

ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ВЫСОТЫ БАРЬЕРА ОТ СМЕЩЕНИЯ НА ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ КОНТАКТОВ С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ

Божков В. Г., Шмаргунов А. В.
 ОАО "Институт полупроводниковых приборов"
 г. Томск, 634034, Россия
 тел.: 3822-556695, e-mail: tohsh@list.ru

Аннотация — Проведено численное исследование характеристик идеального контакта металл-полупроводник с барьером Шоттки (БШ) в широком диапазоне температур, диаметров контакта и уровня легирования полупроводника при учёте влияния сил изображения и туннелирования. Анализ проведён на основе модели, учитывающей нелинейную зависимость высоты барьера от смещения. Показано, что предлагаемая модель позволяет дать практически точное аналитическое описание ВАХ таких контактов, соответствующее их интегральному представлению.

I. Введение

В предлагаемой работе на примере туннельного контакта с учётом эффекта сил изображения показано, что на основе представления о нелинейной зависимости высоты барьера (в данном случае эффективной) удаётся описать ВАХ реального контакта простым аналитическим выражением, куда входят только измеряемые характеристики контакта, имеющие наглядный физический смысл. При этом удаётся объяснить "низкотемпературную аномалию", проявление краевых эффектов в контакте (зависимость показателя идеальности и измеряемой высоты барьера от площади контакта), а также связь измеряемой высоты барьера и показателя идеальности ВАХ.

II. Основные соотношения

ВАХ туннельного контакта может быть представлена в известном виде [1, 2]:

$$I = \frac{AR^*T}{k} \exp\left(-\frac{q\phi_s}{kT}\right) \int_0^\infty T_t(E) \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right], \quad (1)$$

где A — площадь контакта, R^* — эффективная константа Ричардсона, T — абсолютная температура, k — постоянная Больцмана, q — заряд электрона, R_s — последовательное сопротивление контакта, $q\phi_s = E_C - E_{F_s} = kT \ln(N_C/N_D)$ — энергетический интервал между дном зоны проводимости (E_C) и уровнем Ферми в объёме полупроводника n-типа (E_{F_s}); N_C — эффективная плотность состояний в зоне проводимости, N_D — концентрация донорной примеси в полупроводнике. $T_t(E)$ — коэффициент прозрачности барьера в ВКВ-приближении.

Вместе с тем прямая ВАХ такого контакта может быть представлена в самом общем виде

$$I = AR^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{\text{bef}}(V)}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right), \quad (2)$$

где $\phi_{\text{bef}} = \phi_{bl}$ — далее эффективная высота барьера при заданном токе [3, 4]. Для определения высоты барьера ВАХ (2) в каждой точке (I, V) аппроксимируется выражением:

$$I = AR^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{bm}(V)}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right), \quad (3)$$

где $\phi_{bm} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AR^*T^2}{I_s}\right)$, (4)

— измеряемая по току насыщения высота барьера, а n — показатель идеальности в заданной точке ВАХ,

который, при учёте нелинейной зависимости эффективной высоты барьера ϕ_{bl} является функцией смещения (тока), (как и ϕ_{bm}):

$$n(V) = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d \ln I} = \left[1 - \frac{d\phi_{\text{bef}}(V)}{dV}\right]^{-1}, \quad (5)$$

становится функцией смещения. Различные высоты барьера ϕ_{bl} , ϕ_{bm} и $\phi_{bn} = n\phi_{bm}$ сравниваются с реальной высотой барьера ϕ_b с учётом эффекта сил зеркального изображения:

$$\phi_b(V) = \phi_b^0 - (q^3 N_D / 8\pi^2 \epsilon_s^3)^{1/4} (\phi_b^0 - \phi_s - V)^{3/4}, \quad (6)$$

Численные значения параметров, выбранные для расчёта: $\phi_b^0 = 0,8$ В — высота барьера без учёта эффекта сил изображения, $N_D = 4 \times 10^{16}$ см⁻³, $I = 10^{-6}$ А — ток при котором измеряются значения n и ϕ_{bm} .

III. Результаты расчёта и обсуждение

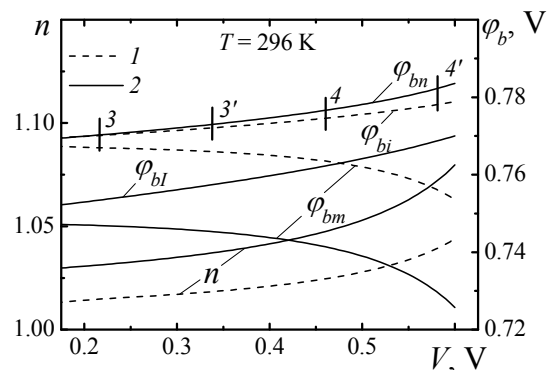


Рис. 1. Зависимости $n(V)$, $\phi_{bm}(V)$, $\phi_{bi}(V)$ и $\phi_{bn}(V)$ при учёте влияния только сил изображения — 1 и совместного влияния сил изображения и туннелирования — 2; области смещений 3-3' и 4-4' соответствуют диапазону токов (10^{-6} - 10^{-4}) А для контактов с диаметром 500 мкм и 5 мкм, соответственно.

Fig. 1. Plots of $n(V)$, $\phi_{bm}(V)$, $\phi_{bi}(V)$ and $\phi_{bn}(V)$ considering the influence of image forces only — 1 and a summary effect of image forces and tunneling — 2; bias voltage ranges 3-3' and 4-4' correspond to the current range (10^{-6} - 10^{-4}) A for contacts with diameters of 500 and 5 mcm, respectively

На рис. 1 представлены рассчитанные согласно (1), (4) и (5) зависимости $\phi_{bm}(V)$ и $\phi_{bl}(V)$, а также $n(V)$ без учёта и с учётом туннелирования в контакте (1 и 2, соответственно). Здесь же приведены зависимости для величины $\phi_{bn}(V)$ (при учёте туннелирования). Как следует из рисунка, в обоих случаях, с учётом туннелирования и без, проявляется нелинейный характер зависимости эффективной высоты барьера от смещения и разнонаправленное, как следствие, изменение измеряемых значений n и ϕ_{bm} с ростом

смещения. Области смещений, ограниченные отрезками линий 3 - 3' и 4 - 4', соответствуют области токов измерения ($10^{-6} \dots 10^{-4}$) А для диаметров контактов 500 мкм и 5 мкм, соответственно. Как видно, эффект нелинейности высоты барьера усиливает влияние при уменьшении диаметра контакта. Отметим также близкое совпадение значений $\varphi_{bn} = n\varphi_{bm}$ и φ_{bi} во всём диапазоне смещений. Разница между ними не превышает 5 мВ.

Совпадение $\varphi_{bn} = n\varphi_{bm}$ и φ_{bi} позволяет, опираясь на точное выражение (3) представить ВАХ рассматриваемого контакта с высокой точностью в виде

$$I = AR^2 T^2 \exp\left(-\frac{q\varphi_{bi}}{nkT}\right) \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right). \quad (8)$$

Для проверки справедливости этих выражений были использованы экспериментальные данные для Pt-Ti-n-GaAs [6]. Они представлены на рис. 2.

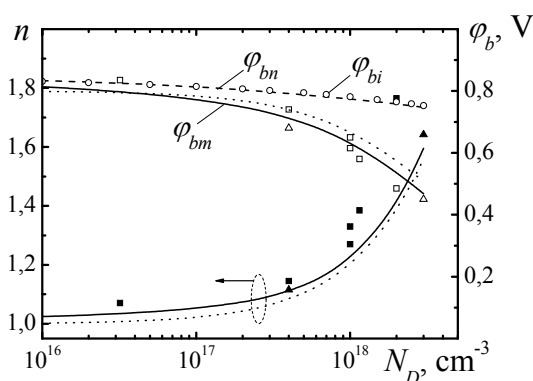


Рис. 2. Измеренные и рассчитанные зависимости $n(N_D)$ и $\varphi_b(N_D)$ контактов Pt-Ti-GaAs:

квадратные и треугольные значки — измеренные параметры для эпитаксиального и объёмного материала, соответственно (сплошные — n , открытые — φ_{bm}) [6]; пунктирные линии — расчётные графики $n(N_D)$ и $\varphi_b^0(N_D)$ из [6]; сплошные линии — $n(N_D)$ и $\varphi_{bm}(N_D)$ из нашего расчёта в соответствии с (5) и (4), соответственно; штриховая линия — $\varphi_{bn}(N_D)$; открытые кружки — φ_{bi} ; ($S = 5.625 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$ [6]).

Fig. 2. Measured and calculated values $n(N_D)$ and $\varphi_b(N_D)$ of Pt-Ti-GaAs contacts: square and delta dots — measured values for epitaxial and bulk material, respectively (filled — n , open — φ_{bm}) [6]; dotted lines — the $n(N_D)$ and the $\varphi_b^0(N_D)$ plots from [6]; continuous lines — the $n(N_D)$ and the $\varphi_{bm}(N_D)$ plots from our calculation in accordance with Eq. (5) and Eq. (4), respectively; dashed line — $\varphi_{bn}(N_D)$; open circles — φ_{bi} ; ($S = 5.625 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2$ [6])

Сравнение расчётных и экспериментальных данных показывает, что предложенная ВАХ (8), соответствующая с высокой точностью интегральной ВАХ туннельного контакта (1), действительно даёт хорошее согласие с экспериментальными данными для широкого диапазона концентраций.

IV. Заключение

Показано, что интегральная ВАХ туннельного контакта (1) в широком диапазоне температур, концентраций примеси в полупроводнике и диаметров контакта может быть описана простым выражением (8), которое помимо измеряемого показателя идеальности содержит реальную (физическую) высоту

барьера в контакте, учитывающую понижение высоты барьера за счёт эффекта сил изображения.

Так же рассмотрены причины "аномального" поведения ВАХ в области низких температур ("низкотемпературная аномалия"), малых площадей (диаметров) контактов (краевые эффекты) и причины связи между измеряемой высотой барьера и показателем идеальности ВАХ однотипных контактов (разнонаправленное их изменение).

V. Список литературы

- [1] Horvath Z. J. Electrical characterization of Schottky junctions: anomalies, parameter extraction and barrier height engineering // Physics of Semiconductor Devices. Ed. by V. Kumar and S. K. Agarwal. New Delhi: Narosa Publishing House, 1998.
- [2] Crowell C. R., Rideout V. L. Normalized thermoionic-field (T-F) emission in metal-semiconductor (Schottky) barriers // Solid State Electron. 1969. Vol. 12. P. 89.
- [3] Божков В. Г., Зайцев С. Е. Анализ модели реального контакта с барьером Шоттки в широком диапазоне температур и смещений // Радиофизика. Изв. ВУЗов. 2004. Т. 47. № 9. С. 769.
- [4] Божков В. Г., Зайцев С. Е. Модель тесного контакта металл-полупроводник с барьером Шоттки // Физика. Изв. ВУЗов. 2005. Т. 48. № 10. С. 77.
- [5] Roderick E. H., Williams R. H. Metal-semiconductor contacts. 2nd ed. Clarendon: Oxford, 1988.
- [6] Doping dependence of the Schottky-barrier height of Ti-Pt contacts to n-gallium arsenide / R. F. Broom et al. // J. Appl. Phys. 1986. Vol. 60. № 5. P. 1832.

INFLUENCE OF THE NONLINEAR BIAS DEPENDENCE OF THE BARRIER HEIGHT ON MEASURED SCHOTTKY-BARRIER CONTACT PARAMETERS

Bozhkov V. G., Shmargunov A. V.
CJSC "Scientific Research Institute
of Semiconductor Devices"
Tomsk, 634034, Russia
Ph.: 3822-556695, e-mail: tohsh@list.ru

Abstract — A numerical investigation of current-voltage characteristics (IVCs) of the metal-semiconductor Schottky-barrier contact (SBC) considering the influence of image force and tunneling effects is presented. The analysis is carried out on the basis of a model, taking into account the nonlinear bias dependence of the barrier height.

I. Introduction

On the example of the tunnel contact considering the image force we show that on the basis of the concept of the nonlinear bias dependence of the barrier height (in this case, an effective barrier height) the IVC of real contacts can be described in a wide range of impurity concentrations and temperatures with a simple analytical expression.

II, III. Main Part

The coincidence of φ_{bn} and φ_{bi} (Figs. 1 and 2) allows, referring to well known expression [3], representing the IVC of the considered contact in the form (8) with high accuracy.

The comparison of calculated and measured results shows that proposed IVC (8), in which $\varphi_{bi} \propto \varphi_{bn}$, really agrees closely with experimental results for a wide range of doping concentrations in semiconductor.

IV. Conclusion

It is shown that IVC in a wide range of temperatures, doping concentrations and contact diameters can be described with a simple analytical expression (8).