

## ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОЕВ ПОЛИ-Ge НА КРЕМНИИ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ

В. А. Зайков<sup>1</sup>, П. И. Гайдук<sup>1</sup>,  
В. Б. Карпович<sup>1</sup>, О. Ю. Наливайко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, [zaikov@bsu.by](mailto:zaikov@bsu.by)

<sup>2</sup>УП «Завод полупроводниковых приборов», [dzsto3@integral.by](mailto:dzsto3@integral.by)

### ВВЕДЕНИЕ

Большой интерес к системам SiGe/Si и Ge/Si обусловлен, прежде всего, созданием на их основе новых электронных и оптоэлектронных приборов. Применение SiGe сплавов позволяет разрабатывать фотоприемники ближнего ИК диапазона, интегрированные в кремниевую технологию и пригодные для оптоволоконной связи (~1,55 мкм). Эпитаксиальные слои Ge, необходимые для высококачественных фотоприемников, выращивают на Si подложках с использованием промежуточных градиентных слоев SiGe переменного состава [1] с помощью дорогостоящего и малопродуктивного метода молекулярно-лучевой эпитаксии. Альтернативный метод химического осаждения из газовой фазы при пониженном давлении слоев существенно дешевле и производительнее, однако слои Ge на Si подложках получают либо аморфными (температура осаждения  $\leq 390$  °C), либо аморфно-кристаллическими, либо полностью поликристаллическими (температура осаждения  $\geq 500$  °C) [2]. Исследования последних лет позволяют прогнозировать разработку недорогих фотоприемников ближнего ИК-диапазона спектра, использующих поликристаллические слои Ge [3]. Поэтому актуальной задачей является получение слоев поли-Ge на Si-подложках и исследование их оптических свойств.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Формирование структур со слоями Si и Ge проводилось на промышленной установке «Изотрон 4–150» методом химического осаждения из газовой фазы. Температурный профиль в изотермической зоне горизонтального реактора пониженного давления с горячими стенками поддерживался с точностью  $\pm 1$  °C. Для осаждения слоев Ge использовали газовую смесь моногермана с водородом следующего состава: GeH<sub>4</sub> - 40 % / H<sub>2</sub> - 60 %. В качестве подложек использовали пластины кремния марки КЭФ-4,5 и КОФ-90 с ориентацией (100). Непосредственно перед загрузкой пластин в реактор осаждения проводилось удаление естественного оксида кремния путем химического травления в разбавленной плавиковой кислоте с последующей отмывкой и сушкой.

Формирование экспериментальных структур осуществлялось следующим образом. Сначала на кремниевые пластины осаждали тонкий буферный подслой Si толщиной 10-30 нм. При этом расход моносилана составлял 7,0 л/ч, а давление в реакторе поддерживали равным  $24,0 \pm 0,5$  Па. Затем осаждали основной слой Ge, для чего, не изменяя температуру реактора, отключали подачу моносилана и подавали газо-

вую смесь  $\text{GeH}_4/\text{H}_2$ . Расход газовой смеси при этом составлял 1,0 л/ч, а давление в реакторе равнялось  $10,0 \pm 0,5$  Па, при этом парциальное давление моногермана соответственно составляло 4 Па. Далее наносили верхний защитный слой Si, толщиной 20 нм в технологическом режиме, соответствующем первому этапу осаждения.

Температура осаждения слоев в каждом процессе поддерживалась постоянной в течение всего процесса формирования слоев Si и Ge. Осаждение слоев проводили при следующих значениях температуры в реакторе: 470 °C, 500 °C и 600 °C.

В результате были сформированы экспериментальные образцы со структурами типа: Si-подложка / подслои Si / слой Ge / защитный слой Si.

Оптические свойства экспериментальных структур со слоями поли-Ge изучались методами комбинационного рассеяния света (КРС) и Фурье-спектроскопии при комнатной температуре. Спектры КРС регистрировались на установке «Раманор». Измерения оптических характеристик слоев Ge (пропускание и поглощение) проводили с помощью фурье-спектрометра Vertex-70.

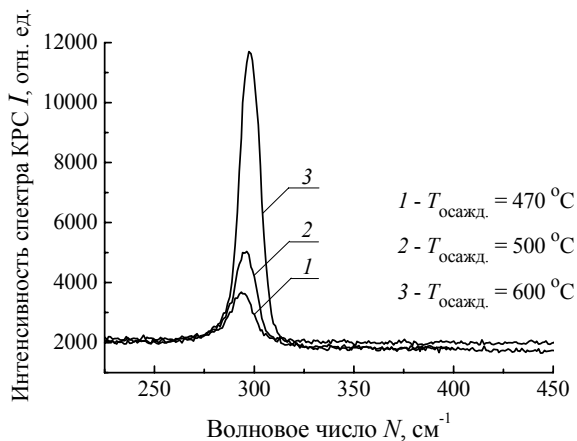


Рис. 1. Спектры КРС для различных температур осаждения слоев поли-Ge на Si

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены спектры КРС от экспериментальных образцов со слоями поли-Ge, выращенными при температурах осаждения 470 °C, 500 °C и 600 °C. На спектрах КРС присутствуют только пики, соответствующие рассеянию света на оптических колебаниях связей Ge-Ge (частота  $\omega_{\text{Ge-Ge}} = 300 \text{ см}^{-1}$ ). Интенсивность спектральных пиков оптических фононов Ge-Ge и их частотный сдвиг зависят от температуры осаждения (кривые 1, 2 и 3). Важным экспериментальным фактом является отсутствие в спектре КРС пиков, соответствующих колебаниям связей Si-Ge (частота  $\omega_{\text{Si-Ge}} = 400 \text{ см}^{-1}$ ), что можно объяснить отсутствием значительного количества атомов кремния в Ge слое. Этот экспериментальный факт подтверждает, что при проведении ХОГФ слоя Ge из газовой смеси  $\text{GeH}_4/\text{H}_2$  в диапазоне температур 470 – 600 °C реализуется осаждение слоя практически чистого Ge.

Известно, что фоннный спектр КРС зависит как от компонентного состава слоя Ge, так и от механических напряжений поверхностного слоя [4, 5]. На рисунке 2 представлена зависимость частоты колебаний связей Ge-Ge в слоях Ge от температуры осаждения. Видно, что частота колебаний связей Ge-Ge с уменьшением температуры осаждения смещается в сторону более низких значений.

Для монокристаллического Ge частота колебаний связей Ge-Ge равна  $300,3 \text{ см}^{-1}$ . Уменьшение частоты рассеяния оптических фононов Ge-Ge однозначно показывает, что в слоях поли-Ge на Si присутствуют растягивающие напряжения. Если предположить, что в процессе роста слоя Ge структурные напряжения при заданной температуре осаждения релаксируют, то при охлаждении образца в слое Ge могут появиться растягивающие напряжения за счет различных коэффициентов температурного расширения Ge и Si. Степень релаксации напряжений растяжения можно рассчитать согласно методике [5] на основе данных зависимости частоты колебаний связей Ge-Ge в слоях Ge от температуры осаждения, представленных на рисунке 2. Для слоев поли-Ge, осажденных при температурах 470, 500 и 600 °C степень релаксации соответственно равна: 62, 71 и 85 %. Таким образом, увеличение температуры осаждения приводит к росту более релаксированных слоев поли-Ge.

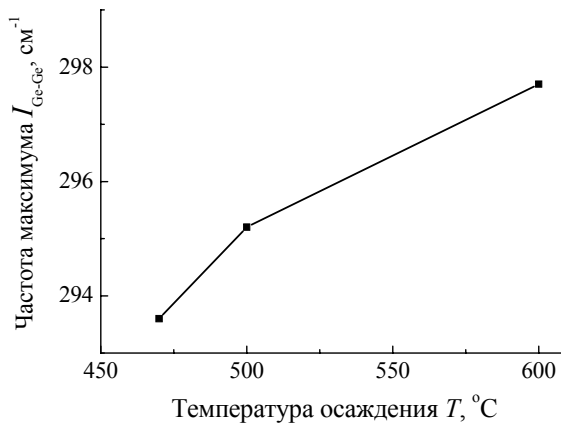


Рис. 2. Зависимость частоты колебаний связей  $\omega_{\text{Ge-Ge}}$  в слоях поли-Ge от температуры осаждения

Оптические характеристики слоев поли-Ge определялись с помощью фурье-спектрометра Vertex-70. Методика измерений заключалась в следующем. Кремниевые подложки КОФ-90 гладкие с двух сторон прописывались с помощью фурье-спектрометра до осаждения слоев Ge и после осаждения. Из спектра пропускания кремниевой подложки до осаждения слоев Ge вычитался спектр пропускания кремниевой подложки с осажденным слоем Ge. Учитывая, что осаждение в реакторе «Изотрон 4–150» проводилось на обе стороны пластины, толщина поглощающего слоя Ge равна удвоенной толщине слоя. На рисунке 3 представлена за-

висимость оптического поглощения пленки поли-Ge от длины волны. По сравнению с монокристаллическим германием спектр поглощения поли-Ge слоев в области края фундаментального поглощения Ge –  $1,85 \text{ мкм}$  имеет меньший наклон.

Слои поли-Ge, полученные при  $T_{\text{осажд.}} = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , более интенсивно (до 95 %) поглощают излучения в спектральной области от 1,3 мкм до 1,8 мкм (рис. 3, кривая 3). Слои поли-Ge, полученные при  $T_{\text{осажд.}} = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $T_{\text{осажд.}} = 470\text{ }^{\circ}\text{C}$ , имеют меньшее поглощение в ближней ИК области спектра до 1,8 мкм (рис. 3, кривые 2 и 1). Слои поли-Ge, осажденные при  $T_{\text{осажд.}} = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , являются практически прозрачными в среднем ИК-диапазоне длин волн от 4 до 12 мкм. Уменьшение температуры осаждения приводит к увеличению поглощения в среднем ИК-диапазоне длин волн.

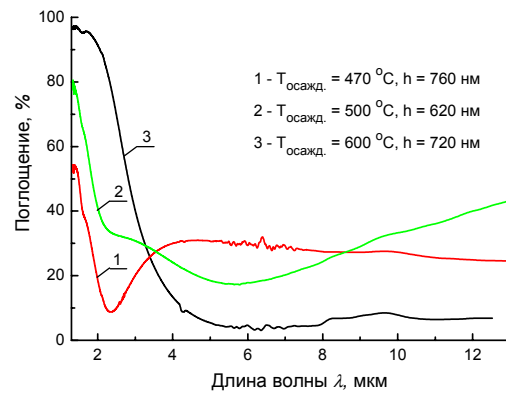


Рис. 3. Зависимость оптического поглощения пленки поли-Ge от длины волны

Таким образом, для разработки фотоприемников ближнего ИК диапазона, интегрированных в кремниевую технологию, желательно было бы использовать поли-Ge слои, осажденные при  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , однако, как показано в работе [6], выращивание таких слоев непосредственно на Si подложке приводит к образованию шероховатой поверхности. Альтернативным подходом может быть выращивание более гладких слоев при меньшей температуре ( $\leq 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и последующая технологическая обработка таких структур.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Gaiduk P. I., Larsen A. N., Hansen J. L // Thin Solid Films. 2000. V. 367. P. 120.
2. Murota J., Ono S. // Jap. J. Appl. Phys. 1994. Vol. 33. P.2290.
3. Colace L., Ferrara P., Assanto G. // IEEE Photon. Technol. Lett. 2007. V. 19. P. 1813.
4. Gaiduk P. I., Larsen A. N., Hansen J. L. // Appl. Phys. Lett. 2001. V. 79. P. 4025.
5. Володин В. А., Ефремов М. Д., Дерябин А. С., Соколов Л. В. // Физика и техника полупроводников, 2006. Т. 40. № 11. С. 1349.
6. Зайков В. А., Гайдук П. И., Наливайко О. Ю., Пиеничный Е. Н. // Тезисы докладов VII международной конференции «Кремний 2010» Нижний Новгород. 2010. 6–9 июля. С. 206.