

*В.А. АНТОНОВА, канд. техн. наук, В.Н. БОРЩЕВ, д-р техн. наук,
А.М. ЛИСТРАТЕНКО, Н.И. СЛИПЧЕНКО, канд. техн. наук*

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ КРЕМНИЕВЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ PIN ПРИЕМНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

В начале 80-х годов получил развитие новый класс полупроводниковых детекторов – микрополосковые детекторы. Их появление было стимулировано потребностями физики высоких энергий и элементарных частиц. Уникальные возможности сверхточных измерений координат с помощью таких детекторов обусловили их быстрое развитие и появление большого числа перспективных разработок как в области самих координатных детекторов, так и в области специализированной микроэлектроники к ним [1,2].

Практически все используемые в настоящее время в физике элементарных частиц полупроводниковые детекторы выполнены на основе кремния, в том числе и микрополосковые детекторы. Микрополосковый приемник излучений представляет собой набор *p-n* переходов в виде узких параллельных полос, которые формируются в исходных кремниевых высокоомных и особо чистых пластинах (обычно *n*-типа с удельным сопротивлением 4 – 8 кОм*см). Шаг полос определяется задачами эксперимента и обычно составляет от 25 до 100 мкм.

Пространственное разрешение кремниевого микрострипового приемника зависит от того, в каком качестве он используется. Если он используется только как датчик соударений, то пространственное разрешение связано с шагом полос P_s соотношением:

$$\sigma = P_s / \sqrt{12}. \quad (1)$$

При аналоговом считывании разрешение зависит от нескольких параметров. Наиболее важными являются электронный шум, шаг полос, шаг считывания и напряжение смещения, определяющее горизонтальную диффузию зарядов. Горизонтальная диффузия распределяет заряд, создаваемый пролетающей частицей, по нескольким стрипам.

Используя алгоритмы нелинейной зарядовой интерполяции, можно получить оптимальное разрешение, которое в конечном счете ограничено только шумом и физическими процессами создания заряда [3]. Пространственное разрешение в этом случае описывается выражением:

$$\sigma = \beta \left(\frac{N}{S} \right)^* P_s, \quad (2)$$

где S/N – отношение сигнал – шум; P_s – шаг полос; β – эмпирический коэффициент пропорциональности, значение которого лежит в пределах 4 ÷ 10.

Как видно из выражения (2), существенное влияние на пространственное разрешение микрополоскового приемника оказывают его шумовые характеристики. Можно выделить наиболее важные параметры приемника, которые влияют на шумовую характеристику считывающей электроники:

- емкость считывающей полосы по отношению к земле или виртуальной земле соседних микрополос;
- ток утечки (дробовой шум);
- номинал резистора смещения.

Емкость является определяющим фактором для последовательного шума, а ток утечки и номинал резистора смещения вносят основной вклад в параллельный шум [4]. Из сказанного выше можно определить требования к конструктивно-технологическим решениям кремниевых микрополосковых приемников:

– конструкция приемника должна обеспечивать минимально возможный шум считывающей электроники, для чего необходимы малая межполосковая емкость, низкие токи утечки и максимально возможное значение сопротивления смещения. Однако сопротивление смещения не должно превышать величин, которые приводят к изменению падения напряжения между соседними полосами, чтобы избежать ошибок в определении координат из-за горизонтального градиента электрического поля;

– для получения высокого разрешения также и для низкоимпульсных частиц многократное рассеяние должно быть минимальным. Это требует уменьшения толщины приемника до значений, ограничиваемых требованиями к механической прочности как при изготовлении кристалла, так и при его монтаже.

Последние технические достижения в производстве кремниевых микрополосковых детекторов связаны с разработкой схем согласования и схем смещения [5]. Разработаны и освоены промышленностью бескорпусные микросхемы, содержащие многоканальные малошумящие зарядово-чувствительные

усилители и коммутаторы последовательного вывода аналоговой информации на 64-128 каналов. При этом традиционно соединения между электронными компонентами, несущими платами и самим кремниевым детектором осуществляются с использованием проводов. Эта технология хорошо известна и относительно дешева. Однако она предъявляет жесткие требования к конструкции детекторных модулей, что делает невозможным их использование в некоторых системах, применяемых в новых экспериментах в физике частиц высоких энергий [6]. Проволочная коммутация позволяет соединять только близко расположенные части, механически зафиксированные друг относительно друга и находящиеся на одной и той же стороне. В системах слежения, где используется открытой вся плоскость детекторов, трудно расположить электронику предварительной обработки в одной плоскости. В этом случае используются промежуточные несущие платы, соединенные между собой кабелями. Однако проволочные соединения остаются хрупкими, а соединительные платы являются неактивной и нежелательной добавкой материала в системе.

В настоящее время проводятся работы по созданию детекторных модулей, в которых соединения между компонентами осуществляется с помощью пленочных шлейфовых микрокабелей [7]. Легкие гибкие алюминиевые микрокабели на полиимидном носителе, которые можно присоединять непосредственно к компонентам, позволяют сделать соединения трехмерными. Более того, т. к. устраняется необходимость в множестве дополнительных соединений при сборке детекторных модулей, ожидается значительное улучшение не только массо-габаритных характеристик, но и значительное повышение надежности детекторных модулей.

Целью данной работы является расчет и разработка топологии микрополоскового PIN приемника излучения, предназначенного для экспериментальных исследований и изучения влияния конструктивных особенностей и электрических характеристик пленочных микрокабелей на чувствительность, быстродействие и разрешающую способность кремниевых микрополосковых детекторных модулей нового поколения [6,7]. Кроме того, разрабатываемая топология должна обеспечить возможность отработки основных технологических процессов сварки, приклейки и последовательности операций сборки микрокабелей и других компонентов детекторного модуля для эксперимента ALICE [8].

В ходе выполнения работ по подготовке эксперимента ALICE разработана специальная аналого-цифровая микросхема A128C, рассчитанная на первичную обработку и передачу информации в приемный тракт со 128 микрополосковыми диодами полноразмерного кремниевого PIN приемника. Микросхема имеет 128 выходных контактных площадок, которые расположены в четыре ряда вдоль одной стороны кристалла. Шаг размещения контактных площадок в одном ряду составляет 88 мкм [9]. Для связи микросхемы A128C с микрополосковым кремниевым PIN приемником разработан микрокабель на полиимидном носителе со 128 алюминиевыми проводниками толщиной 14 мкм. В зоне присоединения к контактным площадкам микрополоскового приемника шаг проводников микрокабеля составляет 95 мкм. При этом ширина проводников равна 60 мкм, а зазор между проводниками 35 мкм. Шаг согласован с шагом микрополоскового полноразмерного кремниевого PIN приемника, который предполагается использовать в эксперименте ALICE [7].

Требования к топологии тестового кремниевого микрострипового приемника излучений должны основываться на требованиях к основным характеристикам полноразмерного приемника излучений эксперимента ALICE. Другими словами, электрофизические характеристики тестового микрострипового кремниевого приемника не должны уступать характеристикам полноразмерного приемника ALICE, в том числе, по самому важному параметру – темновому току утечки при напряжении полного обеднения. Только в этом случае можно будет иметь объективную информацию о влиянии конструктивных особенностей, электрических характеристик и технологии сборки и монтажа алюминиевых микрокабелей на электрофизические характеристики микрополосковых детекторных модулей.

Таким образом, разрабатываемая топология тестового микрополоскового приемника включает:

- количество микрополосков, шт. – 128;
- шаг микрополосков, мкм – 95;
- ширина микрополосков, мкм – 60;
- зазор между микрополосками, мкм – 35;
- длина микрополоска, мм – 12;
- толщина кремниевого кристалла, мкм – 300 ± 5 ;
- площадь приемной области, мм² – 12 x 12;
- размеры кристалла приемника, мм² – 15 x 15.

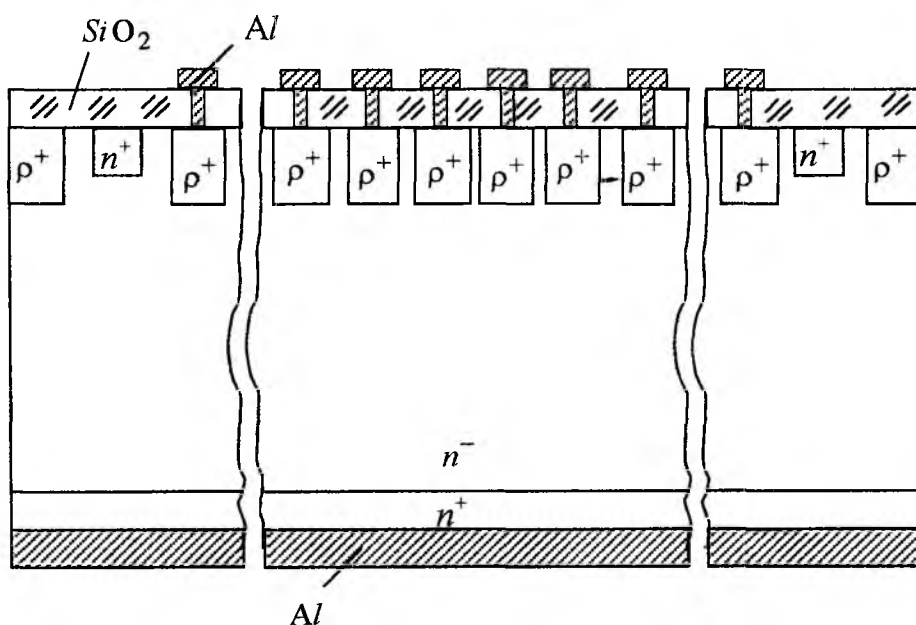
Приемная область представляет собой квадрат с размерами 12 x 12 мм. На погонной длине 12 мм укладывается 128 микрополосков с шагом 95 мкм. Такие размеры приемной области позволяют оптимизировать длину микрополосков как минимально возможную и равную 12 мм.

С использованием методики [10] проведен расчет токов утечки одного микрополоскового $p-n$ - перехода при напряжении обратного смещения 70 В, обеспечивающем полное обеднение в кристалле кремния толщиной 300 мкм с концентрацией носителей $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$. При выбранных геометрических размерах микрополоскового перехода 60 x 12000 мкм и напряжении обратного смещения 70 В суммарный темновой ток не превышает 0,1 нА, выходная емкость составляет $\sim 0,15$ пФ. Как следует из расчета, проведенного по методике [11], напряжение пробоя в наиболее слабых местах $p-n$ - перехода в 2-3 раза превышает напряжение полного обеднения, таким образом топология микрополоскового приемника позволяет обеспечить его работу в условиях полного обеднения и при более высоких напряжениях.

Как известно, на поверхности высокоомной кремниевой подложки (особенно p -типа проводимости) возникают инверсионные слои, приводящие к возрастанию темновых токов утечки на несколько порядков. Для устранения этого нежелательного эффекта приемная площадка должна быть окружена охранным кольцом [12]. Электронно-дырочный переход охранного кольца должен быть изолирован от основной приемной области. Расстояние между охранным кольцом и крайними микрополосковыми $p-n$ - переходами приемной области должно быть порядка ширины слоя объемного заряда при рабочем напряжении. Охранное кольцо должно иметь отдельный вывод. Благодаря такой конструкции инверсионный слой смыкается с охранным кольцом, в результате ток тепловой генерации в этом слое и ток утечки протекают через цепь кольца. В цепях приемной площадки, которая изолирована от охранного кольца слоем объемного заряда, протекает только ток носителей, генерированных в пределах приемной области.

Для снижения инверсионных токов нами применяется противоионное стопорное кольцо. Ширина кольца и концентрация примеси в нем выбрана таким образом, чтобы носители заряда, диффундирующие через кольцо, рекомбинировали, то есть, ширина кольца должна быть больше диффузионной длины носителей заряда. В данной разработке использована также защита области реза кристалла приемника в виде диффузионного кольца вдоль периметра кристалла. Это позволило исключить возможность короткого замыкания и появления значительных обратных токов, а также снижения пробивного напряжения в случае касания выводов поврежденных защитно-пассивирующих покрытий на приемной стороне кристалла.

Топология кристалла кремниевое микрополоскового приемника излучений приведена на рисунке.



В высокоомной исходной кремниевой пластине n -типа с удельным объемным сопротивлением $\rho_v = 4\div 8 \text{ кОм} \cdot \text{см}$ с ориентацией (100) или (111) сформированы микрополосковые p^+ - слои в виде решетки с шагом 95 мкм. Ширина диффузионных полос равна 60 мкм, длина 12000 мкм. Расстояние между диффузионными полосами 35 мкм. В пределах приемной области на погонной длине 12 мм расположе-

но 128 $p-n$ – переходов, не связанных между собой электрически. Глубина p^+ - слоев $\sim 1,5 \div 1,8$ мкм, поверхностная концентрация примеси $\sim (1 \div 5) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. От крайних микрополосковых $p-n$ – переходов и торцов $p-n$ – переходов приемной области на расстоянии 75 мкм расположено охранное кольцо p^+ - типа шириной 50 мкм с поверхностной концентрацией $(1 \div 5) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

Приемная область вместе с охранным кольцом окружена противоионизирующим стопорным кольцом шириной 800 мкм.

Стопорное кольцо, расположенное от охранного кольца на расстоянии 200 мкм, представляет собой n^+ - слой с поверхностной концентрацией $\sim 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Вдоль периметра кристалла на расстоянии 200 мкм от стопорного кольца расположено защитное кольцо области реза, представляющее p^+ - слой шириной 200 мкм с поверхностной концентрацией $(1 \div 5) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, которое формируется в одном технологическом цикле с микрополосковыми $p-n$ – переходами и охранным полевым кольцом. С тыльной стороны кристалла формируется высоколегированный n^+ - слой, имеющий глубину ~ 2 мкм и поверхностную концентрацию $\sim 2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. К p^+ - и n^+ - слоям сформированы металлические контакты на основе алюминия.

Разработанная топология кристалла кремниевого микрополоскового приемника излучений предполагает создание на каждом микрополоске связывающих емкостей. При толщине защитного слоя SiO_2 над $p-n$ – переходом микрополоска $\sim 0,1$ мкм, связывающая емкость одиночного микрополоска составит 25-27 пФ.

Практическая реализация предложенных конструктивно-технологических решений позволит изготовить кремниевый микрополосковый приемник ионизирующих излучений на уровне лучших мировых образцов, а также разработать и изготовить микрополосковый детекторный модуль на основе самых последних достижений: с применением алюминиевых микрокабелей, микросхем первичной обработки типа ALICE 128C, гибридных микросборок с использованием новейших высокотемпературных подложек из AlN и пироглепластиков.

Такой детекторный модуль может быть применен не только для проведения испытаний и исследования влияния конструктивных особенностей и электрических параметров пленочных микрокабелей на основные приемно-детектирующие характеристики, но и как базовый элемент для разработки и создания высокочувствительных систем с высоким разрешением в медицинских томографах, в других системах регистрации рентгеновского и различных видов ионизирующих излучений.

Список литературы: 1. *Чилингаров А.Г.* Координатные полупроводниковые детекторы в физике элементарных частиц. Новосибирск: препринт 90-113, 1990. 288с. 2. *Ляпидевский В.К.* Методы детектирования излучений. М.: Энергоатомиздат, 1987. 405 с. 3. *Weilhammer P.* Double-sided Si strip sensors for LEP vertex // Nucl. Instr. and Meth. 1994. A 342. P. 1-15. 4. *Dabrowski W.* Charge division in silicon strip detectors with a large strip pitch // Nucl. Instr. and Meth. 1994. A 349. P. 424 - 430. 5. *Lutz G.* Silicon radiation detectors // Nucl. Instr. and Meth. 1995. A 367. P. 21-33. 6. *ALICE: Technical Proposal for a Large Ion Collider Experiment at the CERN, LHCC/95-71 LHCC/P3, Geneva, 1995.* 7. *ALICE: Inner Tracking system / Technical Design Report, CERN/LHCC 99-12, ALICE TDR 4, 18 June 1999.* 8. *Haas A.P., Van den Brick A., Kuijer P., Oskamp C.J., NIKHEF, Utrecht, V.N. Borschov, S.K. Kiprich, V.M. Ruzhitsky SRTIIM, Kharkov.* Very low mass microcables for the ALICE silicon strip detector, Proceedings of LEB 99, 1999. 9. *Hebrard L.* Electrical characterisation of ALICE 128C: a low-power CMOS ASIC for the layout of silicon Strip Detectors / CERN / LHCC / 98-36, Proceeding of the 4-th workshop on electronics for LHC experiments, Rome, september 21-25, 1998. 10. *Антонова В.А., Борщев В.Н., Листратенко А.М., Слипченко Н.И.* К вопросу о новых конструктивно-технологических решениях при создании высокоэффективных фотоприемников большой площади // Радиотехника. 1999. Вып. 109. С. 114-120. 11. *Beck S.A., Carter A.A.* Junction depth dependence of breakdown in silicon detector diodes // Nucl. Instr. and Meth. 1996. A 373. P. 223, 226. 12. *Тейлор П.* Расчет и проектирование тиристоров. М.: Энергоатомиздат, 1990. 208 с.

Харьковский государственный технический университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 22.11.99