

## Влияние методов определения параметров барьерного перехода на их точность

В.С. Дмитриев\*

Запорожская государственная инженерная академия, пр. Соборный, 226, 69006 Запорожье, Украина

(Получено – 15.06.2017; в отредактированной форме – 13.07.2017; опубликовано online 16.10.2017)

Точность основных качественных показателей барьерных переходов (высота барьера  $\phi_b$  и фактор неидеальности  $\eta$ ), зависит от точности измерения тока и напряжения и от метода их определения. Рассмотрены и апробированы методы определения высоты барьера Шоттки по вольт-амперным характеристикам на примере барьерных переходов  $Ag/n-n^+GaAs$ , изготовленных при разных режимах термообработки. Установлено, что наиболее простым в реализации является метод расчета параметров вольт-амперных характеристик по методу Rhoderick, однако он не учитывает последовательное сопротивление, из-за чего могут возникать дополнительные ошибки при определении участка вольт-амперной характеристики, где этим влиянием пренебрегают. Установлено, что наиболее точным методом является метод direct approximation, учитывающий влияние последовательного сопротивления при расчете фактора неидеальности и высоты барьера Шоттки.

**Ключевые слова:** Вольт-амперная характеристика, Высота барьера Шоттки, Коэффициент неидеальности, Последовательное сопротивление, Арсенид галлия, Серебро.

DOI: 10.21272/jnep.9(5).05037

PACS numbers: 73.20. – r, 85.40.Sz, 85.30.Hi

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Барьерные переходы металл-полупроводник используют в приборах с барьером Шоттки [1-7], важнейшим преимуществом которых является то, что их выпрямляющие свойства не ухудшаются в СВЧ диапазоне. Другое преимущество заключается в возможности изменения их характеристик [1-7] путем выбора комбинаций металл-полупроводник и технологии изготовления. К настоящему времени установлено [7], что физическая модель реального контакта металл-полупроводник (КМП) является более сложной по сравнению с моделями идеального КМП, теоретически разработанными Шоттки, Бете и др. Реальные эпитаксиальные пленки, используемые в основном для изготовления выпрямляющего КМП, имеют неравномерное распределение примесей, возникающее в процессе роста пленки. Это приводит к появлению механических напряжений и может привести к возникновению дислокаций, дефектов упаковки, трещин.

Обработка поверхности полупроводника для устранения различных дефектов, удаление инородных примесей, получение минимального микрорельефа приводит к непланарности границы раздела металл-полупроводник.

При обработке поверхности полупроводников в вакууме с помощью термического отжига происходит испарение физически, химически адсорбированных газов с поверхности, газов и легирующих примесей с приповерхностного слоя, а также фазовые превращения в твердой фазе и термохимические реакции. Плотность дислокаций в напыленных пленках металла может достигать  $10^{10}$ - $10^{11}$  см<sup>-3</sup> [7].

Несмотря на то, что основные физические процессы в барьерах Шоттки достаточно хорошо изучены [1-6], до сих пор существуют разногласия в вопросах установления причин отклонения вольт-амперных характеристик от идеальных. Предполагается [6], что реальные вольт-амперные характеристики барьерных переходов металл-полупроводник зависят от

способа их изготовления. Одними из основных качественных показателей таких контактов являются высота барьера  $\phi_b$  и фактор неидеальности  $\eta$  [7], однако точность этих параметров зависит не только от точности измерения тока и напряжения, но и от метода их определения.

### 2. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обычно считают, что барьер Шоттки является идеальным нелинейным сопротивлением [7], то есть перенос зарядов в контакте осуществляется основными носителями. Исходя из такого предположения, диод с барьером Шоттки является безинерционным прибором. В этом случае быстродействие диода Шоттки (ДШ) зависит от времени релаксации «горячих» электронов в металле  $\tau_r$ , постоянной времени  $\tau_s$ ,  $\tau_s = R_s C_B$ , где  $C_B$  – барьерная емкость, пФ;  $R_s$  – сопротивление растекания, Ом.

В современных ДШ значение  $R_s$  может быть уменьшено до нескольких единиц Ом, а  $C_B$  – до 0,09...0,23 пФ [7]. Тогда постоянная времени составит  $\tau_s = 10^{-12}$  с. Таким образом, величины  $\tau_s$  и  $\tau_r$  практически не влияют на быстродействие ДШ.

В работе [7] показано, что при больших значениях тока неосновные носители начинают существенно влиять на характеристики диодов. Время жизни неосновных носителей до их рекомбинации, которое обычно составляет  $10^{-7}$  с, на пять-шесть порядков превышает значение времени  $\tau_s$  и  $\tau_r$ .

Установленные требования к качеству функций СВЧ приборов с барьерами Шоттки [7] диктуют необходимость глубокого исследования физической сущности процессов изготовления и реальных вольт-амперных характеристик барьерных переходов.

В работе проведен сравнительный анализ точности методов определения высоты барьера Шоттки  $\phi_{bn}$

\*dems562@gmail.com

по вольт-амперным характеристикам (ВАХ) на основе экспериментальных данных, полученных для барьеров  $Ag/n - n^+GaAs$ .

### 3. ОПИСАНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Известно несколько методов определения высоты потенциального барьера  $\phi_b$  [1, 3, 5, 7, 8]. Одним из них является метод определения  $\phi_b$  по прямым ветвям вольт-амперных характеристик [7].

При низком уровне инжекции перенос заряда в диодах Шоттки осуществляется главным образом основными носителями [8]. Но при достаточно больших прямых смещениях коэффициент инжекции неосновных носителей  $\gamma$  (т.е. отношение тока неосновных носителей к полному току) возрастает с ростом тока.

Rhoderick [8] предположил, что в диодах Шоттки на полупроводниках с высокой подвижностью носителей заряда ток в прямом направлении определяется термоэлектронной эмиссией. Для низкого уровня легирования при термоэлектронной эмиссии сопротивление контакта  $R_c$  не зависит от концентрации доноров  $N_D$ .

Барьеры Шоттки  $Ag/n - n^+GaAs$ , изготавливали в вакууме методом термического испарения на эпитаксиальном монокристаллическом  $n - n^+GaAs$  (111) В, с  $N_D = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , подвижностью  $\mu > 5000 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  и толщиной эпитаксиального слоя - 2 мкм. Исследовали четыре партии образцов, изготовленных при различных температурах отжига  $t_{отж}$ : 703, 753, 803, 853 К и времени отжига  $\tau_{отж} = 6 \cdot 10^2$  секунд. Измерение ВАХ проводили с помощью четырехзондового метода [10].

При анализе ВАХ тонкопленочных структур с барьером Шоттки предполагалось, что в исходных структурах механизм переноса носителей заряда при концентрации свободных носителей  $N_D = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  в GaAs определяется термоэлектронной эмиссией (Т-эмиссией). Параметры контактов определяли по вольт-амперным характеристикам четырьмя различными методами [7, 8, 10-13].

В работе Sze S. M. [7] высота барьера определяется по формуле:

$$\phi_{bn} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{A^{**} T^2}{I_s} \right), \quad (1)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана, Дж/град;  $T$  – температура окружающей среды, К;  $q$  – заряд электрона, Кл;  $A^{**}$  – эффективная постоянная Ричардсона, для GaAs  $A^{**} = 120 \text{ А} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$ .

Экстраполяционная величина плотности тока  $I$  при нулевом напряжении дает ток насыщения  $I_s$ .

Значение тока насыщения барьера Шоттки из вольт-амперной характеристики в обратном направлении определить сложно из-за влияния поверхностных токов, воздействия сил зеркального изображения и краевых эффектов.

На рис. 1 показано определение величины плотности тока насыщения  $I_s$  контактов  $Ag/n - n^+GaAs$  по вольт-амперной характеристике методом линейной экстраполяции (экспериментальные исследования).

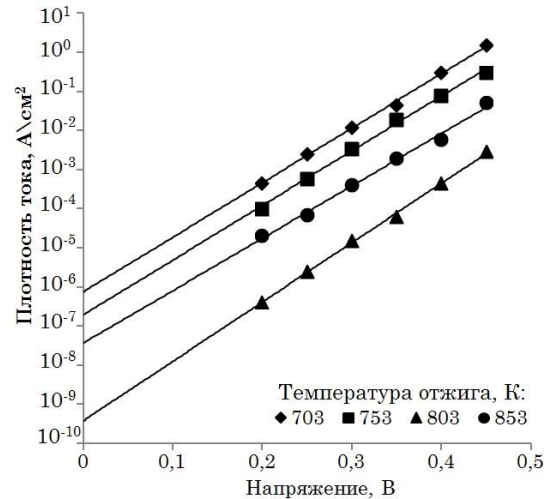


Рис. 1 - Определение методом линейной экстраполяции значения плотности тока насыщения по прямым ветвям ВАХ контактов  $Ag/n - n^+GaAs$

Фактор неидеальности  $\eta$  определяется согласно Sze S.M. [7] по ВАХ при прямом смещении (рис. 1) по формуле:

$$\eta \equiv (q/(kT)) \cdot \partial V / (\partial \ln I), \quad (2)$$

где  $V$  – напряжение,  $I$  – плотность тока.

Rhoderick E.H. и Williams R.H. [8] описали вольт-амперную характеристику с учетом ограничения числа параметров, описывающих стационарную ВАХ, до четырех (высоты барьера Шоттки  $\phi_b$ , фактора неидеальности  $\eta$ , последовательного  $R_s$  и шунтирующего  $R_p$  сопротивлений) в виде:

$$I = I_0 \exp(qV_{pn}/\eta kT) [1 - \exp(-qV/kT)] + V_{pn}/R_p, \quad (3)$$

где  $I_0 = A^{**} T^2 S \exp(-q\phi_b/kT)$  – ток насыщения,  $V_{pn} = V - IR_s$  – напряжение на переходе металл-полупроводник.

Из этого уравнения были определены условия [8,9], при которых: вклад  $R_s$  и  $R_p$  очень мал (менее 1%) и ими можно пренебречь: ограничение сверху  $IR_s/V_{pn} < 10^{-2}$ ,  $\Delta V/V$  – относительная погрешность приложенного напряжения и ограничение снизу  $\eta kT/(qIR_p)(\ln(I/I_0) - 1) > 10^2$ .

Условие, когда вклад барьера Шоттки на фоне этих сопротивлений значительный (для достижения погрешности менее 1% на фоне погрешности измерения) [8,9]: ограничение сверху  $IR_s/V_{pn} < V/100\Delta V$  и ограничение снизу  $\eta kT/(qIR_p)(\ln(I/I_0) - 1) > 100\Delta V/V$ . Если на ВАХ отсутствуют участки, ограниченные этими условиями, то она не дает информации о коэффициенте неидеальности и высоте барьера.

Наиболее простым в реализации является расчет параметров ВАХ по методу, предложенному Rhoderick E.H. в работе [8], где ток через барьер Шоттки описан выражением:

$$I = I_0 \exp(qV/\eta kT) [1 - \exp(-qV/kT)].$$

После построения ВАХ в координатах  $\ln(I/[1 - \exp(-qV/kT)]) \propto V$ , проводят аппроксимацию прямой линейного участка  $y = a + bx$ , получают коэффициенты  $b = \ln(I_0)$  и  $a = q/\eta kT$ , откуда рассчитывают  $\phi_b$  и  $\eta$ .

Недостаток метода [8] - отсутствие учета последовательного сопротивления, из-за чего могут возникать дополнительные ошибки при определении участка ВАХ, где этим влиянием пренебрегают.

В [11-13] для расчета параметров БШ рассмотрен метод прямой аппроксимации всей длины ВАХ (the direct approximation method), описанной формулой (3), недостатком которого являются сложные расчеты. В [9] предложена программа IVbarrierCalc2, позволяющая облегчить этот процесс.

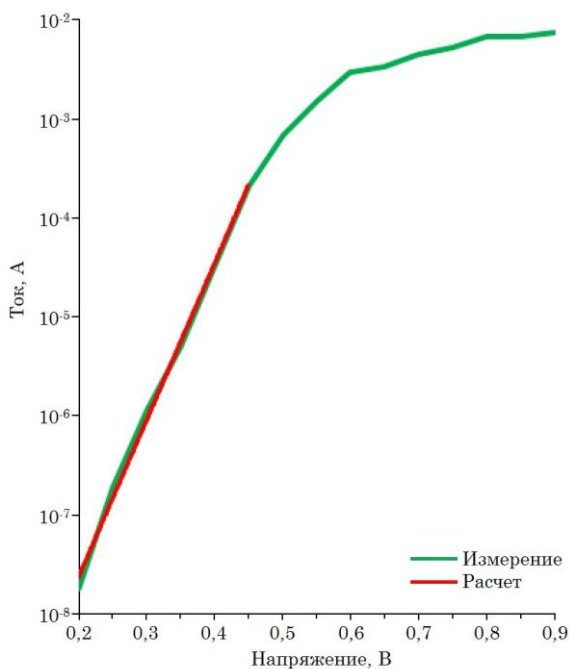
На рис. 2 представлена экспериментальная ВАХ контакта Ag/n-n<sup>+</sup>GaAs, изготовленного при температурном режиме  $t_{отж} = 803$  К,  $\tau_{отж} = 6 \cdot 10^2$  секунд, для которой проведен автоматизированный расчет параметров по ВАХ (табл. 1) по методу direct approximation и по методу Rhoderick с помощью программы IVbarrierCalc2 [9].

Результаты расчетов по методам direct approximation и Rhoderick приведены в таблице 1.

Для расчета использованы следующие исходные данные: температура контакта – 300 К, площадь контакта - 0,075 см<sup>2</sup>, постоянная Ричардсона – 120 А·см<sup>2</sup> К<sup>2</sup>.

**Таблица 1** – Результаты автоматизированного расчета параметров барьерных переходов Ag/n-n<sup>+</sup>GaAs

Параметр	Метод расчёта	Расчётное значение
Фактор неидеальности $\eta$	direct approx.	1,08684728226394
	Rhoderick	1,10434728226394
Высота барьера $\phi_{bn}$ , В	direct approx.	0,983609982375663
	Rhoderick	0,9798599823375663
Сопротивление растекания $R_s$ , Ом	direct approx.	3,70775461196899
Погрешность $e$	direct approx.	0,0748610603024499
	Rhoderick	0,0741855437218312



**Рис. 2** – ВАХ для автоматизированного расчета параметров барьерных переходов Ag/n-n<sup>+</sup>GaAs

Williams R.H. [8] разработал рекомбинационную модель тока, в которой для переходов металл-полупроводник с высотой энергетического барьера  $\phi_b > 0,5 E_g$  фактор неидеальности равен:

$$\eta = \phi_b / 0,5 E_g, \quad (4)$$

где  $E_g$  – ширина запрещенной зоны полупроводника.

Значения автоматизированного расчета по методам direct approximation и Rhoderick, округленные до 3-го знака, данные расчета параметров по методу Sze и результаты расчетов по методу Williams для барьерных переходов Ag/n-n<sup>+</sup>GaAs представлены в таблице 2.

**Таблица 2** - Параметры барьерных переходов Ag/n-n<sup>+</sup>GaAs, рассчитанные различными методами

№ партии	$t_{отж}$ , К	Метод расчёта	$\eta$	$\phi_{bn}$ , В	$R_s$ , Ом
1	703	direct approx.	1,254	0,773	0,22
		Rhoderick	1,204	0,784	
		Williams	1,095	0,78	
		Sze	1,176	0,78	
2	753	direct approx.	1,249	0,805	0,76
		Rhoderick.	1,3	0,8	
		Williams	1,22	0,87	
		Sze	1,176	0,87	
3	803	direct approx.	1,087	0,984	3,7
		Rhoderick	1,104	0,98	
		Williams	1,376	0,98	
		Sze	1,276	0,98	
4	853	direct approx.	1,328	0,849	1,03
		Rhoderick	1,34	0,847	
		Williams	1,207	0,86	
		Sze	1,142	0,86	

По результатам расчетов по методу, предложенному Williams R.H., было определено, что для барьера Шоттки Ag/n-n<sup>+</sup>GaAs с  $\phi_{bn} = 0,78...0,98$  В,  $N_D = 10^{16}$  см<sup>-3</sup> и температуре 300 К фактор неидеальности  $\eta$  изменяется соответственно от  $\eta = 1,095$  до  $\eta = 1,376$ , что соответствует рекомбинационной модели тока.

В ряде первоисточников [7, 8] было отмечено, что фактор неидеальности  $\eta$  при низком уровне легирования ( $N_D = 10^{15}$  см<sup>-3</sup>) и температуре 300 К близок к 1, но при росте уровня легирования ( $N_D = 10^{16}$  см<sup>-3</sup>) отличие  $\eta$  от единицы становится существенным.

Сравнительный анализ полученных значений фактора неидеальности  $\eta$  (табл. 2), рассчитанных различными методами, показал, что для барьерных переходов на основе серебра к GaAs с  $N_D = 10^{16}$  см<sup>-3</sup>, созданных при рекомендуемом способе термической обработки ( $t_{отж} = 803$  К,  $\tau_{отж} = 6 \cdot 10^2$  секунд,  $\phi_{bn} = 0,98$  В), наименьшее значение  $\eta = 1,087$  получено по методу расчета direct approximation, наибольшее  $\eta = 1,376$  по методу Williams.

Исследования показали, что для определения высоты потенциального барьера при небольшой протяженности экспоненциального участка ВАХ метод

direct approximation является наиболее точным, поскольку он учитывает последовательное сопротивление и участок ВАХ при  $V < kT/q$ .

Нелинейный характер зависимости  $\phi_{bn}$  от приложенного напряжения проявляется в области смещений, ограниченной отрезками между 0,44...0,74 В (рис. 2), что приводит соответственно и к изменению фактора неидеальности  $\eta$ .

#### 4. ВЫВОДЫ

Увеличение высоты барьера влияет на фактор неидеальности. При рекомендуемом способе термической обработки барьерных переходов Ag/n - n<sup>+</sup>GaAs ( $t_{отж} = 803$  К,  $\tau_{отж} = 6 \cdot 10^2$  секунд,  $\phi_{bn} = 0,98$  В)

значения фактора неидеальности варьируются в диапазоне  $\eta = 1,087...1,376$  согласно результатам расчетов по ВАХ четырьмя различными методами. Наименьшее значение  $\eta = 1,087$  получено по методу direct approximation, а наибольшее  $\eta = 1,376$  по методу Williams.

Нелинейный характер зависимости  $\phi_{bn}$  от приложенного напряжения проявляется в области смещений, ограниченной отрезками между 0,44...0,74 В, что приводит соответственно и к изменению фактора неидеальности  $\eta$ .

При небольшой протяженности экспоненциального участка ВАХ для определения высоты потенциального барьера метод direct approximation является наиболее точным, поскольку он учитывает последовательное сопротивление и участок ВАХ при  $V < kT/q$ .

## The Research of Influence of the Barrier Transition Parameters Determination Methods on their Accuracy

V.S. Dmitriev

Zaporizhzhya State Engineering Academy, 226, Soborny Ave., 69006 Zaporizhzhya, Ukraine

The accuracy of the main qualitative barrier transitions characteristics (barrier height  $\phi_b$  and nonideality factor  $\eta$ ) depends on the accuracy of the measurement as the current and voltage as their determination method. The methods for determining the Schottky barrier height using current-voltage characteristics are considered and tested at the Ag/n - n<sup>+</sup>GaAs barrier transitions, which are made using different heat treatment regimes. It is established that the method of calculating the current-voltage characteristics by the Rhoderick method is the simplest, but it does not take into account the series resistance, which can lead to additional errors in determining the current-voltage characteristic section where this influence can be neglected. It is established that the most accurate method is the direct approximation method, which takes into account the effect of the series resistance in calculating the non-ideality factor and the Schottky barrier height.

**Keywords:** Current-voltage characteristic, Schottky barrier height, Non-ideality factor, Sequential resistance, Gallium arsenide, Silver.

## Вплив методів визначення параметрів бар'єрного переходу на їх точність

В.С. Дмитрієв

Запорізька державна інженерна академія, пр. Соборний, 226, 69006 Запоріжжя, Україна

Точність основних якісних показників бар'єрних переходів (висота бар'єру  $\phi_b$  і фактор неідеальності  $\eta$ ), залежить від точності вимірювання струму та напруги та від методу їх визначення. Розглянуто і апробовано методи визначення висоти бар'єру Шотткі за вольт-амперними характеристиками на прикладі бар'єрних переходів Ag/n - n<sup>+</sup>GaAs, виготовлених при різних режимах термообробки. Встановлено, що найбільш простим в реалізації є метод розрахунку параметрів вольт-амперної характеристики за методом Rhoderick Е.Н., проте він не враховує послідовний опір, через що можуть виникати додаткові помилки при визначенні ділянки вольт-амперної характеристики, де цим впливом нехтують. Встановлено, що найбільш точним методом є метод direct approximation, який враховує вплив послідовного опору при розрахунку фактора неідеальності та висоти бар'єру Шотткі.

**Ключові слова:** Вольт-амперна характеристика, Висота бар'єру Шотткі, Фактор неідеальності, Послідовний опір, Арсенід галію, Срібло.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. M.P. Hernández, C.F. Alonso, J.L. Peña, *J. Phys. D Appl. Phys.* **34**, 1157 (2001).
2. N.A. Torkhov, *Semiconductors+* **44**, 737 (2010).
3. S. Chand, L. Kamar, *Indian J. Eng. Mater. S.* **7**, 268 (2000).
4. S.A. Zuev, G.V. Kilessa, E.E. Asanov, V.V. Starostenko, S.V. Pokrova, *Semiconductors+* **50**, 810 (2016).
5. V.G. Bozhkov, A.V. Shmargunov, *21th International Crimean Conference – Microwave and Telecommunications (CRIMICO-2011)*, 246 (Sevastopol: Veber: 2011).

6. P. Jayavel, J. Kumar, P. Ramasam, R. Premanand, *Indian J. Eng. Mater. S.* **7**, 340 (2001).
7. S.M. Sze, K.K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices, 3rd Edition* (Hoboken: A John Wiley & Sons Inc.: 2007).
8. E.H. Roderick, R.H. Williams *Metal-Semiconductor Contacts* (Oxford: Clarendon Press: 1988).
9. Ya.Ya. Kudryk, V.V. Shynkarenko, V.S. Slipokurov, R.I. Bigun, R.Ya. Kudryk, *24th International Crimean Conference – Microwave and Telecommunications (CRIMICO-2014)*, 673 (Sevastopol: Veber: 2014).
10. *Annual Book of ASTM Standards 2010* (Ed. V.A. Mayer) (West Conshohocken: ASTM International: 2010).
11. A. Ferhat-Hamida, Z. Ouennoughi, A. Hoffmann, R. Weiss, *Solid State Electron.* **46**, 615 (2002).
12. N. Karaboga, S. Kockanat, H. Dogan, *Appl. Intell.* **38**, 279 (2013).
13. A. Ortiz-Conde, Y. Ma, J. Thomson, E. Santos, J.J. Liou, F.J. Garcia Sánchez, M. Lei, J. Finol, P. Layman, *Solid State Electron.* **43**, 845 (1999).