

ISSN 1561-2430 (Print)

ISSN 2524-2415 (Online)

УДК 621.382.2/.3;621.382.323

<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2025-61-1-34-46>

Поступила в редакцию 11.11.2024

Received 11.11.2024

Н. И. Горбачук¹, Е. А. Ермакова¹, Н. А. Поклонский¹, С. В. Шпаковский²¹Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск, Республика Беларусь**ЕМКОСТНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА SiO₂/n-Si В ОБЛУЧЕННЫХ ИОНАМИ ГЕЛИЯ МОП-СТРУКТУРАХ**

Аннотация. Исследовались МОП-структуры Al/SiO₂/n-Si/Al, изготовленные на пластинах (100) монокристаллического кремния *n*-типа проводимости, выращенного методом Чохральского. Удельное электрическое сопротивление кремния – 4,5 Ом · см при комнатной температуре. Толщина термически сформированного в сухом кислороде слоя SiO₂ – 420 нм. Толщина осажденного поверх SiO₂ слоя алюминия – 0,7 мкм. Площадь алюминиевой металлизации – 1,85 × 1,85 мм². При комнатной температуре структуры облучались ионами гелия (кинетическая энергия одного иона 5 МэВ). Флюенс облучения варьировался от 10¹⁰ до 10¹³ см⁻². По выполненным в программе SRIM расчетам средний проективный пробег иона гелия в структуре составлял ≈ 24 мкм. Измерения модуля импеданса *Z* и угла сдвига фаз φ между током и напряжением выполнялись в диапазоне частот от 20 Гц до 2 МГц на измерителе LCR E4980A. Амплитуда сигнала – 40 мВ. Постоянное напряжение смещения *U* изменялось в пределах от –40 до 40 В. МОП-структуры находились в темноте при комнатной температуре. Спектры DLTS регистрировались с помощью емкостного спектрометра CE-7C в диапазоне температур 80–300 К. Значения напряжения импульсов заполнения *U_p* ловушек электронами *c*-зоны и эмиссии *U_e* электронов из ловушек в *c*-зону *n*-Si изменялись в интервале от –0,5 до –9 В. Длительность импульса заполнения ловушек электронами составляла *t_p* = 0,75 мс, а эмиссии электронов из ловушек – *t_e* = 20 мс. Установлено, что для облученных ионами гелия флюенсами ≤ 10¹² см⁻² структур Al/SiO₂/n-Si/Al зависимость емкости от частоты в режиме обеднения определяется перезарядкой поверхностных электронных состояний на границе раздела SiO₂/n-Si. Показано, что в исходных структурах для быстрых (время перезарядки менее 1 мкс) поверхностных состояний зависимость энергетической плотности состояний *N_{ss}* от потенциальной энергии *eψ* электрона в *n*-Si вблизи границы раздела SiO₂/n-Si имеет максимум при *eψ* ≈ *E_F* – 0,1 эВ (здесь *e* – элементарный заряд, *ψ* – электрический потенциал, *E_F* – уровень Ферми). Этот максимум после облучения ионами гелия флюенсом 10¹² см⁻² сдвигается в сторону меньших энергий вплоть до *eψ* ≈ *E_F* – 0,2 эВ. В облученных структурах на зависимости *N_{ss}*(*eψ*) появляется второй максимум в области *eψ* > 0. Для флюенса облучения 10¹² см⁻² максимум расположен при *eψ* ≈ *E_F* + 0,1 эВ. Показана возможность исследования поверхностных состояний методом спектроскопии DLTS в выделенном энергетическом интервале путем варьирования напряжения эмиссии *U_e* при постоянном значении напряжения заполнения *U_p* и/или варьирования напряжения заполнения *U_p* при постоянном значении напряжения эмиссии *U_e*.

Ключевые слова: структуры металл–оксид–полупроводник–металл, вольт-фарадные характеристики, импеданс, кремний, поверхностные электронные состояния, радиационные дефекты, DLTS

Для цитирования. Емкостная спектроскопия электронных состояний на границе раздела SiO₂/n-Si в облученных ионами гелия МОП-структурах / Н. И. Горбачук, Е. А. Ермакова, Н. А. Поклонский, С. В. Шпаковский // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сэрыя фізіка-матэматычных навук. – 2025. – Т. 61, № 1. – С. 34–46. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2025-61-1-34-46>

Nikolai I. Gorbachuk¹, Katerina A. Ermakova¹, Nikolai A. Poklonski¹, Sergey V. Shpakovski²¹Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus²JSC “INTEGRAL” – Holding Management Company “INTEGRAL”, Minsk, Republic of Belarus**CAPACITANCE SPECTROSCOPY OF ELECTRONIC STATES AT THE SiO₂/n-Si INTERFACE IN MOS STRUCTURES IRRADIATED WITH HELIUM IONS**

Abstract. Al/SiO₂/n-Si/Al MOS structures fabricated on (100) wafers of single-crystal *n*-type silicon grown with the Czochralski method were studied. The electrical resistivity of silicon was 4.5 Ohm · cm at room temperature. The thickness of the SiO₂ layer thermally formed in dry oxygen was 420 nm. The thickness of the aluminum layer deposited on top of SiO₂ was 0.7 μm. The area of aluminum metallization was 1.85 × 1.85 mm². At a room temperature, the structures were irradiated with helium ions (kinetic energy of an ion was 5 MeV). The radiation fluence ranged from 10¹⁰ to 10¹³ cm⁻². According to calculations performed in the SRIM program, the average projective range of the helium ion in the structure was ≈ 24 μm. The impedance modulus *Z* and the phase shift angle φ between the current and voltage were measured in the frequency range from 20 Hz to 2 MHz using an E4980A LCR meter. The signal amplitude was 40 mV. The constant bias voltage *U* varied from

–40 to 40 V. The MOS structures were kept in the dark at a room temperature. The DLTS spectra were recorded using CE-7C capacitance spectrometer in the temperature range of 80–300 K. The voltage pulses for filling traps U_p with c -band electrons and the voltage of emission U_e of electrons from traps to c -band of n -Si varied in the range from –0.5 to –9 V. The pulse duration for filling traps with electrons was $t_p = 0.75$ ms, and the pulse duration for emission of electrons from traps was $t_e = 20$ ms. It was found that for the $\text{Al}/\text{SiO}_2/n\text{-Si}/\text{Al}$ structures irradiated with helium ions with fluences of $\leq 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, the dependence of the capacitance on the frequency in the depletion mode is determined by the recharging of the surface electron states at the $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ interface. It was shown that in the initial structures for fast (recharging time $< 1 \mu\text{s}$) surface states, the dependence of the energy density of states N_{ss} on the potential energy $e\psi$ of an electron in n -Si near the $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ interface has its maximum at $e\psi \approx E_F - 0.1 \text{ eV}$ (here e is the elementary charge, ψ is the electric potential, E_F is the Fermi energy level). After irradiation with helium ions with a fluence of 10^{12} cm^{-2} , this maximum shifts towards lower energies down to $e\psi \approx E_F - 0.2 \text{ eV}$. In the irradiated structures, a second maximum appears on the $N_{ss}(e\psi)$ dependence in the region of $e\psi > 0$. For an irradiation fluence of 10^{12} cm^{-2} , the maximum is located at $e\psi \approx E_F + 0.1 \text{ eV}$. The possibility of studying surface states with the DLTS spectroscopy method in the selected energy range by varying the emission voltage U_e at a constant value of the filling voltage U_p and/or varying the filling voltage U_p at a constant value of the emission voltage U_e is shown.

Keywords: structures metal–oxide–semiconductor–metal, C – V curves, impedance, silicon, surface electron states, irradiation-induced defects, DLTS

For citation. Gorbachuk N. I., Ermakova K. A., Poklonski N. A., Shpakovski S. V. Capacitance spectroscopy of electronic states at the $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ interface in MOS structures irradiated with helium ions. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2025, vol. 61, no. 1, pp. 34–46 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2025-61-1-34-46>

Введение. Структуры металл–оксид–полупроводник–металл (МОП-структуры) являются базовыми для цифровых интегральных микросхем и многих современных дискретных полупроводниковых приборов [1]. Воздействие ионизирующего излучения на МОП-структуры помимо генерации неравновесных электронов и дырок приводит к накоплению дефектов строения как в слое диоксида кремния, так и в кремнии [2]. Облучение также сопровождается увеличением плотности поверхностных состояний [1–6]. Все это приводит к постепенной деградации электрических параметров приборных МОП-структур [1, 5].

Проблема разработки устойчивых к воздействию ионизирующего излучения кремниевых приборов и интегральных микросхем связана с исследованием радиационных повреждений (в объеме кремния, в диоксиде и на границе их раздела), а также с отработкой методик изучения и контроля таких повреждений [6–9].

Как правило, для исследования границ раздела диэлектрик / полупроводник используются методы емкостной спектроскопии [1, 4]. Анализ вольт-фарадных характеристик (ВФХ) позволяет оценивать плотность поверхностных состояний [4]. Однако высокая плотность и электронных, и дырочных ловушек, а также радиационное повреждение объема кремния приводят к дополнительной зависимости емкости и от частоты переменного тока, и от напряжения электрического смещения, что затрудняет анализ экспериментальных данных [7–9]. В работах [10, 11] на примере p^+-n -структур, облученных электронами, показано, что наличие центров (ловушек) с глубокими уровнями в запрещенной зоне может существенно изменять вид частотных зависимостей импеданса. Дополнительная частотная дисперсия емкости МОП-структур, облученных электронами, установлена в [12], ионами гелия – в [13], ксенона – в [8]. Таким образом, для исследования облученных МОП-структур целесообразно проводить измерения в широком интервале частот [14] и применять комплементарные методы исследования, например спектроскопию DLTS (Deep-level transient spectroscopy) [15].

Распределение электронных поверхностных состояний в пределах запрещенной энергетической зоны полупроводника n -типа обычно рассчитывают на основе изменения заряда поверхностных состояний при изменении положения уровня Ферми с температурой [1, 6]. Тем не менее этот метод не позволяет разделить поверхностные состояния по временам релаксации. Фактически определяются полный заряд быстрых и медленных поверхностных состояний. Метод Берглунда, основанный на использовании интегрирования ВФХ, дает возможность получить распределение поверхностных состояний по всей ширине запрещенной зоны, но является недостаточно точным [16]. Часто используемым методом расчета плотности поверхностных электронных состояний все еще остается метод Термана [1, 17], в котором производится сравнение экспериментальной ВФХ с теоретической. Однако с его помощью плотность поверхностных со-

стояний можно рассчитать лишь вблизи уровня Ферми [1]. Это частично ограничивает применение данного метода и определяет перспективность выполнения сравнительных исследований плотности поверхностных состояний с помощью измерений ВФХ и спектроскопии DLTS.

Отметим, что, регистрируя спектры DLTS, можно установить наличие поверхностных состояний на границе изолятор–полупроводник и оценить их распределение по энергиям [18–22], что может дать дополнительное подтверждение данным, полученным из анализа ВФХ. Отсюда следует цель работы – исследовать методами емкостной спектроскопии (ВФХ и DLTS) изменения плотности электронных состояний на границе раздела $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ в приборных структурах $\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si/Al}$, облученных ионами гелия.

Методика эксперимента. Структуры $\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si/Al}$ изготавливались на пластинах (100) монокристаллического кремния n -типа проводимости, выращенного методом Чохральского. Удельное сопротивление кремния – $4,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (КЭФ-4,5) при комнатной температуре. Толщина пластин кремния – 380 мкм. Слой диоксида кремния толщиной 420 нм формировался термическим окислением в сухом кислороде при температуре 950°C в течение 225 мин. На планарной стороне пластины поверх слоя диоксида кремния термическим напылением наносился слой алюминия толщиной 0,7 мкм. Площадь алюминиевой металлизации на диоксиде кремния составляла $1,85 \times 1,85 \text{ мм}^2$. Для создания омического контакта к непланарной стороне кремниевой пластины при температуре 1000°C проводилась диффузия фосфора в $n\text{-Si}$ из газовой фазы PCl_3 в течение 6 мин. Удельное поверхностное сопротивление кремния после диффузии фосфора составляло $4,55 \text{ Ом}/\square$. Контакты к непланарной стороне формировались напылением Al с последующим вжиганием при температуре 400°C в атмосфере азота. Толщина слоя алюминия на омическом контакте к непланарной стороне была 0,7 мкм. Пластины механическим скрайбированием разделялись на «кристаллы» площадью $2,5 \times 2,5 \text{ мм}^2$.

Со стороны сформированного SiO_2 структуры облучались ионами гелия с энергией 5 МэВ в Рурском университете (г. Бохум, Германия). Облучение проводилось при комнатной температуре. Флюенс облучения варьировался от 10^{10} до 10^{13} см^{-2} . По выполненным в программе SRIM [23] расчетам средний проективный пробег иона гелия с кинетической энергией 5 МэВ в структуре $\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si/Al}$ составлял $\approx 24 \text{ мкм}$.

Измерения модуля импеданса Z и угла сдвига фаз φ между током и напряжением на МОП-структуре $Z^* = Z \exp(-i\varphi)$ выполнялись в диапазоне частот от 20 Гц до 2 МГц на измерителе LCR E4980A. Амплитуда синусоидального измерительного сигнала составляла 40 мВ. Постоянное напряжение смещения U изменялось в пределах от -40 до 40 В . При измерениях МОП-структуры находились в темноте при комнатной температуре. Расчет значений емкости C структур на основании измеренных значений Z и φ выполнялся согласно стандартной методике для параллельной эквивалентной электрической схемы замещения [6, 18].

Спектры DLTS структуры $\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si/Al}$ регистрировались на емкостном спектрометре CE-7C [24] в диапазоне температур 80–300 К. Значения напряжения импульсов заполнения U_p и эмиссии U_e варьировались в интервале от $-0,5$ до -9 В . Длительность импульса заполнения составляла $t_p = 0,75 \text{ мс}$, эмиссии – $t_e = 20 \text{ мс}$, что позволяло исследовать центры с временами перезарядки 1 мс и менее.

Нормированный спектр DLTS рассчитывался согласно формуле [2, 15]

$$S = \frac{\Delta C(t_2) - \Delta C(t_1)}{C_0}, \quad (1)$$

где S – нормализованный сигнал DLTS; $\Delta C(t)$ – изменение нестационарного значения барьерной емкости, регистрируемое при импульсе эмиссии (частота измерительного сигнала составляла 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 МОП-структуры.

Положение уровней энергии дефектов и поверхностных состояний в запрещенной зоне кремния рассчитывалось по зависимостям [15]

$$\tau_{\max} T^2 = (\sigma_i b_n)^{-1} \exp(E_i/k_B T), \quad (2)$$

где $\tau_{\max} = (t_2 - t_1)/\ln(t_2/t_1)$ – время релаксации в точке максимума спектра (величина, обратная скорости эмиссии); T – абсолютная температура; E_t и σ_t – энергия термической ионизации и сечение захвата дефектов; $b_n = 6,6 \cdot 10^{-21} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{К}^{-2}$; k_B – постоянная Больцмана. Для отношения моментов времени $t_2/t_1 = 2$ значения $\tau_{\max}$ определялись по спектрам DLTS. Из линейной аппроксимации (2) в аррениусовских координатах $\lg(\tau_{\max} T^2) - 1/k_B T$ рассчитывалось значение E_t .

Результаты эксперимента и их обсуждение. На рис. 1 показаны ВФХ исходных и облученных ионами гелия МОП-структур. В режиме обогащения границы раздела $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ электроны емкость структур, облученных флюенсами 10^{10} см^{-2} (кривая 2), 10^{11} см^{-2} (кривая 3), 10^{12} см^{-2} (кривая 4), не отличается от емкости исходных структур (кривая 1). Для всех флюенсов облучения характерны: сдвиг значения напряжения плоских зон в сторону отрицательных напряжений, снижение величины емкости в режиме инверсии и расширение интервала напряжений смещения U , в котором емкость структур зависит от напряжения (режим обеднения). Для структур, облученных ионами гелия флюенсом 10^{13} см^{-2} (кривая 5), характерно снижение емкости во всех режимах (обогащения, обеднения и инверсии).

На рис. 2 показаны ВФХ, измеренные на частотах $f = 100 \text{ Гц}$ (кривая 1), 1 кГц (кривая 2), 10 кГц (кривая 3), 100 кГц (кривая 4) и 1 МГц (кривая 5). Для исходных структур ВФХ были практически идентичны для всех частот, при которых проводились измерения. Для облученных структур зависимость C от U существенно изменялась от частоты f измерительного сигнала. Минимальное изменение наблюдалось для флюенса облучения 10^{10} см^{-2} (рис. 2, а), наиболее существенные трансформации ВФХ при изменении частоты измерения характерны для флюенса облучения 10^{13} см^{-2} (рис. 2, d).

Из сравнения ВФХ структур, облученных различными флюенсами, следует, что наиболее существенная дисперсия электрической емкости (зависимость C от частоты f) характерна для режима обеднения. Именно в этом режиме величина C зависит от заряда поверхностных состояний (на границе раздела $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$) и заряда в диоксиде. Изменение вида ВФХ свидетельствует о захвате положительного электрического заряда на поверхностные состояния и его накоплении в диоксиде вследствие облучения.

Для определения качественной картины изменения емкости структур $\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si/Al}$ после облучения их ионами гелия измерялись частотные зависимости емкости C при различных значениях постоянного напряжения смещения U . Результаты измерений показаны на рис. 3. Данные подтверждают результаты, представленные на рис. 1 и 2. Даже при минимальном флюенсе облу-

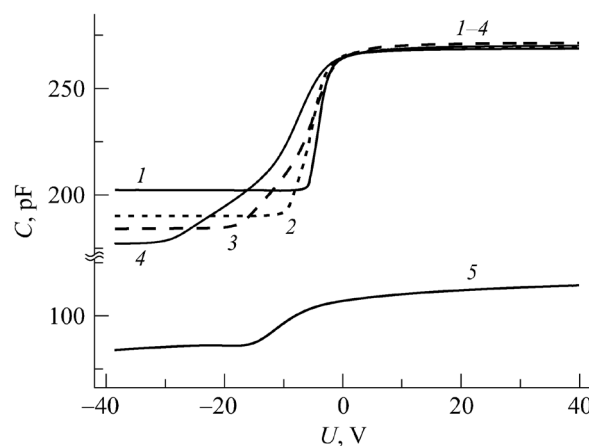


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики $C(U)$ структур $\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si/Al}$, исходных (кривая 1) и облученных ионами гелия с энергией 5 МэВ флюенсами, см^{-2} : 10^{10} (кривая 2), 10^{11} (кривая 3), 10^{12} (кривая 4), 10^{13} (кривая 5). Измерения ВФХ (зависимости емкости C от постоянного напряжения U) выполнены при частоте измерительного сигнала $f = 1 \text{ МГц}$

Fig. 1. C - V curves of $\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si/Al}$ structures, initial (curve 1), and irradiated with helium ions with an energy of 5 MeV with fluences, см^{-2} : 10^{10} (curve 2), 10^{11} (curve 3), 10^{12} (curve 4), 10^{13} (curve 5). The C - V measurements (dependences of the capacitance C on the dc voltage U) were performed at a measuring signal frequency $f = 1 \text{ MHz}$

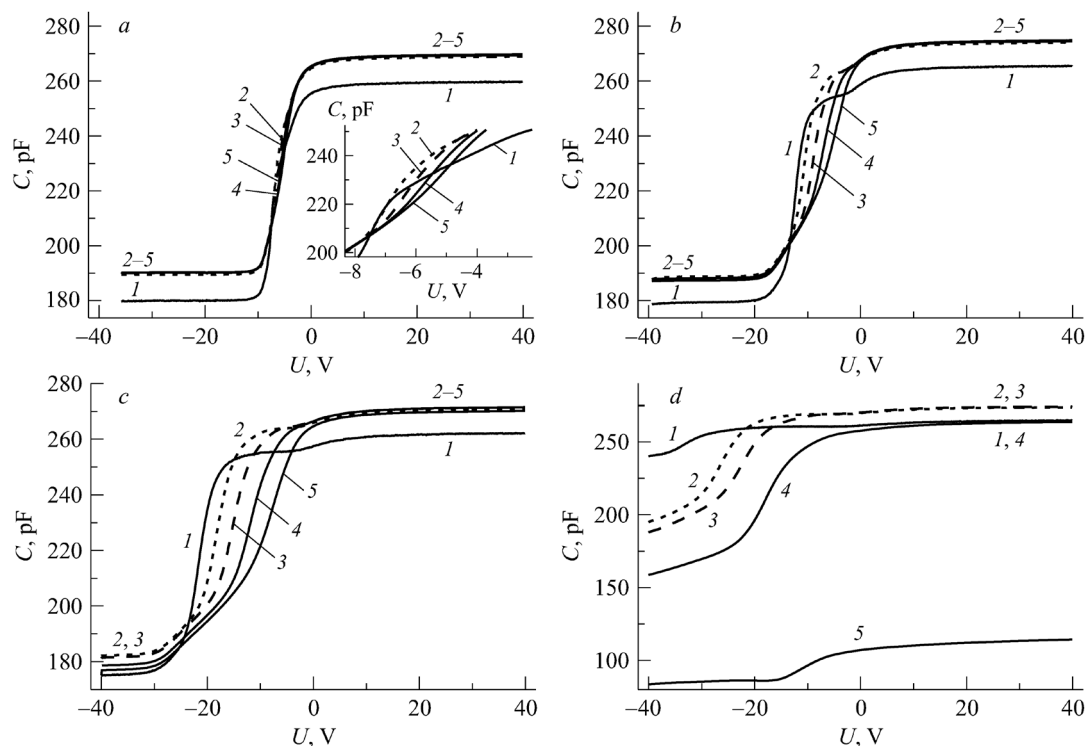


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики $C(U)$ структур $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{n-Si}/\text{Al}$, облученных ионами гелия с энергией 5 МэВ флюенсами, см^{-2} : 10^{10} (a), 10^{11} (b), 10^{12} (c), 10^{13} (d). Значения частот переменного тока, при которых выполнялась регистрация вольт-фарадных характеристик: 100 Гц (кривая 1); 1 кГц (кривая 2); 10 кГц (кривая 3); 100 кГц (кривая 4); 1 МГц (кривая 5)

Fig. 2. C - V curves of $\text{Al}/\text{SiO}_2/\text{n-Si}/\text{Al}$ structures, irradiated with helium ions with an energy of 5 MeV with fluences, cm^{-2} : 10^{10} (a), 10^{11} (b), 10^{12} (c), 10^{13} (d). The values of alternating current frequencies at which the C - V characteristics were recorded: 100 Hz (curve 1); 1 kHz (curve 2); 10 kHz (curve 3); 100 kHz (curve 4); 1 MHz (curve 5)

чения 10^{10} см^{-2} в режиме обеднения (кривые 1–6) наблюдается дисперсия емкости. Постоянный заряд, накопленный на радиационных дефектах в SiO_2 , не приводит к дисперсии электрической емкости. Его вклад проявляется лишь в изменении напряжения плоских зон. Причиной зависимости $C(f)$ в режиме обеднения являются поверхностные электронные состояния границы раздела $\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ [7–9]. В процессе измерения изменение заряда поверхностных состояний проявляется при частотах, для которых время перезарядки состояний меньше периода изменения электрического потенциала на структуре. По мере увеличения частоты f переменного тока заряд поверхностных состояний фактически не успевает «отслеживать» изменения потенциала, и соответственно емкость снижается [1, 2]. Представленные в данной работе исследования DLTS, выполненные при частоте $f = 1 \text{ МГц}$, дают возможность отделить так называемые быстрые поверхностные состояния ($f > 1 \text{ МГц}$) от медленных ($f < 1 \text{ МГц}$).

Отметим также, что в режиме обогащения (кривая 1) и инверсии (кривая 6) емкость облученных структур практически не зависит от частоты. Дисперсия электрической емкости $C(f)$, вызванная наличием компенсированного радиационными дефектами слоя в кремнии, проявляется при флюенсах облучения 10^{12} см^{-2} . Для флюенса 10^{12} см^{-2} именно зависимость C от f является определяющей (см. рис. 2, c, d и кривые 1'–5' на рис. 3).

При флюенсе облучения 10^{13} см^{-2} дисперсия электрической емкости наблюдается во всем исследованном интервале напряжений электрического смещения (от -40 до $+40 \text{ В}$). Наиболее вероятной причиной подобного изменения вида ВФХ структур является образование слоя с большим (по сравнению с КЭФ-4,5) удельным сопротивлением из-за компенсации легирующей примеси (фосфора) радиационными дефектами. Механизм образования слоя может быть подобен механизму, наблюдавшемуся в облученных высокоэнергетическими ионами p^+-n -структурах [10,

11] – перекрытие и слияние областей скоплений радиационных дефектов. На глубине порядка среднего проективного пробега иона гелия (≈ 24 мкм) образуется слой высокоомного кремния. Емкость слоя существенно меньше емкости как SiO_2 , так и области пространственного заряда в $n\text{-Si}$. Это и приводит к наблюдаемой на рис. 3 (кривые 1'–5') дисперсии емкости C при $f > 10$ кГц во всем интервале U . Отличия от случая, описанного в [10, 11], могут быть связаны с тем, что вследствие меньшей плотности радиационных дефектов, образуемых ионами гелия, по сравнению с тяжелыми ионами, необходимо неоднократное перекрытие областей скопления радиационных дефектов, что соответствует флюенсам $\geq 10^{13}$ см $^{-2}$.

На рис. 4 представлены зависимости плотности поверхностных электронных состояний N_{ss} от значений потенциальной энергии $e\psi$ электрона на границе $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$, где e – элементарный заряд, ψ – электрический потенциал. Плотность $N_{ss}(e\psi)$ рассчитывалась согласно [1]:

$$N_{ss} = \frac{\epsilon_{ox}\epsilon_0}{ed_{ox}} \frac{d(U_{ex} - U_{th})}{d\psi}, \quad (3)$$

где d_{ox} и ϵ_{ox} – толщина и относительная статическая диэлектрическая проницаемость слоя диоксида кремния SiO_2 ; $\epsilon_0 = 8,85$ пФ/м – электрическая постоянная; U_{ex} и U_{th} – напряжения смещения, соответствующие одному и тому же значению емкости структуры для экспериментальной и теоретической ВФХ. Поверхностный потенциал $e\psi$ отсчитывается от уровня Ферми E_F , значение которого для исследованных структур при комнатной температуре составляло $E_F = E_c - 0,27$ эВ. Для расчета использовались ВФХ, измеренные при частоте 1 МГц, что позволяет исследовать быстрые поверхностные электронные состояния на границе раздела $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$, время перезарядки которых менее 1 мкс.

Из рис. 4 видно, что для исходных структур максимум на зависимости N_{ss} от $e\psi$ наблюдается при $e\psi \approx E_F - 0,1$ эВ. Облучение смещает максимум в сторону меньших энергий вплоть до $e\psi \approx E_F - 0,2$ эВ (при флюенсе 10^{12} см $^{-2}$). В облученных структурах на зависимости $N_{ss}(e\psi)$ появляется второй максимум в области $e\psi > 0$. Облучение приводит к его незначительному ($< 0,05$ эВ) сдвигу в сторону больших энергий. Для флюенса облучения 10^{12} см $^{-2}$ максимум расположен при $e\psi \approx E_F + 0,1$ эВ. Отметим также, что облучение приводит к ожидаемому увеличению плотности поверхностных состояний. Например, для флюенса 10^{12} см $^{-2}$ – почти на порядок.

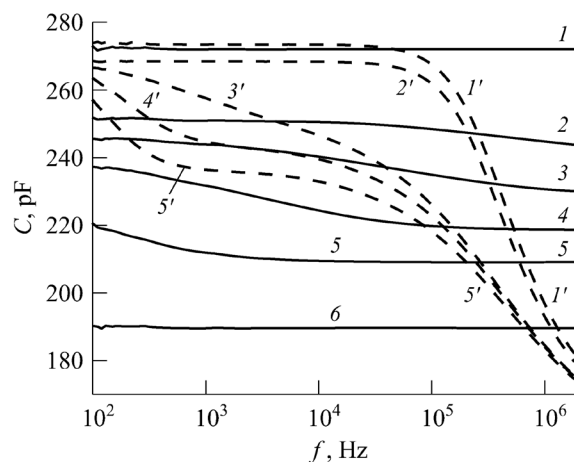


Рис. 3. Зависимости емкости C облученных структур $\text{Al}/\text{SiO}_2/n\text{-Si}/\text{Al}$ от частоты f измерительного сигнала. Флюенсы облучения, см $^{-2}$: 10^{10} (кривые 1–6), 10^{13} (кривые 1'–5'). Измерения выполнены при следующих значениях напряжения смещения, В: 35 (кривые 1 и 1'), –4 (кривые 2 и 2'), –5 (кривая 3), –6 (кривая 4), –7 (кривая 5), –27 (кривая 3'), –32 (кривая 4'), –35 (кривые 6 и 5')

Fig. 3. Dependences of the capacitance C of irradiated $\text{Al}/\text{SiO}_2/n\text{-Si}/\text{Al}$ structures on the frequency f of the measurement signal. Irradiation fluences, cm $^{-2}$: 10^{10} (curves 1–6), 10^{13} (curves 1'–5'). The measurements were performed at the following bias voltages, V: 35 (curves 1 and 1'), –4 (curves 2 and 2'), –5 (curve 3), –6 (curve 4), –7 (curve 5), –27 (curve 3'), –32 (curve 4'), –35 (curves 6 and 5')

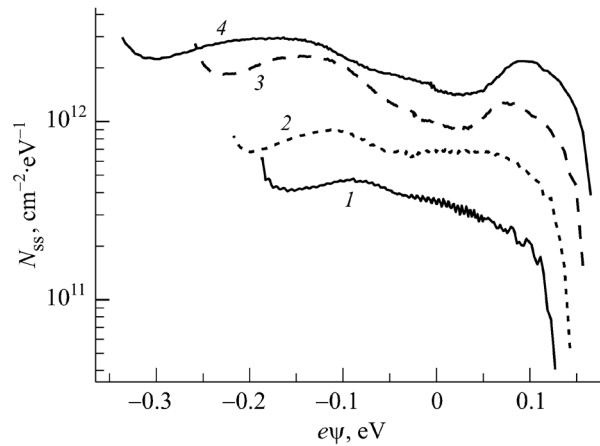


Рис. 4. Зависимости плотности поверхностных состояний N_{ss} по формуле (3) от поверхностной потенциальной энергии электронов $e\psi$ для исходных (кривая 1) структур и структур, облученных ионами гелия флюенсами, см^{-2} : 10^{10} (кривая 2), 10^{11} (кривая 3), 10^{12} (кривая 4)

Fig. 4. Dependences of the density of surface states N_{ss} by formula (3) on the surface potential energy of electrons $e\psi$ for the initial (curve 1) structures and structures irradiated with helium ions with fluences, см^{-2} : 10^{10} (curve 2), 10^{11} (curve 3), 10^{12} (curve 4)

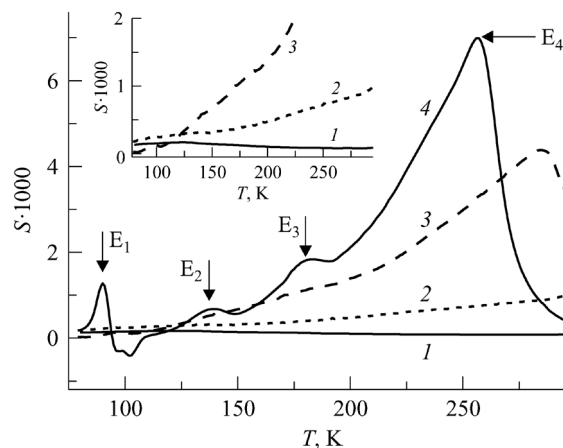


Рис. 5. Спектры DLTS исходных (кривая 1) и облученных ионами гелия структур Al/SiO₂/n-Si/Al. Флюенсы облучения, см^{-2} : 10^{10} (кривая 2), 10^{11} (кривая 3), 10^{12} (кривая 4). Значение напряжения импульса заполнения составляло $U_p = -0.5$ В, импульса эмиссии $U_e = -7$ В. На вставке показан фрагмент спектра в увеличенном масштабе

Fig. 5. DLTS spectra of the initial (curve 1) and helium ion irradiated Al/SiO₂/n-Si/Al structures. Irradiation fluences, см^{-2} : 10^{10} (curve 2), 10^{11} (curve 3), 10^{12} (curve 4). The filling pulse voltage was $U_p = -0.5$ V, the emission pulse voltage was $U_e = -7$ V. The inset shows a fragment of the spectrum in an enlarged scale

На рис. 5 представлены спектры DLTS исходной и облученных МОП-структур. Для исходной структуры значимых сигналов DLTS не зафиксировано. Спектр структур, облученных ионами гелия флюенсами 10^{10} см^{-2} (кривая 2), представляет собой наклонную линию без максимума. При флюенсе облучения 10^{11} см^{-2} DLTS-спектр имеет вид бесструктурной линии «треугольной формы». Наиболее вероятной причиной подобного спектра является эмиссия электронов с поверхностных состояний, уровни энергии которых распределены в широком интервале энергий [18, 22]. Пики от радиационных дефектов на DLTS-спектрах (рис. 5) структур, облученных флюенсами 10^{10} и 10^{11} см^{-2} , не проявляются.

Для структур Al/SiO₂/n-Si/Al, облученных ионами гелия флюенсом 10^{12} см^{-2} (рис. 5, кривая 4), на фоне сигнала «треугольной формы» с пиком E4 наблюдаются дополнительные пики, обозначенные E1–E3. Пики E1–E3 связаны с эмиссией электронов с глубоких уровней энергии

радиационных дефектов. Из зависимостей Аррениуса для глубоких уровней получены значения энергии ионизации: пика E1 соответствует уровень $E_c - 0,16 \pm 0,01$ эВ; E2 – $E_c - 0,23 \pm 0,01$ эВ; E3 – $E_c - 0,34 \pm 0,03$ эВ. Энергии активации, соответствующие пикам E1 и E2, достаточно близки к энергиям А-центра (комплекса вакансии–кислород) и дивакансии в зарядовом состоянии $(-2/-1)$ по [25, 26]. Пик E3, вероятно, соответствует неразрешенному сигналу от дивакансий в зарядовом состоянии $(-1/0)$ и от комплекса вакансии–фосфор [25, 26]. Энергетическое положение пика E4 соответствует $E_c - 0,5 \pm 0,1$ эВ. Положение этого пика могло бы свидетельствовать о расположении максимума плотности поверхностных состояний, однако полученные данные расходятся с расчетом плотности поверхностных состояний N_{ss} , который был выполнен по результатам измерения ВФХ. Для получения дополнительной информации проводилась регистрация спектров DLTS в режимах, отличающихся значениями U_p и U_e .

Для дальнейших исследований были выбраны структуры, облученные ионами гелия флюенсами 10^{11} см^{-2} , что позволяло сохранить значительную величину сигнала от поверхностных состояний и минимизировать вклад в результирующий спектр DLTS, вносимый радиационными дефектами в глубине n -Si.

Проводились две серии измерений. В первой при каждой регистрации спектра DLTS постоянным оставалось значение напряжения заполнения $U_p = \text{const} = -0,5$ В, а значение напряжения эмиссии U_e варьировалось. Результаты серии измерений показаны на рис. 6, а. Во второй серии при каждой регистрации спектра DLTS постоянным оставалось значение напряжения эмиссии $U_e = \text{const} = -8,7$ В, а значение напряжения заполнения U_p варьировалось. Результаты данной серии измерений показаны на рис. 6, б.

Видно, что увеличение напряжения эмиссии U_e при постоянных значениях напряжения заполнения U_p приводит к сдвигу максимума на спектрах DLTS в сторону высоких температур, а увеличение значений напряжения заполнения при постоянных значениях напряжения эмиссии практически не влияет на положение максимума на спектрах DLTS, но приводит к снижению в диапазоне низких температур значения S , рассчитанного согласно (1). Для спектров DLTS, показанных на рис. 6, выполнен расчет значений энергии активации E_{ss} . Данные, соответствующие рис. 6, а, представлены в табл. 1, рис. 6, б – в табл. 2. Погрешность определения значений энергии ионизации не превышает 10 %.

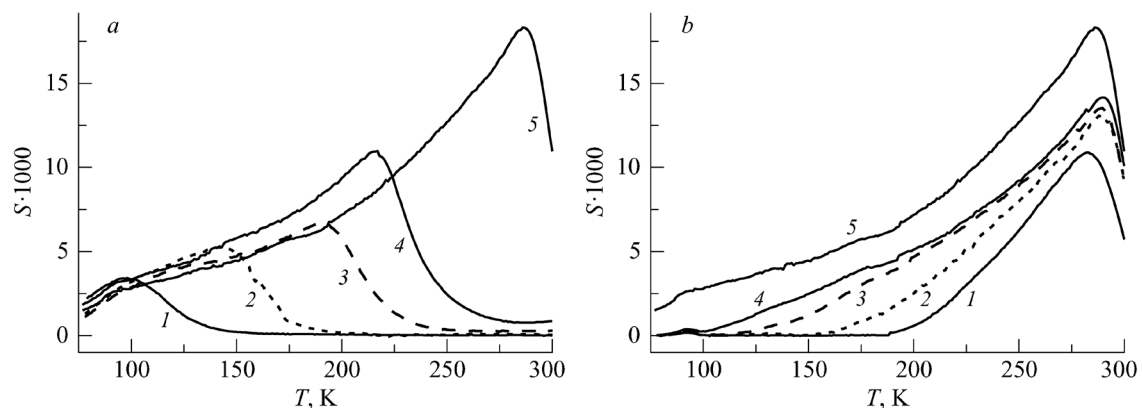


Рис. 6. Спектры DLTS облученных ионами гелия структур Al/SiO₂/n-Si/Al. Флюенс – 10^{11} см^{-2} . Регистрация спектров выполнена при длительностях импульса заполнения $t_p = 0,75$ мс, импульса эмиссии $t_e = 20$ мс, значения напряжения заполнения U_p и эмиссии U_e : а – $U_p = -0,5$ В и $U_e = -2,2$ В (кривая 1), $U_e = -3,1$ В (кривая 2), $U_e = -4,6$ В (кривая 3), $U_e = -6,0$ В (кривая 4), $U_e = -8,7$ В (кривая 5); б – $U_e = -8,7$ В и $U_p = -6,0$ В (кривая 1), $U_p = -4,6$ В (кривая 2), $U_p = -3,1$ В (кривая 3), $U_p = -2,2$ В (кривая 4), $U_p = -0,5$ В (кривая 5). Кривая 5 на рис. а и б – одна и та же

Fig. 6. DLTS spectra of Al/SiO₂/n-Si/Al structures irradiated with helium ions. Fluence is 10^{11} cm^{-2} . The spectra were recorded at the filling pulse duration $t_p = 0.75$ ms, the emission pulse duration $t_e = 20$ ms, the filling pulse voltage U_p and the emission pulse voltage U_e : а – $U_p = -0.5$ V and $U_e = -2.2$ V (curve 1), $U_e = -3.1$ V (curve 2), $U_e = -4.6$ V (curve 3), $U_e = -6.0$ V (curve 4), $U_e = -8.7$ V (curve 5); б – $U_e = -8.7$ V and $U_p = -6.0$ V (curve 1), $U_p = -4.6$ V (curve 2), $U_p = -3.1$ V (curve 3), $U_p = -2.2$ V (curve 4), $U_p = -0.5$ V (curve 5). Curve 5 in figures а and б is the same

Таблица 1. Значения эффективной энергии ионизации, соответствующие пикам DLTS на рис. 6, а

Table 1. The effective ionization energy values corresponding to the DLTS peaks in Fig. 6, a

Параметры / Parameters	Номер кривой / Curve number				
	1	2	3	4	5
U_p , V	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
U_e , V	-2.2	-3.1	-4.6	-6.0	-8.7
E_{ss} , eV	$\approx E_c - 0.16$	$\approx E_c - 0.30$	$\approx E_c - 0.32$	$\approx E_c - 0.42$	$\approx E_c - 0.55$

Таблица 2. Значения эффективной энергии ионизации, соответствующие пикам DLTS на рис. 6, b

Table 2. The effective ionization energy values corresponding to the DLTS peaks in Fig. 6, b

Параметры / Parameters	Номер кривой / Curve number				
	1	2	3	4	5
U_p , V	-0.5	-2.2	-3.1	-4.6	-6.0
U_e , V	-8.7	-8.7	-8.7	-8.7	-8.7
E_{ss} , eV	$\approx E_c - 0.54$	$\approx E_c - 0.56$	$\approx E_c - 0.56$	$\approx E_c - 0.56$	$\approx E_c - 0.55$

Сопоставление рассчитанных по (2) значений энергии ионизации E_{ss} со спектрами DLTS позволяет заключить [20], что величина E_{ss} определяется не максимумом в спектре поверхностных состояний, а условиями их заполнения электронами и опустошения, т. е. значениями U_p и U_e . Действительно, варьирование напряжения эмиссии U_e при постоянном значении напряжения за-

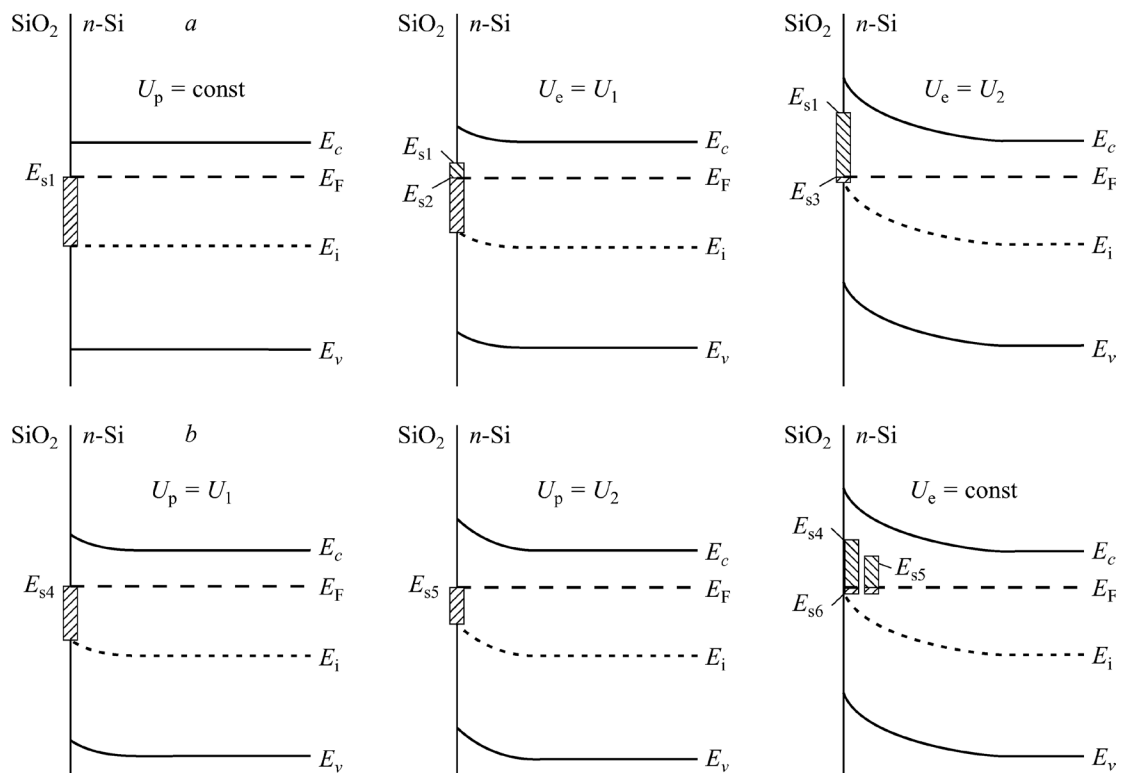


Рис. 7. Зонные диаграммы границы раздела $\text{SiO}_2/\text{n-Si}$, поясняющие регистрацию спектров DLTS (см. рис. 6): $a - U_p = \text{const}$, U_e варьируется, $b - U_e = \text{const}$, U_p варьируется. На рисунке обозначены: E_c – дно c -зоны; E_F – уровень Ферми; E_i – середина запрещенной зоны; E_v – потолок v -зоны. Область сканирования показана заштрихованным прямоугольником; незаполненные во время действия импульса U_p поверхностные состояния не показаны

Fig. 7. Band diagrams of $\text{SiO}_2/\text{n-Si}$ interface explaining the registration of the DLTS spectra (see Fig. 6): $a - U_p = \text{const}$, U_e varies, $b - U_e = \text{const}$, U_p varies. The following are indicated in the figure: E_c is the bottom of the c -band; E_F is the Fermi level; E_i is the middle of the band gap; E_v is the top of the v -band. The scanning area is shown by the shaded rectangle; the surface states that are not filled during U_p pulse are not shown

полнения U_p давало возможность задавать верхнюю границу интервала в спектре поверхностных состояний, регистрируемых методом DLTS. Например, как показано на рис. 7, а, при регистрации спектров DLTS фиксировались бы центры, расположенные в интервалах от E_{s1} до E_{s2} и от E_{s1} до E_{s3} .

Варьирование напряжения заполнения U_p при постоянном значении напряжения эмиссии U_e позволяло задавать нижнюю границу интервала в спектре значений энергии поверхностных состояний, регистрируемых методом DLTS. Например, как показано на рис. 7, б, при регистрации спектров DLTS фиксировались бы центры, расположенные в интервалах от E_{s4} до E_{s6} и от E_{s5} до E_{s6} .

Заключение. Установлено, что для облученных ионами гелия флюенсами $\leq 10^{12} \text{ см}^{-2}$ структур $\text{Al}/\text{SiO}_2/n\text{-Si}/\text{Al}$ зависимость емкости от частоты в режиме обеднения определяется перезарядкой поверхностных состояний. В облученных МОП-структурах для быстрых (время перезарядки менее 1 мкс) поверхностных состояний зависимость плотности N_{ss} от поверхностного электрического потенциала ψ на границе $\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ имеет 2 максимума: при $e\psi \approx E_F + 0,1 \text{ эВ}$ и $e\psi \approx E_F - 0,1 \text{ эВ}$. Увеличение флюенса облучения приводит к увеличению N_{ss} и сдвигу максимума N_{ss} от значения $e\psi \approx E_F - 0,1 \text{ эВ}$ до $e\psi \approx E_F - 0,2 \text{ эВ}$. Показана возможность исследования поверхностных состояний методом спектроскопии DLTS в выделенном энергетическом интервале путем варьирования напряжения эмиссии U_e электронов из ловушек при постоянном значении напряжения заполнения U_p ловушек электронами и/или варьирования напряжения заполнения U_p при постоянном значении напряжения эмиссии U_e .

Благодарности. Работа поддержана Государственной программой научных исследований «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021–2025 годы, подпрограмма «Физика конденсированного состояния и создание новых функциональных материалов и технологий их получения» (задание 1.8.2).

Acknowledgements. The work was supported by the Belarusian National Research Program “Materials Science, New Materials and Technologies” for 2021–2025, subprogram “Condensed Matter Physics and Development of New Functional Materials and Technologies for their Production” (task 1.8.2).

Список использованных источников

1. Sze, S. M. Physics of semiconductor devices / S. M. Sze, K. K. Ng. – Hoboken: Wiley, 2007. – X + 816 p. <https://doi.org/10.1002/0470068329>
2. Вавилов, В. С. Действие излучений на полупроводники / В. С. Вавилов, Н. П. Кекелидзе, Л. С. Смирнов. – М.: Наука, 1988. – 190 с.
3. Барабан, А. Н. Электроника слоев SiO_2 на кремнии / А. Н. Барабан, В. В. Булавинов, П. П. Коноров. – Л.: Ленингр. ун-т, 1988. – 304 с.
4. Nicollian, E. H. The Si-SiO₂ interface electrical properties as determined by metal-insulator-silicon conductance technique / E. H. Nicollian, A. Goetzberger // The Bell System Technical Journal. – 1967. – Vol. XLVI, № 6. – P. 1055–1133. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1967.tb01727.x>
5. Белоус, А. И. Космическая электроника: в 2 кн. / А. И. Белоус, В. А. Солодуха, С. В. Шведов. – М.: Техносфера, 2015. – Кн. 2. – 488 с.
6. Емкость и электропроводность полупроводниковых структур на переменном токе: учеб. пособие / Н. А. Поклонский, Н. И. Горбачук, Т. М. Лапчук, Д. А. Кириленко. – Минск: БГУ, 1997. – 62 с.
7. Комплексная электрическая емкость структур $\text{Al}/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$, облученных высокоэнергетическими ионами ксенона / Н. А. Поклонский, Н. И. Горбачук, С. В. Шпаковский [и др.] // Опто-, микро- и СВЧ-электроника. – 2018: сб. науч. ст. I Междунар. науч.-техн. конф., Минск, Беларусь, 22–26 окт. 2018 г. / Ин-т физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси; ред.: Н. С. Казак, А. С. Чиж, В. В. Малютина-Бронская. – Минск, 2018. – С. 132–135.
8. Емкость в режиме сильной инверсии структур $\text{Al}/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$, облученных ионами ксенона / Н. А. Поклонский, Н. И. Горбачук, С. В. Шпаковский [и др.] // Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. VIII Междунар. науч. конф., Минск, Беларусь, 10–11 окт. 2018 г. / БГУ; редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2018. – С. 192–196.
9. Электрические потери в имплантированных ионами ксенона структурах $\text{Al}/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ / Н. И. Горбачук, Н. А. Поклонский, С. В. Шпаковский [и др.] // Взаимодействие излучений с твердым телом (ВИТТ-2019): материалы 13-й Междунар. конф., Минск, Беларусь, 30 сент. – 3 окт. 2019 г. / БГУ; редкол.: В. В. Углов (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 139–142.
10. Influence of radiation defects on electrical losses in silicon diodes irradiated with electrons / N. A. Poklonski, N. I. Gorbachuk, S. V. Shpakovski [et al.] // Semiconductors. – 2010. – Vol. 44, № 3. – P. 380–384. <https://doi.org/10.1134/S1063782610030188>
11. Equivalent circuit of silicon diodes subjected to high-fluence electron irradiation / N. A. Poklonski, N. I. Gorbachuk, S. V. Shpakovski, A. Wieck // Technical Physics. – 2010. – Vol. 55, № 10. – P. 1463–1471. <https://doi.org/10.1134/S1063784210100117>

12. Диэлектрические потери структур Al/SiO₂/n-Si, облученных электронами с энергией 3.5 МэВ / Н. А. Поклонский, Н. И. Горбачук, С. В. Шпаковский [и др.] // Взаимодействие излучений с твердым телом (ВИТТ-2015): материалы 11-й Междунар. конф., Минск, Беларусь, 23–25 сент. 2015 г. / БГУ; редкол.: В. М. Анищик (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 136–138.
13. Электрическая емкость структур Al/SiO₂/n-Si, облученных ионами гелия с энергиями 5 МэВ / Н. А. Поклонский, Н. И. Горбачук, С. В. Шпаковский [и др.] // Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ-2016): сб. докл. Междунар. науч. конф., Минск, Беларусь, 22–25 нояб. 2016 г.: в 3 т. / НППЦ НАНБ по материаловедению; редкол.: Н. М. Олехнович (пред.) [и др.]. – Минск, 2016. – Т. 2. – С. 39–41.
14. Impedance spectroscopy: Theory experiment and applications / ed. by E. Barsoukov, J. R. Macdonald. – Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2005. – xviii + 596 p. <https://doi.org/10.1002/0471716243>
15. Lang, D. V. Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors / D. V. Lang // Journal of Applied Physics. – 1974. – Vol. 45, № 7. – P. 3023–3032. <https://doi.org/10.1063/1.1663719>
16. Dmitriev, S. G. Semiconductor surface potential relaxation in the MIS structure in the presence of convective currents in insulator and through its boundaries / S. G. Dmitriev // Semiconductors. – 2011. – Vol. 45, № 2. – P. 188–191. <https://doi.org/10.1134/S1063782611020072>
17. Давыдов, В. Н. Программа расчета параметров МДП-структуры по методу Термана / В. Н. Давыдов, П. Е. Троян, Н. Г. Зайцев // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, № 8. – С. 47–51.
18. DLTS-спектроскопия радиационных дефектов в облученных ионами гелия структурах Al/Si₃N₄/n-Si / Н. И. Горбачук, Н. А. Поклонский, Е. А. Ермакова [и др.] // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы седьмой Междунар. науч.-практ. конф., Минск, Беларусь, 18–19 мая 2023 г. / Ин-т приклад. физ. проблем им. А. Н. Севченко Белорус. гос. ун-та; редкол.: Ю. И. Дудчик (гл. ред.), И. М. Цикман, И. Н. Кольчевская. – Минск, 2023. – С. 272–274.
19. C–V and DLTS studies of radiation induced Si–SiO₂ interface defects / I. Capan, V. Janicki, R. Jacimovic, B. Pivac // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2012. – Vol. 282. – P. 59–62. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.08.065>
20. Hara, T. DLTS analysis of interface and near-interface bulk defects induced by TCO-plasma deposition in carrier-selective contact solar cells / T. Hara, Y. Ohshita // AIP Advances. – 2024. – Vol. 14, № 1. – Art. ID 015202. <https://doi.org/10.1063/5.0177685>
21. Energy state distributions of the P_b centers at the (100), (110), and (111) Si/SiO₂ interfaces investigated by Laplace deep level transient spectroscopy / L. Dobaczewski, S. Bernardini, P. Kruszewski [et al.] // Applied Physics Letters. – 2008. – Vol. 92, № 24. – Art. ID 242104. <https://doi.org/10.1063/1.2939001>
22. Traps at the bonded interface in silicon-on-insulator structures / I. V. Antonova, O. V. Naumova, D. V. Nikolaev [et al.] // Applied Physics Letters. – 2001. – Vol. 79, № 27. – P. 4539–4540. <https://doi.org/10.1063/1.1428412>
23. Ziegler, J. F. SRIM – The Stopping and Range of Ions in Matter / J. F. Ziegler, J. P. Biersack, M. D. Ziegler. – Chester, MD: SRIM Co., 2008. – 398 p.
24. Цифровой емкостный спектрометр СЕ-6 / Н. Н. Дедович, В. А. Кузьминых, А. Н. Лазарчик [и др.] // Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. III Междунар. науч. конф., Минск, Беларусь, 25–26 сент. 2008 г. / БГУ; редкол.: В. Б. Оджаев (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2008. – С. 16–19.
25. Hazdra, P. Influence of radiation defects on formation of thermal donors in silicon irradiated with high-energy helium ions / P. Hazdra, V. Komarnitsky // Materials Science and Engineering B. – 2009. – Vol. 159–160. – P. 346–349. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2008.10.008>
26. Defect reactions associated with the dissociation of the phosphorus–vacancy pair in silicon / V. P. Markevich, O. Andersen, I. F. Medvedeva [et al.] // Physica B. – 2001. – Vol. 308–310. – P. 513–516. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(01\)00737-2](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(01)00737-2)

References

1. Sze S. M., Ng K. K. *Physics of Semiconductor Devices*. Hoboken, Wiley, 2007. X + 816 p. <https://doi.org/10.1002/0470068329>
2. Vasilov V. S., Kekelidze N. P., Smirnov L. S. *Effect of Radiation on Semiconductors*. Moscow, Nauka Publ., 1988. 190 p. (in Russian).
3. Baraban A. N., Bulavinov V. V., Konorov P. P. *Electronics of SiO₂ Layers on Silicon*. Leningrad, Publishing House of Leningrad State University, 1988. 304 p. (in Russian).
4. Nicollian E. H., Goetzberger A. The Si–SiO₂ interface electrical properties as determined by metal-insulator-silicon conductance technique. *The Bell System Technical Journal*, 1967, vol. XLVI, no. 6, pp. 1055–1133. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1967.tb01727.x>
5. Belous A. I., Soloduha V. A., Shvedov S. V. *Space Electronics. Book 2*. Moscow, Tehnosfera Publ., 2015. 488 p. (in Russian).
6. Poklonski N. A., Gorbachuk N. I., Lapchuk T. M., Kirilenko D. A. *Capacitance and Electrical Conductivity of Semiconductor Structures on Alternating Current*. Minsk, BSU, 1997. 62 p. (in Russian).
7. Poklonski N. A., Gorbachuk N. I., Shpakovski S. V., Skuratov V. A., Wieck A. Complex electrical capacitance of Al/SiO₂/n-Si structures irradiated with high-energy xenon ions. *Opto-, mikro- i SVCH-ehlektronika – 2018: sbornik nauchnykh statei I Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Minsk, Belarus', 22–26 oktyabrya 2018 g.* [Opto-,

Micro- and Microwave Electronics. Collected Papers of the 1st International Scientific and Technical Conference, Belarus, 22–26 October, 2018]. Minsk, 2018, pp. 132–135 (in Russian).

8. Poklonski N. A., Gorbachuk N. I., Shpakovski S. V., Skuratov V. A., Wieck A. Capacitance in the strong inversion regime of Al/SiO₂/n-Si structures irradiated with xenon ions. *Materialy i struktury sovremennoi ehlektroniki: sbornik nauchnykh trudov VIII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Minsk, Belarus', 10–11 oktyabrya 2018 g.* [Materials and Structures of Modern Electronics. Collected Papers of the VIII International Scientific Conference, Minsk, Belarus, October 10–11, 2018]. Minsk, 2018, pp. 192–196 (in Russian).

9. Gorbachuk N. I., Poklonski N. A., Shpakovski S. V., Wieck A. Electrical losses of Al/SiO₂/n-Si structures implanted with xenon ions. *Vzaimodeistvie izlucheni s tverdyim telom (VITT-2019): materialy 13-i Mezhdunarodnoi konferentsii, Minsk, Belarus', 30 sentyabrya – 3 oktyabrya 2019 g.* [Interaction of Radiation with Solids. Proceedings of the 13th International Conference, Minsk, Belarus, September 30 – October 3, 2019]. Minsk, 2019, pp. 139–142 (in Russian).

10. Poklonski N. A., Gorbachuk N. I., Shpakovski S. V., Lastovskii S. B., Wieck A. Influence of radiation defects on electrical losses in silicon diodes irradiated with electrons. *Semiconductors*, 2010, vol. 44, no. 3, pp. 380–384. <https://doi.org/10.1134/S1063782610030188>

11. Poklonski N. A., Gorbachuk N. I., Shpakovski S. V., Lastovskii S. B., Wieck A. Equivalent circuit of silicon diodes subjected to high-fluence electron irradiation. *Technical Physics*, 2010, vol. 55, no. 10, pp. 1463–1471. <https://doi.org/10.1134/S1063784210100117>

12. Poklonski N. A., Gorbachuk N. I., Shpakovski S. V., Britko P. S., Neverovskii D. A., Lastovskii S. B., Wieck A. Dielectric losses of Al/SiO₂/n-Si structures irradiated with 3.5 MeV-electrons. *Vzaimodeistvie izlucheni s tverdyim telom (VITT-2015): materialy 11-i Mezhdunarodnoi konferentsii, Minsk, Belarus', 23–25 sentyabrya 2015 g.* [Interaction of Radiation with Solids. Proceedings of the 11th International Conference, Minsk, Belarus, September 23–25, 2015]. Minsk, 2015, pp. 136–138 (in Russian).

13. Poklonski N. A., Gorbachuk N. I., Shpakovski S. V., Vo Quang Nha, Merkulov V. A., Skuratov V. A., Kukharchyk N., Becker H.-W., Wieck A. Electrical capacitance of Al/SiO₂/n-Si structures irradiated with 5 MeV-helium ions. *Aktual'nye problemy fiziki tverdogo tela (FTT-2016): sbornik dokladov Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii, Minsk, Belarus', 22–25 noyabrya 2016 g.* [Actual Problems of Solid State Physics. Proceedings of the International Scientific Conference, Minsk, Belarus, November 22–25, 2016]. Minsk, 2016. Vol. 2, pp. 39–41 (in Russian).

14. Barsoukov E., Macdonald J. R. (eds.). *Impedance Spectroscopy: Theory Experiment and Applications*. Hoboken, John Wiley & Sons, Inc., 2005. xviii + 596 p. <https://doi.org/10.1002/0471716243>

15. Lang D. V. Deep level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors. *Journal of Applied Physics*, 1974, vol. 45, no. 7, pp. 3023–3032. <https://doi.org/10.1063/1.1663719>

16. Dmitriev S. G. Semiconductor surface potential relaxation in the MIS structure in the presence of convective currents in insulator and through its boundaries. *Semiconductors*, 2011, vol. 45, no. 2, pp. 188–191. <https://doi.org/10.1134/S1063782611020072>

17. Davydov V. N., Troyan P. E., Zaytsev N. G. Program for calculating the parameters of the MIS structure using the Terman method. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 8, pp. 47–51 (in Russian).

18. Gorbachuk N. I., Poklonski N. A., Ermakova E. A., Shpakovski S. V., Lomako V. M. DLTS spectroscopy of radiation defects in helium ion irradiated Al/Si₃N₄/n-Si structures. *Prikladnye problemy optiki, informatiki, radiofiziki i fiziki kondensirovannogo sostoyaniya: materialy sed'moi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Minsk, Belarus', 18–19 maya 2023 g.* [Applied Problems of Optics, Computer Science, Radiophysics and Condensed Matter Physics. Proceedings of the Seventh International Scientific and Practical Conference, Minsk, Belarus, May 18–19, 2023]. Minsk, 2023, pp. 272–274 (in Russian).

19. Capan I., Janicki V., Jacimovic R., Pivac B. C–V and DLTS studies of radiation induced Si–SiO₂ interface defects. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2012, vol. 282, pp. 59–62. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.08.065>

20. Hara T., Ohshita Y. DLTS analysis of interface and near-interface bulk defects induced by TCO-plasma deposition in carrier-selective contact solar cells. *AIP Advances*, 2024, vol. 14, no. 1, art. ID 015202. <https://doi.org/10.1063/5.0177685>

21. Dobaczewski L., Bernardini S., Kruszewski P., Hurley P. K., Markevich V. P., Hawkins I. D., Peaker A. R. Energy state distributions of the P_b centers at the (100), (110), and (111) Si/SiO₂ interfaces investigated by Laplace deep level transient spectroscopy. *Applied Physics Letters*, 2008, vol. 92, no. 24, art. ID 242104. <https://doi.org/10.1063/1.2939001>

22. Antonova I. V., Naumova O. V., Nikolaev D. V., Popov V. P., Stano J. and Skuratov V. A. Traps at the bonded interface in silicon-on-insulator structures. *Applied Physics Letters*, 2001, vol. 79, no. 27, pp. 4539–4540. <https://doi.org/10.1063/1.1428412>

23. Ziegler J. F., Biersack J. P., Ziegler M. D. *SRIM – The Stopping and Range of Ions in Matter*. Chester, MD, SRIM Co., 2008. 398 p.

24. Dedovich H. H., Kuz'minyh V. A., Lazarchik A. N., Lomako V. M., Pranovich V. I., Romanov A. F. Digital capacitance spectrometer CE-6. *Materialy i struktury sovremennoi ehlektroniki: sbornik nauchnykh trudov III Mezhdunarodnoi nauch. konferentsii, Minsk, Belarus', 25–26 sentyabrya 2008 g.* [Materials and Structures of Modern Electronics. Collected Papers of the III International Scientific Conference, Minsk, Belarus, September 25–26, 2008.]. Minsk, 2008, pp. 16–19 (in Russian).

25. Hazdra P., Komarnitskiy V. Influence of radiation defects on formation of thermal donors in silicon irradiated with high-energy helium ions. *Materials Science and Engineering B*, 2009, vol. 159–160, pp. 346–349. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2008.10.008>

26. Markevich V. P., Andersen O., Medvedeva I. F., Evans-Freeman J. H., Hawkins I. D., Murin L. I., Dobaczewski L., Peaker A. R. Defect reactions associated with the dissociation of the phosphorus–vacancy pair in silicon. *Physica B*, 2001, vol. 308–310, pp. 513–516. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(01\)00737-2](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(01)00737-2)

Информация об авторах

Горбачук Николай Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: gorbachuk@bsu.by. <https://orcid.org/0000-0002-9396-8146>

Ермакова Екатерина Александровна – магистрант, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ermakova.7003@gmail.com

Поклонский Николай Александрович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: poklonski@bsu.by. <http://orcid.org/0000-0002-0799-6950>

Шпаковский Сергей Васильевич – кандидат физико-математических наук, начальник отделения, ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ул. Казинца 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: SShpakovskiy@integral.by

Information about the authors

Nikolay I. Gorbachuk – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gorbachuk@bsu.by. <https://orcid.org/0000-0002-9396-8146>

Katerina A. Ermakova – Master Student, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ermakova.7003@gmail.com

Nikolai A. Poklonski – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: poklonski@bsu.by. <http://orcid.org/0000-0002-0799-6950>

Sergey V. Shpakovski – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of Department, JSC “INTEGRAL” – Holding Management Company “INTEGRAL” (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: SShpakovskiy@integral.by