

## ЛАЗЕРНЫЙ ОТЖИГ ТОНКИХ ПЛЕНОК ГЕРМАНИЯ НА КРЕМНИИ, ПОЛУЧЕННЫХ ГАЗОФАЗНЫМ ХИМИЧЕСКИМ ОСАЖДЕНИЕМ

В.А. Зайков<sup>1)</sup>, П.И. Гайдук<sup>1)</sup>, А.Г. Новиков<sup>1)</sup>, С.Л. Прокопьев<sup>1)</sup>, О.Ю. Наливайко<sup>2)</sup>, Г.Д. Ивлев<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Белгосуниверситет, пр. Независимости 4, 220030, г. Минск, Беларусь,

Тел: +375 17 2789700, E-mail: zaikov@bsu.by

<sup>2)</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ», пл. Казинца 1, 220108 г. Минск, Беларусь,

Тел: +375 17 2123730, E-mail: onalivaiko@integral.by

<sup>3)</sup>Институт физики НАН Беларуси, Логойский Тракт 22, 220090 г. Минск, Беларусь,

Тел: +375 17 2813514, E-mail: ivlev@bas-net.by

Рассмотрено влияние импульсного лазерного отжига на структурные и морфологические свойства слоев Ge на кремниевых подложках, выращенных химическим осаждением из газовой фазы. Методом растровой электронной микроскопии установлены режимы лазерной обработки, при которых происходит планаризация поверхности слоев Ge, а также их полное проплавление по толщине.

### Введение

Поликристаллические SiGe слои на кремнии с высоким (до 100 %) содержанием Ge перспективны в качестве чувствительных слоев фотоприемников ближнего ИК-диапазона, интегрированных в кремниевую технологию [1,2]. Такие слои успешно выращиваются химическим осаждением из газовой фазы при низком давлении (ХОГФНД) [3]. Известно [4], что в интервале температур осаждения 430 - 490 °С наблюдается рост мелкозернистой поликристаллической пленки Ge. Увеличение температуры осаждения с 500 до 600 °С приводит к резкому росту размеров зерна и формированию поликристаллических слоев с развитым рельефом поверхности.

Требования, предъявляемые к нанесению слоев Ge на Si для фотоприемных структур, заключаются в их высоком кристаллическом совершенстве, что предполагает высокие температуры осаждения, при которых межзеренные границы в Ge слоях имеют минимальную поверхность. Однако, такие режимы осаждения ведут к росту зерна и шероховатости поверхности [3,4]. Решением данной задачи может служить подход, при котором сначала осаждают мелкокристаллические слои Ge, а затем проводят их рекристаллизацию, например, импульсной лазерной обработкой [5]. Лазерная рекристаллизация поли-Ge слоев позволяет не только модифицировать структуру и морфологию поверхности, но и улучшить электрофизические и оптические свойства слоев [5].

В данной работе исследуется влияние импульсного лазерного отжига на структурные свойства и морфологию слоев Ge, полученных методом ХОГФНД. В частности, решается задача планаризации поверхности Ge слоев на Si.

### Методика эксперимента

Осаждение слоев Ge на кремниевые подложки КЭФ-4,5 с ориентацией (100) проводилось в изотермической зоне горизонтального реактора пониженного давления с горячими стенками "Изонрон 4-150" при постоянном давлении равном  $10,0 \pm 0,1$  Па. В экспериментах использовались 100%-ный моносилан (SiH<sub>4</sub>) и газовая смесь, состоящая из моногермана и водорода

(GeH<sub>4</sub> - 40 % / H<sub>2</sub> - 60 %). Температура осаждения слоя Ge изменялась от 390 °С до 640 °С.

Перед осаждением Ge на кремниевую подложку наносили подслои Si толщиной 30 нм. Из-за большой тепловой инерционности реакционной камеры, температуру в процессе осаждения Si и Ge слоев поддерживали на постоянном уровне с точностью  $\pm 1$  °С.

Импульсный лазерный отжиг (ИЛО) структур Si/Ge, выращенных при температуре 470 °С, проводили излучением рубинового лазера ( $\lambda = 694$  нм) при длительности импульса 80 нс. Поверхностная плотность энергии изменялась в диапазоне 0,36 - 1,9 Дж/см<sup>2</sup>. Неоднородность распределения энергии ИЛО по облучаемой зоне диаметром 4,5 мм не превышала  $\pm 5\%$ .

Исследования структурно-фазового состава и морфологии поверхности образцов проводили методами растровой электронной микроскопии (РЭМ), резерфордовского обратного рассеяния (РОР), и атомной силовой микроскопии (АСМ).

### Результаты и их обсуждение

Методом РОР определено, что во всех режимах осаждения Ge на Si формируются однородные по толщине слои Ge с высоким содержанием Ge ( $x \geq 0,95$ ). Методами РЭМ, и АСМ установлено, что размер зерна в слоях Ge, в первую очередь, определяется температурой осаждения. Основные параметры, характеризующие процесс осаждения и структурные свойства Ge слоев представлены в таблице 1. Анализ результатов показывает, что для формирования слоев Ge с низкой шероховатостью поверхности предпочтительной является температура осаждения 470 °С, обеспечивающая малый размер зерна и однородность слоя Ge по толщине.

Таблица 1.

Параметры	T <sub>осажд.</sub> °С		
	470	500	600
Время осаждения, мин	270	210	160
Толщина слоя Ge, нм	330	270	310
Скорость осаждения, нм/мин	1,22	1,29	1,95
Размер зерна, нм	30-40	170-200	230-260
Шероховатость, нм	60-70	200-240	260-300

Из сравнительного анализа АСМ изображений поверхности слоев Ge на Si, представленных на рисунках 1 А и 1 Б, следует, что в интервале температур 470 - 500 °С происходит резкое увеличение размера зерна, характеризующее переход к крупнокристаллической структуре слоя Ge.

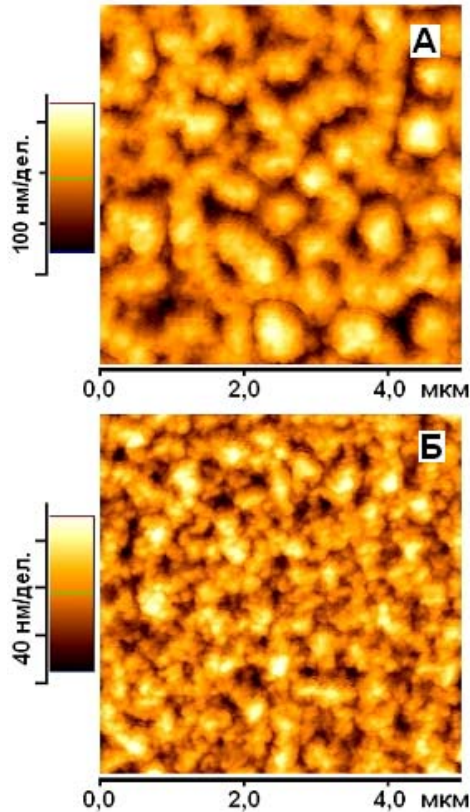


Рис. 1. АСМ изображения поверхности пленки Ge. А) Температура - 500 °С, время осаждения - 210 мин, Б) Температура - 470 °С, время осаждения - 270 мин

Предварительные результаты ИЛО Si/Ge структур, выращенных при 500 °С показали, что во всем диапазоне плотностей мощности (0,36-1,9 Дж/см<sup>2</sup>) получить сглаженный рельеф поверхности не удастся. Поэтому последующие эксперименты по ИЛО слоев Ge на Si были выполнены на образцах, выращенных при температуре осаждения 470 °С.

Процесс ИЛО исследовался *in situ* путем измерения временной зависимости отражательной способности поверхности на двух длинах волн зондирующего пучка ( $\lambda_1 = 532$  нм и  $\lambda_2 = 1064$  нм) [5].

На рисунке 2 представлена зависимость времени существования расплава от плотности энергии излучения, полученная из временных зависимостей отражательной способности поверхности. Характерной особенностью данной зависимости является наличие двух линейных участков различного наклона с точкой перегиба при плотности энергии 0,8 Дж/см<sup>2</sup>. На каждом участке время существования расплава линейно увеличивается с ростом плотности энергии. Первый участок (плотность энергии изменяется от 0,36 до 0,8 Дж/см<sup>2</sup>), характеризуется плавлением только слоя Ge без выхода зоны расплава в нижележащие слои Si. На втором участке, начиная с энергии 1,0 Дж/см<sup>2</sup>,

имеет место проплавление всего слоя Ge с выходом зоны расплава в Si. Наклон на втором участке меньше, вследствие более высокого коэффициента теплопроводности Si по сравнению с Ge ( $K_{Si}/K_{Ge} = 2,3$ ).

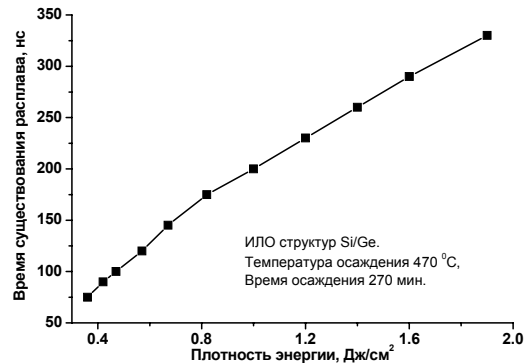


Рис. 2. Зависимость времени существования расплава от плотности энергии излучения на поверхности Si/Ge структуры

Выход зоны расплава в Si начинается с энергии 1,0 Дж/см<sup>2</sup>, о чем свидетельствуют временные зависимости отражательной способности поверхности структур Si/Ge, приведенные на рисунке 3.

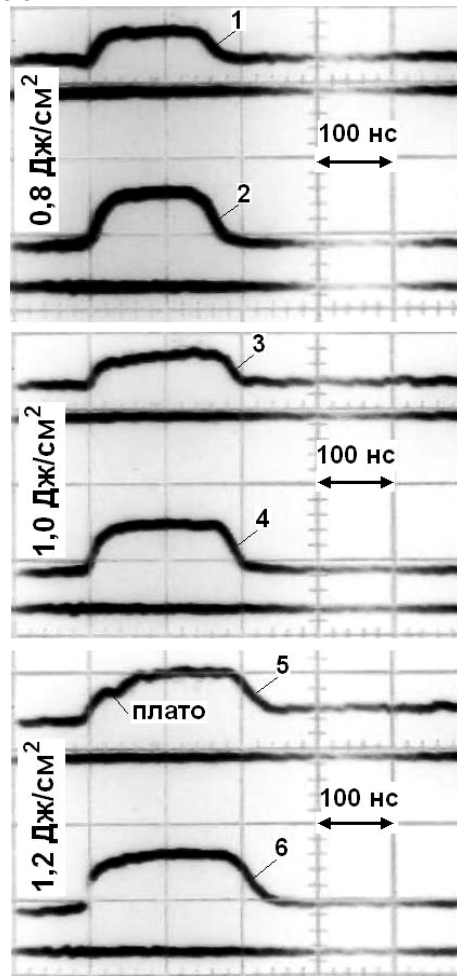


Рис. 3. Временные зависимости коэффициента отражения:  $\lambda_1 = 532$  (1, 3, 5);  $\lambda_2 = 1064$  нм (2, 4, 6)

На временных зависимостях коэффициента отражения для различных плотностей энергии на длине волны  $\lambda_1 = 532$  нм (осциллограммы 1, 3, 5 на рис. 2) виден рост коэффициента отражения, а также существенное изменение хода самой зависимости. Сравнение этих зависимостей показывает, что для плотности энергии  $0,8$  Дж/см<sup>2</sup> наблюдается плато (осциллограмма 1 на рис. 2), в то время как для плотности энергии  $1,0$  Дж/см<sup>2</sup> имеет место непрерывный подъем, связанный с ростом отражательной способности (осциллограмма 2 на рис. 2). Для плотности энергии  $1,2$  Дж/см<sup>2</sup> (осциллограмма 3 на рис. 2) рост отражательной способности луча ( $\lambda_1 = 532$  нм) происходит в два этапа, разделенных небольшим плато. Этот экспериментальный факт объясняется временной последовательностью плавления. Сначала плавится слой Ge (температура плавления –  $940$  °С), а затем подслои Si (температура плавления –  $1412$  °С). Следовательно, можно сделать вывод, что полное проплавление слоя Ge с выходом зоны расплава в Si наблюдается при плотности энергии в интервале  $1,0 - 1,2$  Дж/см<sup>2</sup>.

Как показано на рисунке 4, граница области воздействия лазерного пятна (левая часть рисунка) является резкой. Размер переходной зоны не превышает  $30 - 40$  мкм. Правая часть рис. 4 отражает состояние исходной поверхности слоя Ge.

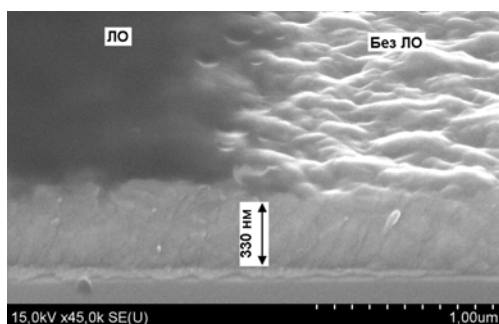


Рис. 4. РЭМ изображение границы области ИЛО пленки Ge. Плотность энергии  $1,2$  Дж/см<sup>2</sup>

На рисунке 5 приведены РЭМ микрофотографии поверхности структуры Si/Ge, подвергнутой ИЛО в режиме полного проплавления слоя Ge. После ИЛО размер неоднородностей микрорельефа по высоте составляет не более  $20$  нм, т.е. происходит лазерная планаризация поверхности.

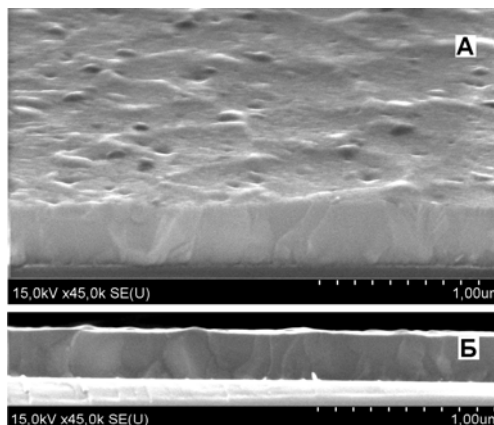


Рис. 5. РЭМ микрофотографии поверхности структуры Si/Ge, после лазерного отжига  $E = 1,2$  Дж/см<sup>2</sup>, А – вид под углом  $30^\circ$ , Б – поперечное сечение образца

### Заключение

Установлено, что температура роста  $470$  °С является приемлемой для формирования однородной по толщине структуры Si/Ge с размером зерна  $< 40$  нм. Импульсный лазерный отжиг с плотностью энергии порядка  $1,2$  Дж/см<sup>2</sup> позволяет провести полную рекристаллизацию слоя Ge и получить сглаженный рельеф поверхности. Такого рода структуры могут использоваться в кремниевой технологии.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Электроника и фотоника» (задание 1.1.02 «Разработка и исследование процессов выращивания кремний-германиевых гетероструктур для создания полупроводниковых приборов») и при частичной поддержке БРФФИ по проекту Ф09СО-015.

### Список литературы

1. Fidaner O. // IEEE Photonics Technol. Lett.,- 2007. – 37. – P. 432-438.
2. Okyay A. SiGe photodetection technologies for integrated optoelectronics // Ph.D. Thesis, The University of Stanford, September 2007.
3. Vega R.A. // J. Electrochem. Soc. – 2007. – V. 154. – 9. – P. H789-H793.
4. Зайков В.А. // Вестник БГУ, сер. 1, - 2011. - 1, - С. 28 – 33.
5. Gaiduk P.I. // Physica B. – 2009. - 404. - P. 4708-4711.

### LASER TREATMENT OF LPCVD GROWN Ge FILMS

V.A. Zaikov<sup>1</sup>), P.I. Gaiduk<sup>1</sup>), A.G. Novikov<sup>1</sup>), S.L. Prakopyeu<sup>1</sup>), O.Y. Nalivajko<sup>2</sup>), G.D. Ivlev<sup>3</sup>)

<sup>1</sup>) Belarusian State University, Nezavisimosti Ave. 4, Minsk 220030, Belarus,

Phone: +375 17 2120880, E-mail: [zaikov@bsu.by](mailto:zaikov@bsu.by)

<sup>2</sup>) JSC "INTEGRAL", Kazintsa sq.1, Minsk 220108, Belarus,

Tel.: +375 17 2123730, E-mail: [onalivaiko@integral.by](mailto:onalivaiko@integral.by)

<sup>3</sup>) Institute of Physics, NANB, Logoisky Trakt, 22, Minsk 220090, Belarus,

Tel.: +375 17 2813514, E-mail: [ivlev@bas-net.by](mailto:ivlev@bas-net.by)

The structural and morfological transformation of LPCVD grown thin Ge films treated by nanosecond laser pulses has been investigated. The laser treatment conditions associated with planarization and total melting of Ge films have been established by scanning electron microscopy.