

06.5;08.1;13.1

Особенности синтеза карбида кремния методом холодной имплантации атомов отдачи углерода

© В.И. Зиненко¹, Ю.А. Агафонов¹, В.В. Сарайкин², В.Г. Еременко¹,
Д.М. Седловец¹, Д.В. Иржак¹

¹ Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Черноголовка, Московская обл., Россия

² Научно-исследовательский институт физических проблем им. Ф.В. Лукина, Москва, Зеленоград, Россия
E-mail: zinenko@iptm.ru

Поступило в Редакцию 4 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 31 мая 2022 г.

Принято к публикации 31 мая 2022 г.

Методом Оже-электронной спектроскопии подтверждена высокая концентрация атомов углерода (~ 85 at.%), вводимых в кремний посредством холодной имплантации атомов отдачи. Атомы углерода сосредоточены в тонкой (~ 5 nm) приповерхностной области кремния. Отжиг такой структуры не выявил заметной диффузии углерода, что не позволяет получать слои SiC с толщиной более нескольких нанометров. Данная проблема решена с помощью применения радиационно-стимулированной диффузии. Это дало возможность управлять профилями распределения атомов углерода в широких пределах. Отжиг при 1150°C позволил получить слои аморфно-кристаллического SiC толщиной 50–150 nm. Для получения монокристаллической пленки SiC необходимы более высокие температуры.

Ключевые слова: холодная имплантация, радиационно-стимулированная диффузия, карбид кремния, атом отдачи, тонкие пленки.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.14.52865.19212

В работе [1] был предложен новый метод холодной имплантации атомов отдачи углерода для синтеза карбида кремния 3C-SiC. Развитие этого метода позволило бы создать чистую, быструю и недорогую технологию синтеза пленок 3C-SiC на кремниевых подложках. Данный метод позволяет получать высокие концентрации атомов углерода в тонком приповерхностном слое кремния (~ 10 nm). Однако дальнейшие исследования показали, что отжиг такой структуры при 1150°C лишь незначительно изменяет исходный профиль атомов углерода, т.е. практически отсутствует термическая диффузия атомов углерода в кремнии. Это не позволяет получить толщину синтезированного слоя SiC больше нескольких нанометров. Возможно, отсутствие заметной диффузии углерода связано с образованием связей Si–C уже на ранней стадии отжига при температурах ниже 1150°C . Это может приводить к резкому уменьшению скорости диффузии, так как коэффициент диффузии углерода в SiC на четыре порядка величины меньше, чем в кремнии [2]. Для увеличения толщины синтезированного слоя SiC была сделана попытка повысить скорость диффузии атомов углерода, используя явление радиационно-стимулированной диффузии (РСД). РСД — гибкий метод, позволяющий в широких пределах управлять формой и глубиной распределения имплантированной примеси [3].

Холодная имплантация атомов отдачи углерода производилась в подложки Si(111) *n*-типа ($7.5 \Omega \cdot \text{cm}$). Образцы устанавливались в вакуумной камере ионного имплантера на держателе, который мог охлаждаться

жидким азотом. Для исследования влияния РСД на профиль атомов углерода в кремний вводились радиационные дефекты (РД). Это осуществлялось путем имплантации ионов Ag^+ при комнатной температуре (энергия ионов 40 keV, доза $2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$). Максимум профиля радиационных дефектов находился на глубине ~ 74 nm. После введения РД образцы охлаждались до температуры ~ 100 K и проводился кратковременный напуск ацетилена (C_2H_2) для создания на поверхности кремния пленки ацетилена в твердой фазе. Далее образцы облучались ионами Ag^+ с энергией 40 keV и дозой $5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ для имплантации атомов отдачи углерода из пленки ацетилена. Параметры холодной имплантации были такими же, как в работе [1]. После имплантации проводился изотермический отжиг образцов в вакууме ($P \sim 10^{-4}$ Pa) при температуре 1150°C в течение 30 min и 3 h. Образцы характеризовались методами вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС), Оже-электронной спектроскопии (ОЭС), рентгеновской дифрактометрии, инфракрасной (ИК) спектроскопии и атомно-силовой микроскопии (АСМ).

Высокое значение концентрации атомов отдачи углерода в приповерхностной области кремния, полученное нами в работе [1], было подтверждено методом ОЭС. Результаты ОЭС-анализа приведены на рис. 1, *a*. Форма ОЭС-профиля атомов углерода хорошо согласуется с данными ВИМС-анализа. На глубине ~ 3 nm атомная концентрация углерода составляет ~ 85 at.%. На рис. 1, *b* приведены ВИМС-профили атомов углерода в произвольных единицах после различных режимов обработ-

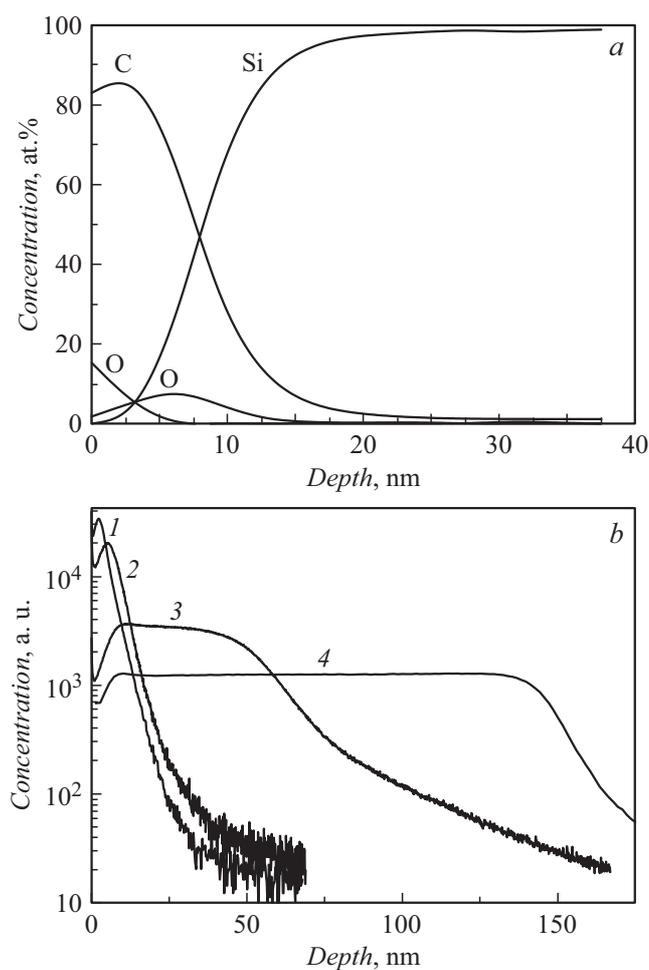


Рис. 1. ОЭС-профили (а) и ВИМС-профили атомов углерода в Si (b). 1 — после имплантации, 2 — отжиг 30 min, 3 — отжиг 30 min с РД, 4 — отжиг 3 h с РД.

ки. Профиль 1 относится к исходному распределению атомов отдачи углерода после имплантации. Абсолютная величина концентрации в максимуме распределения составляет $3 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ [1]. Профиль 2 описывает распределение атомов углерода после отжига образца при температуре 1150°C в течение 30 min. Этот профиль лишь незначительно отличается от профиля 1. ВИМС-профили 3 и 4 относятся к образцам с РД после отжига в течение 30 min и 3 h соответственно. Как видно, применение РСД значительно понизило концентрацию атомов углерода и привело к равномерному распределению их в слое толщиной $\sim 50 \text{ nm}$ (профиль 3) и $\sim 150 \text{ nm}$ (профиль 4).

Как сказалось „растяжение“ профиля атомов углерода с помощью РСД на эффективности образования связей Si–C, видно из ИК-спектров поглощения для трех режимов отжига (рис. 2, а). Спектр 1 соответствует отжигу в течение 30 min, спектры 2 и 3 — случаям, когда в образцы введены РД с последующим отжигом в течение 30 min и 3 h соответственно. Видно, что отжиг в течение 30 min приводит к появлению пика поглощения при

$\sim 800 \text{ cm}^{-1}$, характерного для тетраэдрических связей Si–C кристаллического SiC (спектр 1). Применение РСД приводит к резкому увеличению амплитуды и площади под пиком 800 cm^{-1} . Известно, что площадь под пиком 800 cm^{-1} пропорциональна количеству различных оптически активных связей Si–C [4]. Из соотношения площадей видно, что применение РСД увеличивает число связей Si–C в 3.6 раза для спектра 2 и примерно в 10 раз для спектра 3. Соотношение аморфной и кристаллической фаз в синтезированном слое SiC можно установить из математического разложения на составляющие спектра 3 (рис. 2, б). Узкий пик при 799.3 cm^{-1} соответствует тетраэдрическим связям кристаллической фазы SiC, остальные компоненты относятся к различным типам связей Si–C аморфной фазы [4]. Кристаллическая фаза для спектра 3 составляет 17%. Для спектра 2 она равна 32%, что, очевидно, связано с более высокой концентрацией атомов углерода в этом случае.

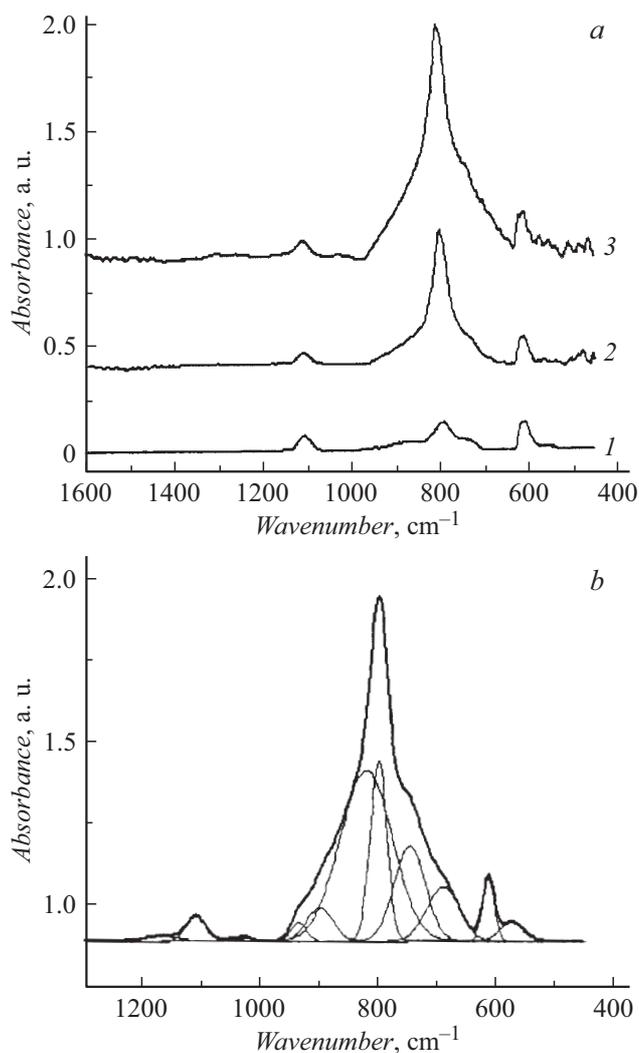


Рис. 2. а — ИК-спектры поглощения: 1 — отжиг 30 min, 2 — отжиг 30 min с РД, 3 — отжиг 3 h с РД; б — математическое разложение спектра 3.

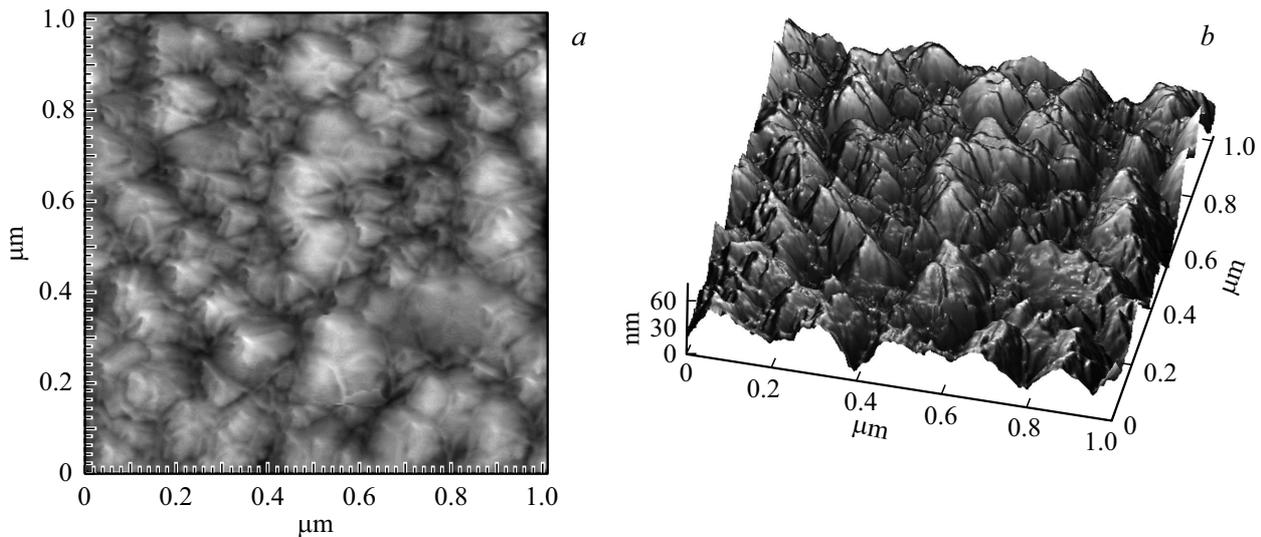


Рис. 3. *a* — АСМ-изображение поверхности образца в плоскости; *b* — 3D АСМ-изображение этого же места.

Кристаллическая структура пленки SiC исследовалась методом рентгеновской дифрактометрии. Выявлены два дифракционных пика отражения, характерных для кристаллографических плоскостей SiC(111) и SiC(222) кубического карбида кремния 3C-SiC. Оценка области когерентного рассеяния дает размер кристаллитов 3C-SiC ~ 7.5 nm.

На рис. 3, *a, b* приведены АСМ-изображения поверхности образца с РД (отжиг в течение 3 h) в поле сканирования $1 \times 1 \mu\text{m}$. Наблюдается высокая плотность зерен в виде трехгранных пирамид, равномерно распределенных по всей плоскости. Кристаллографическая ориентация зерен совпадает с ориентацией (111) кремниевой подложки. Среднеквадратичная шероховатость, измеренная в различных точках поверхности, составляет ~ 10 nm.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить основные особенности метода холодной имплантации атомов отдачи углерода, которые нужно учитывать при синтезе пленок SiC этим методом. Метод позволяет получать высокие концентрации атомов углерода (85 at.%) в тонкой (~ 5 nm) приповерхностной области кремния. Не наблюдается заметной термической диффузии атомов углерода при отжиге таких структур. Применение РСД позволило эффективно управлять формой профиля и распределением атомов углерода по глубине. РСД также существенно увеличивает количество связей Si–C. Отжиг структур с РД при 1150°C привел к формированию аморфно-кристаллического слоя SiC толщиной в несколько десятков нанометров с размером кристаллитов 3C-SiC ~ 7.5 nm. Степень кристалличности в слое толщиной 50 nm составляет 32%. Для увеличения степени кристалличности необходимы температуры отжига более 1150°C .

Благодарности

Авторы выражают благодарность С.П. Кириленко за проведение ОЭС-анализа.

Финансирование работы

Работа выполнена согласно программе госзадания ИПТМ РАН № 075-007706-22-00.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V.I. Zinenko, Yu.A. Agafonov, V.V. Saraykin, V.G. Eremenko, D.V. Roshchupkin, D.M. Sedlovets, *Mater. Lett.*, **233**, 115 (2018). DOI: 10.1016/j.matlet.2018.08.107
- [2] Ю.С. Нагорнов, *ЖТФ*, **85** (5), 71 (2015). [Yu.S. Nagornov, *Tech. Phys.*, **60** (5), 700 (2015). DOI: 10.1134/S1063784215050175].
- [3] V. Kozlovski, V. Abrosimova, *Int. J. High Speed Electron. Syst.*, **15** (1), 1 (2005). DOI: 10.1142/S012915640500317X
- [4] К.Х. Нусупов, Н.В. Бейсенханов, С.К. Жариков, И.К. Бейсембетов, Б.К. Кенжалиев, Т.К. Ахметов, Б.Ж. Сейтов, *ФТТ*, **56** (11), 2231 (2014). [K.Kh. Nussupov, N.B. Beisenkhanov, S.K. Zharikov, I.K. Beisembetov, B.K. Kenzhaliev, T.K. Akhmetov, B.Zh. Seitov, *Phys. Solid State*, **56** (11), 2307 (2014). DOI: 10.1134/S1063783414110237].