

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОПИКСЕЛЬНЫХ ЛАВИННЫХ ФОТОДИОДОВ И КОМПАКТНОЙ МАТРИЦЫ НА ИХ ОСНОВЕ

*З. Садыгов<sup>а,б</sup>, А. Ариффин<sup>в</sup>, Ф. Ахмедов<sup>а,г</sup>, Н. Анфимов<sup>а</sup>,  
Т. Бокова<sup>а</sup>, А. Довлатов<sup>б</sup>, И. Железных<sup>д</sup>, Ф. Зерроук<sup>в</sup>,  
Р. Мехтиева<sup>г</sup>, А. Ольшевский<sup>а</sup>, А. Садыгов<sup>а,г</sup>, А. Титов<sup>е</sup>,  
В. Чалышев<sup>а</sup>, М. Троицкая<sup>а</sup>*

<sup>а</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>б</sup> Институт физики Национальной академии наук Азербайджана, Баку

<sup>в</sup> «Zecotek Photonics Pte, Ltd.», Сингапур

<sup>г</sup> Институт радиационных проблем Национальной академии наук Азербайджана, Баку

<sup>д</sup> Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва

<sup>е</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, Москва

Описана технология изготовления нового микропиксельного лавинного фотодиода (МЛФД) с глубинным расположением пикселей, включающего в себя два эпитаксиальных слоя, между которыми сформирована матрица  $n^+$ -областей путем ионного легирования. Предложен новый способ изготовления компактных матриц МЛФД с минимальной мертвой зоной.

A manufacturing technique for a new micropixel avalanche photodiode (MAPD) with deep buried pixels, including two epitaxial layers between which a matrix of  $n^+$  areas is formed by ion implanting, is described. A new method for making compact MAPD matrixes with the minimal dead zone is proposed.

PACS: 85.60.Bt; 85.60.Dw; 85.60.Gz; 85.60.Ha

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы широко обсуждается возможность массового применения микропиксельных лавинных фотодиодов (МЛФД) в различных устройствах для регистрации слабых световых импульсов, вплоть до единичных фотонов [1]. Известны три основных конструкции МЛФД. Микропиксели в первых двух конструкциях прибора расположены непосредственно на поверхности кремниевой подложки, а в третьей — глубоко погружены в объем эпитаксиального слоя, выращенного на поверхности подложки [2–4]. Это позволяет значительно расширить диапазон линейности МЛФД [5].

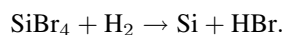
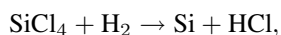
В ряде устройств, таких как медицинские позитронно-эмиссионные томографы (ПЭТ-сканеры) и детекторы физики высоких энергий, требуются дешевые и компактные матрицы лавинных фотодиодов. Традиционно матрицу лавинных диодов изготавливают на

единой (монокристаллической) полупроводниковой подложке [6, 7]. Монокристаллическая подложка используется также в качестве общего электрода для подачи напряжения к прибору. Индивидуальные электроды от каждого элемента выводятся вдоль поверхности подложки на периметр матрицы. Для этого используются специальные металлические полоски, изолированные как от подложки, так и от элементов матрицы. Один конец полоски соединен с элементом матрицы, а другой — с металлическим контактом (штырем) прибора, расположенным по периметру матрицы фоточувствительных элементов. Металлические полоски располагают между фоточувствительными элементами, что приводит к увеличению зазора между элементами матричного фотоприемника. Увеличение размера (числа элементов) матрицы приводит к еще большему расширению зазора, поскольку увеличивается число полосок, расположенных между элементами. Это способствует резкому увеличению доли нечувствительной площади (геометрического фактора) матричного фотоприемника. Кроме этого, монокристаллическая конструкция матрицы приводит также к удорожанию изделия, поскольку невозможно использовать до 30 % площади по периметру круглой полупроводниковой пластины при монокристаллической конструкции матрицы прямоугольной формы.

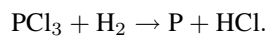
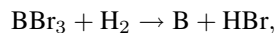
Целями данной работы являются: описание технологии изготовления нового МЛФД с широким диапазоном линейности фотоотклика и создание на его основе дешевых и компактных матриц с минимальной мертвой площадью.

## 1. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОДНОЭЛЕМЕНТНЫХ МЛФД С ГЛУБОКО ПОГРУЖЕННЫМИ ПИКСЕЛЯМИ

МЛФД с глубоко погруженными пикселями изготавливается на базе кремниевых пластин  $n$ -типа проводимости с удельным сопротивлением  $\rho = 10\text{--}20 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ , кристаллической ориентацией  $\{100\}$ . Пластины не являются стандартно выпускаемыми промышленностью, на них выращиваются эпитаксиальные слои со специфическими параметрами. В процессе эпитаксии для выделения кремния используются кремнесодержащие газы: тетрахлорид кремния  $\text{SiCl}_4$  или тетрабромид кремния  $\text{SiBr}_4$ . При температурах  $1050\text{--}1200 \text{ }^\circ\text{C}$  в атмосфере водорода происходит реакция восстановления с осаждением кремния на пластины:



Легирование растущего эпитаксиального слоя производят путем подачи в реактор газовой смеси вещества, содержащего кремний ( $\text{SiCl}_4$  либо  $\text{SiBr}_4$ ), и вещества содержащего примеси бора или фосфора ( $\text{BBr}_3$  или  $\text{PCl}_3$ ):



Соотношение компонентов в смеси обеспечивает необходимую концентрацию примесей в эпитаксиальном слое. При различных типах примеси в пластине и в выращиваемой пленке на границе их раздела образуется  $p$ - $n$ -переход. В отличие от диффузионного и

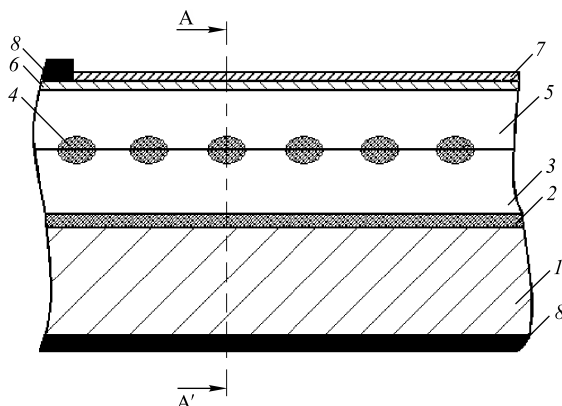


Рис. 1. Конструкция микропиксельных лавинных фотодиодов с глубоко погруженными пикселями: 1 — кремниевая подложка  $n$ -типа проводимости; 2 — кремниевый слой  $n^+$ -типа проводимости; 3 — первый эпитаксиальный слой  $p$ -типа проводимости; 4 — пиксели  $n^+$ -типа проводимости; 5 — второй эпитаксиальный слой  $p$ -типа проводимости; 6 — слой  $p^+$ -типа проводимости; 7 — окисел кремния толщиной 700 Å; 8 — алюминиевые контакты

ионного внедрения примесей, при которых  $p$ - $n$ -переход образуется в результате перекompенсации, эпитаксия дает возможность получать слои в широком диапазоне удельных сопротивлений, не зависящих от сопротивления пластины.

На рис. 1 представлено сечение МЛФД с глубоко погруженными пикселями. Основными отличительными элементами конструкции МЛФД являются: расположенный непосредственно на поверхности кремниевой подложки 1 высокопроводящий слой  $n^+$ -типа проводимости 2, два эпитаксиальных слоя 3 и 5, имеющие  $p$ -тип проводимости, матрица высокопроводящих областей  $n^+$ -типа проводимости 4, расположенная между этими эпитаксиальными слоями, и высокопроводящий слой  $p^+$ -типа проводимости 6, расположенный на внешней поверхности второго эпитаксиального слоя 5.

Высокопроводящий слой  $n^+$ -типа, расположенный на поверхности подложки, формируется с помощью ионного легирования мышьяком с энергией  $E = 100$  кэВ и дозой  $Q = 5$  мкКл/см<sup>2</sup>. Примеси разгоняются при температуре 1100 °С в течение 10 мин в присутствии сухого кислорода (O<sub>2</sub>) и 100 мин в присутствии азота (N<sub>2</sub>). Выбор ионов мышьяка вместо традиционного фосфора связан с его низкой скоростью диффузии при осаждении эпитаксиальных слоев.

На следующем этапе осуществляется выращивание первого эпитаксиального слоя  $p$ -типа при температуре 1150 °С. Толщина слоя  $d = 5$  мкм, удельное сопротивление  $\rho = 10$  Ом·см. На выращенном эпитаксиальном слое вновь формируются знаки совмещения глубиной 0,5 мкм. Затем формируются матрицы  $n^+$ -областей в рабочей зоне с помощью фотолитографии, путем ионного легирования мышьяком. Энергия ионов  $E = 100$  кэВ, доза  $Q = 5$  мкКл/см<sup>2</sup>. Разгонка примесей производится при температуре 1100 °С в течение 10 мин в присутствии сухого кислорода (O<sub>2</sub>), а затем 100 мин в азоте (N<sub>2</sub>). Затем осуществляется выращивание второго эпитаксиального слоя  $p$ -типа при температуре 1150 °С. Толщина слоя  $d = 4$  мкм, а удельное сопротивление  $\rho = 7$  Ом·см.

Высокопроводящий слой  $p$ -типа проводимости создается с помощью ионного легирования бором с энергией  $E = 50$  кэВ и дозой  $Q = 30$  мкКл/см<sup>2</sup>. Последним этапом является вскрытие области омического контакта и формирование алюминиевого электрода. Чистый алюминиевый слой толщиной  $d \sim 1$  мкм наносится на поверхность структуры, затем осуществляется формирование алюминиевого электрода с помощью фотошаблона.

## 2. КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МАТРИЦЫ МЛФД

С целью уменьшения себестоимости продукции нами предлагается использовать не монокристаллы, а одиночные элементы для сборки матрицы лавинных фотодиодов. Подложки элементов (фотодиодов) устанавливаются с зазором 30–50 мкм на поверхности специального диэлектрического корпуса так, чтобы они не имели электрического контакта между собой. Каждый элемент обеспечивается лицевым электродом, расположенным на фоточувствительной стороне подложки, и задним электродом, выполненным на противоположной стороне подложки. Лицевые электроды, соединенные между собой, служат в качестве общего электрода для подачи напряжения к прибору, а задние электроды

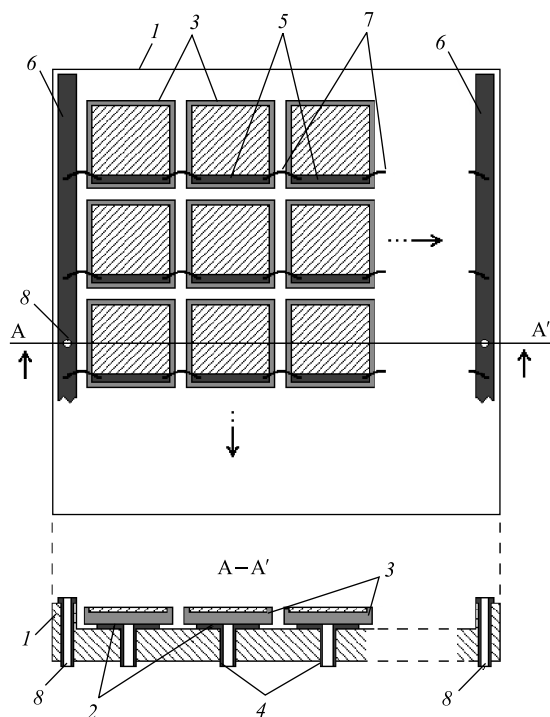


Рис. 2. Общий вид конструкции матрицы лавинных фотодиодов: 1 — диэлектрический корпус; 2 — матрица посадочных областей; 3 — элементы МЛФД; 4 — электрические выходы от посадочных областей; 5 — лицевые электроды МЛФД; 6 — металлическая шина; 7 — металлическая проволока диаметром 20–40 мкм; 8 — электрический выход от металлической шины

троды, имеющие индивидуальные выходы в обратную сторону диэлектрического корпуса, используются для независимого приема сигнала с каждого элемента матрицы.

На рис. 2 показан общий вид матрицы лавинных диодов. Конструкция матрицы содержит диэлектрический корпус 1, на котором выполнена матрица металлических посадочных областей 2 с количеством, равным количеству фоточувствительных элементов — лавинных фотодиодов 3, содержащихся в матричном фотоприемнике. Каждая металлическая посадочная область имеет индивидуальный электрический выход 4 (металлизированное отверстие) в противоположную сторону диэлектрического корпуса. Фотодиоды устанавливаются так, чтобы задний электрод (полупроводниковая подложка) каждого фотодиода имел электрический контакт с соответствующей металлической посадочной областью. Для этого можно использовать проводящий клей или пасту. Затем все лицевые электроды 5 элементов соединяются друг с другом и со специальной металлической шиной 6 методом микросварки алюминиевой проволокой 7 диаметром 20–40 мкм. Металлическая шина также имеет выход 8 в обратную сторону диэлектрического корпуса и служит в качестве общего электрода для подачи напряжения к прибору.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОБРАЗЕЦ МАТРИЦЫ МЛФД

Экспериментальный образец 64-элементной матрицы МЛФД, изготовленный совместно с фирмой «Zecotek Photonics» ([www.zecotek.com](http://www.zecotek.com)), приведен на рис. 3. Коэффициент усиления элементов матрицы имел следующие параметры: рабочее напряжение — 67 В, чувствительная площадь элементов —  $3 \times 3$  мм, интервал между элементами — 40 мкм, коэффициент усиления —  $2 \cdot 10^4$ , плотность пикселей в элементах —  $1,5 \cdot 10^4$  пиксель/мм<sup>2</sup>.

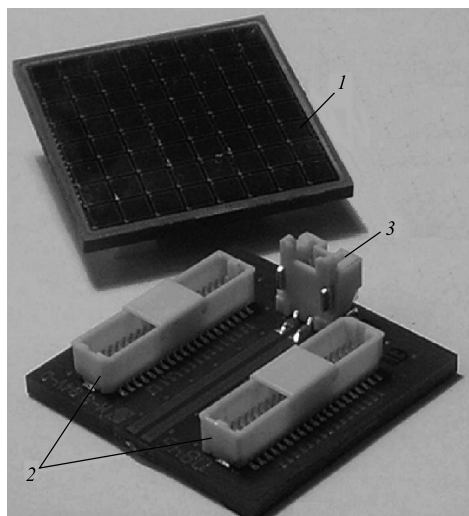


Рис. 3. Экспериментальный образец 64-канальной матрицы лавинных МЛФД: 1 — элемент матрицы (МЛФД); 2 — разъем для съема сигнала с элементов матрицы; 3 — разъем для подачи общего напряжения к матрице

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработан полный цикл изготовления микропиксельных лавинных фотодиодов с глубоко погруженными пикселями. Предложен и осуществлен новый способ формирования глубоко погруженных пикселей. Показано, что для формирования независимых (несвязанных между собой) пикселей из  $n^+$ -областей необходимо использовать примеси мышьяка вместо фосфора из-за низкого коэффициента диффузии первого. Предложен и экспериментально реализован новый способ изготовления наиболее дешевого и компактного матричного лавинного фотоприемника практически с любым количеством элементов. Приборы, произведенные на основе предложенной технологии, планируется использовать в проектах NICA и COMPASS.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anfimov N. et al. Beam Test of Shashlyk EM Calorimeter Prototypes Readout by Novel MAPD with Super High Linearity // Nucl. Instr. Meth. A. 2010. V. 617. P. 78–80.
2. Садыгов З.Я. Патент России №2102820, приоритет от 10.10.1996.
3. Sadygov Z. et al. Three Advanced Designs of Micro-Pixel Avalanche Photodiodes: Their Present Status, Maximum Possibilities and Limitations // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 567. P. 70–73.
4. Садыгов З.Я. Патент России № 2316848, приоритет от 01.06.2006.
5. Садыгов З. и др. Микроканальный лавинный фотодиод с широким диапазоном линейности // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, вып. 11. С. 83–89.
6. Dinu N. et al. Characteristics of a Prototype Matrix of Silicon PhotoMultipliers (SiPM) // JINST. 2009. V. 4. P03016. P. 1–9.
7. [http://sales.hamamatsu.com/info/eul/MPPC/PDF/S11829\\_S11830-3344MF\\_eng.pdf](http://sales.hamamatsu.com/info/eul/MPPC/PDF/S11829_S11830-3344MF_eng.pdf)

Получено 15 марта 2013 г.