

К. ф.-м. н. В. Л. ПЕРЕВЕРТАЙЛО

УДК 539.1.074.5; 621.382; 621.039.7

Украина, г. Киев, НИИ микроприборов НТК «ИМК» НАНУ
E-mail: detector@carrier.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
08.07 2011 г.

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ДВУХСТОРОННИЕ КРЕМНИЕВЫЕ МИКРОСТРИПОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Разработаны технология и конструкция прототипа датчика высокоэнергетических частиц для эксперимента ALICE. Детекторы удовлетворяют требованиям по основным электрофизическим параметрам и по радиационной стойкости.

Двухсторонние микростриповые кремниевые детекторы (ДМКД) являются наиболее совершенным инструментом исследований в физике высоких энергий, который создан на основе кремниевой интегральной технологии. Первые работы по созданию ДМКД появились в конце 80-х — начале 90-х годов XX века [1—6]. После усовершенствования их технологии и конструкции началось тестирование приборов в ряде экспериментов [7—11], а после получения положительных результатов они были успешно применены в ряде экспериментов физики высоких энергий [12—21].

Преимуществом двухсторонних микростриповых детекторов по сравнению с односторонними является удвоение информации, снимаемой с одного кристалла, поскольку рабочими являются обе его стороны, а также возможность построения двухкоординатного детектора на одной подложке и трехмерных детекторных систем. Однако в литературе не освещаются конструктивно-технологические проблемы и способы их решения при изготовлении этих сложных приборов для реальных экспериментов. Сама же технология двухсторонних детекторов намного сложнее технологии односторонних. Кроме решения конструктивно-технологических проблем, характерных для $p-i-n$ -структур и микростриповых детекторов вообще [22, 23], она требует решения еще и ряда проблем, обусловленных формированием двухсторонней $p-i-n$ -микростриповой структуры на кремниевой пластине с учетом моделирования всех термических процессов [24]. Особенно это касается случаев их изготовления на оборудовании стандартной технологической линии по производству ИС.

Кроме решения ряда известных технологических проблем по обеспечению высоких параметров детекторов, при разработке и изготовлении двухсторонних детекторов необходимо дополнительно решить проблемы, связанные с формированием на обеих сто-

ронах кремниевой пластины активных областей, удовлетворяющих, во-первых, по своим параметрам тем же требованиям, что и односторонние детекторы, и во-вторых — требованиям совмещения элементов верхней и нижней стороны пластины с микронной точностью. Одним из препятствий в формировании качественной поверхностной структуры на обеих сторонах пластины является то, что существующее технологическое оборудование предназначено для формирования односторонних структур, и при попытке сформировать активную структуру на противоположной стороне пластины повреждается структура, уже сформированная на исходной стороне. Для предотвращения таких повреждений необходимо наносить защитные пленки, используемые в технологии ИС, и разрабатывать специальную оснастку и приспособления для их нанесения на пластины на стандартном оборудовании. Соответственно, нужна и разработка технологии формирования этих специальных защитных слоев, определение режимов и последовательности технологических операций формирования поверхностной структуры детектора на каждой из двух рабочих поверхностей пластины.

Представленная в настоящей статье разработка двухстороннего детектора, в которой решены перечисленные выше проблемы, предполагает использование распространенных в технологии ИС пленок, материалов и процессов. Такая технология была использована при изготовлении прототипа двухстороннего микрострипового детектора для эксперимента ALICE (CERN) [25—27].

Направленность разработки на возможность изготовления двухсторонних детекторов в условиях серийного производства кремниевых ИС делает более доступным их изготовление и позволяет в случае необходимости осуществлять их массовый выпуск.

Конструкция и технология двухсторонних микростриповых детекторов

Односторонние микростриповые детекторы позволяют измерять только одну координату трека частицы. Для создания двухкоординатных детекторов первоначально использовали два детектора, стрипы которых расположены ортогонально друг другу. Затем были созданы детекторы, у которых стрипы выполнены на обеих сторонах одной и той же пластины кремния. К таким приборам применяют термин «двух-

Автор выражает благодарность Н. И. Маслову и его коллегам из ХФТИ НАНУ (г. Харьков) за плодотворное сотрудничество.

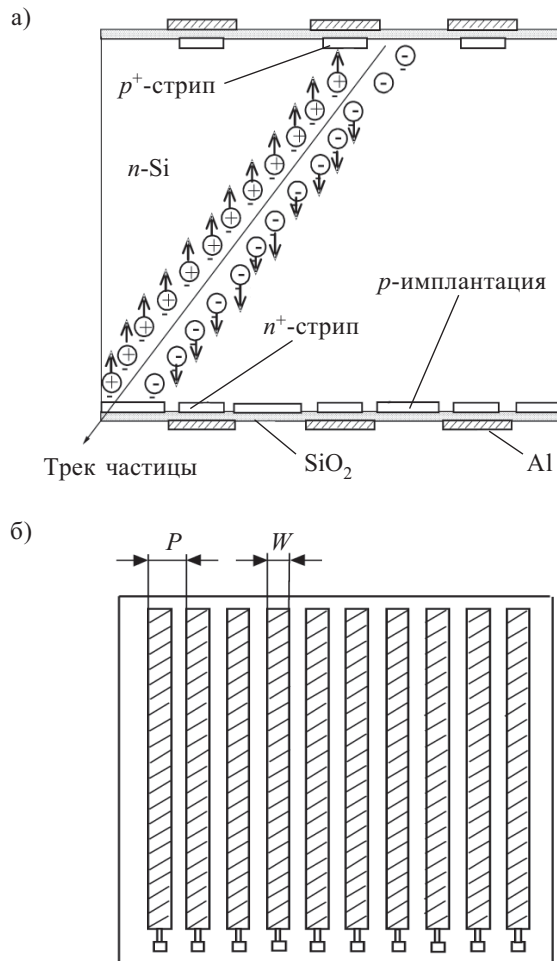


Рис. 1. Поперечное сечение и структура двухстороннего микрострипового детектора (а) и вид сверху на p^+ -сторону с полосками p^+ - n -переходов (стрипов) шириной W и контактными площадками для разварки и тестирования (б)

сторонние двухкоординатные детекторы». Конструкция такого детектора схематически представлена на **рис. 1**, где показано его поперечное сечение и послойная структура в разрезе. На лицевой стороне кремниевой пластины сформирован традиционный p^+ -стрип-детектор (p^+ -сторона), а на обратной стороне сформированы n^+ -стрипы на n^+ - n -переходах (n^+ -сторона) и разделяющие p -имплантационные области. На детектор подается напряжение полного обеднения, поэтому по всей толщине пластины действует электрическое поле, растягивающее электронно-дырочные пары. То есть электронно-дырочные пары, образовавшиеся при прохождении частицы, растягиваются полем на разные поверхности: дырки — на p^+ -сторону, электроны — на n^+ -сторону.

Таким образом, двухсторонний детектор позволяет получить от одной частицы одновременно два сигнала — сигнал от дырок, приходящих на стрипы p^+ -стороны, и сигнал от электронов, приходящих на стрипы n^+ -стороны.

Кроме стриповых элементов, на обеих сторонах кремниевой пластины расположены переходные кон-

денсаторы [3, 7, 8, 11, 12, 15, 23] для реализации емкостной связи между p - n -переходами стриповых элементов детектора и входными цепями предусилителей, а также нагрузочные высокоомные резисторы для подачи смещения на стрипы.

Как и для одностороннего детектора, пространственное разрешение двухстороннего детектора зависит от шага стрипов P и для простейшей модели составляет $P/\sqrt{12}$ [3, 9, 15], причем разрешение определяется отдельно для p^+ -стороны и для n^+ -стороны. Модель и расчет разрешения для случая падения частицы под углом к стрипам рассмотрены в [16, 20].

Топология двухстороннего детектора — 13-слойная, включая слои для совмещения фигур на лицевой и на обратной сторонах. При разработке топологии (с проектной нормой 2 мкм) использовался отечественный пакет программных средств «Сталкер» для проектирования ИС.

Структура двухстороннего детектора (прототипа детектора ALICE) в разрезе показана на **рис. 2**. Верхняя сторона пластины является p^+ -стороной стрип-детектора. Напряжение смещения подается на алюминиевую шину смещения и с нее — через поликремниевые резисторы — на ионно-имплантированные p^+ -стрипы. Нижняя сторона пластины — n^+ -сторона стрип-детектора, где алюминиевая шина смещения через поликремниевые резисторы аналогично соединена с ионно-имплантированными n^+ -стрипами, которые окружены p^+ -стоп-областями. Импульсные сигналы снимаются с алюминиевых площадок «АС-rad» на обеих сторонах детектора и подаются на входы многоканальных зарядочувствительных предусилителей. Контактные площадки «DC-rad» служат для тестирования детектора.

Конструкция и технология изготовления двухсторонних микростриповых детекторов содержит элементы конструкции и технологии односторонних детекторов. Так, например, p^+ -сторона (на рис. 1 и 2 — верхняя) в разработанном нами прототипе двухстороннего детектора для эксперимента ALICE имеет такую же структуру, как и у одностороннего детектора. Поэтому для формирования p^+ -стороны использовались блоки ранее разработанной нами технологии односторонних детекторов [23].

Однако здесь свойства так называемой n^+ -стороны (нижняя на рис. 1, 2), или обратной стороны кристалла, существенно отличаются от свойств p^+ -стороны. На n^+ -стороне в качестве рабочих стрип-элементов используются изотипные n^+ - n -переходы, формируемые легированием поверхностных областей примесью того же типа проводимости, что и подложка, т. е. примесью n -типа. Кроме того, для n^+ -стороны существует дополнительная проблема замыкания n^+ -стрипов между собой, т. к. на границе раздела Si-SiO₂ присутствует встроенный положительный заряд, аккумулирующий электроны на поверхности кремния. Образующийся в результате этого слой электронов под SiO₂ на поверхности n -кремния и приводит к замыканию n^+ -стрипов. На p^+ -стороне детектора этого явления нет, т. к. p^+ - n -переходы создают барьеры для электронов, а с подачей обратного смещения на переходы электроны отселяются от p^+ -стрипов обла-

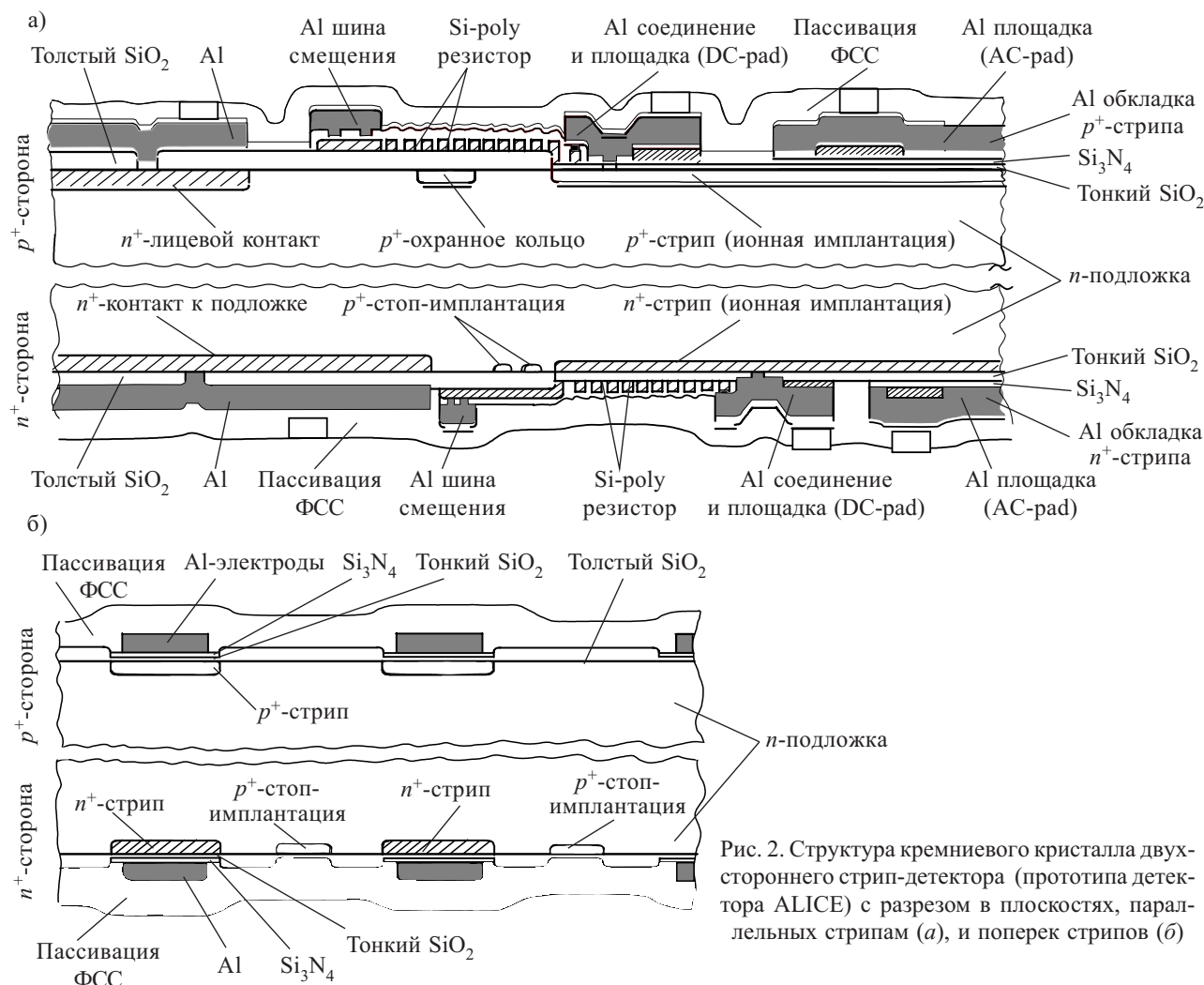


Рис. 2. Структура кремниевого кристалла двухстороннего стрип-детектора (прототипа детектора ALICE) с разрезом в плоскостях, параллельных стрипам (а), и поперек стрипов (б)

тиями обеднения p - n -переходов, и p^+ -стрипы оказываются изолированными друг от друга обедненной областью. Наиболее практичным способом решения проблемы замыкания n^+ -стрипов на n^+ -стороне, применяемым в настоящее время, является разделение n^+ -стрипов стоп-областями, легированными примесью p -типа (на рис. 1 — обратная сторона кристалла). Эти разделяющие p -области создают барьеры для электронов, резко увеличивают сопротивление между n^+ -стрипами, разделяя их обедненными на электроны областями. Такое повышение сопротивления ведет к изоляции n^+ -стрипов друг от друга и предотвращает растекание заряда электронов, что позволяет локализовать сигнал от n^+ -стрипов и повысить пространственное разрешение на n^+ -стороне детектора.

Примером двухстороннего детектора является разработанный совместно с ХФТИ НАНУ и изготовленный нами 2×768 - элементный стрип-детектор (прототип детектора для эксперимента ALICE). Параметры ряда тестовых стрип-детекторов приведены в табл. 1.

Фрагмент топологии p^+ -стороны кристалла детектора показан на рис. 3, где в нижней части кристалла (левый угол) расположена шина смещения, а в нижней части стрипов — поликремниевые резисторы, через которые смещение подается на p^+ -стрипы. Кон-

тактные площадки «DC-pad» для тестирования выполнены в нижнем ряду около резисторов и на шине смещения. Площадки «AC-pad» для съема сигнала выполнены двойными для резервирования и расположены со сдвигом, что дает возможность увеличить ширину площадок и облегчает разварку контактных площадок. На каждой стороне кристалла расположено по 768 стрипов длиной 40 мм с шагом 95 мкм.

Широкое n^+ -кольцо на краю является омическим контактом к подложке (рис. 3, а, б). Активная область p^+ -стороны детектора окружена защитным p^+ -кольцом, на которое подается напряжение смещения (рис. 3, б, в).

Фрагмент топологии n^+ -стороны детектора с n^+ -стрипами и разделительными p^+ -областями между n^+ -стрипами и по периметру детектора показан на рис. 4. В отличие от ортогонального расположения стрипов в ряде известных детекторов, стриповые элементы в разрабатываемом детекторе на лицевой и обратной сторонах располагаются не перпендикулярно. Угол наклона p^+ -стрипов относительно оси детектора составляет 17,5 мрад. Угол наклона стрипов на n^+ -стороне также 17,5 мрад, они наклонены в противоположную сторону относительно p^+ -стрипов, так что суммарный угол наклона между n^+ - и p^+ -стрипами составляет 35 мрад.

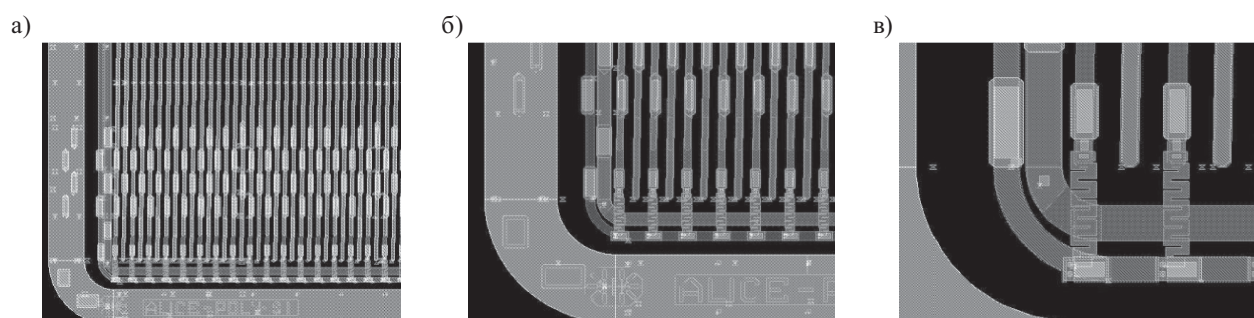


Рис. 3. Фрагменты топологии p^+ -стороны кристалла прототипа стрип-детектора для эксперимента ALICE: a — нижний левый угол кристалла; b — контактные площадки «AC-rad» на стрипах (сверху); c — поликремниевые резисторы и контактные площадки типа «DC-rad» к резистору (внизу) и к p - n -переходу (вверху)

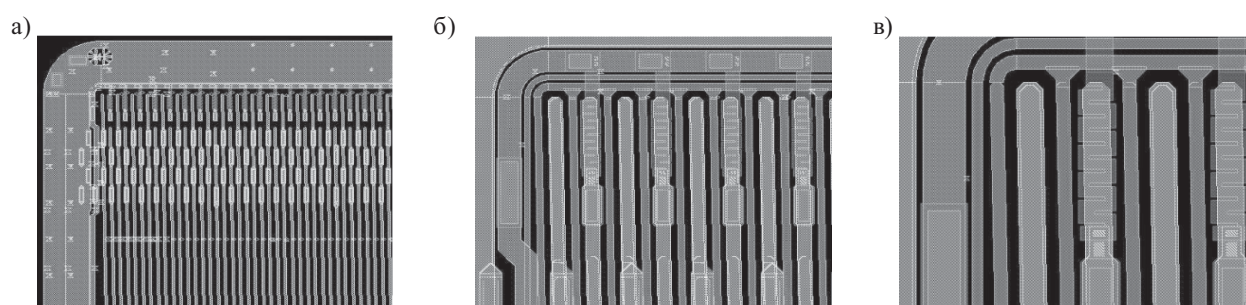


Рис. 4. Фрагменты топологии n^+ -стороны кристалла стрип-детектора (верхний левый угол): a — общий вид, контактные площадки «AC-rad» посередине; b — разделительная p^+ -имплантация между n^+ -стрипами и пассивное p^+ -кольцо вокруг активной области; c — поликремниевые резисторы и контактные площадки «DC-rad». По периметру детектора расположены разделительные полоски p -областей

Таблица 1

Параметры разработанных в Украине в рамках эксперимента ALICE кремниевых координатно-чувствительных микростриповых детекторов

Параметры	Тип детектора					
	Односторонний, p^+ -сторона	Тестовый, n^+ -сторона	Тестовый, p^+ - или n^+ -лицевая сторона	Тестовый, двухсторонний	Прототип ALICE 1	Прототип ALICE 2
Площадь активной области, мм^2	75×40	13×40	13×40	13×40	75×40	73×40
Число стрипов (элементов)	750	1×64	2×64	2×64	2×750	2×768
Ширина стрипа, мкм	40	40	38	38	40	38
Межстриповый зазор, мкм	60	60	57	57	60	57
Шаг стрипов, мкм	100	100	95	95	100	95
Толщина детектора, мкм	350	300	300	300	300	300
Наличие на кристалле детектора:						
— поликремниевых резисторов	+	+	+	+	+	+
— интегрированных переходных емкостей	+	+	+	+	+	+
— двухсторонней структуры	—	+	+	+	+	+
Напряжение полного обеднения, В	80	65—70	65—70	65—70	65—70	65—70

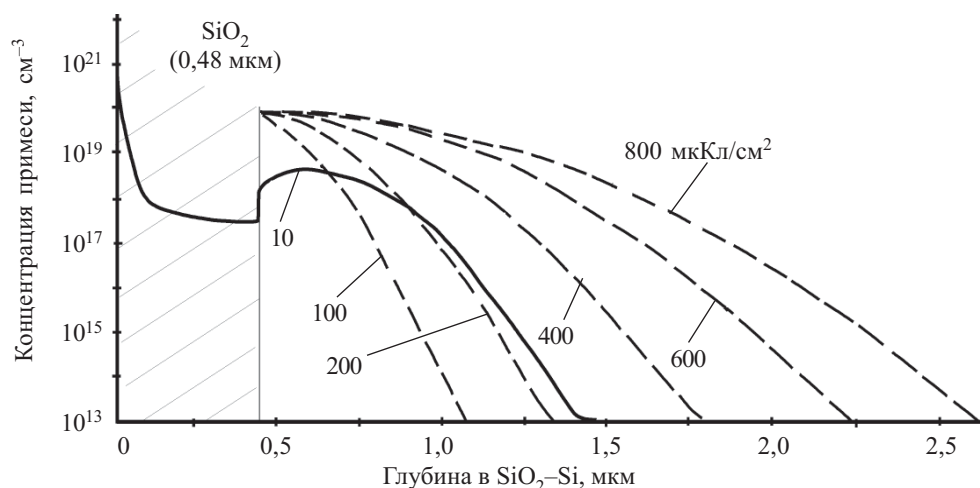


Рис. 5. Профили распределения примеси бора (сплошная линия) и фосфора (пунктирные линии), полученные при разных дозах легирования (в мкКл/см²) на p^+ -стороне детектора

Разработка технологии изготовления прототипа детектора ALICE проводилась на базе технологии, описанной в [22, 23].

На первом этапе была разработана конструкция одностороннего детектора и отработана технология изготовления p^+ -стороны детектора. Детектор имел 750 p^+ -стрипов длиной 40 мм (табл. 1). Для его изготовления использовали полированные с двух сторон пластины кремния n -типа, полученного методом зонной плавки (FZ), с ориентацией $\langle 111 \rangle$, диаметром 100 мм и толщиной 350 мкм. Удельное сопротивление составляло 3000—5000 Ом·см, время жизни неосновных носителей заряда — около 1000 мкс. Характеристики детектора представлены в [25].

В процессе первого окисления при температуре 900°C выращивался пирогенный оксид толщиной 0,3 мкм с добавлением HCl. Этот оксид использовали как маску при ионной имплантации фосфора для формирования защитных n^+ -колец и контактов к n^+ -подложке на лицевой стороне. Фосфор с энергией ионов $E=60$ кэВ и с поверхностной концентрацией $6 \cdot 10^{14}$ см⁻² имплантировали через слой оксида толщиной 500 Å. В обратную сторону одностороннего детектора также имплантировали фосфор, но с более высокой поверхностной концентрацией ($2,5 \cdot 10^{15}$ см⁻²) для создания омического контакта к обратной стороне и возможности проведения эффективного геттерирования быстродиффундирующих примесей.

После формирования n^+ -колец защитный оксид снимали и выращивали новый слой защитного оксида толщиной 0,6 мкм для маскирования при имплантации бора. После формирования рисунка p^+ -областей в окна стрипов имплантировали бор с энергией ионов $E=40$ кэВ и с поверхностной концентрацией $5 \cdot 10^{14}$ см⁻². Профили распределения примеси фосфора и бора на p^+ -стороне при различных режимах ионной имплантации показаны на рис. 5. Расчеты профиля имплантированной примеси с помощью программы SUPREM-3 [24] показали, что вариации энергии ионов (40—80 кэВ), толщины слоя защитного оксида (200—500 Å), дополнительная разгонка ионно-имплантированного слоя (30—60 мин) с предварительным снятием защитного оксида слабо влияют на профиль распределения примеси.

Затем при одновременной активации и разгонке ионов бора формировали первый слой двухслойного конденсаторного диэлектрика — слой SiO₂ толщиной 0,15 мкм. Вторым был слой высокотемпературного Si₃N₄ толщиной 0,12 мкм. На некоторые пластины слой Si₃N₄ не наносили для проведения сравнительного анализа.

Для формирования резисторов наносили пленку поликристаллического кремния толщиной 0,55 мкм, который легировали бором методом ионной имплантации через слой оксида до уровня, обеспечивающего величину сопротивления резисторов около 1,5 МОм.

Контактные окна к различным слоям (n^+ -, p^+ - и к поликремнию) создавали одновременным «мокрым» травлением слоев SiO₂ различной толщины (0,1; 0,3 и 0,6 мкм) после фотолитографического формирования «картинки» контактных окон и плазмохимического травления слоя Si₃N₄ в области контактных окон к n^+ -, p^+ -слоям на лицевой стороне пластины.

Металлизацию стрип-детектора осуществляли напылением Al с примесью кремния (1%). После фотолитографии по Al на лицевую сторону наносили пассивирующий слой низкотемпературного фосфоросиликатного стекла (ФСС) толщиной 0,9 мкм, который покрывал всю площадь детектора. Заключительная фотолитография по пассивирующему слою ФСС вскрывала только области Al контактных площадок для обеспечения возможности ультразвуковой сварки выводов стриповых элементов и контактирования к площадкам тестовых структур. Вжигание Al проводилось при температуре 400°C в атмосфере водорода в течение 30 мин.

Электрофизические характеристики стриповых элементов двухстороннего детектора

Для обеспечения однородности и воспроизводимости параметров поликремниевых ионно-имплантированных резисторов, а также для получения заданного сопротивления была проведена оптимизация режима ионной имплантации бора. В табл. 2 приведены результаты измерений поверхностного сопротивления, усредненные по трем точкам на пластине, для

Таблица 2

Поверхностное сопротивление R_s образцов, полученных в режимах с различной дозой D ионов бора при легировании поликремния

D , мкКл/см ²	R_s , кОм/□
2	4933,3
5	1706,7
10	207,1
20	12,8

различных режимов ионного легирования поликремния (энергия ионов 45 кэВ, имплантация через слой SiO_2 толщиной 0,1 мкм), на основании которых был выбран оптимальный. С учетом высокой нелинейности зависимости $R_s(D)$ в области малых доз оптимальной является доза около 10 мкКл/см².

Показанное на рис. 6 распределение значений сопротивления интегрированных резисторов, а также падения напряжения на них, которое пропорционально току утечки элементов [25], свидетельствует о том, что разброс сопротивления резисторов находится, в основном, в пределах нескольких процентов ($\pm(2-3)\%$). Для ионно-легированных поликремниевых резисторов, распределенных на расстоянии 75 мм по пластине, это является очень хорошим показателем.

Сравнительный анализ параметров детекторов с однослойным и двухслойным конденсаторами пока-

зал, что конденсаторы, образованные двухслойным диэлектриком (0,15 мкм $\text{SiO}_2 + 0,1$ мкм Si_3N_4), имеют более высокое пробивное напряжение (100—160 В) и более высокий процент выхода годных по сравнению с однослойными (0,25 мкм SiO_2) конденсаторами (пробивное напряжение 25—50 В). Так, например, для 750-элементного p^+ -стрип-детектора с двухслойным диэлектриком выход годных конденсаторов составлял более 99%, в то время как для детектора с однослойным диэлектриком — менее 97% (при требовании к показателю качества — менее 1% бракованных конденсаторов).

Следует отметить, что применение пленки Si_3N_4 в технологическом процессе приводит к повышению токов утечки стрипов (иногда в 10—20 раз) из-за внесения напряжений в поверхностные слои МДП-структуры. Указанный эффект виден на рис. 7.

Однако в условиях высоких радиационных нагрузок применение двухслойного диэлектрика ($\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$) оправданно. На рис. 7 [25] показаны значения токов утечки до и после радиационных испытаний p^+ -детекторов пучком электронов с энергией 20 МэВ. Дозы облучения при исследованиях были ниже, чем ожидаемые в эксперименте ALICE. Облучение 20 МэВ-электронами моделировало облучение 14 МэВ-нейтронами. Доза электронов $2,2 \cdot 10^4$ Гр соответствует потоку $2 \cdot 10^{12}$ нейтрон/см². Видно, что с увеличением дозы облучения происходит рост токов утечки для обоих вариантов приборов и их сближе-

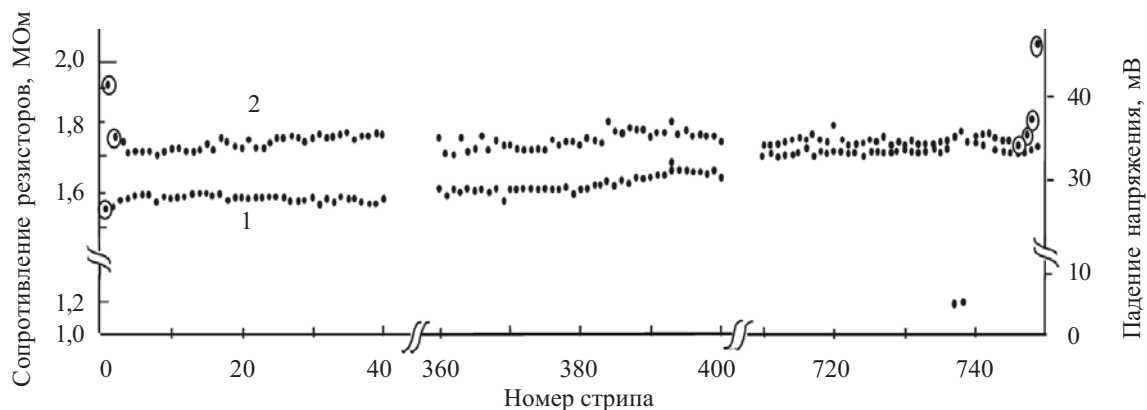


Рис. 6. Распределение значений сопротивления интегрированных резисторов (1) и падения напряжения на стриповых элементах (2) вдоль p^+ -стороны микрострипового детектора (напряжение на общей шине смещения 40 В)

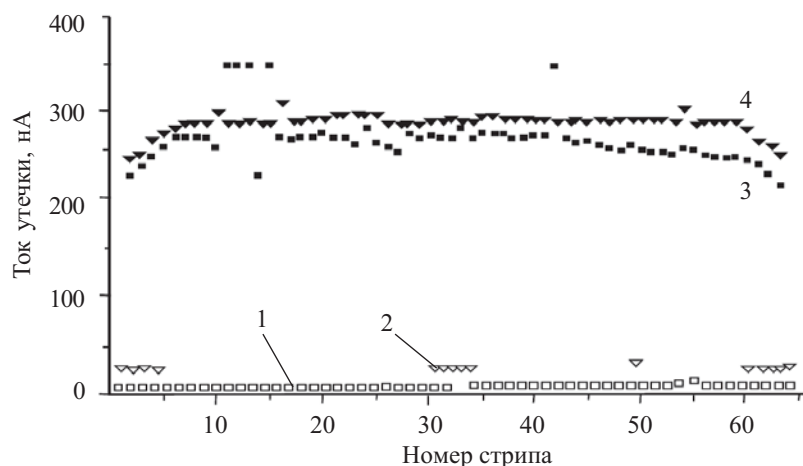


Рис. 7. Распределение токов утечки стриповых элементов в детекторе до (1, 2) и после (3, 4) облучения электронами с энергией 20 МэВ (доза $2 \cdot 10^4$ Гр): 1, 3 — однослойный диэлектрик (SiO_2); 2, 4 — двухслойный диэлектрик ($\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$)

Таблица 3

Электрофизические и геометрические параметры двухсторонних микроstriповых детекторов

Параметры детектора	Значения
Материал, удельное сопротивление, Ом·см	<i>n</i> -Si, 3000—5000
Время жизни неосновных носителей заряда в исходном кремнии, мкс	>1000
Толщина, мкм	300±15
Активная площадь, см ²	2×30
Количество микроstriпов	2×768
Шаг, мм; длина, мм; площадь striпов, мм ²	0,1; 40; 4,0
Переходная емкость striпового элемента, пФ	>200
Межstriповая емкость, пФ	4
Пробивное напряжение конденсатора, В: — однослойного (SiO ₂) — двухслойного (SiO ₂ +Si ₃ N ₄)	>25 >100
Сопротивление поликремниевого резистора смещения, МОм	1,5±3%
Выход годных микроstriповых элементов (включая резисторы и конденсаторы), %	97—100

Таблица 4

Радиационные параметры двухсторонних микроstriповых детекторов

Параметры детекторов	До облучения	После облучения
Напряжение полного обеднения, В	60	33 (доза 1,6·10 ⁴ Гр)
Ток утечки детектора, нА/стрип: — с однослойным конденсатором (SiO ₂) — с двухслойным конденсатором (SiO ₂ +Si ₃ N ₄)	<1 5—10	≈270 (доза 2,2·10 ⁴ Гр) ≈290 (доза 2,2·10 ⁴ Гр)
Межstriповое сопротивление, ГОм	5	0,5 (доза 2,2·10 ⁴ Гр)

ние по абсолютной величине. Например, при дозе около 2·10⁴ Гр разница между токами утечки striпов в детекторах с однослойным и двухслойным диэлектриком практически незначительна.

После отработки описанной технологии и получения удовлетворительных экспериментальных результатов [25] была продолжена разработка технологии двухсторонних структур и изготовлены детекторы с *p*⁺- и *n*⁺-стороной на одной и той же пластине. В начале технологического процесса проводилась двухсторонняя фотолитография для формирования знаков совмещения одновременно на лицевой и обратной стороне, что позволяло в дальнейшем использовать оборудование для односторонней фотолитографии и проводить процесс отдельно на сторонах *p*⁺ и *n*⁺.

При изготовлении *n*⁺-стороны детектора, в основном, повторяется тот же процесс, что и для *p*⁺-стороны, с некоторыми отличиями.

Концентрация ионно-имплантированной примеси (бора) в *p*-стоп-областях несколько ниже, чем концентрация бора в *p*⁺-областях *p*⁺-стороны, и составляет около 2·10¹⁴ см⁻². Для получения одинаковой толщины конденсаторного оксида над *p*⁺- и *n*⁺-striпами проводят дополнительную фотолитографию и снятие оксида над *n*⁺-striпами.

Для обеспечения возможности изготовления двухстороннего детектора на стандартной технологической линии серийного производства ИС с оборудованием для односторонней фотолитографии, была разработана и применена специальная технологическая оснастка и способ маскирования *p*⁺- и *n*⁺-сторон пласти-

ны детектора технологическими слоями, что позволило получить хорошее качество *p*–*n*-переходов и других элементов детектора на обеих сторонах кремниевой пластины. Характеристики детекторов, изготовленных по описанной технологии, представленные в табл. 3 и 4, показывают, что полученные параметры типичны для большинства зарубежных детекторов [1—21].

Поведение разработанных детекторов при облучении согласуется с экспериментальными результатами ряда исследователей, из которых следует, что зависимость токов утечки от дозы облучения близка к линейной с различными коэффициентами [28—31]. Так, для одностороннего детектора фирмы “Hamamatsu” (Япония) этот коэффициент составляет 10 нА/см²/крад [28] при облучении высокоэнергетичными ионами Fe. Для двухстороннего детектора фирмы “Micron Semiconductor” (Англия) [29, 31] и детектора фирмы IRST, Divisione Microsistemi (Италия) [30] он равен примерно 2 мкА/см²/Мрад при облучении 900 МэВ-электронами. У произведенного нами двухстороннего детектора при облучении электронами с энергией 20 МэВ коэффициент составил около 3 мкА/см²/Мрад [26], что достаточно близко к приведенным в [28—30].

Выводы

Разработана технология изготовления и конструкция двухсторонних кремниевых микроstriповых детекторов с резисторами и переходными конденсаторами, интегрированными с детектором на кремне-

вом кристалле. Полученные результаты убедительно доказывают возможность их изготовления на стандартных для стран СНГ технологических линиях с относительно небольшими доработками технологического процесса серийного производства одностронних кремниевых микросхем. При этом применяются стандартные методы оптической фотолитографии, ионного легирования, окисления, нанесения поликремниевых слоев для формирования нагрузочных резисторов, интегрированных с детектором.

Изготовленные детекторы сравнимы по параметрам с аналогичными зарубежными детекторами, однако отличаются меньшей стоимостью.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Kemmer J., Lutz G. New Structures for Position Sensitive Semiconductor Detectors // Nuclear Instrum. and Methods in Physics Research.— 1988.— A273.— P. 588—598.
2. Batignani G., Bosisio L., Focardi E. et al. Development of Double Side Readout Silicon Strip Detectors // Nuclear Instrum. and Methods in Physics Research.— 1988.— A273.— P. 677—681.
3. Holl P., Kemmer J., Prechtel U. et al. A double-sided silicon strip detector with capacitive readout and a new method of integrated bias coupling // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 1989.— Vol. 36, N 1.— P. 251—255.
4. Batignani G., Bosisio L., Conti A. et al. Test results on double-sided readout silicon strip detectors // IEEE Trans. on nuclear science. 1989.— Vol. 36, N 1.— P. 40—45.
5. Becker H., Boulos T., Cattaneo P. et al. New Developments in double sided strip detectors // IEEE Trans. on nuclear science.— 1990.— Vol. 37, N 4.— P. 101—106.
6. Batignani G., Bosisio L., Forcardi E. et al. Development and performance of double-sided silicon strip detectors // Nuclear Instrum. and Methods in Physics Research.— 1991.— A310, P. 160—164.
7. Djama F., Dulinski W., Lagos A. et al. Double-sided double-metal AC-coupled silicon microstrip detectors // Nuclear Instrum. and Methods in Physics Research.— 1995.— A360.— P. 113—117.
8. Saitoh Y., Akamine T., Inoue M. et al. Fabrication of a double-sided silicon microstrip detector with an ONO capacitor dielectric film // IEEE Trans. On Nuclear Science.— 1996.— Vol. 43, N 3.— P. 1123—1129.
9. Iwata Y., Ohsugi T., Fujita K. et al. Optimal p-stop pattern for the N-side strip isolation of silicon microstrip detectors // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 1998.— Vol. 45, N 3.— P. 303—309.
10. Abt I., Andricek L., Bauer C. et al. Irradiation tests of double-sided silicon strip detectors with a special guard ring structure // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 1996.— Vol. 43.— N 3.— P. 1113—1117.
11. Lutz G. Semiconductor radiation detectors.— Springer, 1999.
12. Abt I., Masciocchi S., Moshous B. et al. Double-sided microstrip detectors for the high radiation environment in the HERA-B experiment // Nuclear Instrum. and Methods in Physics Research.— 2000.— A439.— P. 442—450.
13. Koetz U. Test of silicon strip detectors for the ZEUS micro-vertex detector // Nuclear Instrum. and Methods in Physics Research.— 2001.— Vol. 461.— P. 210—212.
14. Dalla Betta G. F., Boscardin M., Bosisio L. et al. Development of a fabrication technology for double-sided AC-coupled silicon microstrip detectors // Nuclear Instrum. and Methods in Physics Research.— 2001.— A460.— P. 306—315.
15. Spieler H. Radiation detectors and signal processing // Introduction: Vertex Detection in High Energy Physics.— 2001, Univ. Heidelberg.— P. 28—34. (http://www-physics.ibl.gov/~spieler/Heidelberg_Notes/index.html)
16. Arnold L., Baudot J., Coffin J. P. et al. In-beam test of double-sided silicon strip detector / ALICE.— SIL 98-05 Internal Note-S.— 22 January, 1998.
17. Bettarini S., Bondioli M., Calderini G. et al. Measurement of the charge collection efficiency after heavy non-uniform irradiation in BaBar silicon detector // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 2005.— Vol. 52, N 4.— P. 1054—1060.
18. Segneri G. Results of the tests of a CMC tracker inner barrel sub-system with a 25 ns beam // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 2005.— Vol. 52, N 4.— P. 1182—1186.
19. Allport P. P., Casse G., Losano M. et al. Performance of P-type micro-strip detectors after irradiation to $7.5 \cdot 10^{15}$ p cm² // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 2005.— Vol. 52, N 5.— P. 1903—1906.
20. Straulino S., Adriani O., Bonechi L. et al. Spatial resolution of double-sided silicon microstrip detectors for the PAMELA apparatus // Nuclear Instrum. and Methods in Physics Research.— 2006.— A556.— P. 100—114.
21. Coppola N., Kahle B., Karstens F. Charm particle finders with the ZEUS micro-vertex detector // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 2007.— Vol. 54, N 5.— P. 1849—1853.
22. Перевертайло В. Л. Характеристики и технология изготовления кремниевых планарных *p-i-n*-фотодиодов для сцинтилляционных детекторов // Электроника и связь. Тематический выпуск «Проблемы электроники». Ч. 1.— 2007.— С. 15—23. [Perevertailo V. L. Elektronika i svyaz'. Tematicheskii vypusk «Problemy elektroniki». P. 1. 2007. P. 15]
23. Перевертайло В. Л. Разработка и характеристики кремниевых координатно-чувствительных детекторов для физики высоких энергий и ядерной физики // Ядерная физика и энергетика.— 2008.— № 1 (23).— С. 88—95. [Perevertailo V. L. Yadernaya fizika i energetika. 2008. N 1 (23). P. 88]
24. Ho C. P., Plummer J. D., Hansen S. E., Dutton R. E. VLSI process modeling SUPREM III // IEEE Trans. on Electron Devices.— 1983.— Vol. ED-30.— N 11.— P. 1438—1452.
25. Maslov N., Kulibaba V., Perevertaylo V. et al. Radiation tolerance of single-sided microstrip detector with Si₃N₄ insulator // Nuclear Physics B (Proceeding Supplements).— 1999.— Vol. 78.— P. 689—694.
26. De Haas A. P., Kuijer P., Maslov N. I. et al. Characteristics and radiation tolerance of a double-sided microstrip detector with polysilicon biasing resistors // Problems of Atomic Science and Technology. Issue: Nuclear Physics Research.— 2000.— N 2 (36).— P. 26—33.
27. Kulibaba V., Maslov N., Potin S., Starodubtsev A. Interstrip resistance of a semiconductor microstrip detector // Problems of Atomic Science and Technology. Issue: Nuclear Physics Research.— 2001.— N 5 (39).— P. 180—182.
28. Yoshida S., Yamanaka K., Ohsugi T. et al. Heavy ion irradiation on silicon strip sensors for GLAST // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 2002.— Vol. 49, N 4.— P. 1756—1762.
29. Re V., Kirkby D., Bruinsma M. et al. Lessons learned from BaBar silicon vertex tracker, limits, and future perspectives of the detector // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 2005.— Vol. 52, N 3.— P. 787—792.
30. Bettarini S., Bondioli M., Calderini G. et al. Measurement of the charge collection efficiency after heavy non-uniform irradiation in BaBar silicon detector // IEEE Trans. on Nuclear Science.— 2005.— Vol. 52, N 4.— P. 1054—1060.
31. www.micronsemiconductor.co.uk — Сайт фирмы "Micron Semiconductor".