

06;12

Микроканальный лавинный фотодиод с широким диапазоном линейности

© З. Садыгов, А. Ольшевский, Н. Анфимов, Т. Бокова,
А. Довлатов, В. Жежер, З. Крумштейн, Р. Мехтиева,
Р. Мухтаров, М. Троицкая, В. Чалышев,
И. Чириков-Зорин, В. Шукурова

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия
Институт физики НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан
E-mail: sadygov@cv.jinr.ru

Поступило в Редакцию 26 января 2010 г.

Рассмотрены конструкция и принцип работы нового микроканального лавинного фотодиода с коэффициентом лавинного умножения до 10^5 , в котором диапазон линейности прибора улучшен на порядок по сравнению с известными аналогами. Отличительной чертой нового прибора является то, что прямосмещенные $p-n$ -переходы, выполняющие функцию гасящих индивидуальных резисторов, расположены под каждым пикселем. Это обеспечивает увеличение плотности до 40 000 каналов умножения на mm^2 при стопроцентной чувствительной площади прибора.

В последнее десятилетие достигнут значительный успех в разработке микропиксельных лавинных фотодиодов (МП ЛФД), способных регистрировать единичные световые кванты при комнатной температуре. Коэффициент усиления МП ЛФД достигает величины 10^5-10^6 при эффективности детектирования фотонов 20–40% в широком диапазоне длин волн, что сравнимо с параметрами традиционных вакуумных фотоэлектронных умножителей [1,2].

Базовая конструкция таких фотодиодов описана в работах [3,4]. Прибор содержит матрицу из небольших $p-n$ -переходов (пикселей) с характерным размером 10–100 μm , выполненных на поверхности кремниевой подложки. Пиксели расположены с определенным интервалом с целью предотвращения зарядовой связи между ними. Каждый пиксель соединен с общей проводящей шиной посредством индивидуального пленочного резистора с сопротивлением $10^5-10^7 \Omega$.

Площадь пикселя и сопротивление его индивидуального резистора выбираются так, чтобы за характерное время электрической релаксации емкости пикселя вероятность темновой генерации носителей заряда в его чувствительной области была значительно меньше единицы. Это обеспечивает возможность работы пикселей МП ЛФД в режиме перенапряжения, т.е. выше пробойного потенциала. При образовании единичного фотоэлектрона (или темнового электрона) в чувствительной области пикселя развивается самогасящийся лавинный процесс, аналогичный гейгеровскому разряду, с постоянной величиной заряда. Гашение лавинного процесса в пикселях происходит из-за падения потенциала в нем ниже пробойного благодаря наличию в каждом пикселе индивидуального пленочного резистора, который не допускает заметной зарядки пикселя от источника напряжения за время протекания лавинного процесса. Сигналы от сработавших пикселей суммируются на общей нагрузке (проводящей шине), и таким образом обеспечивается линейность фотоотклика прибора. Фотоотклик прибора остается линейным, пока вероятность попадания двух или более фотонов на один пиксель не достигает существенной величины.

Однако упомянутые выше МП ЛФД не имеют достаточно широкого диапазона линейности фотоотклика из-за низкой плотности пикселей. Конструкция прибора такова, что значительную часть его поверхности занимают проводящая шина, пленочные микрорезисторы и охранные кольца пикселей. Поэтому увеличение плотности пикселей выше 1000 на mm^2 приводит к значительному сокращению доли чувствительной площади, необходимой для регистрации света. Это, в свою очередь, приводит к значительному ухудшению эффективности детектирования фотонов и, как следствие, амплитудного разрешения прибора [5].

В работе представлено описание структуры и принципа работы микроканального лавинного фотодиода (МК ЛФД) со сверхвысокой плотностью независимых каналов умножения, обеспечивающих широкий диапазон линейности фотоотклика. Отличительная черта МК ЛФД в том, что он не имеет общей проводящей шины, а функцию гасящего индивидуального резистора выполняет прямо смещенный $p-n$ -переход, расположенный под каждым пикселем. Конструкция прибора приведена на рис. 1 и представляет собой кремниевую подложку n -типа проводимости, на поверхности которой выращены два эпитаксиальных слоя p -типа проводимости с одинаковым удельным сопротивлением около $7\Omega \cdot \text{cm}$ и толщиной $4\mu\text{m}$ каждый. Между эпитаксиальными слоями сформирована

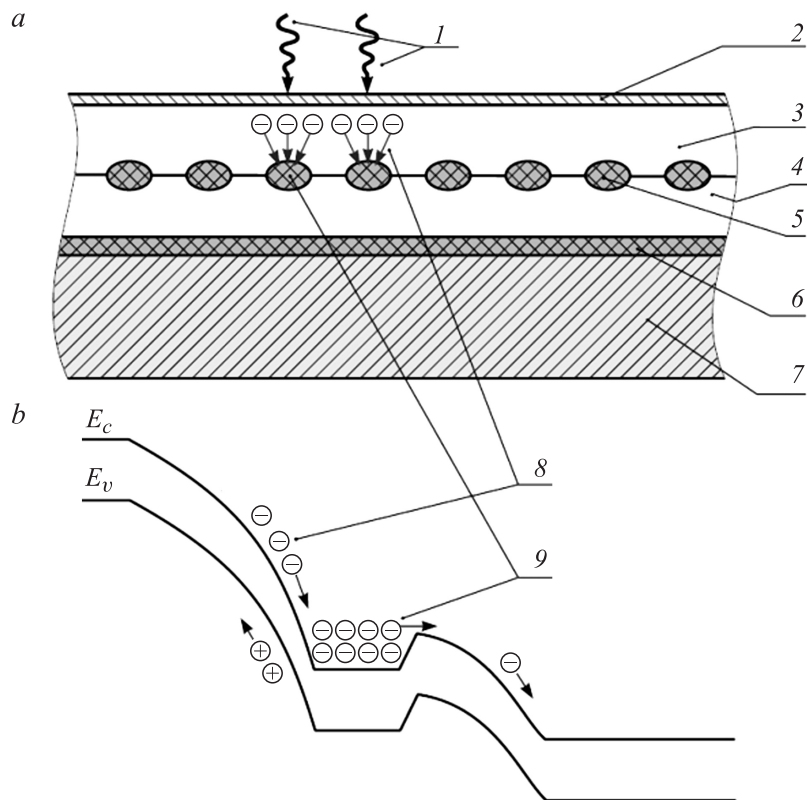


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и энергетическая зонная диаграмма (б) МК ЛФД под напряжением: 1 — регистрируемые фотоны, 2 — высоколегированный p^+ -слой для обеспечения контакта к эпитаксиальному слою, 3 — второй эпитаксиальный слой p -типа проводимости, 4 — первый эпитаксиальный слой p -типа проводимости, 5 — n^+ -области (микропиксели), 6 — высоколегированный n^+ -слой для ограничения обедненной области, 7 — кремниевая подложка n -типа проводимости, 8 — лавинная область, 9 — заряд, накопленный в потенциальной яме из n^+ -области.

матрица высоколегированных областей n^+ -типа проводимости с шагом от 5 до 15 μm в зависимости от конкретного исполнения. Это обеспечивает увеличение плотности до 40 000 каналов умножения на

mm² при стопроцентной чувствительной площади прибора. Технология изготовления МК ЛФД описана в работе [6].

В рабочем режиме к МК ЛФД прикладывается отрицательное напряжение относительно подложки. Обеднение прибора начинается с первого $p-n$ -перехода, расположенного на границе подложки с первым эпитаксиальным слоем. При определенной величине напряжения обедненная область достигает матрицы n^+ -областей и частично открывает имеющийся там второй $p-n$ -переход. С этого момента начинает обедняться только третий $p-n$ -переход, расположенный на границе n^+ -областей со вторым эпитаксиальным слоем. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к полному обеднению второго эпитаксиального слоя. В результате этого в обедненной области МК ЛФД образуется матрица потенциальных ям из n^+ -областей, причем над каждой из этих областей формируется полусферическое электрическое поле, обеспечивающее сбор фотоэлектронов со всей чувствительной поверхности прибора. Таким образом, чувствительная поверхность прибора разделена на фоточувствительные области с индивидуальными микроканалами умножения, полностью независимые друг от друга.

Лавинное умножение носителей заряда в микроканалах происходит в приграничной области второго эпитаксиального слоя с n^+ -областями, где создается высокая напряженность электрического поля. Умноженные электроны накапливаются в потенциальных ямах, образованных n^+ -областями, что приводит к уменьшению электрического поля во втором эпитаксиальном слое ниже некоторого порогового значения, в результате чего лавинный процесс в данном канале прекращается. Восстановление прежнего поля в микроканале умножения происходит за счет стекания накопленного заряда в объем подложки через прямо смещенный $p-n$ -переход, образованный между первым эпитаксиальным слоем и n^+ -областью.

Процесс накопления фотоэлектронов в n^+ -областях можно исследовать при небольших потенциалах на приборе, когда отсутствует усиление фотосигнала. Исследуемый образец МК ЛФД был изготовлен совместно с фирмой Zecotek Photonics Inc. и имел $N_p = 1.35 \cdot 10^5$ каналов умножения на чувствительной площади, равной $3 \times 3 \text{ mm}^2$ ($1.5 \cdot 10^4$ каналов на mm^2). На рис. 2 представлена осциллограмма фотоотклика МК ЛФД при освещении световыми импульсами длительностью $300 \mu\text{s}$ (кривая 1). Сигнал снимался с нагрузки $5 \text{ k}\Omega$. Для сравнения, там же приведен фотоотклик обычного фотодиода без n^+ -областей,

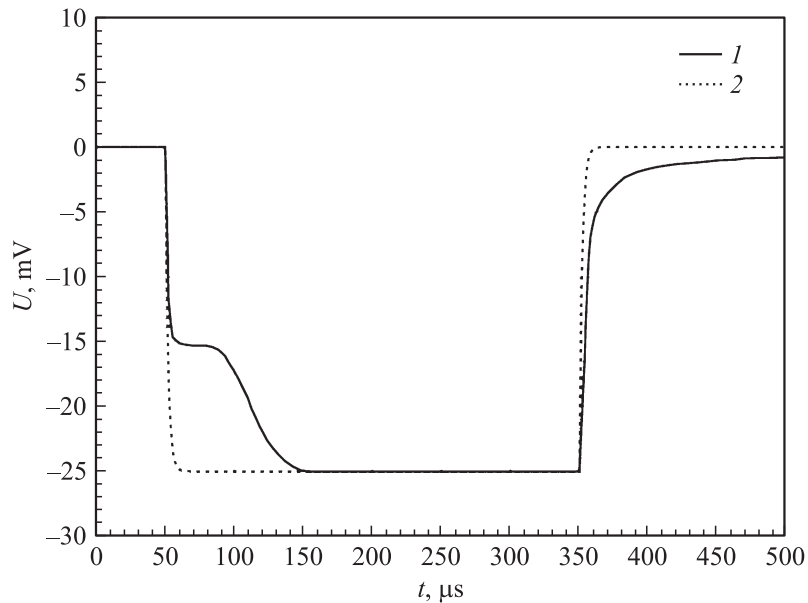


Рис. 2. Осциллограммы фотоотклика на световые импульсы длительностью $300 \mu\text{s}$ МК ЛФД (1) и обычного фотодиода (2) при приложенном потенциале 20 V (усиление равно 1).

изготовленного параллельно с МК ЛФД с использованием идентичных технологических параметров (кривая 2). В качестве источника света использовался светодиод с длиной волны 450 nm , излучение которого полностью поглощалось в верхней части второго эпитаксиального слоя, т. е. до глубины, на которой расположены n^+ -области.

В начале фотоэлектроны создают фототок в цепи прибора, проходя через обедненный слой второго эпитаксиального слоя. Затем они накапливаются в потенциальных ямах, вызывая появление плато на кривой 1 рис. 2. Через некоторое время, определяемое мощностью светового импульса, потенциальные ямы заполняются полностью, и поэтому амплитуда фотоотклика растет до своего максимума, равного амплитуде фотоотклика обычного фотодиода. Суммарный заряд, накопленный во всех потенциальных ямах прибора, можно определить как

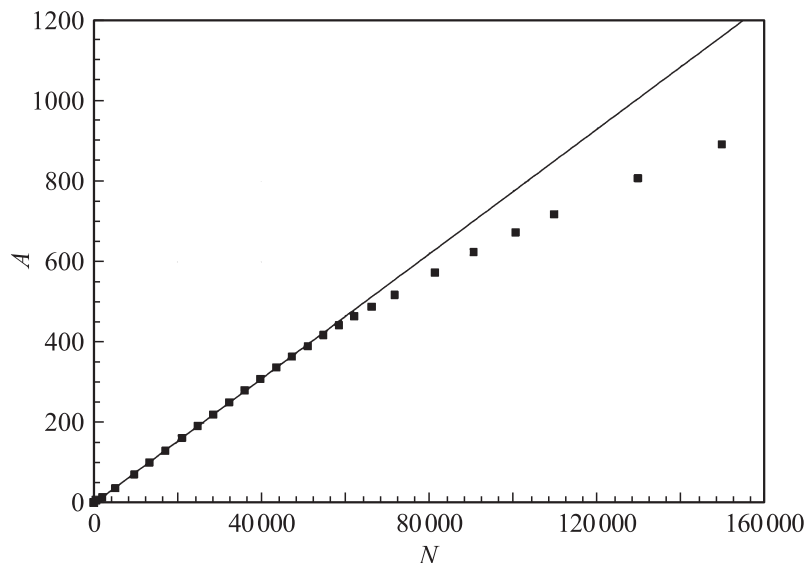


Рис. 3. Зависимость амплитуды фотоотклика A (в отн. ед.) МК ЛФД от числа падающих фотонов N . Точки — экспериментальные данные, прямая — линейная экстраполяция.

площадь (интеграл) разницы между кривыми 1 и 2 в области фронта сигнала. Выполнив графическое интегрирование указанной области, получаем суммарный заряд $Q_{tot} = 1.1 \cdot 10^{-10}$ С. Это означает, что в каждой потенциальной яме из n^+ -областей накоплен заряд, равный $Q_p = Q_{tot}/N_p = 8 \cdot 10^{-16}$ С (около $5 \cdot 10^3$ фотоэлектронов). Этот заряд обеспечивает экранирование электрического поля во втором эпитаксиальном слое, т. е. в лавинной области прибора, что приводит к гашению лавины при работе прибора в лавинном режиме.

Для исследования диапазона линейности фотоотклика МК ЛФД к нему прикладывалось рабочее напряжение величиной 90 В, обеспечивающее лавинное усиление фотоэлектронов в $5 \cdot 10^4$ раз. При этом эффективность регистрации фотонов составляла 25%. Прибор освещался световыми импульсами с длиной волны 450 нм, длительностью 30 нс и частотой следования 1 кГц. Для определения числа фотонов в световом импульсе использовался лавинный фотодиод Hamamatsu S8664-55 с

известной спектральной чувствительностью при единичном усилении сигнала. Результаты исследования диапазона линейности фотоотклика МК ЛФД представлены на рис. 3. Видно, что амплитуда фотоотклика МК ЛФД остается линейной до $6 \cdot 10^4$ фотонов в импульсе.

Таким образом, предложен и реализован новый сверхчувствительный лавинный фотодиод с высоким коэффициентом усиления и широким диапазоном линейности фотоотклика. Такой прибор может успешно применяться в качестве фотодетектора в устройствах, требующих высокого амплитудного разрешения, особенно в физике высоких энергий и ядерной медицине. Созданные фотодиоды были использованы в прототипах электромагнитных калориметров [7].

Список литературы

- [1] *Anfimov N. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. A. 2007. V. 572. P. 413.
- [2] *Renker D., Lorenz E.* // Journal of Instrumentation. 2009. V. 4. P. 04004.
- [3] *Садыгов З.Я.* Патент России № 2102820, приоритет от 10.10.1996.
- [4] *Sadygov Z. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. A. 2006. V. 567. P. 70.
- [5] *Stoykov A. et al.* // Journal of Instrumentation. 2007. V. 2. P. 06005.
- [6] *Садыгов З.Я.* Патент России № 2316848, приоритет от 01.06.2006.
- [7] *Chirikov-Zorin I.* Beam Test of Shashlyk EM Calorimeter Prototypes Readout by Novel MAPD with Super High Linearity. Frontier Detectors for Frontier Physics / XI Pisa Meeting on Advanced Detectors La Biodola, Isola d'Elba, Italy. May 26–30, 2009.