

- [2] Авдеев Л.З., Быков А.Б., Демьянец Л.Н. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 46. С. 196.
- [3] Stormer H.L., Levi A.F.J., Baldwin K.W. et al. // Phys. Rev. B. 1988. V. 38. N 4. P. 2472.
- [4] Горлова И.Г., Зыбцев С.Г., Латышев Ю.И. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 47. С. 100.
- [5] Головашкин А.И., Красносвободцев С.И., Кучеренко И.В., Печень Е.В. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 48. С. 27.
- [6] Лушик Ч.Б., Куусманн И.Л., Фельдбах Э.Х. и др. // ФТТ. 1987. Т. 29. С. 3667.
- [7] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика, ч. 1. М.: Наука, 1976. 584 с.

Ленинградский электротехнический институт им. В.И.Ульянова (Ленина)

Поступило в Редакцию  
22 июля 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 3

12 февраля 1990 г.

05.3; 07

© 1990

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В КАРБИДЕ КРЕМНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ИМПУЛЬСОВ ЭКСИМЕРНОГО ЛАЗЕРА МЕТОДОМ КАНАЛИРОВАНИЯ

К.К. Бурдель, А.С. Ахманов,  
А.Ю. Поройков, А.В. Суворов,  
Н.Г. Чеченин

Ранее [1] нами было установлено, что воздействие импульсов эксимерного лазера на имплантированные ионами  $Ga^+$  образцы  $SiC$  приводит к плавлению приповерхностного слоя, начиная с энергий импульса  $W \sim 0.2-0.3$  Дж·см<sup>-2</sup>. В этой же работе было показано, что лазерное воздействие (ЛВ) с  $W = 1.0$  Дж·см<sup>-2</sup> на кристаллический  $SiC$  вызывает интенсивное дефектообразование, генерируемое в процессе затвердевания (ресолидификации) расплавленного слоя. В настоящей работе проводится детальное исследование зависимости интенсивности дефектообразования в кристаллах  $SiC$  от энергии ЛВ, а также исследование стехиометрических нарушений при ЛВ.

Использовали образцы  $SiC$  (6H)  $n$ -типа с ориентацией поверхности (0001). ЛВ производили на воздухе моноимпульсами ( $\tau_{им} = 30$  нс) эксимерного ( $XeCl$ ) лазера ( $\lambda = 308$  нм) с энергиями  $W = 0.83, 0.96, 1.26$  и  $1.43$  Дж·см<sup>-2</sup>. Анализ проводили методом резерфордовского обратного рассеяния и каналирования

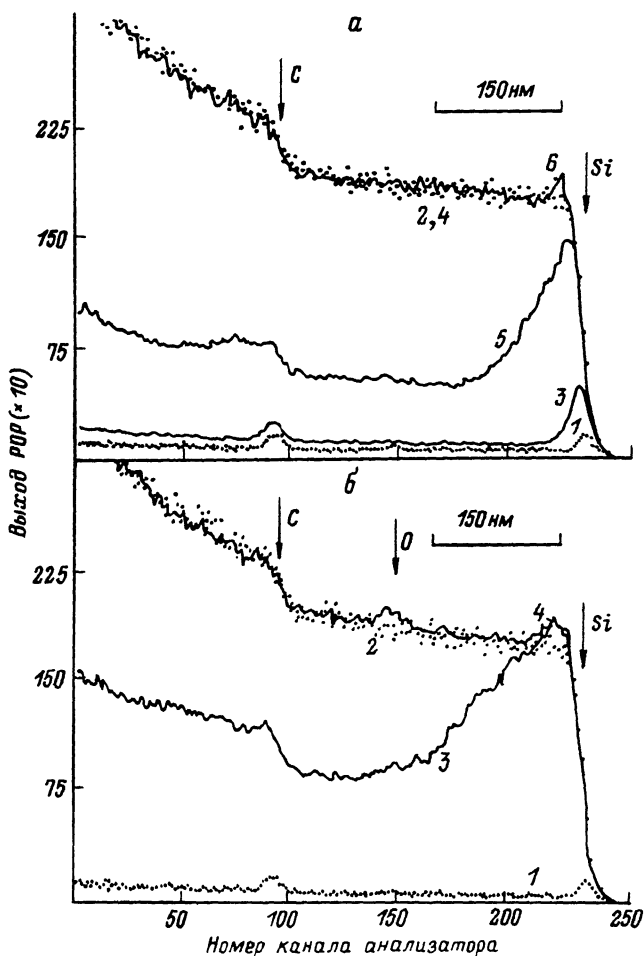


Рис. 1. а) Спектры РОР для образца  $SiC$  до (1, 2) и после ЛВ с  $W = 0.96$  (3, 4) и  $1.26$  (5, 6) Дж·см<sup>-2</sup>.

б) Спектры РОР для образца  $SiC$  до (1, 2) и после (3, 4) ЛВ с  $W = 1.43$  Дж·см<sup>-2</sup>.

Спектры с нечетными номерами измерены в режиме осевого каналирования, а с четными номерами – при неориентированном падении пучка анализирующих ионов.

каналирования ионов (РОРКИ). Использовали пучко ионов  $He^+$  с энергией 1.5 МэВ. Спектры в режиме осевого каналирования (ориентированные спектры) измеряли при падении ионного пучка вдоль оси  $\langle 0001 \rangle$ .

Как видно из анализа ориентированных спектров, изображенных на рис. 1, а, интенсивное дефектообразование происходит в  $SiC$ ,

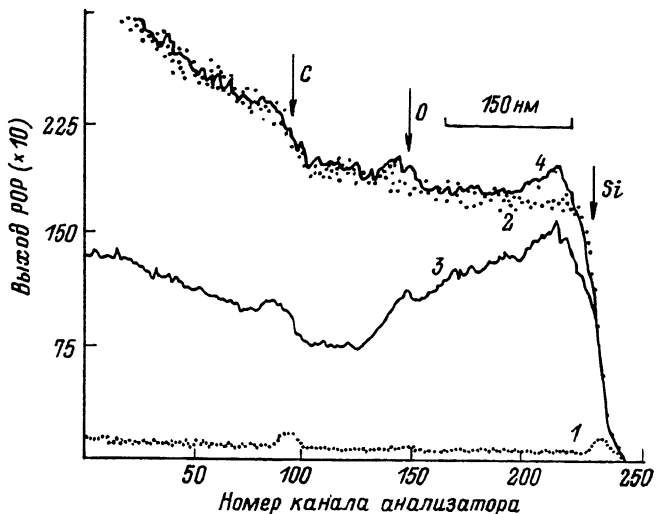


Рис. 2. Спектры PQR для образца  $SiC$  до (1, 2) и после (3, 4) ЛВ трех импульсов с  $W = 1.43$  Дж.см $^{-2}$ . Спектры 1, 3 - ориентированные, спектры 2, 4 - неориентированные.

начиная с энергии ЛВ  $W = 0.96$  Дж.см $^{-2}$  (отметим, что дефектообразование имеет пороговый характер: например, для  $W = 0.83$  Дж.см $^{-2}$  ориентированный спектр практически не отличается от соответствующего спектра для необлученного образца). Также видно, что ЛВ с  $W = 0.96$  Дж.см $^{-2}$  не вызывает существенных изменений в неориентированном спектре PQR. Увеличение  $W$  до  $1.26$  Дж.см $^{-2}$  приводит к росту интенсивности дефектообразования в приповерхностной области (см. спектр 5 на рис. 1, а). Наряду с этим наблюдается нарушение стехиометрического состава  $SiC$  в более тонком слое (сравните выходы PQR для спектров 4 и 6 на рис. 1 в области 220-234 каналов). При  $W = 1.43$  Дж.см $^{-2}$  приповерхностная область образца оказывается полностью аморфизированной (это видно из совпадения выходов PQR в 215-230 каналах для спектров 3 и 4 на рис. 1, б). Происходит увеличение толщины нестехиометричного слоя, в неориентированном спектре наблюдается вклад от рассеяния на атомах кислорода (спектр 4 на рис. 1, б). Видно, что максимум в профиле дефектов приходится на область с нарушенной стехиометрией.

На рис. 2 представлены спектры PQR, характеризующие результаты воздействия трех лазерных импульсов ( $W = 1.43$  Дж.см $^{-2}$ ) на кристалл  $SiC$ . По сравнению с ЛВ одного импульса, облучение еще двумя импульсами приводит к частичному восстановлению кристаллической структуры в приповерхностном слое (ср. спектры 3 на рис. 1, б и рас 2), в то время как в более глубоких слоях наблюдается увеличение интенсивности дефектообразования. Происходит также дальнейшее увеличение толщины нестехиометричного слоя и увеличение выхода PQR от атомов кислорода.

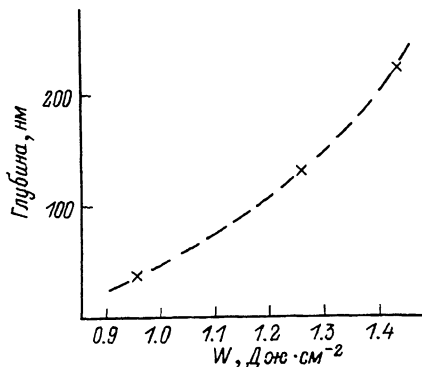


Рис. 3. Зависимость толщины дефектного слоя в *SiC* от энергии ЛВ.

На рис. 3 представлена зависимость толщин разупорядоченных областей в *SiC* от энергии ЛВ. Этот график можно интерпретировать также, как зависимость максимальной глубины проплавления в *SiC* от  $W$ . Как уже отмечалось [1], использование термической модели [2] для расчетов глубин проплавления в *SiC* сдерживается ввиду отсутствия надежных данных по термодинамическим параметрам *SiC* (параметры плавления *SiC* вообще неизвестны). Следует лишь отметить, что для качественного описания этих результатов необходимо положить значение коэффициента поглощения в кристалле  $\alpha \sim 6 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^6$  см<sup>-1</sup>. В связи с этим можно утверждать, что полученные в данной работе результаты по трехкратному воздействию лазерного импульса на *SiC* подтверждают высказанное в [1] предположение о значительно меньшей температуре и теплоте плавления аморфного *SiC* по сравнению с кристаллическим.

Наблюдаемые в данной работе эффекты имеют особенности, сходные с обнаруженными нами ранее при облучении монокристаллов *GaP* импульсами эксимерного ( $\tau_c = 20$  нс,  $\lambda = 308$  нм) лазера [3, 4]. Как и в случае *GaP*, в *SiC* после ЛВ с энергией, несколько превышающей порог плавления, происходит обогащение приповерхностного слоя летучей компонентой — кремнием (для *GaP* — фосфором).

Нестехиометричность приповерхностного слоя, наблюдаемую в *SiC* при ЛВ с  $W = 1.26$ ; 1.43 и 3 раза по 1.43 Дж·см<sup>2</sup>, можно объяснить двумя причинами: 1) поверхностный слой *SiC* может быть обеднен углеродом за счет его интенсивного испарения с поверхности; 2) тот же слой может быть обогащен кремнием благодаря сегрегации *Si* к поверхности при затвердевании расплава. Второе предположение, на наш взгляд, выглядит менее обоснованным, т.к. в неориентированных спектрах РОР (см. рис. 1, б и 2) после ЛВ не заметно дефицита *Si* в более глубоких слоях. Объяснить преимущественное испарение углерода по сравнению

с кремнием (хотя, как показано в [5, 6], при прогреве  $SiC$  в вакууме происходит графитизация поверхности) можно, если принять во внимание, что ЛВ происходило на воздухе. Известно, что графитовую пленку на поверхности  $SiC$  легко удалить прогревом образца на воздухе. Поэтому резонно предположить, что углерод на поверхности расплава  $SiC$  интенсивно реагирует с кислородом, образуя летучие соединения  $CO$  и  $CO_2$ . Вместе с тем кислород может взаимодействовать со свободным или слабо связанным кремнием с образованием окисла  $SiO_2$ , кислородная составляющая которого проявляется в спектрах 4 на рис. 1, б и 2.

Основываясь на этом предположении, с использованием программ [7] нами была проведена обработка неориентированных спектров РОР для образцов  $SiC$  после ЛВ. Для случая  $W = 1.43 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$  были получены следующие результаты: в приповерхностном слое 0–30 нм наблюдается присутствие  $Si$ ,  $C$  и  $O$  со стехиометрическим составом  $Si:C:O = 5:3:1$ , под ним находится слой толщиной 20 нм (в нем кислород отсутствует), для которого выполняется соотношение  $Si:C = 5:4$ . На глубинах, превышающих 50 нм, стехиометрический состав соответствует  $SiC$ . Таким образом, при  $W = 1.43 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$  общее количество захваченного расплавом  $SiC$  кислорода составляет  $\sim 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ .

В заключение отметим основные выводы работы.

1. Определен порог плавления кристаллического  $SiC$  при воздействии импульсов эксимерного лазера. Он составляет  $W_n = 0.9\text{--}0.95 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ .

2. Обнаружено, что при  $W > W_n$  в приповерхностном слое происходят нарушения стехиометрического состава.

3. При  $W \geq 1.4 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$  наблюдается значительное взаимодействие кислорода с расплавом  $SiC$ .

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Бурдель К.К., Ахманов А.С., Макаров В.Н., Поройков А.Ю., Суворов А.В., Чеченин Н.Г. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. В. 13. С. 1207–1211.
- [2] Wood R.F., Giles G.E. // Phys. Rev. 1981. V. B23. No 6. P. 2923–2942.
- [3] Бурдель К.К., Дитрих Т., Чеченин Н.Г. // ФХОМ. 1987. № 2. С. 25–27.
- [4] Бурдель К.К., Дитрих Т., Кашкаров П.К., Чеченин Н.Г. // Поверхность. 1988. № 6. С. 139–141.
- [5] Adachi S., Mohri M., Yamashina T. // Surface Sci. 1985. V. 161. N. 3. P. 479–490.
- [6] Jorgensen B., Morgen P. // J. Vac. Sci. Technol. 1986. V. A4. No 3. P. 1701–1704.

[7] З а т е к и н В.В. Тез докл. ХУШ Всес. сов. по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. М., 1988. С.170-171.

Поступило в Редакцию  
15 августа 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 3

12 февраля 1990 г.

05.4

© 1990

### СЛАБЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРА $c$ РЕШЕТКИ КУПРАТА БАРИЯ-ИТТРИЯ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ХИМИЧЕСКОМ ИЗВЛЕЧЕНИИ КИСЛОРОДА ВОДОРОДОМ

Ю.М. Б а й к о в, С.К. Ф и л а т о в,  
В.В. С е м и н, М.Г. Г о р с к а я,  
С.Л. Ш о х о р

В многочисленных работах экспериментально установлена зависимость физических свойств и параметров решетки соединения  $YBa_2Cu_3O_y$  от содержания кислорода  $y$ , при этом наиболее чувствительным к величине  $y$  оказывается параметр  $c$ , для которого просматривается линейная зависимость от  $y$ :  $0.020 \text{ \AA}$  при  $\Delta y = 0.1$  по [1] (рис. 1, линия А),  $0.015 \text{ \AA}$  - по [2] (линия Б),  $0.019 \text{ \AA}$  по [3] (линия В) и т.п. Однако в работе [4] было обнаружено, что параметры решетки мало меняются при изменении содержания кислорода ( $y$ ) от 7.0 до 6.45. В этой работе, также как и в работах [5, 6], был избран принципиально иной способ получения образцов с разными значениями  $y$  который можно назвать химическим, т.к. извлечение кислорода осуществляется в результате химической реакции с сильным восстановительным агентом - СО в [4] и  $H_2$  в [5, 6].

В данной работе в качестве восстановительного агента избран диводород, обработка которым, как было показано ранее [5, 6], понижает температуру интеркаляции кислорода. В результате нами экспериментально обнаружено, что удаление кислорода из  $YBa_2Cu_3O_y$  при низкой температуре под действием  $H_2$  слабо изменяет параметр  $c$  и сохраняет сверхпроводимость. Для того, чтобы понять причины и возможные последствия полученных результатов, изучалось также влияние отжига в вакууме образцов, обработанных диводородом, на их решетку и сверхпроводящие свойства.

Проведено извлечение кислорода из материала не только ромбической, как в [4], но и тетрагональной модификаций с разным исходным значением  $y$ . Для опытов брали порошок размером частиц