

ЛИТЕРАТУРА

1. Емцев, В.В. Точечные дефекты в полупроводниках / В.В. Емцев, Т.В. Машовец. - Москва: Радио и связь, 1980. - 95 с.
2. Коршунов, Ф.П. Влияние примесного состава и температуры облучения на эффективность образования радиационных дефектов в кремнии / Ф.П. Коршунов [и др.] // Докл. НАН Беларуси. - 2011. - Т.55, №3. - С.101–114.
3. Коршунов, Ф.П. Особенности формирования радиационных дефектов в кристаллах кремния при повышенных температурах облучения / Ф.П. Коршунов [и др.] // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. - 2013, №3. - С.101–106.
4. Литвинко, А.Г. Электрически активные дефекты межузельного типа в облученном *n*-кремнии / А.Г. Литвинко [и др.] // ФТП. - 1980. - Т.14, №4. - С. 776–780.
5. Каструбай, И.Ф. Об эффективности образования точечных дефектов в ядерно-легированном кремнии при облучении быстрыми электронами / И.Ф. Каструбай [и др.] // Докл. АН БССР. - 1987. - Т.31, №4. - С. 306–308.
6. Asom, M.T. Interstitial defect reactions in silicon / M.T. Asom [et al.] // Appl. Phys. Lett. - 1987. - Vol. 51, №4. - P.256–258.
7. Лукьяница, В.В. Уровни вакансий и межузельных атомов в запрещенной зоне кремния // ФТП. - 2003. - Т.37, №4. - С.424–431.
8. Физические процессы в облученных полупроводниках // Под ред Смирнова Л.С.- Новосибирск: Наука, 1977. - 256 с.
9. Kuchinskii, P.V. On the mechanism of primary radiation defect annihilation in Si / P.V. Kuchinskii, V.M. Lomako // Phys. Stat. Sol (a). - 1987. - Vol.102, №2. - P.653–658.
10. Крайчинский, А.А. Эффективность образования дефектов в *n*-Si при облучении электронами с энергией 1 Мэв. / А.А. Крайчинский [и др.] // ФТП.- 1985.-Т.19.- В12.- С. 2202–2204.

ЛОКАЛЬНЫЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ МОДЫ КОМПЛЕКСОВ ДИВАКАНСИЯ – ДВА АТОМА КИСЛОРОДА И ТРИВАКАНСИЯ – ДВА АТОМА КИСЛОРОДА В КРЕМНИИ

Е. А. Толкачева, Л. И. Мурин

НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, talkachova@physics.by

Аннотация. Методом низкотемпературной ИК Фурье-спектроскопии исследованы процессы образования и отжига вакансионно-кислородных комплексов V_nO_m в облученных быстрыми электронами и нейтронами кристаллах кремния, полученных методом Чохральского. Приведен ряд аргументов, позволяющих идентифицировать полосы поглощения у $829,3\text{ см}^{-1}$ и $844,4\text{ см}^{-1}$ как обусловленные локальными колебательными модами комплексов V_2O_2 и V_3O_2 , соответственно.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее успешно применяющихся методик исследования кислородо-содержащих центров в кремнии является спектроскопия локальных колебательных мод (ЛКМ) [1, 2]. В то же время имеющиеся в литературе данные о ЛКМ сложных вакансионно-кислородных комплексов V_nO_m ($n \geq 2$, $m \geq 2$), в том числе и комплексов V_2O_2 и V_3O_2 , весьма ограничены и во многом противоречивы.

Ранее авторы [3] ошибочно приписали комплексу V_2O_2 полосу ИК поглощения у 1000 см^{-1} , а комплексу V_3O_2 – две полосы, расположенные у 904 и 968 см^{-1} (измерения при комнатной температуре). Позднее было показано, что эти три полосы обу-

словлены колебаниями атомов кислорода в комплексе VO_3 (см. [1, 2] и ссылки там). Авторы [4] приписали комплексам V_2O_2 и V_3O_2 полосы ИК поглощения у 824 и 833 см^{-1} , соответственно (измерения при комнатной температуре). В настоящей работе мы приводим ряд новых данных, позволяющих достаточно надежно идентифицировать колебательные полосы у 829,3 см^{-1} и 844,2 см^{-1} (измерения при $T \leq 20$ К), как обусловленные колебаниями атомов кислорода в составе комплексов V_2O_2 и V_3O_2 , соответственно.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовались кристаллы кремния *n*-типа ($[P] = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$), полученные методом Чохральского (Cz-Si). Концентрации междоузельного кислорода и углерода замещения определялись по результатам измерений интенсивности хорошо известных полос поглощения при 1107 см^{-1} и 605 см^{-1} с использованием калибровочных коэффициентов 3,14 $\cdot 10^{17}$ и 0,94 $\cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ для кислорода и углерода, соответственно [1].

Облучение быстрыми электронами и нейтронами проводилось при комнатной температуре дозами 3 $\cdot 10^{17}$ и 7,5 $\cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, соответственно. Образцы были подвергнуты изохронному отжигу в течение 30 минут в диапазоне 75–450 °С с шагом 25 °С. Спектры ИК поглощения измерялись на Фурье спектрометре Bruker IFS 113v. Спектральное разрешение составляло 0,5 или 1,0 см^{-1} , и образцы измерялись при $T = 10$ –20 К и при комнатной температуре. Форма полос поглощения была проанализирована, используя подгонку с учетом влияния изотопов кремния ^{29}Si и ^{30}Si [5].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 показано развитие спектров поглощения, измеренных при низкой температуре для образцов Cz-Si ($[\text{O}_i] = 8,3 \cdot 10^{17}$, $[\text{C}_s] = 7 \cdot 10^{16}$, $[P] = 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$), облученных быстрыми электронами (рис. 1 а) и нейтронами (рис. 1 б) при комнатной температуре, в процессе изохронного отжига в интервале температур 300–400 °С. Анализ спектров, представленных на рисунке 1 а, с учетом результатов их подгонки лоренцианами [5] показал, что в интервале температур 300–400 °С имеет место отжиг комплексов VO (полоса у 835,8 см^{-1}), V_2O (полоса у 833,4 см^{-1}) и V_3O (полоса у 842,4 см^{-1}) [6]. Наблюдается также формирование и последующий отжиг ряда новых, но уже менее интенсивных полос, обусловленных, вероятнее всего, комплексами V_nO_m ($n, m \geq 2$).

Основные из этих полос расположены у 829,3 см^{-1} и у 844,2 см^{-1} . Амплитуда полосы у 829,3 см^{-1} достигает своего максимума после отжига при 350 °С и начинает затем снижаться с ростом температуры отжига (рис. 2). Эти результаты хорошо согласуются с данными, полученными ранее методом ЭПР для комплексов V_2O_2 [7] (см. также работу [8]). В то же время максимум амплитуды полосы у 844,2 см^{-1} и ее последующее снижение имеют место после отжига при 375 °С. Кроме того, мы обнаружили, что отношение интенсивностей этих полос у 829,3 см^{-1} и у 844,2 см^{-1} различно в образцах, облученных быстрыми электронами и нейтронами, т. е. зависит от вида облучения (энергии и массы частиц). Полоса 844,2 см^{-1} является намного более интенсивной в случае нейтронного облучения. Это свидетельствует о том, что она возникает из более сложного дефекта, чем полоса 829,3 см^{-1} . Наиболее вероятный кандидат – дефект V_3O_2 . Формирование данной полосы имеет место в процессе отжига комплекса V_3O , относительная эффективность образования которых выше в кристаллах, облученных быстрыми нейтронами [6].

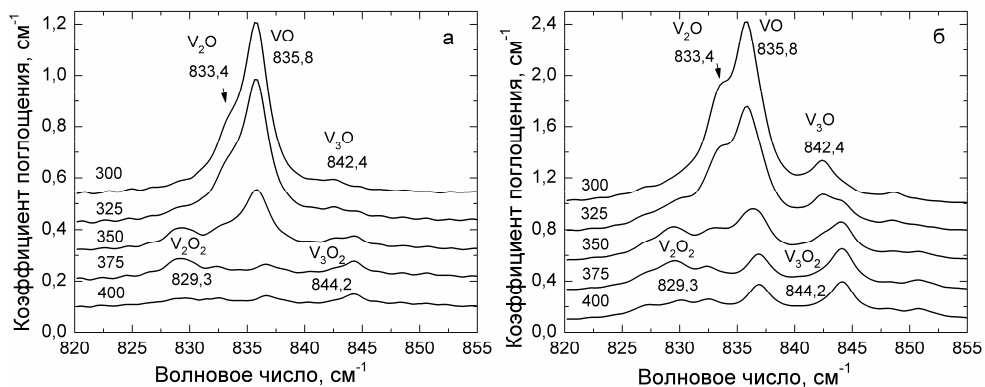
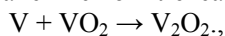


Рисунок 1. – Развитие спектров поглощения, измеренных при низкой температуре для образцов Cz-Si, облученных при комнатной температуре, в процессе изохронного отжига в интервале температур 300–400 °C: а) быстрыми электронами ($E = 10$ МэВ, $F = 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$); б) нейтронами ($F = 7/5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$)

Одним из основных механизмов формирования V_2O_2 , вероятнее всего, является взаимодействие одиночных вакансий с комплексами VO_2 [8]:



(1)

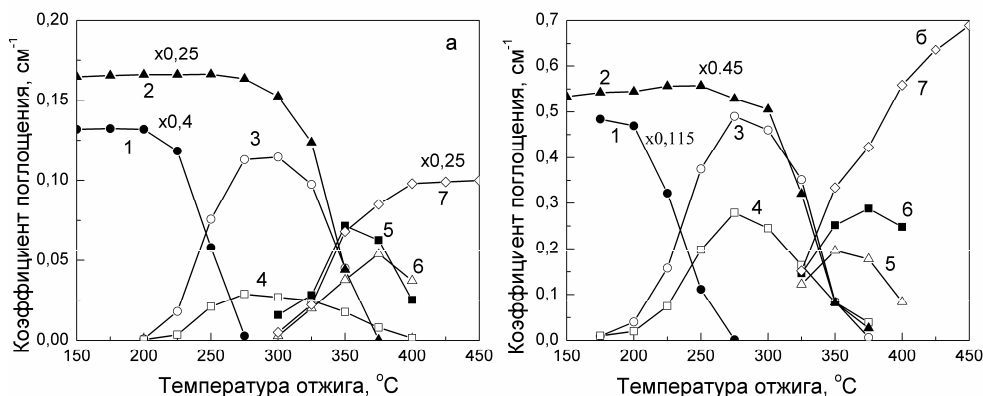
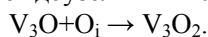


Рисунок 2. – Зависимости амплитуд полос поглощения от температуры изохронного отжига для образцов Cz-Si, спектры которых показаны на рис. 1. Положение полос поглощения в см^{-1} и идентификация соответствующих дефектов: 1 – 2767 (V_2); 2 – 835,8 (VO); 3 – 833,4 (V_2O); 4 – 842,4 (V_3O); 5 – 829,3 (V_2O_2); 6 – 844,2 (V_3O_2); 7 – 895,5 (VO_2)

В области температур ~ 350 °C при отжиге облученных кристаллов Cz-Si вакансии могут появляться в результате диссоциации как комплексов V_2O , так и VO (при отжиге А-центров имеет место их многократная диссоциация и повторное формирование).

Наиболее вероятным механизмом образования V_3O_2 является взаимодействие подвижных комплексов V_3O с междоузельными атомами кислорода O_i :



(2)

Об этом свидетельствует более высокая интенсивность полосы у $844,2\text{ см}^{-1}$ по отношению к интенсивности полосы у $842,4\text{ см}^{-1}$. По-видимому, в образцах, облученных быстрыми электронами, имеет место практически полная трансформация V_3O в V_3O_2 .

ЛИТЕРАТУРА

1. Defect engineering in Czochralski silicon by electron irradiation at different temperatures / J.L. Lindström [et al.] / Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B. – 2002. – Vol. 186. – P. 121–125.
2. Pajot, B. Optical absorption of impurities and defects in semiconducting crystal: Electronic absorption of deep centres and vibrational spectra / B. Pajot, B. Clerjaud. — Berlin Heidelberg: Springer, 2013. – 463 p.
3. Lee, Y.-H. Oxygen-vibrational bands in irradiated silicon / Y.-H. Lee, G.C. Corelli, J.W. Corbett // Physics Letters. – 1977. – Vol. 60A, № 2. – P. 55–57.
4. Londos, C.A. IR studies of oxygen-vacancy related defects in irradiated silicon / C.A. Londos, L.G. Fytros. and G.J. Georgiou // Defect and Diffusion Forum – 1999 - Vols. 171-172. – P. 1–32.
5. Толкачева, Е.А. Влияние изотопного состава природного кремния на локальные колебательные моды вакансионно-кислородных комплексов / Е.А. Толкачева, Л.И. Мурин // ЖПС. - 2013. - Т. 80, № 4. - С. 582–586.
6. Толкачева Е.А. Исследование вакансионно-кислородных комплексов в облученных быстрыми электронами и нейтронами кристаллах кремния методом ИК поглощения / Е.А. Толкачева, Л.И. Мурин // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2014. - № 2. - С. 101–104.
7. Lee, Y.-H. EPR studies of defects in electron-irradiated silicon: A triplet state of vacancy-oxygen complexes / Y.-H. Lee, J.W. Corbett // Phys. Rev. B. - 1976. - Vol. 13, № 6. - P. 2653–2666.
8. Толкачева, Е.А. Локальные колебательные моды комплекса дивакансия-два атома кислорода в кремнии / Е.А. Толкачева, Л.И. Мурин, Ф.П. Коршунов // Доклады НАН Беларуси. – 2016. – Т. 60, № 3. – С.51–56.

ДИФФУЗИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КИСЛОРОДНЫХ ДИМЕРОВ И КОМПЛЕКСОВ ВАКАНСИЯ – ДВА АТОМА КИСЛОРОДА В КРЕМНИИ: ДАННЫЕ ИК ПОГЛОЩЕНИЯ

Л. И. Мурин¹, Е. А. Толкачева¹, В. П. Маркевич²

¹НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, murin@ifftp.bas-net.by

²Университет г. Манчестер, Англия

Аннотация. Методом ИК поглощения исследована кинетика отжига (трансформации) кислородных димеров (O_{2i}) и комплексов вакансии – кислородный димер (VO_2) в кристаллах кремния, обогащенных данными центрами путем предварительного облучения быстрыми электронами при повышенных температурах ($300\text{--}400^\circ\text{C}$). На основе анализа экспериментальных данных определены коэффициенты диффузии O_{2i} и VO_2 и показано, что миграционная способность данных комплексов в области температур $300\text{--}500^\circ\text{C}$ значительно превосходит таковую для междоузельных атомов кислорода.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время хорошо известно (смотри, например, работы [1–5] и ссылки там), что кислородные димеры (O_{2i}) играют важную роль в процессах как термического, так и радиационного дефектообразования в кристаллах кремния, полученных