

**Я.Я. Кудрик, В.В. Шинкаренко, В.С. Слепокуров,
Р.И. Бигун¹, Р.Я. Кудрик¹**

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ БАРЬЕРА ШОТТКИ ИЗ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК (ОБЗОР)

Приведен обзор методов определения высоты барьера Шоттки из результатов измерений вольт-амперных характеристик (ВАХ) применительно к широкозонным полупроводникам. Проведена апробация этих методов на примере диодов Шоттки Au-TiB₂-n-SiC 6H. Показано повышение точности для методов, учитывающих влияние последовательного сопротивления при расчете фактора идеальности и высоты барьера, на примере методов Чонга и прямой аппроксимации. Установлено, что основную погрешность в рассчитанные параметры в исследуемом диоде вносит несоответствие реальной ВАХ ее модели: температурная зависимость высоты барьера, зависимость фактора идеальности от напряжения. Показана необходимость определения механизма токопереноса для корректного расчета высоты барьера Шоттки. Обнаружено, что метод энергии активации и метод Сато применимы только при отсутствии температурной зависимости высоты барьера и частично применимы при линейной зависимости высоты барьера от температуры, в иных случаях их результаты будут спорны.

Ключевые слова: барьер Шоттки, широкозонный полупроводник, фактор идеальности, ВАХ.

1. ВВЕДЕНИЕ

Контакты металл-полупроводник являются неотъемлемой частью большинства полупроводниковых электронных и оптоэлектронных приборов. При этом в зависимости от соотношения работ выхода металла и полупроводника реализуется либо омический, либо барьерный контакт (контакт Шоттки). Контакты Шоттки широко применяются как самостоятельно (в диодах Шоттки [1, 2]), так и как составная часть многих радиоэлектронных приборов (полевых транзисторах с барьером Шоттки [3], в качестве защитных в силовых полевых транзисторах с изолированным затвором, IGBT [4] и т.п.).

Высота барьера Шоттки (ВБШ) и фактор идеальности являются одними из важнейших параметров контакта Шоттки. Известен ряд методов их определения, в том числе по вольт-амперной характеристике (ВАХ) [2, 3, 5-20]. Попытки обобщить и систематизировать существующие методы были предприняты в ряде работ [2, 3, 5, 6], однако оценка точности, проводимая в большинстве работ, не учитывает особенности контактов к широкозонным полупроводникам. Говоря о точности определения ВБШ, применительно к контактам на основе широкозонных полупроводников, необходимо учитывать три фактора: точность измерения исходных величин (ток, напряжение, емкость), точность метода аппроксимации и точность соответствия предполагаемого и реализующегося в действительности механизмов токопереноса.

В данной работе проведено сравнение диапазонов применимости и точности методов определения параметров барьера Шоттки из результатов измерений ВАХ на базе экспериментальных данных, полученных для диода с барьером Шоттки на основе Au-TiB₂-n-SiC 6H.

2. ПАРАМЕТРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВБШ

В большинстве рассмотренных работ по методам определения параметров диодов Шоттки число параметров, описывающих стационарную ВАХ, ограничено до четырех: ВБШ ϕ_b , фактора идеальности n , последовательного R_s и шунтирующего R_p

сопротивлений, минимально необходимых для построения наших расчетов. С их учетом ВАХ можно записать в виде [7]:

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

где $I_0 = A^{**} T^2 S \exp(-q\phi_b/kT)$ – ток насыщения, $V_{pn} = V - IR_s$ – напряжение на переходе металл-полупроводник, V – напряжение, q – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, T – температура, A^{**} – эффективная постоянная Ричардсона, S – эффективная площадь контакта.

Из этого уравнения определим условия, при которых можно пренебречь последовательным и шунтирующим сопротивлениями (вклад их меньше 1%):

- ограничение сверху $IR_s/V_{pn} < 10^{-2}$, (2)

где $\Delta V/V$ – относительная ошибка приложенного напряжения,

- ограничение снизу $\frac{nkT}{qIR_p} (\ln(I/I_0) - 1) > 10^2$, (3)

и условия, когда вклад барьера Шоттки на фоне этих сопротивлений значителен (для достижения погрешности менее 1% на фоне ошибки измерения):

- ограничение сверху $\frac{IR_s}{V_{pn}} < \frac{V}{100\Delta V}$, (4)

- ограничение снизу $\frac{nkT}{qIR_p} (\ln(I/I_0) - 1) > 100 \frac{\Delta V}{V}$. (5)

Если на ВАХ нет участка, ограниченного условиями (4) и (5), то она практически не несет информации о высоте барьера и факторе идеальности.

3. ИССЛЕДУЕМЫЕ ОБРАЗЦЫ

Для сравнения результатов расчетов по исследуемым методам высоты барьера, фактора идеальности и логарифма произведения эффективной постоянной Ричардсона на эффективную площадь контакта $\ln(A^{**} S)$ было проведено исследование температурных зависимостей ВАХ диодов с барьером Шоттки на основе Au-TiB₂-n-SiC 6H (рис. 1, а). Диоды созданы на массивном полупроводнике с тыльным омическим контактом на основе силицида никеля по методике, описанной нами ранее [21]. Концентрация нескомпенсированной примеси в полупроводнике, полученная из вольт-фарадных характеристик (ВФХ) составила $(2...3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ БАРЬЕРА ИЗ ВАХ ПО РОДЕРИКУ

Наиболее простым в реализации среди рассмотренных методов является метод, описанный Родериком [7], согласно которому ток через диод Шоттки описывается зависимостью:

$$I = I_0 \exp(qV/nkT) [1 - \exp(-qV/kT)]. \quad (6)$$

Построив ВАХ в координатах $\ln(I)/[1 - \exp(-qV/kT)] \propto V$ и проведя аппроксимацию прямой $y = a + bx$ линейного участка, получают коэффициенты $b = \ln(I_0)$ и $a = q/nkT$, откуда соответственно рассчитывают ϕ_b и n . При расчетах эффективная постоянная Ричардсона часто берется равной модифицированной постоянной Ричардсона [7]:

$$A^* = 4\pi m^* q k^2 / h^3 = 120,173 \cdot (m^*/m) [A/cm^2 K^2], \quad (7)$$

где m^* – эффективная масса основных носителей тока, m – масса электрона, h – постоянная Планка.

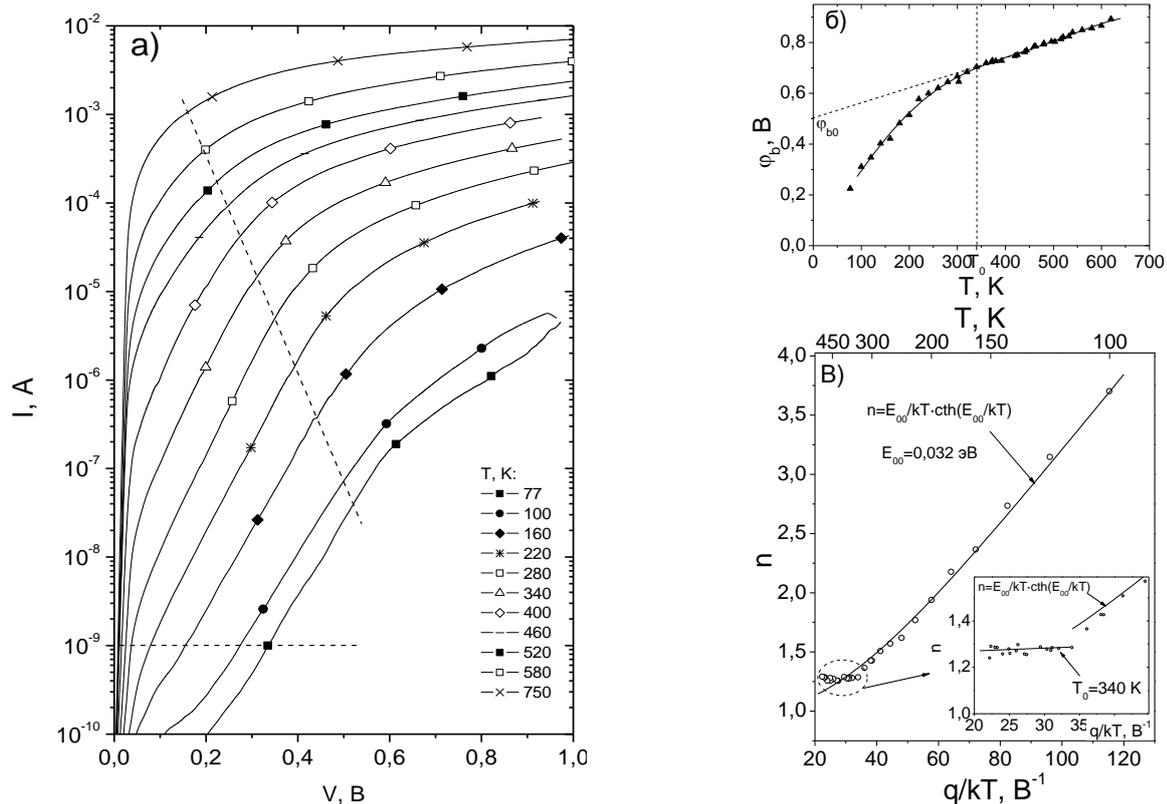


Рис. 1. Температурная зависимость ВАХ одного из диодов (а), температурные зависимости ВБШ (б) и фактора идеальности (в), рассчитанные по методу Родерика. Штриховыми прямыми ограничена зона, которая определяется зависимостью (6).

Преимуществом метода является возможность описания прямой и обратной ветви ВАХ одной зависимостью, а также учет измерений при $V < 3kT/q$. К недостаткам метода следует отнести отсутствие учета влияния последовательного сопротивления, в результате чего могут возникать дополнительные ошибки при определении участка ВАХ, где это влияние пренебрежимо мало.

При автоматизации метода удобно определять фактор идеальности, построив зависимость:

$$\frac{dV}{d \ln(I)} \frac{q}{kT} = n(V), \quad (8)$$

На рис. 2 (справа) представлен результат такого преобразования для ВАХ при $T = 340$ К. На кривой $n(V)$ наблюдается участок, для которого зависимость от напряжения мала. По этому диапазону напряжений и определяют величину фактора идеальности и ВБШ, пользуясь методом Родерика. Следует заметить, что нельзя утверждать о неизменности фактора идеальности от приложенного напряжения даже на выделенном участке. Эта зависимость в нашем случае внесет ошибку в точность определения фактора идеальности, а значит, и высоты барьера существенно большую, чем ошибки, вносимые точностью измерений. Характерный локальный максимум n при низких напряжениях и рост фактора идеальности от напряжения при больших напряжениях отмечался также рядом других авторов [5, 9, 23, 24].

Область применения метода ограничена условиями (2) и (3). Однако на практике при небольших значениях ВБШ либо больших последовательных сопротивлениях, выделить участок, не подверженный влиянию последовательного сопротивления, оказывается невозможным (см., например, график при $T = 580$ К на рис. 1, а). Один из путей решения этой проблемы, предложенный Норде, позволяет определить высоту барьера как в диапазоне

условий $V > 3kT/q$ и (3), так и в точке, находящейся вне (выше) этих условий, но ниже условия (6).

Метод Норде [9] был разработан для фактора идеальности равного единице для случаев, когда влияние последовательного сопротивления на ВАХ вносит значительную ошибку в определение высоты барьера более простыми методами. Для корректного описания ВАХ при $V > 3kT/q$ формулу (1) нужно модифицировать к виду $I = A^{**} T^2 S \exp(q(V - IR_s - \phi_b)/kT)$, где R_s – последовательное сопротивление. Легко видеть, что построив функцию

$$F(V) \equiv V/2 - kT/q [\ln(I/T^2) - \ln(A^{**}S)],$$

получим $F(V) = IR_s + \phi_b - V/2$: при $R_s = 0$ наклон функции $dF/dV = -1/2$, при падении напряжения, в основном, на последовательном сопротивлении наклон составит $1/2$. Если наблюдается участок с наклоном $-1/2$, высота барьера определяется как отсечка линейной аппроксимации этого участка на ось ординат. Если же влияние последовательного сопротивления велико во всем диапазоне напряжений, то используется поиск минимума функции F , который достигается при некоторых значениях V_{\min} и I_{\min} , тогда значения последовательного сопротивления и высоты барьера могут быть получены как $R_s = kT/qI_{\min}$ и $\phi_b = F(V_{\min}) + V_{\min}/2 - kT/q$ соответственно.

Наряду со своими преимуществами метод не лишен недостатков: во многих случаях фактор идеальности не равен единице, что внесет ошибку в результат расчета. Расчет производится по одной точке ВАХ, что может негативно сказаться на точности расчета. Ниже будет рассмотрен целый ряд работ, в которых сделаны попытки нивелировать эти недостатки.

Метод Лина [10] основан на построении нескольких функций, подобных функции Норде, вида $G(I) \equiv V/\gamma - kT/q [\ln(I/T^2) - \ln(A^{**}S)]$, где γ произвольный параметр $\gamma > n$. Из этих кривых могут быть получены значения тока I_{\min} , при которых $G(I_{\min})$ минимальна. При $V > 3kT/q$ без учета шунтирующего сопротивления формулу (1) можно переписать:

$$I = I_s \exp(q(V - IR_s)/kT). \quad (8)$$

Видим, что исходя из определения G и формулы (8), зависимость $I_{\min}(\gamma)$ линейна и описывается выражением $I_{\min}(\gamma) = (\gamma - n)kT/qR_s$. По коэффициенту наклона зависимости определяют последовательное сопротивление, по отсечке – фактор идеальности. Высоту барьера можно найти как экстраполяцию зависимости $G_{\min}(\gamma)$ к значению $\gamma = n$.

В работах Cibils и Vuitrago [11] предложена подобная модификация метода Норде, однако вместо параметра γ введено некоторое параметрическое напряжение, выполняющее ту же функцию.

В методе Чонга и соавторов [12] предложено преобразование формулы (8):

$$V = \frac{nkT}{q} \ln(I) + \exp(\ln(I))R_s - \frac{nkT}{q} \ln(A^{**}T^2S) + n\phi_b,$$

откуда $\frac{dV}{d \ln(I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s$.

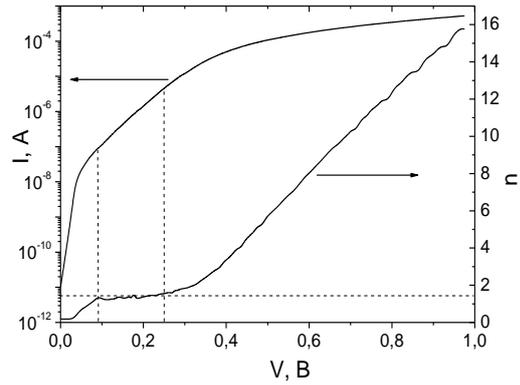


Рис. 2. Зависимость фактора идеальности от напряжения, рассчитанная по формуле (8), а также ВАХ исследуемого диода при $T = 340$ К. Штриховыми прямыми ограничена зона, которая определяется зависимостью (6).

То есть, построив зависимость $\frac{dV}{d \ln(I)} \propto I$ и проведя аппроксимацию ее прямой (рис. 3, а), получим коэффициенты: $a = nkT/q$ и $b = R_s$. Для того чтобы определить высоту барьера, построим зависимость $H(I) \equiv V - nkT/q [\ln(I/T^2) - \ln(A^*S)]$. Как видно из уравнения (8), $H(I) = IR_s + n\phi_b$, то есть, аппроксимируя построенную зависимость прямой, получим коэффициенты R_s и $n\phi_b$ (рис. 3, б). Нелинейность обоих графиков можно объяснить уже наблюдавшейся на рис. 3 нелинейностью $n(V)$.

Преимуществом метода Чонга является определение последовательного сопротивления наряду с высотой барьера и фактором идеальности, что не только дает дополнительные сведения о контакте, но и удобно с точки зрения автоматизации процесса расчета. К недостаткам следует отнести применимость метода только к диапазону напряжений выше $V > 3kT/q$.

Вернером [13] рассмотрены три различных метода для определения параметров диода Шоттки на основе ВАХ. Один из них совпадает с методом Чонга. Однако, как было показано, другой из рассмотренных им методов, который далее мы будем называть **методом Вернера**, дал наиболее точные значения ϕ_b , n и R_s . В методе Вернера используют дифференциальную проводимость реального диода $L = dI/dV$ при прямом смещении. Для $V - IR_s > 3kT/q$ с учетом уравнения (8) можно записать:

$$\frac{L}{I} = \frac{q}{nkT} (1 - LR_s),$$

откуда видно, что, построив зависимость $L/I = f(L)$ и проведя аппроксимацию ее прямой, из коэффициента наклона можно рассчитать R_s , а из отсечки можно получить значение фактора идеальности.

В работе Аубри и Меера [5] проведен сравнительный анализ методов Лина и Вернера и показано, что методы имеют математически схожие процедуры, соответственно их точность и ограничения близки.

Еще одним способом решения обозначенной проблемы является использование методов прямой аппроксимации (ПА) всей длины ВАХ упрощенным выражением (8) [14] или более полным (1) [15-18, 23]. Недостатком метода является относительная сложность расчета, однако нами разработана программа [19], позволяющая легко производить расчеты с помощью большинства вышеупомянутых методов, в том числе и проводить пакетный расчет параметров, что важно при статистических измерениях.

Во всех описанных выше случаях

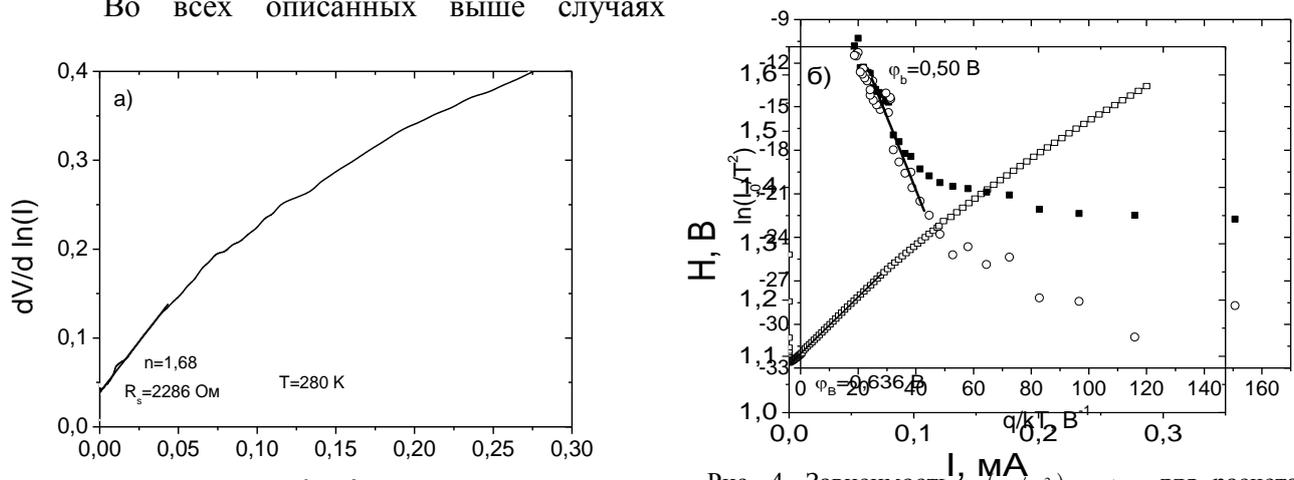


Рис. 4. Зависимость $\ln(I_0/T^2) \propto q/kT$ для расчета высоты барьера методом энергии активации.

Рис. 3. Расчет параметров по методу Чонга: (а) зависимость $dV/d \ln(I) \propto I$ для определения фактора идеальности и последовательного сопротивления, (б) функция H в зависимости от тока для определения высоты барьера.

произведение эффективной постоянной Ричардсона на эффективную площадь считалось

известным. Однако это произведение можно определить экспериментально, в случае, когда имеются температурные измерения ВАХ. Для этого надо использовать метод энергии активации (ЭА) [7] либо метод Сато [20]. Но следует учесть, что полученное с помощью этих двух методов значение высоты барьера находится в предположении отсутствия зависимости его от температуры. При наличии линейной температурной зависимости высоты барьера полученную величину часто обозначают ϕ_{b0} . Значение ϕ_{b0} рассчитано экстраполяцией зависимости $\phi_b(T)$ к температуре равной нулю. Однако это справедливо только для линейной температурной зависимости высоты барьера, когда она нелинейна, получим разные значения ϕ_{b0} для разных диапазонов температуры. В таком случае обязательно нужно указывать диапазон температур, в котором проводилось измерение, а также учитывать ошибку определения значения $\ln(A^{**}S)$, равную $q\beta/k$, где β – температурный коэффициент высоты барьера.

Метод энергии активации [7] состоит в определении $\ln(I_0)$ по одному из вышеописанных методов (Родерика, Чонга и ПА) для каждой температуры отдельно. Построив зависимость $\ln(I_0/T^2) \propto q/kT$ и проведя аппроксимацию ее прямой линией, получим коэффициенты: $a = \ln(A^{**}S)$ и $b = \phi_{b0}$ (см. рис. 4). Сами значения I_0 могут быть получены одним из перечисленных выше методов.

Метод Сато [20] состоит в том, что для определения высоты барьера берется не $\ln(I_0)$, а конкретная точка на ВАХ, определяемая по минимуму $F1_{\min}$ функции $F1 = (qV/2kT) - \ln(I/T^2)$ при некотором токе I_{\min} (рис. 5, а). В таком случае должно выполняться равенство

$$F2 \equiv 2F1_{\min} + (2-n)\ln(I_{\min}/T^2) = 2-n [\ln(SA^{**})+1] + (qn\phi_{b0}/kT), \quad (5)$$

откуда высота барьера ϕ_{b0} и $\ln(A^{**}S)$ находятся как коэффициенты линейной аппроксимации $a = 2-n[\ln(SA^{**})+1]$ и $b = n\phi_{b0}$ при известном факторе идеальности (рис. 5б).

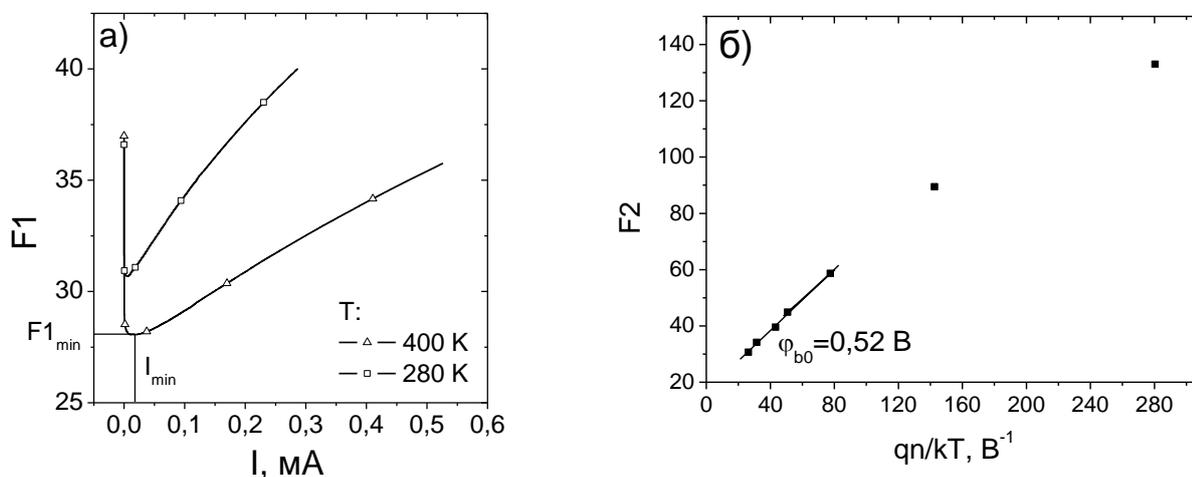


Рис. 5. Расчет высоты барьера методом Норде: а) зависимость функции F1 от тока для двух температур и б) зависимость функции F2 от qn/kT .

Таблица 1. Параметры барьера Шоттки, рассчитанные разными методами. Расчет для температуры вблизи 340 К (рис. 1, а).

Метод расчета	n	ϕ_b , В	$\ln(A^{**}S)$	R_s , Ом
Родерика	$1,51 \pm 0,05$	$0,704 \pm 0,003$	$-4,646^*$	
Чонга	$1,50 \pm 0,01$	$0,704 \pm 0,003$	$-4,646^*$	934 ± 30
ПА	$1.493 \pm 0,005$	$0,704 \pm 0,002$	$-4,646^*$	951 ± 40
ЭА		0,50	-4,0	
Сато		0,52	-4,1	
C-V		0,98		

Примечание: * – значения, взятые для расчета.

Таблица 2. Параметры барьера Шоттки, рассчитанные разными методами. Расчет для температуры вблизи 480 К (рис. 1, а).

Метод расчета	n	ϕ_b , В	R_s , Ом
Родерика	$1,6 \pm 0,12$	$0,789 \pm 0,005$	
Чонга	$1,5 \pm 0,15$	$0,79 \pm 0,01$	400 ± 25
ПА	$1,45 \pm 0,05$	$0,786 \pm 0,003$	370 ± 25

Параметры барьера Шоттки, рассчитанные разными методами при температурах 340 и 480 К, представлены в таблицах 1 и 2 соответственно. Для расчетов методом ЭА использованы результаты тока насыщения, определенные по методу Родерика. Полученное значение высоты барьера сильно занижено (см. табл. 1). Причиной этому служит температурная зависимость ϕ_b (рис. 1, б). Видно, что полученное из этих методов значение высоты барьера близко к значению, полученному линейной экстраполяцией к нулю температуры температурной зависимости высоты барьера, рассчитанной по методу Родерика (см. рис. 1).

Причиной увеличения ошибки расчета высоты барьера во всех трех методах является уменьшение протяженности логарифмического участка ВАХ и повышение сложности определения его границ. В расчетах по методу Чонга ошибка максимальна, так как учет участка ВАХ $V \sim kT/q$ в данном случае играет существенную роль в общей точности измерения.

Рассмотрим причины температурной зависимости определяемой высоты барьера. Во-первых, следует исключить влияние термополевого механизма токопереноса. Температурная зависимость фактора идеальности для этого механизма будет иметь вид:

$$n = E_{00} \operatorname{cth}(E_{00}/kT) / kT. \quad (6)$$

На рис. 6 представлен теоретический вид температурной зависимости фактора идеальности в предположении термополевого механизма токопереноса. Видно, что при значениях $n > 2.5$ коэффициент наклона зависимости $n = f(1/kT)$ становится равным параметру Падовани-Стреттона E_{00} , что может быть легко использовано для определения E_{00} .

Из рис. 1, в видно, что температурный ход фактора идеальности хорошо описывается формулой (6) в интервале температур 100...300 К, на участке 300...340 К наблюдается излом как в температурной зависимости фактора идеальности, так и высоты барьера (рис. 1, б), отражающий смену механизма токопереноса. Температурная зависимость фактора идеальности выше 340 К намного меньше зависит от температуры, и эта зависимость описывается линейным законом (рис. 7а).

В работе В.Г. Божкова [8] зависимость определяемой (эффективной) высоты барьера от фактора идеальности объяснена падением напряжения на переходном слое и для определения высоты барьера без влияния этого фактора использовать модифицированное уравнение для тока

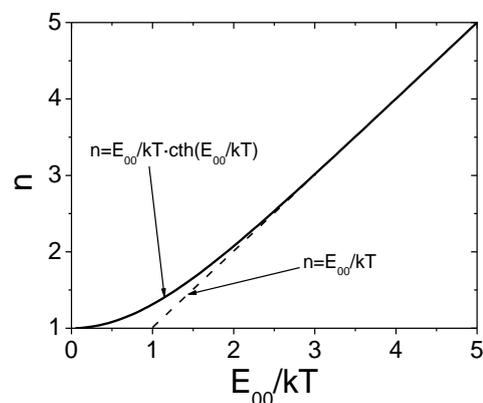


Рис. 6. Температурная зависимость фактора идеальности в предположении термополевого механизма токопереноса.

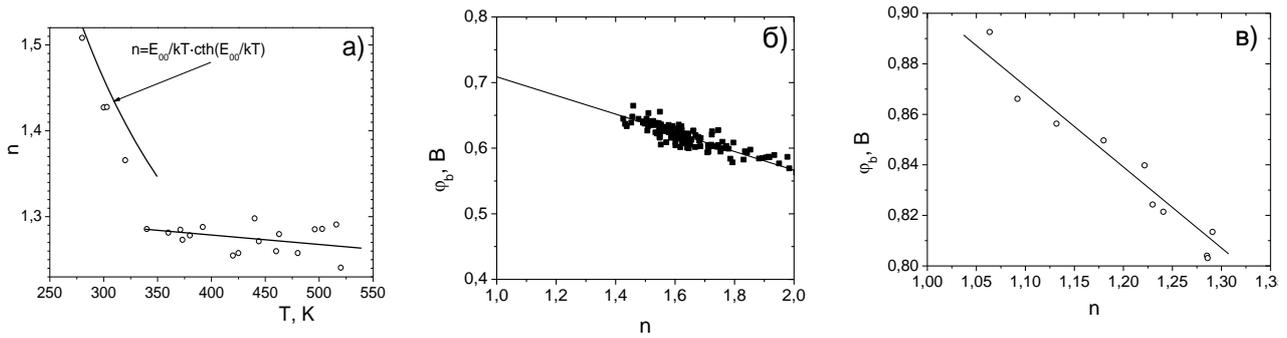


Рис. 7. Температурная зависимость фактора идеальности (а), зависимость эффективной высоты барьера от фактора идеальности для партии ДБШ при комнатной температуре (б) и для температурного диапазона 450...650 К (в).

насыщения: $I_0 = A^{**} T^2 S \exp(-q\varphi_b/nkT)$, иными словами $\varphi_{b, \text{eff}} = \varphi_b/n$. Однако это уравнение не объясняет линейную зависимость высоты барьера от фактора идеальности (рис. 7, б, в).

С другой стороны, в работе Широ Хары [22] показано, что значительную роль в формировании барьера Шоттки к карбиду кремния играют поверхностные состояния. Им была предложена другая зависимость, хорошо описывающая его и наши результаты: $\varphi_{b, \text{eff}} = n\varphi_{b0} - \zeta(n-1)$, где ζ – энергия поверхностных состояний. Больше возможных механизмов зависимости ВБШ от фактора идеальности описано в обзорах Тунга [24] и Бриллсона [25]. Для определения, какой из них реализуется на практике, необходимо комплексное исследование температурных зависимостей ВАХ с учетом данных, полученных другими методами.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные методы определения высоты барьера из ВАХ можно разделить две группы. К первой группе следует отнести методы, не требующие температурных измерений. Как показывает наше исследование, учет последовательного сопротивления и участка ВАХ при $V < kT/q$ может дать существенную поправку в величину определяемого последовательного сопротивления, в связи с чем методы Лина, Вернера и прямой аппроксимации более предпочтительны для определения высоты потенциального барьера при небольшой протяженности экспоненциального участка ВАХ, как это, например, наблюдается для ВАХ исследованного диода при $T \geq 480$ К.

Ко второй группе следует отнести методы энергии активации и модифицированный метод Норде, позволяющие получить дополнительную информацию о величине $\ln(A^{**} S)$. Однако полученные с их помощью значения высоты барьера справедливы только для отсутствия температурной зависимости ВБШ и частично применимы при ее линейной температурной зависимости, в случае же, когда она нелинейна, получим разные значения φ_{b0} для разных диапазонов температуры, что малоинформативно.

Обнаружено, что основную погрешность в рассчитанные параметры в исследуемом диоде вносит несоответствие реальной ВАХ ее модели: температурная зависимость высоты барьера и зависимость фактора идеальности от напряжения. В связи с вышесказанным можно заключить, что применительно к широкозонным полупроводникам на данном этапе их изучения наибольшей точностью обладают методы, позволяющие выявить и идентифицировать расхождение между моделью и измеренными данными, а именно: методы Лина, Вернера и Чонга. Показана необходимость исследования температурной зависимости фактора идеальности для корректного определения механизма токопереноса и ВБШ.

**Ya.Ya. Kudryk, V.V. Shynkarenko, V.S. Slipokurov, R.I. Bigun¹,
R.Ya. Kudryk¹**

METHODS FOR DETERMINATION OF SCHOTTKY BARRIER HEIGHT FROM I–V CURVES (REVIEW)

The methods for determination of Schottky barrier height in wide-gap semiconductors from the results of measurements of I – V curves are reviewed and tested by the example of Au-TiB₂- n -SiC 6H Schottky barrier diodes. The methods that take into account the effect of series resistance when calculating ideality factor and barrier height (such as the direct approximation and Cheung's methods) demonstrate improved accuracy. It is shown that the main inaccuracies in calculated parameters of the diodes under investigation are related to non-compliance of the real I – V curve with its model: dependence of barrier height on temperature and ideality factor on voltage. A correct calculation of the Schottky barrier height requires determination of current flow mechanism. It is found that both the activation energy and Sato methods are applicable only in the absence of temperature dependence of barrier height, and are partially applicable in the case of linear dependence of barrier height on temperature. In other cases, the results given by the above methods are controversial.

Keywords: Schottky barrier, wide-gap semiconductor, ideality factor, I – V curve.

1. *Полущук А.* Полупроводниковые приборы на основе карбида кремния – настоящее и будущее силовой электроники // Компоненты и технологии. – 2004. – № 8. – С. 40-45.
2. *Schroder D.K.* Semiconductor Material and Devices Characterization, 3rd Edition. – NY: John Wiley & Sons. – 2006.
3. *Sze S.M., Kwok K.N.* Physics of Semiconductor Devices, 3rd Edition. – New York: Wiley-Interscience, 2006.
4. *Полущук А.* Применение карбид-кремниевых диодов Шоттки в IGBT-инверторах с жестким переключением // Силовая электроника. – 2006. – № 1. – С. 102-106.
5. *Aubry V., Meyer F.* Schottky diodes with high series resistance: Limitations of forward I-V methods // J. Appl. Phys. – 1994. – **76**, №12. – P. 7973-7984.
6. *Sarpatawari K.* Toward understanding the electrical properties of metal/semiconductor Schottky contacts: The effects of barrier inhomogeneities and geometry in bulk and nanoscale structures. – PhD Diss. – The Pennsylvania State University. – 2009.
7. *Rhoderick E.H., Williams R.H.* Metal-Semiconductor Contacts. – Oxford: Clarendon Press. – 1988.
8. *Божков В.Г., Шмаргунов А.В.* Влияние нелинейной зависимости высоты барьера от смещения на измеряемые параметры контактов с барьером Шоттки // CriMiCo'2011 12-16 September 2011. – Sevastopol, Crimea, Ukraine. – P. 246-247.
9. *Norde H.* A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance // J. Appl. Phys. – 1979. – **50**, №7. – P. 5052-5053.
10. *Lien C.D., So F.C.T., Nicolet M.A.* An improved forward I-V method for non-ideal Schottky diodes with high series resistance // IEEE Trans. Electron. Devices. – 1984. – **ED-31**, №10. – P. 1502-1503.
11. *Cibils R.M., Buitrago R.H.* Forward I-V plot for non-ideal Schottky diodes with high series resistance // J. Appl. Phys. – 1985. – **58**. – P. 1075-1077.
12. *Cheung S.K., Cheung N.W.* Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics // Appl. Phys. Lett. – 1986. – **49**, №2. – P. 85-87.
13. *Werner J.H.* Schottky barrier and p-n-junction I/V plots – small signal evaluation // Appl. Phys. A. – **47**, №3. – P. 291-300.
14. *Bennett R.J.* Interpretation of forward bias behavior of Schottky barriers // IEEE Trans. Electron. Devices. – 1987. – **ED-34**, N4. – P. 935-937.
15. *Кудрик Я.Я.* Определение высоты барьера в диодах Шоттки с шунтирующим эффектом // Петербургский журнал электроники. – 2005. – № 1. – С. 95-99.
16. *Ferhat-Hamida A., Ouennoughi Z., Hoffmann A., Weiss R.* Extraction of Schottky diode parameters including parallel conductance using a vertical optimization method // Solid-State Electronics. – 2002. – **46**. – P. 615-619.
17. *Ortiz-Conde A., Yuansheng M., Thomson J. et al.*, Direct extraction of semiconductor device parameters using lateral optimization method // Solid-State Electronics. – 1999. – **43**. – P. 845-848.
18. *Karaboga N., Kockanat S., Dogan H.* The parameter extraction of the thermally annealed Schottky barrier diode using the modified artificial bee colony // Appl. Intell. – 2013. – **38**. – P. 279-288.
19. *Программа для расчета высоты барьера Шоттки [электронный ресурс] / Я.Я. Кудрик, В.В. Шинкаренко, В.С. Слепокуров, Р.И. Бигун, Р.Я. Кудрик: сайт. лаб. №33 ИФП им. В.Е. Лашкарева // режим доступа: <https://isp.kiev.ua/index.php/uk/component/content/article/908-publications/lab33/lab-33-ustanovky/3944>*
20. *Sato K., Yasumura Y.* Study of the forward I–V plot for Schottky diodes with high series resistance // J. Appl. Phys. – 1985. – **58**. – P. 3655-3657.

21. *Агеев О.А., Беляев А.Е., Болтовец Н.С. и др., Диоды с барьером Шоттки Au-TiB_x-n-6H-SiC: особенности токопереноса в выпрямляющих и невыпрямляющих контактах // ФТП. – 2009. – 43, №7. – С. 897-903.*
22. *Teraji T., Hara S. Control of interface states at metal/6H-SiC(0001) interfaces // Phys. Rev. B. – 2004. – 70. – P. 035312(1-19).*
23. *Kudryk Ya.Ya., Shynkarenko V.V., Slipokurov V.S., Bigun R.I., Kudryk Ya.Ya. Methods for determination of Schottky barrier height from I-V curves // CriMiCo'2014, September 7-13, 2014. – Sevastopol, Crimea. – P.673-674.*
24. *Tung R.T. Recent advances in Schottky barrier concepts // Mater. Sci. and Eng.: R. – 2001. – 35, №1-3. – P. 138.*
25. *Contacts to Semiconductors: Fundamentals and Technology / Ed. by L.J. Brillson. 1st Indian ed. – New Delhi: Crest Publishing House. – 2005.*

Институт физики полупроводников
им. В.Е. Лашкарева
НАН Украины,
проспект Науки, 41
03028 Киев

Получено 28.07.2014

¹Львовский национальный университет
им. Ивана Франко,
ул. Университетская, 1,
79000 Львов