Дж/см}^2$ приводит к появлению дефектов дислокационного типа (дислокаций и дислокационных петель) размерами 40–450 нм (рис. 1б). Облучение импульсами лазера с плотностью энергии $W_2=1,5 \text{ Дж/см}^2$ привело к плавлению покровного слоя Si и SiGe:Er и к их перемешиванию.

На рис. 2 представлены ПЭМ микрофотографии в режиме светлого поля структур Si/SiGe:Er/Si с толщиной SiGe:Er слоя 880 нм. На рис. 2а показано типичное ПЭМ изображение структуры непосредственно после выращивания. Обнаружено, что в структуре после выращивания присутствуют многочисленные дефекты дислокационного типа, а также дефекты упаковки, что, вероятно, объясняется высокой степенью релаксации таких структур. Измерения методом рентгеновской дифракции показали, что остаточные напряжения в этих структурах составляют $\text{RES}=12\text{--}14 \%$.

Облучение импульсами лазера с плотностью энергии $W_1=0,95 \text{ Дж/см}^2$ (рис. 2б) и $W_2=1,5 \text{ Дж/см}^2$ (рис. 2в) приводит к определенным структурным изменениям. После ИЛО в Si/SiGe:Er/Si слоях также наблюдаются дефекты, характерные для релаксированных слоев. Вместе с тем, указанные структурные изменения будут детально изучены и подтверждены в дальнейшем.

На рис. 3 представлены спектры ФЛ структур Si/SiGe:Er/Si с толщиной слоя SiGe:Er 30 нм (рис. 3а) и 880 нм (рис. 3б) непосредственно после выращивания (спектр 1) и после импульсного лазерного отжига (спектры 2, 3).

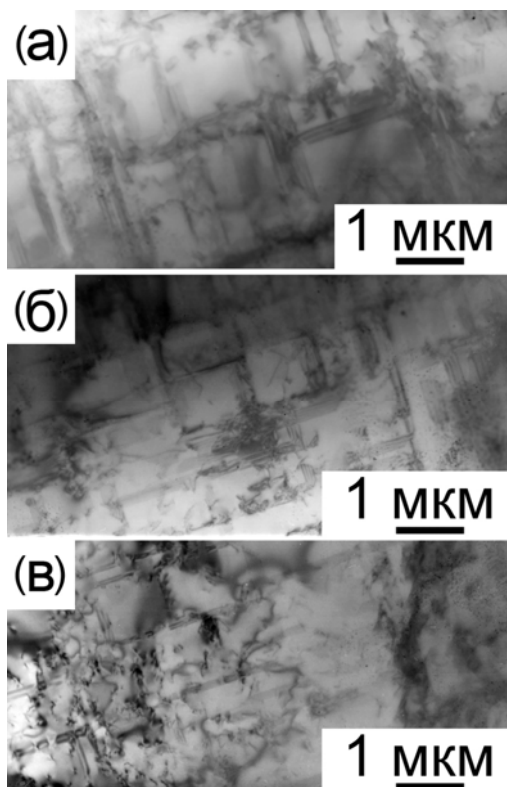


Рис. 2. ПЭМ микрофотографии в режиме светлого поля структур Si/SiGe:Er/Si с толщиной SiGe:Er слоя 880 нм: а – после выращивания, б – после ИЛО с плотностью энергии $W_1=0,95 \text{ Дж/см}^2$, в – после ИЛО с плотностью энергии $W_2=1,5 \text{ Дж/см}^2$.

Из рис. 3а видно, что интенсивность сигнала ФЛ, по сравнению с сигналом от структуры после выращивания, возрастает примерно в 1,7 – 1,8 раза, при этом различные условия ИЛО проявляют себя практически одинаково (спектры 2, 3). Спектральный отклик структур представлен уширенным спектром ФЛ, связанным с присутствием в структурах оптически активных центров иона Er «преципитатной» природы с максимумом на длине волны 1,537 мкм (6508 см^{-1}). Вклад центров с тонкой структурой линий ФЛ незначителен. Таким образом, лазерная обработка не приводит к заметному отклику, связанному с оптически активными центрами иона Er с ярко выраженной структурой кристаллического поля ближайшего окружения.

Из рис. 3б видно, что наибольшее влияние на интенсивность сигнала ФЛ релаксированной структуры оказывает ИЛО при $W_1=0,95 \text{ Дж/см}^2$ (спектр 2). Сигнал ФЛ после этой обработки возрастает примерно в 1,8 раза и в 1,54 раза при обработке лазерным импульсом с $W_2=1,5 \text{ Дж/см}^2$ (спектр 3).

Как видно из рис. 3б, ИЛО с плотностью энергии $W_2=1,5 \text{ Дж/см}^2$ приводит к уширению спектра ФЛ в длинноволновой области, что вероятно связано с увеличением вклада в сигнал ФЛ люминесцентного отклика дефектной природы. Дефектные компоненты спектра проявляются в основном спектра, в диапазоне волновых чисел

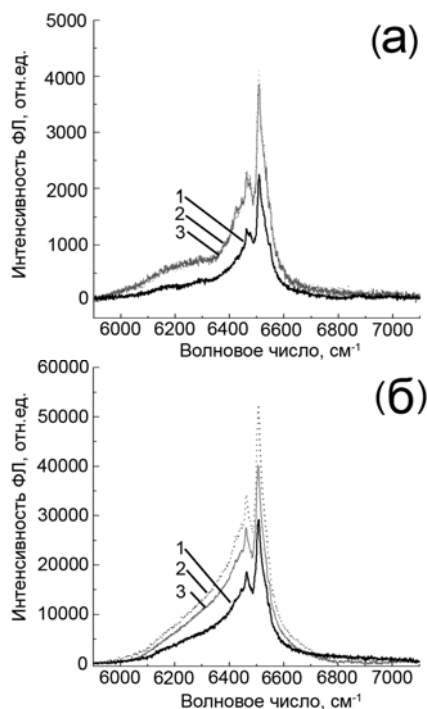


Рис. 3. Спектры фотolumинесценции структур Si/SiGe:Er/Si непосредственно после выращивания (а) SiGe:Er слоя толщиной 30 нм, (б) SiGe:Er слоя толщиной 880 нм

(1) структура после выращивания, (2) после импульсного лазерного отжига с плотностью энергии 0,95 Дж/см² и 1,5 Дж/см² (3).

6100-6700 см⁻¹. В общем, следует отметить, что для Si/SiGe:Er/Si структур, существенно различающихся по степени релаксации слоев SiGe:Er, наблюдается схожий характер усиления люминесценции (рис. 3а, б).

В связи с этим, на основании сравнительного анализа результатов структурных (рис. 1, 2) и оптических исследований (рис. 3) можно сделать предположение, что усиление люминесценции в диапазоне волновых чисел 6100-6700 см⁻¹ (в частности, от ионов Er) основано на взаимодействии Er центров и структурных дефектов в слоях Si/SiGe:Er/Si.

Заключение

Обнаружено, что импульсный лазерный отжиг эпитаксиальных слоев Si/SiGe:Er/Si приводит к структурным изменениям, сопровождаемым увеличением выхода фл до 1,8 раз от структур Si/SiGe:Er/Si и в частности, от Er. Высказывается предположение о взаимодействии Er центров и структурных дефектов в слоях Si/SiGe:Er/Si.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Г.Д. Ивлеву (Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси) за проведение импульсного лазерного отжига структур.

Работа выполнена при частичной поддержке БРФФИ по проекту № Ф09СО-015.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Электроника и фотоника» (задание 1.1.02 «Разработка и исследование процессов выращивания кремний-германиевых гетероструктур для создания полупроводниковых приборов»).

Список литературы

1. Lockwood D. J. Light Emission in Silicon: From Physics to Devices. – New York: Academic Press, 1998.
2. Bisi O., Campisano S. U., Pavesi L., Priolo F. Silicon-based Microphotonics. – Amsterdam: IOS Press, 1999.
3. Shin J. H., et al // Appl. Phys. Lett. – 1999. – 74. – 1573.
4. Ha Y. H., et al // Appl. Phys. Lett. – 2001. – 79. – 287.
5. Galli M., et al // Appl. Phys. Lett. 2006. – 88. – 251114.
6. Huda M.Q., et al // J. Vac. Sci. Tech 1998. – B16. – 2928.
7. Huda M.Q., et al // Electronics Lett., – 1997. – 33. – 1182.
8. Huda M.Q., et al // Solid State Electronics. – 2001. – 45. – 1927.
9. Vernon-Parry K. D., et al // Mat. Sci. Eng. – 2001. – 81. – 164.
10. Naveed A. T., et al // Semicond. Sci. Technol. – 2000. – 15. – 91.
11. Stepikhova M., et al // J. Cryst. Growth. – 2006. – 288. – 65.
12. Двуреченский А., Качурин Г., Нудаев Е., Смирнов Л. Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. – М.: Наука, 1982. – 208 с.
13. Светлов С., Шенгуров В., Чалков В., Красильник З., Андреев Б., Дроздов Ю. // Изв.РАН. Сер.физ. – 2001. – 65 (2). – 203.

STRUCTURAL AND OPTICAL PROPERTIES OF LASER TREATED EPITAXIAL Si/SiGe:Er/Si LAYERS

Stanislau Prakopyeu¹⁾, Elena Gatskevich²⁾, Margarita Stepikhova³⁾,
Vadim Chalkov³⁾, Vladimir Shengurov³⁾, Peter Gaiduk¹⁾

¹⁾Belarusian State University, 4, Nezavisimosti ave., 220030, Minsk, Belarus, phone: (+37517) 278-97-00
e-mail: st-prokopyev@yandex.ru, gaiduk@bsu.by,

²⁾Institute of Physics NASB, Logoisky Trakt, 22, Minsk, Republic of Belarus,
e-mail: gatskevich@inel.bas-net.by

³⁾Institute for Physics of Microstructures RAS, GSP – 105, Nizhny Novgorod, Russian Federation
e-mail: mst@ipm.sci-nnov.ru, chalkov@nifti.unn.ru, shengurov@phys.unn.runnet.ru

We report on the structural and optical properties in Si/SiGe:Er/Si structures after pulsed laser annealing. Si/SiGe:Er/Si structures were deposited by molecular beam epitaxy on silicon substrates (001) and treated by nanosecond laser pulses at an energy density of 0.95 J/cm² and 1.5 J/cm² and a wavelength of 694 nm. Photoluminescence measurements at 77 K show the increase of the Er luminescence from the laser treated Si/SiGe:Er structures. The results are discussed on the basis of structural defects in laser treated Si/SiGe:Er/Si layers.