

Рисунок 4 – Взаимное расположение источника света А и освещаемой точки В в плоскости Р

Из рис. 4 очевидно, что

$$E(x) = \frac{I(\arctg \frac{x}{b_0}) (\cos^3(\arctg \frac{x}{b_0}))}{b_0^2}, \quad (3)$$

где b_0 – расстояние между источником излучения А и плоскостью Р, x – координата освещаемой точки В, лежащей на плоскости Р.

Литература

1. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий : СанПиН 2.21/2.1.1/1278-03.
2. Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений : ГОСТ 55719-2013.
3. Никифоров, С. Проблемы, теория и реальность светодиодов для современных систем отображения информации высшего качества / С. Никифоров // Компоненты и технологии. – 2005. – № 5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kit-e.ru/led/problemy-teoriya-i-realnost-svetodiodov-dlya-sovremennyh-sistem-otobrazheniya-informaczi-vysshego-kachestva/> – Дата доступа: 2.09.2021.
4. Бугров, В. Е. Оптоэлектроника светодиодов. Учебное пособие / В. Е. Бугров, К. А. Виноградова. – СПб : НИУ ИТМО, 2013 – 174 с.
5. Гуторов, М. М. Основы светотехники и источники света : учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., доп. и перераб. / М. М. Гуторов. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 384 с.

УДК 621.315.592

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ГЕРМАНИЙ-КРЕМНИЕВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

Гацкевич Е.И.¹, Ивлев Г.Д.², Малевич В.Л.^{3,4}

¹Белорусский национальный технический университет

²Белорусский государственный университет

³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

⁴ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Изучено перераспределение элементов по глубине в эпитаксиальных GeSi слоях при облучении наносекундными импульсами рубинового лазера. Проанализировано влияние сегрегации на формирование ячеистых структур в неравновесных условиях импульсного воздействия.

Ключевые слова: германий, кремний, гетероструктура, лазерное облучение, сегрегация.

LASER-INDUCED THERMOPHYSICAL PROCESSES IN EPITAXIAL GERMANIUM-SILICON HETEROSTRUCTURES

Gatskevich E.¹, Ivlev G.², Malevich V.^{3,4}

¹Belarusian National Technical University

²Belarusian State University

³Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

⁴B.I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Belarus

Abstract. The redistribution of elements in epitaxial GeSi layers under irradiation with nanosecond pulses of a ruby laser has been studied. The effect of segregation on the formation of cellular structures under nonequilibrium conditions of impulse influence is discussed.

Key words: germanium, silicon, heterostructure, laser irradiation, segregation.

Адрес для переписки: Гацкевич Е.И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: gatskevich_elena@bk.ru

Одна из актуальных проблем полупроводниковой оптоэлектроники – создание эффективных источников света на основе германия, излучающих при комнатной температуре. В частности, гетероструктуры GeSi/Si были использованы при разработке фотодетекторов инфракрасного диа-

пазона [1] и лазерных структур [2]. Перспективы использования Ge/Si гетероструктур придают актуальность поиску альтернативных методов их создания и модификации. В недавних работах [3] было показано, что таким методом может быть импульсная лазерная обработка (ИЛО). В част-

ности установлено, что при ИЛО происходят морфологические изменения поверхности вплоть до образования ячеистых структур [3–4]. Механизмы появления этих морфологических изменений до конца не выяснены. В настоящей работе исследованы процессы массопереноса в условиях ИЛО в GeSi гетероструктурах (ГС), полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Изучаемые структуры, облучались наносекундными импульсами излучения рубинового лазера. Диагностика фазового состояния поверхности зоны ИЛО проводилась методом оптического зондирования *in situ*. Распределение элементов в образцах по глубине до и после ИЛО анализировалось методом вторично-ионной масс-спектрографии (ВИМС). Для определения глубин проплавления проводилось численное моделирование теплофизических процессов ИЛО.

В процессе создания гетероструктур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках Si (100) формировались четыре буферных слоя с толщиной приблизительно 0,25 мкм. Содержание Ge увеличивалось с каждым слоем на 15 %. Затем выращивался слой $\text{Ge}_{70}\text{Si}_{30}$ с низкой концентрацией дефектов дислокационного типа. Толщина $\text{Ge}_{70}\text{Si}_{30}$ слоев составляла 1,4 мкм (рис. 1).

Исследуемые образцы облучались пучком рубинового лазера (длительность импульса 80 нс по уровню 0,5) с заданными плотностями энергии W при неоднородности ее распределения по облучаемой зоне диаметром 3–4 мм не выше $\pm 5\%$. Одновременно проводилось оптическое зондирование зоны ИЛО на длинах волн 0,53 и/или 1,06 мкм путем детектирования отраженного от нее пробного пучка. Источником зондирующего излучения являлся лазер на стекле, активированном неодимом, работающий в режиме свободной генерации (длительностью 0,5 мс). Оба лазера работали в режиме взаимно синхронизированных одиночных вспышек. Зондирование поверхности позволяло по динамике отражательной способности зоны ИЛО определить время существования жидкой фазы. Плотность энергии в лазерном импульсе $W = 1,6\text{--}2,4$ Дж/см² варьировалась калиброванными нейтральными фильтрами.

ВИМС-измерения проводились на установке TOF.SIMS-5 с времяпролетным масс-анализатором и двумя ионными пушками – для распыления и зондирования [5]. Ранее этим методом выполнялись исследования подобных германий-кремниевых структур. Данные ВИМС были получены послойным анализом ГС на упомянутой установке при распылении тестируемой области образцов (~ 1 мкм²) ионами Cs^+ с энергией 1 кэВ (ток пучка 70 нА) и зондировании ионами Bi^+ (25 кэВ, 1 нА).

Полученные зависимости параметра $x(z)$, характеризующие распределения Ge по глубине,

приведенные на рисунке 1, в основном совпадают с исходной зависимостью; ступеньки на графиках отражают наличие переходных слоев между внешним слоем GeSi и базовым кристаллом Si. Вместе с тем наблюдаются особенности зависимостей $x(z)$ в модифицированных ИЛО слоях GeSi ($z < 1$ мкм), свидетельствующие о повышенном содержании Ge в ультратонких (< 50 нм) поверхностных областях образцов и локальных минимумах, положение каждого из которых по глубине (0,48 мкм, 0,66 и 0,86 мкм) определяется энергетическим режимом ИЛО ГС.

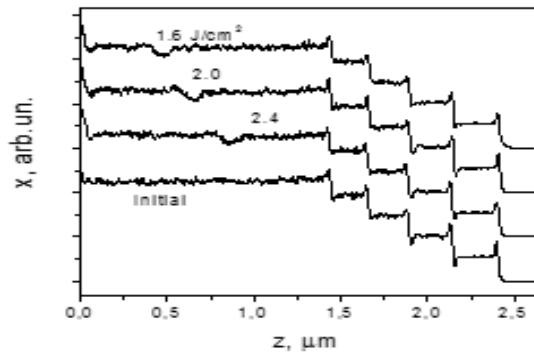


Рисунок 1 – Распределение Ge в эпитаксиальной гетероструктуре $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ по глубине до и после ИЛО с указанными плотностями энергии облучения

Результаты ВИМС анализировались с привлечением данных решения тепловой задачи об импульсном поверхностном нагреве зоны ИЛО. Соответствующее моделирование лазерно-индуцированных фазовых переходов (плавление \leftrightarrow отвердевание) в исследуемых образцах $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ проводилось на основе численного решения задачи Стефана.

Для рассматриваемых экспериментальных условий длина тепловой диффузии за время импульса существенно меньше диаметра лазерного пятна (4 мм), что позволило ограничиться одномерным приближением.

При алгоритмизации задачи использовалась неявная разностная схема, разностные уравнения решались методом прогонки. При расчете учитывались температурные зависимости теплофизических параметров, а также их зависимость от фазового состояния и состава слоев.

Из результатов численного моделирования следует, что в исследованных энергетических режимах ИЛО достигается только частичное проплавление слоев $\text{Ge}_{70}\text{Si}_{30}$. Отвердевание бинарной жидкой фазы в этом случае происходит не от подложки кремния, а от самого твердого раствора. На рис. 2 приведены расчетные значения глубины проплавления и нанесены координаты локальных минимумов. Первая координата (рис. 2) соответствует локальному минимуму концентрации Ge (рис. 1), а вторая координата является координатой начала образования локального минимума.

Результаты расчета времени существования жидкой фазы хорошо коррелируют с экспериментальными данными, полученными методом оптического зондирования. Образование локальных минимумов в распределении Ge по глубине связано с явлениями сегрегации. Хотя кремний и германий образуют непрерывный ряд твердых растворов, в существенно неравновесных условиях нанопульсного нагрева ГС, инициирующего быстрые фазовые превращения твердое состояние \leftrightarrow бинарный расплав, при быстром отвердевании расплавленного слоя происходит сегрегация Ge. Ее следствие – формирование ячеистых структур [3, 4] в результате вытеснения германия в латеральных направлениях, а также к поверхности. Положение каждого из локальных минимумов в распределении Ge (рис. 1) приблизительно на 0,1 мкм ниже достигаемой глубины проплавления. Это различие связано с тем, что моделирование выполнено в приближении плоского фронта фазового перехода.

В результате данного исследования получены данные о перераспределении элементов по глубине в эпитаксиальных слоях $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(100)$ в условиях ИЛО моноимпульсным излучением рубинового лазера. Установлено, что положение локальных минимумов в распределении Ge соответствует глубинам проплавления ГС при заданных значениях W . Происхождение указанных минимумов концентрации германия связано с начальной стадией отвердевания бинарного расплава и зарождением сегрегации, приводящей к формированию ячеистой структуры в результате ИЛО эпитаксиального слоя $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$.

Авторы признательны П.И. Гайдуку за предоставленный образец гетероструктуры $\text{GeSi}/\text{Si}(100)$ и М.Н. Дроздову за данные ВИМС.

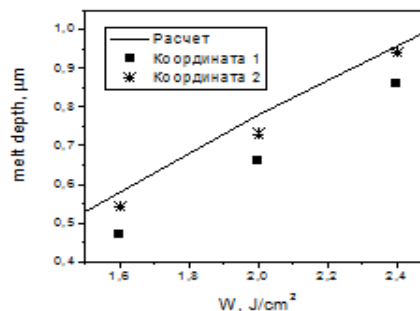


Рисунок 2 – Рассчитанная зависимость максимальной глубины проплавления (сплошная линия) от плотности энергии лазерного облучения. Координата 1 соответствует локальному минимуму, координата 2 – началу формирования локального минимума (пояснения в тексте)

Литература

1. Reliability and performance scaling of very high speed SiGe HBTs / G. Freeman [et al.] // *Microelectronics Reliability*. – 2004. – Vol. 44. – P. 397.
2. Liu, J. Ge-on-Si lasers for large-scale electronic-photon integration / J. Liu, L. C. Kimerling, J. Michel // *Semicond. Sci. Technol.* – 2012. – Vol. 27, № 9. – P.094006(13).
3. Структура и фотопроводимость эпитаксиальных слоев SiGe/Si, модифицированных моноимпульсным лазерным облучением / Г. Д. Ивлев [и др.] // *Письма в ЖТФ*. – 2014. – Т. 40, № 23. – С. 9–15.
4. Гацкевич Е. И. Образование ячеистой структуры в слоях SiGe при наносекундном лазерном облучении / Е. И. Гацкевич, Г. Д. Ивлев, В. Л. Малевич // *Письма в ЖТФ*. – 2015. – Т. 41, вып. 1. – С. 43–49.
5. Количественная калибровка и послойный анализ концентрации германия в гетероструктурах $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ методом вторично-ионной масс-спектропии / М. Н. Дроздов [и др.] // *ФТП*. – 2014. – Т. 48, № 8. – С. 1138–1146.

УДК 621.375.826

РОСТ И СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ $\text{Er, Yb:YAl}_3(\text{BO}_3)_4$

Горбаченя К.Н.¹, Кисель В.Э.¹, Лазарчук А.И.¹, Волкова Е.А.², Копорулина Е.В.², Мальцев В.В.², Кулешов Н.В.¹

¹Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий БНТУ
Минск, Республика Беларусь

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Москва, Российская Федерация

Аннотация. Методом жидкофазной эпитаксии из раствора-расплава на подложке кристалла YAB были выращены образцы монокристаллических слоев Er, Yb:YAB . Определены спектрально-люминесцентные свойства полученных образцов, проведено их сравнение со свойствами объемных монокристаллов сходного состава, подтверждающее высокое оптическое качество полученных эпитаксиальных слоев.

Ключевые слова: жидкофазная эпитаксия, эпитаксиальные слои, борат, эрбий, иттербий, спектрально-люминесцентные свойства.