

РЕАЛЬНАЯ СТРУКТУРА  
КРИСТАЛЛОВ

УДК 548.526

ОБРАЗОВАНИЕ МЕТАСТАБИЛЬНОЙ ФАЗЫ Si(III) В КРЕМНИИ  
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2021 г. Э. М. Пашаев<sup>1</sup>, В. Н. Корчуганов<sup>1</sup>, И. А. Субботин<sup>1</sup>, И. А. Лихачёв<sup>1,\*</sup>, М. М. Борисов<sup>1</sup>,  
Е. И. Мареев<sup>2</sup>, Ф. В. Потёмкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

\*E-mail: [likhachev\\_ia@rckci.ru](mailto:likhachev_ia@rckci.ru)

Поступила в редакцию 29.06.2021 г.

После доработки 29.06.2021 г.

Принята к публикации 08.07.2021 г.

Методами рентгеновской диагностики исследованы кристаллы кремния, подвергнутые воздействию высокоинтенсивных фемтосекундных лазерных импульсов ближнего инфракрасного диапазона. Показано, что при воздействии мощным лазерным излучением с энергией импульса 0.79 мДж на поверхности кремния Si-I образуется поликристаллическая метастабильная фаза Si-III.

DOI: 10.31857/S0023476121060242

ВВЕДЕНИЕ

Процессы, происходящие в твердом теле под воздействием ультракороткого лазерного излучения, вызывают большой интерес в физическом материаловедении и являются важной областью физики конденсированного состояния.

Применение интенсивного лазерного излучения ультракороткой длительности для формирования определенных профилей распределения как примесей, так и базовых элементов полупроводниковой матрицы показано в [1]. Использование фемтосекундного лазерного излучения позволило модифицировать поверхность и повысить ее твердость за счет создания неравновесных условий рекристаллизации с образованием метастабильных нанокристаллических фаз [2].

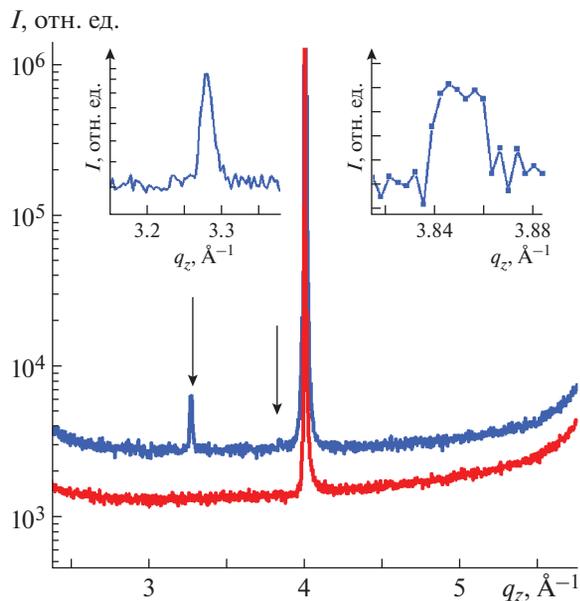
В результате воздействия высокоинтенсивного фемтосекундного лазерного излучения в веществе, в частности в кремнии, генерируются ударные волны, которые могут инициировать фазовые превращения с образованием метастабильных фаз [3]. Однако механизм их формирования до сих пор мало изучен. Как правило, такие структурные превращения наблюдались при приложении высокого давления в алмазных наковальнях [4–6], в [7] была прослежена структурная динамика фазовых переходов в кремнии. В [8] представлены результаты наблюдения фазовых превращений в результате импульсной ударной бомбардировки поверхности кристаллов кремния через медную пластину пневмоснарядами диаметром 30 мм. Отметим, что в [9] методами элек-

тронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света было показано образование в Si (пр. гр.  $Fd\bar{3}m$ ) полиморфных кристаллических структур при воздействии фемтосекундным лазерным излучением, а в [10] описаны параметры лазерного воздействия, необходимые для возникновения ряда фазовых переходов в кремнии.

Цель настоящей работы – обнаружение структурных изменений в кремнии под воздействием фемтосекундного лазерного импульса с использованием метода высокоразрешающей рентгеновской дифрактометрии.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ

Приведены результаты исследования двух образцов Si-I (111) (пр. гр.  $Fd\bar{3}m$ ), облученных ультракороткими лазерными импульсами ИК-диапазона с центральной длиной волны  $\lambda = 1240$  нм, длительностью каждого импульса  $\sim 100$  фс. Диаметр перетяжки лазерного пучка составлял  $\sim 10$  мкм. Облучение поверхности проводилось при нормальном падении излучения на кристалл. Энергия воздействующих лазерных импульсов для образца 1 составляла 790 мкДж, что с учетом фемтосекундной длительности импульса создает условия для инициирования фазовых переходов [10]. Образец 2 был облучен при использовании энергии лазерных импульсов 16 мкДж, что заведомо меньше требуемого значения энергии импульса для создания порогового значения давления.



**Рис. 1.** КДО от исследуемых образцов. Верхняя кривая соответствует образцу 1, нижняя – образцу 2. Дополнительные пики при  $q_z \approx 3.3$  и  $q_z \approx 3.85 \text{ \AA}^{-1}$  изображены на вставках.

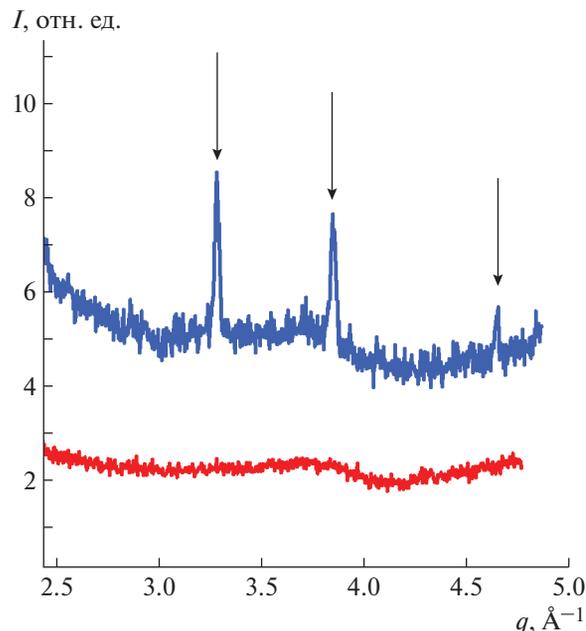
Образцы были исследованы методом высоко-разрешающей рентгеновской дифрактометрии (HRXRD) с использованием синхротронного излучения (СИ) ( $E = 12 \text{ кэВ}$ ) на станции “Фаза” Курчатовского источника синхротронного излучения “КИСИ-Курчатов” в фокусирующей моде с применением фокусирующих зеркал и изгибного монохроматора Si(111) как в режиме  $\theta$ – $2\theta$ -сканирования, так и при сканировании детектором при скользящем угле падения ( $2^\circ$ ) излучения (GIXRD).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кривые дифракционного отражения (КДО) показали хорошее кристаллическое качество необлученной части исследуемых образцов кремния и отсутствие в них дополнительных включений.

Измеренные КДО от облученной области обоих исследованных образцов в режиме  $\theta$ – $2\theta$ -сканировании в угловом диапазоне между пиками Si(111) и Si(333) представлены на рис. 1, а на рис. 2 показаны результаты сканирования детектором при скользящем угле падения СИ.

На КДО образца 1 (рис. 1) видно, что дифракционный пик при  $q_z \sim 4 \text{ \AA}^{-1}$  соответствует отражению Si-I (222). Кроме того, на КДО от образца 1 присутствуют несколько дополнительных дифракционных пиков (указаны стрелками) при  $q_z \sim 3.3$  и  $q_z \sim 3.85 \text{ \AA}^{-1}$ , отсутствующих на кривой от образца 2. Отметим, что наличие этих пиков не



**Рис. 2.** КДО в скользящем падении. Верхняя кривая соответствует образцу 1, нижняя – образцу 2. Стрелками указаны пики от метастабильных фаз кремния.

зависит от азимутального положения исследуемого образца, что в первую очередь свидетельствует об их поликристаллическом происхождении. При этом данным волновым векторам не соответствуют узлы обратной решетки Si-I, следовательно, они могут быть идентифицированы как отражения (222) и (400) поликристаллической метастабильной фазы Si-III (пр. гр.  $Ia\bar{3}$ ). По формуле Шеррера [11] можно оценить средние размеры кристаллитов фазы Si-III, приблизительно равные  $98 \pm 15 \text{ нм}$ .

Аналогичные результаты были получены при сканировании детектором в условиях скользящего падения СИ (рис. 2). На полученных кривых для образца 1 также наблюдаются дифракционные пики при  $q_z \sim 3.3$  и  $q_z \sim 3.85 \text{ \AA}^{-1}$ . При сканировании детектором удалось зафиксировать пик при  $q_z \sim 4.65 \text{ \AA}^{-1}$ , который соответствует отражению (224) той же метастабильной фазы Si-III. Его наличие не зависит от азимутального положения, что подтверждает поликристаллический характер образовавшейся фазы Si-III.

Отметим, что никаких дополнительных дифракционных пиков на КДО, а следовательно, структурных фаз, отличных от Si-I, для образца 2 не наблюдается в обеих геометриях эксперимента.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методами рентгеновской диагностики показано образование метастабильной фазы Si-III (пр. гр.  $Ia\bar{3}$ ) под действием ударных волн, возник-

кающих в Si-I при облучении фемтосекундным лазерным импульсом с энергией 790 мкДж. В то время как для образца, облученного фемтосекундным импульсом с энергией 16 мкДж, образования дополнительных фаз не наблюдалось. Вероятно, условия облучения образца 2 недостаточны для образования метастабильных фаз в кремнии.

Возможность управления фазовым составом твердого тела с помощью фемтосекундного лазерного излучения может найти широкое применение в аддитивных технологиях.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 18-02-40018, 21-32-70021).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lombardo S.F., Boninelli S., Cristiano F. et al.* // Mater. Sci. Semicond. Proc. 2017. V. 62. P. 80.  
<https://doi.org/10.1016/j.mssp.2016.10.047>
2. *Mahanty S., Gouthama* // Mater. Chem. Phys. 2016. V. 173. P. 192.  
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2016.02.001>
3. *Potemkin F.V., Mareev E.I., Podshivalov A.A. et al.* // New J. Phys. 2015. V. 17. P. 053010.  
<https://doi.org/10.1088/1367-2630/17/5/053010>
4. *Kasper J.S., Richards S.M.* // Acta Cryst. 1964. V. 17. P. 752.  
<https://doi.org/10.1107/S0365110X64001840>
5. *Hanfland M., Schwarz U., Syassen K. et al.* // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82 (6). P. 1197.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.82.1197>
6. *McMahon M.I., Nemes R.J.* // Phys. Rev. B. 1993. V. 47. P. 8337.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.47.8337>
7. *Christensen N.E., Novikov D.L., Methfessel M.* // Solid State Commun. 1999. V. 110. P. 615.  
[https://doi.org/10.1016/S0038-1098\(99\)00120-9](https://doi.org/10.1016/S0038-1098(99)00120-9)
8. *Kishimura H., Matsumoto H.* // J. Appl. Phys. 2008. V. 103. P. 023505.  
<https://doi.org/10.1063/1.2830805>
9. *Smith M.J., Lin Yu-Ting, Sher Meng-Ju et al.* // J. Appl. Phys. 2011. V. 110. P. 5.  
<https://doi.org/10.1063/1.3633528>
10. *Mareev E.I., Rumiantsev B.V., Potemkin F.V.* // JETP Lett. 2020. V. 112. P. 739–744.  
<https://doi.org/10.1134/S0021364020230095>
11. *Patterson A.* // Phys. Rev. 1939. V. 56. P. 978.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.56.978>