

УДК 621.382

## НЕИДЕАЛЬНЫЕ ВОЛЬТФАРАДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ БОЛЬШИМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

М. М. Салохина

*Показано, что у полупроводниковых детекторов ядерных излучений на основе поверхностного барьера или p-n перехода неидеальность вольтфарадных характеристик связана, главным образом, с большим последовательным сопротивлением.*

Линейная зависимость обратного квадрата емкости  $C^{-2}$  от напряжения  $U$  в диодах широко применяется для определения параметров прибора и исходного материала. Однако в диодах с большим последовательным сопротивлением (ПС) наблюдаются нарушения этой линейной зависимости. В работе [1] предложена теория, объясняющая неидеальное поведение вольтфарадной характеристики (ВФХ) влиянием ПС и частоты измерения. Теория дает аналитическое описание особенностей ВФХ. В работе [2] получено количественное согласие между положениями теории и экспериментальными данными на примере поверхностно-барьерных структур из арсенида галлия с концентрацией примесей  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  и остаточным сопротивлением  $10^{-2} \text{ Ом}$  при подключении добавочных сопротивлений 5 и 100 Ом.

Настоящая работа посвящена анализу особенностей неидеальных ВФХ поверхностно-барьерных кремниевых и кремний-литиевых детекторов ядерных излучений. Хотя абсолютные величины концентрации примесей и ПС в детекторах превышают на 4–5 порядков аналогичные величины в [2], наблюдаемые закономерности схожи. О подобных неидеальных ВФХ детекторов сообщалось ранее [3–5], однако природа этих аномалий не была понята до конца.

*Основные положения теории неидеального поведения ВФХ диодов с большим ПС [1]. Эквивалентная схема поверхностно-барьерных структур может быть представлена*

в виде параллельно соединенных емкости  $C$  и сопротивления обедненного слоя полупроводника  $R$ , а также последовательно подключенного сопротивления необедненной части полупроводника  $r_b$  и сопротивления контактов  $r_k$ . Тогда общая величина ПС  $r = r_b + r_k$ . Обычно при измерении мостовым методом эта эквивалентная схема преобразуется в схему с параллельно включенными  $C_{эфф}$  и  $R_{эфф}$ . Из теории [1] следует, что  $C_{эфф}$  равна истинной емкости  $C$  при более сильных неравенствах, чем общепринятые.

Линейная зависимость  $C^{-2}(U)$  наблюдается лишь при низких частотах, удовлетворяющих условиям  $\Omega = \omega r C_1 \ll 1$  ( $C_1$  – емкость перехода при напряжении, равном  $kT/q$ ) и  $R \gg R_m$ , где  $R_m$  – некоторое критическое сопротивление, зависящее от  $r$  и превышающее его на один – два порядка. При несоблюдении условия  $R \gg R_m$  ВФХ трансформируется. При  $R \approx R_m$  на кривой  $C_{эфф}^{-2}(U)$  появляется минимум при положительном напряжении, но при отрицательном напряжении линейная зависимость сохраняется. Режим называется низкочастотным (НЧ), если выполняется условие  $\Omega \ll 1$  и  $R \equiv R_m$ .

При высоких частотах и больших ПС параметр  $\Omega \gg 1$ , а емкость перестает зависеть от напряжения. Этот режим называют высокочастотным (ВЧ) режимом. Промежуточный режим между НЧ и ВЧ режимами, при котором выполняются условия  $R \gg R_m$  и  $\Omega \approx 1$ , назван критическим. В этом случае кривая  $C_{эфф}^{-2}(U)$  параллельно сдвигается вверх с увеличением емкостного напряжения отсечки. Этот режим, так же как и НЧ режим, может быть использован для определения концентрации ионизованных доноров. Видно, что эти режимы могут быть получены также при измерении на одной частоте, но при росте ПС в диодах (например, с уменьшением их площади контакта).

*Особенности неидеального поведения ВФХ полупроводниковых детекторов ядерных излучений.* Измерения ВФХ проведены на поверхностно-барьерных кремниевых и кремний-литиевых детекторах. Поверхностно-барьерные структуры с различными ПС были изготовлены из кремния  $n$ - и  $p$ -типа и кремния, компенсированного литием методом дрейфа ионов лития. Для кремния  $n$ -типа в качестве выпрямляющего контакта использовался напыленный слой золота, а напыленный слой алюминия – в качестве тылового контакта. Для кремния  $p$ -типа применялось последовательное напыление германия и алюминия (выпрямляющий контакт) и напыление золота (тыловой контакт). Измерение емкости проводилось на частоте 600 кГц.

Чтобы выяснить влияние ПС на неидеальное поведение ВФХ детекторов, сравним два семейства ВФХ, полученных разными способами (рис. 1 и рис. 2). Семейство характеристик на рис. 1 получено путем измерения ВФХ на одном приборе при последовательном подключении добавочных резисторов. Семейство характеристик на рис. 2

представляет набор ВФХ детекторов разных типов с разными ПС. Из рисунков видно, что наблюдаются общие закономерности для этих случаев. К ним относятся: наличие минимума на зависимости  $C_{эфф}^{-2}(U)$  при небольших обратных напряжениях, параллельный сдвиг ВФХ в сторону увеличения  $C_{эфф}^{-2}$  с ростом ПС и отсутствие зависимости емкости от напряжения при большом ПС. С ростом ПС положение минимума сдвигается в сторону больших обратных напряжений (рис. 1). Видно, что наблюдаемое неидеальное поведение ВФХ в детекторах из-за влияния ПС согласуется с положениями теории [1] и данными работы [2].

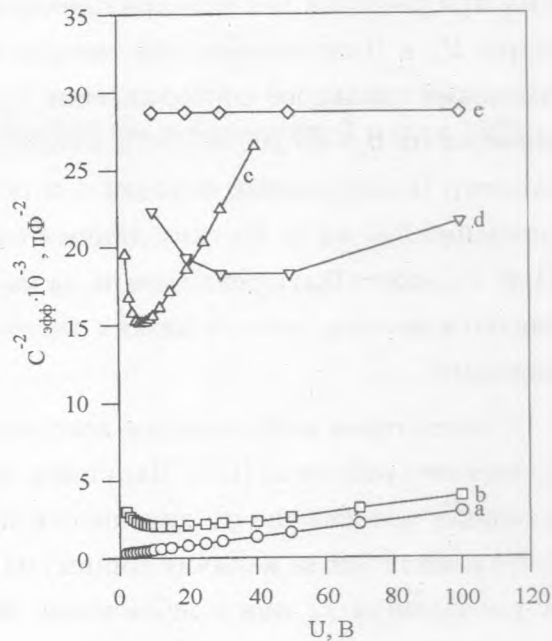
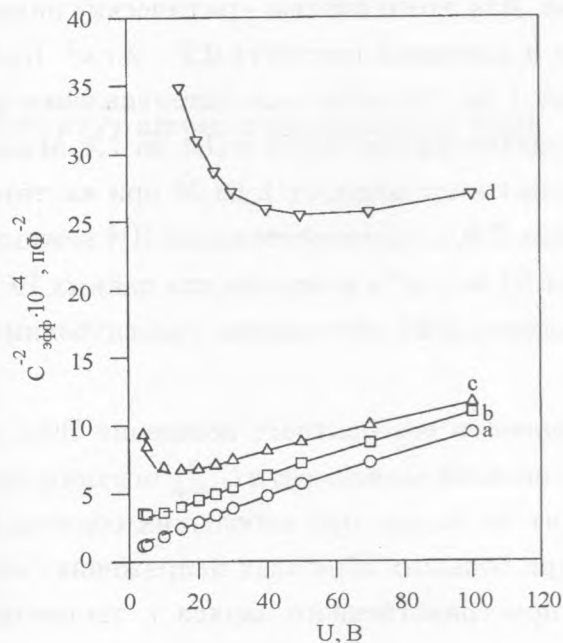


Рис. 1.  $C_{эфф}^{-2}(U)$  – характеристики детектора типа  $Au-nSi$  с последовательным сопротивлением  $r = 2,1 \text{ кОм}$  при частоте  $600 \text{ кГц}$  и при разных значениях внешнего сопротивления  $r_{вн} = 0$  (a),  $1 \text{ кОм}$  (b);  $2 \text{ кОм}$  (c),  $4 \text{ кОм}$  (d).

Рис. 2.  $C_{эфф}^{-2}(U)$  – характеристики полупроводниковых детекторов с разными значениями последовательного сопротивления  $r$  при частоте  $600 \text{ кГц}$ :  $r = 2,5 \text{ кОм}$ ,  $Al/aGe-pSi$  (a);  $r = 5,9 \text{ кОм}$ ,  $Al/aGe-pSi$  (b);  $r = 10 \text{ кОм}$ ,  $Au-nSi$  (c);  $Si(Li)$  – детекторы, имеющие разные большие значения  $r$  из-за различной степени компенсации кремния после дрейфа ионов лития (d, e).

Согласно [1], определить количественно величину ПС детектора можно по сдвигу ВФХ (рис. 1) или по напряжению отсечки емкости в критическом режиме. Например, величина остаточного ПС детектора на рис. 1 (кривые а и б) определялась из соотношения  $\Delta C_{эф}^{-2}(U) \approx 2\omega[(r + r_{сн})^2 - r^2]$ . Собственное ПС кремниевого детектора (рис. 1), вычисленное по сдвигу ВФХ, составило 2,1  $\kappa Ом$ . Вычисление этой же величины методом Норде [6] из измерений прямой вольтамперной характеристики дало значение 1,7  $\kappa Ом$ . Согласие между двумя различными методами удовлетворительное. Небольшое расхождение может быть связано с возможным различием ПС при прямом и обратном напряжении. Таким образом, видно, что существует также и количественное согласие с теорией [1].

Знание ПС позволяет определить для детекторов частотный диапазон измерения ВФХ при работе в НЧ или критическом режиме. Для этого оценим критические параметры  $R_m$  и  $\Omega$  детекторов для толщин 1 – 2 мм и площадей контакта 0,2 – 2  $см^2$ . При изменении удельного сопротивления кремния от 1 до 100  $\kappa Ом \cdot см$  сопротивление  $r_b$  меняется от 0,5 до 100  $\kappa Ом$ , а величина  $R_m$  соответственно от 54  $\kappa Ом$  до 7,4  $Мом$ . Параметр  $\Omega$  для данных величин  $r = r_b$  и  $R_m$  лежит в пределах от 1 до 30 при частоте измерения 600  $\kappa Гц$ . Из этих данных следует, что ВФХ, соответствующая НЧ режиму ( $\Omega \ll 1$ ), может быть реализована на частотах от 60 до 2  $\kappa Гц$  и меньше для данных ПС. Однако известно, что при низких частотах искажение ВФХ обусловлено уже глубокими уровнями.

У детекторов наблюдаются некоторые особенности неидеального поведения ВФХ в сравнении с работами [1, 2]. Например, область линейной зависимости  $C_{эф}^{-2}$  ограничена, поскольку отклонение от линейности происходит не только при небольших обратных напряжениях (из-за наличия минимума), но и при больших обратных напряжениях из-за уменьшения  $r_b$  при приближении области пространственного заряда к тыловому контакту.

Анализ неидеальных ВФХ  $Si(Li)$  детекторов показывает, что измерения  $C-U$  характеристик обычно соответствующие ВЧ режиму, могут быть использованы только для качественно оценки степени компенсации (рис. 2), но не могут применяться для корректного определения напряженности электрического поля и толщины обедненного слоя. Следует также отметить, что в случае неидеальной ВФХ этот метод не может быть использован для определения высоты барьера поверхностно-барьерных структур из-за наличия минимума в области прямых или небольших обратных напряжений.

Таким образом, проведенные исследования демонстрируют влияние ПС на неидеаль-



ное поведение ВФХ детекторов ядерных излучений и возможность использования этих характеристик для определения параметров прибора и материала.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Константинов О. В., Мезрин О. В. ФТП, **17**, 305 (1983).
- [2] Гольдберг Ю. А. и др. ФТП, **17**, 1068 (1983).
- [3] Ristinen R. A. et al. Nucl. Instrum. Meth., **56**, 55 (1967).
- [4] Демидова Г. Н. В сб.: Полупроводн. техн. и микроэлектроника, (Киев), **9**, 66 (1972).
- [5] Gigante J. R. et al. IEEE TRANS. Nucl. Sci., **NS-21**, N 1, 395 (1974).
- [6] Norde N. J. Appl. Phys., **50**, 5052 (1979).

Институт ядерных исследований РАН

Поступила в редакцию 2 марта 1998 г.