

УДК 533.376

**ПЕРИОДИЧЕСКИЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ Si/SiGe,
ВЫРАЩЕННЫЕ НА Si(100) ИЗ АТОМАРНОГО ПОТОКА Si
И МОЛЕКУЛЯРНОГО ПОТОКА МОНОГЕРМАНА**© 2014 г. **С.А. Матвеев,¹ С.А. Денисов,¹ В.Ю. Чалков,¹ В.Г. Шенгуров,¹
М.В. Степихова,² М.Н. Дроздов,² П.А. Юнин,² Н.Д. Захаров³**¹ Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского² Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород³ Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik, Halle (Saale), Germany

matveevsa.sou@gmail.com

Поступила в редакцию 24.09.2013

Комбинированным методом гетероэпитаксии из атомарного потока Si и молекулярного потока GeH₄ на подложках Si(100) выращены периодические гетероструктуры Si/SiGe. Структуры исследовались методами рентгеновской дифракции, вторично-ионной масс-спектрометрии и просвечивающей электронной микроскопии. Полученные данные свидетельствуют о высоком структурном совершенстве структур, резких границах раздела между слоями, повторяемости толщин и состава слоев в периодических структурах.

Ключевые слова: полупроводники, кремний-германий, молекулярно-пучковая эпитаксия, кремниевая подложка, периодические гетероструктуры.

Введение

Гетероструктуры (ГС) Si/Si_{1-x}Ge_x интенсивно исследуются с целью их использования в новых приборах микро- и оптоэлектроники [1]. Для успешного изготовления приборов на основе таких ГС рассматриваются низкотемпературные методы выращивания. Это обусловлено уменьшением проблем, связанных с большой разницей в параметрах элементарных ячеек Ge и Si (4.2%), что затрудняет гетероэпитаксию их твердых растворов на Si из-за тенденции к образованию и развитию трехмерных зародышей по мере увеличения концентрации Ge [2]. Кроме того, при высоких температурах возникает взаимная диффузия. Низкотемпературный рост ГС такого типа обычно проводят с использованием методов молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) или газовой эпитаксией в сверхвысоком вакууме (аббревиатура англоязычного названия UHV CVD) [3, 4]. Температура роста в этих методах составляет 500–550°C. Метод МПЭ из-за использования твердотельных источников страдает от микрокластерирования и градиентности состава. Кроме того, в многослойных ГС Si/Si_{1-x}Ge_x, выращенных этим методом, наблюдаются вариации толщины и взаимодиффузия.

Метод UHV CVD является химико-молекулярным процессом, который позволяет избе-

жать микрокластеризирующего столкновительного процесса, характерного для МПЭ. Однако процессы, происходящие при осаждении слоев Si и Ge на поверхности роста, не поддаются жесткому контролю, что затрудняет выращивание ГС с заданными параметрами.

Целью данной работы являлось исследование структуры, состава и воспроизводимости параметров слоев в периодических ГС Si_{1-x}Ge_x/Si, выращенных на подложках Si(100) комбинированным методом, где источником паров Si и легирующей примеси являлся сублимационный источник, а поток атомов Ge формировался в процессе разложения моногермана (GeH₄) в камере роста.

Методика эксперимента

ГС Si_{1-x}Ge_x/Si были выращены в сверхвысоковакуумной установке, изготовленной в НИФТИ ННГУ. Атомарный поток Si создавался сублимацией бруска, вырезанного из слитка монокристаллического Si, а поток Ge формировался при разложении моногермана, напускаемого в камеру роста до давления 2·10⁻⁵–6·10⁻⁴ Торр, на разогретом источнике Si. Подложка Si(100) подвергалась предварительной тщательной химической обработке. Тонкий окисный слой с её поверхности удалялся во время отжига в вакууме при температуре 1200°C в течение 10 минут. Бу-

ферный слой Si толщиной ~ 0.2 мкм осаждался на подложку Si перед ростом ГС. Скорость роста ГС составляла ~ 0.2 нм/с, общая толщина – до 2 мкм. В ряде случаев слои дополнительно легировались атомами эрбия (Er), испаряемыми совместно с Si из Si:Er-источника.

Использованная нами методика предростовой подготовки подложек, а также задействование химико-молекулярных процессов при росте слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, предполагающих разложение моногермана на атомарный водород и другие радикалы, позволили снизить температуру роста ГС до 350°C , а концентрацию Ge в слое твердого раствора довести до 35%. Полученные слои $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ имели гладкую поверхность, что свидетельствует о послойном механизме роста. При таких условиях были выращены многослойные структуры $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$, состоящие из чередующихся по периодическому закону слоев Si и слоев твердого раствора SiGe.

Рентгенодифракционные исследования отдельных слоев и периодических ГС проводились на дифрактометре D8 DISCOVER (Bruker) в схеме двухкристального спектрометра (два германиевых щелевых кристалла-монокроматора). Программа динамического моделирования была использована как вспомогательное средство для определения кристаллического совершенства, резкости границ раздела, толщин слоев и содержания Ge в ГС. Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) также была проведена для исследования качества ГС и резкости границ раздела. Методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) исследовались состав и периодичность слоев в ГС.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 приведены дифракционные кривые (1 – эксперимент; 2 – теория) ГС, состоящей из

10 слоев Si:Er/ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с толщиной каждого слоя Si 44 нм и каждого слоя SiGe 15 нм. Содержание Ge в слоях составляет $\sim 35\%$. Хорошее согласование экспериментальной и модельной дифракционных кривых указывает на то, что достигнуто высокое качество многослойной ГС с напряженными слоями, резкими границами раздела и высокой однородностью (повторяемостью) толщины и состава слоев Si:Er, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$.

Для подтверждения результатов, полученных методом РД, ГС были исследованы методом ВИМС (рис. 2). Видно, что периодичность слоев воспроизводится с высокой точностью. Границы раздела между слоями резкие, т.е. сегрегации атомов Ge и легирующей примеси (Er) не наблюдается.

Были также проведены исследования периодических ГС методом просвечивающей электронной микроскопии. На рис. 3 приведена ПЭМ-микрофотография поперечного сечения ГС Si/ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с тремя периодами слоев Si, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. На этом рисунке слои Si и SiGe соответствуют областям яркого и темного контраста, соответственно. Как видно из рисунка, в полученной ГС отсутствуют дислокации несоответствия. Толщины слоев Si и SiGe при измерении оказались равными 100 и 33 нм, соответственно. На рис. 4 приведен профиль распределения Ge вдоль линии, проведенной на микрофотографии ПЭМ (рис. 3). Видно, что состав слоев твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ хорошо воспроизводится от слоя к слою.

Объяснение такого рода распределения атомов Ge и легирующей примеси Er по толщине ГС можно связать с наличием атомов водорода на поверхности роста, которые образуются при разложении моногермана на горячем Si-источнике. При низких температурах роста атомы водорода пассивируют поверхность роста и способствуют интенсивному захвату атомов Ge и примеси растущим слоем [5, 6].

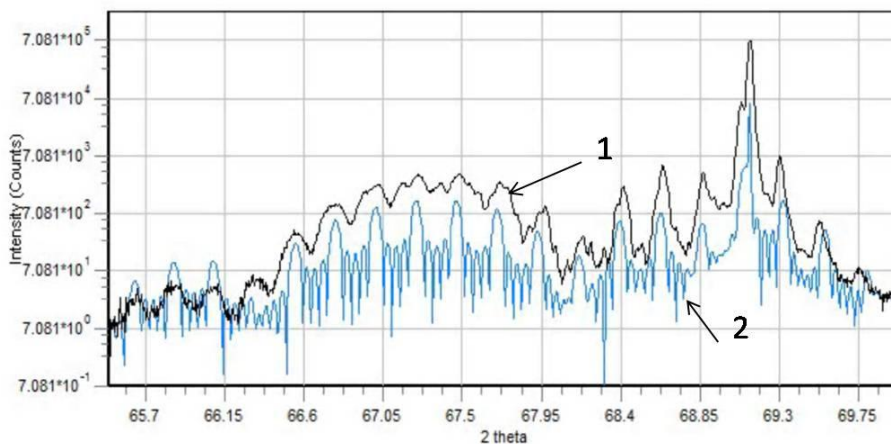


Рис. 1. Дифракционные кривые ГС, состоящей из 10 слоев Si:Er/ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (1 – эксперимент; 2 – теория)

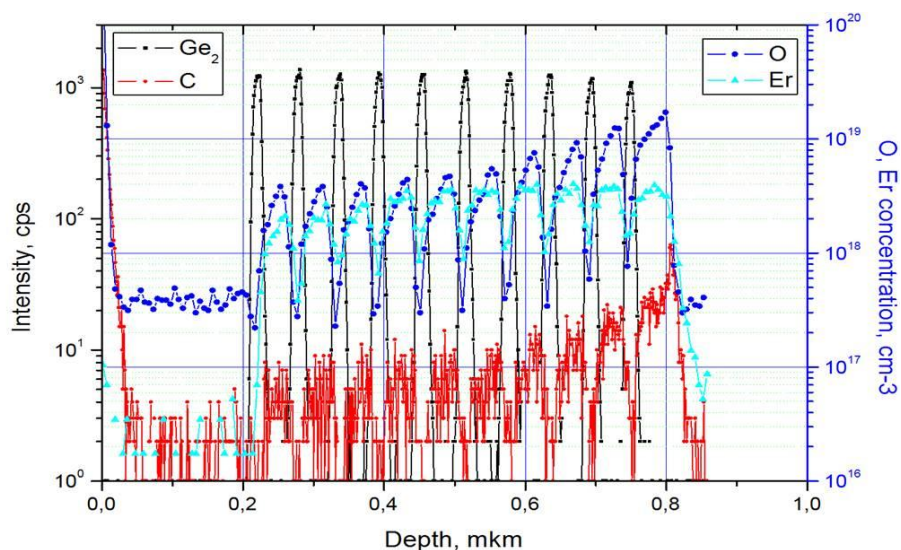


Рис. 2. ВИМС-профиль распределения Ge, Er, O и C по толщине структуры

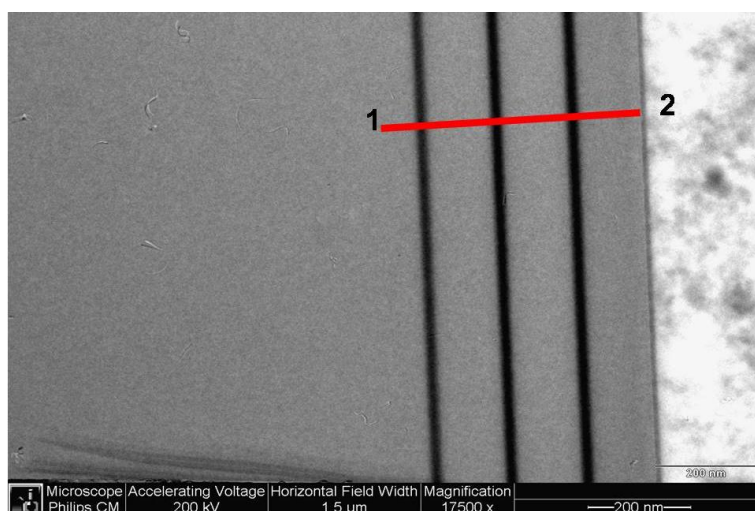
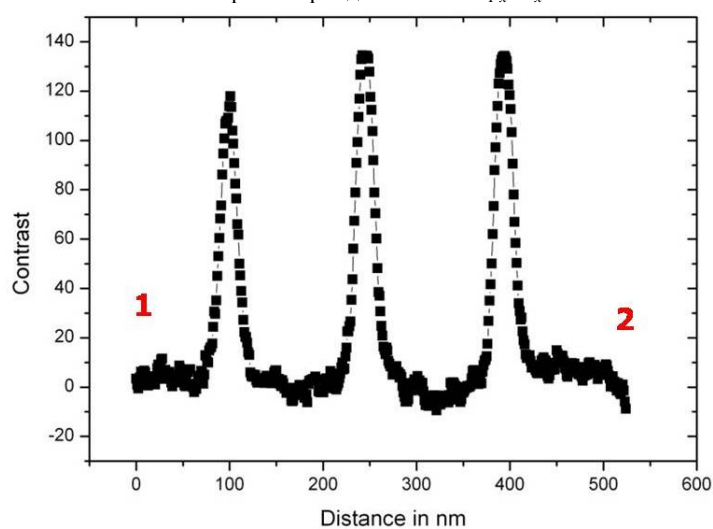
Рис. 3. ПЭМ-микрофотография (поперечное сечение) ГС Si/Si_{1-x}Ge_x с тремя периодами ГС Si/Si_{1-x}Ge_x

Рис. 4. Профиль распределения Ge вдоль линии, отмеченной на ПЭМ-микрофотографии (рис. 3)

Заключение

Комбинированным методом гетероэпитаксии из атомарного потока Si и молекулярного потока GeH₄ на подложках Si(100) выращены совершенные по структуре многослойные периодические ГС со слоями Si и твердого раствора Si_{1-x}Ge_x с концентрацией Ge вплоть до 35% и толщиной в десятки нм.

Для характеристики выращенных периодических структур использовались методы РД высокого разрешения, ПЭМ и ВИМС. В методе РД получено хорошее соответствие экспериментальных и модельных кривых качания, указывающее на получение высококачественных ГС с резкими границами раздела и хорошей однородностью слоев по толщине и составу. Структурное совершенство и воспроизводимость состава слоев в периодической структуре также подтверждаются исследованиями ГС ме-

тодами просвечивающей электронной микроскопии и ВИМС.

Работа выполнена при поддержке проекта ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (грант № 14.В37.21.0337).

Список литературы

1. Rupp T., Messarosh I., Eisele U. // J. Cryst. Growth. 1998. V. 183. P. 99.
2. Cullis A.G., Booker G.R. // J. Cryst. Growth. 1971. V. 9. P. 132–138.
3. Ota Y. // Thin Solid State. 1983. V. 106. P. 3.
4. Hirayama H., Hiroi K., Tatsumi T. // J. Cryst. Growth. 1990. V. 105. P. 46.
5. Chen L.P., Chou C.T., Huang G.W. et al. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. № 20. P. 3001–3003.
6. Thomson P.E., Silvestre C., Twigg M. et al. // Thin Solid Films. 1998. № 321. P. 120–124.

PERIODIC Si/SiGe HETEROSTRUCTURES GROWN ON Si(100) FROM Si ATOMIC FLUX AND GeH₄ MOLECULAR FLOW

*S.A. Matveev, S.A. Denisov, V.Yu. Chalkov, V.G. Shengurov,
M.V. Stepikhova, M.N. Drozdov, P.A. Yunin, N.D. Zakharov*

Si/SiGe periodic heterostructures are grown on Si(100) substrates by combined method of heteroepitaxy from the Si atomic flux and GeH₄ molecular flow. The structures have been studied by X-ray diffraction, secondary ion mass spectroscopy and transmission electron microscopy. The data obtained indicate a high structural perfection of the structures, sharp interfaces between the layers, repeatability of thickness and composition of the layers in periodic structures.

Keywords: semiconductors, silicon-germanium, molecular beam epitaxy (MBE), silicon substrate, periodic heterostructures.

References

1. Rupp T., Messarosh I., Eisele U. // J. Cryst. Growth. 1998. V. 183. P. 99.
2. Cullis A.G., Booker G.R. // J. Cryst. Growth. 1971. V. 9. P. 132–138.
3. Ota Y. // Thin Solid State. 1983. V. 106. P. 3.
4. Hirayama H., Hiroi K., Tatsumi T. // J. Cryst. Growth. 1990. V. 105. P. 46.
5. Chen L.P., Chou C.T., Huang G.W. et al. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. № 20. P. 3001–3003.
6. Thomson P.E., Silvestre C., Twigg M. et al. // Thin Solid Films. 1998. № 321. P. 120–124.