

06:07

Структура и фотопроводимость эпитаксиальных слоев SiGe/Si, модифицированных моноимпульсным лазерным облучением

© Г.Д. Ивлев, Н.М. Казючиц, С.Л. Прокопьев,
М.С. Русецкий, П.И. Гайдук

Белорусский государственный университет, Минск
E-mail: ivlev-1947@mail.ru

Поступило в Редакцию 26 июня 2014 г.

Методами электронной микроскопии исследовано воздействие наносекундных импульсов излучения рубинового лазера на структурное состояние и морфологию эпитаксиальных слоев твердого раствора $\text{SiO}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ на кремнии с иницированием фазового перехода кристалл–расплав. Получены данные о фотоэлектрических параметрах лазерно-модифицированных слоев, обладающих ячеистой структурой вследствие сегрегации германия на стадии отвердевания бинарного расплава.

Твердые растворы $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с задаваемой параметром „ x “ шириной запрещенной зоны применяются/формируются при создании различных микро- и оптоэлектронных приборных структур, в технологии которых может быть эффективно использована импульсная лазерная обработка (ИЛО) — весьма привлекательный как с практической, так и с научной точек зрения метод модификации полупроводниковых материалов и тонкопленочных систем [1]. Эффекты ИЛО различных германий-кремниевых структур в наносекундном диапазоне длительностей воздействующего излучения исследовались в ряде работ [2–8], в том числе в режимах наносекундной ИЛО [8] указанных гетероэпитаксиальных слоев. Однако в литературе практически отсутствуют сведения об изменении фотоэлектрических параметров таких слоев во взаимосвязи с модификацией их структурного состояния вследствие ИЛО.

В этом контексте цель данной работы заключалась в исследовании структуры и фотопроводимости (ФП) эпитаксиальных слоев $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$

на кремнии, модифицированных наноимпульсным излучением рубинового лазера, в сравнении с их исходными характеристиками.

Гетероструктуры препарировались методом молекулярно-лучевой эпитаксии (установка VG Semicon V80) на стандартных подложках Si(100) *n*-типа проводимости с удельным сопротивлением $4.5 \Omega \cdot \text{cm}$, на которых предварительно выращивались 6 переходных буферных слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ толщиной по $0.2 \mu\text{m}$ с увеличением доли германия (параметра „*x*“) на 7.5% в каждом слое. Затем формировался слой $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$ (толщина $1.3 \mu\text{m}$) *p*-типа проводимости с шириной запрещенной зоны 0.91 eV [9].

ИЛО проводилась в экспериментальных условиях [6,10] при длительности импульса излучения рубинового лазера 80 ns по уровню 0.5 от максимума (FWHM) и неоднородности распределения энергии не выше $\pm 5\%$ по зоне облучения диаметром 4.5 mm . Образцы облучались при плотностях энергии ИЛО $W = 1.5, 2.0$ и 2.5 J/cm^2 . Структура слоев и состояние облученной поверхности исследовались методами просвечивающей (ПЭМ) и растровой (РЭМ) электронной микроскопии на микроскопах ЭМ-125 и LEO-1455VP соответственно.

Измерения спектров ФП исходного и лазерно-модифицированных SiGe слоев проводились в спектральном интервале $0.6\text{--}1.4 \mu\text{m}$. Исследованный образец (рис. 1, *e*), наряду с исходной структурой, содержал три облученных лазером участка ($W = 1.5, 2.0$ и 2.5 J/cm^2) с нанесенными на них после ИЛО серебряными контактами. Освещение образца проводилось со стороны эпитаксиального слоя. Расположение контактов на поверхности освещаемого SiGe слоя позволяло регистрировать изменение именно его проводимости. Этому способствовала также и меньшая, по сравнению с кремнием, ширина запрещенной зоны SiGe, ограничивающая проникновение возбуждающего ФП света в Si подложку. Для возбуждения ФП использовалось выделенное решеточным монохроматором МДР-12У излучение лампы накаливания СИ-100. Регистрация фототока осуществлялась по типичной схеме с подачей внешнего напряжения 10 V на последовательно соединенные образец и сопротивление нагрузки. Изменение падения напряжения на сопротивлении нагрузки после усиления и детектирования подавалось на аналогово-цифровой преобразователь, связанный с персональным компьютером. Полученные спектры нормировались на величину интенсивности излучения, возбуждающего ФП.

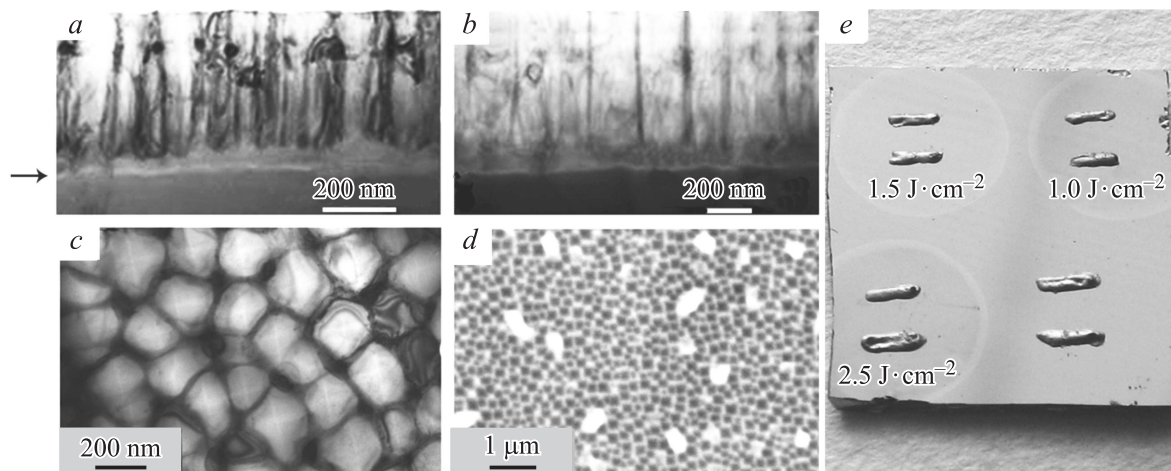


Рис. 1. ПЭМ-изображение в поперечной (*a, b*) и планарной (*c*) геометриях съемки и РЭМ-снимок (*d*) слоев $\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$, облученных при плотностях энергии $W = 1.5$ (*a*, стрелкой указана глубина проплавления) и 2.5 J/cm^2 (*b-d*), *e* — фотография образца с контактами для измерений ФП (числами обозначена величина W).

Результаты электронно-микроскопических исследований (рис. 1, *a–d*) свидетельствуют о переходе части слоя SiGe вследствие лазерно-индуцированных фазовых превращений в новое структурное состояние, радикально отличающееся от исходного. Трансформация состояния облученных участков фиксируется и визуально в связи с изменением не только их структуры, но и оптических характеристик. Области ИЛО достаточно четко выделяются на фотографии образца (рис. 1, *e*), размер которого 1 см^2 .

Данные ПЭМ (рис. 1, *a, b*) в поперечном сечении (cross-section) зон лазерного воздействия указывают на образование развитой (рис. 1, *a*, $W = 1.5\text{ Дж/см}^2$) и более однородной (рис. 1, *b*, $W = 2.5\text{ Дж/см}^2$) ячеистой структуры (ЯС). Формирование ЯС в иницируемых ИЛО фазовых превращениях связано [8] с сегрегационным вытеснением германия из ячеек, зарождающихся и далее растущих к поверхности на стадии отвердевания бинарного расплава от монокристаллической (не переплавленной) части слоя SiGe. На микрофотографии (рис. 1, *b*) четко видны вертикальные границы между ячейками, обогащенные германием. Из изображения этой ЯС в планарной геометрии ПЭМ (рис. 1, *c*) следует, что средний латеральный размер ячеек составляет около 200 нм .

На изображении (рис. 1, *d*) изучаемой структуры видны субмикронные поверхностные кластеры с преимущественным содержанием германия, что установлено [8] рентгеноспектральным анализом их состава в ходе проведения РЭМ, т.е. сегрегационное вытеснение германия в процессе формирования ЯС происходит не только к границам ячеек, но и в направлении их роста к поверхности. Скорость роста составляет примерно 0.5 м/с . Она определена на основе данных ПЭМ (рис. 1, *b*) о толщине модифицированной части слоя SiGe (т.е. глубине проплавления около 1 мкм) и проведенных по методике [6,9] измерений длительности фазовых превращений, которая составила $\sim 2\text{ мкс}$.

Следует отметить, что эффект сегрегации германия в условиях наносекундного лазерного облучения слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ известен и исследовался, в частности, в работе [2] ($x \leq 0.1$) с применением ХеСІ эксимерного лазера ($\lambda = 308\text{ нм}$, 30 нс). В наших экспериментальных условиях ($\lambda = 694\text{ нм}$, 80 нс) ранее исследовались [6] особенности лазерной модификации Si–Ge сверхрешеток толщиной 0.6 мкм на подложках Si(100) и наблюдалось формирование вследствие сегрегации Ge подобных (рис. 1, *d*) ячеистых структур, однако с меньшим ($\sim 100\text{ нм}$) средним размером ячеек примерно квадратной формы.

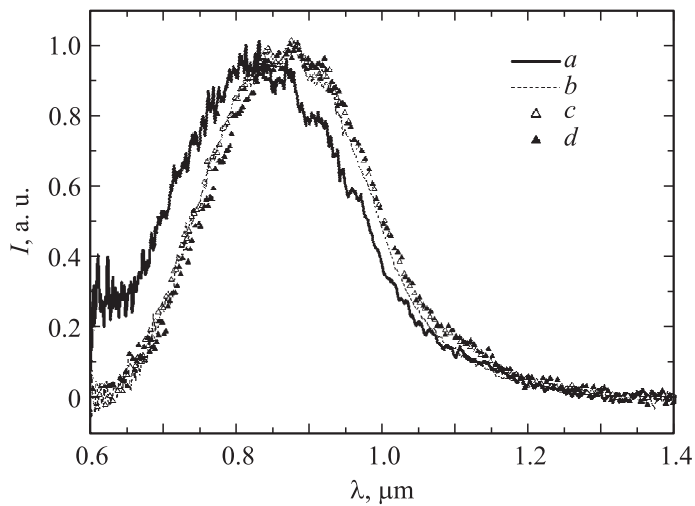


Рис. 2. Спектры ФП исходных (а) и лазерно-модифицированных слоев $\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}/\text{Si}$; $W = 1.5$ (b), 2 (c) и 2.5 J/cm^2 (d).

Образование вышеописанных ячеистых структур приводит к существенному изменению электрофизических и фотоэлектрических характеристик эпитаксиальных слоев $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}$. Контрольные измерения слоевого сопротивления образцов ρ четырехзондовым методом на установке ИУС-3 показали, что исходная величина $\rho = 9.2 \text{ k}\Omega/\square$ в результате ИЛО слоя уменьшается до 5.0 ($W = 1.5 \text{ J/cm}^2$) и $2.4 \text{ k}\Omega/\square$ (2.5 J/cm^2). При подсветке излучением HeNe лазера ($\lambda = 633 \text{ nm}$) тестируемой поверхности образцов, т.е. при инициировании ФП, слоевое сопротивление исходного SiGe слоя понижалось на 23%, а лазерно-модифицированных слоев — на 13 (1.5 J/cm^2) и 5% (2.5). Приведенные данные свидетельствуют о том, что модифицированные ИЛО слои обладают более высокой электропроводностью и меньшей фоточувствительностью в сравнении с исходными параметрами $\text{Ge}_{0.5}\text{Si}_{0.5}/\text{Si}$.

Исходный эпитаксиальный слой $\text{Si}_{0.5}\text{Ge}_{0.5}/\text{Si}$ характеризуется длинноволновой границей внутреннего фотоэффекта около $\lambda = 1.4 \mu\text{m}$ и максимумом ФП в окрестности $\lambda = 0.84 \mu\text{m}$ (рис. 2, а). Следствием ИЛО является сдвиг спектра ФП в длинноволновую область в среднем на $\Delta\lambda = 0.05 \mu\text{m}$ (рис. 2, b–d). Спектры ФП образцов, модифицирован-

ных в интервале плотностей энергии ИЛО от 1.5 до 2.5 J/cm², различаются незначительно. Это свидетельствует о том, что определяющее влияние на их эволюцию оказывает переход части слоя в качественно новое состояние (образование ЯС), а не изменение количественных характеристик ЯС в этом интервале варьирования величины W .

Сдвиг спектров в длинноволновую область объясняется обогащением германием части объема слоя SiGe вследствие произошедших в нем фазовых превращений. Германий обладает меньшей шириной запрещенной зоны и, соответственно, характеризуется большей чувствительностью к длинноволновому излучению. Значительно меньшее слоевое сопротивление модифицированных слоев SiGe (см. выше) в сравнении с исходным также связано с наличием собственно германия, вытесненного в окрестности ячеек и границы ЯС.

Пониженная фоточувствительность модифицированных слоев ассоциируется со сложностью строения ЯС и высоким содержанием точечных дефектов (дефектов закалки) в кристаллической решетке, что интенсифицирует рекомбинацию генерируемых светом неравновесных носителей заряда (электронов и дырок), обуславливающих возникновение фотопроводимости. Области ЯС с избыточным содержанием германия и, соответственно, с пониженной шириной запрещенной зоны являются стоками электронов и дырок, что способствует ускорению рекомбинационных процессов.

Основным результатом проведенного исследования является получение и интерпретация совокупных данных о структуре и фотоэлектрических свойствах лазерно-модифицированных эпитаксиальных слоев твердого раствора SiGe, что важно при оценке возможностей ИЛО в технологии приборных SiGe-структур.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ по проекту Ф13К-117.

П.И. Гайдук выражает благодарность Международному стипендиальному фонду Марии Кюри (грант № 911932 на выполнение проекта PIFR-Ga-2011-911932) за поддержку исследования.

Список литературы

- [1] Poate J.M., Foti G., Jacobson D.C. (Eds). Surface Modification and Alloying by Laser, Ion, and Electron Beam. Springer, 1983. 414 p.
- [2] Brunco D.P., Thompson M.O., Hoglund D.E., Aziz M.J., Gossmann H.-J. // J. Appl. Phys. 1995. V. 78 (3). P. 1575–1582.

- [3] *Krishnan S., Chaundhry M.I., Babu S.V.* // J. Mater. Res. 1995. V. 10. N 8. P. 1884–1888.
- [4] *Larciprete R., Willmor P., Martelli S.* et al. // Appl. Surf. Sci. 1996. V. 106. P. 179–185.
- [5] *Frangis N., Van Landuyt J., Larciprete R.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1998. V. 72. N 22. P. 2877–2879.
- [6] *Sobolev N.A., Ivlev G.D., Gatskevich E.I.* et al. // Mater. Sci. Eng. C. 2003. V. 23. P. 19–22.
- [7] *Weizman M., Nickel N.H., Sieber I., Yan B.* // J. Appl. Phys. 2008. V. 103. P. 093 536-1–093 536-10.
- [8] *Gaiduk P.I., Prakopyev S.L.* // Springer Series in Material Science. 2013. V. 192. P. 79–105.
- [9] *Ланков Ж.* Оптические процессы в полупроводниках / Под ред. Ж.И. Алфёрова и В.С. Вавилова. М., 1973. 456 с.
- [10] *Ивлев Г.Д., Гацкевич Е.И.* // ЖТФ. 2012. Т. 82. В. 6. С. 69–72.