

ISSN 1561-2430 (Print)  
ISSN 2524-2415 (Online)  
УДК 621.383.292  
<https://doi.org/10.29235/1561-2430-2022-58-3-337-343>

Поступила в редакцию 17.03.2022  
Received 17.03.2022

Д. А. Огородников

*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,  
Минск, Республика Беларусь*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ЗАРЯДА В КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЯХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ МЯГКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**Аннотация.** В программном комплексе Silvaco создана модель структуры ячеек кремниевых фотоэлектронных умножителей (SiФЭУ). Ячейки представляли собой оптически изолированные друг от друга  $n^+p-p^+$ -структуры. Оптическая изоляция ячеек осуществлялась канавками, которые после пассивации боковых стенок слоем  $\text{SiO}_2$  заполнялись металлом. Моделирование проводилось для двух вариантов конструкции структур SiФЭУ: вывод металла канавки электрически соединялся 1) с  $n^+$ -областью ячейки, 2) с  $p^+$ -областью. Ячейки облучались рентгеновскими квантами с энергией 10 кэВ дозой  $10^5$  рад при значениях обратного электрического смещения  $U_b = -30$  В (активный электрический режим) и  $U_b = 0$  В (пассивный электрический режим). Получено распределение объемной плотности накопленного заряда  $Q$  в слое окисла разделительной канавки. Установлено, что максимальное значение  $Q > 0$  зависит от режима облучения. В пассивном режиме величина  $Q$  минимальна и совпадает для обоих вариантов структур, в активном режиме она возрастает по сравнению с пассивным в 2,5 раза для SiФЭУ со структурой второго варианта и в 5,9 раза со структурой первого. Полученный результат объясняется усилением выхода заряда  $Q$  дырок под действием электрических полей в слоях окислов разделительных канавок ячеек SiФЭУ.

**Ключевые слова:** кремниевый фотоэлектронный умножитель, граница раздела Si/SiO<sub>2</sub>, внешнее электрическое поле, накопленный заряд, рентгеновское излучение

**Для цитирования.** Огородников, Д. А. Моделирование накопления заряда в кремниевых фотоэлектронных умножителях под воздействием мягкого рентгеновского излучения / Д. А. Огородников // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. – 2022. – Т. 58, № 3. – С. 337–343. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2022-58-3-337-343>

Dzmitryi A. Aharodnikau

*Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus,  
Minsk, Republic of Belarus*

## SIMULATION OF CHARGE ACCUMULATION IN SILICON PHOTOMULTIPLIERS UNDER THE INFLUENCE OF SOFT X-RAYS

**Abstract.** A model of the cell structure of silicon photomultipliers (SiPM) is herein created in the software complex “Silvaco”. The cells are  $n^+p-p^+$ -structures optically isolated from each other. The optical isolation of the cells is realized by trenches filled with metal after passivation of the walls with a  $\text{SiO}_2$  layer. Simulations are carried out for two variants of SiPM structures when the trench metal is electrically connected to the  $n^+$ - (the first design) or  $p^+$  (the second design) region of the cell. The cells are irradiated by X-ray quanta with 10 keV energy up to a dose of  $10^5$  rads at the reverse bias values of  $U_b = -30$  V (active electrical mode) and  $U_b = 0$  V (passive electric mode). We obtain the distribution of the volume density of the accumulated charge  $Q$  in the oxide layer of the separation trench. It is established that the maximal  $Q$  value depends upon the irradiation mode. In the passive mode, the  $Q$  value is minimal and similar for both variants of the structures. In the active mode,  $Q$  increases in comparison to the passive mode by 2.5 times for SiPM with the structure of the second variant and by 5.9 times for the structure of the first variant. The obtained result can be explained by an increase of the hole charge yield under the influence of the appropriately distributed electric fields in the oxide layers of the separating trenches of the investigated SiPM’s cells.

**Keywords:** silicon photomultiplier, Si/SiO<sub>2</sub> interface, external electric field, accumulated charge, X-ray quanta

**For citation.** Aharodnikau D. A. Simulation of charge accumulation in silicon photomultipliers under the influence of soft X-rays. *Vestsi Natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-matematychnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Mathematics series*, 2022, vol. 58, no. 3, pp. 337–343 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2022-58-3-337-343>

**Введение.** Кремниевый фотоэлектронный умножитель (SiФЭУ) представляет собой матрицу параллельно включенных ячеек, каждая из которых содержит лавинный фотодиод с последовательно включенным гасящим резистором. SiФЭУ предназначены для регистрации предельно слабого оптического излучения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, ионизирующих излучений и единичных фотонов [1]. В ряде работ рассматривалось воздействие различных видов проникающих излучений (гамма-квантов, электронов, протонов, нейтронов) на параметры SiФЭУ (см.: обзор [2]). Во всех случаях основным радиационным эффектом в SiФЭУ является увеличение темнового счета – DCR (Dark Count Rate). Темновой счет, или темновой ток, – это сигнал на выходе SiФЭУ в отсутствие светового сигнала на входе. Темновой счет связан с умножением носителей, которые генерируются в объеме кремния в отсутствие внешнего возбуждения, например, в результате термогенерации.

Недостатком SiФЭУ является оптическая связь между ячейками [1]. Фотоны, порожденные при рекомбинации «горячих» электронов и дырок при гейгеровском разряде в одной из ячеек, проникают в соседние и генерируют там электронно-дырочные пары. Фотоэлектроны и дырки запускают дополнительные гейгеровские разряды и на выходе прибора регистрируются ложные импульсы. Одним из способов подавления оптической связи является создание разделительных канавок между ячейками [3]. Канавки после пассивации стенок слоем  $\text{SiO}_2$  могут заполняться металлом.

Наличие границы раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  в фотоактивной части каждой ячейки SiФЭУ с разделительными металлизированными канавками может быть основным фактором радиационной деградации приборов из-за накопления поверхностного заряда при воздействии ионизирующих излучений [4]. Скорость накопления поверхностного заряда увеличивается при наличии электрических полей в слоях диэлектриков, т. е. при соединении вывода канавок с одним из электродов фотодиодов. В этой связи представляет интерес моделирование распределений накопленного заряда и электрического поля вблизи границы раздела ячейки со слоем диэлектрика канавки после воздействия ионизирующих излучений на SiФЭУ.

Цель данной работы – с помощью программного комплекса Silvaco рассчитать распределение накопленного заряда и напряженности электрического поля вблизи границы раздела ячеек с окислом металлизированных разделительных канавок после облучения SiФЭУ рентгеновскими квантами с энергией 10 кэВ.

**Методика исследований.** Объектами моделирования являлись ячейки SiФЭУ, которые представляли собой оптически изолированные друг от друга  $n^+p-p^+$ -структуры. Оптическая изоляция ячеек осуществлялась канавками, которые после пассивации стенок слоем  $\text{SiO}_2$  заполнялись вольфрамом. Рассматривались два варианта структуры SiФЭУ. В первом варианте вывод металла канавки электрически соединялся с  $n^+$ -областью ячейки, во втором – с  $p^+$ -областью. Далее в тексте статьи данные конструкции SiФЭУ будут упоминаться под названиями «первый вариант» и «второй вариант» соответственно. На рис. 1 показана двумерная модель двух ячеек SiФЭУ с разделительной канавкой между ними. Данная модель использовалась для проведения расчета распределения электрического поля. Цифрой 1 обозначена  $n^+$ -область ячейки (концентрация атомов фосфора  $[P] = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ), цифрой 2 –  $p$ -область ( $[B] = 2,7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ), цифрой 3 –  $p^+$ -область подложки ( $[B] = 1,3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) и 4 – слой окисла  $\text{SiO}_2$ . Области  $n^+p-p^+$ -структуры отделены друг от друга вертикальными линиями. Толщины областей на рис. 1 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 [5]. Воздействие на ячейки SiФЭУ рентгеновских квантов с энергией 10 кэВ до поглощенной дозы  $10^5$  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  $U_b = -30 \text{ В}$ , в пассивном – смещение отсутствовало ( $U_b = 0 \text{ В}$ ). Напряженность электрического поля в слое  $\text{SiO}_2$  облученных SiФЭУ рассчитывалась во всех случаях при обратном смещении  $U_b = -30 \text{ В}$ .

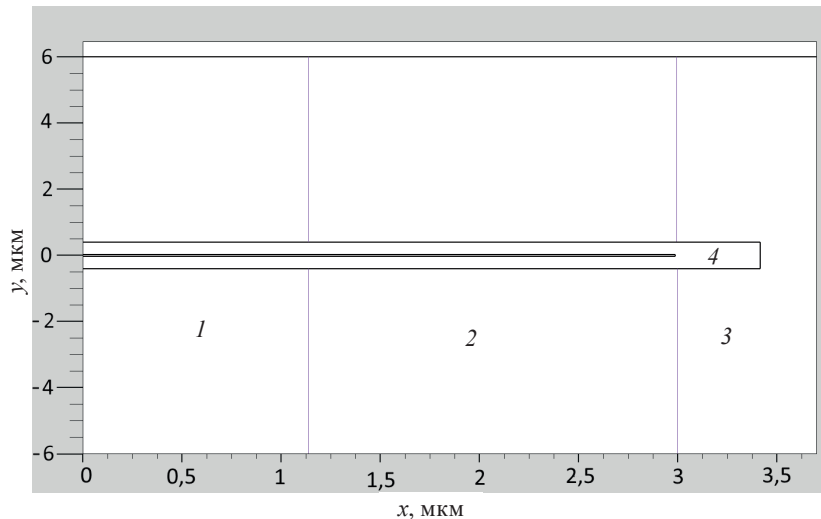


Рис. 1. Двумерная модель двух ячеек SiФЭУ с разделительной канавкой между ними

Fig. 1. Two-dimensional model of two SiPM cells with a separating trench between them

**Результаты моделирования и их обсуждение.** Основным радиационным эффектом структуры Si/SiO<sub>2</sub> является накопление заряда в слое диэлектрика и на границе раздела полупроводник – диэлектрик в результате воздействия радиации. Накопленный в Si/SiO<sub>2</sub> заряд влияет на электрофизические характеристики приборных структур. Считается, что при наличии электрического поля в слое диэлектрика основная доля заряда накапливается вблизи границы раздела с кремнием [4].

Рассмотрим распределение объемной плотности накопленного заряда  $Q$  в слое окисла разделительной канавки SiФЭУ, облученного рентгеновскими квантами при  $U_b = 0$  В. На рис. 2, а приведены результаты для первого варианта структуры SiФЭУ. На графике оси  $Ox$  и  $Oy$  соответствуют аналогичным осям на рис. 1. Значение  $Q$  рассчитывалось для слоя окисла SiO<sub>2</sub> толщиной 0,2 мкм, граничащего с кремнием активной области ячейки SiФЭУ. Цифрами на графиках (рис. 2) обозначены распределения плотности накопленного заряда, взятые на различных расстояниях от границы раздела SiO<sub>2</sub>/Si: 1 – 0,01 мкм; 2 – 0,025 мкм; 3 – 0,05 мкм; 4 – 0,75 мкм; 5 – 0,1 мкм; 6 – 0,15 мкм; 7 – 0,2 мкм. Согласно полученным результатам, величина накопленного заряда зависит от координат  $x$  и  $y$ . При этом зависимости  $Q(x)$  имеют немонотонный вид с максимумом при  $x = 3$  мкм. Положение максимума граничит с  $p-p^+$ -переходом активной ячейки. По мере удаления от границы раздела Si/SiO<sub>2</sub> вид зависимостей  $Q(x)$  сохраняется, но величина накопленного заряда монотонно уменьшается при всех значениях координаты  $x$ .

При пассивном электрическом режиме облучения вид зависимостей  $Q(x)$ , приведенных на рис. 2, а, остается таким же и для SiФЭУ со структурой второго варианта.

Рассмотрим распределения объемной плотности накопленного заряда в слое окисла разделительной канавки SiФЭУ, облученного рентгеновскими квантами в активном режиме при  $U_b = -30$  В. На рис. 2, б приведены результаты для SiФЭУ со структурой первого варианта. Характер распределения плотности накопленного заряда при таком электрическом режиме облучения приборов во многом совпадает с результатами пассивного режима облучения. Здесь величина  $Q$  также зависит от координат  $x$  и  $y$ , а кривые  $Q(x)$  имеют немонотонный вид с максимумом при  $x = 3$  мкм. Однако в активном режиме облучения максимальное значение  $Q$  в 5,9 раза больше, чем в результате облучения при  $U_b = 0$  В.

На рис. 2, в показаны результаты облучения SiФЭУ второго варианта конструкции в активном электрическом режиме при напряжении обратного смещения  $U_b = -30$  В. Здесь на расстоянии  $y \leq 0,1$  мкм от границы раздела Si/SiO<sub>2</sub> характер распределения плотности накопленного заряда аналогичен рассмотренным выше случаям: кривые  $Q(x)$  имеют такой же немонотонный вид

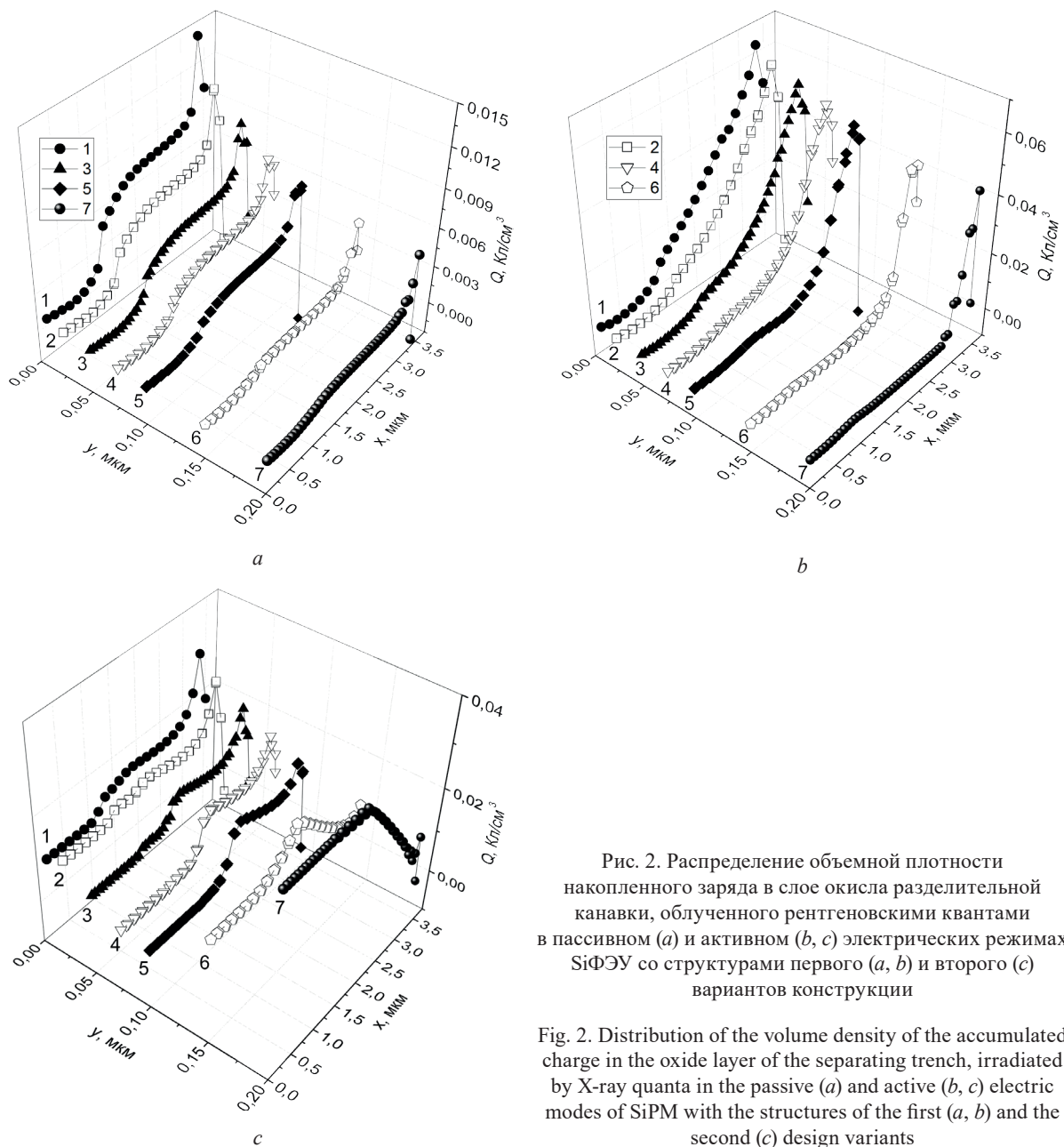


Рис. 2. Распределение объемной плотности накопленного заряда в слое окисла разделительной канавки, облученного рентгеновскими квантами в пассивном (a) и активном (b, c) электрических режимах SiФЭУ со структурами первого (a, b) и второго (c) вариантов конструкции

Fig. 2. Distribution of the volume density of the accumulated charge in the oxide layer of the separating trench, irradiated by X-ray quanta in the passive (a) and active (b, c) electric modes of SiPM with the structures of the first (a, b) and the second (c) design variants

с максимумом при  $x = 3$  мкм. Максимальное значение  $Q(x)$  в 2,5 раза больше, чем при пассивном режиме облучения образцов. Следует отметить, что у SiФЭУ со структурой второго варианта наблюдается немонотонное изменение величины накопленного заряда также и по толщине слоя окисла, т. е. вдоль оси  $OY$ . По мере удаления от границы раздела Si/SiO<sub>2</sub> вплоть до  $y = 0,1$  мкм величина  $Q$  уменьшается, а при  $y > 0,1$  мкм – увеличивается.

Из представленных на рис. 2 расчетных данных следует, что во всех случаях значения объемной плотности накопленного заряда  $Q$  вблизи границы раздела Si/SiO<sub>2</sub> достигают своего максимума при  $x = 3$  мкм. Это максимальное значение зависит от электрического режима облучения SiФЭУ со структурами первого и второго вариантов. При облучении в пассивном режиме величина  $Q$  минимальна и совпадает для обоих вариантов структур. В активном режиме облучения максимальная величина  $Q$  относительно пассивного возрастает в 2,5 раза для SiФЭУ со структурой второго варианта, а для первого – в 5,9 раза.

При воздействии проникающих излучений в объеме SiO<sub>2</sub> генерируются электронно-дырочные пары. Часть носителей заряда рекомбинирует, а оставшаяся часть разделяется. В силу своей высо-

кой подвижности электроны в течение очень короткого времени покидают диэлектрик и попадают в граничащие с ним металл разделительной канавки и активную область ячейки. Подвижность дырок на порядки ниже, чем у электронов, поэтому дырки активно захватываются на ловушки, имеющиеся в слое SiO<sub>2</sub>.

Часть электронов и дырок, которые не успели прорекомбинировать в окисле, называют электронно-дырочным выходом, или выходом электронно-дырочных пар [4]. Выход положительного заряда дырок в структуре Si/SiO<sub>2</sub> существенно возрастает при наличии в слое диэлектрика электрического поля. В этом случае сгенерированные электроны и дырки сразу разделяются силами поля и дрейфуют в противоположных направлениях.

Для объяснения наблюдаемого существенного увеличения накопленного заряда при активном электрическом режиме облучения SiФЭУ и неоднородного распределения плотности этого заряда в слое SiO<sub>2</sub> рассмотрим распределение напряженности электрического поля в слое окисла на разных глубинах от границы раздела SiO<sub>2</sub>/Si при обратном смещении на структуре U<sub>b</sub> = -30 В.

На рис. 3 показано распределение направлений напряженности электрического поля в окисле разделительной канавки необлученных гамма-квантами SiФЭУ со структурами первого (а) и второго (b) вариантов при U<sub>b</sub> = -30 В. Стрелки здесь соответствуют направлению векторов напряженности электрического поля, а горизонтальная и вертикальная оси – аналогичным осям на рис. 1. На рис. 3, а потенциалы металла канавки и контакта к n<sup>+</sup>-области ячейки выше потенциала контакта к p<sup>+</sup>-подложке. При этом граница области пространственного заряда каждой ячейки при обратном смещении U<sub>b</sub> = -30 В находится в p<sup>+</sup>-области. В этом случае векторы напряженности электрического поля в слое SiO<sub>2</sub> направлены от металла канавки к p- и p<sup>+</sup>-областям ячеек, где сконцентрирован отрицательный объемный заряд мелких акцепторов. Допустимо предположить, что при таком распределении электрического поля в слое SiO<sub>2</sub> положительный заряд будет накапливаться при облучении SiФЭУ вблизи границы SiO<sub>2</sub>/p-Si и особенно SiO<sub>2</sub>/p<sup>+</sup>-Si. Именно такой результат показан на рис. 2.

На рис. 3, b потенциал контакта к n<sup>+</sup>-области ячейки выше потенциалов металла канавки и контакта к p<sup>+</sup>-подложке. Граница области пространственного заряда каждой ячейки при обратном смещении U<sub>b</sub> = -30 В по-прежнему находится в p<sup>+</sup>-области. При таких условиях векторы напряженности электрического поля направлены от p-области к металлу канавки, а также к p<sup>+</sup>-подложке. При облучении SiФЭУ со структурой второго варианта в активном электрическом режиме следует ожидать, что положительный заряд будет накапливаться вблизи границ раздела SiO<sub>2</sub>/p<sup>+</sup>-Si, а также SiO<sub>2</sub>/металл канавки. Этим объясняется немонотонная зависимость плотности накопленного заряда не только вдоль оси OX, но и OY на рис. 2, с.

По мере накопления положительного заряда в процессе облучения SiФЭУ соответственно изменяется и напряженность электрического поля в слое диэлектрика. Наибольший интерес изменения E вблизи границы раздела окисла представляют канавки с активной областью ячеек, т. е.

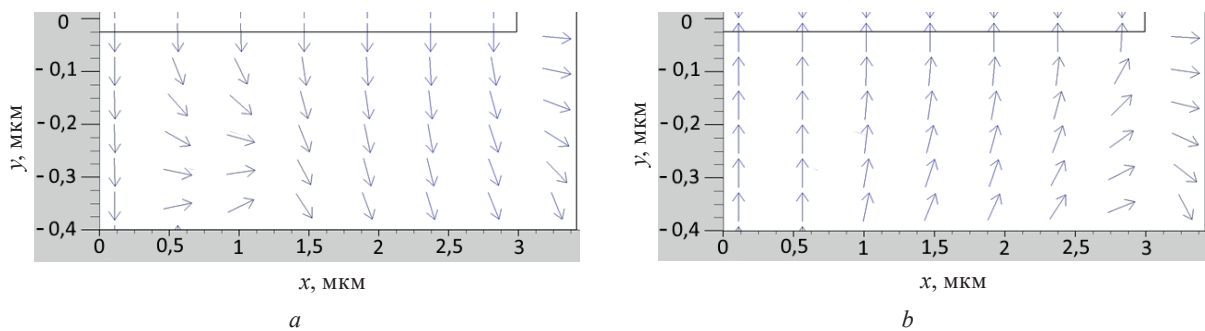


Рис. 3. Распределение направлений напряженности электрического поля в окисле разделительной канавки SiФЭУ со структурами первого (а) и второго (b) вариантов при U<sub>b</sub> = -30 В

Fig. 3. Distribution of the electric vectors in the oxide of the SiPM separation trench with the structures of the first (a) and the second (b) variants at U<sub>b</sub> = -30 V

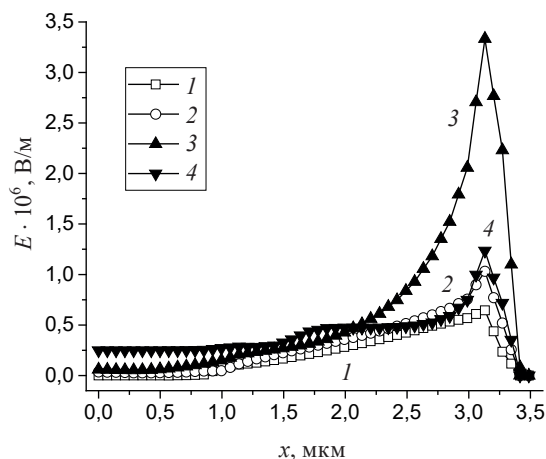


Рис. 4. Зависимости  $E(x)$  в окисле канавки ( $Y = 0,005$  мкм) для SiФЭУ до (кривая 1) и после (кривые 2–4) облучения рентгеновскими квантами в различных электрических режимах: 2 – пассивный; 3 – активный для SiФЭУ со структурой первого варианта конструкции; 4 – активный для структуры второго варианта конструкции

Fig. 4. Dependences of  $E(x)$  in the trench oxide ( $Y = 5$  nm) for SiPM before and after irradiation with X-ray quanta in different electrical modes: 1 – before irradiation; 2 – passive mode; 3 – active mode (the first design variant of the structure); 4 – active mode (the second design variant of the structure)

SiO<sub>2</sub>/p-Si и SiO<sub>2</sub>/p<sup>+</sup>-Si. На рис. 4 показаны зависимости  $E(x)$  в окисле канавки (на расстоянии 0,005 мкм от границы раздела Si/SiO<sub>2</sub>) для SiФЭУ до и после облучения рентгеновскими квантами в разных электрических режимах. Видно, что при наличии обратного смещения максимальная величина напряженности электрического поля необлученных SiФЭУ достигается при  $x = 3$  мкм. Следовательно, при облучении в активном режиме SiФЭУ со структурой первого и второго вариантов следует ожидать в области SiO<sub>2</sub> при  $x = 3$  мкм максимального выхода дырочного заряда, что и подтверждается результатами, представленными на рис. 2. По мере накопления положительного заряда в слое SiO<sub>2</sub> еще больше увеличивается значение напряженности электрического поля в процессе облучения (см. рис. 4). Так, максимальное значение  $E$  при  $x = 3$  мкм возросло относительно первоначального значения в 1,4 раза после облучения в пассивном электрическом режиме, в 1,6 раза – в активном режиме образцов со структурой второго варианта и в 4,4 раза – в активном режиме образцов со структурой первого варианта.

Увеличение напряженности электрического поля вблизи границы SiO<sub>2</sub>/p-Si в результате облучения SiФЭУ со структурой первого варианта конструкции приводит к еще более интенсивному разделению электронно-дырочных пар и накоплению положительного заряда.

**Заключение.** В программном комплексе Silvaco рассмотрено изменение распределения плотности накопленного заряда  $Q$  и напряженности электрического поля  $E$  в окисле металлизированных разделительных канавок ячеек кремниевых фотоэлектронных умножителей (SiФЭУ) в результате облучения мягким рентгеновским излучением с энергией кванта 10 кэВ дозой  $10^5$  рад. Ячейки представляли собой оптически изолированные друг от друга  $n^+p-p^+$ -кремниевые структуры. Оптическая изоляция ячеек осуществлялась канавками, которые после пассивации стенок слоем SiO<sub>2</sub> заполнялись металлом. Облучению подвергались два различных варианта структур: в первом металл канавки соединялся с  $n^+$ -областью ячейки, во втором – с  $p^+$ -областью. Облучение SiФЭУ проводилось в активном электрическом (при обратном электрическом смещении  $U_b = -30$  В) и пассивном ( $U_b = 0$ ) режимах.

Показано, что максимальные значения плотности накопленного заряда и напряженности электрического поля в слое SiO<sub>2</sub> достигаются вблизи границы с областью  $p-p^+$ -перехода ячейки и зависят как от электрического режима облучения, так и от структуры SiФЭУ. При пассивном режиме облучения значение  $Q$  не зависит от того, с какой областью активной ячейки соединена канавка прибора. При облучении SiФЭУ со структурой первого варианта при  $U_b = -30$  В максимальное значение  $Q$  увеличивается по сравнению с пассивным режимом в 5,9 раза, а второго

варианта – 2,5 раза. Максимальное значение  $E$  в слоях  $\text{SiO}_2$  возрастает в результате облучения SiФЭУ в пассивном электрическом режиме в 1,4 раза, в активном – в 4,4 и 1,6 раза для первого и второго вариантов структур соответственно. Полученный результат объясняется усилением выхода дырочного заряда под действием соответствующим образом распределенных электрических полей в слоях окислов разделительных канавок ячеек SiФЭУ, облучаемых под обратным смещением.

С точки зрения радиационной деградации исследуемых SiФЭУ со структурой первого варианта усиление электрического поля в фотоактивной  $p$ -области ячеек вблизи окисла разделительных канавок может стимулировать генерацию неравновесных электронно-дырочных пар, что приведет к увеличению темнового тока и невозможности фиксировать отдельные фотоны.

### Список использованных источников

1. Гулаков, И. Р. Фотоприемники квантовых систем / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич. – Минск: УО ВГКС, 2012. – 48 с.
2. The cross-talk problem in SiPMs and their use as light sensors for imaging atmospheric Cherenkov telescopes / E. Popova [et al.] // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. – 2009. – Vol. 610, № 1. – P. 131–134. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.nima.2009.05.150>
3. Garutti, E. Radiation Damage of SiPMs / E. Garutti, Yu. Musienko // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. – 2019. – Vol. 926. – P. 69–84. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.191>
4. Таперо, К. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения / К. И. Таперо, В. Н. Улимов, А. М. Членов // Влияние ионизирующих излучений на кремний, биполярные приборные структуры / К. И. Таперо, В. Н. Улимов, А. М. Членов. – Минск, 2012. – С. 261–287.
5. ATLAS User's Manual. Device Simulation Software [Electronic resource] / SILVACO International. – 2010. – Mode of access: [http://ridl.cfd.rit.edu/products/manuals/Silvaco/atlas\\_users.pdf](http://ridl.cfd.rit.edu/products/manuals/Silvaco/atlas_users.pdf). – Date of access: 13.05.2021.

### References

1. Gulakov I. R., Zenevich A. O. *Photodetectors of Quantum Systems*. Minsk, UO VGKS Publ., 2012. 48 p. (in Russian).
2. Popova E., Buzhan P., Dolgoshein B., Ilyin A., Kaplin V., Klemin S., Mirzoyan R., Teshima M. The cross-talk problem in SiPMs and their use as light sensors for imaging atmospheric Cherenkov telescopes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2009, vol. 610, no. 1, pp. 131–134. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.nima.2009.05.150>
3. Garutti E., Musienko Yu. Radiation damage of SiPMs. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipmen*, 2019, vol. 926, pp. 69–84. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.191>
4. Tapero K. I., Ulimov V. N., Chlenov A. M. Radiation effects in silicon integrated circuits for space applications. *The Influence of Ionizing Radiation on Silicon, Bipolar Devices*. Minsk, 2012, pp. 261–287 (in Russian).
5. SILVACO International. *ATLAS User's Manual. Device Simulation Software*. 2010. Available at: [http://ridl.cfd.rit.edu/products/manuals/Silvaco/atlas\\_users.pdf](http://ridl.cfd.rit.edu/products/manuals/Silvaco/atlas_users.pdf) (accessed 13 May 2021).

### Информация об авторе

**Огородников Дмитрий Александрович** – младший научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [ogorodnikov@ifftp.bas-net.by](mailto:ogorodnikov@ifftp.bas-net.by)

### Information about the author

**Dzmitryi A. Aharodnikau** – Junior Researcher, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [ogorodnikov@ifftp.bas-net.by](mailto:ogorodnikov@ifftp.bas-net.by)