

Диагностика низкобарьерных диодов Шоттки с приповерхностным δ -легированием

© В.И. Шашкин[¶], А.В. Мурель

Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 28 июня 2007 г. Принята к печати 28 августа 2007 г.)

Разработана методика диагностики параметров низкобарьерных диодов Шоттки, основанная на анализе зависимости дифференциального сопротивления диода с барьером Мотта и приповерхностным δ -легированием. Показано, что возможно полное описание вольт-амперных характеристик диода при учете последовательно включенного $n^- - n^+$ -перехода. Методика позволяет оптимизировать диоды для достижения более высокой чувствительности при детектировании.

PACS: 73.61.Ey, 73.30.+y, 73.63.-b, 73.40.Gk, 73.43.Cd

Для создания чувствительных детекторов, в частности для систем миллиметрового видения, перспективно использовать низкобарьерные диоды Шоттки (НДШ) с высотами барьеров в пределах 0.15–0.3 эВ. Возможность детектирования сигнала без напряжения смещения обеспечивает пониженный уровень шумов и соответственно высокую чувствительность приёмника. Процедуры определения параметров, необходимые для расчета и оптимизации детектора, применяемые для диодов с большой высотой барьера (0.7–1 эВ) [1–4], не годятся для низкобарьерных диодов. Предлагается метод диагностики низкобарьерных диодов Шоттки, основанный на анализе зависимости дифференциального сопротивления диода от напряжения смещения $R_d(V)$.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) низкобарьерного диода с изовалентным приповерхностным δ -легированием, как показано теоретически [5] и подтверждено экспериментально [6], описывается формулой

$$I = SA^{**}T^2 \exp\left(-\frac{\Delta_0 - \alpha qV}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{q}{nkT}V\right) - 1\right], \quad (1)$$

где Δ_0 — эффективная высота барьера при нулевом смещении, зависящая от параметров δ -легирования [5], q — заряд электрона, S — площадь диода, A^{**} — модифицированная постоянная Ричардсона, n — фактор неидеальности, k — постоянная Больцмана, T — температура; $\alpha = d/D \ll 1$, d — ширина туннельного барьера на границе с металлом (единицы нанометра), D — ширина барьера Мотта ~ 100 нм. Величина α определяет слабую зависимость эффективной высоты барьера от напряжения. Дифференциальное сопротивление контакта, вычисленное из зависимости (1), равно

$$R_d(V) = \frac{nkT}{qI_s} \frac{\exp\left(\frac{\alpha}{kT}qV\right)}{an + (1 - an)\exp\left(\frac{q}{nkT}V\right)}, \quad (2)$$

где I_s — ток насыщения.

[¶] E-mail: sha@ipm.sci-nnov.ru

При больших обратных напряжениях смещения имеем экспоненциальную зависимость от напряжения:

$$R_d(V) = \frac{kT}{qI_s} \frac{\exp\left(\frac{\alpha}{kT}qV\right)}{\alpha}, \quad (3)$$

откуда можно определить значение α . При условии $\exp(qV/nkT) \gg an$, что выполняется уже при $V \rightarrow 0$, зависимость также носит экспоненциальный характер:

$$R_d(V) = \frac{nkT}{qI_s} \frac{1}{1 - an} \exp\left(-\frac{1 - an}{n} \frac{qV}{kT}\right). \quad (4)$$

Значение фактора неидеальности определяется из соотношения

$$n = -\frac{q}{kT} \frac{d(\ln R_d(V))}{dV} + \alpha^{-1}. \quad (5)$$

При нулевом смещении, как видно из формулы (4), значение дифференциального сопротивления равно

$$R_d(V=0) = \frac{kT}{qI_s} \frac{n}{1 - an}, \quad (6)$$

что позволяет найти величину тока насыщения I_s и эффективную высоту барьера. Таким образом, достаточно просто определяются основные параметры НДШ: n , α и Δ_0 . Заметим, что для обычных диодов Шоттки с достаточно большой высотой барьера (0.7–1 эВ) дифференциальное сопротивление вблизи нулевого смещения очень велико и подобные измерения и расчеты затруднены.

Типичная ВАХ НДШ, изготовленного из арсенида галлия, приведена на рис. 1. Параметры структуры: $D = 100$ нм, уровень легирования в барьере Мотта $n \lesssim 10^{15}$ см⁻³, $d = 4$ нм, поверхностная плотность легирования в δ -слое $\sim 10^{13}$ см⁻², высота барьера Шоттки 0.7 эВ, концентрация электронов в подложке $n^+ = 3 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Конструкции и технология изготовления микроволнового диода описаны в работе [7]. Площадь анода диода составляет около 8 мкм².

Как видно из рис. 1, прямая ветвь ВАХ в отличие от обычных диодов Шоттки не спрямляется в полулогарифмических координатах, поэтому извлечение параметров

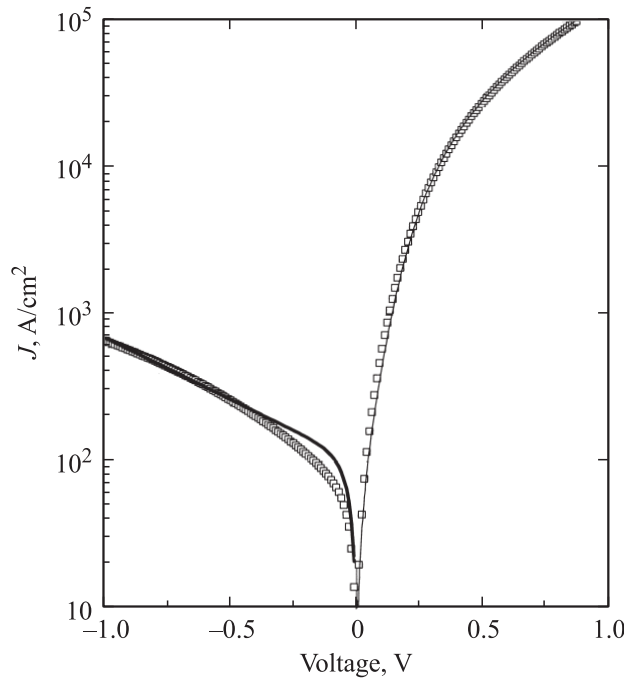


Рис. 1. Экспериментальная (точки) и расчетная (линия) вольт-амперная характеристика низкобарьерного диода Шоттки при комнатной температуре.

диода сопряжено с большими ошибками. На рис. 2 приведена зависимость $R_d(V)$, полученная численным дифференцированием экспериментальной ВАХ. Определенное из зависимости (3) значение $\alpha = 0.043$ близко к заданному $d/D = 0.04$. Участок вблизи нулевого напряжения хорошо аппроксимируется прямой (см. вставка на рис. 2). Её наклон равен коэффициенту нелинейности диода

$$\beta = \frac{d^2 I / dV^2}{dI / dV}. \quad (7)$$

Определяем $\beta = 25 \text{ В}^{-1}$ и $n = 1.5$ согласно формуле (5). Из уравнения (6) находим $I_s = 70 \text{ А/см}^2$, откуда оцениваем эффективную высоту барьера $\Delta_0 = 0.23 \text{ эВ}$.

Зависимость $R_d(V)$ не выходит на постоянное значение при больших прямых смещениях, что связано с потенциальным барьером вблизи $n^- - n^+$ -перехода в эпитаксиальной структуре. Полагая для него экспоненциальную зависимость тока от напряжения, легко получить в этом случае выражение для $R_d(V)$:

$$R_d(V) = \frac{kT}{qI_0} (n_1 + n_2) \exp \left[-\frac{qV}{(n_1 + n_2)kT} \right], \quad (8)$$

где

$$I_0 = I_{s1}^{\frac{n_1}{n_1+n_2}} + I_{s2}^{\frac{n_2}{n_1+n_2}}, \quad n_1 = \frac{n}{(1-\alpha n)},$$

n_2 — фактор неидеальности и I_{s2} — ток насыщения второго перехода. Для области напряжений 0.4–0.8 В (рис. 2) из угла наклона находим $n_1 + n_2 = 16.7$, т.е. $n_2 = 15.2$. Высота барьера $\Delta_2 \sim 0.065 \text{ эВ}$. Полученные

значения представляются реальными для токов, ограниченных пространственным зарядом в $n^- - n^+$ -переходах [8]. Моделирование цепи их двух последовательно включенных диодов и резистора R_s хорошо описывают экспериментальные данные, как видно на рис. 2. Зна-

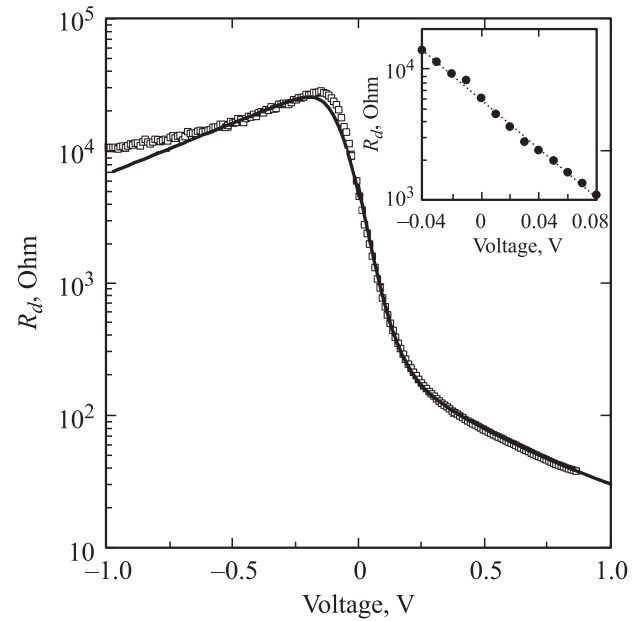


Рис. 2. Экспериментальная (точки) и расчетная (линия) зависимости дифференциального сопротивления $R_d(V)$ низкобарьерного диода Шоттки. Расчетные параметры: $\alpha = 0.043$, $\Delta_0 = 0.23 \text{ эВ}$, $n = 1.5$, $\Delta_2 = 0.065 \text{ эВ}$, $n_2 = 15.2$, $R_s = 6 \text{ Ом}$. Линейную зависимость логарифма дифференциального сопротивления от напряжения вблизи $V = 0$ подтверждает график, приведенный на вставке.

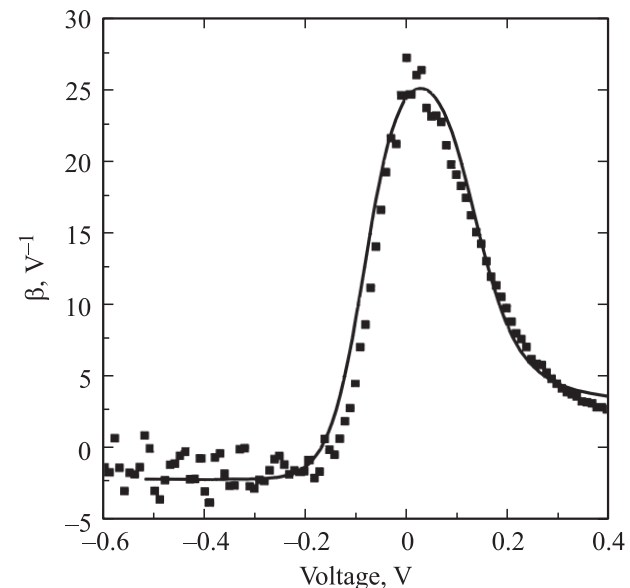


Рис. 3. Зависимость коэффициента нелинейности диода β от напряжения смещения. Точки — экспериментальные значения, линия — численный расчет (7).

чение последовательного сопротивления $R_s = 6$ Ом дает наилучшее совпадение с экспериментальными данными при максимальных токах. Вольт-амперная характеристика диода, рассчитанная для найденных значений параметров, приведена на рис. 1 и имеет хорошее совпадение с экспериментальной кривой во всем диапазоне токов.

Сигнал микроволнового детектора пропорционален величине коэффициента β [7]. Зависимость $\beta(V)$, рассчитанная из экспериментальной ВАХ по формуле (7), показана на рис. 3 точками. Сплошной линией на рисунке приведен коэффициент нелинейности, определенный для предложенной эквивалентной цепи из двух нелинейных элементов. Максимальная нелинейность детектора реализуется при нулевом смещении и определяется только параметрами контакта металл–полупроводник. Последовательно включенные элементы оказывают незначительное влияние на величину $\beta(V \rightarrow 0)$, что является важным с точки зрения оптимизации нелинейности НДШ для достижения более высокой чувствительности при детектировании сигналов.

Таким образом, разработана методика определения параметров низкобарьерного диода Шоттки с приповерхностным δ -легированием арсенида галлия, основанная на анализе дифференциального сопротивления диода, полученного численным дифференцированием экспериментальных ВАХ во всей области напряжений. Определены характеристики низкобарьерного диода Шоттки: высота потенциального барьера, фактор неидеальности, величина последовательного сопротивления. Выявлена роль последовательного $n^- - n^+$ -перехода. Показано, что возможно точное и полное описание не только зависимости тока от напряжения, но также первой и второй производных этих зависимостей. Полученные результаты позволяют оптимизировать нелинейные свойства диодов для повышения чувствительности при детектировании.

Работа поддержана грантами РФФИ и президента РФ МК-2234.2006.8.

Список литературы

- [1] H. Norde. J. Appl. Phys., **50**, 5052 (1979).
- [2] C.-D. Lien, F.C.T. So, M.-A. Nicolet. IEEE Trans. Electron. Dev., **31**, 1502 (1984).
- [3] H. Werner. Appl. Phys. A, **47**, 291 (1988).
- [4] V. Aubry, F. Meyer. J. Appl. Phys., **76**, 7973 (1994).
- [5] В.И. Шашкин, А.В. Мурель. ФТП, **38**, 574 (2004).
- [6] В.И. Шашкин, А.В. Мурель, В.М. Данильцев, О.И. Хрыкин. ФТП, **36**, 537 (2002).
- [7] В.И. Шашкин, В.Л. Вакс, В.М. Данильцев, А.В. Масловский, А.В. Мурель, С.Д. Никифоров, О.И. Хрыкин, Ю.И. Чеченин. Изв. вузов. Радиофизика, XLVIII, 1 (2005).
- [8] М. Шур. *Современные приборы на основе арсенида галлия* (М., Мир, 1991).

Редактор Т.А. Полянская

Diagnostics of low-barrier Schottky diodes with sub-surface δ -doping

V.I. Shashkin, A.V. Murel

Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Science,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The technique based on analysis voltage dependence of differential contact resistance was developed to characterize low-barrier Schottky diodes. The main parameters of low-barrier Mott diodes with sub-surface δ -doping were determined. It was shown possibility to obtain full description of current-voltage curves of the diode accounting series $n^- - n^+$ -junction. The technique is useful for optimization diodes and realizing superior detector performance.