

# РАДИОФИЗИКА

УДК 621.391.822

## ИСТОЧНИКИ ФЛИККЕРНОГО ШУМА В ДЕЛЬТА-ЛЕГИРОВАННЫХ КРЕМНИЕМ ДИОДАХ ШОТТКИ

© 2010 г.

А.В. Клюев, Е.И. Шмелёв, А.В. Якимов

Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского

yakimov@rf.unn.ru

Поступила в редакцию 23.03.2010

Представлена модель диода Шоттки с  $\delta$ -легированием, ориентированная на выявление технологических областей диода, ответственных за генерацию фликкерного ( $1/f$ ) шума. Учтены последовательное сопротивление  $R_b$  базы и контактов, а также возможный ток утечки  $I_{leak}$ . Параметры диода определяются из анализа вольт-амперной характеристики. Исследована зависимость спектра шумового напряжения от тока, протекающего через диод. Для объяснения полученных данных предложена модель флуктуаций заряда некомпенсированных доноров в  $\delta$ -слое перехода Шоттки ( $\Delta N_s$ -модель). Показано, что в исследованных диодах на  $10^6$  атомов основной примеси (Si), формирующей  $\delta$ -слой, приходится 1–10 атомов посторонней примеси, приводящей к появлению  $1/f$ -шума.

*Ключевые слова:* диод Шоттки, дельта-легирование, вольт-амперная характеристика,  $1/f$ -шум.

### Введение

Диод с барьером Шоттки является одним из перспективных нелинейных элементов, используемых при приеме микроволнового излучения. Уменьшение эффективной высоты барьера приводит к уменьшению дифференциального сопротивления диода и, тем самым, позволяет получить детектор сигналов, работающий без постоянного смещения. Способом снижения эффективной высоты барьера диодов Шоттки является обеспечение высокой туннельной прозрачности вблизи вершины потенциального барьера при сильном неоднородном легировании ( $\delta$ -легировании) полупроводника вблизи контакта с металлом. Детальное описание исследованных диодов представлено в работах [1–4].

В настоящей работе представлена эквивалентная схема диода, ориентированная на выявление технологических областей, ответственных за генерацию  $1/f$ -шума. Исследована зависимость спектра  $S_v$  шумового напряжения, выделяющегося на диоде, от тока  $I$  через диод. Для объяснения экспериментальных данных предложена модель флуктуаций заряда некомпенсированных доноров в  $\delta$ -слое перехода ( $\Delta N_s$ -модель). Модель опирается на подход [5], согласно которому источниками  $1/f$ -шума являются

подвижные точечные дефекты кристаллической решетки.

Анализ эквивалентной схемы диода, описывающей отрицательную и положительную ветви его вольт-амперной характеристики, а также предварительный анализ токовой зависимости спектра  $1/f$ -шума выполнен в работе [6].

### Модель диода

Эквивалентная схема диода Шоттки с  $\delta$ -легированием изображена на рис. 1. Представленная модель ориентирована на выявление технологических областей диода, ответственных за генерацию  $1/f$ -шума. Здесь барьер Шоттки выделен элементом  $D$ , учтены последовательное сопротивление  $R_b$  базы и контактов (в общем случае нелинейное), а также возможность существования тока утечки  $I_{leak}$ , которому ставится в соответствие (нелинейное) сопротивление  $R_{leak}$ . Параметры элементов эквивалентной схемы определяются из анализа вольт-амперной характеристики диода.

Исследованные диоды изготовлены в Институте физики микроструктур РАН по единой технологии и различаются величиной начального (при  $I = 0$ ) дифференциального сопротивления  $R_0$ , варьирующейся в диапазоне от  $6 \cdot 10^9$  до 400 Ом. Практически у всех диодов утечка пре-

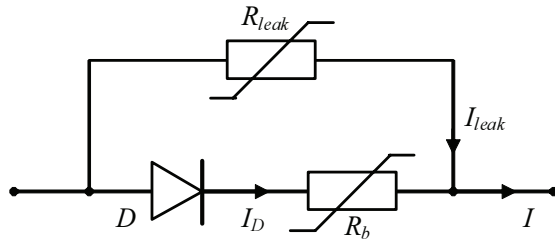


Рис. 1. Эквивалентная схема диода

небрежимо мала, но присутствует нелинейное сопротивление  $R_b$ . Зависимость тока  $I_D$  от напряжения  $V_D$ , приложенного к барьеру Шоттки, описывается соотношением:

$$I_D = I_s \cdot \exp\left(-\frac{\alpha V_D}{V_T}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{V_D}{\eta V_T}\right) - 1\right]. \quad (1)$$

Здесь  $\eta$  – коэффициент неидеальности,  $\alpha = d/D_M$  – относительная толщина  $\delta$ -слоя ( $\alpha \sim 0.04-0.08$ ),  $d$  – ширина туннельного барьера на границе с металлом,  $D_M$  – ширина барьера Мотта,  $V_T = kT/q$  – тепловой потенциал, определяемый постоянной Больцмана  $k$ , абсолютной температурой  $T$  и зарядом электрона  $q$ . Характерный ток  $I_s$  равен:

$$I_s = A^{**} T^2 \exp(-\Delta_0/kT), \quad (2)$$

где  $A^{**}$  – модифицированная постоянная Ричардсона,  $\Delta_0$  – эффективная высота барьера при нулевом смещении, зависящая от параметров  $\delta$ -легирования:

$$\Delta_0 = \left[ \Phi - \frac{q^2 N_s d}{\varepsilon} \right] \cdot \left[ 1 - \frac{d}{D_M} \right]. \quad (3)$$

Здесь  $\Phi$  – высота барьера на границе металл – полупроводник,  $N_s$  – поверхностная концентрация атомов донорной примеси,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость полупроводника.

Дифференциальное сопротивление, соответствующее ВАХ (1), равно:

$$R_D = \left( \frac{dI_D}{dV_D} \right)^{-1} = \frac{\eta V_T}{I_D (1 - \eta \alpha) + I_s \exp\left(-\frac{\alpha V_D}{V_T}\right)}. \quad (4)$$

Дифференциальное сопротивление при нулевом напряжении есть  $R_{D0} = \eta V_T / I_s$ .

### Экспериментальные данные и $\Delta N_s$ -модель

Спектр  $S_v(f)$  шумового напряжения, выделяющегося на диоде, измерялся на частотах от

нескольких герц до 20 кГц, при разных значениях тока  $I$  через диод. Типичное семейство спектров (диод с  $R_0 = 600$  Ом) приведено на рис. 2.

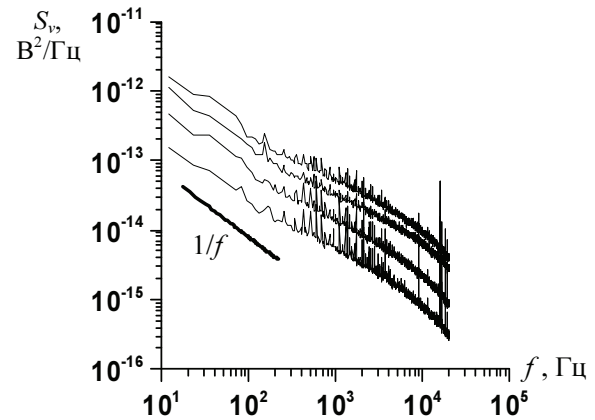


Рис. 2. Семейство спектров шумового напряжения при разных токах через диод

Пример токовой зависимости спектра на фиксированной частоте (диод с  $R_0 = 600$  Ом) в области  $1/f$ -шума приведён на рис. 3 (точки).

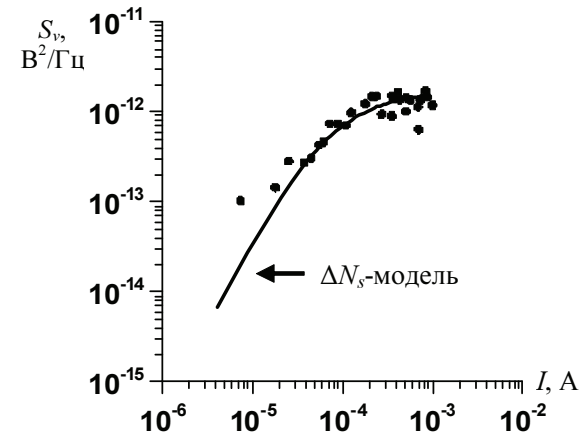


Рис. 3. Токовая зависимость спектра шумового напряжения на частоте 12 Гц

Для анализа экспериментальных данных за основу взята модель [7; 8], описывающая проявление источников  $1/f$ -шума (подвижных дефектов), локализованных в различных технологических областях полупроводникового диода с  $p$ - $n$ -переходом. Токовая зависимость, представленная на рис. 3, близка к зависимости (эффект насыщения), наблюдающейся для шума, вызванного флуктуациями обратного тока насыщения  $p$ - $n$ -перехода.

В рассматриваемом диоде Шоттки аналогом указанного тока является характерный ток  $I_s$ , определяемый соотношениями (2) и (3).

Допустим, что наблюдаемый  $1/f$ -шум вызван флуктуациями заряда некомпенсированных доноров в  $\delta$ -слое перехода Шоттки ( $\Delta N_s$ -модель). Суть модели излагается ниже; соответствующая токовая зависимость спектра шумового напряжения показана на рис. 3 сплошной линией.

Атомы основной примеси (Si), формирующей  $\delta$ -слой, полностью ионизованы. Однако в  $\delta$ -слое могут присутствовать атомы посторонних примесей (кислород, углерод и др.). Предполагается, что каждый атом имеет несколько метастабильных состояний, разделённых относительно низким потенциальным барьером [5]. Термоактивированные переходы между состояниями проявляются через стохастическую модуляцию энергии ионизации примеси. Эти изменения можно трактовать как флуктуации  $\Delta N_s(t)$  эффективной концентрации донорной примеси в  $\delta$ -слое.

Вводя флуктуации в соотношение (3),  $N_s \Rightarrow (N_s + \Delta N_s)$ , и предполагая их малость,  $\langle \Delta N_s^2 \rangle \ll N_s^2$ , найдём флуктуационную компоненту  $i_s(t)$  характерного тока, определяемую соотношением (2):

$$i_s(t) = -A \cdot I_s \Delta N_s(t), \quad A = \frac{q^2 d}{kT\epsilon} \cdot \left[ 1 - \frac{d}{D_M} \right]. \quad (5)$$

Здесь  $A$  – восприимчивость характерного тока к флуктуациям заряда некомпенсированных доноров. Используя соотношение (1), найдём шумовой ток  $i_D(t)$ , генерируемый барьером Шоттки:

$$i_D(t) = \frac{I_D}{I_s} \cdot i_s(t). \quad (6)$$

Далее найдём  $v(t)$  – шумовое напряжение, выделяющееся на барьере и, следовательно, на диоде:

$$v(t) = R_D \cdot i_D(t) = I_D R_D \cdot A \cdot \Delta N_s(t). \quad (7)$$

Таким образом, для спектра  $1/f$  шумового напряжения, выделяющегося на диоде, имеем:

$$S_v(f) = (I_D \cdot R_D)^2 \cdot A^2 \cdot S_{\Delta N_s}(f). \quad (8)$$

Здесь  $S_{\Delta N_s}(f)$  – спектр флуктуаций эффективной концентрации атомов донорной примеси.

Перейдём к анализу токовой зависимости спектра (8). Увеличение тока  $I_D$  приводит к увеличению шумового тока (6) и к уменьшению дифференциального сопротивления  $R_D$ , определяемого соотношением (4). В области малых токов,  $I_D \lesssim I_s$ , дифференциальное сопротивление изменяется относительно слабо, что приводит к

увеличению спектра шумового напряжения при росте тока.

В области больших токов спектр шумового напряжения практически перестает зависеть от величины тока через диод, так как рост шумового тока  $i_D(t)$ , сопровождающий увеличение полного тока  $I_D$ , компенсируется соответствующим уменьшением дифференциального сопротивления  $R_D$ .

Проиллюстрируем приведенную выше модель на примере конкретного диода. Например, для диода с  $R_0 = 600$  Ом оценки параметров имеют следующие значения: характерный ток  $I_s = 5 \cdot 10^{-5}$  А, коэффициент неидеальности  $\eta = 1.21$ , относительная толщина  $\delta$ -слоя  $\alpha = 0.08$ , линейная часть сопротивления базы и контактов  $R_{bb} = 10$  Ом, нелинейная часть сопротивления базы и контактов моделируется ВАХ обычного диода и характеризуется характерным током  $I_{sb} = 8 \cdot 10^{-4}$  А и коэффициентом неидеальности  $\eta_b = 6$ .

Для диода с  $R_0 = 600$  Ом получен модельный спектр  $S_{\Delta N_s} = 6.7 \cdot 10^{21} / f$  м<sup>-4</sup>/Гц. Этот результат может быть использован для оценки числа атомов посторонней примеси.

Оценим для диода с  $R_0 = 600$  Ом дисперсию абсолютных флуктуаций поверхностной концентрации атомов донорной примеси в исследуемой полосе частот от 1 Гц до 20 кГц. Находя среднеквадратическое (эффективное) значение  $\Delta N_{s\phi\phi}$ , приходим к относительным флуктуациям поверхностной концентрации атомов донорной примеси (поверхностная концентрация атомов донорной примеси составляет  $N_s \approx 10^{13}$  см<sup>-2</sup> [3]):  $\delta N_s = \Delta N_{s\phi\phi} / N_s \approx 10^{-6}$ .

Подобные оценки проводились для всех исследованных диодов. Анализ спектра  $1/f$ -шума позволяет предположить, что в исследованных диодах на  $10^6$  атомов основной примеси приходится 1–10 атомов посторонней примеси, энергия ионизации которых может изменяться стохастически.

## Заключение

Предложена модель диода Шоттки с  $\delta$ -легированием, ориентированная на выявление технологических областей диода, ответственных за генерацию  $1/f$ -шума. Учтены последовательное сопротивление  $R_b$  базы и контактов, а также возможная утечка  $I_{leak}$ .

Параметры диода определены из анализа вольт-амперной характеристики.

Для объяснения экспериментальных данных предложена модель флуктуаций заряда некомпенсированных доноров в  $\delta$ -слое перехода Шоттки ( $\Delta N_s$ -модель).

Анализ спектра  $1/f$ -шума позволяет предположить, что в исследованных диодах на  $10^6$  атомов основной примеси приходится 1–10 атомов посторонней примеси, энергия ионизации которых может изменяться стохастически.

Авторы выражают благодарность группе В.И. Шашкина (Институт физики микроструктур РАН) за предоставленные для исследования диоды Шоттки с  $\delta$ -легированием и плодотворные дискуссии по теме работы.

*Решаемые задачи связаны с работами, выполненными по Приоритетному национальному проекту «Образование». Исследования проведены при поддержке программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственные контракты № 02.740.11.0163, № 02.740.11.0003 и № П2606); программ «У.М.Н.И.К.–08–3» (государственный контракт № 6039р/8473) и «У.М.Н.И.К.–НН» (договор № 14 от 15 декабря 2009 г.).*

#### Список литературы

1. Шашкин В.И., Вакс В.Л., Данильцев В.М. и др. Микроволновые детекторы на основе низкобарьерных планарных диодов Шоттки и их характери-

стики // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48. Вып. 6. С. 544–551.

2. Shashkin V.I., Drjagin Yu.A., Zakamov V.R. et al. Millimeter-wave Detectors Based on Antenna-coupled Low-barrier Schottky Diodes // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 2007. V. 28. № 11. P. 945–952.

3. Шашкин В.И., Мурель А.В., Данильцев В.М., Хрыкин О.И. Управление характером токопереноса в барьере Шоттки с помощью  $\delta$ -легирования: расчет и эксперимент для Al/GaAs // Физика и техника полупроводников. 2002. Т. 36. Вып. 5. С. 537–542.

4. Шашкин В.И., Мурель А.В. Теория туннельного токопереноса в контактах металл – полупроводник с приповерхностным изотипным  $\delta$ -легированием // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. Вып. 5. С. 574–579.

5. Orlov V.B., Yakimov A.V. The Further Interpretation of Hooge's  $1/f$  Noise Formula // Physica B. 1990. V. 162. P. 13–20.

6. Yakimov A.V., Klyuev A.V., Shmelev E.I. et al.  $1/f$  noise in Si delta-doped Schottky diodes // Proc. 20th Int. Conf. «Noise and Fluctuations, ICNF 2009». Pisa, Italy, 14–19 June 2009. P. 225–228.

7. Якимов А.В. Эффект минимизации фликкерных шумов в  $p$ - $n$ -переходах // Изв. вузов. Радиофизика. 1983. Т. 26. № 6. С. 772.

8. Якимов А.В. Фликкерные шумы токов утечки в полупроводниковых диодах // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27. № 1. С. 120–123.

## SOURCES OF $1/f$ NOISE IN SI DELTA-DOPED SCHOTTKY DIODES

*A.V. Klyuev, E.I. Shmelev, A.V. Yakimov*

A model of  $\delta$ -doped Schottky diode has been suggested aiming at the determination of diode technological areas responsible for the  $1/f$  noise. The series resistance  $R_b$  of base and contacts, and the possible leakage current  $I_{leak}$  have been taken into account. Diode parameters are defined from the analysis of the current-voltage characteristic. The dependence of the noise voltage spectrum on the diode current has been studied. For the explanation of the experimental data, a model of fluctuations in the charge of non-compensated donors in  $\delta$ -layer of Schottky junction ( $\Delta N_s$  – model) has been suggested. It has been shown that each  $10^6$  atoms of the main impurity (Si) of the diodes studied contain 1–10 atoms of an extraneous impurity which produces  $1/f$  noise.

*Keywords:* Schottky diode, delta-doping, current-voltage characteristic,  $1/f$  noise.