

ВАКУУМНОЕ ОСАЖДЕНИЕ И ИМПУЛЬСНАЯ МОДИФИКАЦИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК Ge НА Si. СТРУКТУРА И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

Р.И. Баталов¹⁾, Р.М. Баязитов¹⁾, Г.А. Новиков¹⁾, В.А. Шустов¹⁾, Д.А. Бизяев¹⁾,
П.И. Гайдук²⁾, Г.Д. Ивлев²⁾, С.Л. Прокопьев²⁾

¹⁾Казанский физико-технический институт КазНЦ РАН, Казань

²⁾Белорусский государственный университет, Беларусь, Минск

тел: +7-843-231-9102, e-mail: batalov@kfti.knc.ru

Изучено вакуумное осаждение пленок Ge на подложки Si методом магнетронного распыления. В процессе осаждения варьировалось время распыления и температура подложки. Проведен наносекундный импульсный отжиг осажденных пленок Ge мощными лазерными или ионными пучками. Изучена зависимость структуры и оптических свойств пленок Ge/Si от параметров импульсных обработок.

Введение

В последние 20 лет значительно вырос интерес к тонкопленочным структурам на основе кремния, излучающим в видимой и ближней ИК-области. Такой интерес обусловлен возможностями создания светоизлучающих диодов и лазеров с использованием хорошо развитой планарной КМОП-технологии и их интеграции с микро- и оптоэлектронными приборами и волоконными линиями связи. Поскольку наибольший интерес для оптоэлектроники представляет диапазон длин волн 1.3-1.6 мкм (окно прозрачности кварца и кремния), то к настоящему времени сформировалось четыре базовых подхода к созданию кремниевых структур излучающих в данной области. К таковым следует отнести легирование кремния редкоземельными элементами (прежде всего эрбием) [1], синтез прямозонных бинарных соединений с кремнием (например, дисилицида железа $\beta\text{-FeSi}_2$) [2], «дефектную» инженерию, включающую введение в кремний точечных (*W*- и *G*-центры) и протяженных (дислокационные линии *D1-D4*) дефектов [3-4], а также создание SiGe сплавов, квантовых точек Ge в Si и напряженных слоев Ge на Si [5-7]. Наибольший прогресс в создании эффективных светоизлучающих структур достигнут в рамках последнего из упомянутых подходов, где получена лазерная генерация на слоях Ge/Si при оптической и электрической накачке при комнатной температуре. Необходимо отметить, что прямозонная люминесценция на длине волны $\lambda \sim 1.6$ мкм ($h\nu \sim 0.8$ эВ) от слоев Ge, который в обычных условиях является непрямозонным материалом ($E_g \sim 0.7$ эВ), имеет место лишь при введении в Ge растягивающей деформации до 0.5% и легирования примесью *n*-типа (фосфор) до уровня $\sim 10^{19}$ см⁻³ [7]. Основными методами роста напряженных и сильно легированных слоев Ge на Si являются сверхвысоковакуумная молекулярно-лучевая и газофазная эпитаксия с последующим высокотемпературным отжигом. В данной работе изучалось влияние импульсных наносекундных воздействий мощными лазерными или ионными

пучками на пленки Ge, осажденные на подложки Si методом магнетронного распыления.

Эксперимент

В качестве подложек использовались монокристаллы Cz-Si (15x15x0.4 мм) с ориентацией (100) и (111) и удельным сопротивлением 5-10 Ом·см. Перед загрузкой в камеру пластины Si последовательно очищались в ацетоне, этиловом спирте, водном растворе плавиковой кислоты и промывались в дистиллированной воде. Вакуумное осаждение пленок Ge на подложки Si проводилось на установке ВУП-5М, оснащенной приставкой для несбалансированного магнетронного распыления. В качестве мишени использовалась пластина *p*-Ge диаметром 40 мм. Откачка вакуумной камеры проводилась до остаточного давления $\sim 10^{-6}$ Торр. Расстояние мишень-подложка составляло 30 мм. В процессе осаждения варьировалась температура подложки ($T = 20\text{-}200$ °C) и время распыления ($t = 3\text{-}20$ мин). Толщина осажденных пленок Ge составляла 90-1000 нм. Импульсная модификация осажденных пленок Ge проводилась на воздухе импульсами рубинового лазера ($\lambda = 0.69$ мкм, $\tau = 80$ нс) или в вакууме с использованием сильноточного (до 150 А/см²) импульсного ионного пучка (C^+ , H^+ , $E = 300$ кэВ, $\tau = 50$ нс) на ускорителе ТЕМП. В процессе импульсных воздействий варьировалась плотность энергии ($W = 0.3\text{-}1.2$ Дж/см²) и число импульсов ($N = 1\text{-}10$). Доза ионов углерода и водорода, внедренных в пленки Ge в процессе импульсной ионной обработки (ИИО), не превышала 3×10^{13} см⁻² за один импульс. Отдельные образцы подвергались термическому отжигу в печи ($T = 500\text{-}800$ °C) в среде азота. Измерения толщины пленок Ge и шероховатости поверхности до и после импульсных воздействий проводились методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) и профилометрии. Химический и фазовый состав пленок изучался методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), Резерфордского обратного рассеяния (РОР) и рентгеновской дифракции в скользящих лучах (РДСЛ). Микроструктура пленок изучалась методом просвечивающей

электронной микроскопии (ПЭМ). Фотолюминесценция импульсно-модифицированных пленок Ge исследовалась в ближней ИК-области ($\lambda = 1-2$ мкм) при температуре $T = 77$ К. Возбуждение сигнала ФЛ проводилось непрерывным излучением DPSS лазера ($\lambda = 532$ нм, $P = 400$ мВт), а регистрация сигнала – охлаждаемым InGaAs фотодиодом.

Результаты и обсуждение

АСМ-измерения морфологии поверхности пленок Ge/Si показали, что размеры островков Ge варьируются в интервале 40-100 нм при среднеквадратичной шероховатости $RMS < 1.6$ нм при температуре осаждения $T = 20-200$ °С. РДСЛ-измерения показали аморфную структуру пленок. Импульсный лазерный отжиг (ИЛО) пленок Ge с нарастающей плотностью энергии ($W = 0.3-1.5$ Дж/см²) приводит к уменьшению содержания аморфной фракции Ge, росту размеров островков Ge (до 0.5 мкм) и шероховатости поверхности (до 25 нм). По данным РОР-измерений пленки Ge теряют значительную часть своей толщины (до 2/3) в результате ИЛО. Это может быть связано с выделением максимальной энергии лазерного излучения вблизи поверхности и окислением Ge при его нагреве на воздухе.

В отличие от ИЛО отжиг пленок Ge мощными ионными пучками (ИИО) позволяет проводить рекристаллизацию более толстых пленок (до 1 мкм) и уменьшить потерю вещества за счет выделения максимальной энергии в глубине подложки (в области пробега ионов) и облучения пленок в бескислородной среде (вакуум). Результаты РОР-измерений показали меньшую степень эрозии пленок при ИИО. Кроме того, РДСЛ-измерения демонстрировали эффективную рекристаллизацию пленок, вплоть до эпитаксиальной в зависимости от их толщины. Образование монокристаллических пленок обусловлено плавлением тонкой пленки Ge и нижележащих слоев Si подложки на глубину ~ 0.2 мкм и их перемешиванием с образованием SiGe сплава. В случае толстых пленок Ge (сотни нм) фронт расплава не достигал Si подложки и пленка Ge становилась поликристаллической. При этом степень перемешивания атомов Ge и Si

была незначительной в связи с различием точек плавления Si (1410 °С) и Ge (940 °С). ПЭМ-измерения исходных пленок Ge демонстрировали образование отдельных частиц с размерами 30-50 нм в аморфной матрице Ge (аморфное гало на микродифракции). ИИО приводила к образованию монокристаллических SiGe слоев с пронизывающими дислокациями в случае малых толщин пленок (~ 100 нм) и поликристаллических бездислокационных Ge слоев при больших толщинах пленок с размерами зерен 0.2-0.7 мкм.

Оптические измерения пленок Ge/Si на пропускание в области 900-2500 нм показали падение уровня пропускания и сдвиг края поглощения в длинноволновую область с ростом толщины пленок. ФЛ-измерения гетероструктур Ge/Si после ИИО и дополнительного термического отжига (800 °С/20 мин) демонстрировали световую эмиссию в области длин волн 1200-1700 нм с максимумом при 1550 нм только на тонких эпитаксиальных пленках. Несимметричная форма линии сигнала, а также микроструктура пленок указывают на излучательную рекомбинацию носителей в сплаве SiGe и на дислокациях. Отсутствие сигнала ФЛ на толстых пленках Ge, по-видимому, связано с их поликристаллической структурой и усиленной безызлучательной рекомбинацией на границах зерен.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №13-02-00348 и частично БРФФИ по проекту № Ф13К-117.

Список литературы

1. Keryon A.J. // *Semicond. Sci. Technol.* - 2005. - 20. - R65-R84.
2. Chu S., Hirohada T., Nakajima K., et al. // *Jpn. J. Appl. Phys.* - 2002. - 41. - L1200-L1202.
3. Bao J., Tabbal M., Kim T., et al. // *Optics Express.* - 2007. - 15. - P.6727-6733.
4. Sveinbjornsson E.O., Weber J. // *Appl. Phys. Lett.* - 1996. - 69. - P.2686-2688.
5. Vescan L., Stoica T. // *J. Luminesc.* - 1999. - 80. - P.485-489.
6. Krasilnik Z.F., Novikov A.V., Lobanov D.N. et al. // *Semicond. Sci. Technol.* - 2011. - 26. - P.014029 (5pp).
7. Liu J., Kimerling L.C., Michel J. // *Semicond. Sci. Technol.* - 2012. - 27. - P.094006 (13pp).

VACUUM DEPOSITION AND PULSED MODIFICATION OF Ge THIN FILMS ON Si. STRUCTURE AND PHOTOLUMINESCENCE

R.I. Batalov¹, R.M. Bayazitov¹, H.A. Novikov¹, V.A. Shustov¹, D.A. Bizyaev¹,
P.I. Gaiduk², G.D. Ivlev², S.L. Prokopiev²

¹Kazan Physical-Technical Institute of RAS, Kazan, Russia

²Belarusian State University, Minsk, Belarus

tel. +7-843-231-9102, e-mail: batalov@kfti.knc.ru

Vacuum deposition of Ge thin films onto Si substrates by magnetron sputtering was studied. During deposition sputtering time and substrate temperature were varied. Nanosecond pulsed annealing of deposited films by powerful laser or ion beams was performed. The dependence of the structure and optical properties of Ge/Si films on parameters of pulsed treatments was investigated. Optimum parameters of deposition and pulsed treatments resulting into light emitting monocrystalline Ge/Si layers are determined.