

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ КРЕМНИЕВЫХ ДЕТЕКТОРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Ю.М. Покотило¹⁾, А.Н. Петух¹⁾, А.В. Гиро¹⁾, И.А. Свито¹⁾, С.Б. Ластовский²⁾, Д.В. Шестовский³⁾

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

pokotilo@bsu.by, petuch@bsu.by, giro@bsu.by, svito@bsu.by

²⁾Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки 19, 220072 Минск, Беларусь, lastov@ifft.bas-net.by

³⁾ОАО «ИНТЕГРАЛ» - Управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца 121А, 220108 Минск, Беларусь, shchytrovets96@gmail.com

Исследовалась радиационная стойкость кремниевых детекторов ионизирующего и оптического излучений при воздействии электронов с энергией 6 МэВ и гамма-квантами ⁶⁰Со. Определены константы радиационного повреждения времени жизни и коэффициент радиационного повреждения обратного тока. Показано, что токовая чувствительность фотодиодов описывается линейной функцией в широком диапазоне потоков облучения. Однако ее величина экспоненциально уменьшается с ростом потока облучения. Температура измерения не влияет на линейность люкс-амперной характеристики.

Ключевые слова: радиационные дефекты; емкостная спектроскопия глубоких уровней; кремний; время жизни; фотодиод; гамма-квант.

RADIATION RESISTANCE OF SILICON RADIATION DETECTORS

Yu.M. Pokotilo¹⁾, A.N. Petukh¹⁾, A.V. Giro¹⁾, I.A. Svito¹⁾, S.B. Lastovskii²⁾, D.V. Shestovskii³⁾

¹⁾Belarussian State University, 4 Nezavisimosti Ave., 220030 Minsk, Belarus,
pokotilo@bsu.by, petuch@bsu.by, giro@bsu.by, svito@bsu.by

²⁾Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus,
19 P. Brovki Str., 220072 Minsk, Belarus, lastov@ifft.bas-net.by

³⁾Joint-stock company "Integral",
121A Kazintsa Str., 220108 Minsk, Belarus, shchytrovets96@gmail.com

The radiation resistance of silicon detectors of ionizing and optical radiation at exposure to electrons with energy of 6 MeV and ⁶⁰Co gamma rays. The constants of radiation damage to life $K_e = 1.8 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ and $K_r = 8.8 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, the coefficient of radiation damage to reverse current $K = 2 \cdot 10^{-25} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ are determined. It is shown that the current sensitivity of photodiodes is described by a linear function in a wide range of radiation fluxes. However, its value decreases exponentially with increasing flux of radiation $S = A_0 \cdot \exp(-\Phi/\Phi_1)$, $A = 0.43$, $\Phi_1 = 4.3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. Temperature measurement does not affect the linearity of lux-ampere characteristic.

Keywords: radiation defects; deep level transient spectroscopy; silicon; carrier lifetime; photodiode; gamma quantum.

Введение

Проблема повышения радиационной стойкости полупроводниковых материалов, используемых для создания электронных приборов, которые длительное время должны сохранять эксплуатационные параметры в радиационных полях, была и остается актуальной [1]. Один из подходов к решению этой проблемы заключается в разработке материалов стойких к радиационным воздействиям [2].

Целью настоящей работы являлось исследование радиационных нарушений кремниевых детекторов электронов и гамма-квантами, установление природы дефектов и их влияние на параметры детектора.

Методика эксперимента

Для определения параметров глубоких уровней использовался так называемый метод DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy — нестационарная спектроскопия глубоких уровней). Достоинствами этого емкостного метода является высокая чувствительность, возможность определения спектра глубоких уровней почти по всей ширине запрещенной зоны, возможность

определения параметров глубоких уровней при изменении их заполнения как основными, так и неосновными носителями. Методика позволяет определить следующие параметры центров: энергетическое положение уровня в запрещенной зоне; сечение захвата электрона или дырки на глубокий уровень; концентрацию каждого центра в отдельности.

Для определения фотоэлектрических характеристик р⁺-п диодов измерялись их вольт-амперные и люкс-амперные характеристики при различных температурах.

Исследования были проведены на р⁺-п диодах, изготовленный из зонного кремния ($\rho = 1 \text{ кОм} \cdot \text{см}$) и выращенного методом Чохральского ($\rho = 50 \text{ Ом} \cdot \text{см}$), легированных фосфором.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 изображены спектры DLTS кремния, облученного быстрыми электронами с энергией $E = 6 \text{ МэВ}$, для трех различных окон регистрации. Видно, что максимумы пиков при увеличении окна регистрации смещаются в более низкотемпературную область. Это в соответствии с зависимостями Аррениуса позволяет определить

параметры наблюдаемых дефектов. Полученные результаты и литературные данные приведены в таблице.

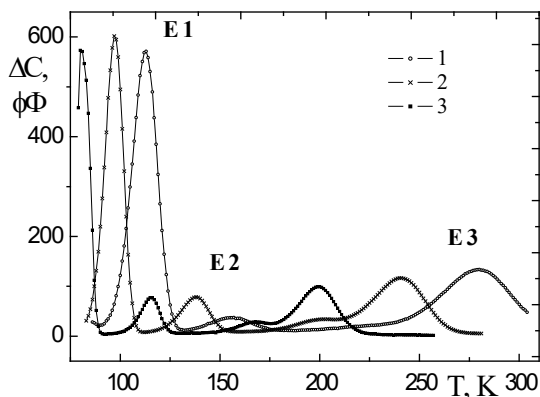


Рис. 1. Спектры DLTS кремния, облученного электронами $\Phi = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^2$, при различных окнах регистраций t_r (мкс): 1 – $2 \cdot 10^2$; 2 – $5 \cdot 10^3$; 3 – $5 \cdot 10^5$

Fig. 1. DLTS spectra of electron irradiated silicon ($F = 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^2$) with different registration time t_r (μs): 1 – $2 \cdot 10^2$; 2 – $5 \cdot 10^3$; 3 – $5 \cdot 10^5$

Таблица. Параметры дефектов в кремнии, облученном электронами

Table. Parameters of defects in electron irradiated silicon

	Энергия ионизации, эВ		Сечение захвата, 10^{-14} см^2		Идентификация дефекта
	Эксп.	Лит.	Эксп.	Лит.	
E1	0.175	0.174	68.1	60	VO
E2	0.271	0.246	2.77	3.1	VV(=/-)
E3	0.365	0.358	1.53	2	не идентифицир.

Из анализа данных, приведенных в таблице, и из спектров DLTS следует, что преобладающий по концентрации тип дефекта для образцов, облученных электронами – А-центр. Основным процессом дефектообразования в облученном кремнии – полупроводника с узкой запрещенной зоной и сравнительно большой пороговой энергией дефектообразования – является объемный механизм повреждения кристаллической структуры в результате смещения атомов решетки. Образование дефектов в кремнии, как видно из таблицы, сопровождается образованием дополнительных энергетических уровней в энергетической запрещенной зоне полупроводника. Глубокие уровни вблизи центра энергетической запрещенной зоны (генерационно-рекомбинационные уровни) обладают большим сечением захвата неравновесных носителей заряда. Поэтому, время жизни неравновесных носителей

заряда у полупроводников является наиболее чувствительным к облучению. В связи с этим, исследования времени жизни могут быть использованы для прогнозирования качества и радиационной стойкости полупроводниковых детекторов. Можно определить коэффициент радиационного повреждения времени жизни высокоэнергетическими электронами в соответствии с выражением:

$$\tau^{-1} = \tau_0^{-1} + K_e \Phi, \quad (1)$$

где $K_e = 1.8 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$, Φ – поток облучения. Соответствующий коэффициент при облучении гамма-квантами равен $K_\gamma = 8.8 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

В ходе работы был проведен изохронный отжиг (в течение 20 минут) исследуемого образца зонного кремния, облученного электронами. График на рис. 2 показывает восстановление времени жизни неосновных носителей заряда и удаление радиационных дефектов в результате отжига. На участке от 300 до 400 °C происходит резкое восстановление до исходных значений времени жизни и полный отжиг РД.

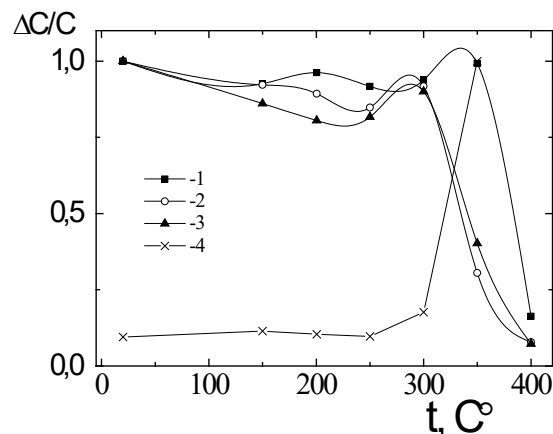


Рис. 2. Изохронный отжиг (20 мин.) дефектов (1–3) и восстановление времени жизни носителей заряда (4)

Fig. 2. Isochronous annealing (20 min.) of defects (1–3) and carrier lifetime recovery (4)

Из анализа рис. 3 видно, что наблюдаемая зависимость может быть описана линейной функцией:

$$I(\Phi) = I_0 + K_I \cdot \Phi, \quad (2)$$

где $K_I = 2 \cdot 10^{-25} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$ – коэффициент радиационного повреждения обратного тока, $I_0 = 2 \cdot 10^{10} \text{ А}$.

На рис. 4 представлены люкс-амперные характеристики при различных дозах облучения. Из анализа приведенных на рисунке зависимостей следует, что при потоках облучения вплоть до $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ они описываются линейной функцией. Однако наклон этих зависимостей, т.е. токовая чувствительность S , уменьшается с ростом потока облучения.

На рис. 5 показана зависимость токовой чувствительности от потока облучения.

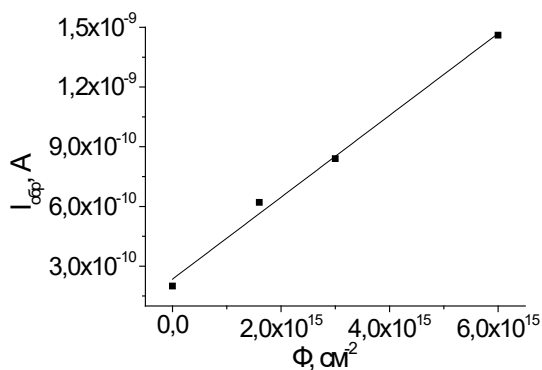


Рис. 3. Изменение обратного темного тока и его линейная интерполяция (сплошная линия) от потока облучения гамма-квантами ^{60}Co

Fig. 3. Reverse dark current change and its linear interpolation (solid) from the irradiation flux of gamma quanta ^{60}Co

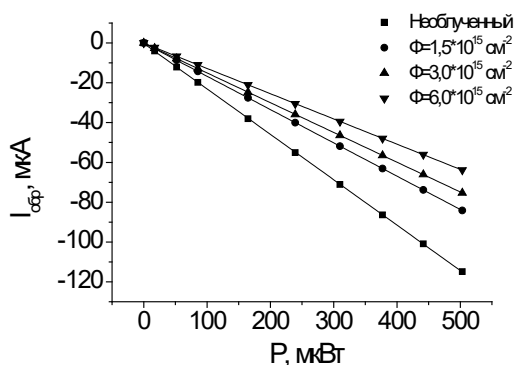


Рис. 4. Зависимости величины фототока от мощности излучения кремниевого светодиода для различных потоков облучения

Fig. 4. Dependences of the photocurrent on the radiation power of silicon LED for various irradiation fluxes

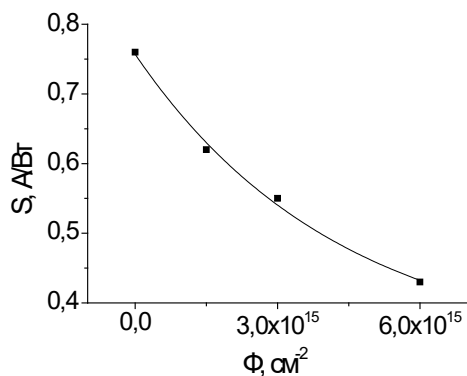


Рис. 5. Зависимость токовой чувствительности фотодиода от потока облучения

Fig. 5. Current sensitivity dependence of the photodiode from the irradiation flux

Полученная зависимость представлена на рисунке сплошной линией и описывается выражением:

$$S = A_0 \cdot \exp(-\Phi / \Phi_1), \quad (3)$$

где $A_0 = 0.43$, $\Phi_1 = 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$.

На рис. 6 приведены люкс-амперные характеристики в зависимости от температуры измерения. Видно, что токовая чувствительность сохраняет линейность при увеличении температуры вплоть до 375°C .

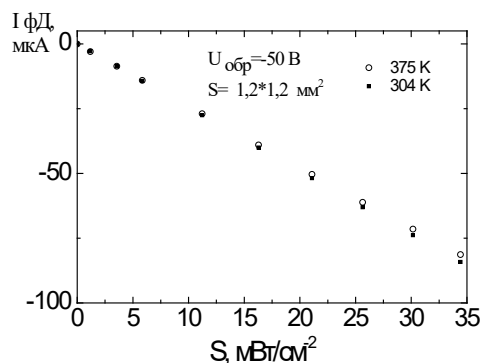


Рис. 6. Люкс-амперная характеристика фотодиода при различных температурах измерения

Fig. 6. Lux-ampere characteristic of the photodiode at different measurement temperatures

Заключение

Определены константы радиационного повреждения времени жизни и коэффициент радиационного повреждения обратного тока. Показано, что токовая чувствительность фотодиодов описывается линейной функцией в широком диапазоне потоков облучения. Однако, ее величина экспоненциально уменьшается с ростом потока облучения. Температура измерения не влияет на линейность люкс-амперной характеристики.

Библиографические ссылки

1. Кабальнов Ю.А., Труфанов А.Н., Оболенский С.В. Исследование радиационной стойкости фотодиодов на структурах кремний-на-сапфире. *Физика и техника полупроводников* 2019; 53(3): 388-395.
2. Абдинов Д.Ш., Аскеров К.А., Гаджиева И.И., Бекташи М.Г. Радиационно-стойкие фотоприемники на область спектра 0,35-1,1 мкм. *Прикладная физика* 2008; 5: 106-109.

References

1. Kabalnov Yu.A., Trufanov A.N., Obolensky S.V. Issledovanie radiatsionnoy stoykosti fotodiodov na strukturakh kremniy-na-sapfire. [Radiation hardness of silicon-on-sapphire photodiodes]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* 2019; 53(3): 388-395. (In Russian).
2. Abdinov D.Sh., Askerov K.A., Gadzhieva V.I., Bektashi M.G. Radiatsionno-stoykie fotopriemniki na oblast' spektra 0,35-1,1 mkm. [Radiation-resistant photodetectors for the 0.35-1.1 μm area]. *Prikladnaya fizika* 2008; 5: 106-109. (In Russian).