

ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ТОНКИХ ПЛЁНКАХ ГЕРМАНИЯ НА КРЕМНИИ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОДЛОЖКАХ

Р. И. Баталов¹, Р. М. Баязитов¹, Г. А. Новиков¹, И. А. Файзрахманов¹,
Г. Д. Ивлев², С. Л. Прокопьев²

¹Казанский физико-технический институт КазНЦ РАН, Казань, Россия

²Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

E-mail: batalov@kfti.knc.ru

В развитие исследования [1] особенностей лазерной модификации эпитаксиальных гетеросистем $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{Si}$ в данной работе в тех же условиях изучалась динамика воздействия наноимпульсного излучения рубинового лазера на тонкие (200-600 нм) плёнки Ge, полученные магнетронным распылением и ионно-лучевым осаждением на подложки кремния, сапфира и кварца. Такая работа была инициирована недавними публикациями по созданию электролюминесцентных диодов, а также оптически и электрически накачиваемых лазеров на напряженных и сильно легированных гетероструктурах Ge/Si, излучающих в области телекоммуникационной длины волны 1.5-1.6 мкм при комнатной температуре (обзорная статья [2]). Основным методом создания таких слоев является молекулярно-лучевая эпитаксия. В данной работе для создания гетероструктур Ge/Si применялись более совместимые с микроэлектроникой методы формирования, включающие магнетронное распыление Ge или ионно-лучевое осаждение в сочетании с последующим импульсным лазерным отжигом (ИЛО). Такие обработки позволяют управлять структурным состоянием и уровнем легирования слоев Ge. Наряду с подложками кремния применялось осаждение на прозрачные диэлектрические подложки (сапфир и кварц), существенно различающиеся коэффициентом теплопроводности (46.06 и 1.38 Вт/(м К) против 149 Вт/(м К) у кремния), а также точкой плавления (2050 °С и 1720 °С) по сравнению с кремнием (1420 °С).

Перед осаждением подложки подвергались ультразвуковой очистке в изопропиловом спирте и промывке в дистиллированной воде. В процессе вакуумного осаждения, проводимого при давлении $\sim 10^{-4}$ Торр, мишень из монокристаллического Ge бомбардировалась ионами инертных газов (Ar^+ , Kr^+) с энергией до 1.5 кэВ в течении 5–15 мин, что соответствовало толщинам пленок 200-600 нм. После осаждения образцы подвергались ИЛО излучением рубинового лазера ($\lambda = 690$ нм, $\tau = 80$ нс) с плотностью энергии $W = 0.2\text{--}1.4$ Дж/см² с шагом 0.2 Дж/см² (Таблица). Диаметр облучаемой зоны составлял 4 мм.

Таблица.

Перечень исследованных образцов.

№	Подложка	Толщина Ge, d (нм)	Плотность энергии, W (Дж/см ²)
1	c-Al ₂ O ₃	200	0.2-1.4
2	c-Al ₂ O ₃	600	0.2-1.4
3	n-Si(100)	200	0.2-1.2
4	n-Si(100)	600	0.2-1.2
5	α -SiO ₂	400	0.2-1.2

Зондированием зоны лазерного нагрева на $\lambda_1 = 0,53$ и $\lambda_2 = 1,06$ мкм проводилась диагностика фазового состояния поверхности образцов по отражению пробного пучка, сфокусированного в пятно ~ 1 мм при угле падения $\sim 30^\circ$. Отраженное зондирующее излучение (ЗИ) детектировалось скоростными ФЭУ. Наблюдение динамики $R(t)$ ЗИ позволяет идентифицировать образование расплава полупроводника по значительному возрастанию R вследствие фазового перехода в состояние жидкого металла, определить порог плавления W_m , время существования жидкой фазы τ при плотности энергии $W > W_m$, выявить особенности поведения R на стадии отвердевания.

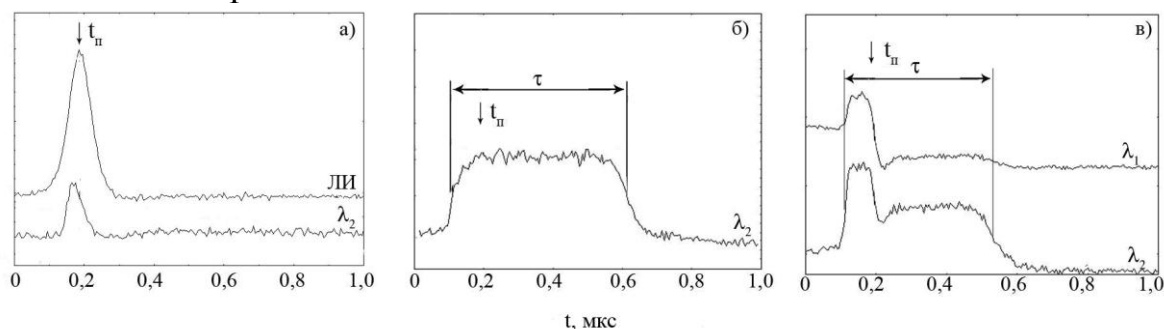


Рис. 1. Осциллограммы лазерного импульса (ЛИ)) и сигналов ФЭУ: *а* – Ge/сапфир ($d = 200$ нм, $W = 0,2$ Дж/см²), *б* – Ge/сапфир ($d = 600$ нм, $W = 0,8$ Дж/см²), *в* – Ge/Si ($d = 600$ нм) – повторное облучение с $W = 1$ Дж/см² после предварительного при $W = 0,2$ Дж/см². t_n – время, соответствующее максимуму интенсивности ЛИ

Результаты зондирования облучаемой зоны (Рис. 1) показали, что порог плавления слоев Ge соответствует минимальной энергии $W_m = 0.2$ Дж/см² (рис. 1, *а*). В области энергий $0.2\text{--}0.8$ Дж/см² поведение $R(t)$ проходит через три стадии: быстрый рост от начального уровня ($\sim 33\text{--}40\%$), соответствующего аморфному Ge, до плато на уровне $65\text{--}75\%$, ширина которого соответствует времени жизни расплава (τ), с последующим возвратом к начальному уровню отражения, соответствующего кристаллическому Ge (рис. 1, *б*). В случае использования повышенных плотностей энергии ($W > 0.8$ Дж/см²) плато разбивается на ряд участков с различающимся уровнем отражения (рис. 1, *в*). Первый участок с повышенным отражением и коротким плато

длительностью около 100 нс связан с плавлением пленки Ge. Затем наблюдается резкий спад отражения с последующим небольшим ростом и выходом на плато большей длительности. Такое поведение $R(t)$ можно объяснить частичным или полным испарением пленки Ge с поверхности подложки Si и ее последующим плавлением. Отметим, что подобное поведение $R(t)$ не наблюдалось для подложек сапфира и кварца, не плавившихся при данных режимах отжига ввиду повышенных точек плавления. Из осциллограмм следует, что в ситуации «а» величина W недостаточна для проплавления плёнки Ge на глубину, превышающую толщину скин-слоя для ЗИ, и её отражательная способность не достигает максимума, как в ситуации «б», когда она обладает таковым в течение времени τ . Осциллограммы «в», которые свидетельствуют о поэтапном отвердевании расплавленного слоя аналогично данным [1]. Из рис.2 следует, что величина τ при равных W получается разной в зависимости от теплопроводности подложки и толщины слоя Ge. Наибольшее τ (например, для $W = 0.4 \text{ Дж/см}^2$) наблюдается для подложки кварца (No5), обладающей наименьшей теплопроводностью и для подложек кремния и сапфира с более толстой пленкой Ge.

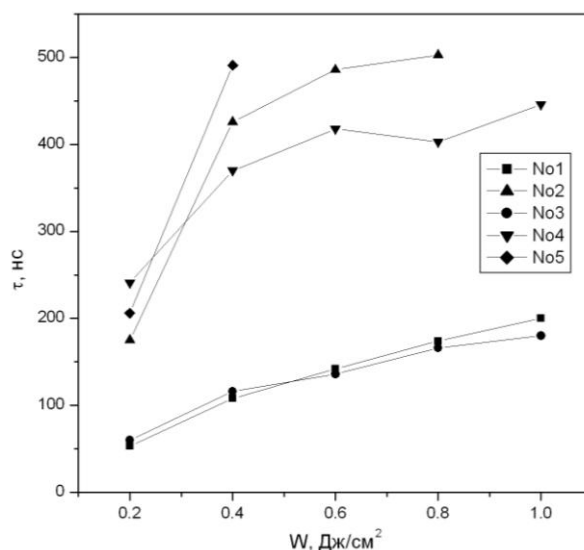


Рис 2. Зависимость времени жизни расплава (τ) от плотности энергии импульсов (W) рубинового лазера для различных образцов.

Таким образом, получены новые данные о порогах плавления и абляции пленок Ge на различных подложках, а также временах жизни расплава в зависимости от режимов лазерной обработки.

Работа выполнена при поддержке БРФФИ (проект Ф13К-117) и РФФИ (грант №13-02-00348).

1. Прокопьев С. Л., Ивлев Г. Д., Гайдук П. И. // Радиационная физика твёрдого тела: Матер. 23-й Междунар. конф. М.: ФГБНУ "НИИ ПМТ", 2013. С. 140–147.
2. Liu J., Kimerling L.C., Michel J. // Semicond. Sci. Technol. 2012. V. 27, P. 094006 (13pp).