

Межсегментное сопротивление в кремниевых позиционно-чувствительных приемниках излучений на основе $p-n$ -переходов

© В.К. Еремин, Е.М. Вербицкая, И.Н. Ильяшенко, И.В. Еремин, Н.Н. Сафонова, Ю.В. Тубольцев, Н.Н. Егоров*, С.А. Голубков*, К.А. Коньков*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

* НИИ материаловедения,
124460 Зеленоград, Россия

(Получена 15 октября 2008 г. Принята к печати 24 октября 2008 г.)

Проведено исследование межсегментной изоляции в матрицах $p-n$ -переходов на основе высокоомного кремния, которое определило взаимовлияние соседних элементов позиционно-чувствительных приемников излучения. Показано, что в условиях глубокого обеднения при приложении обратного напряжения к $p-n$ -переходу вольт-амперные характеристики межсегментного промежутка имеют участок ступенчатого изменения тока, определяющий сопротивление межсегментной изоляции. Данная особенность обусловлена эффектом переключения небольшой части объемного тока между соседними сегментами. При этом влияние омической проводимости между сегментами на сопротивление межсегментной изоляции оказывается на порядок меньше влияния переключения объемного тока.

PACS: 29.40.Gx, 29.40.-n

1. Введение

Среди кремниевых приемников излучений в настоящее время наиболее востребованными являются позиционно-чувствительные детекторы. Область их применения охватывает самые разные направления науки и техники, включая физику высоких энергий, медицину, астрофизику и ядерные технологии. Современные твердотельные позиционно-чувствительные приемники излучений строятся на основе матриц сегментированных $p-n$ -переходов, формирующих чувствительную область детектора в виде изолированных чувствительных элементов, с топологией однокоординатной (стриповый детектор) или двухкоординатной структуры (пиксельный детектор). Характерным примером успешной разработки подобных матриц является создание систем детектирования частиц для экспериментов в физике высоких энергий. В предстоящих экспериментах на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе (Швейцария) и Центре ядерных исследований на тяжелых ионах (GSI) (Германия) стриповые и пиксельные детекторы покрывают площади в десятки квадратных метров [1–5]. В таких детекторах каждый элемент матрицы соединяется с индивидуальным трактом электроники, что обеспечивает разрешающую способность по координате не хуже шага матрицы [6]. Это позволяет определять траектории элементарных частиц и их времена жизни.

В настоящей работе приведены экспериментальные результаты исследования характеристик сегментов и межсегментного сопротивления в матрицах $p-n$ -переходов на основе высокоомного кремния и обсуждаются физические эффекты, влияющие на его величину.

Измерения выполнены на тестовых структурах, которые моделируют свойства межсегментного промежутка позиционно-чувствительных приемников излучений.

2. Структура детектора и образцы

Тестовые образцы, использованные в работе, представляли собой $p-i-n$ -структуры, изготовленные на высокоомном кремнии (удельное сопротивление более 5 кОм·см). Структуры содержали два сегмента на основе p^+-n -переходов. Сегменты представляли собой высоколегированные p^+ -слои, которые имели топологию двух взаимопроникающих гребенок (рис. 1). Гребенки состояли из p^+ -полосков, объединенных общей p^+ -шиной. Полоски были разделены промежутками равной ширины, поверхность которых была пассивирована слоем SiO_2 .

Для обеспечения стабильной вольт-амперной характеристики (ВАХ) структура была окружена системой из четырех колец (на рис. 1 не показаны), внутреннее из которых могло использоваться как охранное кольцо для отвода периферийного тока утечки. Три остальных кольца выполняли функцию плавающего делителя потенциала, с помощью которого потенциал активной области структуры плавно снижался к периферии. Нижний контакт структуры был выполнен сплошным и представлял собой сильно легированный n^+ -слой. Толщина образцов равнялась 300 мкм, площадь сегментированного контакта $1 \times 1 \text{ мм}^2$. Напряжение полного обеднения составляло 20 В.

Выбор описанной топологии сегментации обусловлен ее практической значимостью для создания так называемых матриц с субсегментированными пикселями [5] и удобством для исследования. Такая топология позволяет

✉ E-mail: vladimir.eremin@cern.ch

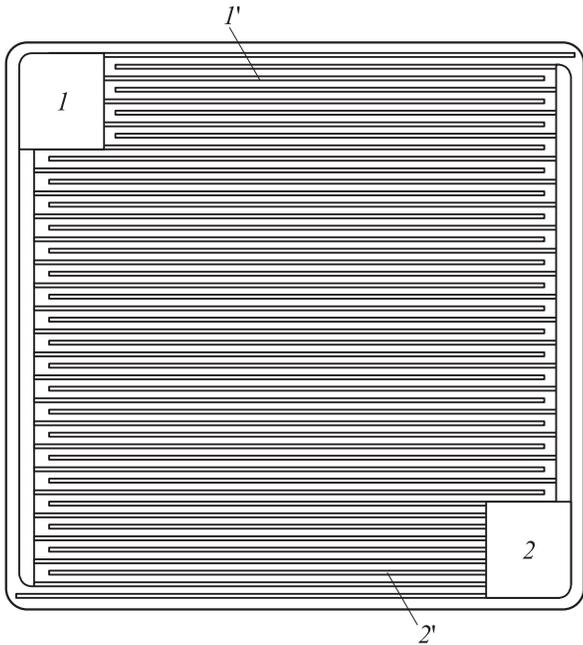


Рис. 1. Топология тестового сегментированного образца: $I, 2$ — контактные площадки к сегментам; $I', 2'$ — один из p^+ -полосков сегментов.

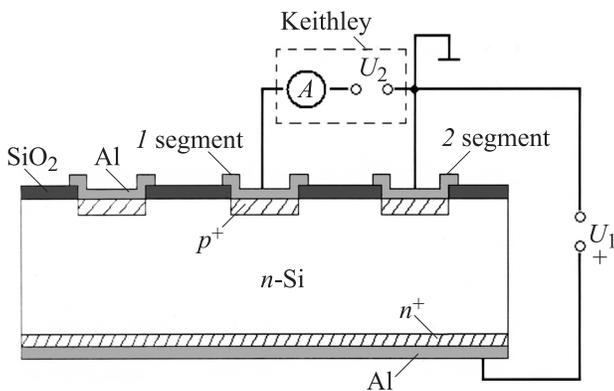


Рис. 2. Схема измерений межсегментного сопротивления образца.

получить при малой площади структуры значительную длину межсегментного промежутка. Это увеличивает ее чувствительность к свойствам промежутка и снижает требования к чувствительности измерительной аппаратуры. Ширина межсегментного промежутка равнялась 10 мкм при ширине p^+ -полосков сегментов 15 мкм. Используемая топология позволила иметь при малой площади такой структуры длину межсегментного промежутка в 40 мкм. Измерения выполнялись на установке с микрозондами и пикоамперметром Keithley-487 при температуре 20°C. Схема измерений межсегментного сопротивления приведена на рис. 2. Источник U_1 использовался для приложения к $p-n$ -переходам обратного напряжения U_1 . Источник напряжения U_2 , встроенный в пикоамперметр, позволял измерять ВАХ межсегментного промежутка.

3. Экспериментальные результаты

На рис. 3 представлены вольт-амперные характеристики двух сегментов тестовой структуры, измеренные в режиме отвода тока периферийной утечки и заземленном втором (неизмеряемом) сегменте структуры. Результат показывает их полную идентичность. Характеристики в широком диапазоне $U_1 = 0-150$ В стабильны и не показывают насыщения тока при напряжении, превышающем напряжение обеднения (20 В). Их сублинейный характер специфичен для структур с развитой периферией $p-n$ -перехода и сравнительно малой площадью, когда краевые эффекты на периферии p^+-n - или i -переходов создают области с высокой напряженностью электрического поля. Те же измерения при не соединенном с землей неизмеряемом сегменте показывают удвоенную величину тока как результат собирания всего объемного тока структуры одним измеряемым сегментом.

На рис. 4 представлено семейство ВАХ межсегментного промежутка структуры $I(U_2)$ при различных

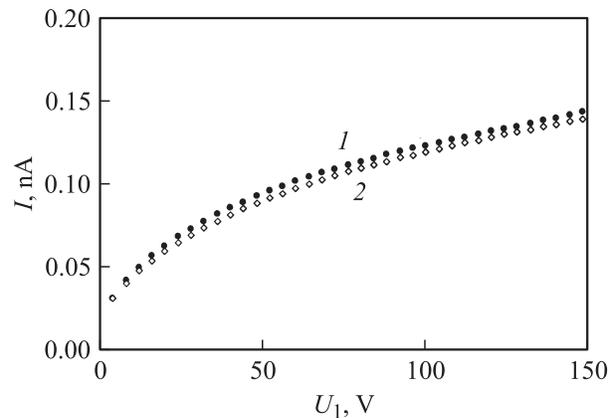


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики двух сегментов (I) и (2). Напряжение $U_2 = 0$.

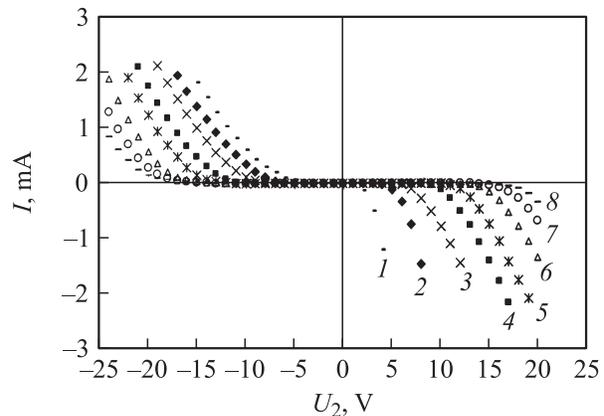


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики межсегментного промежутка тестового образца. Напряжение U_1 , В: 1 — 0, 2 — 5, 3 — 10, 4 — 20, 5 — 30, 6 — 50, 7 — 70, 8 — 90.

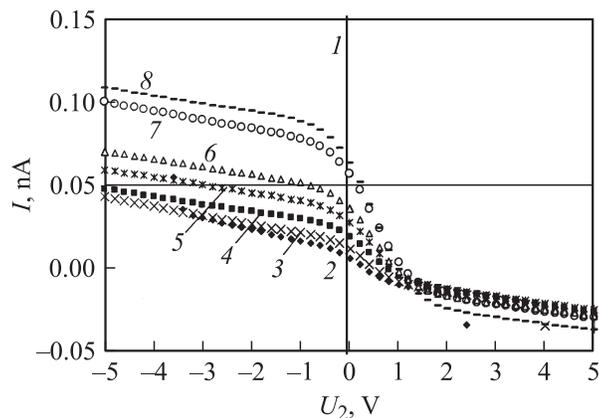


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики межсегментного промежутка после вычитания темнового тока сегмента. Напряжения U_1 , В: 1 — 0, 2 — 5, 3 — 10, 4 — 20, 5 — 30, 6 — 50, 7 — 70, 8 — 90.

обедняющих напряжениях U_1 . Характеристики имеют несимметричный вид, и рост тока в положительной ветви характеристик начинается при более низком напряжении, чем в отрицательной, хотя обе ветви возрастания тока носят инжекционный характер. Напряжение U_2 , при котором наблюдается рост тока, увеличивается с увеличением обедняющего напряжения U_1 .

Как следует из схемы рис. 3, величина тока, измеряемого в цепи источника напряжения U_2 при обедняющем напряжении U_1 , отличном от нуля, складывается из темнового объемного тока, собираемого сегментом I , и тока, протекающего через межсегментный промежуток. Поэтому собственно ток, протекающий между сегментами, может быть получен путем вычитания из измеренного тока промежутка объемного компонента тока, собираемого на сегмент I , при определенном U_1 . Этот объемный ток в первом приближении может быть принят не зависящим от U_2 , поскольку рассматриваемый диапазон U_2 меньше, чем напряжение U_1 . Результат такой обработки ВАХ межсегментного промежутка приведен на рис. 5. Характерным для всех характеристик является ступень тока вблизи $U_2 = 0$, наблюдаемая при любых напряжениях U_1 . Высота ступени и ее наклон увеличиваются с ростом U_1 при стабильной форме примыкающих к ней участков ВАХ.

Наблюдаемая особенность имеет принципиальное значение, поскольку именно эта ступень определяет межсегментное сопротивление при стандартном режиме работы детектора, когда межсегментное напряжение близко к 0. Здесь важно отметить, что сопротивление изоляции сегментов R_{IS} , определяемое как $R_{IS} = dU_2/dI$, оказывается минимальным при нулевой разности потенциалов между сегментами $U_2 = 0$ и возрастает на прилежащих к ступени участках. Обнаруженный эффект имеет как методическое, так и приборное значение и должен быть учтен при создании и использовании сегментированных приемников излучений.

4. Обсуждение результатов

В приведенных экспериментальных результатах следует выделить два эффекта, важных для работы сегментированных детекторов. Во-первых, принципиальным является тот факт, что любые оценки межсегментного сопротивления без приложения обратного напряжения к $p-n$ -переходам не отражают истинной величины сопротивления в реальных условиях работы сегментированного приемника излучений. Определение межсегментного сопротивления как дифференциального сопротивления при $U_1 = 0$ дает, согласно кривой 1 рис. 4, $R_{IS} = 1.5$ Мом, в то время как при подаче напряжения смещения $U_1 = 5$ В оно возрастает до 10 ГОм. Однако эта величина соответствует только $U_2 = 0$ и связана с резкостью наблюдаемой ступени тока в межсегментных ВАХ.

На рис. 6 приведены 4 эскиза, поясняющие протекание тока между сегментами при различной полярности приложенного напряжения U_2 и величине обедняющего напряжения U_1 . Эскизы a и b иллюстрируют механизмы протекания тока между сегментами при $U_1 = 0$ и объясняют асимметрию отрицательной и положительной ветви межсегментной ВАХ. Межсегментный промежуток представляет собой структуру p^+-n-p^+ , в которой сегмент 2 заземлен, т.е. находится под потенциалом n -объема. Поэтому приложение положительного потенциала к сегменту 1 смещает его в прямом направлении, вызывая инжекцию дырок. Последние, рекомбинируя в объеме n -области, создают ток, протекающий как через сегмент 2, так и через тыловой n^+ -контакт (эскиз a). Таким образом, положительная ветвь межсегментной ВАХ аналогична прямой характеристике резкого p^+-n -перехода.

Отрицательная ветвь ВАХ межсегментного промежутка при $U_1 = 0$ имеет отличный вид. При этой полярности сегмент 1 находится под отрицательным напряжением U_2 и смещен в запиорном направлении относительно сегмента 2 и n^+ -контакта. В результате под воздействием межсегментного напряжения U_2 образуется область объемного заряда под сегментом 1 (эскиз b), и измеряемый ток является током обратно смещенного p^+-n -перехода. Его стабильно малая величина будет сохраняться до смыкания области пространственного заряда сегмента 1 с областью падения контактной разности потенциалов вокруг сегмента 2. Соприкосновение этих областей соответствует „проколу“ межсегментного промежутка и создает условия для инжекции дырок из сегмента 2 в область электрического поля сегмента 1. Как следствие, резко возрастает межсегментный ток. Очевидно, что напряжение, при котором начинается рост тока в отрицательной ветви, будет всегда больше, чем в положительной, в силу разного механизма возникновения тока.

Приложение обедняющего напряжения U_1 к $p-n$ -переходам сегментов меняет картину протекания тока. Как показано на эскизе c , при $U_2 = 0$ под каждым из сегментов образуются области обеднения, которые, пе-

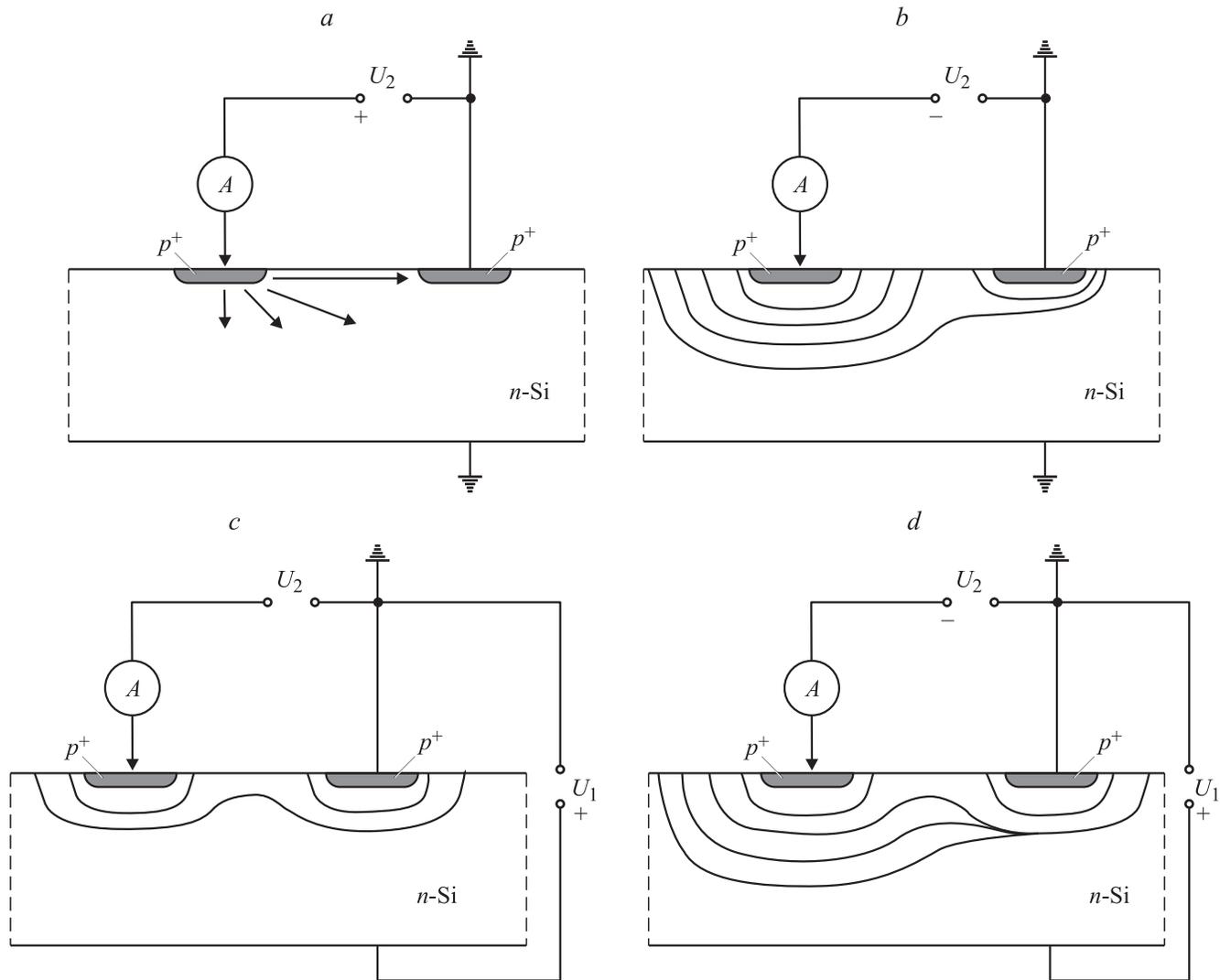


Рис. 6. Эскизы, поясняющие протекание тока между сегментами при различной полярности приложенного напряжения U_2 и величине обедняющего напряжения U_1 : $a - U_1 = 0, U_2 > 0$; $b - U_1 = 0, U_2 < 0$; $c - U_1 > 0, U_2 = 0$; $d - U_1 > 0, U_2 < 0$. Линиями обозначены границы области пространственного заряда при различных напряжениях, стрелки иллюстрируют инжекцию дырок из сегмента в объем кремния.

рекрываясь, создают симметричное распределение электрического поля, изолирующее сегменты. Протекание межсегментного тока в таких условиях возможно только при создании сильной асимметрии электрических полей в таком распределении, приводящей к инжекции дырок из одного из контактов. Так, воздействие положительного напряжения, приложенного к сегменту 1, будет уменьшать глубину области обеднения вокруг этого сегмента. Поэтому при определенном напряжении область пространственного заряда сегмента 2 достигнет сегмента 1 и вызовет инжекцию дырок и соответствующий рост тока. При отрицательной полярности U_2 (эскиз d) инжекция дырок из сегмента 2 может возникнуть, когда вектор электрического поля сегмента 2 изменит знак в области, прилегающей к межсегментному зазору, и тем самым образуется траектория для дрейфа дырок от сегмента 2 в объем структуры. Очевидно, что при этой

полярности напряжения U_2 условие инжекции дырок требует более сильной асимметрии в распределении электрического поля, чем при положительном U_2 , что проявляется в большей абсолютной величине отрицательного напряжения U_2 , соответствующего росту тока. Качественно рассмотренная модель предсказывает возрастание диапазона межсегментного напряжения, не приводящего к инжекции, с увеличением U_1 . Таким образом, эффект изоляции сегментов $p-n$ -переходов при обратном напряжении носит полевой характер и связан с разрывом линий протекания тока между сегментами, вызванным ростом компонента электрического поля, направленного нормально к поверхности образца.

Рассмотренный выше механизм предсказывает высокое сопротивление межсегментной изоляции при $U_2 = 0$. Можно предположить, что его величина будет увеличиваться с возрастанием U_1 , поскольку рост компонента

электрического поля, нормального к поверхности, будет снижать вероятность переноса дырок между соседними сегментами. Однако, как следует из эксперимента (рис. 5), именно при $U_1 \approx 0$ дифференциальное сопротивление межсегментного промежутка имеет максимум (минимум высоты ступени тока). Возможным объяснением этого факта может являться эффект перераспределения тока, генерированного на интерфейсе Si/SiO₂ в межсегментном промежутке. Это объяснение не требует привлечения прямого переноса носителей заряда между сегментами, а проводимость межсегментного промежутка носит эффективный характер. В то же время перераспределение токов будет вызывать токовый шум, влияющий на чувствительность и разрешающую способность детектора по энергии.

ВАХ, представленные на рис. 5, позволяют оценить компонент межсегментного сопротивления R_L , связанный с омической поверхностной утечкой. Его вклад в проводимость между сегментами отчетливо наблюдается как наклон ВАХ по обе стороны от ступени: $R_L = dU_2/dI$ при $|U_2| > 1$ В, не зависящий от обедняющего напряжения. В данном случае термин „поверхность“ следует рассматривать как совокупность элементов, формирующих поверхность межсегментного промежутка и включающих собственно поверхность окисной пленки кремния, интерфейс Si/SiO₂ и слой аккумулированных электронов в кремнии, возникающий как результат присутствующего в SiO₂ встроенного положительного заряда. В компоненте R_L слой электронов контактирует с областью пространственного заряда, что может являться причиной дополнительных утечек. Величина эквивалентного сопротивления утечки R_L определенного по ВАХ, показанных на рис. 5, равна 100 Ом.

Эксперименты по установлению физической модели эффекта переключения тока в межсегментном промежутке в настоящее время ведутся в рамках работ по созданию трековых детектирующих систем для экспериментов по ядерной физике и физике высоких энергий.

5. Заключение

Выполненное исследование межсегментной изоляции в сегментированных приемниках излучений на основе высокоомного кремния показало, что его величина определяется комбинацией нескольких эффектов, включающих как процессы, связанные с приповерхностным слоем, так и со свойствами чувствительного объема структуры. Среди них определяющим являются распределение электрического поля в межсегментном промежутке, от которого зависит прямая инжекция дырок в промежутки, и обнаруженный эффект переключения небольшой части объемного тока между соседними сегментами. Поскольку эффект переключения происходит при межсегментном напряжении, близком к 0, т.е. при условии стандартной работы большинства приемников излучений, то именно он определяет взаимовлияние сегментов в сегментированных приемниках излучений.

Кроме того, этот новый механизм может быть дополнительным источником шума.

Работа выполнена при поддержке Федерального агентства по науке и инновациям — госконтракт № 02-516-11.6098, научной школы — грант президента РФ НШ-2951.2008.2, гранта INTAS-GSI 06-1000012-8844.

Список литературы

- [1] D. Roninson, P. Allport, L. Andricek, J. Bohm, C. Buttar, J.R. Carter, A. Chilingarov, A.G. Clark, D. Ferrère, J. Fuster, C. Garcia, C. Grigson, L. Johansen, G. Lutz, M.C. Morone, R. Richter, S. Stugu, N. Unno. Nucl. Instrum. Meth. A, **485**, 84 (2002).
- [2] A. Abdesselam, P.J. Adkin, P.P. Allport, J. Alonso, L. Andricek, F. Anghinolfi, A.A. Antonov, R.J. Apsimon, T. Atkinson, L.E. Batchelor, R.L. Bates, G. Beck, H. Becker, P. Bell, W. Bell, P. Beneš, J. Bernabeu, S. Bethke, J.P. Bizzell, J. Blocki. Nucl. Instrum. Meth. A, **575** (3), 353 (2002).
- [3] A. Dorokhov, C. Amsler, D. Bortoletto, V. Chiochia, L. Cremaldi, S. Cucciarelli, M. Konecki, K. Prokofiev, C. Regenfus, T. Rohe, D. Sanders, S. Son, T. Speer, M. Swartz. Nucl. Instrum. Meth. A, **530**, 71 (2004).
- [4] *FAIR Baseline Technical Report*. ISBN 3-9811298-0-6; EAN 978-3-9811298-0-9 (Sept. 2006) p. 18.
- [5] Z. Li, H. En'yo, Y. Goto, V. Radeka, R. Beuttenmuller, W. Chen, D. Elliott, Y.H. Guo, T. Kawabata, M. Togawa, N. Saito, V. Rykov, K. Tanida, J. Tojo. Nucl. Instrum. Meth. A, **535**, 404 (2002).
- [6] V. Eremin, J. Bohm, S. Roe, G. Ruggiero, P. Weilhammer. Nucl. Instrum. Meth. A, **500**, 121 (2003).

Редактор Л.В. Беляков

Intersegment isolation in silicon $p-n$ -junction position sensitive arrays

V.K. Eremin, E.M. Verbitskaya, I.N. Ilyashenko,
I.V. Eremin, N.N. Safonova, Yu.V. Tuboltsev,
N.N. Egorov*, S.A. Golubkov*, K.A. Konkov*

loffe Physicotechnical Institute
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

* Research Institute
of Material Science and Technology,
124460 Zelenograd, Russia

Abstract Intersegment isolation in $p-n$ -junction array based on high resistivity Si was investigated and the interaction of the neighboring segments of position sensitive sensors was defined. It has been demonstrated that current–voltage characteristics of intersegment gap in $p-n$ -junction arrays operated at the bias far beyond full depletion voltage, show an abrupt step of the current that is responsible for intersegment isolation resistance. This feature arises from redistribution of a small fraction of the bulk current between the neighboring segments which controls intersegment isolation while the contribution of the ohmic conductivity between the segments is insignificant.