

# РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ КИСЛОРОДНЫХ ТРИМЕРОВ В КРЕМНИИ: ДАННЫЕ ИК-ПОГЛОЩЕНИЯ

Е. А. Толкачева, Л. И. Мурин

---

*Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, ул. П. Бровки, 19,  
220072 Минск, Беларусь, e-mail: talkachova@physics.by*

В настоящей работе мы значительно увеличили концентрацию кислородных тримеров ( $O_{3i}$ ) в кремнии, сначала обогащая кристаллы Si комплексом вакансия-три атома кислорода ( $VO_3$ ), а затем облучая быстрыми электронами. Обнаружено, что в результате взаимодействия радиационно-индуцированных собственных междоузельных атомов кремния с  $VO_3$  происходит эффективная генерация комплексов, включающих три междоузельных атома кислорода. Полученные результаты дают возможность приписать кислородному тримеру три полосы локальных колебательных мод, расположенные при 537, 723 и 1020  $cm^{-1}$ , наряду с известной полосой у 1006  $cm^{-1}$ .

**Ключевые слова:** локальные колебательные моды; кислородный тример; кремний; ИК-поглощение.

## RADIATION-INDUCED GENERATION OF THE OXYGEN TRIMER IN SILICON: INFRA-RED ABSORPTION STUDIES

E. A. Tolkacheva, L. I. Murin

---

*Scientific-Practical Material Research Centre of the National Academy of Science of Belarus,  
P. Brovki str. 19, 220072 Minsk, Belarus  
Corresponding author: E. A. Tolkacheva (talkachova@physics.by)*

In the present work, we significantly increased the concentration of the  $O_{3i}$  defect in silicon, first enriching with the vacancy-three oxygen atom complex ( $VO_3$ ), and then irradiating with fast electrons. It is found that an interaction of the radiation-induced Si self-interstitials with  $VO_3$  occurs, so resulting in the appearance of a complex incorporating three interstitial oxygen atoms. The results obtained give strong support for the assignment of three vibrational bands positioned at 537, 723 and 1020  $cm^{-1}$  alongside with the band at 1006  $cm^{-1}$  as arising from the oxygen trimer.

**Key words:** local vibrational mode; oxygen trimer; silicon; infra-red absorption.

### ВВЕДЕНИЕ

Спектроскопия локальных колебательных мод (ЛКМ) успешно применялась в исследованиях кислородосодержащих комплексов в кремнии [1-3], включая термодоноры (ТД) [1, 2] и кислородные димеры ( $O_{2i}$ ) [3]. Кислородный тример ( $O_{3i}$ ), наряду с кислородным димером, играет важную роль в процессах кластеризации кислорода [3]. С комплексом  $O_{3i}$  предположительно связана ЛКМ полоса при 1006  $cm^{-1}$  [3]. Такое предположение базировалось, главным образом, на данных ИК поглощения, полученных ранее в работе [1]. Эта полоса была обнаружена фактически во всех исходных кристаллах Si, полученных методом Чохральского (Cz-Si). Кроме того, было

найден, что ее дальнейший рост имеет место в интервале температур формирования ТД. Анализ данных [1] показал, что поведение центра, ответственного за полосу при  $1006 \text{ см}^{-1}$ , в процессе термических обработок соответствовало таковому, ожидаемому для кислородного тримера [3].

Следует ожидать, что комплекс  $O_{3i}$ , как и кислородный димер и ТД [2], должен приводить к появлению ряда ЛКМ полос. Однако, ни о каких таких полосах, кроме полосы при  $1006 \text{ см}^{-1}$ , в работах [1–3] не сообщалось. Причина состоит в том, что концентрация кислородных тримеров весьма низка как в исходных, так и в термообработанных кристаллах Cz-Si, и трудно обнаружить ЛКМ, связанные с этим дефектом. В данной работе мы использовали современные методы дефектной инженерии, чтобы повысить эффективность формирования кислородного тримера и изучить его колебательный спектр более детально.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Образцы для исследований были приготовлены из кристаллов Cz-Si n-типа Si ( $[O_i] = 1.15 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) с низким содержанием углерода ( $[C_s] = 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ). Образцы были облучены электронами с энергией 2 МэВ ( $F = 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$ ) при  $350^\circ\text{C}$ , затем подвергнуты отжигу в течение 5 минут при  $595^\circ\text{C}$  и последующему облучению при комнатной температуре дозой  $2 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ .

Спектры инфракрасного поглощения измерялись на Фурье спектрометре Bruker 113v. Спектральное разрешение составляло  $0,5 \text{ см}^{-1}$ , образцы измерялись при  $T \sim 12 \text{ K}$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В общем случае, следующие друг за другом облучение при комнатной температуре или «горячее» облучение, отжиг, а затем облучение при комнатной температуре являются очень эффективными методами дефектной инженерии. Используя последний метод нам удалось получить образцы Cz-Si с высокой интенсивностью полос, связанных с кислородным тримером. Первоначально исходный образец Cz-Si был облучен при  $350^\circ\text{C}$  электронами с энергией 2 МэВ ( $F = 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$ ) для создания  $VO_2$  в высокой концентрации. Следующим шагом был кратковременный отжиг облученных образцов в температурном диапазоне  $500\text{--}600^\circ\text{C}$ . Такая обработка привела к эффективному преобразованию  $VO_2$  в  $VO_3$  и  $VO_4$ .

На рисунке (кривая 1) показан фрагмент спектра поглощения для облученного образца, отожженного в течение 5 минут при  $595^\circ\text{C}$ . Можно видеть, что в спектре доминируют колебательные полосы, связанные с комплексами  $VO_3$  и  $VO_4$ .

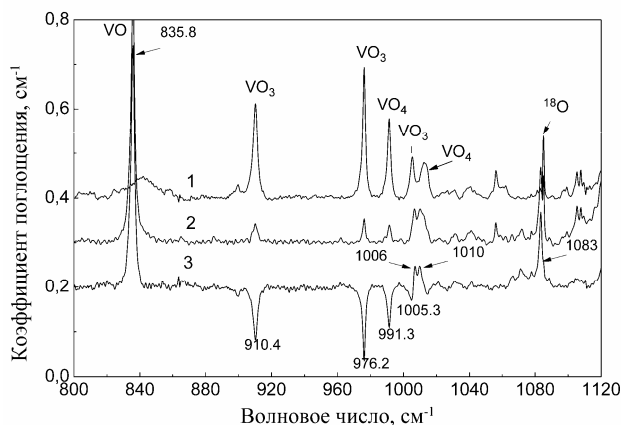
Из представленных спектров четко видно, что конечное облучение привело к эффективному формированию центров VO (полоса при  $835,8 \text{ см}^{-1}$ ), а также к сильному уменьшению в интенсивности всех полос, связанных с  $VO_3$ , и  $VO_4$ . Такое эффективное формирование A-центров можно было ожидать, так как концентрация  $O_i$  в образце все еще очень высока ( $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) после проведенных обработок, а междоузельный кислород является основной ловушкой для вакансий в Cz-Si.

С другой стороны, содержание узлового углерода было ниже предела обнаружения после облучения и отжига при  $595^\circ\text{C}$ , и эта примесь не могла быть основной ловушкой собственных междоузельных атомов кремния в изучаемом образце. Это подтверждается и отсутствием полос поглощения, связанных с дефектами C3 и C4 [4] (см. спектр 2). Очевидно, в таком случае комплексы, содержащие вакансии, могут

выступать ловушками для междоузельных атомов кремния. Сильное уменьшение интенсивности полос, обусловленных  $VO_3$  и  $VO_4$ , вне сомнения обусловлено аннигиляцией вакансий с радиационно-индуцированными междоузельными атомами Si. Известно, что после облучения при комнатной температуре образцов Cz-Si с низким содержанием углерода, обогащенных  $VO_2$ , наблюдалось увеличение концентрации кислородных димеров [5]. Однако, для образцов, обогащенных  $VO_3$  и  $VO_4$ , сразу после облучения не наблюдается формирования  $O_{3i}$  и  $O_{4i}$ . Имеет место только небольшое увеличение интенсивности полосы при  $1006\text{ см}^{-1}$ , однако появляется ряд новых полос, наиболее интенсивная из которых расположена при  $1083\text{ см}^{-1}$ . Можно предположить, что появление этих полос связано с дефектами  $O_{3i}$  и  $O_{4i}$ , находящимися в некоторых метастабильных конфигурациях, которые могут быть обозначены как  $O_{3i}^*$  и  $O_{4i}^*$  и которые формируются в процессе облучения при комнатной температуре в результате реакций:



Действительно, согласно результатам теоретического моделирования [6] комплексы, включающие три или четыре междоузельных атома кислорода, могут находиться во многих различных метастабильных конфигурациях. Только при повышенных температурах, когда кислородные атомы становятся подвижными, может происходить трансформация тримеров и тетрамеров в наиболее устойчивую конфигурацию [7].



**Рисунок – Фрагменты спектров поглощения для образца Cz-Si, облученного электронами с энергией 2 МэВ при 350 °С, отожженного в течение 5 минут при 595 °С (спектр 1) и после облучения при комнатной температуре дозой  $2 \times 10^{17}\text{ см}^{-2}$  (спектр 2). Кривая 3 – разностный спектр, полученный вычитанием спектра, измеренного после отжига при 595 °С из спектра, измеренного после последующего облучения при комнатной температуре**

Интенсивные полосы при  $537$ ,  $723$ ,  $1006$  и  $1020\text{ см}^{-1}$ , появившиеся после отжига при  $275\text{ °C}$ , должны быть приписаны самой устойчивой конфигурацией кислородного тримера. Все эти полосы наблюдались также в спектре поглощения образца, облученного при  $360\text{ °C}$  [5]. Такой спектр ЛКМ кислородного тримера хорошо согласуется с весьма схожими спектрами локальных колебательных мод кислородного димера

и ТД [2], а также с расчетными данными для высокочастотных мод кислородных тримеров [6].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Только одна ЛКМ полоса при  $1006\text{ см}^{-1}$  была ранее приписана кислородному тримеру в Si, хотя для этого комплекса можно ожидать более богатый колебательный спектр. В настоящей работе мы сумели значительно увеличить концентрацию малых кислородных кластеров в образцах, сначала обогащенных комплексом вакансия-три атома кислорода ( $\text{VO}_3$ ), а затем облученных быстрыми электронами при комнатной температуре. В результате взаимодействия радиационно-индуцированных собственных междоузельных атомов кремния с  $\text{VO}_3$  происходит эффективная генерация метастабильных комплексов, включающих три междоузельных атома кислорода. Эти комплексы ответственны за полосы ЛКМ при  $556$ ,  $1010$  и  $1083\text{ см}^{-1}$  и устойчивы до  $250^\circ\text{C}$ . При более высоких температурах, когда становится возможной переориентация междоузельных атомов кислорода, они преобразуются в устойчивую форму кислородного тримеров и ответственны за ЛКМ полосы при  $537$ ,  $723$ ,  $1006$  и  $1020\text{ см}^{-1}$ .

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Lindström, J. L. Clustering of oxygen atoms in silicon at  $450^\circ\text{C}$ : a new approach to thermal donor formation / J. L. Lindström, T. Hallberg // *Phys. Rev. Lett.* – 1994. – Vol. 72, № 17. – P.2729-2732.
2. Thermal double donors and quantum dots / J. Coutinho [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 2001. – Vol. 87, N 23. – P. 235501(1-4).
3. Murin, L. I. Thermal double donors in silicon: a new insight into the problem // in: *Early Stages of Oxygen Precipitation in Silicon* / L. I. Murin, V. P. Markevich, ed. by R. Jones, NATO ASI Series, 3. High Technology-Vol. 17, Kluwer, Dordrecht. – 1996. - P. - 329-336.
4. Evolution of radiation-induced carbon-oxygen-related defects in silicon upon annealing: LVM studies / L.I. Murin [et al.] // *Nucl. Instr. and Meth. B.* – 2006. - Vol. 253. - P. 210-213.
5. Oxygen and carbon clustering in Cz-Si during electron irradiation at elevated temperatures / J.L. Lindstrom [et al.] // *Solid State Phenomena.* - Vols. 69–70. - P.297–302.
6. Local vibrations of thermal double donors in silicon / Y. J. Lee [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 2002. - Vol. 66. – P. 075219 (1-4).
7. Local vibrational modes of the oxygen trimer in Si / L.I. Murin [et al.] // *Physica Status Solidi (c).* – 2011. – Vol. 8, № 3. – P. 709–712.

### ТРАНСФОРМАЦИЯ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕНИЯ ДИАЗОХИНОН-НОВОЛАЧНОГО ФОТОРЕЗИСТА ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ СУРЬМЫ

А. А. Харченко<sup>1</sup>, Д. И. Бринкевич<sup>1</sup>, С. А. Вабищевич<sup>2</sup>, В. С. Просолович<sup>1</sup>,  
В. Б. Оджаев<sup>1</sup>, Ю. Н. Янковский<sup>1</sup>

---

<sup>1)</sup> *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь, e-mail: prosolovich@bsu.by*

<sup>2)</sup> *Полоцкий государственный университет, ул. Блохина, 29, 211440 Новополоцк, Беларусь, e-mail: vabser@tut.by*

Методом измерения спектров отражения исследованы имплантированные ионами сурьмы пленки позитивного фоторезиста ФП9120 толщиной  $1,8\text{ мкм}$ , нанесенные на