

Распределение электрического поля в $p-n$ -переходах кремниевых детекторов с торцевой чувствительностью

© В.К. Еремин[†], А.С. Налетко, Е.М. Вербицкая, И.В. Еремин, Н.Н. Егоров*

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

* НИИ Материаловедения,
124460 Зеленоград, Россия

(Получена 29 февраля 2011 г. Принята к печати 4 марта 2011 г.)

Разработка кремниевых детекторов с торцевой чувствительностью (*edgeless*-детекторов) началась в 2004 г. в связи с подготовкой эксперимента TOTEM на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе. В рамках данного эксперимента необходимо регистрировать протоны, рассеянные под предельно малыми углами по отношению к протонному пучку БАК, что приводит к ограничению на максимальное расстояние между пучком и чувствительной областью детекторов. Для решения этой задачи был разработан новый тип кремниевых детекторов — детекторы с торцевой чувствительностью (*edgeless*-детекторы), имеющие структуру, контролирующую распределение тока вблизи края $p-n$ -перехода. В настоящей работе исследованы распределение потенциала и электрического поля в области торца кремниевых *edgeless*-детекторов, обсуждаются модели, объясняющие полученные результаты, и их соответствие вольт-амперным характеристикам кремниевых *edgeless*-детекторов, разработанных для эксперимента TOTEM.

1. Введение

Разработка кремниевых детекторов с торцевой чувствительностью (*edgeless*-детекторов) была начата в 2004 г. в связи с подготовкой эксперимента TOTEM (total elastic and diffractive cross section measurement) на Большом адронном коллайдере в ЦЕРНе. В рамках этого эксперимента планируется исследование полного сечения протон-протонного взаимодействия релятивистских протонов [1–3]. Для проведения таких измерений необходимо регистрировать частицы, рассеянные под предельно малыми углами по отношению к первичному протонному пучку [1]. Данное требование приводит к ограничению, накладываемому на максимальное расстояние между протонным пучком и чувствительной областью детекторов, критическая величина которого составляет десятки мкм.

Стандартные кремниевые детекторы ядерных излучений, изготавливаемые по планарной технологии, содержат специальные конструктивные элементы, которые ограничивают чувствительную область детектора, уменьшают напряженность электрического поля на периферии $p-n$ -перехода чувствительной области и предотвращают его электрический пробой. В общем случае эту задачу выполняет последовательность охранных колец, окружающих чувствительную область детектора (voltage terminating structure, VTS), которая занимает значительную площадь на периферии $p-n$ -перехода. В таких детекторах ширина нечувствительной к регистрируемому излучению периферийной области достигает 1000 мкм и более, что не удовлетворяет требованиям эксперимента TOTEM.

В связи с этим был предложен и успешно реализован новый принцип стабилизации характеристик детекторов

путем контроля распределения тока в области торца детектора и разработана структура для его реализации (current terminating structure, CTS) [4,5]. В детекторах с CTS удалось подавить влияние близко расположенного торца детектора на характеристики детектора и уменьшить ширину нечувствительной к регистрируемому излучению области до 50 мкм [4] (т.е. более чем в 10 раз) при сохранении основной характеристики чувствительной области детектора — малого темного тока.

В *edgeless*-детекторах торец, близко расположенный к чувствительной области и представляющий собой сильно поврежденную поверхность, является потенциальным поставщиком свободных носителей заряда, способных достичь чувствительной области и тем самым создать дополнительную компоненту темного тока. Транспорт носителей от торца к чувствительному объему определяется, помимо диффузии, также и распределением электрического поля в области торца, величина которого и направление вектора играют ключевую роль. Реализованные в программе работ по эксперименту TOTEM p^+-n^- -*edgeless*-детекторы с CTS (рис. 1) имеют чувствительную p^+ -область и два p^+ -кольца: внешнее (current terminating ring, CTR) и внутреннее (clean-up ring, CR). Торец в этой структуре проходит через область p^+-n^- -перехода CTR и омический n^+ -контакт. Внешнее кольцо, собирая носители заряда, генерируемые в сильно поврежденной области торца, создает электрическую цепь протекания тока вдоль торца и тем самым распределяет потенциал по торцу детектора. Внутреннее кольцо (CR) выполняет роль дополнительной защиты от влияния торца и тока утечки по поверхности.

Цель данной работы заключается в сравнении результатов исследования *edgeless*-детекторов с CTS с модельными представлениями о работе CTS. Будет показано,

[†] E-mail: vladimir.eremin@mail.ioffe.ru

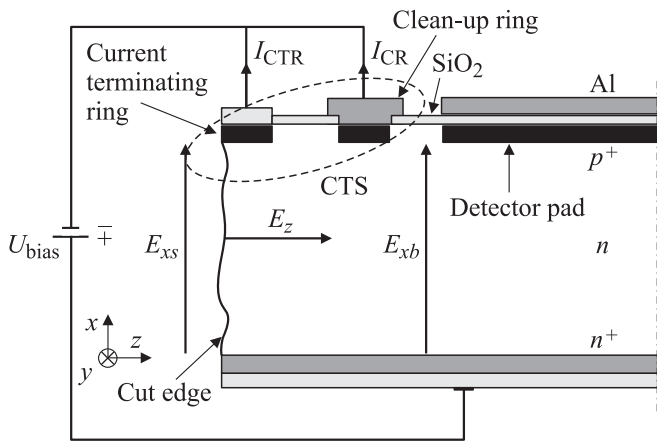


Рис. 1. Схематическое изображение поперечного сечения *edgeless*-детектора с CTS. Компоненты электрического поля: E_{xs} — поверхностная, E_{xb} — объемная, E_z — нормальная к торцу.

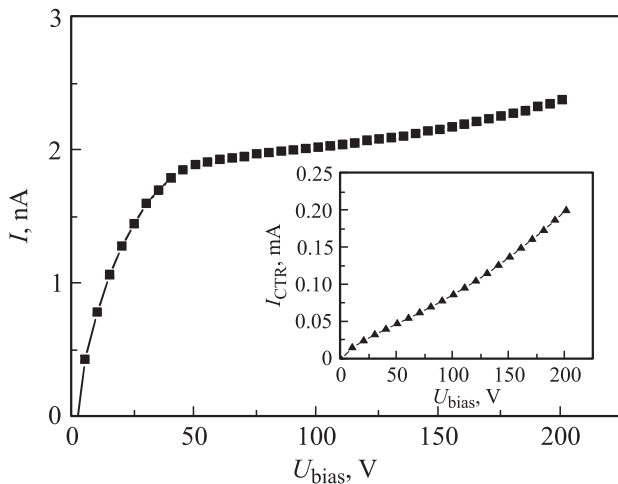


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика активной области детектора. На вставке — вольт-амперная характеристика CTR.

что экспериментальные данные по распределению потенциалов и электрических полей соответствуют модели аморфного торцевого слоя детектора. Модель дополнена рассмотрением тока внешнего кольца (CTS), который является источником инжекции носителей, генерированных разрушенным $p^+ - n$ -переходом CTR, и контролирует распределение поверхностного потенциала на торце *edgeless*-детектора.

2. Образцы и эксперимент

В работе исследовались тестовые образцы *edgeless*-детекторов со структурой $p-i-n$, изготовленные на подложках из кремния n -типа проводимости с удельным сопротивлением $5 \text{ кОм} \cdot \text{см}$ и толщиной 270 мкм . Полное обеднение i -области образцов достигалось при напряжении $U_{fd} = 50 \text{ В}$. В отличие от реальных стрипо-

вых детекторов, которые разработаны для эксперимента TOTEM, имеют специальную форму и площадь 10 см^2 , используемые образцы лишь повторяли структуру колец в области чувствительной границы и при меньшей площади чувствительной области ($6 \times 6 \text{ мм}^2$) не имели сегментации. На рис. 2 приведены вольт-амперные характеристики CTR и чувствительной области тестового детектора (напряжение смещения U_{bias} прикладывалось к n^+ -контакту). Вольт-амперная характеристика (ВАХ) CTR близка к омической при токе I_{CTR} в диапазоне сотен мкА, ток CR ниже на 3 порядка, а ток чувствительной области I составляет доли нА/см и показывает зависимость, характерную для стандартного $p-i-n$ -детектора. При напряжении U_{fd} происходит насыщение тока, выше которого ток возрастает незначительно.

Распределение потенциала по торцу детектора (V_{xs}) исследовалось с помощью проводящего микрозонда (conductive microprobe technique, СМРТ). Разрешение метода определялось диаметром площади касания острия зонда с исследуемой поверхностью и составляло $\sim 5 \text{ мкм}$. Погрешность измерения потенциала определялась малым током, отбираемым зондом, имевшим входное сопротивление 1000 ГОм . Для сканирования поверхности торца использовался прецизионный двухкоординатный столик с точностью позиционирования 0.1 мкм . Для регистрации тока зонда был использован пикоамперметр Keithley-487. Работа установки контролировалась компьютером и проводилась в автоматическом режиме.

Приведенные в статье экспериментальные результаты по распределению потенциалов соответствуют условию заземления n^+ -контакта детектора, и потенциалы имеют отрицательное значение.

3. Экспериментальные результаты

На рис. 3 представлены распределения потенциала V_{xs} по поверхности торца при различных напряжениях U_{bias} на детекторе. Измерения выполнены при перемещении зонда от n^+ -контакта ($x = 0$) к p^+ -контакту. Видно, что с увеличением U_{bias} координата начала роста потенциала смещается в направлении n^+ -контакта, что соответствует расширению области пространственного заряда (ОПЗ). Кривая при $U_{bias} = 60 \text{ В}$ показывает полное обеднение структуры, что согласуется с измеренным напряжением полного обеднения $U_{fd} = 50 \text{ В}$.

Характерно, что все кривые $V_{xs}(x)$ нелинейны и хорошо аппроксимируются квадратичным полиномом. Реконструкция распределения электрического поля вдоль оси x (E_{xs}) путем дифференцирования экспериментальных данных $V_{xs}(x)$ дает значительные флуктуации при $x \geq 0.02 \text{ см}$. Поэтому базовыми для определения E_{xs} были приняты аппроксимации распределения потенциала, из которых дифференцированием получались аппроксимации для $E_{xs}(x)$. Из рис. 3, *b*, как и из кривых $V_{xs}(x)$,

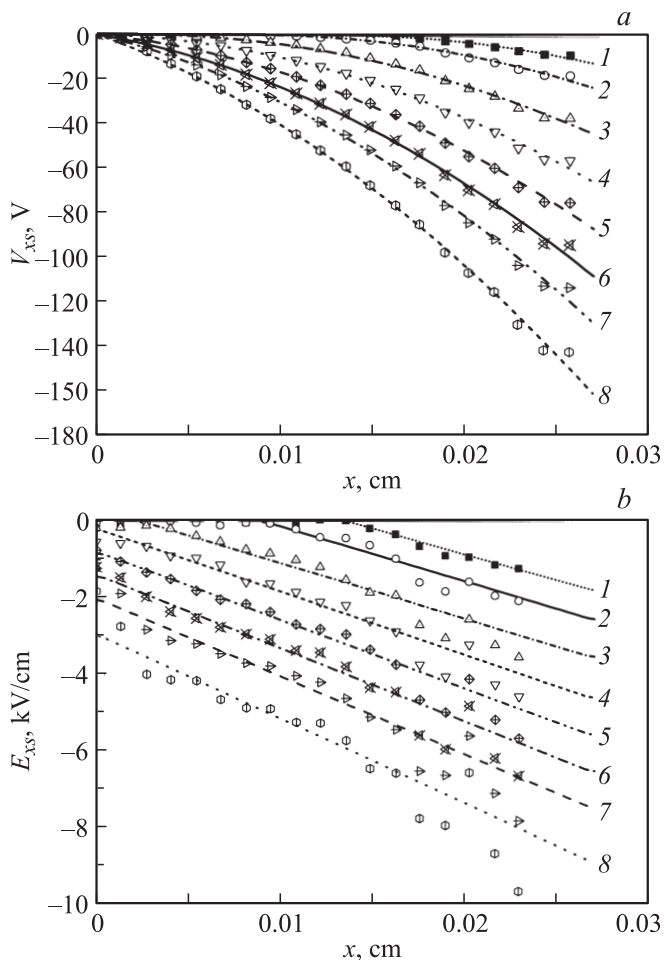


Рис. 3. Распределения потенциала V_{xs} (a) и электрического поля E_{xs} (b) по глубине чувствительного края детектора при различных напряжениях U_{bias} , В: 1 — 5, 2 — 10, 3 — 40, 4 — 60, 5 — 80, 6 — 100, 7 — 150, 8 — 200. Точки — экспериментальные значения, линии — аппроксимации.

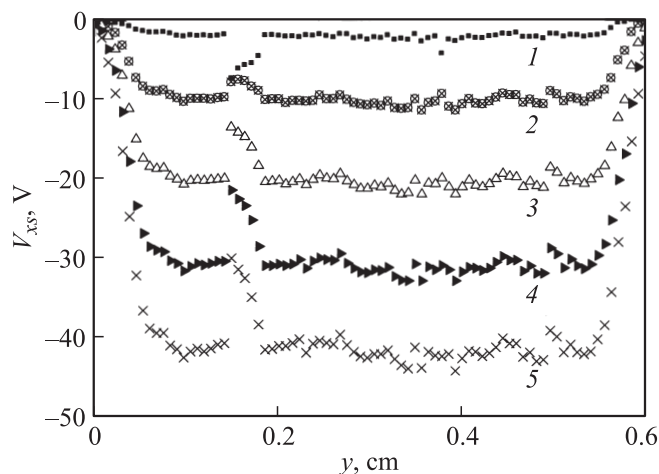


Рис. 4. Распределения потенциала вдоль чувствительного края детектора при $x = 0.013$ см (область середины торца между p^+ - и n^+ -контактами) при различных напряжениях, приложенных к структуре. U_{bias} , В: 1 — 20, 2 — 40, 3 — 60, 4 — 80, 5 — 100.

видно, что начиная с напряжения $U_{bias} = 60$ В напряженность электрического поля в точке $x = 0$ становится отличной от нуля и далее ее абсолютная величина возрастает с увеличением U_{bias} . В отличие от распределений напряженности электрического поля в объеме $p-i-n$ -структур, E_{bx} , для которых наклон $E_{bx}(x)$ не зависит от приложенного напряжения (плотность пространственного заряда постоянна), наклон полученных зависимостей $E_{xs}(x)$ несколько меняется с напряжением, что особенно заметно в области больших напряжений (кривые 4–8).

На рис. 4 представлены зависимости поверхностного потенциала от координаты y , т. е. при перемещении зонда по поверхности торца вдоль контактов детектора на расстоянии 0.013 см от n^+ -контакта (близко к середине торца). За исключением области вблизи поверхностной границы p^+-n -перехода, потенциал распределен равномерно в пределах той части торца, которая перекрыта СТР. Вне этого диапазона потенциал резко меняется на длине 0.05 см, спадая до нуля на периферии. Наблюдаемые флуктуации потенциала в пределах 10% от измеряемой величины превышают аппаратную погрешность и отражают истинную локальную величину потенциала. Максимально глубокий провал размером 0.07 см в точке при $y = 0.15$ см, по-видимому, связан с механическим дефектом на поверхности торца.

4. Модели распределения поверхностного потенциала и электрического поля на торце *edgeless*-детектора

В *edgeless*-детекторах торец, близко расположенный к чувствительной области и представляющий собой сильно поврежденную поверхность, является потенциальным поставщиком в чувствительную область детектора свободных носителей заряда, создающих дополнительную компоненту темного тока. Очевидно, что транспорт носителей от торца в область чувствительного объема определяется одновременно их диффузией и дрейфом в электрическом поле у торца детектора, а его влияние на темновой ток чувствительной области зависит от того, смогут ли генерированные на торце дырки достигнуть p^+ -контакта чувствительной области, с которого снимается полезный сигнал. При этом электроны, диффундирующие в объем, не вносят вклад в сигнал, поскольку они собираются на пассивный n^+ -контакт, соединенный с источником питания. Таким образом, ключевыми в физике работы *edgeless*-детекторов являются двумерное распределение электрического поля у торца и модель торца, которая объясняет протекание тока и формирование потенциала вдоль торца.

Электрическое поле в двумерной модели торцевой области описывается компонентами E_{xs} и E_z (рис. 1). Средняя величина компоненты E_z определяется локальной разностью потенциалов в направлении z между

поверхностью торца (V_{xs}) и объемом детектора (V_{xb}),

$$V_z = V_{xs} - V_{xb}, \quad (1)$$

и равна

$$E_z = \frac{V_z}{W_z}, \quad (2)$$

где W_z — характерное расстояние затухания компоненты E_z , сопоставимое с толщиной ОПЗ, которая в рабочем режиме полного обеднения детектора равна его толщине d [6,7]. На передней и задней сторонах детектора, т. е. в области p^+ - и n^+ -контактов, эти потенциалы одинаковы, в то время как при других значениях x они могут различаться.

Для анализа работы *edgeless*-детекторов были развиты две модели, описывающие процессы в области чувствительного торца: резистивная модель, разработанная на стадии создания прототипов *edgeless*-детекторов [6,7], и модель аморфного торца [7,8], стимулированная разработкой радиационно-стойких *edgeless*-детекторов. Последняя модель предполагает обмен носителями заряда между торцом и чувствительным объемом детектора и рассматривает физические свойства поверхностного слоя торца.

4.1. Модель резистивного торца

В модели резистивного торца постулируется, что поверхность торца сильно разрушена в процессе разрезки пластины на отдельные детекторные чипы и формально может рассматриваться как однородный резистивный слой, связывающий p^+ - и n^+ -контакты. Ток, протекающий между p^+ -контактом CTR и тыльным n^+ -контактом, создает линейное по координате x распределение потенциала по поверхности торца,

$$V_{xs} = ax, \quad (3)$$

и постоянное электрическое поле E_{xs} . В то же время потенциал в объеме пропорционален x^2 :

$$V_{xb} \propto \frac{qN_{\text{eff}}}{2\epsilon\epsilon_0} x^2, \quad (4)$$

где q — элементарный заряд, N_{eff} — эффективная концентрация объемного заряда в ОПЗ, ϵ и ϵ_0 — диэлектрические проницаемости кремния и вакуума соответственно. Разность потенциалов $V_{xs} - V_{xb}$ является параболической функцией, максимум которой увеличивается по абсолютной величине с увеличением обратного напряжения и затем остается неизменным в условиях полного обеднения детектора.

Согласно (3), (4), для детекторов на основе n -Si V_{xb} определяется положительным зарядом ионизованных донорных примесей N_{eff} . В то же время потенциал V_{xs} контролируется свойствами поверхности торца, разрушенной режущим инструментом, и нечувствителен к свойствам объема. При достаточно высоком значении N_{eff} потенциал V_{xb} при любом x будет менее

отрицательным, чем V_{xs} . Поэтому электрическое поле E_z будет препятствовать диффузионному переносу дырок от торца в чувствительный объем детектора. Напротив, диффузионный поток электронов в объем будет дополнен их дрейфом, однако электроны будут собираться на заземленном тыльном n^+ -контакте, не влияя на работу детектора.

Таким образом, модель резистивного слоя предполагает идеальность функционирования CTS *edgeless*-детектора, при котором дырки локализованы на поврежденной поверхности торца и не могут достичь p^+ - n -перехода чувствительной области, в то время как электроны, вытянутые полем в объем, не дают вклада в темновой ток чувствительной области.

Сопоставление основного предположения модели об омическом поведении торцевой поверхности с данными эксперимента (рис. 3) показывает их существенное несоответствие. В эксперименте наблюдается линейное распределение напряженности электрического поля с градиентом, зависящим от приложенного напряжения, в отличие от постоянного поля, следующего из резистивной модели.

4.2. Модель торца с высокой скоростью поверхностной генерации (аморфный торец)

Модель *edgeless*-детектора с высокой скоростью поверхностной генерации учитывает два процесса, происходящие на сильно нарушенной поверхности торца: протекание поверхностного тока между p^+ - и n^+ -контактами в сильно разрушенном слое торца и генерацию электронов и дырок на торце, создающую проводимость и являющуюся единственным источником протекающего по нему тока. В модели предполагается, что за счет более высокой подвижности электронов их диффузия в чувствительный объем детектора происходит более интенсивно по сравнению с дырками. Последующий дрейфовый перенос электронов в ОПЗ детектора к n^+ -контакту приводит к тому, что в поверхностном проводящем слое торца преимущественным током является ток дырок. Зависимости токов от координаты определяются уравнениями непрерывности:

$$\text{div}(j_e) = q(g_e - \eta_e),$$

$$\text{div}(j_h) = qg_h,$$

$$g_e = g_h = g, \quad (5)$$

где g_e и g_h — скорости генерации электронов и дырок в приповерхностном слое (размерность $\text{c}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$), j_e и j_h — плотности электронной и дырочной компоненты тока на поверхности соответственно, а параметр η_e определяет долю электронного тока, который уходит в объем детектора и не дает падения напряжения на поверхности торца. Как следует из выражений (5), обе компоненты

тока будут линейно возрастать: дырочная — от n^+ - к p^+ -стороне, а электронная — от p^+ - к n^+ -стороне:

$$j_e = q(g - \eta_e)(d - x),$$

$$j_h = qgx. \quad (6)$$

Выражения (6) позволяют получить распределение напряженности электрического поля и потенциала по поверхности чувствительного края детектора, используя параметр эффективного удельного сопротивления приповерхностного слоя ρ_s , постоянного по торцу:

$$E_{xs}(x) = q\rho_s[(g - \eta_e)d - \eta_e x], \quad (7)$$

$$V_{xs} = q\rho_s \left[(g - \eta_e)dx - \frac{\eta_e x^2}{2} \right]. \quad (8)$$

Согласно (7), модель аморфного слоя предсказывает линейный ход напряженности электрического поля на торце, что формально согласуется с экспериментом. Параметр η_e определяет наклон зависимости $E_{xs}(x)$ и в принципе может изменяться в зависимости от приложенного к детектору напряжения и соответственно среднего электрического поля в объеме. При этом повышение напряженности поля в объеме детектора должно приводить к более эффективной экстракции электронов и соответственно увеличению η_e и градиента поля вдоль торца.

На рис. 5,а сопоставлены расчетные профили потенциала в объеме детектора и аппроксимации измеренных распределений поверхностного потенциала. При напряжениях $U_{bias} \leq U_{fd}$ (кривые 1 и 2) поверхностный потенциал V_{xs} более отрицателен по сравнению с объемным V_{xb} , что стимулирует обеднение поверхности торца электронами. При более высоких напряжениях смещения, $U_{bias} > U_{fd}$, потенциал в каждой точке объема становится еще более отрицательным, и поле E_z меняет знак (рис. 5,б). При этом следует ожидать подавления ухода электронов от торца в объем и изменения характера распределения потенциала на торце. Однако, как показывает эксперимент, наклон зависимостей $E_{xs}(x)$ с ростом U_{bias} несколько возрастает, что указывает на прогрессивное увеличение η_e . Действительно, процесс оттока электронов от торца состоит в совокупности их диффузии в объем и последующем дрейфе к n^+ -контакту. Рост U_{bias} приводит к увеличению напряженности поля E_{xb} и соответственно стимулирует дрейф. В свою очередь это приводит к возрастанию числа электронов, экстрагированных от торца, что и увеличивает η_e . Напряженность электрического поля E_z невелика и составляет лишь сотни В/см, что не может ограничить отток электронов от поверхности.

Описанная тенденция в изменении E_z хорошо согласуется с ВАХ чувствительного объема детектора (рис. 2). Рост тока в диапазоне $U_{bias} \leq U_{fd}$ определяется объемной генерацией электронов и дырок, и его насыщение происходит при U_{fd} . При этом электрическое поле E_z препятствует диффузии дырок в чувствительную

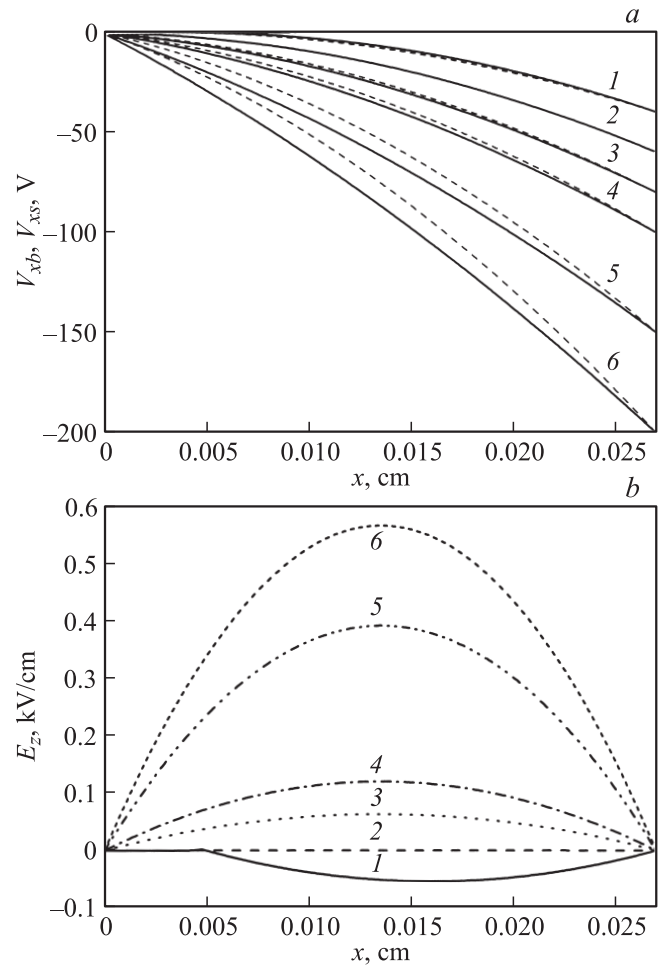


Рис. 5. Распределения потенциалов в объеме детектора (сплошные линии), на поверхности чувствительного края (штриховые) (а) и соответствующие им напряженности электрического поля E_z (б) при различных напряжениях U_{bias} , В: 1 — 40, 2 — 60, 3 — 80, 4 — 100, 5 — 150, 6 — 200.

область детектора, что аналогично результатам для модели резистивного слоя. Однако с возрастанием U_{bias} поле E_z сначала уменьшается, а затем, при напряжении выше 60 В ($> U_{fd}$), изменяет знак, что обуславливает дрейф дырок в чувствительный объем детектора и дополнительный рост темнового тока. Тем не менее, поскольку значения E_z невелики, рост темнового тока является достаточно малым и составляет менее 0.5 нА ($\sim 20\%$) в диапазоне напряжений до 25 В.

В целом генерационная модель качественно соответствует экспериментальным характеристикам *edgeless*-детектора и позволяет осуществить их параметризацию. Однако остается неясной природа омической зависимости тока внешнего кольца детектора (CTR) от напряжения, а также величины тока (см. вставку на рис. 2). Действительно, ток CTR связан с генерацией носителей в нарушенном слое и его зависимость от напряжения должна иметь тенденцию к насыщению (истощение генерации), как это наблюдается в $p-i-n$ -структурах,

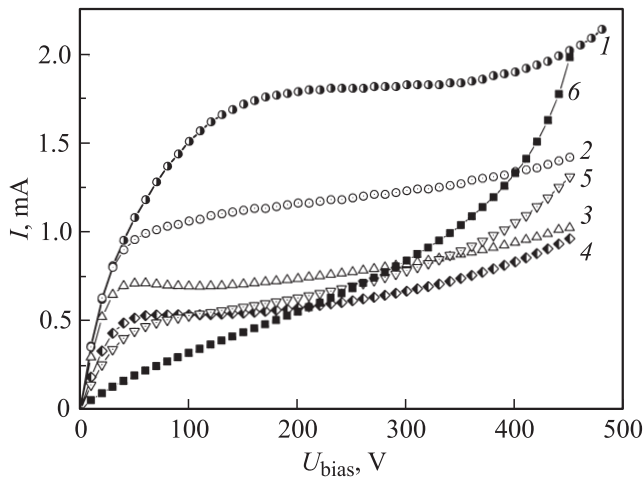


Рис. 6. Вольт-амперные характеристики тестового диода с царапиной на чувствительном p^+-n -переходе. Время после нанесения царапины: 3 (1), 8 (2), 23 (3), 78 (4), 128 мин (5), 24 ч (6).

когда при полном обеднении ток становится независимым от приложенного напряжения. Кроме того, оценки показывают, что существование на торце аморфного (разрушенного) слоя толщиной в несколько мкм допускает протекание тока в единицы мкА при $U_{bias} = 100$ В, тогда как экспериментальная величина равна ~ 100 мкА. Характерно, что ни в одной из описанных выше моделей не рассматривался слой разрушенного p^+-n -перехода СТР, расположенный в верхнем углу торца при координате d . Полная структура торца детектора представляет собой комбинацию сильно разрушенного p^+-n -перехода внешнего кольца СТС, поверхности торца и объема, прилегающего к ней. Среди указанных элементов наиболее предсказуемым поведением обладает объем, который представляет собой слой пространственного заряда с известным распределением электрического поля, в котором дрейфующие носители создают ток, но не меняют распределения электрического поля в ОПЗ. Поэтому очевидно, что ток, протекающий в ОПЗ, не влияет на распределение потенциала на торце.

Вторым элементом является разрушенный (верхний на рис. 1) угол, в котором соприкасаются торец и p^+-n -переход СТР. Для исследования свойства этого элемента детектора был изготовлен тестовый диод, на p^+ -контакте которого была нанесена царапина (scratch) глубиной, несколько превышающей толщину p^+ -слоя. Царапина моделирует угол торца с тем отличием, что в месте царапины торец отсутствует, а истекание тока из царапины происходит в ОПЗ чувствительного p^+-n -перехода с известным объемным электрическим полем. В этих условиях истекание носителей не влияет на распределение поля в области царапины, а ВАХ диода определяется процессами в разрушенном p^+-n -переходе.

На рис. 6 приведены ВАХ тестового диода с царапиной, измеренные в различное время после ее нанесения. Последовательность ВАХ имеет ряд характерных особенностей. Форма ВАХ изменяется во времени. Если первая по времени измерения характеристика (через 3 мин) имеет максимальный ток с насыщением при 150 В, то следующие ВАХ показывают последовательно снижающийся ток и резко выраженное его насыщение при сравнительно низких напряжениях (40–60 В). Вид зависимости тока с насыщением вполне характерен для процесса генерации тока дефектами при их ограниченном количестве. Ток насыщается при скорости оттока носителей, большей, чем скорость их генерации. Очевидно и то, что основным нестабильным во времени элементом царапины является разрушенная поверхность, которая, подвергаясь окислению, может менять свои генерационные свойства. Нарастающий естественный окисел кремния пассивирует дефекты разрушенного p^+-n -перехода и уменьшает скорость поверхностной генерации. Вследствие этого снижаются ток насыщения и соответствующее ему напряжение. Процесс пассивации дефектов является длительным во времени, и по прошествии одних суток ВАХ принимает омический вид с током, достигающим 1 мА при напряжении ~ 350 В. Этот ток является генерационным током, истекающим в ОПЗ под действием электрического поля, окружающего царапину. Поскольку царапина находится у p^+ -контакта, то его напряженность поля представляет собой максимальную величину объемного поля $E_{b\ max}$, которая зависит от U_{bias} , как

$$E_{b\ max} \propto \sqrt{U_{bias}}, \quad U_{bias} < U_{fd}, \quad (9a)$$

$$E_{b\ max} = (U_{bias} + U_{fd})/d, \quad U_{bias} \geq U_{fd}. \quad (9б)$$

С учетом того что напряжение полного обеднения тестового образца составляет лишь 20 В, в широком диапазоне $U_{bias} \gg U_{fd}$ $E_{b\ max}$ меняется практически линейно с напряжением. Важно отметить, что, поскольку ток из разрушенного p^+-n -перехода истекает непосредственно в ОПЗ, его омический характер определяется структурой дефектов, образовавшихся после нанесения царапины, и не связан с процессом дрейфа носителей в поле p^+-n -перехода. В частности, омическая ВАХ может быть результатом возникновения областей, в которых потенциальный барьер для транспорта носителей отсутствует.

Обнаруженная особенность истекания тока из механически разрушенного p^+-n -перехода тестового образца позволяет дополнить модель работы *edgeless*-детекторов и объяснить всю совокупность их основных стационарных характеристик. Для этого в модель торцевой поверхности следует ввести слой разрушенного p^+-n -перехода СТР, расположенный в углу торца при координате d , который может быть рассмотрен как аналог p^+-n -перехода с царапиной. Тогда его наличие объясняет омическую ВАХ СТР при величинах токов, сопоставимых с экспериментальными. Действительно, ток детектора с

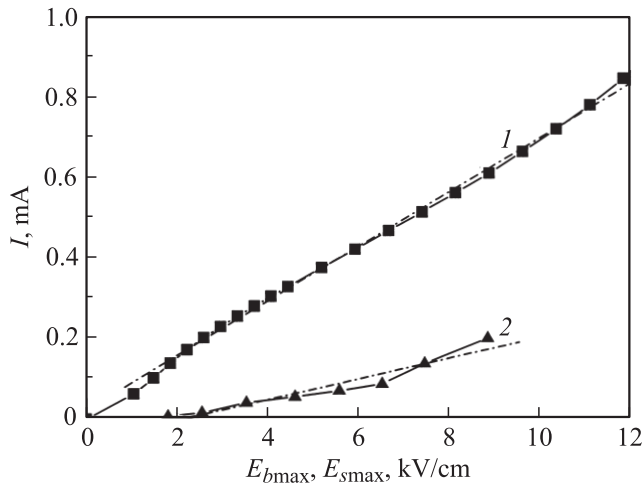


Рис. 7. Зависимости тока тестового диода с царапиной от максимальной напряженности электрического поля в объеме $E_{b\max}$ (1) и тока CTR от максимальной напряженности электрического поля на торце $E_{s\max}$ (2).

царапиной достигает сотен мкА при $U_{\text{bias}} > U_{fd}$. Вольт-амперная характеристика CTR так же близка к линейной, и ток возрастает до 200 мкА при $U_{\text{bias}} = 200$ В. Различие линейных плотностей токов царапины и угла торца вполне объяснимо, поскольку степень разрушения $p^+ - n$ -перехода при высокоскоростной резке пластины алмазным диском (торец *edgeless*-детектора) и его грубом разрушении скрайбером существенно различаются.

Таким образом, выполненное исследование $p^+ - n$ -перехода с царапиной позволяет детализировать модель распределения потенциала вдоль торца *edgeless*-детектора и постулировать, что ток торца и его ВАХ в значительной мере определяются свойствами разрушенной области угла, где смыкаются торец и $p^+ - n$ -переход CTR. Именно из этой области истекает ток CTR, большая часть которого затем переносится электронами к n^+ -контакту путем их дрейфа в ОПЗ, прилегающей к торцу, и обеспечивает линейность ВАХ CTR. Другая, меньшая часть этого тока может течь непосредственно по торцу, влияя на распределение поверхностного потенциала.

Согласно сделанному выводу, в модели баланса токов, текущих по торцу, следует добавить инжекционную компоненту тока электронов j_{inj} . Тогда уравнения (6) принимают вид

$$\begin{aligned} j_e &= q(g - \eta_e)(d - x) + j_{\text{inj}}, \\ j_h &= qgx. \end{aligned} \quad (10)$$

Соответственно распределение электрического поля вдоль торца остается линейным:

$$E_{xs}(x) = q\rho_s[(g - \eta_e)d - \eta_e x] + \rho_s j_{\text{inj}}. \quad (11)$$

При этом член $\rho_s j_{\text{inj}}$ будет дополнительно аддитивно увеличивать (смещать) линейно зависящее от координаты

поле E_{xs} по мере роста приложенного напряжения, как это наблюдается на рис. 3, б. На рис. 7 сопоставлены зависимости тока диода с царапиной от напряженности электрического поля $E_{b\max}$ и тока CTR от максимальной напряженности поля E_{xs} в точке $x = d$, т. е. у p^+ -контакта, $E_{d\max}$, и их линейные аппроксимации. Зависимость $I_{\text{CTR}}(E_{s\max})$ достаточно близка к линейной функции, что соответствует модели омической инжекции тока электронов из угловой области торца.

5. Заключение

В статье проведено сопоставление результатов измерения распределений потенциала и напряженности электрического поля на поверхности края детектора с торцевой чувствительностью с модельными представлениями о его функционировании. Выполненный анализ подтвердил справедливость модели аморфного слоя на торце детектора. Важным дополнительным аспектом, расширяющим модель функционирования *edgeless*-детектора, является определение характера истечения тока из области разрушенного $p^+ - n$ -перехода торца, причем показано, что именно этот процесс ответствен за характерную для *edgeless*-детекторов омическую ВАХ внешнего кольца с большой величиной тока (сотни мкА).

Интерес при дальнейшем изучении данной проблематики представляет исследование изменения рассмотренных параметров при модификации поверхности чувствительного торца детектора, приводящей к уменьшению концентрации дефектов на ней.

Работа выполнена при поддержке программы президиума РАН „Экспериментальные и теоретические исследования фундаментальных взаимодействий, связанные с работами на ускорительном комплексе ЦЕРН“ и в рамках научной школы „Грант президента РФ“ № НШ-3306.2010.2 и научной программы коллаборации ЦЕРН-RD50.

Список литературы

- [1] TOTEM Technical Design Report. CERN-LHCC-2004-002, TOTEM-TDR-001 (2004).
- [2] TOTEM Collaboration. JINST, **3**, S08007 (2008).
- [3] G. Antchev et al. Nucl. Instrum. Meth. A, **617**, 62 (2010).
- [4] G. Ruggiero, E. Alagoz, V. Avati, V. Basetti, V. Berardi, V. Bergholm. IEEE Trans. Nucl. Sci., **NS-52**, 1899 (2005).
- [5] E. Noschis et al. Nucl. Instrum. Meth. A, **563**, 41 (2006).
- [6] E. Verbitskaya et al. Nucl. Instrum. Meth. A, **604**, 246 (2009).
- [7] E. Verbitskaya, V. Eremin, G. Ruggiero. Nucl. Instrum. Meth. A, **612**, 501 (2010).
- [8] E. Noschis, V. Eremin, G. Ruggiero. Nucl. Instrum. Meth. A, **574**, 420 (2007).

Редактор Л.В. Шаронова

Electric field distribution in $p-n$ junctions of silicon edgeless detectors

*V.K. Eremin, A.S. Naletko, E.M. Verbitskaya,
I.V. Eremin, N.N. Egorov**

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

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

Abstract Research and development work on Si edgeless detectors was started in 2004 that was motivated by the background of the TOTEM experiment at the Large Hadron Collider in CERN. The objective of this experiment in registration of low angle scattering of protons in close-to-beam interactions. This requirement restricts a maximum distance between the proton beam and the detector sensitive region. To solve this problem, innovative Si detectors — edgeless detectors with current termination structure — were developed which controls the current distribution near the $p-n$ junction edge. The goal of this work is investigation of the potential and electric field distributions at the cut edge, and development of the physical models which explain the obtained results and their correlation to the current-voltage characteristics of edgeless detectors which are elaborated for the TOTEM experiment.