

# Кремниевые детекторы с вольт-амперной характеристикой „идеального“ диода в приборостроении

© В.Л. Суханов, П.Н. Аруев, М.В. Дроздова, Н.В. Забродская, В.В. Забродский<sup>†</sup>, М.С. Лазеева, В.В. Филимонов, Е.В. Шерстнев

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

(Получена 17 июля 2012 г. Принята к печати 20 июля 2012 г.)

Предельно малый уровень собственных шумов кремниевых детекторов с вольт-амперной характеристикой „идеального“ диода позволил создать системы детектирования токовых сигналов на уровне до  $10^{-16}$  А, одновременно имеющие динамический диапазон измерения порядка  $10^{11} - 10^{12}$ .

## 1. Введение

Для современного приборостроения в таких областях техники, как спектрофотометрия, пирометрия, вакуумметрия и т.п., постоянно актуальна задача создания систем детектирования, обладающих одновременно предельно высокой чувствительностью и предельно широким динамическим диапазоном измерения.

### 1.1. Технология „идеального“ диода

Кремниевые  $p-n$ -переходы с вольт-амперной характеристикой (ВАХ) „идеального“ диода, описываемой уравнением Шокли [1]

$$I = I_s(e^{qU/kT} - 1), \quad \text{где } I_s = qD_p p_n / L_p + qD_n n_p / L_n,$$

впервые были получены на рубеже 70–80-х годов прошлого века [2], и, таким образом, в этот период времени нами был достигнут теоретический предел уменьшения темнового тока кремниевого  $p-n$ -перехода до единственной — диффузионной составляющей. В середине 80-х годов возможность получения кремниевых  $p-n$ -переходов с ВАХ „идеального“ диода была подтверждена авторами работы [3].

В начале 70-х годов при поиске технологических методов формирования кремниевых планарных структур с  $p-n$ -переходами, обладающих наилучшими электрофизическими характеристиками, были использованы методы газозащитного осаждения. В результате выполненных исследований были определены условия получения кремниевых планарных структур с наилучшими электрофизическими характеристиками [4]. Набор разработанных при этом технологических операций образовал технологию получения кремниевых детекторов с ВАХ „идеального“ диода [2] для различных применений.

### 1.2. Методы газозащитного осаждения

Локальное осаждение эпитаксиальных слоев легированного кремния в окна диэлектрической маски позволило создать широкий ряд кремниевых фотодиодов,

у которых легированная область  $p-n$ -перехода имеет гребенчатую конфигурацию [5] и занимает незначительную часть фотоприемной площади кремниевой пластины, большая часть которой покрыта только окислом кремния. На рис. 1 представлена структура фотодиода с гребенчатой структурой.

Эти фотодиоды оказались наиболее востребованными разработчиками спектрофотометрических приборов, так как они обладают совокупностью положительных характеристик, а именно:

- высокой спектральной чувствительностью в УФ, видимой и ближней ИК областях спектра от 300 до 1100 нм;
- пониженной удельной емкостью приходящейся на единицу фотоприемной поверхности, менее 1000 пФ/см<sup>2</sup>;
- малой плотностью темнового тока, приходящейся на единицу фотоприемной поверхности, порядка  $10^{-12}$  А/см<sup>2</sup>.

Локальная диффузия из газовой фазы позволила создать ряд детекторов, обладающих сверхтонкой легированной  $p^+$ -областью  $p-n$ -перехода толщиной 30 нм [6] для работы в области рентгеновского, гамма и жесткого УФ излучения, а также детекторы отраженных электронов и детекторы тяжелых ядерных частиц с рекордными параметрами [7]. Эти детекторы демонстрируют повышенную радиационную стойкость в области вакуумного ультрафиолета и мягкого рентгена [8,9]. На рис. 2 представлена структура фотодиода со сверхтонкой легированной  $p^+$ -областью.

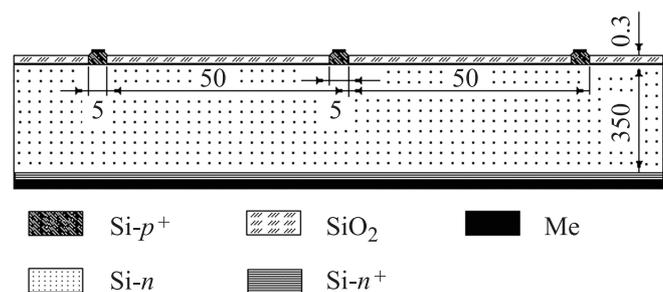


Рис. 1. Фотодиод с гребенчатой структурой.

<sup>†</sup> E-mail: sildet@mail.ioffe.ru

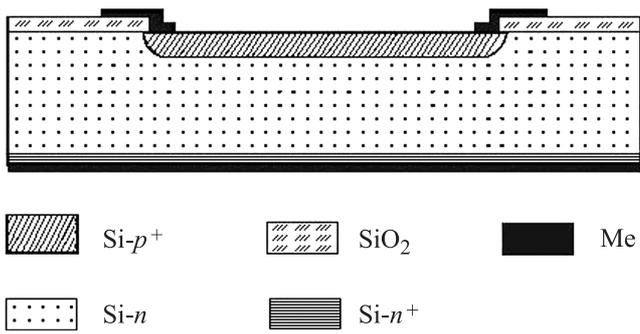


Рис. 2. Фотодиод со сверхтонкой легированной  $p^+$ -областью.

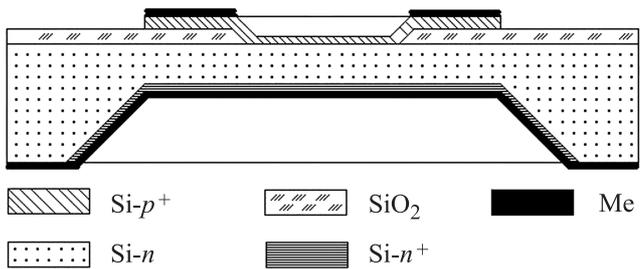


Рис. 3. Фотодиод с  $p^+$ -областью из поликристаллического кремния.

Осаждение из газовой фазы легированного поликристаллического кремния используется для создания детекторов [10,11] высокого быстродействия с  $t_{0.1-0.9}$  менее одной наносекунды, чему способствуют малое время жизни носителей в поликристаллическом кремнии и малое сопротивление растекания сильно легированного слоя поликристаллического кремния. На рис. 3 представлена структура фотодиода с легированной  $p^+$ -областью из поликристаллического кремния.

Наличие расширенного за пределы  $p-n$ -перехода поликристаллического электрода позволило создать высоковольтные планарные детекторы с малым током утечки [10].

## 2. Результаты и обсуждение

К настоящему времени кремниевые детекторы с ВАХ „идеального“ диода, созданные на основе вышеописанных методов, работают в десятках тысяч оптических приборов, производимых в России и в Белоруссии, а также в различных экспериментальных установках [12,13].

Разработка и внедрение в технику приборостроения широкого ряда кремниевых детекторов с предельно малыми темновыми токами инициировали создание систем детектирования с измерителями тока, по своим характеристикам соответствующих этим детекторам. Наименьший уровень шумов достигается в измерителях с конденсаторным измерительным элементом, в котором отсутствуют тепловые шумы. В таких измерителях

принципиально неустранимыми остаются только дробовые шумы всех составляющих тока, поступающих на сигнальный вход.

Среднеквадратичное значение дробового шума описывается выражением

$$\bar{i}^2 = 2qI\Delta f,$$

где  $\bar{i}^2$  — среднеквадратичное значение тока дробовых шумов,  $q$  — заряд электрона,  $I$  — суммарное значение составляющих тока на входе преобразователя,  $\Delta f$  — полоса частот, необходимая для обеспечения требуемой скорости измерения.

Разработана система детектирования токовых сигналов с рабочим динамическим диапазоном измерения тока порядка от  $10^{10}$  до  $10^{12}$ , зависящим от природы источника измеряемого тока, способная измерять токи до  $10^{-16}$  А. При этом обеспечивается высокая точность измерения за счет того, что в широкой средней части динамического диапазона измерений отношение сигнал/шум превышает величину  $10^6$ . Создание этой системы стало возможным благодаря применению кремниевых детекторов с предельно малыми токами утечки. Эти детекторы используются в схеме преобразования токового сигнала в интервал времени в качестве ключевых и защитных элементов входной сигнальной цепи измерителя. Основу такой системы составляет гибридно-интегральный микросхемный электрометрический преобразователь тока (МЭПТ), выполненный на операционном усилителе по схеме интегратора, приведенной на рис. 4.

В разработанной системе детектирования при измерении и преобразовании в цифровой код токов датчиков используется промежуточное преобразование токового сигнала  $I$  в интервал времени  $T$

$$T = CU/I.$$

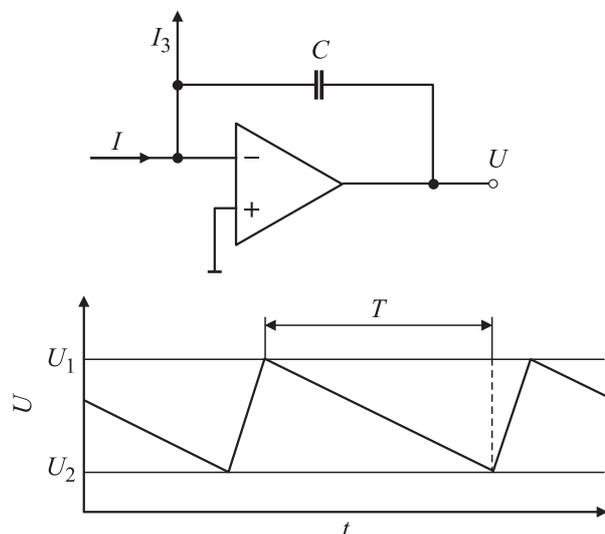


Рис. 4. Схема интегратора.



Рис. 5. Фотография двух электрометров на основе МЭПТ.

Это преобразование осуществляется в МЭПТ, принцип действия которого поясняет рис. 4.

Конденсатор  $C$ , являющийся измерительным элементом схемы, периодически разряжается входным сигнальным током  $I$  от начального уровня напряжения  $U_1$  до конечного уровня напряжения  $U_2$ , по достижении которого происходит перезарядка конденсатора  $C$  зарядным током  $I_3$  до начального уровня  $U_1$  и процесс интегрирования входного тока повторяется. Зарядный ток  $I_3$  и входной сигнальный ток  $I$  разнополярны. Интервал времени  $T$ , соответствующий времени интегрирования входного тока от уровня  $U_1$  до уровня  $U_2$ , измеряется подключенным к выходу МЭПТ микропроцессорным блоком, содержащим высокоточное цифровое измерительное устройство. По измеренному интервалу времени  $T$  и по известному напряжению  $U = U_1 - U_2$  определяется величина интеграла входного тока:

$$I = CU/T = K/T,$$

где  $K = CU$  — постоянная величина для данного прибора.

МЭПТ изготавливаются в виде гибридно-интегральной тонкопленочной микросхемы, которая размещается в четырехвыводном металlostеклянном корпусе диаметром 20 мм и высотой 5 мм. На рис. 5 приведена фотография двух амперометрических электрометров на основе МЭПТ.

Для удовлетворения требований к МЭПТ в широкой области их использования в современной измерительной аппаратуре разработано семейство МЭПТ, которые различаются:

- по природе детектируемого сигнала — амперометрический детектор (АМД), спектрофотометрический детектор (СФД), рентгеновский детектор (РД) для электрического тока, оптического и рентгеновского излучения соответственно;
- по уровню измеряемого сигнала: большой (до  $10^{-2}$  А) или малый (от  $10^{-16}$  А) и менее;
- по полярности тока датчика (положительная или отрицательная);

- по наличию или отсутствию поляризации входного сигнального электрода;
- по скорости измерения (от 100 измерений в секунду до одного измерения за несколько секунд);
- по наличию или отсутствию синхронизации измерительного цикла со шкалой времени прибора;
- по набору доступных для использования в приборе источников питания: однополярный или двухполярный;
- по конструктивному исполнению, которое может быть согласовано с конструкцией конкретного измерительного прибора, при этом приоритетным является использование стандартных металlostеклянных корпусов.

МЭПТ обладают следующими пользовательскими свойствами:

- дают возможность измерения токов на уровне от  $10^{-16}$ – $10^{-17}$  А;
- измерение в динамическом диапазоне сигнала до  $10^{12}$  реализуется на одном и единственном измерительном элементе;
- в широкой средней части динамического диапазона измерений отношение сигнал/шум превышает значение  $10^6$ ;
- работают автономно и не требуют внешнего управления;
- устойчиво работают с датчиками, обладающими повышенной собственной емкостью порядка 10 нФ;
- обладают высокой помехозащищенностью по входному сигналу при размещении детекторов в металlostеклянном корпусе;
- высокая помехозащищенность по выходному сигналу позволяет размещать МЭПТ на расстоянии в десятки метров от контроллера;
- не требуют установки никаких дополнительных элементов электрической схемы вблизи места размещения МЭПТ;
- могут устанавливаться и работать в объеме сверхвысокого вакуума без ущерба для работы всего прибора в целом.

### 3. Применение МЭПТ

Уникальные характеристики МЭПТ способствуют их успешному применению в современном приборостроении. Одно из первых применений состоялось в приборе высокоэффективного капиллярного электрофореза „Нанофор 02“ [14].

Спектрофотометрические МЭПТ использованы при построении государственного эталона РФ оптической плотности во ВНИИОФИ г. Москва.

МЭПТ использован в разработанном в ФТИ универсальном оптоволоконном пирометре для установок молекулярно-лучевой эпитаксии. Высокие технические характеристики пирометра достигнуты благодаря МЭПТ [15]. Пирометрический фотодетектор FI-1 представляет собой микросборку „идеального“ кремниевоего фотодиода со схемой обработки сигнала на основе МЭПТ. Низкий уровень собственных шумов

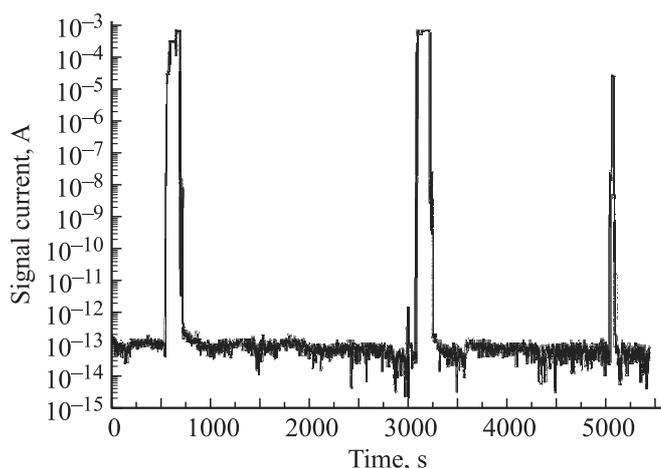


Рис. 6. Запись значения тока системой регистрации на основе МЭПТ с фотодиодом.

( $2 \cdot 10^{-15}$  А/ $\sqrt{\text{Гц}}$ ), широкий динамический диапазон измеряемого тока (до  $10^{11}$ ) делают FI-1 привлекательным для создания прецизионных пирометрических сенсоров. Пирометрический фотодетектор FI-1 положен в основу высокочувствительного квазимонохроматического МПЭ-пирометра с рабочим диапазоном 400–1500°C, высоким температурным разрешением ( $\sim 1^\circ\text{C}$ ) и относительной инструментальной погрешностью менее 0.2%. Пирометрический сенсор FI-1 по своим параметрам приближается к предельным расчетным характеристикам, достижимым с помощью кремниевых фотодиодов.

Примером использования МЭПТ в области рентгена является замена детектора на базе ФЭУ-085 и сцинтиллятора NaI(Tl) (типа БДС-25-04) на фотодиод ФДУК-100УВ (в англоязычной литературе закрепилась аббревиатура SPD-100UV [9]) и МЭПТ. Система регистрации, состоящая из фотодиода и МЭПТ, позволяет регистрировать поток рентгеновских квантов (с энергией 5кэВ) порядка  $10^6 \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ , с точностью не хуже 1% и температурным коэффициентом 0.08% на  $1^\circ\text{C}$ . Запись текущего значения тока в подобной системе показана на рис. 6 (время регистрации составляло 1 с).

В вакуумметре VM-11МБ для измерения сверхвысокого вакуума от  $10^{-1}$  до  $10^{-11}$  Па один МЭПТ обеспечивает измерение выходных токов промышленного манометрического преобразователя ПММ-46 от  $2 \cdot 10^{-3}$  до  $2 \cdot 10^{-14}$  А.

Также один амперметрический МЭПТ используется для измерения давлений от  $10^5$  до  $10^{-6}$  Па в комбинированном ионизационно-тепловом вакуумметре.

#### 4. Заключение

Кремниевые детекторы с ВАХ „идеального“ диода позволили разработать широкий ряд прецизионных приборов, обладающих высокой чувствительностью. С их помощью решены аналитические задачи в биологии, экологии, медицине и научном приборостроении.

#### Список литературы

- [1] W. Shockley. *Electron and Holes in Semiconductors* (Toronto–N. Y.–London, 1950).
- [2] Е.И. Иванов, Л.Б. Лопатина, В.Л. Суханов. Письма ЖТФ, **6** (14), 874 (1980).
- [3] P. Cappelletti, G.F. Cerofolini, M.L. Poligano. *J. Appl. Phys.*, **57** (2), 646 (1985).
- [4] Е.И. Иванов, Л.Б. Лопатина, В.Л. Суханов, В.В. Тучкевич, Н.М. Шмидт. ФТП, **16** (2), 207 (1982).
- [5] Е.И. Иванов, Л.Б. Лопатина, В.Л. Суханов, В.В. Тучкевич, Н.М. Шмидт. ФТП, **15** (7), 1343 (1981).
- [6] Ю.А. Гольдберг, В.В. Забродский, О.И. Оболенский, Т.В. Петелина, В.Л. Суханов. ФТП, **33** (3), 344 (1999).
- [7] Е.М. Вербицкая, В.К. Еремин, А.М. Маляренко. Письма ЖТФ, **12** (20), (1986).
- [8] В.В. Забродский, В.П. Белик, П.Н. Аруев. ЖТФ, **38** (17), 69 (2012).
- [9] P.N. Aruev. *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.*, **603**, 58 (2009).
- [10] Л.Б. Лопатина, В.Л. Суханов, В.В. Тучкевич, Н.М. Шмидт, Б.С. Явич. Письма ЖТФ, **16** (1), 11 (1979).
- [11] А.Б. Грудинин, Е.И. Иванов, В.Л. Суханов, В.В. Тучкевич, Н.М. Шмидт. ФТП, **15** (5), 920 (1981).
- [12] A. Alekseyev. *38th EPS Conference on Plasma Phys.* (Strasbourg, France, 2011) P1.047.
- [13] A.A. Bogomaz, A.V. Budin, V.V. Zabrodskii. *Instruments and Experimental Techn.*, **51** (5), 744 (2008).
- [14] Патент РФ № 2189038, 24.05.2000.
- [15] G.Yu. Sotnikova, G.A. Gavrilov, V.L. Sukhanov, D.F. Chernykh, S.E. Aleksandrov, A.A. Kapralov, A.N. Alekseev, A.O. Shkurko. *Instruments and Experimental Techn.*, **50** (4), 572 (2007).

Редактор Л.В. Беляков

#### Silicon detectors with the „ideal“ diode current-voltage characteristic in instrumentation

V.L. Sukhanov, P.N. Aruev, M.V. Drozdova, N.V. Zabrodskaya, V.V. Zabrodskiy, M.S. Lazeeva, V.V. Filimonov, E.V. Sherstnev

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