

На правах рукописи

АЗЕР ЗИРАДДИН ОГЛЫ САДЫГОВ

**РАЗРАБОТКА НОВЫХ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ
ФОТОПРИЕМНИКОВ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ И ИХ
РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ**

Специальность: 2225.01 – Радиационное материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени доктора философии по
физике

Баку - 2016

Работа выполнена в Институте Радиационных Проблем
НАН Азербайджана

Научные руководители:

Д.ф.-м.н., профессор

Р. С. Мадатов

К.ф.-м. н., доцент

Р. Н. Мехтиева

Официальные оппоненты:

Д.ф.-м.н., проф.

А.М.Магеррамов

Д.ф.-м.н., проф.

Г.С.Оруджев

Ведущая организация: Институт Физики им. академика
Х.М.Абдуллаева НАНА (лаборатория «Ядерных Исследований»).

Защита состоится «03» июня 2016г. в «12⁰⁰» часов на заседании
Диссертационного Совета D.01.221 при Институте Радиационных
Проблем НАН Азербайджана

Адрес: Az-1143, г. Баку, ул. Б. Вахабзаде, 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института
Радиационных Проблем НАН Азербайджана.

Автореферат разослан «02» мая 2016 г.

Ученый секретарь

Диссертационного Совета,

д.х.н.

Т.Н.Агаев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и выбор объекта исследования. В последние годы, достигнуты значительные успехи в разработке новых фотоприемников на основе кремния, арсенида галлия, германия, карбида кремния, искусственного алмаза и других полупроводников. Среди них самым высокочувствительным, в настоящее время, являются микропиксельные лавинные фотодиоды (МЛФД), способные регистрировать единичные световые кванты при комнатной температуре. Сегодня с большой уверенностью можно сказать, что МЛФД приборы являются твердотельным аналогом традиционных вакуумных фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). Свидетельством этому является применение МЛФД в крупных Международных экспериментах по Физике Высоких Энергий, таких как CMS, ATLAS, COMPASS (CERN, Швейцария), T2K (Япония) и другие.

Исследованию амплитудных характеристик МЛФД посвящены много экспериментальных и теоретических работ, тогда как временные характеристики прибора изучены недостаточно. Однако, для широкого применения МЛФД во времяпролетных (TOF – Time of Flight) устройствах Физики Высоких Энергий и в медицинских ПЭТ сканерах наряду амплитудных измерений важны также временные измерение (время прихода сигнала). С этой точки зрения недостаточно изучено быстродействие прибора, не выяснен механизм формирования переднего фронта фотоотклика, определяющего точность времяпролетных устройств. Не создана физическая модель МЛФД, учитывающая характер лавинного процесса, происходящего внутри пикселей. Не исследованы предельные временные характеристики МЛФД. Недостаточно изучена работа МЛФД различного типа в условиях высокой радиации.

Целями работы являются выявление факторов, определяющих быстродействие лавинных микропиксельных фотоприемников и изучение их радиационную стойкость. Реализация поставленных целей осуществлялась последовательным решением следующих основных задач:

- Расчет амплитудных и временных параметров МЛФД на основе эквивалентной схемы, учитывающей характер лавинного процесса в микропикселях;

- Исследование влияния паразитной емкости, шунтирующей гасящего сопротивления и сопротивления обедненного слоя полупроводника на форму одноэлектронного отклика МЛФД;
- Исследование возможности уменьшения удельной емкости лавинных микропиксельных структур, ограничивающей их быстродействие;
- Сравнительный анализ радиационной стойкости двух типов МЛФД.

Объектом исследования являются кремниевые микропиксельные структуры, способные работать в условиях лавинного умножения носителей заряда. Основные свойства лавинных микропиксельных структур исследовались методом математического моделирования эквивалентных схем и математического анализа оцифрованных амплитудных и временных спектров одноэлектронного фотоотклика прибора.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые предложена физическая модель работы микропиксельных лавинных фотодиодов, учитывающая паразитную емкость гасящего микрорезистора, сопротивление объемного заряда полупроводника и изменение потенциала пикселя после каждого цикла лавинного процесса.
2. Впервые теоретически предсказано и экспериментально подтверждено, что после окончания лавинного процесса потенциал пикселя МЛФД падает ниже напряжения пробоя на величину, равную перенапряжению. При этом заряд одноэлектронного импульса (Q_p) МЛФД определяется как, $Q_p = 2 \times \Delta U_p \times C_p$, где ΔU_p – величина перенапряжения (overvoltage), C_p – емкость пикселя.
3. Предложен новый способ увеличения быстродействия и коэффициента усиления МЛФД с поверхностным расположением пикселей путем увеличения площади перекрытия общей металлической шины с пикселями.
4. Предложена новая конструкция и разработана технология изготовления МЛФД с глубоко погруженными пикселями, имеющего удельную емкость более чем в 10 раз ниже известных аналогов. Уменьшение удельной емкости реализовано путем увеличения толщины первого эпитаксиального слоя МЛФД. Показано, что для

предотвращения краевого пробоя доза легирования крайних элементов матрицы пикселей не должно превышать величины $1,4 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

5. Впервые разработан и экспериментально реализован новый фотоприемник – микропиксельный лавинный фототранзистор (МЛФТ), содержащий матрицу фотодиодных пикселей, в котором каждый пиксель соединен с индивидуальным n-p-n микротранзистором, работающим в цифровом режиме.
6. Установлено, что радиационная стойкость МЛФД глубинным расположением пикселей более чем в 10 раз превышает известные аналоги. Показано, что улучшение радиационной стойкости объясняется пониженной чувствительностью таких МЛФД. Благодаря синусоидальному распределению электрического поля вдоль поверхности прибора, большая часть носителей заряда, генерированных в радиационных дефектах, проходят между пикселями без усиления.

Практическая ценность работы заключается в том, что в ней впервые разработан и изготовлен новейший высокочувствительный фотоприемник – микропиксельный лавинный фототранзистор (МЛФТ). Экспериментально установлено, что МЛФТ значительно превосходит известные аналоги в мире по быстродействию, чувствительности и минимальной удельной емкости.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Итеративная физическая модель работы микропиксельных лавинных фотодиодов, учитывающая паразитную емкость гасящего микрорезистора, сопротивление объемного заряда полупроводника и изменение потенциала пикселя после каждого цикла лавинного процесса.
2. Новый способ увеличения быстродействия и коэффициента усиления МЛФД с поверхностным расположением пикселей путем увеличения площади перекрытия общей металлической шины с пикселями. Использование диэлектрического слоя с повышенной диэлектрической проницаемостью, например, нитрида кремния вместо двуокиси кремния для минимизации потери фоточувствительной площади прибора.
3. Конструкция и технология изготовления нового МЛФД с глубоко погруженными пикселями, имеющего удельную емкость более чем в 10 раз ниже известных аналогов.

4. Конструкция и технология изготовления новейшего высокочувствительного фотоприемника – микропиксельного лавинного фототранзистора, значительно превосходящего известные аналоги в мире по быстродействию и чувствительности.
5. Физическая модель, объясняющая высокую радиационную стойкость МЛФД с глубоко погруженными пикселями по сравнению с аналогами.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Третья международная конференция "Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии" - ИСМАРТ-2012 (19-23 ноября 2012, г. Дубна, Россия);
- Четвертая международная конференция "Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии" ИСМАРТ-2014 (12-16 октября 2014, г. Минск, Беларусь);
- The 13th Pisa Meeting on Advanced Detectors (24-30 May 2015, La Biodola, Isola d'Elba, Italy);
- Third International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research–RAD-2015 (June 8-12, 2015, Budva, Montenegro);
- 10-ая Международная конференция: Ядерная и радиационная физика (Сентябрь 2015, Астана, Казахстан);
- Fövqəladə Hallar Nazirliyinin 10 illik yubileyinə həsr olunmuş konfrans (30 Sentyabr, 2015, Bakı);
- Gənc tədqiqatçılar üçün "Akademik elm həftəliyi–2015" adlı beynəlxalq multidissiplinar forum (2-4 noyabr 2015, Bakı);
- The 15th Vienna Conference on Instrumentation (15-19 February 2016. Vienna, Austria).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 9 научных статьях, из которых 7 опубликованы в зарубежных рецензируемых, а 2 – в республиканских научных журналах.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, выводов и списка использованной литературы. Диссертация изложена на 110 печатных страницах, содержит 67

рисунков и 5 таблиц. Общий объем состоит из 151 страницы. Список цитируемой литературы состоит из 90 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована тема, сформулированы цели и задачи работы, определены научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Приведены данные об апробации работы и основных публикации, кратко рассмотрена структура диссертации.

В первой главе приведены результаты анализа существующих к началу работы кремниевых фотоприемников, в том числе обычных р-і-п фотодиодов, лавинных фотодиодов с традиционной р-п структурой, лавинных МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) и МРП (металл-резистивный слой-полупроводник) структур, а также МЛФД (микропиксельные лавинные фотодиоды) с поверхностным и глубинным расположением пикселей. Оценены преимущества и недостатки каждого из них. Показано, что для регистрации слабых световых импульсов, вплоть до единичных световых квантов, необходимо разработать новые быстродействующие микропиксельные лавинные фотоприемники, имеющие высокие коэффициенты усиления ($\sim 10^5 \div 10^6$), низкие удельные емкости и низкие коэффициенты избыточного шума ($F \sim 1$ при $M > 1000$).

Во второй главе приведены результаты исследования механизма формирования одноэлектронного фотоотклика МЛФД на основе предложенной физической модели, учитывающей характер лавинного процесса в полупроводнике и влияния пассивных элементов внешней электрической цепи на параметры прибора. В предложенной модели каждый пиксель представлен в виде кремниевого р-і-п диода. В цепи диода имеются гасящее сопротивление R_g и шунтирующая его емкость C_g . К пикселю приложено напряжение U_d величиной, превышающей потенциал пробоя пикселя U_b . За время пролета через обедненный слой (і-слой) толщиной W единичный электрон ($N_{01} = 1$) создает поток электронов, равный $N_1 = \exp(\alpha_0 W)$ (см. Рис.1а). Соответственно, образованные при этом дырки в количестве $[\exp(\alpha_0 W) - 1]$, идущие в противоположную сторону создают новый дырочный поток, равный $P_2 = [\exp(\alpha_0 W) - 1] \times \exp(\beta_0 W)$. Затем созданные дырками новые электроны в количестве $N_{02} = [\exp(\alpha_0 W) - 1] \times [\exp(\beta_0 W) - 1]$

начинают второй цикл лавинного процесса и создают электронный поток величиной $N_2 = [\exp(\alpha_0 W) - 1] \times [\exp(\beta_0 W) - 1] \times \exp(\alpha_1 W)$.

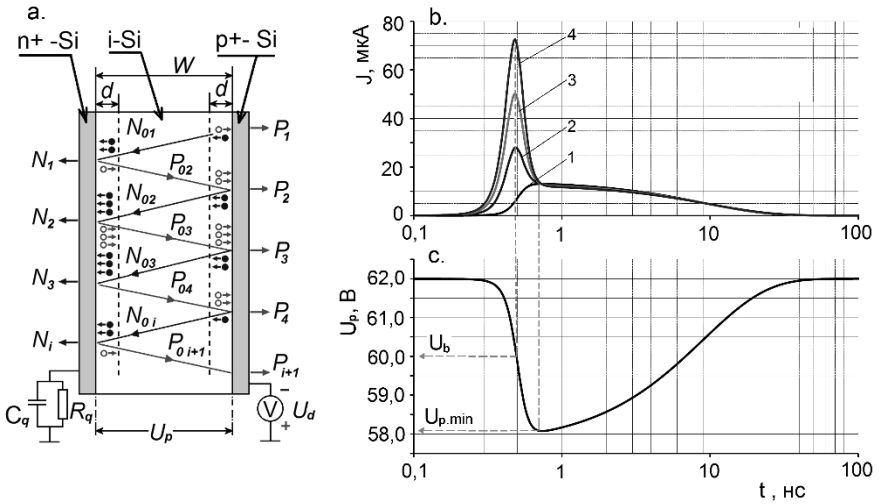


Рис.1. Эквивалентная схема (а) и характер изменения формы одноэлектронного фотоотклика J (b) и потенциала пикселя U_p (c) МЛФД при $C_g = 0$ фФ (кривая 1); $C_g = 1$ фФ (кривая 2); $C_g = 2$ фФ (кривая 3); $C_g = 3$ фФ (кривая 4).

Здесь буквами α и β обозначены коэффициенты ионизации для электронов и дырок, соответственно. Зависимость α и β от напряженности электрического поля определяются известными выражениями:

$$\alpha(E_i) = 3,8 \times 10^6 \times \exp\left(-\frac{1,75 \times 10^6}{E_i}\right),$$

$$\beta(E_i) = 2,25 \times 10^7 \times \exp\left(-\frac{3,26 \times 10^6}{E_i}\right).$$

Таким образом, количество электронов N_i в i -ом цикле лавины можно выразить как

$$N_i = \left\{ \prod_{j=2}^i [\exp(\alpha_{j-1} W) - 1] \times [\exp(\beta_{j-1} W) - 1] \right\} \times \exp(\alpha_i W).$$

Здесь после каждого цикла лавинного процесса учитывается изменение напряженности электрического поля E_i в пикселе, вызванное разрядкой внутренним лавинным током I_i и зарядкой внешним током I_i . Отчет

времени определяется количеством цикла ($t_i = (i - 1) \times 2\tau$), где τ – время пролета электронов через -слой.

Для расчета параметров МЛФД была разработана специальная программа с использованием программного языка C++. Обработка результатов вычисления проводилась при помощи программных пакетов ROOT (CERN, Geneva). На рисунках 1b и 1c представлены формы одноэлектронного фототока I и потенциала U_p пикселя МЛФД при различных значениях паразитной емкости. Моделирование проводилось при типичных значениях параметров МЛФД – внешнего источника напряжения $U_a = 62В$, напряжения пробоя $U_b = 60В$ перенапряжения $\Delta U_p = U_a - U_b = 2В$, емкости пикселя $C_p = 30$ фФ и гасящего сопротивления $R_g = 300кОм$. Установлено, что лавинный процесс в МЛФД приводит падению потенциала пикселя ниже напряжения пробоя на величину, равную перенапряжению, т.е. $U_{p,min} = U_b - \Delta U_p = 58В$. Кроме того, при увеличении паразитной емкости, шунтирующей гасящего сопротивления, фронт нарастания снимаемого сигнала значительно падает. Это позволяет предложить новый способ достижения максимального быстродействия МЛФД, заключающийся в создании дополнительных индивидуальных паразитных емкостей C_g , шунтирующих соответствующие гасящие микрорезисторы. Показано, что величина емкости C_g , составляющая всего 10% емкости C_p самого пикселя, является достаточной для достижения максимального быстродействия, равного обратному значению фронта нарастания внутреннего лавинного тока разрядки.

Третья глава диссертации посвящена описанию новых способов создания быстродействующих лавинных фотоприемников. Необходимость улучшения быстродействия микропиксельных лавинных фотоприемников вызвана возможностью их применения в ряде ядерно-физических детекторах и позитронно-эмиссионных томографах нового поколения, в которых требуются времяпролетные модули, способные измерить время прихода заряженных частиц или гамма кванта с точностью не хуже, чем 100пс. Для таких модулей важна длительность (или скорость нарастания) переднего фронта сигнала, снимаемого от фотоприемника.

Результаты исследования, приведенные в этой главе диссертации, привели к разработке трех новых способов улучшения быстродействия микропиксельных лавинных фотоприемников. Первый способ

предполагает увеличение шунтирующей гасящего сопротивления паразитной емкости. Установлено, что дополнительная шунтирующая емкость, необходимая для повышения быстродействия МЛФД с поверхностными пикселями можно сформировать путем увеличения площади перекрытия общей металлической шины с пикселями. На рисунке 2 представлена конструкция нового МЛФД с улучшенным быстродействием. Для увеличения емкости $C_{\text{ш}}$ шунтирующей

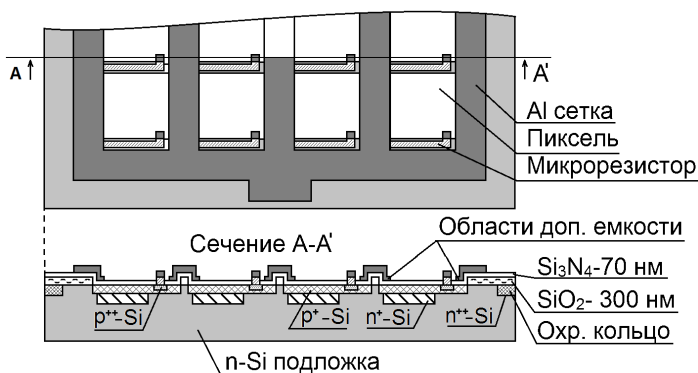


Рис.2. Новый микропиксельный лавинный фотодиод с поверхностными микрорезисторами.

гасящего микрорезистора, часть чувствительной площадки пикселя покрывают металлическими полосками. Использование нитрида кремния (Si₃N₄) с диэлектрической проницаемостью 7,5 в место традиционно используемой термической двуокиси кремния (SiO₂) с диэлектрической проницаемостью 3,9, позволяет увеличить около двух раз удельную емкость необходимого дополнительно конденсатора.

Второй способ заключается в уменьшении удельной емкости МЛФД с целью улучшения быстродействия. Этот способ реализуется путем увеличения толщины первого эпитаксиального слоя в МЛФД с глубоко погруженными пикселями. Одновременно с этим следует уменьшить удельное сопротивление этого эпитаксиального слоя так, чтобы напряжение, необходимое для его полного обеднения не увеличилось. Это обеспечить неизменность рабочего напряжения прибора при увеличении толщины первого эпитаксиального слоя. При этом для предотвращения возникшей опасности краевого пробоя, доза легирования крайних элементов матрицы пикселей должно быть значительно снижена по сравнению с дозой легирования остальных

пикселей (см. рис.3). Экспериментальные результаты, полученные на тестовых структурах, показали, что при уменьшении дозы

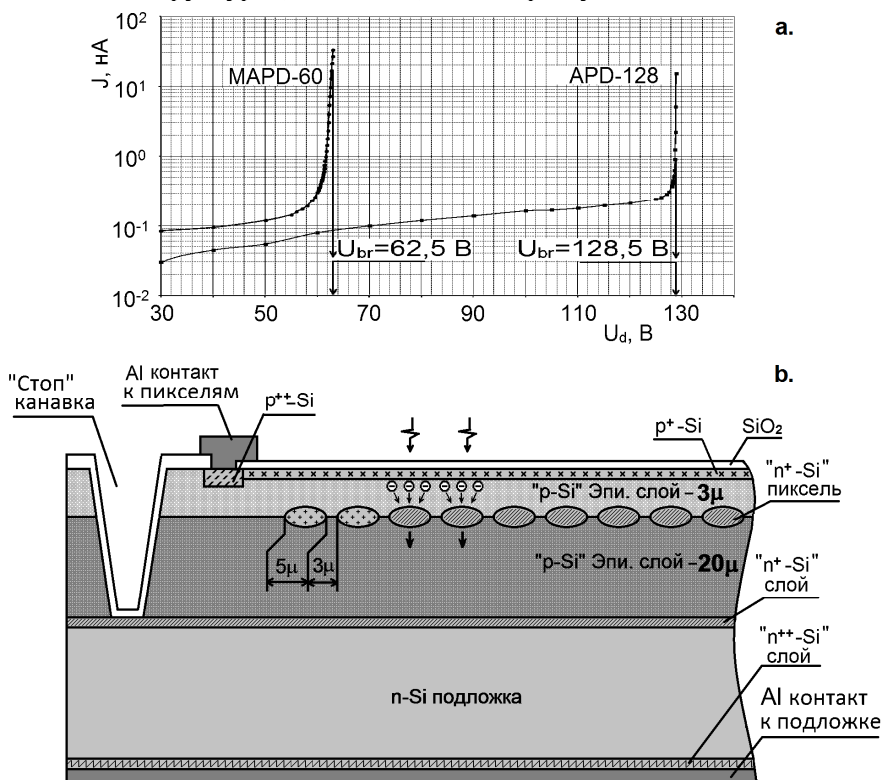


Рис.3. ВАХ тестовых МЛФД структур с общей толщиной эпитаксиальных слоев 8 мкм (а) и конструкция нового МЛФД с низкой удельной емкостью (б).

легирования крайних элементов матрицы пикселей с $2,3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (рис.3а, кривая "MAPD-60") до $1,4 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (кривая "APD-128") напряжение пробоя растет от 62,5В до 128,5В, что достаточно для предотвращения краевого пробоя. Это позволило увеличить толщину эпитаксиальных слоев от 8мкм до 23мкм, что позволило уменьшить удельную емкость МЛФД около 3-х раз по сравнению с известными аналогами (рис.3б).

Третий способ связан с необходимостью создания принципиально нового лавинного фотоприемника. Дело в том, что, будучи

полупроводниковым прибором, МЛФД фотоприемники имеют высокую удельную емкость (от 10 до 50 пФ/мм²). Это приводит к ограничению быстродействия прибора при увеличении его чувствительной площади. Микропиксельный лавинный фототранзистор (МЛФТ), описанный в данной главе работы, решает эту проблему. МЛФТ содержит матрицу микропикселей с индивидуальными гасящими резисторами, как известный МЛФД, и матрицу микротранзисторов с индивидуальными балластными резисторами. Все микропиксели соединены с помощью индивидуальных гасящих резисторов к одной общей металлической шине, а все микротранзисторы соединены через индивидуальные балластные резисторы к другой металлической шине. То есть, прибор имеет два независимых выхода для снятия сигнала: «обычный выход», соединенный к цепи микропикселей и «быстрый выход», соединенный к цепи микротранзисторов (см. рис.4). Принцип работы МЛФТ основывается на специфике работы пикселя МЛФД в режиме перенапряжения (в режиме Гейгера). Лавинный процесс в пикселе вызывает там падение напряжение больше, чем 0,8В, что достаточно для полного открывания перехода эмиттер-база (или пиксель) микротранзистора, и результате этого через электрическую цепь микротранзистора течет большой ток, ограниченный только его балластным резистором. Микротранзистор закрывается, когда потенциал базы (пикселя) относительно эмиттера станет ниже 0,8В, благодаря разрядке емкости микропикселя. Микротранзистор, например n-p-n –типа, формируется непосредственно над малой части площади пикселя р-типа проводимости, изготовленный на подложке n-типа проводимости. Например, микротранзистор размером 5μ*5μ может занимать около 1% площади микропикселя размером 50μ*50μ. При этом удельная емкость микротранзистора будет в 100 раз меньше соответствующей емкости пикселя, что равносильно уменьшению эффективной емкости прибора, поскольку сигнал снимается с цепи микротранзисторов.

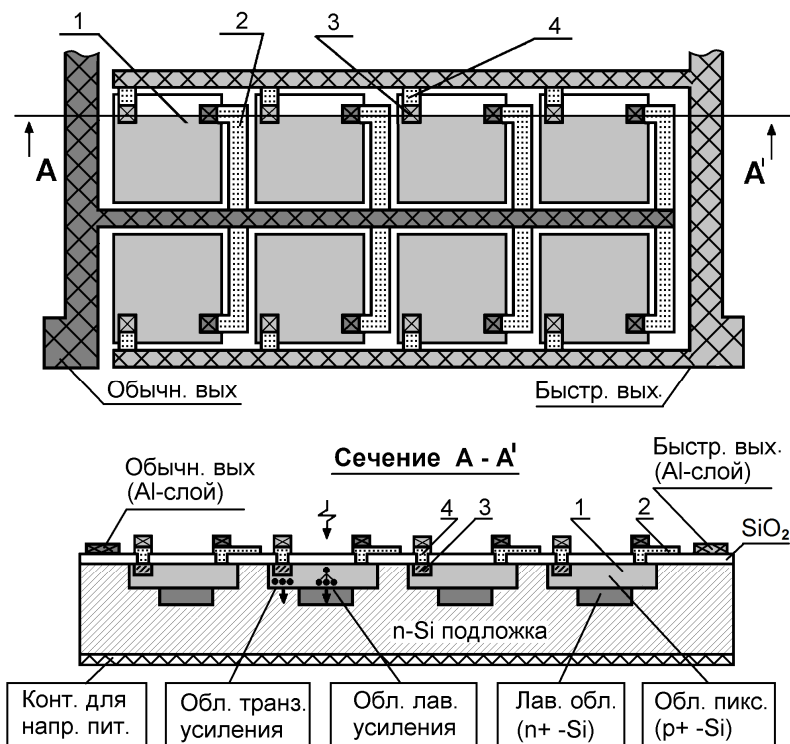


Рис.4. Конструкция микропиксельного лавинного фототранзистора, изготовленного на кремниевой подложке n-типа проводимости. 1-Микропиксель, 2-Резистор микропикселя, 3-Микротранзистор, 4-Резистор микротранзистора.

В таблице 1, приведены результаты сравнения параметров разработанного МЛФТ с аналогом от фирмы “SensL” (тип прибора: MicroPC-30035-SMT), в котором быстрый сигнал снимается с цепи микроемкостей, расположенных на поверхности микропикселей. Видно, основные параметры сигнала, снимаемого с быстрого выхода МЛФТ значительно превышает соответствующие параметры прибора фирмы “SensL”.

Таблица 1. Результаты сравнения параметров разработанного МЛФТ с зарубежным аналогом от фирмы "SensL" (Ирландия).

Прибор Параметр	Прибор от фирмы "SensL",	Разработанный прибор МЛФТ
Амплитуда сигнала	1,2 мВ	2,8 мВ
Коэффициент усиления	$0,63 \cdot 10^5$	$5,1 \cdot 10^5$
Скорость роста фронта сигнала	$2,4 \cdot 10^5$ В/сек.	$5 \cdot 10^5$ В/сек.
Чувствительная площадь	3мм*3мм	3мм*3мм

В четвертой главе приведены результаты исследования радиационной стойкости МЛФД фотоприемников при облучении протонами с энергией 150 МэВ и альфа частицами с энергией 3,5МэВ. Необходимость решения этих задач вызвано реальной возможностью применения МЛФД как в Физике Высоких Энергий, так и в импульсных нейтронных генераторах, применяемых в устройствах обнаружения взрывчатых веществ и каротажа нефтяных скважин.

Известно, что нейтронном генераторе получают монохроматические нейтроны с энергией 14.1 МэВ и сопутствующие им альфа частицы с энергией 3,5МэВ. Эти частицы получают путем бинарной реакции дейтрон+тритид титана $\rightarrow$ альфа частица+нейтрон, причем угол вылета этих частиц равно 180 градусов. Измерив время прихода и направление вылета альфа частиц можно определить направление нейтронов. В качестве детектора альфа частиц обычно используют кремниевые р-і-n диоды, низкая радиационная стойкость которых ограничивает срок службы нейтронного генератора.

Проведенные нами исследования показали, что при облучении кремниевых р-і-n и МЛФД диодов альфа частицей с дозой 1×10^{12} альфа/см², темновой ток у обоих детекторов увеличивает около 1000 раз, что равносильно к выходу из строя приборов. Поэтому, нами было предложено использовать сцинтилляционные счетчики для регистрации альфа частиц. В таком случае кремниевый МЛФД будет защищен от воздействия альфа частиц сцинтилляционным кристаллом с размерами 3мм×3мм×0,5мм, например, LFS (Lutetium Fine Silicate). Известно, что LFS имеет в 100 раз лучшую радиационную стойкость, чем любой кремниевый детектор (см. Yu.D.Zavartsev et.al. New Radiation Resistant Scintillator LFS-3 for Electromagnetic Calorimeters //

Bulleten of the Lebedev Physics Institute, 2013, Vol.40, No.2, pp.34-38). Это позволит значительно увеличить срок службы нейтронного генератора.

Облучение МЛФД детекторов протонами с энергией 150МэВ проводилось в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна, Россия). В качестве источника протонов использовался ускоритель протонов с однородностью потока частиц по сечению пучка $\approx 10\%$. Исследовались два типа МЛФД. Первый тип МЛФД детекторы (тип образцов – МР-3d с рабочей поверхностью 1мм×1мм) имели поверхностно пиксельную конструкцию. В научной литературе такие приборы часто называют как кремниевые фотоумножители (по-английски, Silicon photomultipliers – SiPM). Второй тип МЛФД детекторы (тип образцов – MAPD-3K0 с рабочей поверхностью 3,7мм×3,7мм) имели глубоко расположенную пиксельную структуру. Полученные детекторами дозы протонов составляли 2×10^{10} протон/см², $5,5 \times 10^{10}$ протон/см², 1×10^{11} протон/см², $6,5 \times 10^{11}$ протон/см², 1×10^{12} протон/см² и 5×10^{12} протон/см².

Установлено, что при фиксированной дозе облучения протонами с энергией 150МэВ, радиационная стойкость МЛФД с глубинным расположением пикселей более, чем в 10 раз превышает радиационную стойкость МЛФД с поверхностным расположением пикселей (см. рис.5).

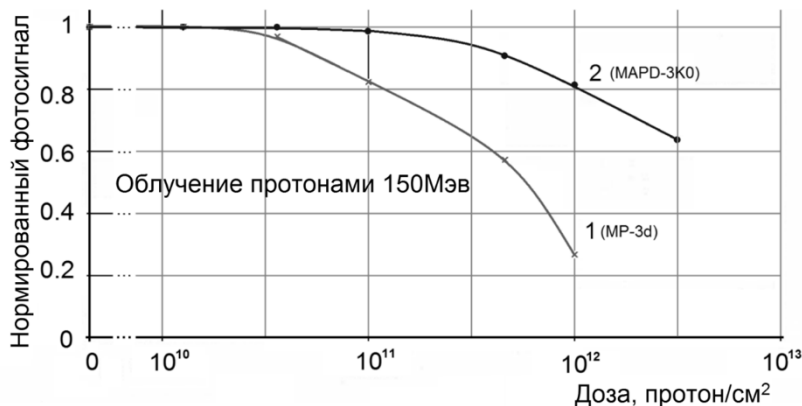


Рис.5. Зависимость амплитуды фотосигнала МЛФД от дозы облучения протонами.

Предложена физическая модель, объясняющая повышенную радиационную стойкость МЛФД с глубинным расположением пикселей. Улучшение радиационной стойкости таких детекторов объясняется пониженной чувствительностью этих приборов к радиационным дефектам, обеспечиваемой специальным распределением электрического поля в полупроводнике. Дело в том, что благодаря синусоидальному распределению электрического поля вдоль поверхности прибора, большая часть носителей заряда, генерированных в радиационных дефектах, проходят между пикселями без усиления.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана новая итеративная модель работы микропиксельных лавинных фотодиодов (МЛФД), учитывающая изменение потенциала пикселя после каждого цикла лавинного процесса. Установлено, что после окончания лавинного процесса потенциал пикселя МЛФД падает ниже напряжения пробоя на величину, равной перенапряжению. Проведенные сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными показывают, что предложенная модель достаточно хорошо (с точностью 15%) описывает работу существующих лавинных фотодиодов, работающих в режиме перенапряжения.
2. Впервые показано, что увеличение емкости, шунтирующей гасящего сопротивления пикселя МЛФД, приводит к увеличению, как быстродействия, так и коэффициента усиления прибора. Предложен новый способ увеличения шунтирующей емкости путем увеличения площади перекрытия металлической шины с пикселями. При этом использование диэлектрического слоя с повышенной диэлектрической проницаемостью, например, нитрида кремния в место двуокись кремния, позволит минимизировать потери фоточувствительной площади.
3. Предложена конструкция и разработана технология изготовления МЛФД с глубоко погруженными пикселями, имеющего удельную емкость более чем в 10 раз ниже известных аналогов. Уменьшение удельной емкости реализовано путем увеличения толщины первого

эпитаксиального слоя МЛФД. При этом для предотвращения краевого пробоя доза легирования крайних элементов матрицы пикселей не должно превышать величины $1,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

4. Разработан и экспериментально реализован новый фотоприемник – микропиксельный лавинный фототранзистор (МЛФТ), содержащий матрицу фотодиодных пикселей, в котором каждый пиксель соединен с индивидуальным п-р-п микротранзистором, работающим в цифровом режиме. Экспериментально установлено, что МЛФТ значительно превосходит известные аналоги в мире по быстродействию и чувствительности. Показано, что амплитуда сигнала, снимаемого с быстрого выхода МЛФТ, может быть значительно увеличена путем увеличения перенапряжения на приборе и уменьшения сопротивления балластного резистора микротранзистора.
5. Проведен сравнительный анализ радиационной стойкости МЛФД с поверхностным и глубинным расположением пикселей. Установлено, что радиационная стойкость МЛФД глубинным расположением пикселей более чем в 10 раз превышает известные аналоги. Показано, что улучшение радиационной стойкости объясняется пониженной чувствительностью таких МЛФД. Благодаря синусоидальному распределению электрического поля вдоль поверхности прибора, большая часть носителей заряда, генерированных в радиационных дефектах, проходят между пикселями без усиления.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ.

1. F. Ahmadov, O. Abdinov, G. Ahmadov, N. Anfimov, A. Garibov, E. Guliyev, Z. Krumshstein, R. Madatov, A. Olshevski, V. Shvetsov, A. Sadygov, Z. Sadygov, A. Titov, and V. Zhezher. Alpha Particle Detector Based on Micropixel Avalanche Photodiodes. // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2013, Vol. 10, No. 7, pp. 778–779.
2. Z. Sadygov, A. Ariffin, F. Akhmedov, N. Anfimov, T. Bokova, A. Dovlatov, I. Zheleznykh, F. Zerrouk, R. Mekhtieva, A. Ol'shevskii, A. Sadygov, A. Titov, V. Chalyshev, and M. Troitskaya. Technology of Manufacturing Micropixel Avalanche Photodiodes

and a Compact Matrix on Their Basis // Physics of Particles and Nuclei Letters, 2013, Vol. 10, No. 7, pp. 780–782.

3. Z.Sadygov, F.Ahmadov, R.Madatov, A.Sadygov et.all. On futures of potential distribution in avalanche photodiodes with deeply buried pixels. – Fizika, v.XIX, No.2, (2013), p.17-19.
4. F.Ahmadov, G.Ahmadov, N.Anfimov, A.Garibov, E.Guliyev, Z.Krumshtein, R.Madatov, A.Olshevski, A.Sadigov, Z. Sadygov, A. Titov. New alpha particle counter based on micro-pixel avalanche photodiode //Journal of Radiation Researches. vol. 1, No.1, 2014, p.34-37.
5. 3. Я.Садыгов, А. 3. Садыгов. Патент России №2528107 . Полупроводниковый лавинный детектор, приоритет от 16.04.2013, опубликован в 10.09.2014, Бюл.№25.
6. F. Ahmadov, G. Ahmadov, X. Abdullaev, A. Garibov, E. Guliyev, S. Khorev, R. Madatov, R. Muxtarov, J. Naghiyev, A. Sadigov, Z. Sadygov, S. Suleymanov and F. Zerrouk. Development of compact radiation detectors based on MAPD photodiodes with Lutetium Fine Silicate and stilbene scintillators // Journal of Instrumentation, vol.10, Feb., 2015.
7. Z.Sadygov, F.Ahmadov, S.Khorev, A.Sadigov, S.Suleymanov, R.Madatov, R.Mehdiyeva, F.Zerrouk. A new method to improve multiplication factor in micro-pixel avalanche photodiodes with high pixel density // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2015.11.008i>, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900215013704> .
8. A.Sadigov, F.Ahmadov, G.Ahmadov, A.Ariffin, S.Khorev, Z.Sadygov, S.Suleymanov, F.Zerrouk. A new detector concept for silicon photomultipliers // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2015.11.013i> <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900215013753> .
9. A. Sadigov, F. Ahmadov, S. Suleymanov, M.Nazarov, R. Akbarov, G. Ahmadov, Z. Sadygov, R. Madatov, R. Mechtiyeva, S. Khorev, F. Zerrouk. An Iterative Model of Performance of Micropixel Avalanche Photodiodes // International Journal of Advanced Research in Physical Science (IJARPS) Volume 3, Issue 2, February 2016, PP 9-18: <https://www.arcjournals.org/pdfs/ijarps/v3-i2/3.pdf> .

***Silisiyum əsaslı yeni cəld fotoqeydedicilərin işlənməsi və onların
radiasiya davamlığı***

Xülasə

Dissertasiya işində Mikropikselli Selvari Fotodiodların (MSFD) cəld fotocavablığının nəzəri və təcrübi tədqiqi təqdim edilmişdir. MSFD-ların simulyasiyası nəticəsində cəld fotocavab xassəsini yaxşılaşdırmaq məqsədilə üç yeni metod təklif olunmuşdur. Birinci metod söndürmə müqavimətinə şunt olan parazit tutumun artırmasına əsaslanır. Nəticədə boşaldıcı daxili sel cərəyanının artma frontunun əks kəmiyyətinə bərabər olan maksimal cəld fotocavaba nail olmaq mümkün olurşdur.

İkinci metod fotocavab cəldliyinin artırılması MSFD-un xüsusi tutumunun azaldılmasına əsaslanır. Bu zaman qıraq dəşilməsinin qarşısını almaq üçün, matrisin perimetri boyunca yerləşən piksellərin aşkarlama dozası, mərkəzdə yerləşən piksellərə nisbətən az olmalıdır.

Üçüncü yanaşma isə prinsipial olaraq yeni növ selvari fotoqeydedicinin (mikropikselli selvari fototranzistorun – MSFT) yaradılmasına əsaslanır. MSFT-lar individual sönmə müqavimətləri olan mikropiksellər matrisindən və ballast müqavimətləri olan mikrotranzistor matrisindən ibarətdirlər. Təcrübi olaraq təyin edilmişdir ki, MSFT-lar iş parametrlərinə görə öz analoqlarını üstələyir.

Təyin edilmişdir ki, dərinlikdə yerləşən piksel tipli MSFD-lar, səthi piksellə MSFD-ları radiasiya davamlığına görə 10 dəfə üstələyir. Dərinlikdə yerləşən piksel tipli MSFD-ların yüksək radiasiya davamlığı onlarda elektrik sahəsinin sinusoidal paylanması ilə izah olunur.

Development of silicon based new photodetectors with fast response and their radiation hardness

Abstract

The theoretical and experimental study of the response time of Micro pixel Avalanche Photodiodes (MAPD) was presented in the dissertation work. The results of MAPD simulation led to the development of three new methods to improve the response time of micro pixel avalanche photo detectors. The first method assumes an increase the parasitic capacitance, which shunts the quenching resistor. Thus it is possible to achieve the maximum speed of response, equal to the rise time inverse of the internal avalanche discharge current.

The second method is to reduce the specific MAPD capacity in order to improve the response time. Thus in order to prevent the occurred edge breakdown hazard, the dose doping of the outer cells of the pixel array must be much lower than the dose doping of the inner cells.

The third method is the necessity to create a fundamentally new avalanche photo detector – micro pixel avalanche phototransistor (MAPT). MAPT include the matrix of micro pixels with individual quenching resistors and the matrix of micro transistors with individual ballast resistors. Experimentally found, that the developed MAPT greatly exceeds the known analogues by working parameters.

It was found, that the radiation resistance of MAPD with a depth located pixels is 10 times more than the radiation resistance of MAPD with the surface located pixel. The improvement in radiation resistance is explained by the sinusoidal distribution of the electric field in the MAPD with the depth located pixels.

Kağız formatı 60x84, 1/16
Fizika çap vərəqi 1,5
Tiraj 100
AMEA-nın mətbəəsində çap olunmuşdur

Əlyazması hüququnda

AZƏR ZİRƏDDİN OĞLU SADIQOV

**SİLİSIUM ƏSASLI YENİ CƏLD FOTOQEYDEDİCİLƏRİN
İŞLƏNMƏSİ VƏ ONLARIN RADİASIYA DAVAMLILIĞI**

2225.01 – Radiasiya materialşünaslığı

Fizika üzrə fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün təqdim edilmiş
dissertasiyanın

A V T O R E F E R A T I

BAKİ – 2016