

05;06;12

Формирование слоев кубического карбида кремния на кремнии непрерывными и импульсными пучками ионов углерода

© Р.М. Баязитов, И.Б. Хайбуллин, Р.И. Баталов, Р.М. Нурутдинов

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского Казанского научного центра РАН,
420029 Казань, Россия
e-mail: bayaz@kfti.knc.ru

(Поступило в Редакцию 5 ноября 2002 г.)

Исследована структура и инфракрасное поглощение в слоях кубического карбида кремния (β -SiC), сформированных путем непрерывной высокодозной имплантации ионов углерода (C^+) в кремний ($E = 40$ keV, $D = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$) с последующей обработкой имплантированных слоев мощным наносекундным импульсным ионным пучком (C^+ , $\tau = 50$ ns, $E = 300$ keV, $W = 1.0\text{--}1.5 \text{ J/cm}^2$). Просвечивающая электронная микроскопия и электронная дифракция свидетельствуют о формировании крупнозернистого поликристаллического слоя β -SiC с размером зерна до 100 nm. Характерной особенностью сформированных слоев является дендритная поверхностная морфология, что объясняется кристаллизацией из расплава, сильно переохлажденного относительно точки плавления β -SiC.

Введение

Благодаря широкой запрещенной зоне ($E_g = 2.3\text{--}3.5$ eV в зависимости от политипа), высокой теплопроводности, а также высокой физической и химической стойкости карбид кремния (SiC) является перспективным материалом для создания высокотемпературных и высокочастотных приборов [1,2]. Одним из наиболее перспективных методов создания слоев SiC на кремнии, хорошо совместимым с кремниевой приборной технологией, является метод ионно-лучевого синтеза — имплантация углерода (C^+) в кремний, позволяющий с малым уровнем загрязнений создавать слои SiC на заданной глубине. Для создания сплошных пленок SiC ионная имплантация проводится при повышенной температуре кремниевой подложки ($\geq 500^\circ\text{C}$) либо при комнатной температуре с последующим высокотемпературным ($> 1100^\circ\text{C}$) и продолжительным (> 1 h) термическим отжигом. При таких обработках формируются эпитаксиальные или поликристаллические слои кубического карбида кремния (β -SiC) [3–6]. Однако использование высоких температур имплантации или термического отжига создает дополнительные технические сложности и часто бывает нежелательным.

Быстрый отжиг имплантированных слоев мощными импульсными лазерными или корпускулярными пучками является альтернативой высокотемпературной имплантации/отжигу, поскольку импульсная обработка происходит без нагрева базового материала и может быть локализована на отдельных областях поверхности. Ранее было показано, что высокодозная ($> 10^{17} \text{ cm}^{-2}$) и низкоэнергетичная (< 40 keV) имплантация ионов C^+ в Si с последующей обработкой лазерными [7] или электронными [8] пучками наносекундной длительности импульса ($\sim 10^{-8}\text{--}10^{-7}$ s) приводит к формированию эпитаксиальных или поликристаллических слоев β -SiC.

Наносекундная импульсная ионная обработка (ИИО) имеет ряд преимуществ по сравнению с лазерной и электронной. Благодаря равномерному выделению энергии (в области пробега ионов) по глубине [9] синтез тонкопленочных соединений может проводиться с более однородным нагревом приповерхностных слоев без перегрева и разрушения поверхности [10,11]. Глубокое плавление ($\sim 1 \mu\text{m}$) в сочетании с высокой скоростью затвердевания ($\sim 10^9$ K/s) позволяет создавать толстые сильнолегированные слои с концентрацией имплантированных примесей, значительно превышающей их равновесную растворимость в кристалле [12]. Кроме того, метод обладает высокой производительностью [13] и возможностью одновременной имплантации и отжига [14]. В данной работе нами исследована возможность формирования сплошных слоев β -SiC на Si с использованием высокодозной имплантации ионов C^+ с последующей наносекундной обработкой мощным пучком ионов C^+ .

Эксперимент

Непрерывная имплантация ионами C^+ проводилась в пластины n -Si (100) с энергией ионов $E = 40$ keV, дозой $D = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ при плотности ионного тока $j < 6 \mu\text{A/cm}^2$. После ионной имплантации образцы были подвергнуты ИИО. Импульсный ионный ускоритель генерировал широкоапертурные ($d \sim 4$ cm) ионные пучки с длительностью импульса $\tau = 50$ ns, энергией ионов $E = 300$ keV при плотности энергии в импульсе $W = 1.0\text{--}1.5 \text{ J/cm}^2$, что соответствует плотности ионного тока $j = 65\text{--}100 \text{ A/cm}^2$. Ионный пучок в основном содержал ионы C^+ ($\sim 80\%$) и H^+ ($\sim 20\%$). Общая доза этих ионов за один импульс не превышала 10^{14} cm^{-2} . Для сравнения методов часть образцов после ионной имплантации подверглась лазерному или термическому отжигу. Импульсный лазерный отжиг (ИЛО) проводился

излучением рубинового лазера ($\lambda = 0.69 \mu\text{m}$) с длительностью импульса $\tau = 50 \text{ ns}$ и плотностью энергии $W = 0.5\text{--}2 \text{ J/cm}^2$. Термический отжиг (ТО) проводился в атмосфере азота при температурах $950\text{--}1050^\circ\text{C}$ в течение $10\text{--}15 \text{ min}$. Структура сформированных слоев была исследована просвечивающей электронной микроскопией (ПЭМ) и электронной дифракцией. Морфология поверхности Si и оптическое поглощение слоев $\beta\text{-SiC}$ исследовались методами оптической микроскопии и инфракрасной (ИК) спектроскопии.

Результаты и обсуждение

Данные ПЭМ (не показаны) свидетельствуют, что после имплантации Si ионами C^+ с дозой $5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ образуется сплошной слой, состоящий из случайно ориентированных зерен $\beta\text{-SiC}$. Размер зерен составляет около 10 nm , а микродифракционная картина сильно размыта, что свидетельствует о сильной разупорядоченности имплантированного слоя. На рис. 1, *a* показано изображение, полученное в светлом поле электронного микроскопа, имплантированного Si после ИИО с плотностью энергии в импульсе $W = 1.0 \text{ J/cm}^2$. Видно, что средний размер зерна $\beta\text{-SiC}$ составляет около 100 nm . При этом микродифракционная картина показывает большое число (вплоть до 12) хорошо различимых колец, что свидетельствует о поликристаллической природе сформированного слоя $\beta\text{-SiC}$. Повышение плотности энергии в импульсе до 1.5 J/cm^2 приводит к образованию наряду с зернами $\beta\text{-SiC}$ больших размеров графитовых зерен размерами около 100 nm , а также к визуально наблюдаемому потемнению образца (рис. 1, *b*). Присутствие графитовых зерен подтверждается появлением дополнительного кольца в микродифракционной картине. При воздействии на имплантированный слой лазерными импульсами графитовые зерна образуются практически во всем диапазоне плотностей энергии, начиная с $W = 0.5 \text{ J/cm}^2$, близкой к порогу плавления Si. Термический отжиг имплантированных слоев при 1050°C в течение 15 min не показывает каких-либо заметных изменений структуры по сравнению с исходной после имплантации.

Расчетная глубина расплава кремния при ИИО достигает $\sim 0.8 \mu\text{m}$ при плотности энергии в импульсе $W = 1.0 \text{ J/cm}^2$ [12], что превышает ширину профиля распределения имплантированного углерода ($\sim 0.2 \mu\text{m}$ при $E = 40 \text{ keV}$), вычисленную по программе TRIM [15]. При образовании расплава кремния, содержащего углерод, он сразу находится в переохлажденном относительно точки плавления SiC состоянии, поскольку имеется значительное различие точек плавления Si (1700 K) и $\beta\text{-SiC}$ (2830 K). Очевидно, что энергии излучения недостаточно для полного разрыва связей Si-C и для плавления отдельных зерен $\beta\text{-SiC}$, образовавшихся при ионной имплантации. В этом случае велика вероятность неориентированной полицентральной кристаллизации, ко-

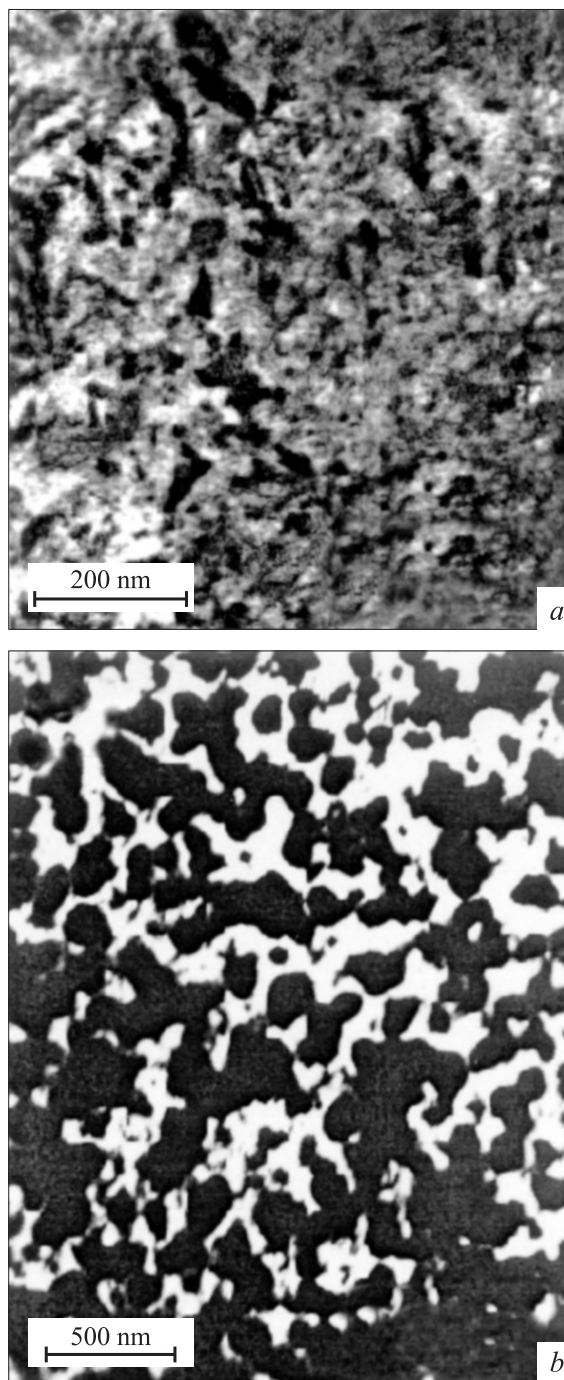


Рис. 1. Светлопольное ПЭМ изображение имплантированного Si (40 keV , $5 \cdot 10^{17} \text{ C}^+/\text{cm}^2$) после ИИО (300 keV , 50 ns) с плотностью энергии $W = 1.0$ (*a*) и 1.5 J/cm^2 (*b*).

торая приводит к появлению дендритной поверхностной морфологии с характерными размерами дендритов до $500 \mu\text{m}$ (рис. 2). Аналогичная морфология поверхности наблюдалась в [8] при обработке имплантированных слоев Si импульсными электронными пучками.

ИК поглощение является одним из наиболее информативных методов исследования формирования SiC.

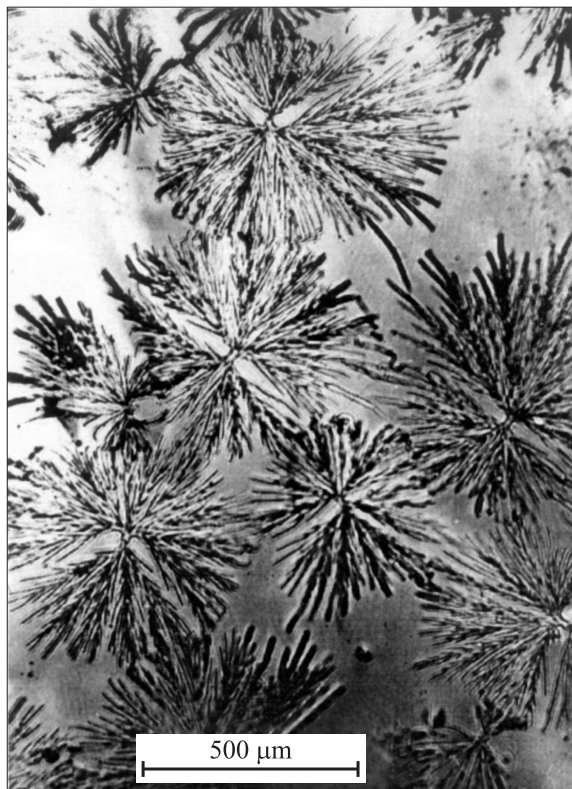


Рис. 2. Изображение поверхности имплантированного Si (40 keV , $5 \cdot 10^{17} \text{ C}^+/\text{cm}^2$) после ИИО (300 keV , 50 ns) с плотностью энергии $W = 1.0 \text{ J}/\text{cm}^2$, полученное в оптическом микроскопе.

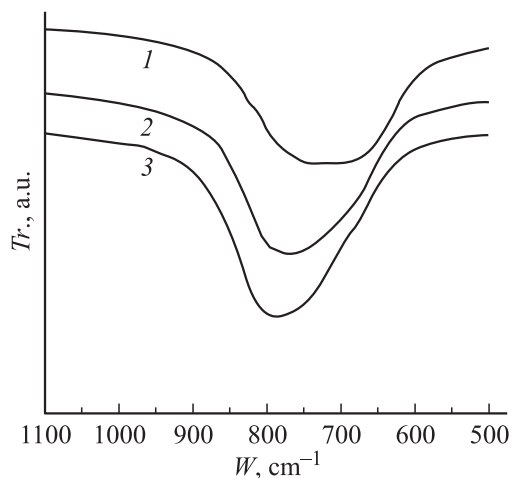


Рис. 3. Спектры ИК поглощения Si после ионной имплантации (40 keV , $5 \cdot 10^{17} \text{ C}^+/\text{cm}^2$) (1) после имплантации и ИИО (300 keV , 50 ns , $1.0 \text{ J}/\text{cm}^2$) (2), после имплантации, ИИО (300 keV , 50 ns , $1.0 \text{ J}/\text{cm}^2$) и дополнительного термического отжига (950°C , 10 min) (3). Кривые 2 и 3 смещены вертикально для ясности.

После ионной имплантации наблюдается широкая полоса поглощения, максимум которой расположен вблизи частоты $\sim 720 \text{ cm}^{-1}$, смещенной в длинноволновую

область относительно максимума для монокристаллического SiC (рис. 3, кривая 1). Термический отжиг этих образцов при температуре 1050°C в течение 15 min не приводит к заметному изменению спектров. В то же время ИИО имплантированного слоя приводит к сужению полосы поглощения и к смещению ее максимума к частоте $\sim 770 \text{ cm}^{-1}$ (рис. 3, кривая 2). Данное обстоятельство свидетельствует о кристаллизации имплантированной структуры. Для устранения остаточных дефектов и механических напряжений, образующихся в результате кристаллизации из расплава во время ИИО, использовался дополнительный термический отжиг при температуре 950°C в течение 10 min (рис. 3, кривая 3). Видно, что происходит дальнейшее сужение полосы поглощения и сдвиг максимума к величине $\sim 790 \text{ cm}^{-1}$, близкой к значению поперечной оптической моды β -SiC ($\omega_{TO} = 794 \text{ cm}^{-1}$). Таким образом, для формирования фазы β -SiC наилучшие результаты достигаются при сочетании ИИО с последующим непродолжительным термическим отжигом.

Заключение

Воздействие мощными наносекундными импульсными ионными пучками на имплантированный большими дозами углерода кремний приводит к формированию крупнозернистого поликристаллического слоя β -SiC с размером зерна около 100 nm . При повышенной плотности энергии импульсов наряду с образованием поликристаллической фазы β -SiC образуются зерна графита с размерами до 100 nm . Основным механизмом образования слоев β -SiC является жидкофазная неориентированная кристаллизация из переохлажденного относительно точки плавления β -SiC расплава. Характерной особенностью этого процесса является образование дендритной морфологии поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 00-15-96615, 01-02-16649).

Список литературы

- [1] Иванов П.А., Челноков В.Е. // ФТП. 1995. Т. 29. С. 1921–1943.
- [2] Harris C.I., Savage S., Konstantinov A. et al. // Appl. Surf. Sci. 2001. Vol. 184. P. 393–398.
- [3] Баранова Е.К., Демаков К.Д., Старинин К.В. и др. // ДАН СССР. 1971. Т. 200. С. 869–870.
- [4] Герасименко Н.Н., Кузнецов О.Н., Лежейко Л.В. и др. // Микроэлектроника. 1974. Т. 3. С. 467–468.
- [5] Lindner J.K.N. // Nucl. Instr. and Meth. B. 2001. Vol. 178. P. 44–54 и ссылки в ней.
- [6] Liu Z.Q., Liu J.F., Feng J.Y. et al. // Mater. Lett. 2001. Vol. 50. P. 275–278.
- [7] Kantor Z., Foqarassy E., Grob A. et al. // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol. 69. P. 969–971.

- [8] *Durupt P., Barbier D., Laugier A.* // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Energy Beam-Solid Interaction and Transient Thermal Processing / Ed. J.C.C. Fan, N.M. Johnson. North-Holland, 1984. Vol. 23. P. 747–752.
- [9] *Hodgson R., Baglin J.E.E., Pal R.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1980. Vol. 37. P. 187–189.
- [10] *Chen L.J., Hung L.S., Mayer J.W.* et al. // Appl. Phys. Lett. 1982. Vol. 40. P. 595–597.
- [11] *Bayazitov R., Batalov R.I.* // J. Phys. 2001. Vol. 13. P. L113–L118.
- [12] *Bayazitov R., Zakirzyanova L., Khaibullin I.* et al. // Vacuum. 1992. Vol. 43. P. 619–622.
- [13] *Isakov I., Kolodii V., Opekunov M.* et al. // Vacuum. 1990. Vol. 42. P. 159–162.
- [14] *Piekoszewski J., Werner Z., Szymczyk W.* // Vacuum. 2001. Vol. 63. P. 475–481.
- [15] *Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U.* The Stopping and Range of Ions in Solids. New York: Pergamon Press, 1985. (<http://www.srim.org>).