

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ЯЧЕЙКЕ SiФЭУ С МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫМИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫМИ КАНАВКАМИ

Д.А. Огородников

*Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению,  
ул. П. Бровки 19, 220072 Минск, Беларусь, ogorodnikov@iftp.bas-net.by*

С помощью программного комплекса «Silvaco» рассмотрено изменение распределения электрических полей в ячейках SiФЭУ с металлизированными разделительными канавками в результате облучения рентгеновскими квантами с энергией 10 кэВ дозой  $10^5$  рад. Ячейки 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. Вывод металла канавки электрически соединялся с  $n^+$ -областью ячейки. Облучение SiФЭУ проводилось при значениях обратного смещения  $U_b = -30$  В и  $U_b = 0$  В. Показано, что в активном режиме облучения напряженность электрического поля вблизи (5 нм) границы раздела  $\text{SiO}_2/p\text{-Si}$  увеличивается 5.1 раза, а в пассивном — 1.6 раза. Результаты объясняются влиянием электрического поля на величину выхода дырочного заряда в  $\text{SiO}_2$ .

**Ключевые слова:** SiФЭУ; напряженность электрического поля; граница раздела Si/SiO<sub>2</sub>; рентгеновские кванты.

## SIMULATING THE IMPACT OF X-RAY RADIATION ON THE DISTRIBUTION OF THE ELECTRIC FIELDS IN SiPM CELL WITH METALLIZED DIVIDING TRENCHES

D.A. Ogorodnikov

*Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus,  
19 P. Brovka Str., 220072 Minsk, Belarus, ogorodnikov@iftp.bas-net.by*

With the help of software complex «Silvaco» the change in distribution of electric fields in the cells of SiPM with metallized dividing trenches was considered. SiPM cells were irradiated with X-ray quanta with an energy of 10 keV until a dose of  $10^5$  rad. The cells represented optically isolated  $n^+p-p^+$ -structures. The optical isolation of the cells was represented as trenches, which were filled with tungsten, after their walls were passivated with a layer of  $\text{SiO}_2$ . The metal output contact of the trench was electrically connected to the  $n^+$ -region of the cell. The SiPM was irradiated at the following electrical conditions: reverse bias  $U_b = -30$  V (active mode) and  $U_b = 0$  V (passive mode). It is shown that in the irradiation process in the active mode the electric field intensity near (5 nm)  $\text{SiO}_2/p\text{-Si}$  interface increased by a factor of 5.1, and in the passive mode – by a factor of 1.6. The results were explained by the influence of the electric field on the hole charge yield in  $\text{SiO}_2$ .

**Keywords:** SiPM; electric field intensity; Si/SiO<sub>2</sub> interface; X-ray quanta.

### Введение

Кремниевый фотоумножитель (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 ви-

дов 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, порождённые горячими носителями 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 SiO<sub>2</sub> могут заполняться металлом.

Наличие границы раздела SiO<sub>2</sub>/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, то есть при соединении вывода канавок с одним из электродов фотодиодов. В этой связи представляет интерес промоделировать изменение распределения электрических полей вблизи границы раздела ячейки со слоем диэлектрика канавки в результате воздействия ионизирующих излучений на SiФЭУ.

Цель данной работы – с помощью программного комплекса «Silvaco» рассмотреть изменение распределения электрических полей вблизи границы раздела ячеек с окислом металлизированных разделительных канавок в результате облучения SiФЭУ рентгеновскими квантами с энергией 10 кэВ дозой 10<sup>5</sup> рад.

### Методика

Объектами моделирования являлись ячейки SiФЭУ, которые представляли собой оптически изолированные друг от друга  $n^+p$ -структуры. Оптическая изоляция ячеек осуществлялась канавками, которые после пассивации стенок слоем

SiO<sub>2</sub> заполнялись вольфрамом. Вывод металла канавки электрически соединялся с  $n^+$ -областью ячейки. 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<sup>19</sup> см<sup>-3</sup>), цифрой 2 –  $p$ -область ([B] = 2.7·10<sup>15</sup> см<sup>-3</sup>), цифрой 3 –  $p^+$ -область подложки ([B] = 1.3·10<sup>19</sup> см<sup>-3</sup>) и 4 – слой окисла SiO<sub>2</sub>. Области  $n^+p$ -структуры отделены друг от друга вертикальными линиями. Толщины областей указаны на рис. 1 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.

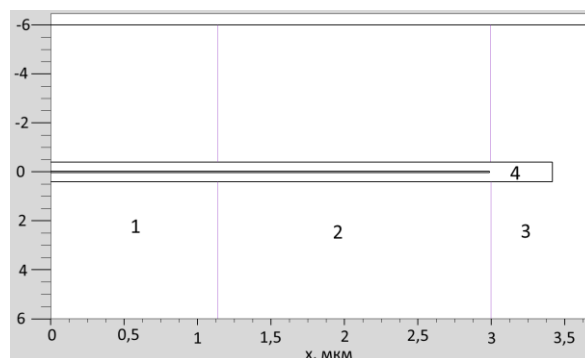


Рис. 1. Двумерная модель двух ячеек SiФЭУ с разделительной канавкой между ними  
Fig. 1. Two-dimensional model of two SiPM cells with a dividing trench between them

Расчет электрических полей осуществлялся в программном комплексе «Silvaco» [5]. Моделирование воздействия на тестовые структуры рентгеновских квантов с энергией 10 кэВ при мощности поглощенной дозы 1 рад/с было проведено в программном модуле «VictoryDevice». Облучение SiФЭУ проводилось при значениях обратного смещения  $U_b = -30$  В и  $U_b = 0$  В.

### Результаты

Основным радиационным эффектом структуры Si/SiO<sub>2</sub> является накопление заряда в слое диэлектрика и на границе раздела полупроводник-диэлектрик в ре-

зультате ионизирующего 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 (5 нм и менее) границы раздела с кремнием [4]. Рассмотрим, как направлены векторы напряженности электрического поля  $E$  в слое SiO<sub>2</sub>. На рис. 2 показана в несколько увеличенном масштабе для наглядности область окисла канавки, граничащая с кремнием ячейки. Потенциалы металла и контакта  $n^+$ -области ячейки выше потенциала  $p^+$ -подложки на 30 В, то есть  $n^+p-p^+$ -структура ячейки находится под обратным смещением, равным -30 В. Стрелки на рис. 2 соответствуют векторам напряженности поля. Из результатов моделирования следует, что в основном поле направлено от металла к  $p$ - и  $p^+$ -областям ячеек исследуемых SiФЭУ. При облучении прибора следует ожидать основное накопление заряда и изменение значения  $E$  в слое SiO<sub>2</sub> вблизи границы SiO<sub>2</sub>/ $p$ -Si и SiO<sub>2</sub>/ $p^+$ -Si. Очевидно, что представленная картина электрических полей полностью симметрична относительно прямой  $Y = 0$ .

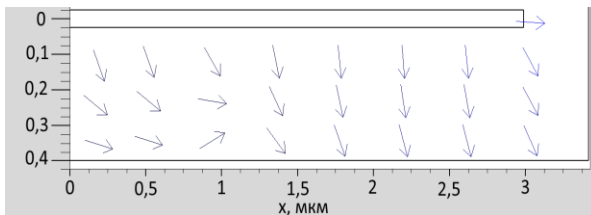


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля в окисле канавки при значении обратного смещения SiФЭУ, равном -30 В  
Fig. 2. Electric field intensity distribution in the trench oxide in SiPM at the reverse bias -30 V

На рис. 3 показано изменение вдоль оси OX значения напряженности электрического поля на расстояниях от границы раздела в окисле  $Y = 5$  нм и в кремнии  $Y = 50, 350$  и  $600$  нм для необлученного прибора под обратным смещением -30 В. Максимальное значение  $E$  в окисле достигается в области  $p-p^+$ -перехода ( $x = 3$  мкм). При приближении к  $n^+p$ -переходу

( $x = 1.12$  мкм) значение  $E$  уменьшается и в  $n^+$ -области спадает до нулевых значений. Зависимости  $E(x)$  в кремнии ( $Y = 50$  нм) имеют такой же вид, как и в SiO<sub>2</sub>. Однако по мере удаления от границы раздела растет значение  $E$  на  $n^+p$ - и уменьшается на  $p-p^+$ -переходе. Таким образом, у необлученных образцов максимальная напряженность электрического поля в области ячейки вблизи окисла канавок приходится не на  $n^+p$ -, а  $p-p^+$ -переход.

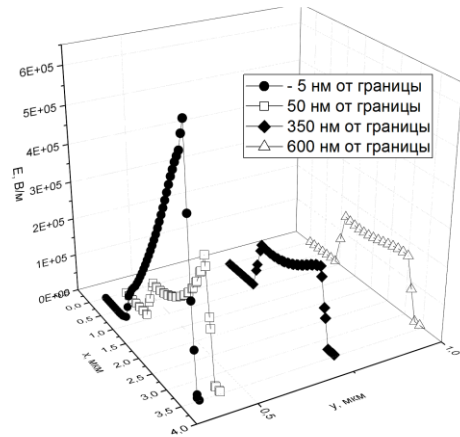


Рис. 3. Изменение напряженности электрического поля по глубине обратно смещенной (-30 В)  $n^+p-p^+$ -структуры ячейки вблизи границы раздела SiO<sub>2</sub>/Si до облучения

Fig. 3. Change in the electric field intensity at a depth of the  $n^+p-p^+$ -cell structure near the SiO<sub>2</sub>/Si interface before irradiation at the reverse bias -30 V

На рис. 4 показаны аналогичные зависимости  $E(x)$ , что и на рис. 3, только для прибора, облученного в пассивном электрическом режиме рентгеновскими квантами дозой  $10^5$  рад. Из полученных результатов видно, что характер зависимостей  $E(x)$  при тех же значениях  $Y$  не изменился. Однако при подаче на образец обратного смещения, равного -30 В, видно, что значения напряженности электрического поля увеличились после воздействия ионизирующего излучения.

На рис. 5 показаны зависимости  $E(x)$  для исследуемого SiФЭУ, облученного в режиме обратного смещения (-30 В) рентгеновскими квантами дозой  $10^5$  рад. Облучение в активном режиме также не приводит к существенным изменениям характера зависимостей  $E(x)$ . Это хорошо вид-

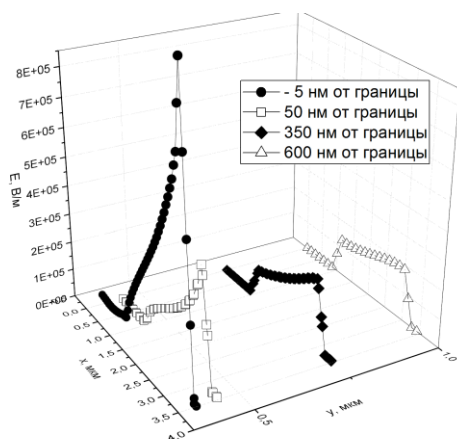


Рис. 4. Изменение напряженности электрического поля по глубине обратно смещенной (-30 В)  $n^+p-p^+$ -структуры ячейки вблизи границы раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  после облучения рентгеновскими квантами в пассивном электрическом режиме

Fig. 4. Change in the electric field intensity at a depth of the  $n^+p-p^+$ -cell structure near the  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  interface after irradiation in passive electrical mode

но из сравнения соответствующих кривых на рис. 3 и 5. В то же время, в отличие от пассивного режима облучения, здесь наблюдается существенное увеличение значений напряженности электрического поля. Для сравнения результатов на рис. 6 представлены зависимости  $E(x)$  в окисле канавки ( $Y = 5$  нм) для SiФЭУ до и после облучения рентгеновскими квантами в разных электрических режимах. Видно, что после облучения образцов в пассивном режиме до дозы в  $10^5$  рад максимальная (при  $x = 5$  нм) величина напряженности поля возросла в 1.6 раза относительно первоначального значения, тогда как в активном режиме – в 5.1 раза.

Увеличение значений  $E$  вблизи границы  $\text{SiO}_2/p\text{-Si}$  в результате облучения SiФЭУ в активном режиме объясняется более интенсивным накоплением поверхностного заряда. При воздействии проникающих излучений в объеме  $\text{SiO}_2$  генерируются электронно-дырочные пары. Часть носителей заряда рекомбинирует, а оставшаяся часть разделяется. При наличии сил электрического поля разделение генерируемых облучением электронно-дырочных пар в слое  $\text{SiO}_2$  происходит более интенсивно [4].

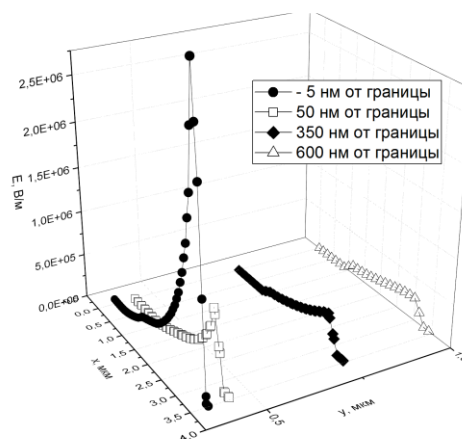


Рис. 5. Изменение напряженности электрического поля по глубине обратно смещенной (-30 В)  $n^+p-p^+$ -структуры ячейки вблизи границы раздела  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  после облучения рентгеновскими квантами в режиме обратного смещения (-30 В)

Fig. 5. Change in the electric field intensity at a depth of the  $n^+p-p^+$ -cell structure near the  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  interface after irradiation in active electrical mode at the reverse bias -30 V

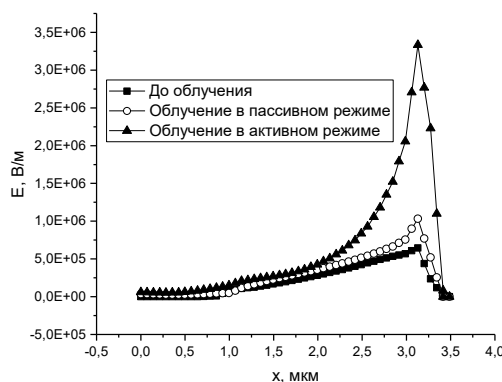


Рис. 6. Зависимости  $E(x)$  в окисле канавки ( $Y = 5$  нм) для SiФЭУ до и после облучения рентгеновскими квантами в разных электрических режимах

Fig. 6. 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

С точки зрения радиационной деградации исследуемых SiФЭУ усиление электрического поля в фотоактивной  $p$ -области ячеек вблизи окисла разделительных канавок может стимулировать генерацию неравновесных электронно-дырочных пар, то есть увеличение темнового тока. Таким образом, для исследуемых приборов активный режим облучения является менее радиационноустойчивым.

## Заключение

В программном комплексе «Silvaco» рассмотрено изменение распределения электрических полей в ячейках SiФЭУ с металлизированными разделительными канавками в результате облучения рентгеновскими квантами с энергией 10 кэВ дозой  $10^5$  рад. Ячейки представляли собой оптически изолированные друг от друга  $n^+ - p - p^+$ -структуры. Оптическая изоляция ячеек осуществлялась канавками, которые после пассивации стенок слоем SiO<sub>2</sub> заполнялись вольфрамом. Металл канавки соединялся с  $n^+$ -областью ячейки. Облучение SiФЭУ проводилось при обратных смещениях  $U_b = -30$  В и  $U_b = 0$  В. Показано, что в активном режиме облучения напряженность электрического поля вблизи (5 нм) границы раздела SiO<sub>2</sub>/p-Si увеличивается 5,1 раза, а в пассивном — 1,6 раза. Полученный результат объясняется усилением выхода дырочного заряда в SiO<sub>2</sub> под действием электрического поля.

Увеличение значения  $E$  в  $p$ -области ячеек вблизи окисла канавок в результате накопления поверхностного заряда при облучении SiФЭУ в активном режиме может стимулировать генерацию неравновесных электронно-дырочных пар. Можно предположить, что для исследуемых приборов активный режим облучения является менее радиационноустойчивым.

Результаты моделирования представляют интерес с точки зрения разработки технологии изготовления радиационноустойчивых кремниевых фотоумножителей.

## Библиографические ссылки

1. Гулаков И.Р. Фотоприемники квантовых систем. Минск. 2012.

2. Garutti E., Musienko Yu. Radiation damage of SiPMs. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, A. 2019; 926: 69-84.
3. 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. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* 2009; 610: 131-134.
4. Таперо К.И., Улимов В.Н., Членов А.М. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. Влияние ионизирующих излучений на кремний, биполярные приборные структуры: учеб. пособие Минск, 2012. С. 261-287.
5. SILVACO International. ATLAS User's Manual. Device Simulation Software. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.silvaco.com>. (Дата обращения 13.05.2021).]

## References

1. Gulakov I.R. Fotopriemniki kvantovykh sistem [Photodetectors of quantum systems]. Minsk. 2012. (In Russian)
2. Garutti E., Musienko Yu. Radiation damage of SiPMs. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, A. 2019; 926: 69-84.
3. 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. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A* 2009; 610: 131-134.
4. Tapero K.I., Ulimov V.N., Chlenov A.M. Radiacionnye jeffekty v kremnievyh inte-gral'nyh shemah kosmicheskogo primenenija [Radiation effects in silicon integrated circuits for space applications] Vlijanie ionizirujushhih izluchenij na krem-nij, bi-poljarnye pribornye struktury: ucheb. posobie [The Influence of ionizing radiation on silicon, bipolar devices: textbook] Minsk, 2012. P. 261-287. (In Russian)
5. SILVACO International. ATLAS User's Manual. Device Simulation Software. [Electronic resource]. URL: <http://www.silvaco.com>. (Request date 13.05.2021).