

СЕГРЕГАЦИЯ ГЕРМАНИЯ ПРИ НАНОИМПУЛЬСНОМ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СЛОИ SiGe/Si

С.Л. Прокопьев, Г.Д. Ивлев, П.И. Гайдук
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь, тел. 278-97-00,
e-mail: st-prokopyev@yandex.ru

Методами атомно-силовой, просвечивающей и растровой электронной микроскопии исследованы структурные свойства эпитаксиальных слоев $\text{Si}_{0,5}\text{Ge}_{0,5}/\text{Si}$ до и после лазерной обработки импульсами излучения наносекундной длительности. Динамика лазерного воздействия исследована методом двухволнового оптического зондирования на отражение пробного пучка. Исследуемые структуры выращивались на кремниевых подложках с ориентацией (100) и подвергались лазерной обработке на $\lambda=0,69$ мкм в интервале плотностей энергии облучения $1,5\text{-}2,5$ Дж/см² при длительности импульса 80 нс.

Введение

Импульсный лазерный отжиг (ИЛО) является эффективным методом модификации свойств полупроводниковых материалов. В частности, ИЛО кремния, имплантированного низкорастворимыми примесями (Fe, Cr, In, Er), приводит к формированию ячеистой структуры [1-4]. С другой стороны, в настоящее время интенсивно развивается технология интегральных схем и твердотельных приборов, основанная на использовании твердых растворов Si-Ge [5]. В целом, представляется возможным использование SiGe слоев в ряде приборных структур нового поколения (фотоприемники, солнечные элементы, биполярные транзисторы и др.). [5-8]. При этом до сих пор фундаментальный интерес представляет изучение процессов, протекающих в системе Ge-Si в сильно неравновесных условиях (в частности, при ИЛО) [9-14]. В настоящей работе обсуждается эффект формирования ячеистой структуры в эпитаксиальных слоях SiGe при ИЛО.

Основная часть

Структуры для исследований выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). В качестве исходных подложек использовались подложки Si ориентации (100). Затем выращивался слой $\text{Si}_{0,5}\text{Ge}_{0,5}$, с низкой концентрацией дефектов дислокационного типа. Толщина $\text{Si}_{0,5}\text{Ge}_{0,5}$ слоя составляла 1,3 мкм. Выращенные структуры подвергались ИЛО рубиновым лазером на длине волны $\lambda=0,69$ мкм. Длительность импульсов в режиме модуляции добротности составляла $t=80$ нс при плотности энергии в импульсе $W=1,5\text{-}2,5$ Дж/см². Одновременно на двух длинах волн - 1,06 и 0,53 мкм – регистрировалась динамика отражательной способности с использованием миллисекундного зондирующего излучения лазера на стекле, активированном неодимом. Исследования структуры SiGe/Si слоев непосредственно после выращивания, а также после ИЛО проводились методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в режиме светлого поля с использованием микроскопа ЭМ-125, при ускоряющем напряжении 100 кВ. Морфология поверхности исследовалась с использованием атомно-силового микроскопа (АСМ) Nanoscope III.

На рис. 1 представлены АСМ изображения поверхности слоев SiGe/Si после ИЛО при плотности энергии $2,5$ Дж/см².

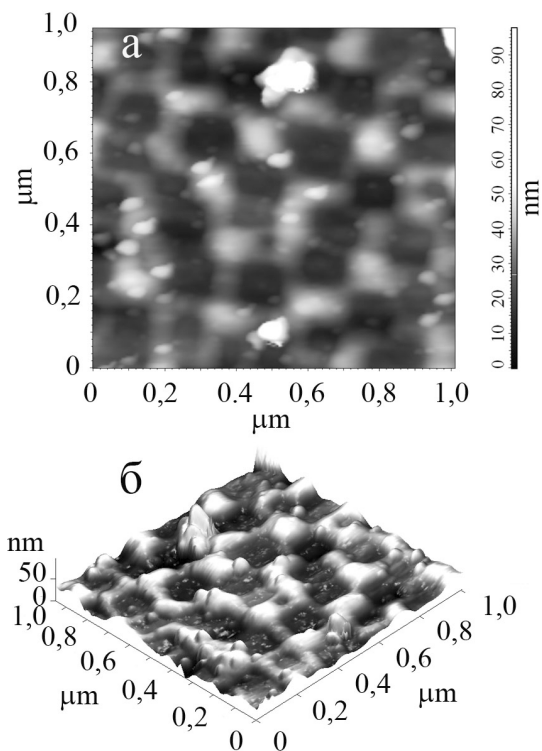


Рис. 1. АСМ изображения поверхности слоев $\text{Si}_{0,5}\text{Ge}_{0,5}/\text{Si}$ после ИЛО при $W=2,5$ Дж/см²
а) 2D изображение,
б) 3D изображение

Видно, что ИЛО приводит к формированию ячеистой структуры, по аналогии с той, которая формируется в слоях Si, имплантированных низкорастворимыми примесями, а также наноразмерных (до 500 нм) островков высотой до 100 нм. При этом средний размер ячеек составляет 150 нм.

На рис. 2 представлены ПЭМ микрофотографии в режиме светлого поля структур $\text{Si}_{0,5}\text{Ge}_{0,5}/\text{Si}$ после при ИЛО $2,5$ Дж/см².

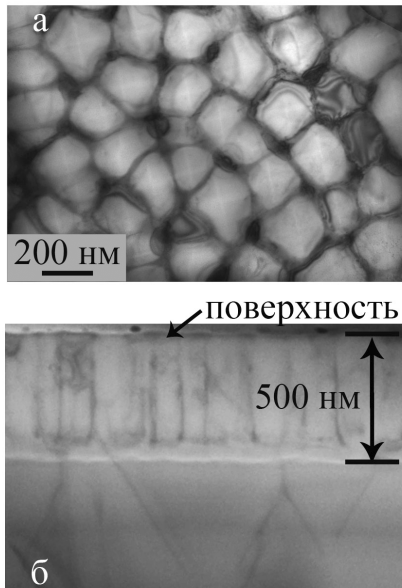


Рис. 2. ПЭМ микрофотографии в режиме светлого поля слоев $\text{Si}_{0,5}\text{Ge}_{0,5}/\text{Si}$ после ИЛО при $W=2,5 \text{ Дж/см}^2$. а) ПЭМ микрофотография в планарном сечении, б) ПЭМ микрофотография в поперечном сечении

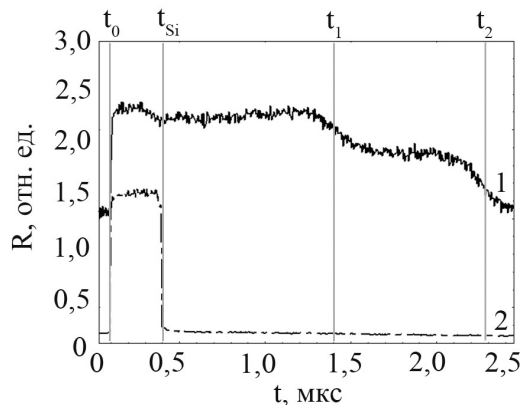


Рис. 3. Динамика отражательной способности R образцов $\text{Si}_{0,5}\text{Ge}_{0,5}$ (1) и Si (2), на длине волны $0,53 \text{ мкм}$ для $W=2,5 \text{ Дж/см}^2$

На рис. 2а показано типичное ПЭМ изображение ячеистой структуры в планарном сечении. Средний размер ячеек – около 180 нм, что коррелирует с данными АСМ (рис. 1). Из микрофотографии в поперечном сечении (рис. 2б) видно, что глубина проплавления при ИЛО с $W=2,5 \text{ Дж/см}^2$ составляет 500 нм, при этом ячеистая структура начинает формироваться на меньшей глубине (около 450 нм).

На рис. 3 представлены типичные осциллограммы, представляющие динамику изменения отражательной способности R образцов $\text{Si}_{0,5}\text{Ge}_{0,5}$ и Si при ИЛО в течение существования жидкой фазы. Видно, что на осциллограмме 1 наряду с сигналом от расплавленной фазы Si длительностью $t_1-t_0=1,3 \text{ мкс}$ наблюдается сигнал от фазы Ge длительностью $t_2-t_1=1 \text{ мкс}$, что существенно отличается от сигнала, получаемого от чистого Si (осциллограмма 2).

Заключение

Согласно полученным данным, хотя Ge и Si образуют непрерывный ряд твердых растворов, при ИЛО наблюдается сегрегационное вытеснение части германия в межъячеистые границы и на поверхность, что обусловлено трехмерным массопереносом в процессе отвердевания расплавленного слоя.

Благодарности

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Электроника и фотоника» (задание 1.1.02 «Разработка и исследование процессов выращивания кремний-германиевых гетероструктур для создания полупроводниковых приборов») и при частичной поддержке БРФФИ по проекту Ф13К-117.

Список литературы

1. Narayan J. In: Laser and Electron-Beam Interactions with Solids. - Amsterdam: Elsevier, 1982. - P.141.
2. Batalov R.I. et al // Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Proc. of VIII Int. Conf. (CMM-8). Tomsk, 2006. - P.330.
3. Batalov R.I. et al // Phys. Procedia. - 2011. - 11. - P.43.
4. Batalov R.I. et al // J. Appl. Spectrosc. - 2009. - 76. - P.209.
5. Cressler J.D. The Silicon Heterostructure Handbook: Materials, Fabrication, Devices, Circuits, and Applications of SiGe and Si Strained-Layer Epitaxy. - New York: CRC Press, 2005. - 1210 p.
6. Li C. et al // J. Appl. Phys. - 2002. - 92. - P.1718.
7. Lafontaine H. et al // J. Appl. Phys. - 1999. - 86. - P.1287.
8. Altukhov I.V. et al // Appl. Phys. Lett. - 2001. - 79. - P.3909.
9. Sobolev N.A. et al // Mat. Sci. Eng. C. - 23. - 2003. - P.19.
10. Weizman M. et al // J. Appl. Phys. - 103. - 2008. - P.093536.
11. Gen-Quan H. et al // Chin. Phys. Lett. - 25. - 2008. - P.242.
12. Han G. et al // J. Cryst. Growth. - 310. - 2008. - P.3746.
13. Yakimov A.I. et al // Phys. Rev. B. - 72. - 2005. - P.115318.
14. Volodin V.A. et al // Semiconductors. - 40. - 2006. - P.202.

Ge SEGREGATION IN PULSED LASER TREATED EPITAXIAL SiGe/Si LAYERS

Stanislau Prakopyeu, Gennadii Ivlev, Peter Gaiduk

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

We report on the structural properties in epitaxial $\text{Si}_{0,5}\text{Ge}_{0,5}/\text{Si}$ structures after pulsed laser annealing. $\text{Si}_{0,5}\text{Ge}_{0,5}$ layers were deposited on silicon substrates (100) and treated by 80 ns pulses of Q-switched laser at an energy density of $W=1.5-2.5 \text{ J/cm}^2$ at $\lambda=0,69 \text{ μm}$. The Ge redistribution in $\text{Si}_{0,5}\text{Ge}_{0,5}$ layer is driven by Ge segregation during solidification from the melt.