## СПЕКТРОСКОПИЯ DLTS СТРУКТУР Al/SiO<sub>2</sub>/*n*-Si, ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

 Н.И. Горбачук<sup>1)</sup>, Н.А. Поклонский<sup>1)</sup>, Е.А. Ермакова<sup>1)</sup>, С.В. Шпаковский<sup>2)</sup>
<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь gorbachuk@bsu.by, poklonski@bsu.by, ermakova.7003@gmail.com
<sup>2)</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», ул. Казинца 121А, Минск 220108, Беларусь, shpaks@tut.by

Исследовались структуры Al/SiO<sub>2</sub>/*n*-Si, облученные ионами гелия. Кинетическая энергия иона 5 МэВ. Флюенс облучения варьировался от  $10^{10}$  до  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Измерялись вольт-фарадные характеристики, регистрировались спектры DLTS. Показана возможность регистрации методом спектроскопии DLTS поверхностных состояний на границе раздела SiO<sub>2</sub>/*n*-Si. Установлено, что варьирование электрического напряжения заполнения ловушек позволяет выделить спектры DLTS радиационных дефектов. Облучение ионами гелия приводит как к генерации дивакансий и комплексов вакансия-кислород и вакансия-фосфор, так и к увеличению концентрации дефектов на границе раздела кремний/диоксид кремния. Помимо дивакансий, комплексов вакансия-кислород и вакансия, комплексов вакансия DLTS структур, облученных ионами гелия флюенсами  $10^{11}$  и  $10^{12}$  см<sup>-2</sup> присутствует центр с энергией ионизации  $E_c - 0.30 \pm 0.04$  эВ.

Ключевые слова: МОП-структуры; кремний; радиационные дефекты; DLTS.

# DEEP-LEVEL TRANSIENT SPECTROSCOPY OF Al/SiO<sub>2</sub>/n-Si STRUCTURES IRRADIATED WITH HELIUM IONS

N.I. Gorbachuk<sup>1)</sup>, N.A. Poklonski<sup>1)</sup>, K.A. Yermakova<sup>1)</sup>, S.V. Shpakovski<sup>2)</sup> <sup>1)</sup>Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus, gorbachuk@bsu.by, poklonski@bsu.by, ermakova.7003@gmail.com <sup>2)</sup>JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company, 121A Kazintsa Str., 220108 Minsk, Belarus, sshpakovskiy@integral.by

Al/SiO<sub>2</sub>/n-Si structures irradiated with helium ions were studied. The Al/SiO<sub>2</sub>/n-Si structures were fabricated on (100) wafers of single-crystal *n*-type silicon grown by the Czochralski method. The resistivity of the wafers was 4.5 Ohm cm. A layer of silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>) with a thickness of 420 nm was formed by thermal oxidation. On the planar side, the area of aluminum plating with a thickness of 0.7 µm was 1.85×1.85 mm<sup>2</sup>. From the Al/SiO<sub>2</sub> side, the structures were irradiated with helium ions. The kinetic energy of the ion was 5 MeV. The average projective range calculated using SRIM program was  $\approx 24 \ \mu m$ . The irradiation fluence varied from  $10^{10}$  to  $10^{12} \ cm^{-2}$ . Capacitancevoltage characteristics were measured, and DLTS spectra were recorded. The DLTS spectra were recorded using CE-7C capacitance spectrometer in the temperature range of 80–300 K. The voltage value of the filling pulse  $U_p$  was varied in the range from -0.5 to -10 V. The voltage value of the emission pulse  $U_e$  was varied in the range from -5to -15 V. The duration of the filling pulse was  $t_p = 0.75$  ms, emission pulse —  $t_e = 20$  ms. The possibility of registering surface states at the SiO<sub>2</sub>/n-Si interface by DLTS spectroscopy is shown. It is found that varying the filling voltage makes it possible to isolate the DLTS spectra of irradiation-induced defects. Irradiation with helium ions leads both to the generation of divacancies and vacancy-oxygen and vacancy-phosphorus complexes and to the increase in the concentration of defects at the silicon/dioxide interface. In addition to divacancies and vacancy-oxygen and vacancyphosphorus complexes, the DLTS spectra of structures irradiated with helium ions with fluences of 10<sup>11</sup> and 10<sup>12</sup> cm<sup>-2</sup> contain a center with an ionization energy of  $E_{\rm c} - 0.30 \pm 0.04$  eV.

Keywords: MOS structures; silicon; irradiation-induced defects; DLTS.

## Введение

Воздействие ионизирующего излучения и тяжелых заряженных частиц приводит к

деградации характеристик полупроводниковых приборов и к их катастрофическим отказам. Облучение структур металл-ок-

<sup>15-</sup>я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 26-29 сентября 2023 г., Минск, Беларусь 15th International Conference "Interaction of Radiation with Solids", September 26-29, 2023, Minsk, Belarus

сид-полупроводник (МОП) вызывает образование точечных дефектов и их комплексов в глубине кремния и увеличивает плотность поверхностных состояний [1]. МОПструктуры являются базовыми для современной микроэлектроники [2]. Исследование радиационных повреждений в них необходимо для разработки технологических и технических решений, направленных на повышение радиационной стойкости. Цель работы — методом спектроскопии DLTS изучить радиационные дефекты в структурах Al/SiO<sub>2</sub>/*n*-Si, облученных ионами гелия.

#### Методика эксперимента

Структуры Al/SiO<sub>2</sub>/n-Si изготавливались на пластинах (100) монокристаллического кремния. Удельное сопротивление – 4.5 Ом·см. Слой диоксида кремния толщиной 420 нм формировался термическим окислением в сухом кислороде. Площадь алюминиевой металлизации (толщиной 0.7 мкм) поверх SiO<sub>2</sub> составляла 1.85×1.85 мм<sup>2</sup>. Со стороны Al/SiO<sub>2</sub> структуры облучались ионами гелия. Энергия ионов — 5 МэВ. Средний проективный пробег ≈24 мкм. Флюенс облучения варьировался от  $10^{10}$  до  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Спектры DLTS регистрировались с помощью емкостного спектрометра СЕ-7С в диапазоне температур 80-300 К. Значение напряжений при импульсах заполнения и эмиссии варьировалось в интервале от -0.5 B, до -15 В. Длительность импульса заполнения составляла  $t_p = 0.75$  мс, эмиссии —  $t_e =$ 20 мс. Нормированный спектр DLTS рассчитывался согласно формуле:

$$S = [\Delta C(t_2) - \Delta C(t_1)]/C_0, \qquad (1)$$

где  $\Delta C(t)$  — изменение нестационарного значения барьерной емкости, регистрируемое в течение импульса эмиссии;  $t_1 < t_2 < t_e$ — некоторые моменты времени;  $C_0$  — стационарное значение высокочастотной емкости при текущей температуре. Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) регистрировались при комнатной температуре и тем-



Рис. 1. ВФХ в координатах  $1/C^2$ , зарегистрированные при комнатной температуре (*a*) и температуре жид-кого азота ( $\delta$ )

пературе жидкого азота в интервале от -15 до -0.5 B, с шагом 0.1 B.

## Результаты эксперимента

На рис. 1 в координатах  $1/C^2$  представлены вольт-фарадные характеристики облученных структур. Видно, что при температуре жидкого азота (рис. 1а) МОПструктуры «не выходят» в режим инверсии. При комнатной температуре режим инверсии для указанного диапазона U наблюдается только в структурах, облученных ионами гелия флюенсом  $10^{10}$  см<sup>-2</sup> [3]. Это позволяет провести регистрацию спектров DLTS при напряжениях  $U_p$ , соответствующих (при комнатной температуре) режиму инверсии.

На рис. 2 показаны спектры DLTS облученных структур. Спектры зафиксированы при различных значениях напряжений импульсов заполнения и эмиссии.

Сигналы DLTS с пиками  $E_x$  не обладают четкой структурой. Зависимость S(T) > 0температур (80-240 К). При росте флюенса

<sup>15-</sup>я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 26-29 сентября 2023 г., Минск, Беларусь 15th International Conference "Interaction of Radiation with Solids", September 26-29, 2023, Minsk, Belarus



Рис. 2. Спектры DLTS облученных ионами гелия структур. Условия регистрации:  $U_p = -0.5$  В и  $U_e = -7$  В (*a*);  $U_p = -5$  В и  $U_e = -10$  В (*b*);  $U_p = -10$  В и  $U_e = -15$  В (*b*)

фиксируется в широком интервале облучения интенсивность сигнала S увеличивается, пик смещается в сторону более низких температур. Сигнал может идентифицироваться как сигнал от поверхностных состояний. Эффективная энергия ионизации равна  $E_c - 0.35 \pm 0.06$  эВ.

Пики  $E_1-E_4$  сигналов DLTS наблюдаются для структур, облученных флюенсами  $10^{11}$  и  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>. Наиболее четко пики разрешаются при  $U_p = -10$  В и  $U_e = -15$  В. Указанные условия регистрации обеспечивают исследование дефектов, расположенных в глубине кремния. Пики связаны с эмиссией электронов с уровней радиационных дефектов. Пику  $E_1$  соответствует уровень  $E_c - 0.17 \pm 0.02$  эВ, пику  $E_2$  - уровень  $E_c - 0.22 \pm 0.02$  эВ, пику  $E_3$  — уровень  $E_c - 0.30 \pm 0.04$  эВ, пику E4 — уровень  $E_c - 0.50 \pm 0.05$  эВ. Энергии для пиков E<sub>1</sub> и E<sub>2</sub>, достаточно близки [1, 4] к энергиям *A*центра и дивакансии в зарядовом состоянии (=/-). Пик E<sub>4</sub> вероятно соответствует неразрешенному сигналу от дивакансий в зарядовом состоянии (-/0) и от комплекса вакансия-фосфор [5]. Пику E<sub>3</sub> может быть поставлен в соответствие комплекс тривакансия-кислород в энергетическом состоянии (=/-). Согласно работе [6], его энергия ионизации составляет  $E_c - 0.34$  эВ.

## Заключение

Методом спектроскопии DLTS показано, что облучение ионами гелия приводит как к генерации дивакансий и комплексов вакансия-кислород и вакансия-фосфор, так и к увеличению концентрации дефектов на границе раздела SiO<sub>2</sub>/*n*-Si. По спектрам DLTS структур, облученных ионами гелия флюенсами  $10^{11}$  и  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>, установлено наличие центра с энергией ионизации  $E_c - 0.30 \pm 0.04$  эВ.

#### Библиографические ссылки

- 1. Вавилов В.С., Кекелидзе Н.П., Смирнов Л.С. Действие излучений на полупроводники. Москва: Наука; 1988. 192 с.
- 2. Sze S.M. Semiconductor Devices: Physics and Technology, 3nd ed. NY: Wiley; 2012. 592 p.
- 3. Поклонский Н.А., Горбачук Н.И., Шпаковский С.В., Во Куанг Нья, Меркулов В.А., Скуратов В.А. и др. Электрическая емкость структур Al/SiO<sub>2</sub>/n-Si, облученных ионами гелия с энергиями 5 МэВ. В кн. Олехнович Н.М., редактор. Сборник докладов Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела». (22–25 ноября 2016 года), г. Минск: в 3 т. Минск: Ковчег; 2016. Т. 2, С. 39-41.
- 4. Hazdra P., Komarnitskyy V. Influence of radiation defects on formation of thermal donors in silicon irradiated with high-energy helium ions. *Mater. Sci. Eng.* B. 2009; 159-160: 346-349.
- 5. Markevich V.P., Andersen O., Medvedeva I.F., Evans-Freeman J.H., Hawkins I.D., Murin L.I., et al. Defect reactions associated with the dissociation of the phosphorus–vacancy pair in silicon. *Physica B*. 2001; 308-310: 531-516.
- Markevich V.P., Peaker A.R., Hamilton B., Lastovskii S.B., Murin L.I., Coutinho J., et al. Structure and electronic properties of trivacancy and trivacancyoxygen complexes in silicon. *Phys. Status Solidi A*. 2011; 208(3): 568-571.

<sup>15-</sup>я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 26-29 сентября 2023 г., Минск, Беларусь 15th International Conference "Interaction of Radiation with Solids", September 26-29, 2023, Minsk, Belarus