

УДК 621.315:541.16

Горбачук Н. И.¹, Поклонский Н. А.¹, Ермакова Е. А.¹, Шпаковский С. В.², Ломако В. М.³

DLTS-СПЕКТРОСКОПИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ГЕЛИЯ СТРУКТУРАХ Al/Si₃N₄/n-Si

¹Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

²ОАО “Интеграл” управляющая компания холдинга “Интеграл”, Минск, Беларусь

³НП ООО “ОМНИТЕЛ”, Минск, Беларусь

Исследовались структуры Al/Si₃N₄/n-Si, облученные ионами гелия флюенсом 10^{11} см^{-2} (кинетическая энергия иона 5 МэВ). Регистрировались спектры DLTS, т.е. зависимости емкости от температуры, а также изотермические вольт-фарадные характеристики. Установлено, что варьирование электрического напряжения заполнения и напряжения эмиссии позволяет независимо регистрировать сигналы DLTS как от центров, локализованных на границе раздела Si₃N₄/n-Si, так и от радиационных дефектов в глубине кремния. 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.

Введение. Методика DLTS-спектроскопии является одной из базовых методик для диагностики радиационных повреждений в материалах и структурах полупроводниковой электроники [1]. Для ее реализации необходим энергетический барьер и области пространственного заряда в полупроводнике. Релаксация барьерной емкости после импульсов напряжения экстракции (инжекции) носителей заряда при различных температурах позволяет построить так называемый DLTS-спектр. Из-за вхождения МДП-структур в режим инверсии и влияния поверхностных состояний DLTS-спектроскопия для их исследования применяется ограниченно [2, 3].

Цель работы — оценить возможности использования DLTS-спектроскопии для исследования радиационных дефектов в структурах Al/Si₃N₄/n-Si, облученных ионами гелия.

Методика эксперимента. Структуры Al/Si₃N₄/n-Si изготавливались на пластинах (100) монокристаллического кремния *n*-типа проводимости, выращенного методом Чохральского. Удельное сопротивление кремния — 4,5 Ом·см. Толщина пластин — 380 мкм. Слой нитрида кремния (Si₃N₄) толщиной $d = 70 \text{ нм}$ формировался методом химического осаждения из газовой фазы, содержащей смесь аммиака (NH₃) и моносилана (SiH₄), при пониженном давлении. Контакты к планарной и непланарной (тыловой) стороне формировались термическим напылением алюминия с последующей термообработкой при температуре 400 °С в атмосфере азота. Толщина слоя алюминия — 0,7 мкм. Площадь алюминиевой металлизации на планарной стороне МДП-структур — $1,85 \times 1,85 \text{ мм}^2$. Пластины кремния разделялись на чипы площадью $2,5 \times 2,5 \text{ мм}^2$.

Со стороны Al/Si₃N₄ структуры облучались ионами гелия (энергия 5 МэВ, средний проективный пробег, рассчитанный по программе SRIM $\approx 24 \text{ мкм}$). Облучение проводилось при комнатной температуре на ускорителе Рурского университета (г. Бохум, Германия). Флюенс облучения — 10^{11} см^{-2} .

Спектры DLTS регистрировались с помощью емкостного спектрометра CE-7C в диапазоне температур 80–300 К. Значения напряжения импульса заполнения U_p и импульса эмиссии U_e выбирались, исходя из необходимости зарегистрировать спектры центров, расположенных вблизи границы раздела Si₃N₄/n-Si, или в глубине *n*-Si. В первом случае величина U_p выбиралось в окрестности напряжения плоских зон, а U_e — в интервале от U_p до -7 В . Во втором случае значения U_p и U_e выбирались в интервале от -7 до -20 В . Длительность импульса заполнения составляла $t_p = 0,75 \text{ мс}$, эмиссии — $t_e = 20 \text{ мс}$. Нагрев до последующего значения температуры и ее стабилизация осуществлялся в условиях приложенной к структуре внешней разности электрических потенциалов U_e . 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 (на частоте измерительного сигнала 1 МГц); t_1 и t_2 — некоторые моменты времени, причем $t_1 < t_2 < t_e$; C_0 — стационарное значение высокочастотной емкости при текущей температуре [1, 4].

Вольт-фарадные характеристики $C(U)$ регистрировались в интервале от -40 до 0 В с шагом $0,1$ В при температурах 80 – 300 К на измерителях LCR Agilent 4284A, E4980A и емкостном спектрометре CE-7C. Все измерения выполнялись в темноте.

Результаты и их обсуждение. На рисунке 1 представлены зависимости емкости от температуры, зарегистрированные при напряжениях U_e . Рост емкости в окрестности 260 К для исходной и 245 К для облученной структур связан с переходом в процессе измерения в режим инверсии. В интервалах температур 80 – 260 К (для исходной структуры) и 80 – 245 К (для облученной) особенностей на зависимостях $C(T)$, обусловленных формированием инверсного слоя, нет. В указанных интервалах температур структуры, как видно на вставках, находятся в режиме глубокого обеднения. Это позволяет провести регистрацию спектров DLTS при напряжениях U_e , соответствующих при комнатной температуре режиму инверсии.

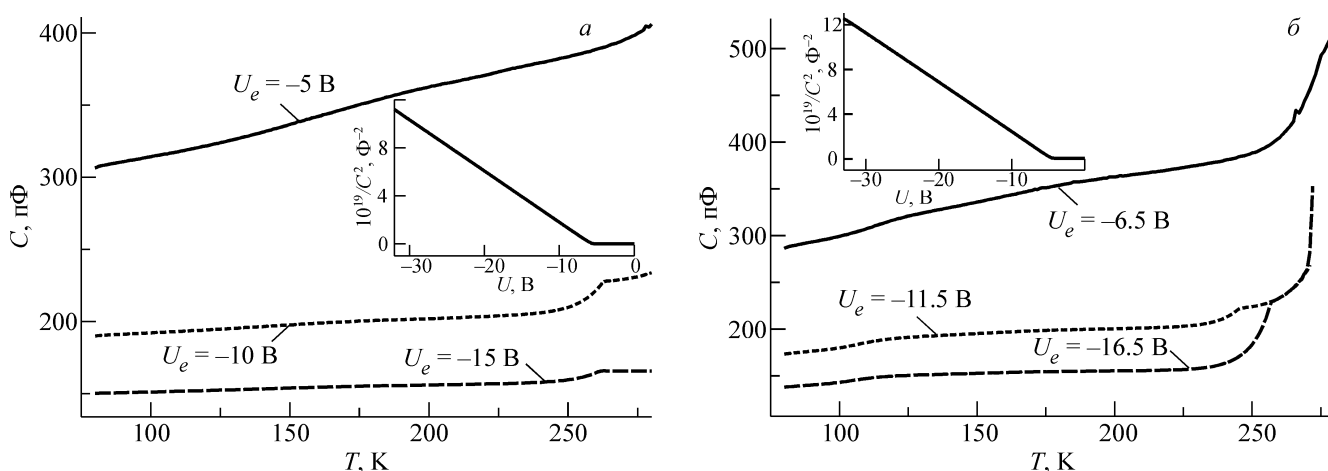


Рисунок 1 – Зависимости емкости C от температуры T для исходной (а) и облученной ионами гелия (б) структур. Значения напряжения, при которых измерены зависимости $C(T)$, указаны на рисунке.

На вставках – вольт-фарадные характеристики в координатах $1/C^2$, зарегистрированные при температуре жидкого азота

На рисунке 2 показаны спектры DLTS исходной и облученной структур. Спектры 1 соответствуют центрам, расположенным вблизи границы раздела $\text{Si}_3\text{N}_4/n\text{-Si}$. Для исходной структуры спектр имеет вид широкого бесструктурного сигнала «треугольной формы». Для облученной структуры наряду с увеличением амплитуды сигнала в области низких температур (< 150 К) отчетливо наблюдается пик Е1. Результаты согласуются с данными работы [5], в которой показано, что причиной появления широкого сигнала DLTS для исходных структур $\text{Al/Si}_3\text{N}_4/n\text{-Si}$ является эмиссия электронов с поверхностных состояний (центров), уровни которых распределены в широком интервале энергий.

Спектры 2, 3 соответствуют центрам, расположенным в глубине $n\text{-Si}$. Широкий сигнал на них отсутствует. Пики Е1-Е3 сигналов DLTS наблюдаются лишь на спектрах облученных структур (рис. 2б). Пики связаны с эмиссией электронов с глубоких уровней радиационных дефектов. На основании зависимостей Аррениуса рассчитаны значения энергии термической ионизации. Пика Е1 соответствует уровню $E_c - 0,17 \pm 0,02$ эВ, пику Е2 — $E_c - 0,22 \pm 0,02$ эВ, пику Е3 — $E_c - 0,46 \pm 0,04$ эВ. Энергии активации, характерные для пиков Е1 и Е2, достаточно близки [6] к энергиям А-центра (комплекса вакансия-кислород) и дивакансии в зарядовом состоянии ($=/-$). Пик Е3 возможно соответствует неразрешенному сигналу от дивакансий в зарядовом состоянии ($-/0$) и от комплекса вакансия-фосфор [7]. Эффективная энергия ионизации, полученная для пика E_x равна $E_c - 0,35 \pm 0,06$ эВ.

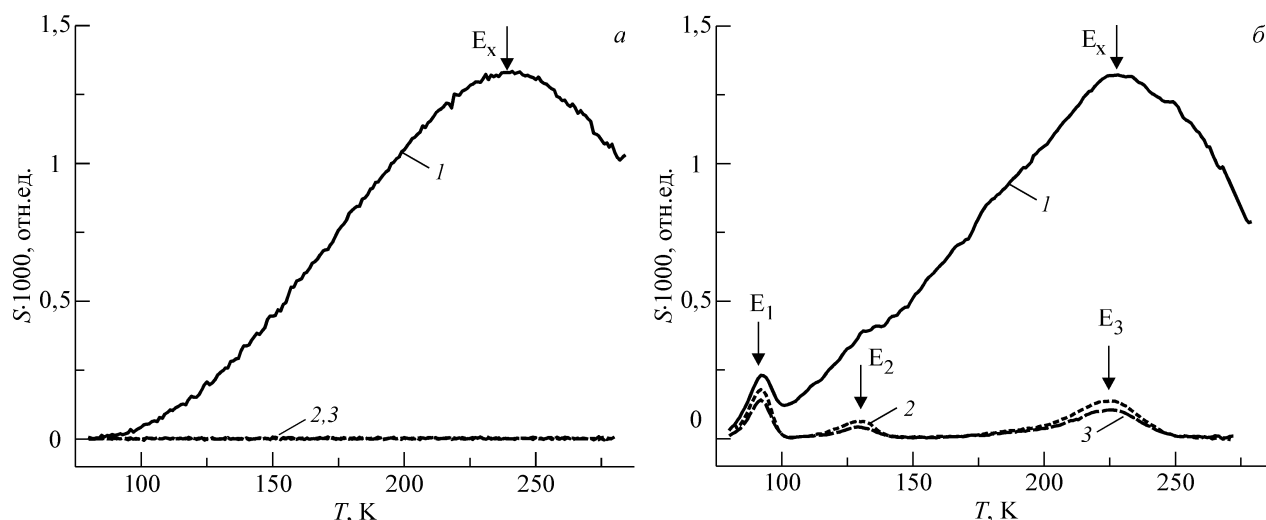


Рисунок 2 — Спектры DLTS исходных (а) и облученных ионами гелия (б) структур. Условия регистрации на рис. а: 1 — $U_p = -2,4$ В, $U_e = -5$ В; 2 — $U_p = -5$ В, $U_e = -10$ В; 3 — $U_p = -10$ В, $U_e = -15$ В. Условия регистрации на рис. б: 1 — $U_p = -3,8$ В, $U_e = -6,5$ В; 2 — $U_p = -6,5$ В, $U_e = -11,5$ В; 3 — $U_p = -11,5$ В, $U_e = -16,5$ В

Заключение. Установлено, что варьирование напряжения заполнения и напряжения эмиссии позволяет независимо регистрировать сигналы DLTS от центров, локализованных на границе раздела $\text{Si}_3\text{N}_4/n\text{-Si}$, и от радиационных дефектов в глубине кремния. Показано, что облучение ионами гелия приводит как к генерации дивакансий и комплексов вакансия-кислород и вакансия-фосфор, так и к росту концентрации дефектов на границе раздела.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии».

Список литературы

1. Вавилов В. С., Кекелидзе Н. П., Смирнов Л. С. Действие излучений на полупроводники. — М.: Наука, 1988. — 192 с.
2. Deep level transient spectroscopy study of defects at Si/SiO_2 and $\text{Si}/\text{Si}_3\text{N}_4$ interfaces / В. С. Johnson, Н. U. Rahman, E. Gauja, R. Ramer, J. C. McCallum // ICONN 2010 Int. Conf. on Nanosci. and Nanotechnol., 22-26 February 2010, Sydney, Australia. — IEEE, 2010. — P. 333–336.
3. A deep-level transient spectroscopy study of silicon interface states using different silicon nitride surface passivation schemes / C. Gong, E. Simoen, N. Posthuma, E. Van Kerschaver, J. Poortmans, R. Mertens // Appl. Phys. Lett. — 2010. — Vol. 96, № 10. — P. 103507 (1–3).
4. Цифровой емкостный спектрометр СЕ-6 / Н. Н. Дедович, В. А. Кузьминых, А. Н. Лазарчик, В. М. Ломако, В. И. Пранович, А. Ф. Романов // Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. III Междунар. науч. конф., Минск, 25–26 сент. 2008 г. / редкол.: В.Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. — Мн.: БГУ, 2008. — С. 16–19.
5. Нестационарная спектроскопия глубоких уровней структур $\text{Al}/\text{Si}_3\text{N}_4/n\text{-Si}$ / Н. И. Горбачук, Н. А. Поклонский, Е. А. Ермакова, С. В. Шпаковский // КРЕМНИЙ 2022: Тез. докл. XIV Междунар. конф., Новосибирск, 26-30 сент. 2022 г. — М.: Изд. «Перо», 2022. — С. 135.
6. P. Hazdra, V. Komarnitsky. Influence of radiation defects on formation of thermal donors in silicon irradiated with high-energy helium ions // Mater. Sci. Eng. B. — 2009. — Vol. 159–160. — P. 346–349.
7. V. P. Markevich, O. Andersen, I. F. Medvedeva, J. H. Evans-Freeman, I. D. Hawkins, L. I. Murin, L. Dobaczewski, A. R. Peaker. Defect reactions associated with the dissociation of the phosphorus–vacancy pair in silicon // Physica B. — 2001. — Vol. 308–310. — P. 513–516.