

02:07

Образование кластеров спайков в CMOS-матрицах, облученных протонами и нейтронами

© Н.А. Иванов¹, О.В. Лобанов¹, В.В. Пашук¹,
М.О. Прыгунов², К.Г. Сизова^{3,¶}

¹ Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
НИЦ „Курчатовский институт“, Гатчина, Ленинградская обл., Россия

² ООО „О2 Световые Системы“, Санкт-Петербург, Россия

³ ООО „НПЦ „Гранат“, Санкт-Петербург, Россия

¶ E-mail: ksizova@npcgranat.ru

Поступило в Редакцию 9 июля 2018 г.

Исследованы распределения пикселей с большой величиной темнового тока в CMOS-матрицах, облученных протонами с энергией 1000 MeV и нейтронами сплошного спектра, моделирующего энергетический спектр атмосферных нейтронов. Получены данные об образовании кластеров спайков в облученных матрицах и влиянии времени экспозиции на параметры кластеров.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.21.46855.17457

В светочувствительных матрицах эффект воздействия отдельных частиц проявляется в возникновении спайков — поврежденных пикселей с величинами темновых токов (I_{dc}), значительно превышающими средние значения темновых токов в пикселях исходной необлученной матрицы. При облучении протонами и нейтронами спайки преимущественно образуются в результате ядерных реакций, продукты которых создают структурные радиационные дефекты в чувствительной области пикселей [1]. В работах [2,3] было установлено, что под действием быстрых протонов и нейтронов в матрицах на основе приборов с зарядовой связью (CCD-матрицах) ICX259AL марки Sony с размером пикселей $6.50 \times 6.25 \mu\text{m}$ возникают кластеры (скопления) спайков, которые включают несколько соседних поврежденных пикселей с большими величинами I_{dc} и имеют линейные размеры до $\sim 20 \mu\text{m}$.

В настоящей работе изучается образование спайков под действием протонов и нейтронов в матрицах на основе комплементарной

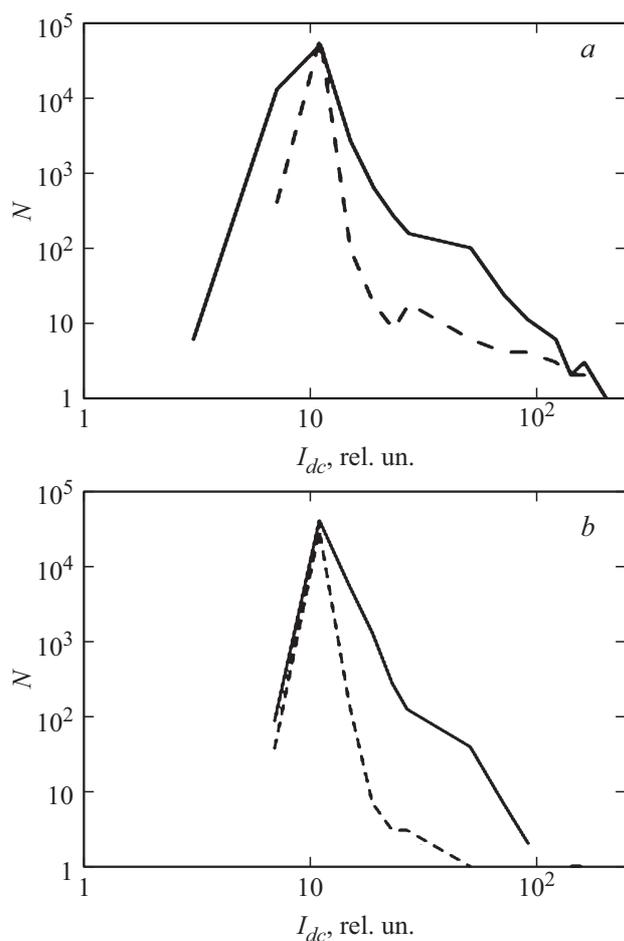


Рис. 1. Распределения величин темнового тока в пикселях CMOS-матриц, облученных протонами (*a*) и нейтронами (*b*). Время экспозиции 32 ms (сплошная линия) и 0.5 ms (штриховая линия).

структуры металл–оксид–полупроводник (CMOS-матрицы), которые благодаря своим техническим характеристикам и низкой стоимости в последнее десятилетие практически заменили CCD-матрицы в элект-

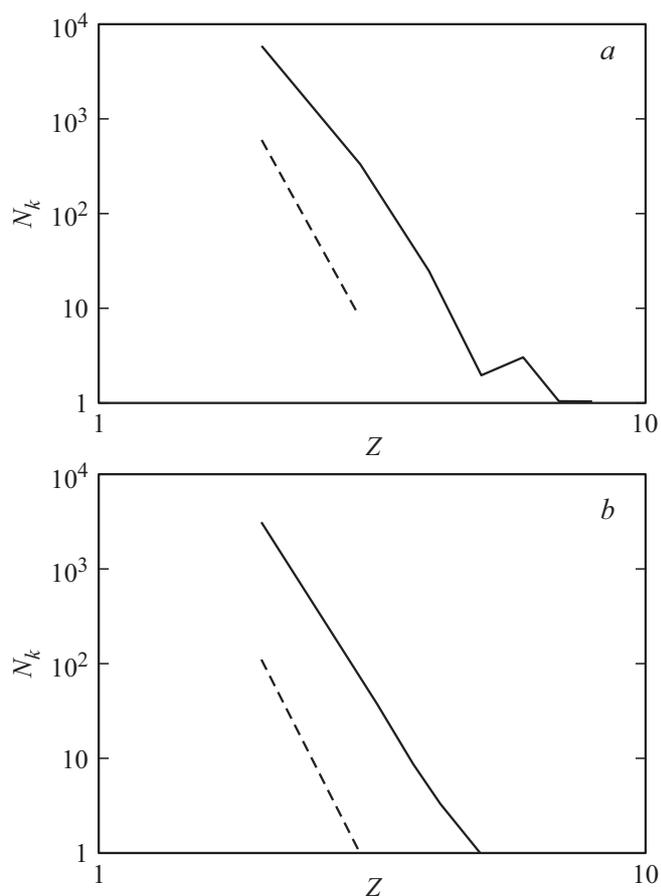


Рис. 2. Распределения количества кластеров по числу входящих в них спайков в матрицах, облученных протонами (*a*) и нейтронами (*b*). Время экспозиции 32 ms (сплошная линия) и 0.5 ms (штриховая линия).

ронной аппаратуре. Исследовались CMOS-матрицы МТ9М034 производства фирмы ON Semiconductor с размером кристалла 4.8×3.6 mm, размером пикселя 3.75×3.75 μm и количеством активных пикселей 1280×960 . Облучение проводилось протонами с энергией 1000 MeV

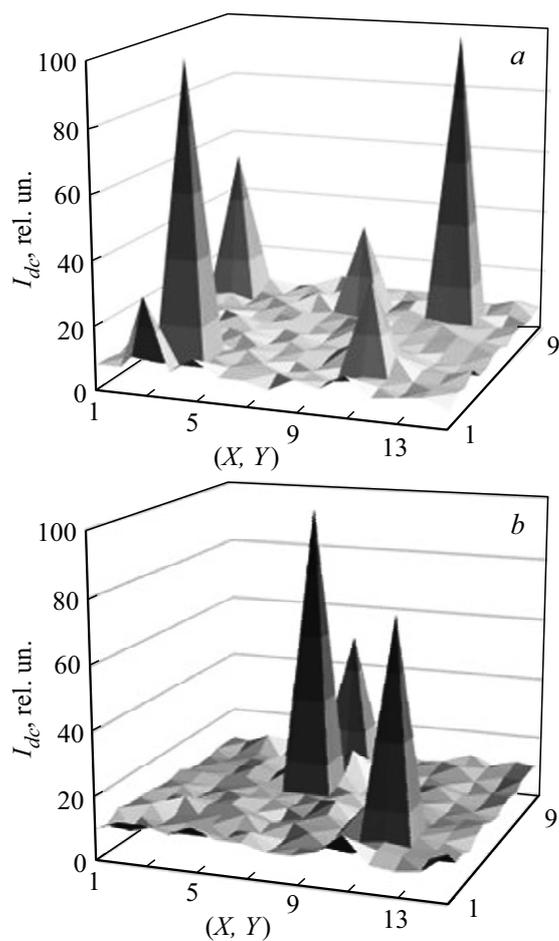


Рис. 3. Рельефы кластеров спайков в CMOS-матрице при облучении протонами до флюенса 10^{10} см^{-2} (a) и нейтронами до флюенса $2.8 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$ (b) при временах экспозиции 32 ms.

на синхротроне С-1000 до флюенса $F_p = 10^{10} \text{ см}^{-2}$ и нейтронами атмосферного спектра с максимальной энергией 1000 MeV на установке ГНЕЙС [4] до флюенса $F_n = 2.8 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$. Мето-

дика облучения протонами и нейтронами при флюенсах частиц $10^7 - 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ аналогична описанной в работах [2,3]. Величины I_{dc} определялись по степени яркости пикселя матрицы в относительных единицах (rel. un.) целым числом в диапазоне от 0 (черное) до 255 (белое).

На рис. 1 приведены измеренные при температуре 25°C распределения пикселей по величине темнового тока в облученных протонами и нейтронами CMOS-матрицах при различных временах экспозиции (выдержки до момента измерения значения темнового тока). Поскольку в исходных матрицах величины темновых токов не превышали 20 rel. un., спайками мы считали пиксели, величина I_{dc} в которых после облучения превышала 20 rel. un.

На рис. 2 показаны распределения количества кластеров N_k по числу входящих в них спайков при различных временах экспозиции в CMOS-матрицах, облученных протонами и нейтронами. Размеры кластеров и величины темновых токов в спайках, входящих в их состав, в сильной степени зависят от времени экспозиции и практически не зависят от природы нуклонов. В качестве примера на рис. 3 приведены участки облученных протонами и нейтронами CMOS-матриц с типичными „рельефами“ кластеров спайков при времени экспозиции 32 ms. Максимальный размер кластеров, приведенных на рис. 3, составляет $\sim 11.75 \times 11.75 \mu\text{m}$ и включает в себя девять спайков.

К образованию кластеров способны приводить наиболее длинно-пробежные частицы из числа продуктов ядерных реакций нуклонов с ядрами кремния. В таблице приведены величины пробегов различных ядер отдачи [5], образующихся с максимальными энергиями в ядерных реакциях протонов с энергией 1000 MeV с ядрами атомов кремния [6] (продукты ядерных реакций нейтронов атмосферного спектра с максимальной энергией 1000 MeV имеют аналогичный состав и величины пробегов). Из таблицы видно, что такие ядра отдачи, как неон, кислород и углерод, имеют пробеги, достаточные для создания кластеров спайков наблюдаемых размеров. Следует также иметь в виду, что эти ядра отдачи в процессе торможения проходят область максимальных значений линейных потерь энергии на ионизацию и испытывают упругие атом-атомные соударения [5,6].

При флюенсе протонов 10^{10} cm^{-2} и времени экспозиции 32 ms количество событий n от отдельных частиц составило 28 926, в том

Пробеги ядер отдачи, образующихся с максимальными энергиями в ядерных реакциях протонов с энергией 1000 MeV с ядрами атомов кремния

Параметр	Тип ядра отдачи			
	^{27}Al	^{20}Ne	^{16}O	^{12}C
Энергия ядра отдачи, MeV	7.5	24	46	53
Пробег ядра, μm	4.5	11	30	63

числе 20194 от кластеров и 8732 от спайков вне кластеров. Соответственно сечение возникновения событий от отдельных протонов в CMOS-матрице \sum_{sp} , равное $\sum_{sp} = n/F_p$, составило $2.9 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$, что качественно согласуется с величиной сечения ядерных реакций в объеме CMOS-матрицы (\sum_{nr})

$$\sum_{nr} = \sigma n_{\text{Si}} V_{\text{CMOS}} \approx 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2,$$

где $\sigma = 5 \cdot 10^{-25} \text{ cm}^2$ — сечение ядерных реакций нуклонов с энергией 1000 MeV с ядрами атомов кремния [7], $n_{\text{Si}} = 5.19 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ — плотность атомов кремния, V_{CMOS} — объем CMOS-матрицы, принятый нами равным $0.86 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3$ при толщине чувствительной области матрицы $5 \mu\text{m}$.

Проведенные исследования показали следующее.

1. Механизм образования кластеров спайков в CMOS-матрицах МТ9М034 и CCD-матрицах ICX259AL, облученных быстрыми протонами и нейтронами, аналогичен и обусловлен длиннопробежными остаточными ядрами, возникающими в результате ядерных реакций протонов и нейтронов с ядрами кремния.

2. Размеры кластеров и величины темновых токов в спайках, входящих в их состав, в сильной степени зависят от времени экспозиции и практически не зависят от природы нуклонов.

3. Возникновение кластеров спайков под действием протонов и нейтронов указывает на возможность множественных сбоев и отказов в интегральных схемах с размером чувствительных областей, близким и меньшим размера пикселей в CMOS-матрицах.

Список литературы

- [1] *Hopkinson G.R., Goiffon V., Mohammadzadeh A.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2008. V. 55. N 4. P. 2197–2204.
- [2] *Ермаков К.Н., Иванов Н.А., Лобанов О.В., Пашук В.В., Тверской М.Г., Любинский С.М.* // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 13. С. 54–60.
- [3] *Иванов Н.А., Лобанов О.В., Митин Е.В., Пашук В.В., Тверской М.Г.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 17. С. 35–43.
- [4] *Абросимов Н.К., Вайшнине Л.А., Воробьев А.С., Иванов Е.М., Михеев Г.Ф., Рябов Г.А., Тверской М.Г., Щербаков О.А.* // Приборы и техника эксперимента. 2010. № 4. С. 5–12.
- [5] Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- [6] *Ермаков К.Н., Иванов Н.А., Пашук В.В., Тверской М.Г.* // Вопр. атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. Науч.-техн. сб. М., 2007. В. 1-2. С. 20–23.
- [7] *Барашенков В.С.* Сечения взаимодействия частиц и ядер с ядрами. Дубна: ОИЯИ, 1993, 346 с.