

Были кратко описаны алгоритм и программная реализация, выполненная на языке C++ с использованием среды Borland C++ Builder 6. В результате тестирования получены оценочные показатели скорости шифрования: 1,9 МБит/с на процессоре Celeron 333 МГц.

#### Литература

1. *Menezes A., Van Oorschot P.* Handbook of applied cryptography. CRC Press, 1996.
2. *Roellgen.* The polymorphic cipher. <http://www.pmc-ciphers.com>.
3. *Li S., Zheng X.* Chaotic encryption scheme for real-time digital video. <http://citeseer.ist.psu.edu>.
4. *Дейтель Х., Дейтел П.* Как программировать на C++. М., 1998.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СЕГРЕГАЦИИ GE И SN В СТРУКТУРЕ SiO<sub>2</sub>/Si

С. Л. Прокопьев, А. Г. Новиков, К. В. Яцко

### ВВЕДЕНИЕ

Кремний является базовым материалом современной микроэлектроники, что связано с удачным сочетанием ряда физических и технологических параметров. Вместе с тем, дальнейшее развитие кремниевой микроэлектроники требует, в частности, поиска новых способов внутрисхемных коммуникаций. Одним из возможных путей решения этой проблемы является использование оптоэлектронных элементов. Кремний является непрямозонным материалом с низким квантовым выходом, поэтому в настоящее время ведется интенсивный поиск новых прямозонных материалов, совместимых с кремниевой технологией.

В ряде работ было установлено, что недеформированные сплавы Ge<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub> в определенном композиционном интервале могут иметь прямую запрещенную зону. Так, в теоретических работах [1] показано, что прямая запрещенная зона характерна для сплава Ge<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub> при 0,09 < x < 0,15. Указанные выводы теоретических расчетов затем подтверждены экспериментально. В частности, в работе [2,3] было установлено, что сплавы Ge<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub> в композиционном интервале 0,09 < x < 0,15 являются прямозонными. В дополнение к этому в работе [2] с использованием метода измерения коэффициента поглощения ИК излучения подтверждено наличие прямой зоны для сплавов Ge<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub> в интервале 0,035 < x < 0,115. Суммируя указанные результаты, можно предполагать, что сплавы Ge<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub> в композиционном интервале 0,035 < x < 0,15 являются перспективными для применения в электронике, базирующейся на Si и соединениях SiGe. Таким образом, цель настоящей работы заключалась в исследовании воз-

возможностей формирования сплавов  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$  путем сегрегации атомов Ge и Sn на границе раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  при оксидировании структур  $\text{Si}/\text{GeSn}/\text{Si}$ .

### ПРИГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦОВ

Исследовались пластины кремния со структурой  $\text{Si}/\text{Ge}_{0,93}\text{Sn}_{0,07}/\text{Si}$ . В качестве подложки использовались пластины кремния ориентации (001) n-типа проводимости. Структуры создавались методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Сначала выращивался буферный слой Si толщиной 100 нм. Далее, при температуре  $170^\circ\text{C}$  выращивался сплав толщиной 1 нм. Затем осаждался поверхностный слой Si толщиной 20 нм при температуре  $170^\circ\text{C}$ . После этого пластины разрезались на образцы  $10 \times 10 \text{ мм}^2$ , которые подвергались оксидированию в среде сухого кислорода. Оксидирование образцов проводилось при температурах  $925^\circ\text{C}$  и  $950^\circ\text{C}$  в течение 60 минут. Химический состав образцов исследовался с помощью резерфордского обратного рассеяния каналированных ионов (РОРКИ) с использованием ионов  $\text{He}^+$  с энергией 1.5 МэВ. Структурно-фазовый состав был исследован методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) в режиме планарной геометрии. Для этих целей использовался просвечивающий электронный микроскоп ЭМ-125 с ускоряющим напряжением 100 кВ. Образцы для ПЭМ утонялись методом химико-динамического травления.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены спектры РОРКИ до и после оксидирования исходных структур. Отличительной особенностью спектров является присутствие пиков, которые были идентифицированы как пики Ge и Sn.

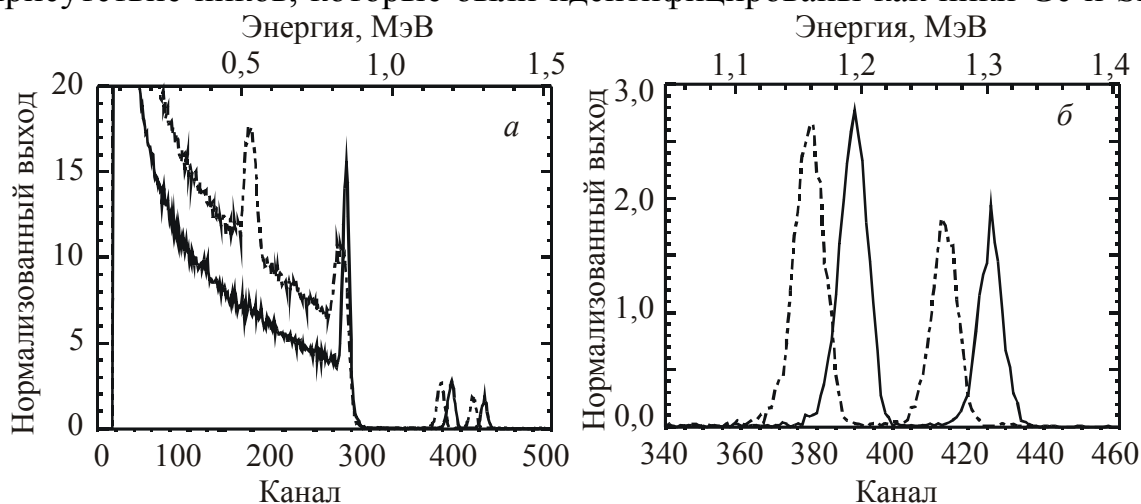


Рис. 1. Спектры РОР в каналированном режиме  
*a* —исходная структура, --- после отжига  $925^\circ\text{C}$  60 мин,  
*б* область каналов 350–450 спектра *a*

Из рисунка видно, что спектры РОРКИ от исходных структур содержат пики в области каналов 360–460. Обнаружено, что при оксидировании происходит сдвиг пиков Ge и Sn в область низких энергий. Величина сдвига оказывается одинаковой как для пика Ge, так и для пика Sn.

Так, смещение пика Ge происходит из области каналов 380–400 в область каналов 370–390, таким образом, величина смещения составляет около 10

каналов как для Ge, так и для Sn. Высота пиков, их форма, а также интегральная площадь под ними не изменяются, что позволяет предположить сохранение концентрации Ge и Sn в слое GeSn. Кроме того, анализ спектров позволяет сделать предположение, что часть Ge (~7%) занимает междоузельное положение. Это, вероятно, связано с диффузионным перераспределением атомов Ge в Si подложку и образованием сплава SiGe переменного состава на границе раздела Si/SiO<sub>2</sub>. На основании анализа данных спектров можно также предполагать изменение состава преципитатов. Одной из причин такого явления может служить взаимодействие слоя преципитатов с избыточным количеством Sn, находящимся в слое SiO<sub>2</sub>. Это процесс имеет место при увеличении температуры или длительности оксидирования.

Исследование структурно-фазовых превращений, приводящих к формированию НК при оксидировании исходных образцов, проводилось методом ПЭМ в режиме светлого поля (рис. 2). Микрофотографии содержат темные пятна на светлом фоне, плотность распределения и размер которых сильно зависит от условий термообработки. Более темный по сравнению с фоном абсорбционный ПЭМ-контраст пятен указывает на то, что соответствующие им структурные образования являются преципитатами, включающими в свой состав более тяжелые атомы, чем атомы окружающей матрицы. Таким образом, на светлопольных ПЭМ микрофотографиях зарегистрировано наличие НК в структуре после отжига. Из

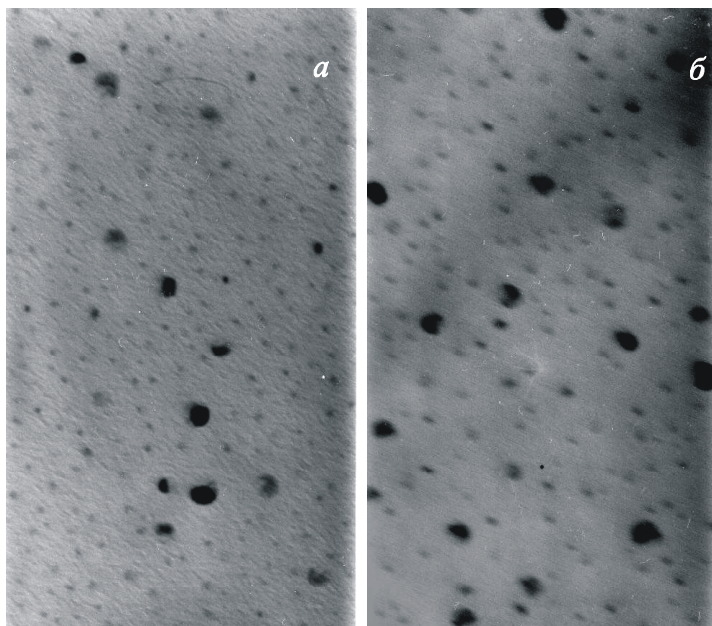


Рис. 2 Светлопольные ПЭМ микрофотографии от образцов после отжига

*a* – 925 °С 60 мин *б* – 950 °С 60 мин

сравнения микрофотографий можно сделать вывод, что происходит изменение размеров НК Ge и Sn в зависимости от условий получения образцов. По мере увеличения времени оксидирования при одной и той же температуре увеличивается размер НК и сокращается их количество. Эта закономерность хорошо согласуется с механизмом созревания Оствальда, согласно которому при диффузионном распаде пересыщенных твердых растворов происходит увеличение размеров преципитатов [4]. Таким образом, сравнительный анализ контраста ПЭМ-микрофотографий предоставляет убедительное свидетельство определяющего влияния степени пересыщения на структурно-фазовый состав НК.

Проведена оценка распределения НК в матрице. Результаты показывают, что средняя поверхностная плотность НК –  $4.5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$  и средний размер – 5–15 нм. Из микрофотографий можно определить и форму НК. Так, некоторые из НК имеют ярко выраженную фасетированную форму и в проекции на плоскость изображения имеют вид квадратов. Вместе с тем, имеется большая фракция НК сферической формы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучена динамика сегрегационного перераспределения примесей Ge и Sn в образцах  $\text{Si/Ge}_{0,93}\text{Sn}_{0,07}/\text{Si}$  при термическом оксидировании. Методами РОРКИ и ПЭМ установлено, что перераспределение примеси при сегрегационном оттеснении является определяющим механизмом в процессе формирования НК GeSn методом МЛЭ с последующим оксидированием. Полученные НК имеют средний размер 5–15 нм.

## Литература

1. *Gang He and Harry A. Atwater* Interband Transitions in  $\text{Sn}_x\text{Ge}_{1-x}$  Alloys // *Phys. Rev. Lett.* 79. 1937–1940 (1997).
2. *Ragan R. and Harry A. Atwater* Measurement of the direct energy gap of coherently strained  $\text{Sn}_x\text{Ge}_{1-x}/\text{Ge}(001)$  heterostructures // *Applied Physics Letters* – November 20, 2000 – Volume 77, Issue 21, pp. 3418–3420
3. *Ragan R. et. al.* Direct energy gap group IV semiconductor alloys and quantum dot arrays in  $\text{Sn}_x\text{Ge}_{1-x}/\text{Ge}$  and  $\text{Sn}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  alloy systems // *Mat. Sci. Eng. B* 2001, Vol. 87. P.204–213.
4. *Лифшиц И. М., Слезов В.В.* О кинетике диффузионного распада пересыщенных твердых растворов // *ЖЭТФ* – 1958, т. 35, № 2, с.479–492.