

УДК 621.382.2

**МОДЕЛЬ ОБРАТНОЙ ВОЛЬТАМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ И  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТА ШОТТКИ  
С ОХРАННЫМ КОЛЬЦОМ**

Я.А. СОЛОВЬЕВ

*ПРУП "Завод Транзистор"  
Корженевского, 16, Минск, 220064, Беларусь**Поступила в редакцию 3 сентября 2004*

В статье представлен метод определения высоты барьера Шоттки, основанный на оптимизации параметров модели обратной вольтамперной характеристики. Произведено экспериментальное сравнение с графоаналитическим методом определения высоты барьера. Получена высокая степень соответствия.

*Ключевые слова:* диод Шоттки, вольтамперная характеристика, высота барьера.

**Введение**

Диоды с контактом Шоттки в последнее время завоевывают все большую популярность в качестве выпрямителей в силовой преобразовательной технике. Диоды с контактом Шоттки по сравнению с диодами на основе  $p-n$ -перехода имеют такие фундаментальные преимущества, как меньшее падение напряжения при одном и том же значении прямого тока, а также улучшенное быстродействие, характерное для всех приборов, работающих только на основных носителях [1]. В зависимости от условий применения предъявляются следующие требования к электрическим параметрам диода с контактом Шоттки: падение напряжения на диоде  $U_F$  при протекающем прямом токе  $I_F$ , максимальное допустимое обратное напряжение  $U_{Rmax}$ , постоянный обратный ток  $I_R$ , протекающий через диод при подаче на него обратного напряжения  $U_R$  [2]. Система названных характеристик диода с контактом Шоттки полностью описывается вольтамперной характеристикой (ВАХ) диода, форма которой определяется параметрами контакта Шоттки: высотой потенциального барьера  $\phi_B$ , толщиной переходного слоя  $\delta$ , а также плотностью поверхностных состояний на границе металл–полупроводник  $D_S$  [3].

Широко известны три основных метода измерения  $\phi_B$ : метод ВАХ, CV-метод, фотоэлектрический метод и [4]. Метод ВАХ наиболее прост в реализации, однако из-за неоднозначности графоаналитического определения линейного участка ВАХ он не всегда приводит к достаточно точным измерениям  $\phi_B$ , коэффициента неидеальности и последовательного сопротивления  $R_{SER}$ . Для снижения субъективности аппроксимации линейного участка ВАХ предложены методики, включающие построение графиков вспомогательных функций [5, 6], либо встречных диодных структур [7, 8]. Однако все указанные методики не позволяют определять физические параметры контактов Шоттки, такие, как  $\delta$  и  $D_S$ , а всего лишь заменяют их искусственным параметром — коэффициентом неидеальности  $n$ . От данного недостатка свободна методика оптимизация параметров математической модели ВАХ контакта Шоттки [9].

## Математическая модель обратной ВАХ контакта Шоттки

Обратная ВАХ контакта Шоттки несет в себе больше информации о состоянии границы раздела металл–полупроводник, чем прямая. Согласно теории термоэлектронной эмиссии она описывается выражением [3]:

$$I_r = S * A^{**} T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $S$  — площадь контакта Шоттки,  $A^{**}$  — модифицированная эффективная постоянная Ричардсона,  $T$  — абсолютная температура,  $q$  — элементарный заряд,  $k$  — постоянная Больцмана. В свою очередь при обратном смещении контакта Шоттки высота барьера  $\phi_B$  определяется как:

$$\phi_B = \phi_{B0} - \Delta\phi - \Delta\phi_{\tilde{N}\partial\lambda\partial\tilde{E}\times}, \quad (2)$$

где  $\phi_{B0}$  — высота барьера в случае плоских зон,  $\Delta\phi$  — понижение высоты барьера за счет эффекта Шоттки,  $\Delta\phi_{\text{СТАТИЧ}}$  — дополнительное статическое понижение высоты барьера, обусловленное наличием промежуточного слоя диэлектрика на границе металл–полупроводник. Понижение барьера за счет эффекта Шоттки вычисляется из выражения

$$\Delta\phi = \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_S}}, \quad (3)$$

где  $E$  — электрическое поле в полупроводнике вблизи границы раздела,  $\epsilon_S$  — диэлектрическая постоянная полупроводника. Величина  $E$  — функция от приложенного к контакту Шоттки отрицательного напряжения  $V$ :

$$E = \sqrt{\frac{2qN_D}{\epsilon_S} \left( V_{bi} + V - \frac{kT}{q} \right)}, \quad (4)$$

где  $N_D$  — концентрация примеси в полупроводнике,  $V_{bi}$  — контактная разность потенциалов.

Дополнительное статическое понижение описывается формулой

$$\Delta\phi_{\tilde{N}\partial\lambda\partial\tilde{E}\times} = \alpha E, \quad (5)$$

где  $\alpha$  — коэффициент, характеризующий влияние промежуточного слоя [4]:

$$\alpha = \frac{\delta\epsilon_S}{(\epsilon_I + q\delta D_S)}, \quad (6)$$

где  $\epsilon_I$  — диэлектрическая постоянная промежуточного слоя.

Таким образом, в контактах Шоттки с охранным кольцом, предотвращающим краевые утечки, обратная ВАХ в начальной части (без учета влияния лавинного пробоя) должна полностью описываться совокупностью выражений (1)–(6).

## Методика эксперимента

Тестовые структуры контактов Шоттки с охранным кольцом, разрез которой представлен на рис. 1, были изготовлены по планарной технологии на пластинах монокристаллического кремния КЭФ 0,5 (111). В качестве барьерообразующего металла использовались пленки молибдена, полученные магнетронным распылением мишени с чистотой не хуже 99,93 %.

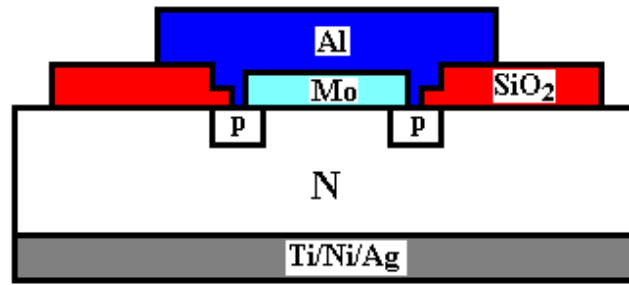


Рис. 1. Разрез тестовой структуры контакта Шоттки с охранным кольцом

Прямая и обратная ВАХ диодной структуры измерялись при помощи автоматизированной измерительной системы HP 4061A (*Hewlett Packard*, США). Определение параметров контакта Шоттки  $\varphi_{B0}$  и  $\alpha$  производилось по методике оптимизации параметров математической модели [9]. В качестве целевой функции выбрана сумма квадратов относительной разности измеренного  $I_{RM}$  и рассчитанного по формулам (1)–(6)  $I_{RS}$  значений обратного тока:

$$F = \sum_{i=1}^N \left( \frac{I_{RM} - I_{RS}}{I_{RM}} \right)^2, \quad (7)$$

где  $N$  — количество точек измерений. В качестве критерия оптимизации были выбраны следующие условия:

$$\frac{\partial F}{\partial \varphi_{B0}} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \alpha} = 0. \quad (9)$$

Оптимизация производилась методом Ньютона, реализованным в табличном процессоре Excel. Для сравнения также определялась эффективная высота барьера ( $\varphi_E = \varphi_{B0} - \Delta\varphi$ ) графоаналитическим методом из измерений прямой ветви ВАХ.

### Результаты эксперимента

Экспериментальные ВАХ контакта Шоттки представлены на рис. 2. Как видно из рис. 2, обратная ветвь контакта Шоттки, рассчитанная по формулам (1)–(6), в диапазоне обратных напряжений 0–10 В совпадают с точностью менее 3 % при значении  $\varphi_{B0} = 0,6722$  В, и коэффициенте  $\alpha = 5,629$  Å. Данное значение  $\varphi_{B0}$  хорошо согласуется с литературными данными, где для контакта молибден–кремний  $n$ -типа приводится значение  $\varphi_{B0} = 0,68$  В [3]. Полученная из анализа прямой ветви ВАХ величина  $\varphi_E$  составила 0,6495 В, т.е. при вычисленной для нулевого смещения величине  $\Delta\varphi = 0,022$  В разница в определении высоты барьера между двумя моделями составляет 0,0007 В.

Расхождение модели обратной ВАХ и измеренных значений в области больших смещений может быть обусловлено влиянием не учтенных в модели эффектов: генерации носителей заряда в области пространственного обеднения, лавинным умножением носителей заряда, неоднородностью высоты барьера по площади контакта.

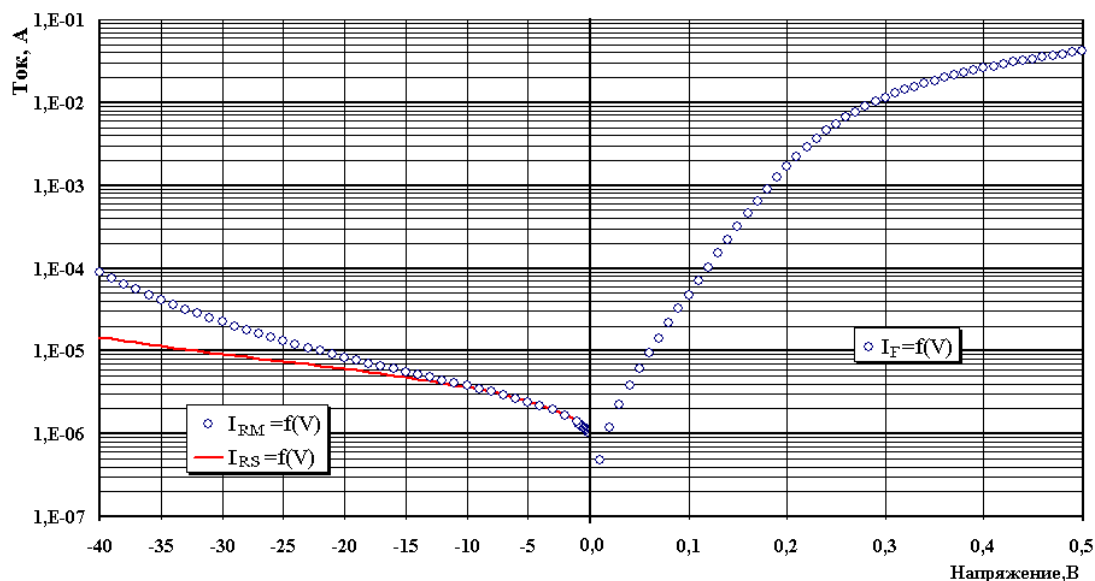


Рис. 2. Экспериментальная и расчетная ВАХ контакта Шоттки с охранным кольцом

### Заключение

Предложенная методика позволяет на основе оптимизации параметров модели обратной ВАХ более точно определить высоту барьера Шоттки, а также состояние границы раздела и может применяться для тестирования и оптимизации технологического процесса изготовления структур с диодами Шоттки.

## REVERSE V-I CHARACTERISTICS MODEL AND PARAMETERS EXTRACTION OF SCHOTTKY CONTACT WITH GUARD RING

J.A. SOLOVJOV

### Abstract

Method of Schottky barrier height definition based on the parameters optimization of reverse V-I characteristic model is represented. The experimental comparison with graphical method barrier height definition was made. A high degree of accordance was obtained.

### Литература

1. Попов С. // Электронные компоненты. 2002. № 3. С. 35–38.
2. Стриха В.И., Бузанева Е.В. Физические основы надежности контактов металл-полупроводник в интегральной электронике. М., 1987.
3. Зи С. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х кн. Кн. 1. Пер. с англ. М., 1984.
4. Родерик Э.Х. Контакты металл-полупроводник: Пер. с англ./ Под ред. Г.В. Степанова. М., 1982.
5. Lee T.C., Fung S., Beling C.D., Au H.L. // J. Appl. Phys. 1992. Vol. 72, № 10. P. 4739–4742.
6. Chattopadhyay P. // Solid-St. Electron. 1995. Vol. 38. № 3. P. 739–741.
7. Дущенко В.К. // Электронная техника. Сер. 10. Микроэлектронные устройства. 1992. Вып. 3, 4. С. 41–42.
8. Андреев Д.А., Грушко Н.С. // Микроэлектроника. 2002. Т. 31. № 2. С. 142–146.
9. Osvald J., Dobročka E. // Semicond. Sci. Technol. 1996. № 11. P. 1198–1202.