БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Коршунов, Ф.П. Радиационная технология изготовления мощных полупроводниковых приборов / Ф.П. Коршунов, Ю.В. Богатырев // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.- тех. наук. - 2008. - № 4. - С.106 – 114.
2. Defect engineering in Czochralski silicon by electron irradiation at different temperatures / J.L. Lindstrom [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. - 2002. – V.186. - P. 1012 - 1014.
3. DLTS studies of high-temperature electron irradiated Cz n-Si /V. Neimash [et al.] // Phys. Status Solidi A. - 2004. –V. 201, № 3. - P. 509 - 516.
4. Formation of radiation-induced defects in Si crystals irradiated with electrons at elevated temperatures / V.P. Markevich [et al.] // Solid State Phenomena. - 2010. – V. 156-158. - P. 299 – 304.
5. Влияние примесного состава и температуры облучения на эффективность образования радиационных дефектов в кремнии / Ф.П. Коршунов [и др.] // Доклады НАН Беларуси. - 2011. – Т. 55, № 3. - С. 110 – 114.
6. Djerassi, H. Effect of ^{60}Co γ- rays on high-resistivity p-type Si / H. Djerassi. J. Merlo-Flores, J. Messier // J. Appl, Phys. – 1966. - V. 37, № 12. – P. 4510–4516.
7. Radiation-induced interstitial carbon atom in silicon: Effect of charge state on annealing characteristics / S.B. Lastovskii [et al.] // Phys. Status Solidi A. – 2017. – V. 214, №. 7. – P. 1700262 (1–6).
8. Donor levels of the divacancy-oxygen defect in silicon / V.P. Markevich [et al.] // J. Appl. Phys. – 2014. – V. 115, N 1. - P. 012004 (1–6).
9. Особенности формирования радиационных дефектов в кремнии при повышенных температурах облучения // Коршунов Ф.П.[и др.] // Изв. НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2013. – № 3. - С. 101–106.

ИНЖЕНЕРИЯ КИСЛОРОДОСОДЕРЖАЩИХ ЦЕНТРОВ В КРЕМНИИ: РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ТРАНСФОРМАЦИИ ВАКАНСИОННО-КИСЛОРОДНЫХ КОМПЛЕКСОВ VO_2, V_2O_2 И V_3O_2

Л. И. Мурин[1], Е. А. Толкачева[1], С. Б. Ластовский[1], В. П. Маркевич[2]

[1)] ГО«НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», П. Бровки 19, 220072 Минск, Беларусь,
e-mail: murin@ifttp.bas-net.by
[2)] The University of Manchester, Manchester M60 1QD, United Kingdom,
e-mail: v.markevich@manchester.ac.uk

Двухступенчатое электронное облучение использовано для инженерии кислородосодержащих дефектов в кремнии, полученном методом Чохральского (Cz-Si). Сначала образцы Cz-Si облучали при комнатной температуре электронами с энергией 2,5 МэВ и подвергали термообработке при 320 °C в течение 30 часов для отжига центров VO, V_2O и V_3O и генерации комплексов VO_2, V_2O_2 и V_3O_2 в качестве доминирующих вакансионно-кислородных центров. Затем образцы снова облучали при комнатной температуре. Эволюция дефектов в результате обработок контролировалась методом спектроскопии локальных колебательных мод (ЛКМ). Спектры ИК поглощения измерялись на Фурье спектрометре при 20 K и 300 K. Из анализа изменений интенсивности ЛКМ линий обнаружено, что второе облучение приводит к заметному уменьшению концентраций комплексов VO_2, V_2O_2 и V_3O_3 и к существенному росту концентраций кислородного димера и дефекта VO_2*.

Ключевые слова: кремний; облучение; вакансионно-кислородные дефекты; собственные междоузельные атомы; локальные колебательные моды.

INGENEERING OF OXYGEN-RELATED CENTRES IN SILICON: RADIATION-INDUCED TRANSFORMATIONS OF VACANCY-OXYGEN COMPLEXES VO_2, V_2O_2 AND V_3O_2

L. I. Murin[1], E. A. Tolkacheva[1], S. B. Lastovskii[1], V. P. Markevich[2]

[1)] Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus,
P. Brovki str. 19, 220072 Minsk,
[2)] The University of Manchester, Manchester M60 1QD, United Kingdom
Corresponding author: L. I. Murin (murin@ifttp.bas-net.by)

Two stage electron irradiation has been used for oxygen-related defect engineering in Czochralski-grown silicon (Cz-Si). First, the Cz-Si samples were irradiated at room temperature with 2.5 MeV electrons and then heat-treated at 320 ºC for 30 hours to anneal out the VO, V_2O and V_3O centers and generate the VO_2, V_2O_2 and V_3O_2 complexes as dominant vacancy-oxygen related defects. Subsequently, the samples were irradiated at room temperature again. Defect evolution upon the treatments was monitored by means of the local vibrational mode (LVM) spectroscopy. The FT-IR spectra were recorded with the samples being at 20 K and 300 K. From an analysis of changes in intensity of the LVM lines it has been revealed that the second irradiation results in a noticeable decrease in the concentrations of VO_2, V_2O_2 and V_3O_2 complexes and an essential growth in the concentrations of oxygen dimer and the so-called VO_2* defect.

Key words: silicon; irradiation; vacancy-oxygen defects; self-interstitials; local vibrational modes.

ВВЕДЕНИЕ

Базовым материалом современной микроэлектроники и фотовольтаики попрежнему остается кремний. Наиболее важной технологической примесью в кремнии, помимо основных легирующих, является кислород. Он присутствует в высоких концентрациях как в исходных кристаллах Si, полученных методом Чохральского (Cz-Si), так и эффективно вводится на высокотемпературных технологических операциях. В процессах радиационного дефектообразования в Si кислород является одной из наиболее эффективных ловушек для подвижных моновакансий, дивакансий и тривакансий [1, 2]. Комплекс вакансия-кислород (VO), называемый также *A*-центром, был первым радиационным дефектом, идентифицированным в облученных кристаллах Si. Дефект вносит в запрещенную зону акцепторный уровень у $E_C - 0.17$ эВ и может наблюдаться в спектрах ИК поглощения как в нейтральном, так и в отрицательно заряженном состояниях (полосы поглощения у 836 см$^{-1}$ и 885 см$^{-1}$, соответственно. Отжигается *A*-центр в области температур 300–400 °C. При этом одновременно могут иметь место два процесса: диссоциация комплекса и его миграция как целого на стоки. В кристаллах Cz-Si такими стоками преимущественно являются междоузельные атомы кислорода (O_i), и в результате взаимодействия VO с O_i формируется новый комплекс вакансия – два атома кислорода (VO_2), которому соответствует полоса поглощения у 895 см$^{-1}$.

Согласно структурной модели VO_2 в данном комплексе два атома кислорода насыщают все четыре оборванные связи вакансии. Длительное время считалось, что данный дефект не проявляет электрической активности. Только сравнительно недав-

но [3] было обнаружено, что в действительности комплекс VO_2 является бистабильным и существует другая, метастабильная, конфигурация этого центра – VO_2*, в которой один атом кислорода находится в вакансии, а второй атом занимает междоузельное положение на центре ближайшей Si–Si связи. Полная энергия дефекта для такой конфигурации на 0.25 эВ превышает энергию основного состояния комплекса VO_2 и при высоких температурах заметная часть комплексов может находиться в состоянии VO_2*. В отличие от основного электрически неактивного состояния комплекс VO_2* является акцептором с уровнем, расположенным у E_C – 0,05 эВ. Полосы поглощения у 928 и 1004 см$^{-1}$ соответствуют нейтральному состоянию дефекта, а полосы у 967 и 1023 см$^{-1}$ – отрицательно заряженному состоянию. Во всех предыдущих работах (см. [3] и ссылки там) формирование комплексов VO_2 и, соответственно, комплексов VO_2* наблюдалось либо при отжиге в области температур 300–400 °C кристаллов Cz-Si, облученных при комнатной температуре, либо при так называемом горячем (~350 °C) облучении. В настоящей работе сообщается о формирование комплексов VO_2* в области комнатных температур в результате облучения образцов, содержащих V_2O_2 и V_3O_2 центры.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследовались промышленные кристаллы Cz-Si n-типа (легирующая примесь – фосфор) с удельным сопротивлением ~20 Ом·см. Образцы облучались быстрыми электронами (E = 2.5 МэВ) при комнатной температуре. Отжиги облученных образцов проводились в печи на воздухе. Спектры ИК поглощения измерялись на Фурье спектрометре Bruker IFS 113v при комнатной температуре и при $T \leq 20$ К. Спектральное разрешение составляло 0.5–1.0 см$^{-1}$. Форма полос была проанализирована, используя подгонку с учетом влияния изотопов кремния ^{29}Si и ^{30}Si [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 (спектр 1) приведен фрагмент низкотемпературного спектра поглощения для образца Cz-Si, отожженного при 320 °C в течение 30 часов после облучения быстрыми электронами при комнатной температуре. Основными дефектами в данном кристалле после отжига являются вакансионно-кислородные комплексы VO_2, V_2O_2 и V_3O_2. Об этом свидетельствует высокая интенсивность полос, расположенных у 895.5 см$^{-1}$ (VO_2), 829.3 см$^{-1}$ (V_2O_2) и 844.2 см$^{-1}$ (V_3O_2) [1, 5]. После повторного облучения быстрыми электронами при комнатной температуре интенсивность всех вышеуказанных полос падает (спектр 2). При этом наблюдается возрастание интенсивности полос, расположенных у 835.8 см$^{-1}$ (комплексы VO), 928.4 см$^{-1}$ и 1003.8 см$^{-1}$ (комплексы VO_2*), а также полос, обусловленных кислородными димерами. Наиболее вероятно, что возрастание концентрации комплексов VO_2* и O_{2i} обусловлено взаимодействием генерируемых облучением собственных междоузельных атомов кремния I с вакансионно-кислородными комплексами VO_2, V_2O_2 и V_3O_2 в результате протекания реакций VO_2+I→O_{2i}, V_3O_2+I→V_2O_2, V_2O_2+I→VO_2*.

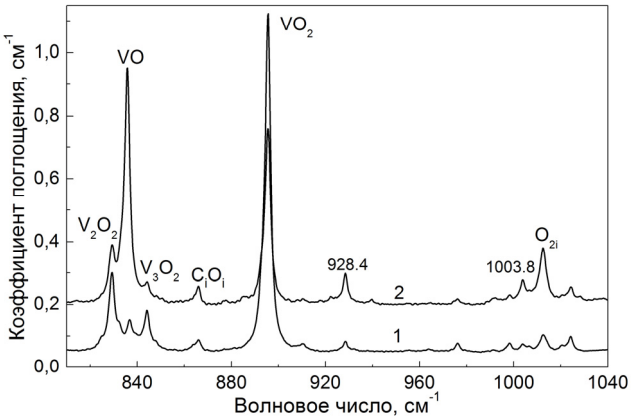

Рисунок 1. – Фрагменты спектров поглощения, измеренные при 20 K, для образца Cz-Si ($[O_i] = 1\times10^{18}$, $[C_s] = 5\times10^{16}$, $[P] = 1\times10^{14}$ см$^{-3}$). 1 - отожженного при 320 °C в течение 30 часов после облучения при комнатной температуре электронами (E = 2,5 МэВ, $F = 1{,}3\times10^{18}$ см$^{-2}$), 2 – повторно облученного дозой $3{,}5\times10^{17}$ см$^{-2}$

На рисунках 2 и 3 представлены результаты более детального анализа спектров поглощения, измеренных при 20 K (см. рис. 1), в интервале волновых чисел 810–855 см$^{-1}$. Для наглядности, только подгоночные кривые, соответствующие структуре ^{28}Si–^{16}O–^{28}S, показаны на рисунках 2 и 3, однако суммарные кривые подгонки учитывают все вклады.

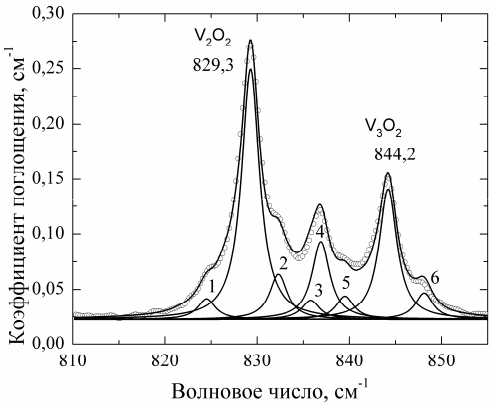

Рисунок 2. – Фрагмент спектра поглощения 1. Положение полос в см$^{-1}$: 1 – 824.5, 2 – 832.3, 3 – 835.8, 4 – 836.9, 5 – 839.5, 6 – 848.1

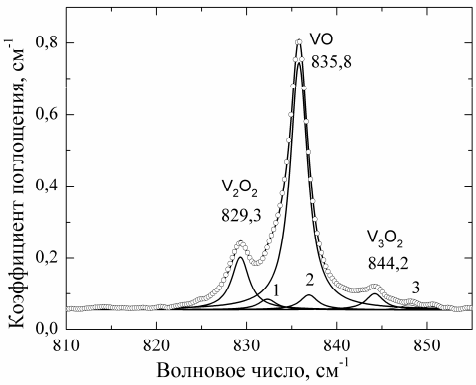

Рисунок 3. – Фрагмент спектра поглощения 2. Положение полос в см$^{-1}$: 1 – 832.3, 2 – 836.9, 3 - 848. Сплошные линии - подгонка с использованием функции Лоренца

На основе представленных данных были определены амплитуды основных полос, наблюдавшихся в спектрах поглощения. Ниже приведено изменение (Δ) интенсивности данных полос в см$^{-1}$ для образца Cz-Si в результате повторного облучения дозой

3.5×10^{17} см$^{-2}$: 835,8 (VO) – Δ = +0.67; 829,3 (V_2O_2) – Δ = -0.08;
844,2 (V_3O_2) – Δ = -0.07; 895,5 (VO_2) – Δ = -0,5; 928,4 (VO_2*) – Δ = +0.05;
1012,4 (O_{2i}) – Δ = +0.12.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы процессы дефектообразования при облучении быстрыми электронами кристаллов Si, содержащих вакансионно-кислородные комплексы VO_2, V_2O_2 и V_3O_2. Обнаружено возрастание концентраций комплекса VO_2, находящегося в метастабильной конфигурации VO_2*, и кислородного димера в результате взаимодействия генерируемых облучением собственных междоузельных атомов кремния I с комплексами VO_2, V_2O_2 и V_3O_2. Полученные результаты о радиационно-индуцированном формировании комплексов VO_2* являются важными и с точки зрения дополнительного подтверждения идентификации полос у 829,3 см$^{-1}$ и 844,2 см$^{-1}$ как обусловленных комплексами V_2O_2 и V_3O_2, соответственно.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке БРФФИ (проект Ф17МС-022).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Defect engineering in Czochralski silicon by electron irradiation at different temperatures / J.L. Lindstrom [et al.] // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B. - 2002. – V.186. - P. 1012–1014.
2. Trivacancy and trivacancy-oxygen complexes in silicon / V.P. Markevich [et al.] // Phys. Rev. B. – 2009. – Vol. 80, № 23. – P. 235207 (1-7).
3. Бистабильность и электрическая активность комплекса вакансия - два атома кислорода в кремнии / Л.И Мурин [и др.] // ФТП. – 2006 - Т. 40, вып. 11. - С. 1316–1320.
4. 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. 586–590.
5. Толкачева, Е.А. Оптические свойства и механизм образования вакансионно-кислородных комплексов V_2O_2 и V_3O_2 в облученных кристаллах кремния / Е.А. Толкачева, В.П. Маркевич, Л.И. Мурин // ФТП. – 2018. – Т. 52, вып. 9. – С. 973–979.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ЗАРЯДА В ОБЛУЧЕННЫХ МОП/КНИ ТРАНЗИСТОРАХ

Д. А. Огородников, Ю. В. Богатырев, С. Б. Ластовский

НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларус,
e-mail: ogorodnikov@ifttp.bas-net.by

Проведен расчет накопления поверхностного заряда на границе раздела кремний - скрытый окисел в *n*-канальных МОП/КНИ-транзисторах в зависимости от их геометрических параметров и электрических режимов облучения. Показано, что наиболее «жёстким» является режим, при котором во время облучения на сток и исток подаётся напряжение +5 В, а на подложку, затвор и запитку канала – 0 В. При этом величину накопленного заряда удается существенно снизить, прикладывая к подложке отрицательное смещение и уменьшая толщину слоя захороненного окисла.