

УДК 538.911, 539.234

**ИНДУЦИРОВАННОЕ УГЛЕРОДОМ  
ФОРМИРОВАНИЕ НАНООСТРОВКОВ Ge  
ПРИ МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ  
ГЕТЕРОСТРУКТУР Ge/CaF<sub>2</sub>/Si(111)**

**Л. В. Соколов, А. С. Дерябин, Е. Е. Родякина**

*Институт физики полупроводников СО РАН им. А. В. Ржанова,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13  
E-mail: sokolov@isp.nsc.ru*

Исследовалось самоформирование наностроек германия на поверхности фторида кальция с помощью атомно-силовой микроскопии и дифракции электронов на отражение. Методом молекулярно-лучевой эпитаксии выращена структура Ge/CaF<sub>2</sub>/Si(111). Нанесением субмонослойного покрытия углерода модифицирована поверхность пленки фторида кальция для стимулирования зарождения наностроек германия. Обнаружена зависимость параметров массива наностроек от величины покрытия.

*Ключевые слова:* наностройки, гетероструктуры, молекулярно-лучевая эпитаксия.

**Введение.** Структуры с наностройками, помещенными в матрицу из широкозонного материала, являются интересным объектом, поскольку позволяют получать глубокие квантовые ямы. Создание нанобъектов в матрице SiO<sub>2</sub> отражено в работах [1, 2]. Альтернативным диэлектрическим материалом, перспективным для создания подобных структур, является CaF<sub>2</sub>. Этот материал, имея ширину запрещенной зоны около 12 эВ, сравнительно просто выращивается методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на поверхности Si(111). Следовательно, в одном МЛЭ-процессе может создаваться структура, пригодная для электрических измерений.

В работе [3] представлен резонансный туннельный диод на основе гетероструктуры CaF<sub>2</sub>/Ge/CaF<sub>2</sub>/Si(111), работающий при комнатной температуре. Хотя в этой работе были продемонстрированы диоды с резонансной характеристикой, образование наностроек Ge на поверхности эпитаксиальной пленки CaF<sub>2</sub> носило плохо воспроизводимый характер, что, по-видимому, было обусловлено влиянием неконтролируемой примеси. Учитывая, что углеродсодержащие примеси являются наиболее распространенными на поверхности выращиваемых структур в методе МЛЭ, задачей предлагаемой работы стало изучение закономерности формирования наностроек Ge на поверхности эпитаксиальной пленки CaF<sub>2</sub>, модифицированной субмонослойным покрытием углерода.

**Эксперимент.** Эксперименты проводились на установке молекулярной эпитаксии «Катунь». В качестве подложки использовались пластины кремния марки КДБ-10 диаметром 100 мм с ориентацией поверхности (111). Молекулярные пучки CaF<sub>2</sub> и Ge создавались тигельными источниками. Для испарения CaF<sub>2</sub> применялся тигель, изготовленный из стеклоуглерода, а для испарения Ge — из пиролитического BN. Углерод испарялся из навески стеклоуглерода, помещенной в один из электронно-лучевых испарителей. Другой электронно-лучевой испаритель применялся для создания молекулярного пучка кремния при выращивании буферного слоя на поверхности кремниевой пластины. Типичные скорости роста составляли: для Si —  $1,2 \cdot 10^{-1}$  нм/с, для Ge —  $2 \cdot 10^{-2}$  нм/с, для CaF<sub>2</sub> —  $4 \cdot 10^{-2}$  нм/с и для C —  $3,5 \cdot 10^{-3}$  нм/с. Контроль процесса роста осуществлялся дифракцией быстрых электронов (ДБЭ) на отражение. Изучение выращенных образцов производилось с помощью метода атомно-силовой микроскопии (АСМ) (применялся микроскоп Solver P-47H NT-MDT) в полуконтактной моде.

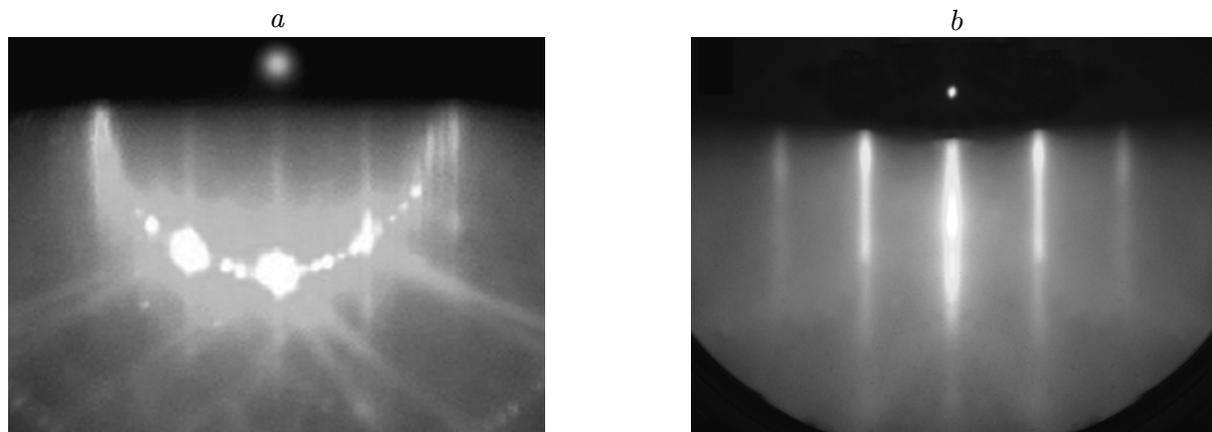


Рис. 1. Дифракционная картина, полученная в азимуте  $\langle 110 \rangle$ : *a* — от очищенной поверхности кремния; *b* — от поверхности пленки  $\text{CaF}_2$

**Выращивание и изучение образцов.** Предэпитаксиальная подготовка кремниевых подложек состояла из двух стадий. Перед загрузкой в вакуумную камеру установки МЛЭ подложки подвергались химической обработке, в которую входило обезжиривание в органических растворителях, удаление окисла с поверхности в растворе плавиковой кислоты и создание на поверхности тонкой окисной пленки посредством обработки подложки в растворе, содержащем аммиак и перекись водорода. Окончательная очистка подложек производилась в ростовой камере установки путем прогрева до  $700\text{ }^\circ\text{C}$  с одновременной подачей слабого молекулярного потока кремния. Критерием полной очистки являлась дифракционная картина с четкими тяжами сверхструктуры  $(111)7 \times 7$  (рис. 1, *a*).

После очистки при той же температуре подложки на поверхности выращивался буферный слой кремния толщиной 50 нм. Затем источник молекулярного потока кремния охлаждали, открывали заслонку источника молекулярного потока  $\text{CaF}_2$  и выращивали пленку фторида толщиной 2 нм. По окончании формирования пленки на картине дифракции электронов сверхструктурные рефлекссы исчезали, а основные — были несколько уширенными по сравнению с поверхностью Si (рис. 1, *b*). Это обычно свидетельствует о повышении плотности ступеней на поверхности роста. Чтобы улучшить кристаллическое совершенство выращенных пленок  $\text{CaF}_2$ , проводился отжиг структур при температуре  $700\text{ }^\circ\text{C}$  в

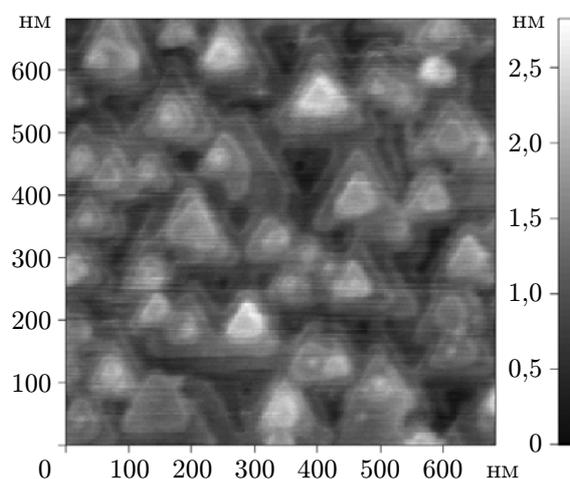


Рис. 2. Рельеф поверхности пленки  $\text{CaF}_2$  после отжига

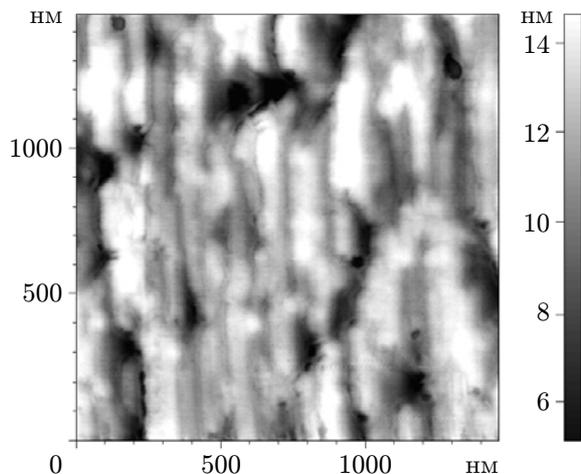


Рис. 3. Рельеф пленки Ge, нанесенной на чистую поверхность  $\text{CaF}_2$

течение 20 мин. Для контроля поверхности пленки  $\text{CaF}_2$  некоторые из структур после отжига вынимались из вакуумной камеры и их поверхность изучалась методом АСМ. Типичное изображение рельефа поверхности эпитаксиальной пленки фторида кальция, полученное в атомно-силовом микроскопе, представлено на рис. 2. Хорошо видны моноатомные ступени, окаймляющие пирамиды роста.

Выращивание слоя Ge производилось при температуре подложки  $350\text{ }^\circ\text{C}$ . В том случае, если слой Ge выращивался непосредственно на чистой поверхности пленки  $\text{CaF}_2$ , он оставался гладким до толщины  $\sim 3\text{ нм}$ , далее на поверхности развивался трехмерный рельеф. Его топография после нанесения  $4\text{ нм}$  Ge на чистую поверхность  $\text{CaF}_2$  представлена на рис. 3. Характерным элементом рельефа поверхности являются крупные ( $\sim 500\text{ нм}$ ) вытянутые неровности, сформировавшиеся, по-видимому, в ходе пластической релаксации механических напряжений несоответствия между пленками Ge и  $\text{CaF}_2$ .

Чтобы изменить характер роста слоя Ge, на поверхность пленки  $\text{CaF}_2$  осаждался углерод. Эффективная толщина слоя C составляла от доли монослоя (МС) до монослоя, осаждение проводилось также при температуре  $350\text{ }^\circ\text{C}$  и не приводило к изменению дифракционной картины. Введение субмонослойного покрытия углерода на поверхности пленки  $\text{CaF}_2$

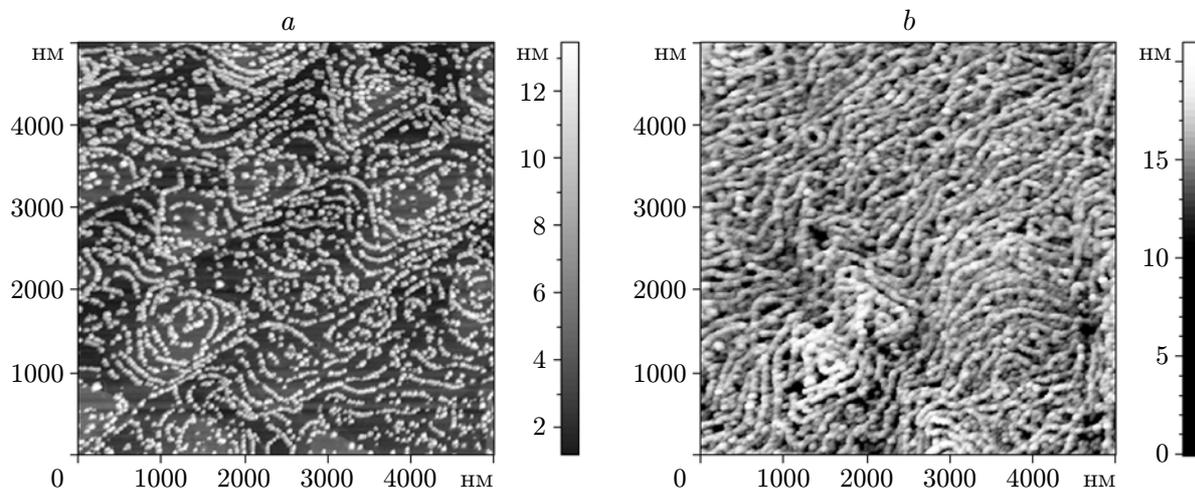


Рис. 4. Рельеф поверхности гетроструктуры  $\text{Ge}/\text{C}/\text{CaF}_2/\text{Si}(111)$  после осаждения  $3\text{ нм}$  Ge в зависимости от количества C: *a* —  $0,25\text{ МС}$ ; *b* —  $1,0\text{ МС}$

Образец	Средняя толщина слоя Ge, нм	Величина покрытия С, МС	Плотность островков Ge, см <sup>-2</sup>
CF3	3	0,10	$5,0 \cdot 10^9$
CF4	3	0,25	$7,0 \cdot 10^9$
CF5	3	0,50	$1,5 \cdot 10^{10}$
CF6	3	1,00	$2,5 \cdot 10^{10}$

радикально изменяет структуру пленки Ge (рис. 4). Уже при покрытии 0,1 МС углерода вместо сплошного слоя Ge наблюдается система мелких ( $\sim 70$  нм) трехмерных островков, большинство из которых выстроено в криволинейные цепочки. Сравнение рис. 4, *a* и рис. 2 дает основание сделать вывод, что островки Ge декорируют ступени, существовавшие на поверхности пленки CaF<sub>2</sub>. При увеличении покрытия С до 1 МС плотность островков Ge возрастает, однако и в этом случае в их расположении на поверхности видно влияние поверхностных ступеней нижележащей пленки. В таблице представлена зависимость плотности островков от величины покрытия пленки CaF<sub>2</sub> углеродом. Учитывая одинаковое количество Ge, осажденное на единицу поверхности в этих образцах, следует сделать вывод, что при большей плотности островков пропорционально уменьшается их средний объем. Изображение на рис. 4, *b*, полученное с помощью АСМ, в данном случае не может дать объективную информацию о латеральном размере, поскольку отдельно стоящих островков не наблюдается, а присутствуют тесно расположенные островки, выстроенные вдоль ступеней.

**Заключение.** Таким образом, модификация поверхности CaF<sub>2</sub> путем нанесения субмонослойных покрытий С стимулирует образование наноструктур Ge. Изменяя количество осажденного углерода, можно регулировать плотность наноструктур, что важно для исследования электротранспортных свойств структуры.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Inoue Y., Tanaka A., Fujii M. et al. Single-electron tunneling through Si nanocrystals dispersed in phosphosilicate glass thin films // Journ. Appl. Phys. 1999. **86**. P. 3199.
2. Pi X. D., Zalloum O. H. Y., Knights A. P. et al. Electrical conduction of silicon oxide containing silicon quantum dots // Journ. Phys.: Condens. Matter. 2006. **18**. P. 9943–9950.
3. Yakimov A. I., Derjabin A. S., Sokolov L. V. et al. Growth and characterization of CaF<sub>2</sub>/Ge/CaF<sub>2</sub>/Si(111) quantum dots for resonant tunneling diodes operating at room temperature // Appl. Phys. Lett. 2002. **81**, N 3. P. 499–501.

*Поступила в редакцию 19 мая 2009 г.*