

РАДИАЦИОННО СТОЙКИЕ ФОТОДИОДЫ ДЛЯ РАБОТЫ В ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Д. А. Санжаревский, А. Н. Труфанов, Ю. А. Кабальнов, С. В. Оболенский

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В технике широко применяются фотодиоды в различных приложениях. Однако важным недостатком классических фотодиодов является низкий уровень их радиационной стойкости [1], что значительно ограничивает возможности их использования в космических аппаратах и других приборах, предназначенных для работы в условиях воздействия ионизирующих излучений.

Для обеспечения радиационной стойкости фотодиодов применяются различные методы, как схемотехнические, так и технологические.

В данной работе представлен результат исследований возможности создания стойких к воздействию ионизирующих излучений фотодиодов на основе хорошо зарекомендовавших себя в радиационно-стойкой микроэлектронике материалов: кремнии на сапфире (КНС) и арсениде галлия.

В первой части работы представлены результаты исследования стойкости фотодиодов изготовленных на основе КНС и приведено сравнение их характеристик с фотодиодами на основе традиционной кремниевой технологии.

Во второй части работы представлены результаты исследований стойкости фотодиодов (фотопреобразователей) на основе гетеропереходов GaAs-InGaAs.

Фотодиоды на основе кремния на сапфире и кремния

Ниже представлены результаты разработки фотодиодов на КНС структурах и исследований их стойкости к воздействию ионизирующих излучений.

Фотодиоды разрабатывались для применения как преобразователи постоянного и импульсно-периодического оптического излучения с длиной волны 0,63 мкм в электрический сигнал [2]. Были разработаны и исследованы два типа фотодиодов: одноэлементные (ФД1), содержащие один фоточувствительный элемент (ФЧЭ), и двухэлементные (ФД2), содержащие два идентичных ФЧЭ с межэлементным зазором 60 мкм. Конструктивно области анода и катода фотодиодов выполнялись в виде встречно-штыревой структуры с размером фоточувствительной области 1,4×1,4 мм² для одноэлементных диодов и 0,4×1,4 мм² для каждого элемента двухэлементных диодов (рис. 1).

В качестве материала подложки использовались гетероэпитаксиальные структуры КНС. Схематично на рис. 2 в разрезе приведена структура элементарного фотодиода. Показана активная область p-n пе-

рехода, 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 (ФСС). Фоточувствительную область можно рассматривать как диод большой площади, который с целью увеличения токовой чувствительности был сформирован из 20 параллельно соединенных элементарных фотодиодов малой площади.

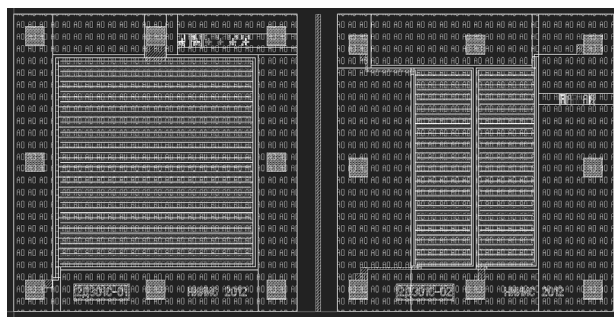


Рис. 1. Топология фотодиодов с одним и двумя ФЧЭ

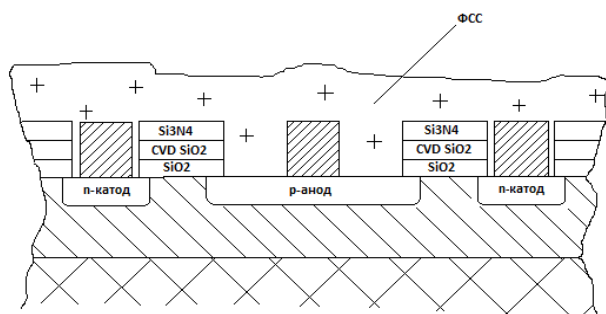


Рис. 2. Разрез структуры элементарного фотодиода

Параллельно с фотодиодами на КНС структурах были изготовлены по аналогичной технологии фотодиоды на объемном кремнии. В таблице представлены результаты измерений темного тока и токовой чувствительности фотодиодов в зависимости от типа и параметров подложек.

Фотодиоды, созданные по кремниевой технологии, имели характеристики лучше, что обусловлено более совершенной структурой монокристаллического кремния. Гетероэпитаксиальные структуры КНС по сравнению с объемным кремнием имеют повышенную дефектность, связанную с влиянием внутренних механических напряжений. Однако характеристики фотодиодов на КНС структурах удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям.

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

Структуры фотодиодов были промаркированы следующим образом:

– фотодиоды с одним ФЧЭ, 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.

Далее представлены результаты исследований радиационной стойкости фотодиодов.

Сначала проводились исследования влияния на работоспособность фотодиодов воздействия мощности экспозиционной дозы гамма-излучения. Длительность такого воздействия составляла 2,5–16 нс. Уровень этого воздействия в условных единицах менялся от 1 до 5 Ус.

Типичная осциллограмма сигналов с фотодиодов после воздействия мощности экспозиционной дозы гамма-излучения показана на рис. 3. Стрелкой снизу на рис. 3 показан момент импульса излучения, при этом видно, что длительность ионизационной реакции фотодиодов значительно превышает длительность наводки системы запуска установки.

Выходные сигналы фотодиодов на основе КНС восстанавливались после воздействия мощности экспозиционной дозы гамма-излучения за время менее 10 мкс независимо от уровня воздействия, а у фотодиодов на основе Si – значительно дольше – до 40 мкс.

Деградации образцов фотодиодов на основе КНС при таком воздействии обнаружено не было, а у образцов на основе Si деградация незначительна: снижение выходного напряжения после воздействия не превышало 5 %.

На втором этапе проводились исследования влияния на работоспособность фотодиодов комбинированного воздействия потока быстрых нейтронов и гамма-излучения. В процессе такого воздействия образцы фотодиодов размещали в непосредственной близости от выхода излучения. На рис. 4 показаны типичные осциллограммы сигналов на нагрузках фотодиодов. Уровень этого воздействия по нейтрону составил более 3 Ус.

Из приведенных результатов, рис. 4, видно, что такое воздействие оказывает значительное влияние

на параметры фотодиодов, как во время, так и после воздействия.

Во время этого воздействия выходное напряжение с фотодиодов возрастает в 2–4 раза. Форма импульса напряжения повторяет форму импульса излучения.

Фотодиоды на основе КНС деградируют после комбинированного воздействия потока быстрых нейтронов и гамма-излучения в гораздо меньшей степени, чем на основе Si. Деградация образцов фотодиодов на основе Si составила более 80 %, на основе КНС - не превышала 4 %.

На третьем этапе проводилось исследование влияния на работоспособность фотодиодов воздействия экспозиционной дозы гамма-излучения. Как и на предыдущих этапах, образцы фотодиодов располагали в поле излучения. Воздействие экспозиционной дозы гамма-излучения продолжалось в течение 33 мин.

Изменение параметров выходных сигналов контролировали с помощью осциллографов с интервалом около 10 мин. На рис. 5 приведены графики изменения выходного напряжения фотодиодов в процессе воздействия экспозиционной дозы гамма-излучения.

Проведенные исследования показали, что деградация напряжения образцов фотодиодов на основе Si после такого воздействия составила 20–35 %, а у образцов фотодиодов на основе КНС – отсутствовала. При этом у образцов фотодиодов на основе КНС наблюдалось восстановление (увеличение) напряжения на 15–25 % по сравнению с уровнем до воздействия экспозиционной дозы гамма-излучения.

Фотопреобразователи на основе гетероструктур

Фотопреобразователи (ФП) на основе гетеропереходов с использованием GaAs обычно рассчитаны на длину волны лазерного излучения (ЛИ) менее 870 нм, что связано с шириной запрещенной зоны GaAs. Такого рода структуры хорошо зарекомендовали себя, как с точки зрения удобства работы с ними, достаточной проработанностью конструкций, так и высокой радиационной стойкостью.

Ниже рассмотрены ФП на основе гетеропереходов GaAs-InGaAs, изготовленные в ФТИ им. А. Ф. Иоффе и рассчитанные на длину волны ЛИ, равную 970 ± 30 нм.

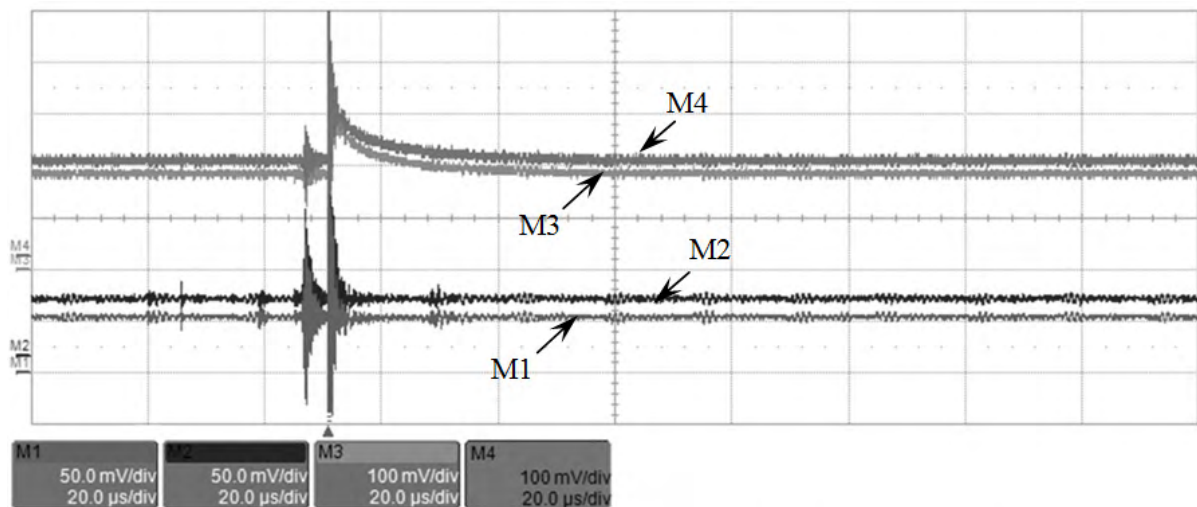


Рис. 3. Осциллограмма сигналов с фотодиодов при воздействии мощности экспозиционной дозы гамма-излучения: M1, M2 – сигналы с ФД2-КНС; M3, M4 – сигналы с ФД2-Si

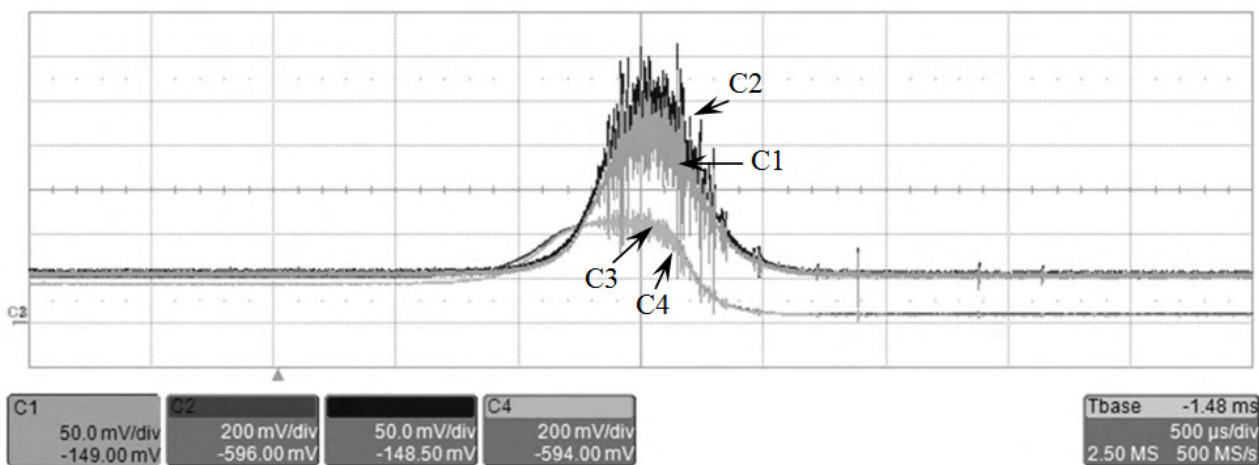


Рис. 4. Осциллограмма сигналов на фотодиодах при комбинированном воздействии потока быстрых нейтронов и гамма-излучения: C1, C2 – сигналы с ФД1-КНС; C3, C4 – сигналы с ФД1-Si

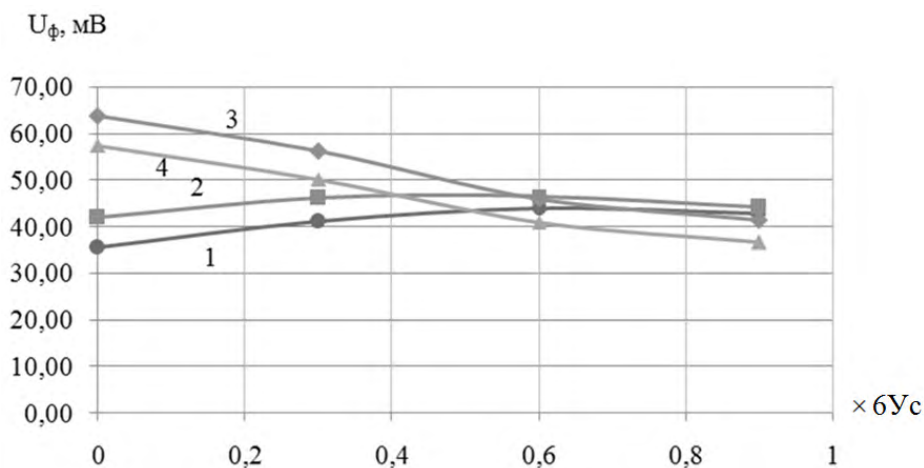


Рис. 5. Изменение выходного напряжения в процессе воздействия экспозиционной дозы гамма-излучения: 1, 2 – ФД1-КНС, 3, 4 – ФД1-Si

Конструкция гетероструктуры ФП была выбрана, исходя из общих принципов конструкций гетероструктур для приборов такого класса, - с широкозонным окном и тыльным потенциальным барьером. Подобный тип гетероструктур широко применяется и при создании ФП солнечного излучения, поэтому принцип работы таких ФП хорошо изучен.

На основе структур GaInAs с содержанием индия 24 % были изготовлены ФП для исследования потенциальных возможностей по преобразованию мощного ЛИ в диапазоне длин волн 970 ± 30 нм.

Спектральная зависимость фоточувствительности GaInAs ФП, представленная на рис. 6, демонстрирует значения $0,605\text{--}0,615$ А/Вт в диапазоне длин волн $940\text{--}1000$ нм.

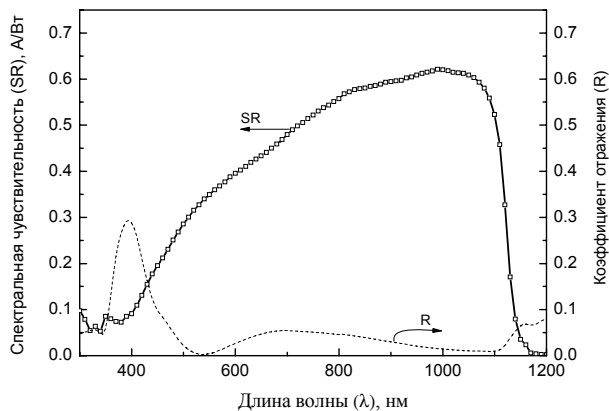


Рис. 6. Спектральная зависимость фоточувствительности GaInAs ФП с содержанием индия 24 %

Измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) ФП в диапазоне мощностей ЛИ вплоть до 4 Вт показали, что для созданных на основе GaInAs метаморфных структур ФП ЛИ возможно достижение эффективности преобразования на уровне 40 % при оптимальном режиме работы ФП (рис. 7).

Возможно дальнейшее повышение КПД, которое будет определяться точностью согласования длины волны и мощности ЛИ с параметрами структуры и конструкции ФП.

Представленные структуры были исследованы для определения их радиационной стойкости.

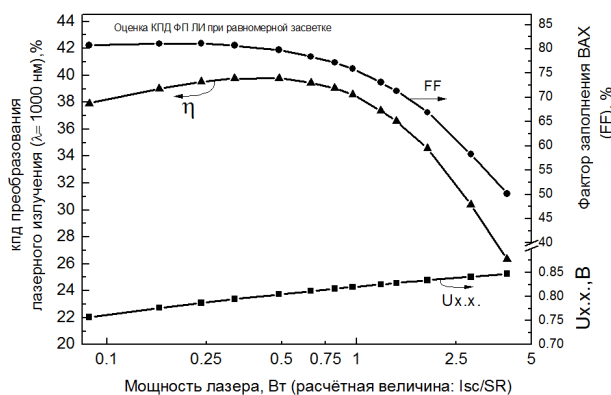


Рис. 7. Зависимость КПД, напряжения холостого хода ($U_{х.х.}$) и фактора заполнения ВАХ (FF) ФП ЛИ от мощности ЛИ ($SR = 0.62$ А/Вт, $\lambda = 1000$ нм)

С целью оценки деградации параметров ФП исследования осуществляли по схеме, приведенной на рис. 8. Конструктивно два соединенных последовательно образца ФП1 и ФП2 с подключенным нагрузочным сопротивлением R1 располагали в экранирующем кожухе. Длина соединительных кабелей от экранирующего кожуха до измерительных приборов составляла 20 м.

Для проверки работоспособности ФП ЛИ на него с ЛД (см. рис. 8) подавали импульсно-периодический световой сигнал мощностью 1 Вт, длительностью импульса 100 мкс и периодом следования 1 мс. Длина волны излучения составляла 976 нм.

На первом этапе проводили исследование влияния на работоспособность ФП воздействия мощности экспозиционной дозы гамма-излучения. Уровень этого воздействия менялся от 1,5 до 5Ус. Типичная осциллограмма сигнала на нагрузке ФП при воздействии мощности экспозиционной дозы гамма-излучения показана на рис. 9.

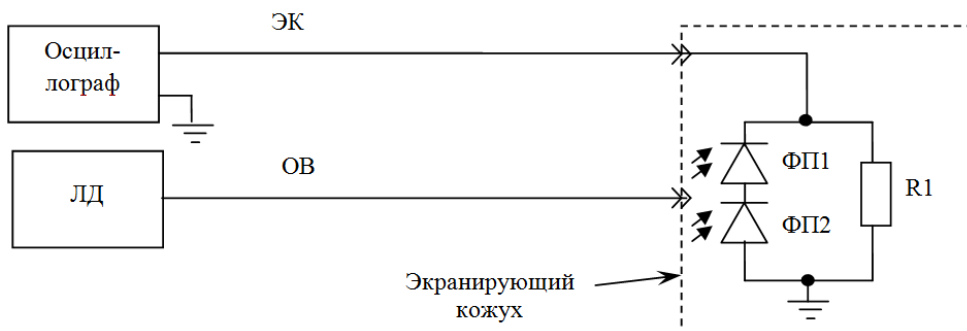
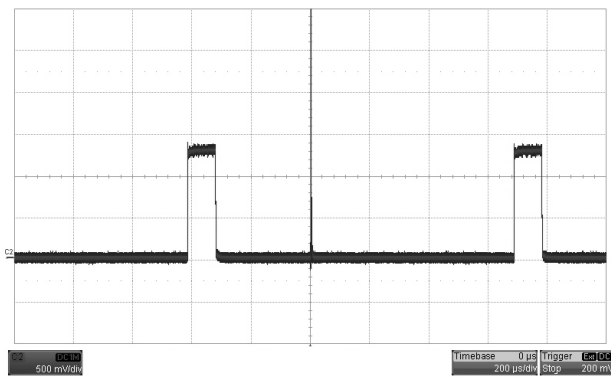
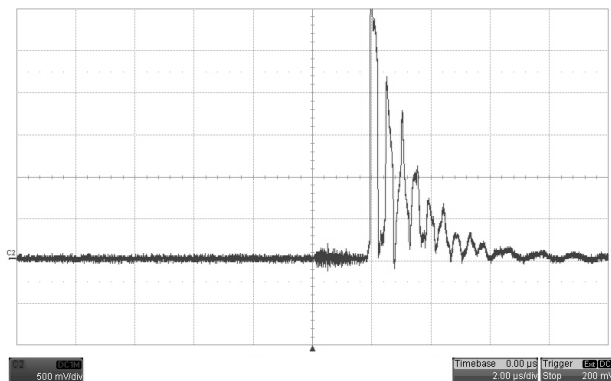


Рис. 8. Схема включения ФП при исследованиях: ЛД – лазерный диод; ФП1 и ФП2 – последовательно соединенные фотопреобразователи; R1 = 91 Ом – нагрузочное сопротивление ФП; ЭК – электрический кабель; ОВ – оптоволоконный кабель



а



б

Рис. 9. Типичная осциллограмма сигнала на нагрузке ФП в разных масштабах времени, при воздействии мощности экспозиционной дозы гамма-излучения: а – 200 мкс/дел, б – 2 мкс/дел

Стрелкой снизу на рис. 9 показан момент прихода импульса излучения. Дegradация ФП при таком воздействии отсутствовала. Время спада паразитного сигнала - менее 5 мкс. По уровню и полярности сигнала можно утверждать, что происходит ионизация полупроводниковых кристаллов ФП, разделение носителей встроенным полем перехода и, соответственно, появление напряжения на нагрузке. После воздействия мощности экспозиционной дозы гамма-излучения ФП сохранил работоспособность.

На втором этапе проводили исследования влияния на работоспособность ФП флюенса нейтронов и экспозиционной дозы гамма-излучения. Уровень этого воздействия менялся от 1,3 до 5 Ус.

Осциллограмма сигнала на нагрузке ФП при этом воздействии показана на рис. 10.

Стрелкой снизу на рис. 10 показан момент начала импульса излучения. Сигнал с выхода ФП по форме практически повторял форму импульса излучения. После такого воздействия уровень полезного сигнала снизился приблизительно на 11 %. При дальнейших измерениях уровень сигнала не восстанавлился.

Таким образом, исследования радиационной стойкости образцов ФП на основе гетеропереходов GaAs-InGaAs, рассчитанных на длину волны ЛИ 970 ± 30 нм, показали высокую стойкость образцов ФП:

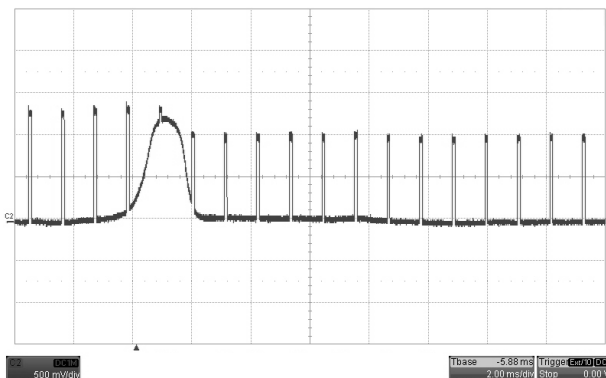


Рис. 10. Осциллограмма сигнала на нагрузке ФП при воздействии флюенса нейтронов и экспозиционной дозы гамма-излучения

- деградация образцов ФП отсутствует, как при воздействии мощности экспозиционной дозы гамма-излучения, так и экспозиционной дозы гамма-излучения;
- время восстановления работоспособности ФП при воздействии мощности экспозиционной дозы гамма-излучения не превышает 5 мкс;
- после воздействия флюенса нейтронов и экспозиционной дозы гамма-излучения уровень полезного сигнала с ФП ЛИ снизился лишь на 11 %.

Выводы

Приведенные в данной работе результаты показали перспективность использования в качестве материалов фотодиодов структур КНС и на основе арсенида галлия. Применение указанных материалов позволяет обеспечить высокую стойкость фотодиодов к воздействию ионизирующих излучений.

Результаты проведенных исследований показали, что фотодиоды на основе КНС структур обладают электрическими характеристиками, сопоставимыми с кремниевыми диодами, а уровень их радиационной стойкости существенно превосходит уровень стойкости кремниевых диодов.

Исследования ФП на основе гетеропереходов GaAs-InGaAs, изготовленных в ФТИ им. А. Ф. Иоффе и рассчитанных на длину волны лазерного излучения 970 ± 30 нм, показали высокую стойкость образцов к воздействию ионизирующих излучений.

Литература

1. Филадель А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. М.: Физматкнига, 2011.
2. Пат. 2611552, РФ. Фотоприемное устройство (варианты) и способ его изготовления / Кабальнов Ю. А., Киселев В. К., Труфанов А. Н. // Бюллетень изобретений .2017.