

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ

## INVESTIGATION OF HIGHLY INTENSIVE IONIZING RADIATION EFFECT ON PHOTORECEIVER FEATURES

*А. Н. Труфанов*

*A. N. Trufanov*

Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «ФНПЦ НИИИС им. Ю. Е. Седاکова»

Branch of RFNC-VNIIEF, «FRPC NIIS named after Yu.Ye. Sedakov»

В работе представлены параметры фотодиодов, изготовленных на КНС структурах и результаты исследований их радиационной стойкости. Приведены результаты сравнения с диодами на основе традиционной кремниевой технологии. Представлены результаты исследования стойкости образцов к воздействию ионизирующего излучения. Исследования проводились на воздействие мощности экспозиционной дозы гамма-излучения, комбинированного воздействия потока быстрых нейтронов и гамма-излучения, а также экспозиционной дозы гамма-излучения. Проведенные исследования влияния ионизирующих излучений на характеристики образцов фотодиодов, изготовленных на структурах «кремний на сапфире» и фотодиодов на объемном кремнии показали значительно более высокую стойкость к воздействию радиации КНС-фотодиодов по сравнению с образцами на основе Si.

The study shows parameters of photodiodes manufactured on SOS-structures and the investigation results of their radiation resistance. The results of comparing diodes based on traditional silicon technology have been submitted. The investigation results of samples resistant to ionizing radiation exposure have been presented. The effect of gamma radiation exposure dose power, combined influence of fast neutron flux and gamma rays as well as gamma radiation exposure dose has been researched. The submitted research results of ionizing radiation effect on characteristics of photodiode samples manufactured on «silicon-on-sapphire» structures and bulk silicon-made photodiodes have substantiated considerably higher resistance to radiation effect of SOS-photodiodes in comparison to Si-based samples.

### Введение

Промышленностью выпускаются фотоприемные устройства широкой номенклатуры с различными спектральными характеристиками [1]. Их основным недостатком является низкий уровень радиационной стойкости. Хорошо известно использование структур кремния на сапфире (КНС) в микроэлектронике для изготовления радиационно-стойкой элементной базы [2]. Диэлектрическая подложка позволяет сформировать полностью электрически изолированные карманы транзисторных структур и исключить образование тиристорного эффекта при воздействии ионизирующих излучений.

В работе представлены параметры фотодиодов, изготовленных на КНС структурах и резуль-

таты исследований их радиационной стойкости. Приведены результаты их сравнения с диодами на основе традиционной кремниевой технологии.

### Конструкция и характеристики фотодиодов

Фотодиоды разрабатывались как преобразователи постоянного и импульсно-периодического оптического излучения с длиной волны 0,63 мкм в электрический сигнал. Были изготовлены фотодиоды двух типов: одноэлементные, содержащие один фоточувствительный элемент (ФЧЭ) и двухэлементные, содержащие два идентичных ФЧЭ с межэлементным зазором 60 мкм. Конструктивно области анода и катода фотодиодов выполнялись в виде встречно-штыревой структуры (рис. 1) с размером фоточувствительной области  $1,4 \times 1,4 \text{ мкм}^2$

для одноэлементных диодов и  $0,4 \times 1,4 \text{ мм}^2$  для каждого элемента двухэлементных диодов.

Фоточувствительную область можно рассматривать как диод большой площади, который с целью увеличения токовой чувствительности был сформирован из группы в количестве 20 шт. параллельно соединенных элементарных фотодиодов малой площади с размером  $68 \times 1440 \text{ мкм}^2$  для одноэлементных и  $64,8 \times 409,4 \text{ мкм}^2$  для двухэлементных диодов. Аноды и катоды фотодиодов были выведены к контактным площадкам, которые расположены противоположно друг к другу и симметрично относительно центра ФЧЭ.

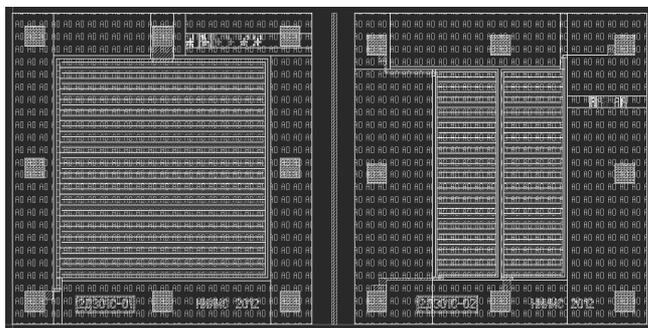


Рис. 1. Топология фотодиодов с одним и двумя ФЧЭ

В качестве материала подложки использовались гетероэпитаксиальные структуры «кремний на сапфире». Схематично на рис. 2 в разрезе приведена структура элементарного фотодиода. Показана активная область  $p-n$  перехода, сформированная слоем  $p^+$  анода в эпитаксиальной пленке кремния, металлизированные контакты к  $p^+$  аноду и к  $n^+$  катоду, межслойный диэлектрик из слоев нитрида кремния и двуокиси кремния, пассивация пленкой фосфо-силикатного стекла.

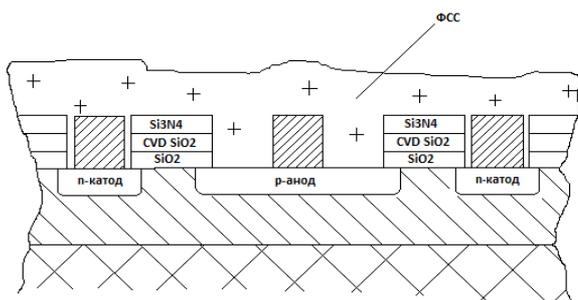


Рис. 2. Разрез структуры элементарного фотодиода

С целью сравнения стойкости к воздействию ионизирующих излучений параллельно с фотодиодами на КНС структурах по аналогичной тех-

нологии были изготовлены фотодиоды на объемном кремнии.

Фотодиоды, созданные по кремниевой технологии, имели характеристики лучше, что обусловлено более совершенной структурой монокристаллического кремния. Гетероэпитаксиальные структуры кремния на сапфире, по сравнению с объемным кремнием, имеют повышенную дефектность, связанную с влиянием внутренних механических напряжений.

Структуры фотодиодов были промаркированы следующим образом:

- фотодиоды с одним фоточувствительным элементом, изготовленные на структурах КНС – ФД1-КНС;
- фотодиоды с одним ФЧЭ, изготовленные на подложках объемного кремния – ФД1-Si;
- фотодиоды с двумя ФЧЭ, изготовленные на структурах КНС – ФД2-КНС;
- фотодиоды с двумя ФЧЭ, изготовленные на подложках объемного кремния – ФД2-Si.

В табл. 1 приведены данные по измерениям темнового тока и токовой чувствительности данных четырех типов фотодиодов.

Таблица 1

Средние значения темнового тока и токовой чувствительности для различных типов фотодиодов

Тип фотодиода	Темновой ток (15В), мкА	Мощность излучателя, мВт	Величина фототока, мкА	Токовая чувств., А/Вт
ФД1-Si	0,02	2,1	90,2	0,622
ФД1-КНС	0,81	2,1	59,2	0,408
ФД2-Si	0,02	2,1	32,45	0,78
ФД2-КНС	0,36	2,1	19,95	0,48

Исследования импульсно-периодических параметров фотодиодов проводились в фотогальваническом режиме при освещении диодов модулированным лазерным излучением.

Типичная осциллограмма выходного сигнала фотодиода при частоте светового сигнала 1 МГц представлена на рис. 3. Мощность излучателя составляла 2,1 мВт, нагрузкой служили сопротивления 200 Ом для одноэлементных фотодиодов и 680 Ом для двухэлементных. По результатам измерений величина собственной постоянной времени для всех типов фотодиодов не превышала 100 нс.

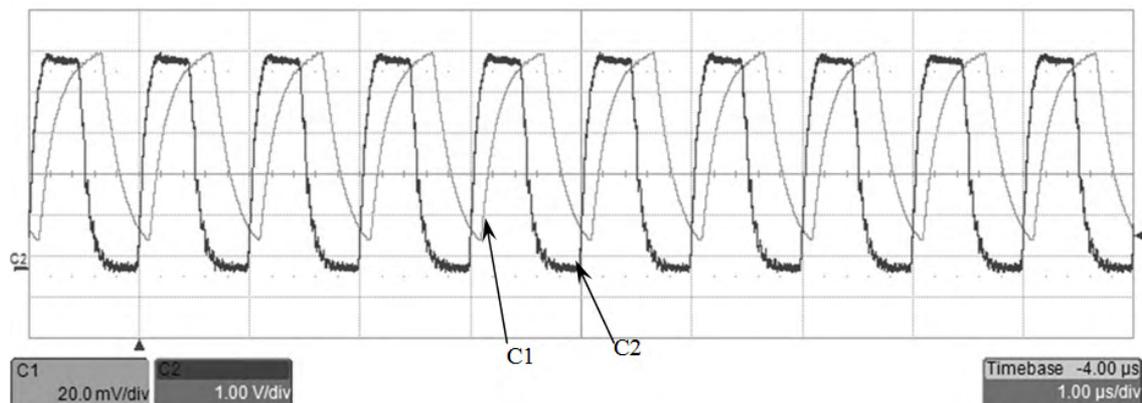


Рис. 3. Осциллограмма выходного сигнала фотодиода (C1) на частоте 1 МГц (C2 – напряжение на лазерном диоде)

### Результаты исследований радиационной стойкости

С использованием комплекса моделирующих установок и имитационного оборудования были проведены исследования стойкости образцов к воздействию ионизирующего излучения [3].

На первом этапе проводили исследования влияния на работоспособность фотодиодов мощности экспозиционной дозы гамма-излучения. В процессе воздействий образцы фотодиодов в защитном экране размещали на различном расстоянии от выхода излучения. Длительность воздействия составляла 2,5–16 нс. Уровень воздействия варьировали от 1Ус до 5Ус.

Типичная осциллограмма сигналов с фотодиодов показана рис. 4. Стрелкой показан момент импульса излучения, при этом видно, что дли-

тельность ионизационной реакции фотодиодов значительно превышает длительность наводки системы запуска установки.

Выходные сигналы фотодиодов на основе КНС восстанавливались за время менее 10 мкс независимо от уровня воздействия. Фотодиоды на основе Si восстанавливались значительно дольше – до 40 мкс.

Деградации образцов фотодиодов на основе КНС обнаружено не было. Деградация образцов на Si незначительна: снижение выходного напряжения после воздействия не превышало 5 %.

На втором этапе проводили исследования влияния на работоспособность фотодиодов комбинированного воздействия потока быстрых нейтронов и гамма-излучения. В процессе воздействий образцы размещали в непосредственной близости от выхода излучения. На рис. 5 показаны

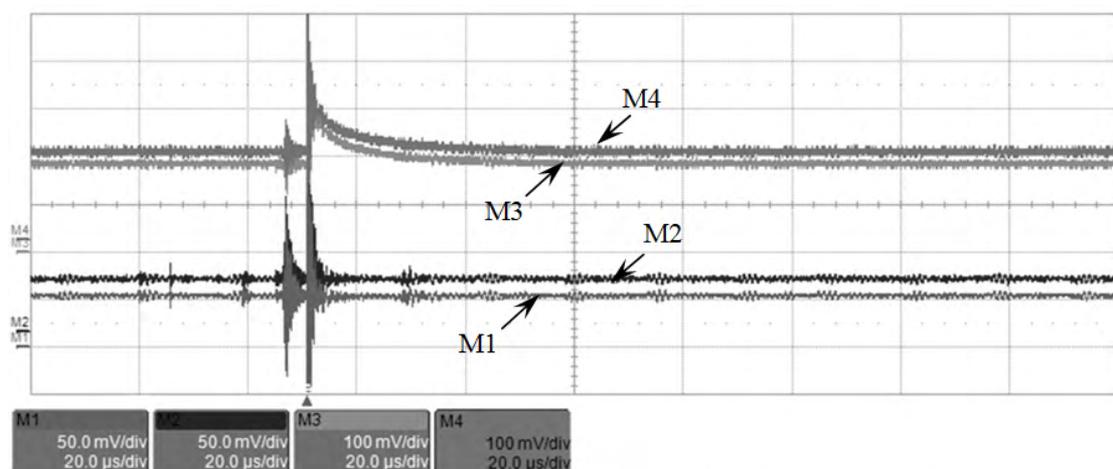


Рис. 4. Осциллограмма сигналов с фотодиодов при воздействии импульса гамма-излучения (M1, M2 – сигналы с ФД2-КНС; M3, M4 – сигналы с ФД2-Si)

типичные осциллограммы сигналов на нагрузках фотодиодов. Уровень воздействия по нейтронам составил более 3Ус.

Из приведенных результатов видно, что излучение оказывает значительное влияние на параметры фотодиодов как во время, так и после воздействия. Во время воздействия выходное напряжение с фотодиодов возрастает в 2,5÷4,5 раза. Форма импульса напряжения повторяет форму импульса излучения.

Фотодиоды на основе КНС деградируют после воздействия в гораздо меньшей степени, чем на основе Si. Дегradация образцов на Si составила более 80 %, на основе КНС – не превышала 4 %.

На третьем этапе проводилось исследование влияния на работоспособность фотодиодов экспо-

зиционной дозы гамма-излучения. Как и на предыдущих этапах, образцы располагали в поле излучения. Воздействие продолжалось в течение 33 мин.

Изменение параметров выходных сигналов контролировали с помощью осциллографов с интервалом около 10 мин. На рис. 6 приведены графики изменения выходного напряжения фотодиодов в процессе воздействия.

Проведенные исследования показали, что дегradация напряжения фотодиодов на основе Si составила 20÷35 %. Дегradация образцов на основе КНС отсутствовала, при этом наблюдалось восстановление (увеличение) напряжения на 15÷25 % по сравнению с уровнем до воздействия.

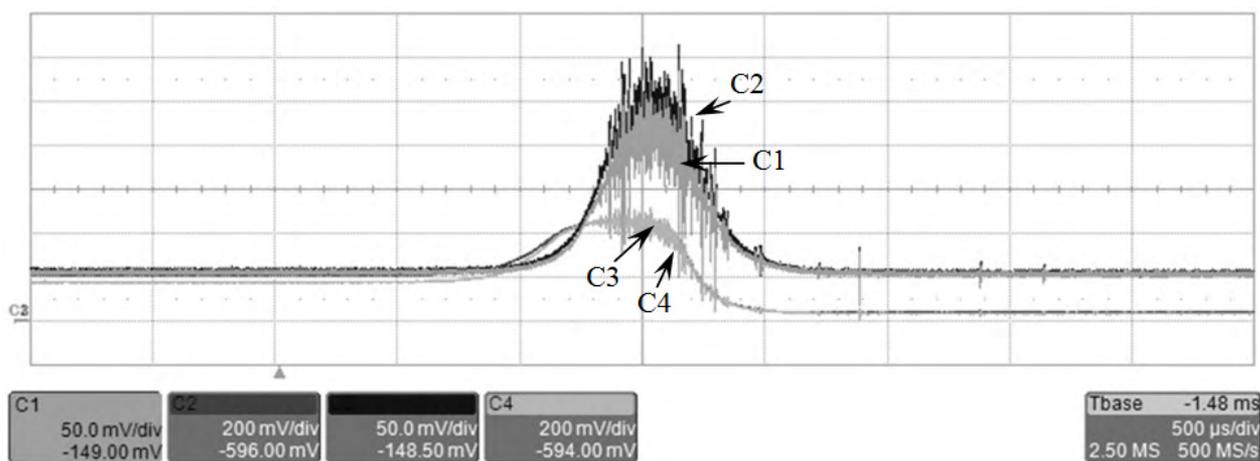


Рис. 5. Осциллограмма сигналов на фотодиодах при воздействии импульса излучения (C1, C3 – сигналы с ФД1-КНС; C2, C4 – сигналы с ФД1-Si)

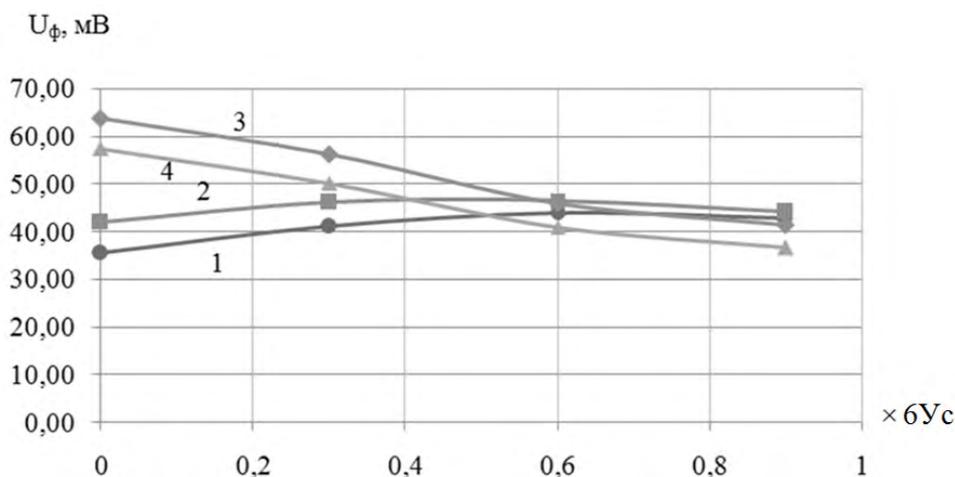


Рис. 6. Изменение выходного напряжения ФД1-КНС № 1, 2 и ФД1-Si № 3, 4 в процессе воздействия экспозиционной дозы гамма-излучения

### Заключение

Проведенные исследования показали, что фотодиоды на основе структур «кремний на сапфире» обладают электрическими характеристиками, сопоставимыми с кремниевыми диодами, а уровень их стойкости к воздействию высокоинтенсивного ионизирующего излучения существенно превосходит уровень стойкости кремниевых диодов.

Автор выражает признательность Кабальнову Ю. А. за помощь в разработке конструкций ФПУ и проведении исследований.

### Список литературы

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. М.: Физматкнига, 2011.
2. Стучебников В. М., Папков В. С. Материалы для новых направлений электронной техники // Электронная промышленность, 1980. № 8 (92)-9(93).
3. Бутин В. П., Зинченко В. Ф., Романенко А. А. Система радиационных испытаний изделий электронной техники. М.: Радио и связь, 2004.