

СПЕКТРОСКОПИЯ DLTS СТРУКТУР Al/SiO₂/n-Si, ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ГЕЛИЯ

Н.И. Горбачук¹⁾, Н.А. Поклонский¹⁾, Е.А. Ермакова¹⁾, С.В. Шпаковский²⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,
пр. Независимости 4, Минск 220030, Беларусь

gorbachuk@bsu.by, poklonski@bsu.by, ermakova.7003@gmail.com

²⁾ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца 121А, Минск 220108, Беларусь, shpaks@tut.by

Исследовались структуры Al/SiO₂/n-Si, облученные ионами гелия. Кинетическая энергия иона 5 МэВ. Флюенс облучения варьировался от 10¹⁰ до 10¹² см⁻². Измерялись вольт-фарадные характеристики, регистрировались спектры DLTS. Показана возможность регистрации методом спектроскопии DLTS поверхностных состояний на границе раздела SiO₂/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-фосфор на спектрах DLTS структур, облученных ионами гелия флюенсами 10¹¹ и 10¹² см⁻² 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/SiO₂/n-Si STRUCTURES IRRADIATED WITH HELIUM IONS

N.I. Gorbachuk¹⁾, N.A. Poklonski¹⁾, K.A. Yermakova¹⁾, S.V. Shpakovski²⁾

¹⁾Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus,
gorbachuk@bsu.by, poklonski@bsu.by, ermakova.7003@gmail.com

²⁾JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company,
121A Kazintsa Str., 220108 Minsk, Belarus, sshpakovskiy@integral.by

Al/SiO₂/n-Si structures irradiated with helium ions were studied. The Al/SiO₂/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 (SiO₂) 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 mm². From the Al/SiO₂ 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 ≈24 μm. The irradiation fluence varied from 10¹⁰ to 10¹² cm⁻². Capacitance-voltage 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 -5 to -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 SiO₂/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 vacancy-phosphorus complexes, the DLTS spectra of structures irradiated with helium ions with fluences of 10¹¹ and 10¹² cm⁻² contain a center with an ionization energy of $E_c - 0.30 \pm 0.04$ 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-

сид-полупроводник (МОП) вызывает образование точечных дефектов и их комплексов в глубине кремния и увеличивает плотность поверхностных состояний [1]. МОП-структуры 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/SiO₂/n-Si, облученных ионами гелия.

Методика эксперимента

Структуры Al/SiO₂/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 SiO₂ составляла 1.85×1.85 мм². Со стороны Al/SiO₂ структуры облучались ионами гелия. Энергия ионов — 5 МэВ. Средний проективный пробег ≈ 24 мкм. Флюенс облучения варьировался от 10¹⁰ до 10¹² см⁻². Спектры DLTS регистрировались с помощью емкостного спектрометра CE-7C в диапазоне температур 80-300 К. Значение напряжений при импульсах заполнения и эмиссии варьировалось в интервале от -0.5 В, до -15 В. Длительность импульса заполнения составляла $t_p = 0.75$ мс, эмиссии — $t_e = 20$ мс. Нормированный спектр DLTS рассчитывался согласно формуле:

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

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-

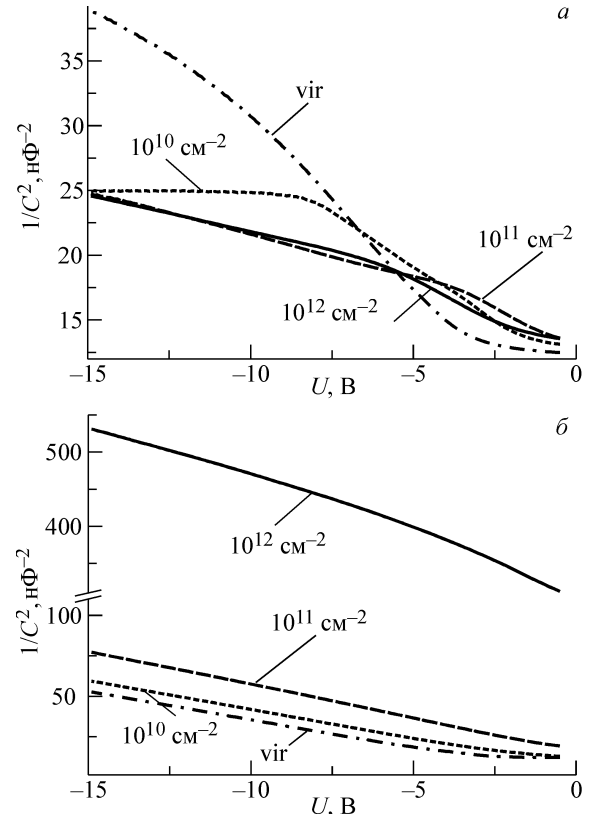


Рис. 1. ВФХ в координатах $1/C^2$, зарегистрированные при комнатной температуре (а) и температуре жидкого азота (б)

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

Результаты эксперимента

На рис. 1 в координатах $1/C^2$ представлены вольт-фарадные характеристики облученных структур. Видно, что при температуре жидкого азота (рис. 1а) МОП-структуры «не выходят» в режим инверсии. При комнатной температуре режим инверсии для указанного диапазона U наблюдается только в структурах, облученных ионами гелия флюенсом 10¹⁰ см⁻² [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 $S(T) > 0$ температур (80-240 К). При росте флюенса

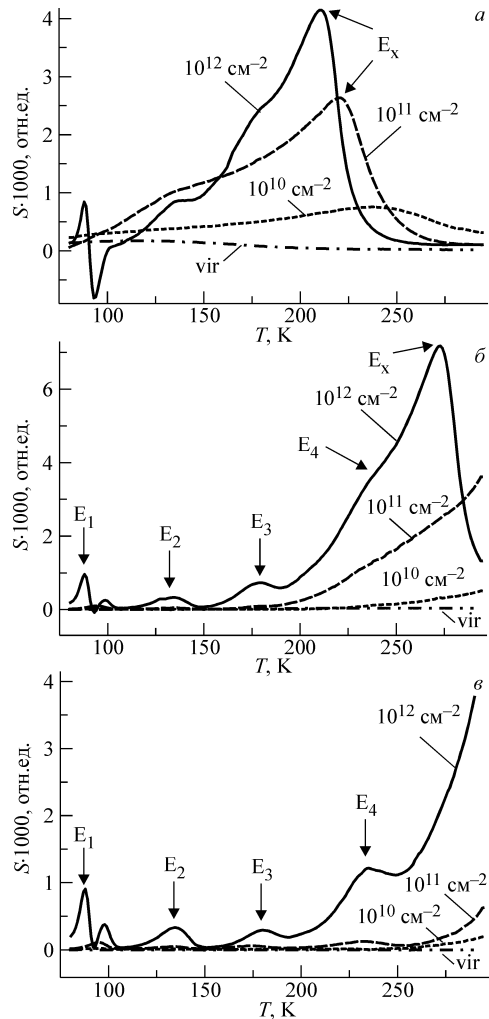


Рис. 2. Спектры DLTS облученных ионами гелия структур. Условия регистрации: $U_p = -0,5$ В и $U_e = -7$ В (а); $U_p = -5$ В и $U_e = -10$ В (б); $U_p = -10$ В и $U_e = -15$ В (в)

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^{-2} . 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. Пикку E_1 соответствует уровень $E_c - 0.17 \pm 0.02$ эВ, пикку E_2 - уровень $E_c - 0.22 \pm 0.02$ эВ, пикку E_3 — уровень

$E_c - 0.30 \pm 0.04$ эВ, пикку E_4 — уровень $E_c - 0.50 \pm 0.05$ эВ. Энергии для пиков E_1 и E_2 , достаточно близки [1, 4] к энергиям А-центра и дивакансии в зарядовом состоянии (=/-). Пик E_4 вероятно соответствует неразрешенному сигналу от дивакансий в зарядовом состоянии (-/0) и от комплекса вакансия-фосфор [5]. Пикку E_3 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 $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$. По спектрам DLTS структур, облученных ионами гелия флюенсами 10^{11} и 10^{12} см^{-2} , 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, 3rd 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 $\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si}$, 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., Komarnitsky 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.
6. 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 trivacancy-oxygen complexes in silicon. *Phys. Status Solidi A*. 2011; 208(3): 568-571.