

06;11

## Влияние водородного травления на электрофизические свойства автоэпитаксиальных слоев карбида кремния

© В.В. Зеленин, Д.В. Давыдов, М.Л. Корогодский, А.А. Лебедев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 26 декабря 2001 г.

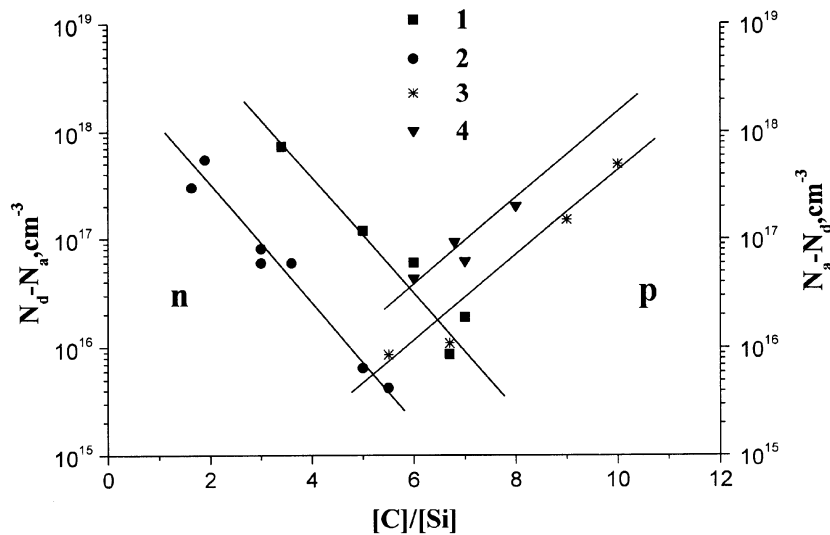
Приведены результаты, указывающие на корреляцию между предростовой обработкой подложки SiC в водороде и концентрацией доноров (акцепторов) выращенных автоэпитаксиальных слоев. Показано, что вышеупомянутые концентрации в слоях могут отличаться на порядок для предварительно травленных и не травленных подложек. Обсуждается физическое обоснование корреляционной связи. Отмечается важность влияния конкурирующего травления на процесс эпитаксиального роста.

**Введение.** Предростовая обработка поверхности подложки является важным этапом для выращивания совершенных эпитаксиальных слоев. В большей мере это касается карбида кремния — твердого и химически стойкого материала, у которого трудно удалить нарушенный слой после механической полировки. Ранее нами уже отмечалось благотворное воздействие водородного травления на структурное совершенство выращенных эпитаксиальных слоев SiC, сказывающееся на сужении полуширины линии рентгеновского пика брэгговского отражения [1]. Наряду с водородным травлением нами были рассмотрены и другие методы воздействия на поверхность SiC, в частности сухое и влажное окисление с последующим удалением окисла. Многократное электролитическое окисление и удаление окисла по методике, близкой к [2], показало лучшее состояние поверхности, но тем не менее на поверхности оставался аморфный слой. Исследования, проведенные на источнике синхротронного излучения, показали, что четкую атомную структуру поверхности можно было наблюдать только на образцах, травленных в водороде [3]. Травлению SiC также посвящены работы [4–6]. В [7] показано, что характер травления в H<sub>2</sub> зависит

не только от температуры и скорости потока водорода, но и от материала нагревателя, что соответствует нашим представлениям о работе реакторов с углеродной оснасткой в водороде без защитного покрытия из карбида кремния [8]. В [9] нами уже указывалось на наличие корреляционной связи между концентрацией с одной стороны и предростовой обработкой подложек в водороде с другой для слоев  $n$ -типа проводимости. В данном сообщении приведены результаты, распространяющиеся и на слои  $p$ -типа проводимости. Показано, что разница концентраций в эпитаксиальных слоях для предварительно травленных и не травленных в водороде подложек может отличаться на порядок. Обсуждаются физические обоснования корреляционной связи. Отмечается важность конкурирующего травления на процесс эпитаксиального роста в условиях низкого пересыщения.

**Эксперимент.** Для экспериментов использовались подложки фирмы „CREE“  $p$ -6H-SiC с ориентацией (0001) Si,  $3^\circ$  (11 $\bar{2}$ 0). Выращивание производилось в системе метан (CH<sub>4</sub>)-силан (SiH<sub>4</sub>)-водород (H<sub>2</sub>), в реакторе с горячей стенкой и стеклоуглеродным нагревателем [1]. Слои выращивались при малом пересыщении с результирующей скоростью роста 0.1–0.3  $\mu\text{m}/\text{h}$  при температуре 1450°C, общем потоке H<sub>2</sub>–3 l/min, потоке 5% SiH<sub>4</sub> в аргоне — 8 cm<sup>3</sup>/min, поток 10% CH<sub>4</sub> в аргоне варьировался в пределах отношения C/Si ~ 1–10. Выход на режим роста осуществляли двумя путями: а) выход к заданной температуре в атмосфере водорода и ввод активных ростовых газов, б) выход к заданной температуре и травление поверхности подложек водородом в течение 2 h с последующим вводом активных ростовых газов. При вышеуказанной температуре в реакторах присутствуют молекулы CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> и их радикалы (являющиеся результатом взаимодействия водорода с оснасткой без SiC покрытия) [8]. Таким образом, реально травление подложек происходит в водороде, обогащенном углеродсодержащими компонентами. Скорость травления ~ 0.6–0,8  $\mu\text{m}/\text{h}$ . Морфология выращенных слоев в среднем была зеркально-гладкой. Специального легирования не делалось. Концентрация выращенных слоев оценивалась из вольт-фарадных характеристик барьеров Шоттки. На рис. 1 представлены результаты измерений концентраций нескомпенсированных доноров (акцепторов) эпитаксиальных слоев  $n$ - и  $p$ -типа проводимости в зависимости от отношения C/Si в газовой фазе. Природа  $n$ - и  $p$ -типа проводимости обсуждалась ранее в [8–10].

**Обсуждение результатов.** Итак, из рис. 1 видно, что предростовая обработка подложки является важным фактором, позволяющим сни-



**Рис. 1.** Зависимость концентрации нескомпенсированных доноров ( $N_d - N_a$ ) и акцепторов ( $N_a - N_d$ ) от отношения  $[C]/[Si]$  в газовой фазе: 1 и 4 — без предостового травления подложек в  $H_2$ , 2 и 3 — с предостовым травлением подложек в  $H_2$ .

зить на порядок фоновую концентрацию. Поведение характерно для образцов как  $n$ -, так и  $p$ -типов проводимости (сравнить графики 1 и 2 —  $n$ -тип и 3 и 4 —  $p$ -тип на рис. 1). Из общих соображений можно утверждать, что уровень концентрации связан с состоянием поверхности как до, так и после травления. Состояние поверхности, в свою очередь, характеризуется наличием атомных ступеней, их ориентации (разориентации) относительно кристаллографических плоскостей и дефектами на поверхности. Известно, что элементарная ячейка  $6H$ -SiC вдоль главной оси состоит из шести плотно упакованных би-слоев SiC ( $\sim 6 \times 0.2$  nm), которые на разориентированной, относительно сингулярной грани поверхности выступают в виде ступеней. Ступени энергетически не эквивалентны. При травлении уходят наименее связанные с поверхностью атомы. Недавние исследования поверхности  $6H$ -SiC и  $4H$ -SiC с помощью растровой туннельной микроскопии

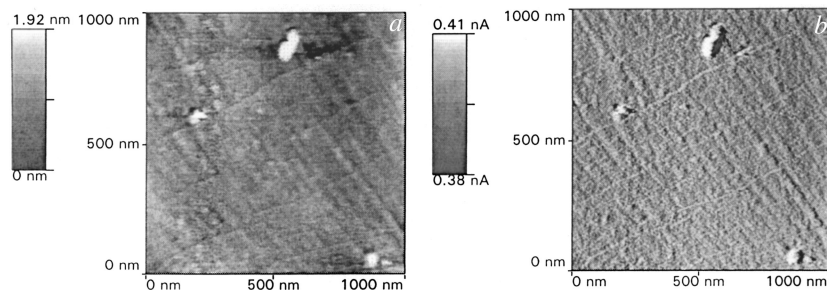


Рис. 2. Морфология поверхности эпитаксиального слоя 6H-SiC для  $[C]/[Si] \sim 5$ .

показали, что после продолжительного травления в водороде высота ступеней на поверхности становится равной половине постоянной решетки 6H и 4H-SiC (т.е. 3 и 2 би-слоя соответственно вдоль главной оси) [4]. Аналогичная картина наблюдается при травлении поверхности SiC хлористым водородом [5]. Таким образом, длительное травление не сводится к простому удалению дефектного слоя с поверхности, а приводит к качественно новому состоянию поверхности. Полученные результаты позволили этим авторам сделать предположение, что в результате травления с поверхности уходят наиболее энергичные ступени (верхние 3 би-слоя). Оставшиеся, наименее энергичные (наиболее интегрированные в слой), и определяют морфологию поверхности. В нашем случае при вышеобозначенных условиях роста ( $0.1-0.3 \mu\text{m/h}$ ) скорость роста конкурирует со скоростью травления. В связи с этим можно предположить, что при эпитаксиальном росте в условиях, конкурентных с травлением, параллельно стравливаются наиболее энергичные ступени и поверхность растущего слоя сохраняет структуру поверхности травленной подложки. Таким образом, число мест адсорбции становится меньше, что в конечном итоге сказывается на уменьшении концентрации нескомпенсированных доноров (акцепторов). На рис. 2 представлена морфология эпитаксиального слоя, выращенного на предварительно травленной в водороде подложке, полученная с помощью атомно-силовой микроскопии. Указанный масштаб соответствует средней шероховатости, не превышающей двух-трех би-слоев 6H-SiC. Таким образом, вышеприведенные рассуждения качественно объясняют разницу в концентрациях выращенных слоев с предварительно травленными и не травленными подложками.

**Заключение.** Продолжительное водородное травление ( $t \sim 2$  h при  $T = 1450^\circ \text{C}$ ) делает структуру поверхности подложки менее развитой. Эпитаксиальный рост в условиях конкуренции с водородным травлением сохраняет структуру поверхности травленной подложки, при этом количество центров адсорбции примеси уменьшается. Вышеприведенные рассуждения и исследования морфологии слоев методом атомно-силовой микроскопии качественно объясняют разницу в концентрациях выращенных слоев с предварительно травленными и не травленными подложками.

Авторы выражают благодарность Prof. W. Richter и Dr. B. Schroeter из Friedrich-Schiller-University Jena за исследование образцов методом атомно-силовой микроскопии.

Работа поддержана фондом РФФИ (грант № 00-02-16688).

## Список литературы

- [1] Zelenin V.V., Lebedev A.A., Starobinets S., Chelnakov V.E. // Mat. Sci. Eng. 1997. В46. P. 300–303.
- [2] Абаев М.И., Вольфсон А.А., Каркина М.И., Остроумов А.Г., Семенов В.В. // Неорганические материалы. 1979. Т. 15. В. 12. С. 2232.
- [3] Аргунова Т.С., Зеленин В.В., Костина Л.С., Лебедев А.А., Корогодский М.Л., Sauvage M., Coati A. // Тез. 4-й Российской конф. по физике полупроводников. Новосибирск, 25–29 октября 1999.
- [4] Chu T.L., Campbell R.B. // J. Electrochem. Soc. 1965. V. 112. N 9. P. 955.
- [5] Patanchandra V., Brady M.F., Smith A.R., Fcenstra R.M., Grew D.W. // J. Electron. Mat. 1998. V. 27. N 24. P. 308.
- [6] Chun-inchi Nakamura, Kimoto T., Matsunami H., Tanaka S., Teraguchi N., Suzuki A. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. N 23. P. 3412.
- [7] Saidov M.S., Shamuratov Kh., Kadyrov M.A. // Crystall Growth. 1988. V. 87. P. 519.
- [8] Зеленин В.В., Корогодский М.Л., Лебедев А.А. // ФТП. 2001. Т. 35. В. 10. С. 1169.
- [9] Зеленин В.В., Корогодский М.Л., Лебедев А.А. // ФТП. 2001. Т. 35. В. 10. С. 1172.
- [10] Zelenin V.V., Lebedev A.A., Rastegaeva M.G., Davydov D.V., Chelnakov V.E., Korogodskii M.L. // Mat. Sci. Eng. 1999. В61–62. P. 183.