

Г. Д. Ивлев, Е. И. Гацкевич

## ВОЗДЕЙСТВИЕ НАНОИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ГЕТЕРОСИСТЕМУ ГЕРМАНИЙ/КРЕМНИЙ

Гетероэпитаксиальные структуры  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  привлекают научный и практический интерес в связи с их потенциально широким применением для создания опто- и микроэлектронных приборов нового поколения, таких как высокоскоростные гетеропереходные биполярные и полевые транзисторы, а также приборов, функционирующих на квантоворазмерных эффектах [1]. Эпитаксиальные слои  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  на кремнии обычно формируются методами молекулярно-лучевой эпитаксии и химическим осаждением из газовой фазы. Получение таких слоев возможно также с применением импульсной лазерной обработки. Гетероэпитаксиальные слои  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  формировались воздействием наносекундных импульсов УФ излучения эксимерных лазеров на систему а-Ge/Si-аморфная пленка германия на кремнии (100) [2, 3]. Образование тонкого слоя  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  связано с лазерно-индуцированным плавлением, интердиффузией Ge и Si в жидкой фазе и эпитаксиальным отвердеванием бинарного расплава. Для диагностики *in situ* процессов плавления-отвердевания, происходящих в полупроводниковых материалах в условиях наносекундного лазерного воздействия, часто применяется оптическое зондирование на  $\lambda = 0.63$  мкм облучаемой зоны с детектированием отраженного от неё потока зондирующего излучения. Динамика лазерного воздействия на систему а-Ge/Si исследовалась этим методом лишь в нескольких экспериментах [4, 5]. В данной работе теплофизические процессы модификации гетеросистемы а-Ge/Si(100), происходящие под действием излучения ArF эксимерного лазера, изучались отмеченным методом *in situ* и методом растровой электронной микроскопии.

Толщина плёнки а-Ge, полученной вакуумно-термическим напылением германия на холодную подложку Si(100), составляла  $\sim 0.1$  мкм. Образцы облучались в условиях эксперимента [6]: лазер EMG –100,  $\lambda = 193$  нм, длительность импульса излучения 10 нс по уровню 0.5. Плотность энергии в импульсе  $E$  регулировалась от 0.02 до 2 Дж/см<sup>2</sup> перемещением фокусирующей линзы ( $f \approx 8$  см). Непосредственно перед образцом устанавливалась тонкая металлическая пластина с отверстием диаметром 0.5 мм, определяющим размер облучаемой зоны, в центральную область которой в пятно  $\sim 0.05$  мм фокусировался зондирующий пучок (He-Ne лазер)  $p$ -поляризации; угол падения  $30^\circ$ . Отраженный поток зондирующего излучения принимался кремниевым фотодиодом с интер-

ференционным светофильтром на  $\lambda = 633$  нм. Выходной сигнал фотоприемника подавался на вход запоминающего осциллографа TS-8123, соединенного с компьютером. Время нарастания переходной характеристики регистрирующего тракта фотодиод–запоминающий осциллограф TS-8123 составляло  $\sim 4$  нс. Энергия лазерного излучения флуктуировала от импульса к импульсу с разбросом до  $\pm 10\%$ . Состояние поверхности образцов исследовалось на сканирующем электронном микроскопе JXA 50A.

Плавление а-Ge при лазерном воздействии приводит к возрастанию отражательной способности образца  $R$  до максимальной величины  $R_{max}$ , более чем в 1.5 раза превышающей при  $E \geq 0.1$  Дж/см<sup>2</sup> начальный коэффициент отражения  $R_i$  ( $T = 300$  К). Такое соотношение  $R_{max}/R_i$  соответствует ситуации, когда во время лазерного нагрева образуется слой жидкой фазы (l-Ge), превышающий двойную толщину скин-слоя, т. е. глубину проникновения зондирующего излучения в расплав-жидкий металл. Составляющим  $n$  и  $k$  комплексного показателя преломления на  $\lambda = 0.63$  мкм для а-Ge [7] (5 и 1.7), l-Ge [8] (3.2 и 5.8) согласно вычислениям [9] применительно к нашей ситуации, т. е. для  $p$ -поляризации излучения, падающего на образец под углом  $30^\circ$ , соответствуют значения  $R_i$  и  $R_{max}$ , равные 43.5 и 71 %, а их отношение  $R_{max}/R_i = 1.63$  согласуется с результатами измерений. Коэффициент поглощения  $\alpha = 4\pi k/\lambda$  на  $\lambda = 0.63$  мкм в а-Ge равен  $3.4 \cdot 10^5$  см<sup>-1</sup> ( $1.2 \cdot 10^6$  см<sup>-1</sup> l-Ge), т.е. при толщине пленки а-Ge 0.1 мкм подложка кремния не вносит вклада в отражение зондирующего пучка.

Считаем, что порог  $E_m$  плавления а-Ge  $\sim 0.05$  Дж/см<sup>2</sup> соответствует плотности энергии, при которой соотношение  $R_{max}/R_i \approx 1.3$  в 2 раза меньше максимально возможного в условиях эксперимента. Воздействие лазерного импульса в этом режиме приводит к оцененной глубине плавления а-Ge менее 10 нм. Продолжительность фазовых переходов плавление – отвердевание измеряется временем  $\tau$  нестационарности коэффициента отражения, в данном случае  $\sim 10$  нс (рис. 1). Увеличение  $E$  до  $0.16$  Дж/см<sup>2</sup> приводит к примерно двухкратному возрастанию  $\tau$ , но характер изменения  $R(t)$  не меняется. В этой ситуации плёнка а-Ge плавится не на всю толщину. В аналогичных условиях эксперимента [10] с ионно-аморфизированным кремнием а-Si/Si с такой же толщиной слоя а-Si (0.1 мкм) его проплавление до подложки наблюдалось при почти пятикратном превышении величины  $E$  над  $E_m$ . По аналогии для полного плавления слоя а-Ge требуется  $\sim 0.25$  Дж/см<sup>2</sup>. Фазовый переход а-Ge  $\rightarrow$  l-Ge ( $0.16$  Дж/см<sup>2</sup>) происходит при температуре 965 К [4], тогда как равно-

весная точка плавления Ge есть 1210 К. Последующее отвердевание приводит к релаксированному аморфному состоянию германия [4].

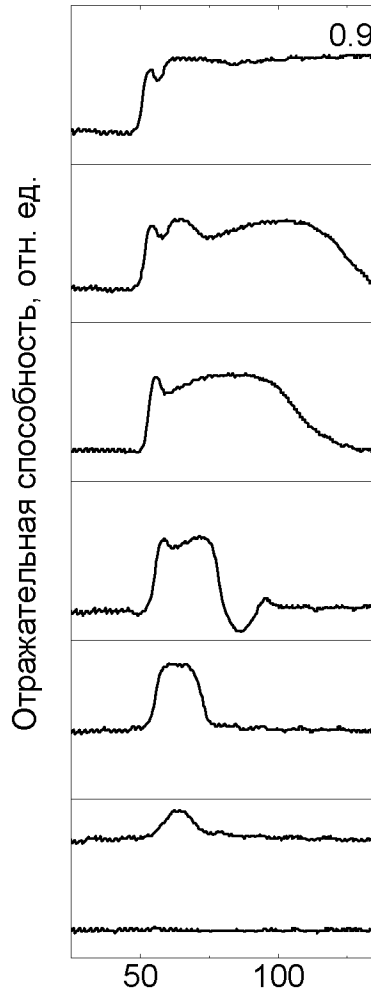


Рис. 1. Динамика отражения зондирующего излучения от гетероструктуры а-Ge/Si при лазерном облучении с разными плотностями энергии.

Линия развертки ниже осциллограммы, соответствующей  $E = 0.05 \text{ Дж/см}^2$ , обозначает уровень  $R = 0$

остывании расплава величина  $R$  возрастает до второго максимума. В условиях воздействия лазерного импульса с  $E = 0.5 \text{ Дж/см}^2$  (и выше) расплавленный слой отвердевает только со стороны подложки. С увеличением  $E$  до  $0.7 \text{ Дж/см}^2$  во временной зависимости  $R$  после окончания действия лазерного импульса появляется второй минимум отражения, обусловленный, по-видимому, изменением состояния поверхности

Когда достигается плавление а-Ge по всей толщине, динамика отражательной способности  $R(t)$  образцов качественно меняется. В зависимости  $R(t)$  появляется промежуточный минимум, предшествующий установлению конечного значения  $R$ . Подобная динамика отражательной способности наблюдалась [11] при пикосекундном лазерном воздействии на систему а-Ge/Si. Авторы [11] объяснили такую зависимость  $R(t)$  отвердеванием расплавленного слоя Ge не только со стороны подложки Si, но и с поверхности, с чем связано наличие промежуточного минимума  $R$  как следствия интерференции при отражении зондирующего излучения от слоистой системы. На стадии высокой отражательной способности ( $E = 0.35 \text{ Дж/см}^2$ ) наблюдается ее некоторое уменьшение непосредственно во время действия лазерного импульса, объясняемое температурной зависимостью оптических параметров l-Ge, более существенной, чем у расплавленного Si [8]. При

и состава жидкой фазы из-за плавления не только пленки германия, но и прилегающего к ней слоя кремниевой подложки. При  $E = 0.9$  Дж/см<sup>2</sup> отражательная способность возникающей жидкой фазы практически неизменна.

Согласно данным растровой электронной микроскопии существенное изменение состояния пленок германия наблюдается в результате воздействия лазерных импульсов с  $E \geq 0.5$  Дж/см<sup>2</sup>, т. е. при  $\sim 10$ - и более кратном превышении энергетического порога плавления поверхности Ge. Облучение образца при  $E = 0.53$  Дж/см<sup>2</sup> приводит к плавлению, нагреву расплавленной пленки Ge (кремний при этом не плавится) и образованию в ней удаленных друг от друга круглых отверстий (рис. 2 а). Отверстия возникают, вероятно, в местах с локально пониженным теплоотводом в подложку из-за наличия неоднородностей границы раздела. Возникающий «прокол» жидкой пленки в условиях плохой смачиваемости кремния расплавом Ge инициирует радиальное гидродинамическое движение под действием сил поверхностного натяжения с образованием валика (рис. 2 б). Кроме возникновения отверстий, на стадии отвердевания пленка приобретает зернистую структуру. Концентрация этих, по видимому кристаллических, зерен порядка  $10^9$  см<sup>-2</sup>. С повышением  $E$  до  $0.72$  Дж/см<sup>2</sup> пленка частично разрушается с образованием своеобразной сетки (рис. 2 в). Плотности энергии  $\sim 1$  Дж/см<sup>2</sup> уже вполне достаточно для плавления и прилегающего к пленке Ge слоя кремниевой подложки. Фотография края области лазерного воздействия (рис. 2 г) выявляет наличие переходной зоны шириной 4–5 мкм, разделяющей исходную, не подвергнутую лазерному воздействию систему a-Ge/Si, и внутреннюю область пятна, в которой вследствие интердиффузии Si и Ge в жидкой фазе и последующего эпитаксиального роста образовался тонкий слой твердого раствора  $Ge_xSi_{1-x}$ . Как исходная поверхность образца, так и модифицированная лазерным воздействием, выглядят однородными, но различаются по контрасту из-за разного элементного состава и неодинакового структурного состояния.

Отметим, что время формирования слоя  $Ge_xSi_{1-x}$ , т. е. время существования жидкой фазы в этом режиме облучения составляет  $\sim 0.1$  мкс (см. рис. 1). Длина диффузии атомов (ионов) Ge в жидком Si и наоборот примерно 6 нм за 1 нс по оценке [11], что согласуется с экспериментом. Отсюда следует, что в нашей ситуации возможно образование слоя  $Ge_xSi_{1-x}$  толщины, значительно превышающей указанную диффузионную длину.

В результате проведенного исследования установлены особенности изменения динамики отражательной способности поверхности образцов

а-Ge/Si по мере увеличения плотности энергии в наносекундном импульсе излучения эксимерного лазера до 20-ти кратного превышения

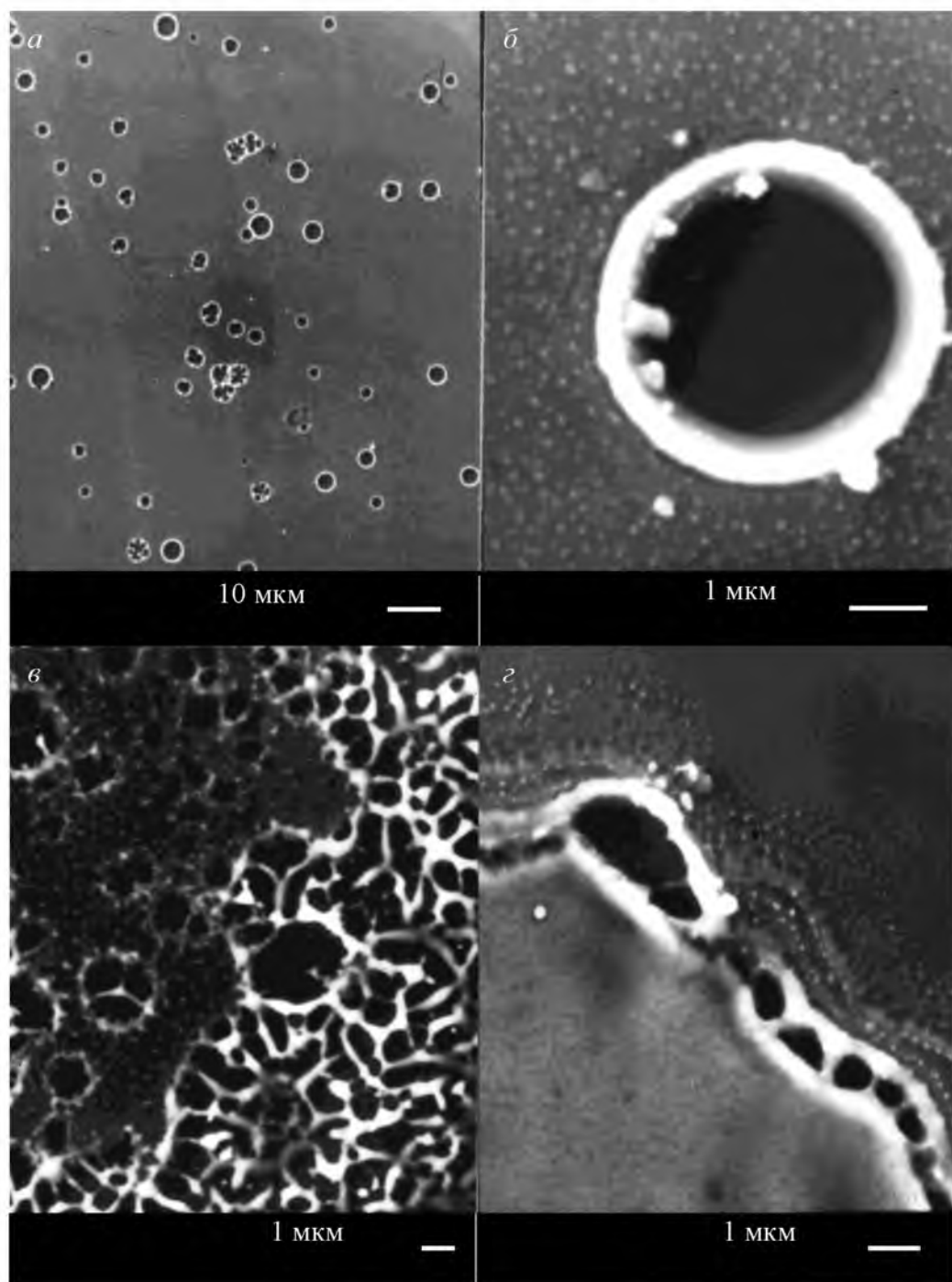


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение поверхности образцов а-Ge/Si, модифицированных лазерным воздействием в разных энергетических режимах. а, б –  $E = 0.53$ , в –  $0.72$ , г –  $1$  Дж/см<sup>2</sup>; на фотографии “г” изображен край области лазерного воздействия.

порога плавления a-Ge в тонкопленочной гетеросистеме. Показано, что отвердевание расплавленного в определенных режимах облучения слоя германия происходит как со стороны подложки кремния, так и с поверхности образца, что ранее наблюдалось в эксперименте с пикосекундным лазерным нагревом a-Ge/Si. Выяснено влияние фазовых превращений в гетеросистеме a-Ge/Si на морфологию облученной поверхности.

Авторы выражают благодарность В.Хабу (V. Cháb) и М. Шимечковой (M. Šimečková) за предоставление данных растровой электронной микроскопии.

### Литература

5. Paul D. J. Silicon germanium heterostructures in electronics: the present and the future // *Thin Solid Films*. 1998. Vol. 321. P. 172–180.
6. Frangis N., Van Landuyt J., Larciprete R et al. High resolution electron microscopy and x-ray photoelectron spectroscopy studies of heteroepitaxial  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  alloys produced through laser induced processing // *Appl. Phys. Lett.* 1998. Vol. 72, № 22. P. 2877–2879.
7. Larciprete R., Willmott P., Martelli S. et al. ArF excimer laser epitaxy of  $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$  alloys studied by XRD and XPS // *Appl. Surf. Sci.* 1996. Vol. 106. P. 179–185.
8. Szyszko W., Vega F., Afonso C. N. Shifting of the thermal properties of amorphous germanium films upon relaxation and crystallization // *Appl. Phys. A*. 1995. Vol. 61. P. 141–147.
9. Vega F., Afonso C. N., Szyszko W., Solis J. On the origin of recalescence in amorphous Ge films melted with nanosecond laser pulses // *J. Appl. Phys.* 1997. Vol. 82, № 5. P. 2247–2250.
10. Ivlev G., Gatskevich E., Cháb V et al. Dynamics of the excimer laser annealing of hydrogenated amorphous silicon thin films // *Appl. Phys. Lett.* 1999. Vol. 75, № 4. P. 498–500.
11. Adachi S. Calculation model for the optical constants of amorphous semiconductors // *J. Appl. Phys.* 1991. Vol. 70, № 4. P. 2304–2308.
12. Ивлев Г. Д., Гацкевич Е. И. Температурное изменение оптических свойств жидкой фазы при наносекундном лазерном плавлении кремния и германия // *ФТП*. 1996. Т. 30, № 11. С. 2097–2107.
13. Пришивалко А. П. Отражение света от поглощающих сред. Мн.: Изд-во Академии наук БССР, 1963.
14. Ивлев Г. Д., Гацкевич Е. И. Фазовые превращения, инициируемые в тонких слоях аморфного кремния наносекундным воздействием излучения эксимерного лазера // *ФТП*. 2003. Т. 37, № 5. С. 622–628.
15. Siegel J., Solis J., Afonso C. N. et al. Evidence for surface initiated solidification in Ge films upon picosecond laser pulse irradiation // *J. Appl. Phys.* 2001. Vol. 89, № 7. P. 3642–3649.