

конверсионной люминесценции эрбия может усиливаться на порядок для пленочного микрорезонатора с резонансной модой в видимом диапазоне. Пленочные структуры и мишени, демонстрирующие ап-конверсионную люминесценцию, представляют интерес для визуализаторов ИК-излучения, а также его преобразования в видимое для фоточувствительных структур электроники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Up-conversion enhancement in $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ doped 1-D microcavity based on alternating aluminosilicate glass and titania sol-gel layers / R.E. Rojas-Hernandez [et al.] // *Ceram. Int.* – 2020. – V. 46. – P. 26273–26281.
2. Sol-gel fabrication and luminescence properties of multilayer Eu-doped $\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2$ xerogel nanostructures / Yu.D. Karnilava [et al.] // *Int. J. Nanosci.* – 2019. – V. 18. – P. 1940044 (4 pages).
3. Enhanced luminescence of europium in sol-gel derived $\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2$ multilayer cavity structure / N.V. Gaponenko [et al.] // *Opt. Mater.* – 2019. – V. 96C. – P. 109265 (5 pages).
4. Optical properties and upconversion luminescence of BaTiO_3 xerogel structures doped with erbium and ytterbium / E.I. Lashkovskaya [et al.] // *Gels.* – 2022. – V. 8. – P. 347 (15 pages).
5. Ап-конверсионная люминесценция ионов Er^{3+} в порошке ксерогеля титаната бария и мишени, сформированной методом взрывного прессования / Н.В. Гапоненко [и др.] // *ЖПС.* – 2022. – Т. 89, № 2. – С. 184–190.

ВЛИЯНИЕ ГАММА-КВАНТОВ НА ТЕМНОВОЙ ТОК КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ С ОПТИЧЕСКОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ ЯЧЕЕК

Д. А. Огородников¹, Ю. В. Богатырев¹, С. Б. Ластовский¹,
А. М. Лемешевская², В. С. Цымбал², А. В. Кетько², С. В. Шпаковский²

¹) Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, ул. П. Бровки, 19, 220072 Минск, Беларусь, e-mail: ogorodnikov@iftpr.bas-net.by

²) ОАО «Интеграл», ул. Казинца, 121А, 220108 Минск, Беларусь, e-mail: office@bms.by

Представлены результаты исследования влияния гамма-излучения Co^{60} на темновой ток кремниевых фотоэлектронных умножителей (Si ФЭУ). Активные ячейки Si ФЭУ представляли собой оптически изолированные друг от друга p^+-n-n^+ -структуры. Оптическая изоляция ячеек осуществлялась канавками, которые после пассивации стенок слоями SiO_2 и Si_3N_4 заполнялись вольфрамом. Вывод металла канавки электрически соединялся с n^+ -областью ячейки. Установлено, что наиболее сильные изменения обратной вольтамперной характеристики наблюдаются у образцов Si ФЭУ, облучаемых в активном электрическом режиме. Показано, что изменения темнового тока с ростом поглощенной дозы носят немонотонный характер. Полученные результаты объясняются влиянием электрического поля на величину выхода дырочного заряда в диэлектрических слоях канавок.

Ключевые слова: кремниевый фотоумножитель; гамма-излучение; темновой ток; обратная вольт-амперная характеристика.

INFLUENCE OF GAMMA RAYS ON THE DARK CURRENT OF OPTICALLY INSULATED SILICON PHOTOMULTIPLIERS

D. A. Ogorodnikov¹, Yu. V. Bogatyrev¹, S. B. Lastovskij¹, A. M. Lemeshevskaja²,
V. S. Tsymbal², A. V. Ket'ko², S. V. Shpakovskiy²

¹⁾ Scientifically-practical centre HAH of Belarus on materials technology, P. Brovki's street, 19,
220072 Minsk, Belarus

²⁾ Open Society "Integral", Kazintsa street, 121A, 220108 Minsk, Belarus
Corresponding author: D. A. Ogorodnikov (ogorodnikov@ifftp.bas-net.by)

The results of experimental studies of dark current of p^+-n-n^+ -silicon photomultiplier (SiPM) with optical isolation of cells by metallized trenches under the influence of gamma radiation of Co^{60} are presented. Optical isolation of the cells was performed by trenches, which were filled with tungsten after passivation of the walls with layers of SiO_2 and Si_3N_4 . The output of the trench metal was electrically connected to the n^+ -region of the cell. It was found that the strongest changes in the reverse current-voltage characteristic were observed for SiPM samples irradiated in the active electrical mode. It is shown that the changes in the dark current with an increase in the absorbed dose are non-monotonic in nature. The results obtained can be explained by the influence of the electric field on the hole charge yield in the dielectric layers of the trenches.

Key words: silicon photomultiplier; gamma radiation; dark current; reverse current-voltage characteristic.

ВВЕДЕНИЕ

Кремниевые фотозлектронные умножители (Si ФЭУ) относятся к приборам с внутренним усилением и предназначены для регистрации предельно слабого оптического излучения. Прибор содержит на одном кремниевом кристалле матрицу ячеек, каждая из которых представляет собой диод и включенный последовательно с ним резистор с сопротивлением до 10 МОм. Все ячейки матрицы соединены параллельно. Si ФЭУ находят весьма широкое практическое применение, в том числе в приемниках детектирования ионизирующих частиц, космическом приборостроении и астрофизических исследованиях [1].

Одним из недостатков Si ФЭУ является оптическая связь между ячейками (Crosstalk) [2]. Генерируемые при лавинном пробое ячеек «горячими» носителями заряда фотоны распространяются внутри объема Si ФЭУ и вызывают срабатывание других соседних ячеек, что вызывает появление ложных импульсов на выходе прибора. Одним из способов устранения этого недостатка является оптическая изоляция ячеек между собой разделительными канавками [3], в том числе заполненными металлом.

Основное влияние ионизирующих излучений на параметры Si ФЭУ проявляется в ухудшении счетных характеристик приборов в результате увеличения темновых токов [4]. Генерируемые электроны и дырки в области пространственного заряда обратно смещенных ячеек посредством глубоких уровней вводимых радиационных дефектов создают ложные счетные импульсы. В работе [5] исследовалось влияние гамма-излучения Co^{60} на величину темнового тока Si ФЭУ, ячейки которых представляли n^+-p-p^+ -структуры с оптической изоляцией металлизированными канавка-

ми. Авторами показано, что при положительном потенциале на металле канавки темновой ток увеличивается с ростом дозы облучения в результате усиления поверхностных токов утечки вблизи границ ячеек с окислом разделительных канавок. В данной работе представлены результаты исследований влияния гамма-излучения Co^{60} на темновой ток Si ФЭУ с ячейками типа p^+n-n^+ -структур, оптически разделенных металлизированными канавками.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом испытаний являлись опытные образцы малогабаритного кремниевого фотоумножителя, изготовленные в ОАО «ИНТЕГРАЛ» — управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ». Размеры кристаллов Si ФЭУ составляли $S_{\text{кр}} = 1,44 \times 1,44$ мм², со светочувствительной площадью 1×1 мм² и размером одного пикселя 35×35 мкм² (всего 1004 пикселя). Fill-factor образцов Si ФЭУ равен 61,6%. Пиксели представляют собой p^+n-n^+ -диодные структуры, изготовленные в эпитаксиальной плёнке сформированной на низкоомной подложке n-типа. Последовательно в цепи с каждым диодом выполнен высокоомный гасящий резистор. Фотоактивная поверхность диода покрыта слоями составного окисла с целью получения просветляющего покрытия, обладающего минимальным коэффициентом отражения на длине волны $\lambda \sim 450\text{--}550$ нм. Напряжение лавинного пробоя исследуемых Si ФЭУ составляло порядка $U_{\text{проб}} = 25 \pm 1,0$ В.

Конструктивной особенностью исследуемых образцов Si ФЭУ является наличие оптической экранировки ячеек друг от друга с помощью разделительных металлизированных канавок в виде решетки для устранения паразитного оптического взаимодействия. Канавки U-типа формировались ионно-плазменным реактивным травлением кремния в хлорсодержащей среде. Стенки получаемой канавки покрывались слоями окисла. С целью оптической экранировки канавка заполняется вольфрамом. Вывод металла канавки соединялся с n^+ -областью ячейки. Кристаллы Si ФЭУ помещались в стандартные корпуса ТО-1-2.

Облучение проводилось в активном и пассивном электрических режимах. В активном режиме на образцы подавалось обратное смещение $U_{\text{обр}}$, превышающее значение $U_{\text{проб}}$. Испытания проводились при значениях превышающего напряжения $|U_{\text{обр}} - U_{\text{проб}}| = 3$ В. Также отдельные образцы облучались при $U_{\text{обр}} < U_{\text{проб}}$. Значение обратного (темнового) тока $I_{\text{обр}}$ во время облучения регистрировалось вольтметром. В процессе облучения в пассивном электрическом режиме все выводы образцов были короткозамкнуты.

Измерения обратной вольтамперной характеристики (ВАХ) образцов Si ФЭУ проводились до и после облучения с помощью автоматизированного измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-1/6 при нормальных условиях в темноте.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Обратные ВАХ образцов Si ФЭУ до и после воздействия гамма-излучения Co^{60} в пассивном электрическом режиме представлены на рис. 1, а. До облучения гамма-квантами Si ФЭУ имеют типичный для кремниевых диодов вид обратной характеристики, на которой можно выделить два характерных участка. На первом участке ток утечки слабо зависит от прикладываемого обратного напряжения $U_{\text{обр}}$, а на втором —

резко увеличивается с ростом $U_{обр}$, что соответствует механизму лавинного умножения подвижных носителей заряда.

Обратная ВАХ образцов Si ФЭУ в результате воздействия гамма-излучения Co^{60} в пассивном режиме (рис. 1, а) изменяется, главным образом, в допробойной области. С ростом поглощённой дозы гамма-квантов наблюдается практически монотонное увеличение $I_{обр}$. На рисунке 1, б представлены зависимости величины $I_{обр}$ при различных значениях $U_{обр}$ от поглощённой дозы. Видно, что при $D = 10^6$ рад значение $I_{обр}$ увеличилось всего лишь на 4–5 нА при $U_{обр} = 25$ В.

На рис. 2, а приведены обратные характеристики образца Si ФЭУ, облучаемого гамма-квантами Co^{60} в активном электрическом режиме. Здесь зависимости $I_{обр}(D)$ имеют немонотонный вид (рис. 2, б). До дозы $D = (2-6) \cdot 10^4$ рад значение обратного тока при $U = 25$ В увеличивается на 4 порядка, а при $D = (6-20) \cdot 10^4$ рад уменьшается до $I = 10^{-8}$ А, после чего остается практически неизменным вплоть до дозы $D = 1 \cdot 10^6$ рад.

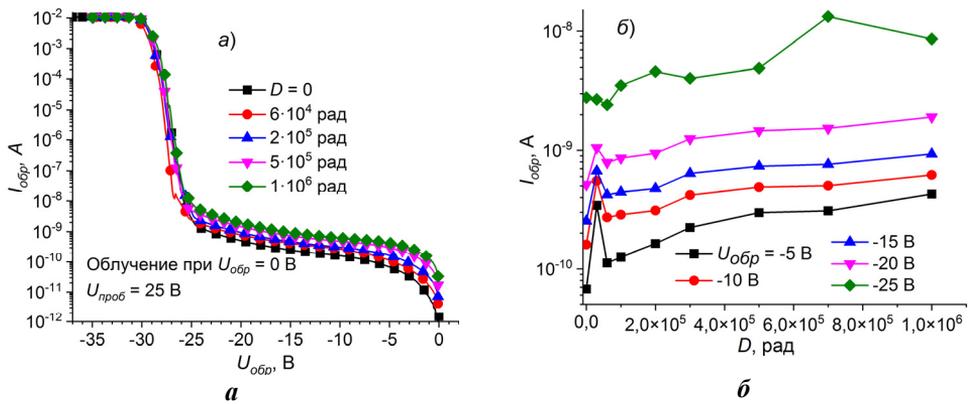


Рисунок 1. Изменения обратной ВАХ (а) и обратного тока (б) при разных значениях $U_{обр}$ образца Si ФЭУ в результате облучения гамма-квантами Co^{60} в пассивном электрическом режиме

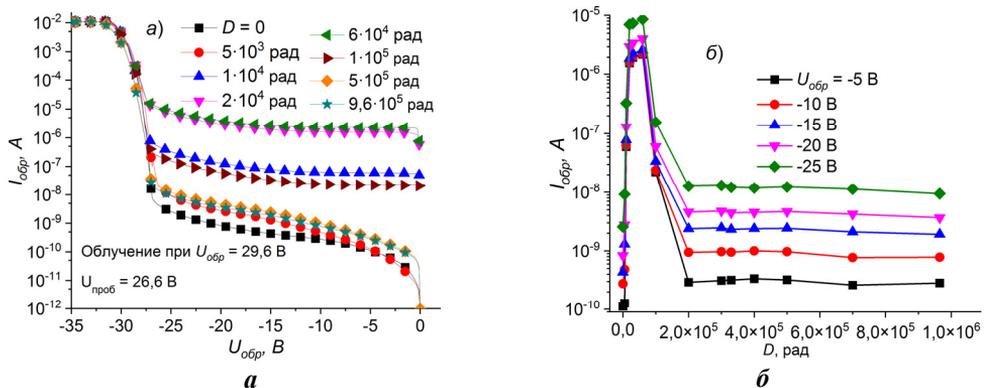


Рисунок 2. Изменения обратной ВАХ (а) и обратного тока (б) при разных значениях $U_{обр}$ образца Si ФЭУ в результате облучения гамма-квантами Co^{60} в активном электрическом режиме

В слоях окислов, граничащих с p^+ -областью ячеек, при обратном смещении образцов Si ФЭУ вектор напряженности электрического поля направлен от металла канавки к границе p^+ -области кремния и окисла. Наблюдаемые особенности зависимости $I_{обр}(D)$ при активном режиме облучения, вероятнее всего, связаны с влиянием электрического поля на скорость накопления положительного заряда в слоях окислов разделительных канавок и на границе раздела кремний-окисел.

Проводилось моделирование распределения электрического поля в окисле разделительной канавки. Использовалась двумерная модель двух ячеек Si ФЭУ с разделительной канавкой между ними (рис. 3). Цифрой 1 обозначена p^+ -область ячеек, 2 – n -область, 3 – n^+ -область подложки и 4 – слой окисла SiO₂. Области структуры отделены друг от друга вертикальными линиями. Толщины областей на рисунке указаны в соответствии с масштабом по осям OX и OY (мкм). Толщина вольфрама в канавке (прямая Y = 0) составляла 0,05 мкм, а толщина слоев окисла с каждой стороны металла 0,375 мкм.

Расчет осуществлялся в программном комплексе «Silvaco» [6]. Воздействие на ячейки Si ФЭУ рентгеновских квантов с энергией 10 кэВ до поглощенной дозы 10⁵ рад моделировалось в программном модуле «VictoryDevice». Мощность поглощенной дозы составляла 1 рад/с. Облучение проводилось в активном и пассивном электрических режимах. В активном режиме облучения приборы находились под обратным смещением $U_{обр} = -30$ В, а в пассивном — смещение отсутствовало ($U_{обр} = 0$ В). Напряженность электрического поля в слое SiO₂ облученных Si ФЭУ рассчитывалась во всех случаях при обратном смещении $U_{обр} = -30$ В.

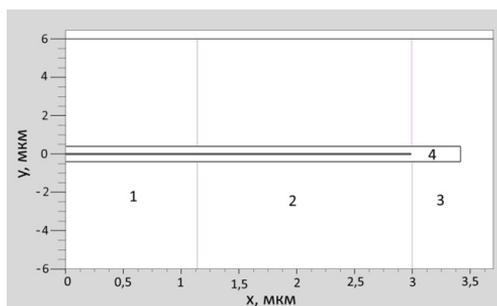


Рисунок 3. Двумерная модель двух ячеек Si ФЭУ с разделительной канавкой между ними

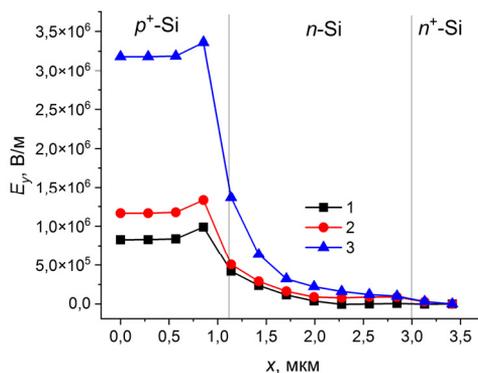


Рисунок 4. Распределение проекции напряжённости электрического поля на ось OY в слое окисла SiO₂ двумерной модели ячеек

На рис. 4 приведено распределение вдоль оси OX проекции напряжённости электрического поля на ось Y в слое окисла на расстоянии 0,1 мкм от границы раздела для двумерной модели ячеек Si ФЭУ до (кривая 1) и после облучения в пассивном (2) и в активном (3) электрических режимах. Для наглядности на графике выделены области ячеек, с которыми граничит окисел вдоль оси OX в соответствии с рис. 3. В целом рассчитанные зависимости 1–3 имеют одинаковый характер. Как и предполагалось, максимальные значения E_y соответствуют участку окисла, граничащего с p^+ -областью ячейки. Далее с ростом координаты x значение E_y вначале участка, граничащего с областью пространственного заряда p – n -перехода, немного увеличивается,

а потом монотонно уменьшается на несколько порядков на всех остальных участках. Облучение меняет вид кривых $E_y(x)$ и наиболее значимо это сказывается при активном режиме. Так, при пассивном режиме облучения значения E_y при $x \leq 0,85$ мкм возросли в 1,3 раза, а в активном — 3,4 раза. Столь существенное увеличение при активном режиме облучения напряженности электрического поля обусловлено более эффективным накоплением дырочного заряда вблизи границы p^+ -окисел. Этот накопленный заряд усиливает напряженность электрического поля и в приграничной области активных ячеек, что увеличивает темновой ток Si ФЭУ.

Наряду с процессами накопления положительного заряда в окислах в процессе облучения и без него происходит также нейтрализация этого заряда посредством механизмов термогенерации и туннелирования носителей заряда на уровни поверхностных ловушек [7]. Уменьшение темнового тока образцов Si ФЭУ, облучаемых в активном электрическом режиме, вероятнее всего вызвано туннелированием электронов из валентной зоны p^+ -Si на уровни дырочных ловушек окисла вблизи границы раздела и, следовательно, уменьшением напряженности электрического поля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние гамма-излучения Co^{60} на темновой ток кремниевых фотомножителей. Активные ячейки Si ФЭУ представляли собой оптически изолированные друг от друга p^+-n-n^+ -структуры. Оптическая изоляция ячеек осуществлялась канавками, которые после пассивации стенок слоями окисла заполнялись вольфрамом. Вывод металла канавки электрически соединялся с n^+ -областью ячейки. Установлено, что темновой ток образцов, облучаемых в пассивном электрическом режиме, весьма незначительно увеличивается с ростом поглощенной дозы: при $D = 10^6$ рад значение $I_{обр}$ увеличилось всего лишь на 4–5 нА (при $U_{обр} = 25$ В). Наиболее сильные изменения обратной вольтамперной характеристики наблюдаются у образцов Si ФЭУ, облучаемых в активном электрическом режиме. Показано, что изменения обратного тока с ростом поглощенной дозы носят немонотонный характер: до дозы $D = (2 \div 6) \cdot 10^4$ рад значение $I_{обр}$ увеличивается на 4 порядка, а при $D = (6 \div 20) \cdot 10^4$ рад уменьшается до $I_{обр} = 10^{-8}$ А (при $U_{обр} = 25$ В), после чего остается практически неизменным вплоть до дозы $D = 1 \cdot 10^6$ рад.

Для объяснения полученных результатов в программном комплексе «Silvaco» проведено моделирование распределения электрического поля в окисле разделительной канавки на примере двумерной модели двух ячеек SiФЭУ с канавкой между ними. Показано, что в процессе облучения в активном режиме электрическое поле в слое окисла канавки увеличивает скорость накопления положительного поверхностного заряда на границе кремний-окисел, что увеличивает темновой ток. Нейтрализация поверхностного заряда в результате туннелирования электронов из валентной зоны Si на уровни ловушек уменьшает величину напряженности поля и, следовательно, обратные токи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Гулаков, И.Р. Фотоприемники квантовых систем / И.Р. Гулаков. — Минск: УО ВГКС, 2012. — 276 с.
2. Hampel, M.R. Optical crosstalk in SiPMs / M.R. Hampel, A. Fuster, C. Varela, M. Platino A. Almela, A. Lucero, B. Wundheiler, A. Etchegoyen // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A976. —2020. —P. 164-262.
3. Popova, E. The cross-talk problem in SiPMs and their use as light sensors for imaging atmospheric Cherenkov telescopes. / E. Popova, P. Buzhan, B. Dolgoshein, A. Ilyin, V. Kaplin, S. Klemin, R. Mirzoyan, M. Teshima // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A610. —2009. —P. 131-134.

4. Garutti, E. Radiation damage of SiPMs / E. Garutti, Y. Musienko // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A926. –2019. –Р. 69-84.
5. Огородников, Д.А. Радиационные эффекты в кремниевых фотоэлектронных умножителях. / Д.А. Огородников, Ю.В. Богатырев, А.В. Кетько, С.Б. Ластовский, А.М. Лемешевская, В.С. Цымбал. // Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. IX Междунар. науч. конф., Минск, БГУ, 14 – 17 окт. 2020 г. С. 189-192.
6. SILVACO International. ATLAS User's Manual. Device Simulation Software. [Электронный ресурс]. Доступно по адресу: <http://www.silvaco.com>. (Дата обращения 13.05.2021).
7. Таперо К.И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения / К.И. Таперо, В.Н. Улимов, А.М. Членов. — Москва: БИНОМ, 2012. — 304 с

ВЛИЯНИЕ γ -ОБЛУЧЕНИЯ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ $p-i-n$ -ФОТОДИОДОВ

**В. Б. Оджаев¹, Н. И. Горбачук¹, С. Б. Ластовский², А. Н. Петлицкий³,
В. С. Просолович¹, Н. С. Ковальчук³, М. И. Тарасик¹, Д. В. Шестовский³,
В. Ю. Явид¹, Ю. Н. Янковский¹**

¹⁾ *Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Беларусь, e-mail: prosolovich@bsu.by*

²⁾ *Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению, ул. П.Бровки, 19, 220072, Минск, Беларусь, e-mail: lastov@physics.by*

³⁾ *ОАО «Интеграл» - управляющая компания холдинга «Интеграл», ул. И.П. Казинца, 121А, 220108, Минск, Беларусь, e-mail: 1279489@mail.ru*

Исследовано воздействие γ -излучения ^{60}Co на электрофизические характеристики $p-i-n$ -фотодиодов на основе кремния с вертикальной структурой и охранным кольцом. Приборы изготавливались на кремнии p -типа проводимости ориентации (100) с $\rho = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, выращенном методом бестигельной зонной плавки. Установлено, что в результате облучения $p-i-n$ -фотодиодов дозой $10^{15} \text{ квант/см}^2$ обратный ток возрос более, чем на порядок. Форма кривой вольт-амперной характеристики качественно не изменилась – имеют место три области с различной зависимостью тока от напряжения, которая во всех случаях удовлетворительно описывается $I_R \sim (V_R)^n$. Возрастание обратного тока в области I обусловлено образованием в процессе облучения рекомбинационных центров радиационного происхождения. В области II, связанной с остаточными технологическими дефектами, значение n изменяется от 2 до 4,4. Вероятно, в процессе облучения остаточные дефекты «оделись в шубу» из радиационных дефектов. Область III, связанная с остаточными дефектами, также претерпела существенные изменения, величина n возрастает от 0,8 до 2,2. Измерением вольт-фарадных характеристик установлено, что область обеднения при напряжениях смещения менее 1 В увеличилась, а при напряжениях свыше 1 В – уменьшилась. Это обусловлено изменением контактной разности потенциалов при облучении вследствие компенсации радиационными дефектами i -области.

Ключевые слова: $p-i-n$ -фотодиоды; вольт-амперные характеристики; вольт-фарадные характеристики; облучение гамма-квантами.