

Методика визначення електричних параметрів діодів Шотткі

Цуканов^f О. В., ORCID [0000-0003-0489-4753](https://orcid.org/0000-0003-0489-4753)

Діденко^g Ю. В., к.т.н. доц., ORCID [0000-0001-7305-8519](https://orcid.org/0000-0001-7305-8519)

Татарчук^h Д. Д., д.т.н., доц., ORCID [0000-0003-1171-6701](https://orcid.org/0000-0003-1171-6701)

Кафедра мікроелектроніки, me.kpi.ua

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)

Київ, Україна

Драмарецький О. Г., с.н.с., ORCID [0000-0002-2157-3444](https://orcid.org/0000-0002-2157-3444)

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України
Київ, Україна

Анотація—У статті розглянуто методику визначення за ВАХ таких електричних параметрів діодів Шотткі, як висота потенціального бар'єра, коефіцієнт неідеальності, струм насичення та послідовний опір матеріалу та контактів, а також фактори, які впливають на точність визначення цих параметрів. Розглянуто існуючі методики визначення вказаних параметрів діодів Шотткі та проаналізовано їх переваги та недоліки. Представлено нову методику визначення електричних параметрів діодів Шотткі, яка має мінімальне середньоквадратичне відхилення і забезпечує більшу точність розрахунків, ніж існуючі методики.

Ключові слова — діод Шотткі, електричні параметри, вольт-амперна характеристика, аморфний індій-галій-оксид цинку.

I. ВСТУП

На сьогоднішній день карбід кремнію (SiC) є найбільш вживаним матеріалом для виготовлення діодів Шотткі, які мають ряд переваг порівняно з діодами, виготовленими з кремнію, а саме: менший час перемикавання, менші динамічні втрати, а також слабку залежність параметрів від температури. Проте технологія виготовлення діодів на основі SiC має певні недоліки: складність легування через низький коефіцієнт дифузії домішок у SiC, а також через значну кількість дефектів, які виникають у матеріалі у процесі виробництва. Пошук альтернативних матеріалів для виготовлення діодів Шотткі потребує значної кількості експериментальних досліджень і, відповідно, наявності ефективних методик визначення параметрів таких структур.

Одним з перспективних матеріалів для виготовлення діодів Шотткі є сполука індій-галій-оксид цинку (IGZO) [1]. Такі пристрої мають відмінні характеристики для використання їх у гнучкій високочастотній електроніці [2], а саме: високі робочі частоти (до 6,3 ГГц), висока швидкодія. Гнучкі IGZO-діоди першими в своєму класі досягли так званої «еталонної» частоти в 2,45 ГГц, яка охоплює головні комунікаційні канали, за винятком 4G і 5G. Також перевагою технології IGZO є зниження енергоспоживання за рахунок більшої рухливості електронів [3].

Загалом, гнучкі діоди Шотткі, виготовлені з IGZO, успішно конкурують із аналогічними пристроями, виготовленими із традиційних матеріалів [3] – органічних напівпровідників або ж кремній-вуглецевих наноматеріалів, завдяки таким властивостям IGZO, як оптична прозорість, висока рухливість носіїв заряду, механічна гнучкість та простота структурування [4]. Матеріал IGZO [1] також застосовують у пристроях пам'яті, сенсорах глюкози, датчиках температури, польових транзисторах із заслоном Шотткі [4].

Діод Шотткі має декілька електричних параметрів, які можна розрахувати на основі даних, отриманих з вольт-амперної характеристики, а саме: висота потенціального бар'єра, коефіцієнт неідеальності, струм насичення та послідовний опір матеріалу та контактів. Визначення наведених параметрів є актуальним для контролю якості готових діодів і дослідження параметрів діодів Шотткі, виготовлених з нових матеріалів, тому розроблення методики для визначення електричних параметрів з мінімальним середньоквадратичним відхиленням є вкрай актуальною задачею. У літературі наведено багато методик розрахунку цих параметрів, але кожна з них має певні недоліки.



II. ЕЛЕКТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ДІОДІВ ШОТТКІ

При вивченні роботи діодів Шотткі найбільш важливими електричними параметрами є висота потенціального бар'єру ϕ_b і коефіцієнт неідеальності n [1]. Перший визначає можливе значення зворотних струмів, а також описує властивості контакту. Коефіцієнт неідеальності визначає ступінь відхилення ВАХ діода Шотткі від ідеальної моделі.

Також при розрахунку параметрів за ВАХ треба враховувати струм насичення I_s і послідовний опір матеріалу та контактів R_s [1]. Значення струму залежить від типу напівпровідника й розмірів діода. А за рахунок опору R_s , за великих прямих струмів, коли бар'єр в переході зменшується до нуля, ВАХ з експоненціальної залежності вироджується у лінійну, що дає змогу точніше визначити вищевказані параметри.

У більшості наукових робіт, присвячених методам визначення параметрів діодів Шотткі із стаціонарної ВАХ, виділяють мінімум чотири параметра, необхідних для побудови розрахунків: висота потенціального бар'єра Шотткі ϕ_b , коефіцієнт неідеальності n , послідовний R_s і шунтуючий R_p опори [5]. З їх врахуванням ВАХ діода Шотткі можна записати у вигляді:

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qU_{pn}}{nkT}\right) - 1 \right] + \frac{U_{pn}}{R_p}, \quad (1)$$

де $I_s = A^* T^2 S \exp\left(\frac{-q\phi_b}{kT}\right)$ – струм насичення, A^* – константа Річардсона, T – температура, S – площа переходу метал–напівпровідник, q – заряд електрона, k – стала Больцмана, $U_{pn} = U - IR_s$ – напруга на переході метал–напівпровідник, R_p – шунтуючий опір.

Оскільки $I_s \left[\exp\left(\frac{qU_{pn}}{nkT}\right) - 1 \right] \gg \frac{U_{pn}}{R_p}$ [5], то додатком $\frac{U_{pn}}{R_p}$, як правило, нехтують. Тоді вираз (1) приймає вигляд:

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{q(U - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right], \quad (2)$$

III. МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДІОДІВ ШОТТКІ

Існують декілька методик для розрахунку вищевказаних електричних параметрів діодів Шотткі: Норде, Родеріка, Чонга, Сато та прямої апроксимації.

A. Методика Норде

У цій методиці [6] коефіцієнт неідеальності вважається рівним одиниці. Методика Норде використовується тоді, коли вплив послідовного опору на ВАХ вносить значну помилку у визначення висоти бар'єру більш простими методами. Для коректного опису

ВАХ при $U > 3kT/q$ формулу для струму насичення можна модифікувати до вигляду:

$$I_s = A^* T^2 S \exp\left[\frac{q(U - IR_s - \phi_b)}{kT}\right], \quad (3)$$

У методиці Норде використовується пошук мінімуму додаткової функції $F(U) = IR_s + \phi_b - \frac{U}{2}$.

Отримавши U_{\min} та I_{\min} , вираховують значення послідовного опору та висоти потенціального бар'єра за

$$\text{формулами:} \quad R_s = \frac{kT}{qI_{\min}} \quad \text{та}$$

$$\phi_b = F(U_{\min}) + \frac{U_{\min}}{2} - \frac{kT}{q}, \quad \text{відповідно.}$$

Але у методиці є суттєвий недолік: у реальних діодах коефіцієнт неідеальності не дорівнює одиниці, що вносить помилку в результат розрахунку.

B. Методика Родеріка

Найбільш простим в реалізації серед інших методик розрахунку електричних параметрів діодів Шотткі, є методика Родеріка [7]. Побудувавши нормовану

$$\text{ВАХ у вигляді } \tilde{I} = \frac{\ln(I)}{1 - \exp\left(\frac{-qU}{kT}\right)} \text{ як функцію від } U$$

і провівши апроксимацію лінійної ділянки цієї ВАХ прямою $\tilde{I} = a + b \cdot U$, отримуємо коефіцієнти $b = \ln(I_s) = \ln\left[A^* T^2 S \exp\left(\frac{-q\phi_b}{kT}\right)\right]$ і $a = \frac{q}{nkT}$, звідки відповідно розраховуються ϕ_b і n .

Перевагою методики Родеріка [7] є можливість опису прямої і зворотної гілок ВАХ однією залежністю, а також врахування вимірювань за $U < \frac{3kT}{q}$. До недоліків методики слід віднести відсутність врахування впливу послідовного опору, в результаті чого можуть виникати додаткові похибки.

При автоматизації методики зручно визначати коефіцієнт неідеальності, побудувавши залежність [7]:

$$\frac{dU}{d \ln(I)} \cdot \frac{q}{kT} = n(U). \quad (4)$$

На рис. 1 представлений результат такого перетворення для ВАХ за $T = 340 \text{ K}$. На кривій $n(U)$ спостерігається ділянка, на якій залежність струму від напруги мала. З цього діапазону напруг і визначають величину коефіцієнту неідеальності та висоту бар'єра Шотткі, користуючись методикою Родеріка.

C. Методика Чонга

У методиці Чонга та співавторів [8] запропоновано перетворення формули ВАХ діода Шотткі:



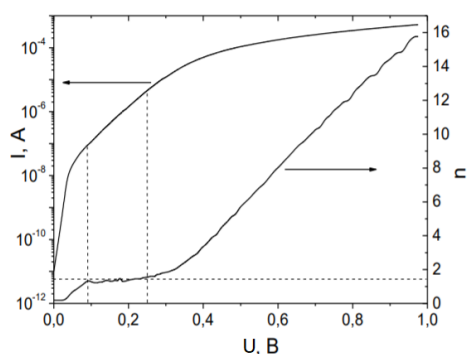


Рис.1 Залежність коефіцієнту неідеальності від напруги (права крива), розрахована за формулою (4), а також ВАХ діода (ліва крива) за $T=340$ К [5]

$$U = \frac{nkT}{q} \ln(I) + \exp(\ln(I))R_s - \frac{nkT}{q} \ln(A^* T^2 S) + n\phi_b, \quad (5)$$

$$\text{звідки } \frac{dU}{d \ln(I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s.$$

Тобто побудувавши залежність $\frac{dU}{d \ln(I)}$ як функцію від I і провівши апроксимацію її прямою, отримаємо коефіцієнти: $a = \frac{nkT}{q}$ і $b = R_s$.

Основною перевагою методики Чонга [8] є визначення послідовного опору разом із висотою бар'єра і фактором неідеальності, що не тільки дає додаткові відомості про контакт, але і зручно з точки зору автоматизації процесу розрахунку.

До недоліків слід віднести можливість застосування методики тільки до діапазону напруг вище $U = \frac{3kT}{q}$.

D. Методика Сато

Методика Сато [9] полягає в тому, що для визначення висоти бар'єру береться не $\ln(I_s)$, а конкретна точка на ВАХ, яка визначається за мінімумом функції:

$$F_1 = \left(\frac{qU}{2kT} \right) - \ln \left(\frac{I}{T^2} \right) \quad (6)$$

при деякому струмі I_{\min} . У такому випадку має виконуватись рівність [5]:

$$F_2 \equiv 2F_{1\min} + (2-n) \ln \left(\frac{I_{\min}}{T^2} \right) = 2 - n \left[\ln(SA^*) + 1 \right] + \left(\frac{qn\phi_b}{kT} \right).$$

ТАБЛИЦЯ 1 ЕЛЕКТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ДІОДА ШОТТКІ, РОЗРАХОВАНІ РІЗНИМИ МЕТОДАМИ [5]

Метод розрахунку	Електричні параметри		
	n	ϕ_b	$R_s, \text{ Ом}$
Родеріка	$1,51 \pm 0,05$	$0,704 \pm 0,003$	---
Чонга	$1,50 \pm 0,01$	$0,704 \pm 0,003$	934 ± 30
ПА	$1,493 \pm 0,005$	$0,704 \pm 0,002$	951 ± 40
Сато	---	$0,52$	---
Норде	---	$0,79$	900 ± 35

Функція F_2 апроксимується прямою $F_2 = a + b \frac{qn}{kT}$

з коефіцієнтами $a = 2 - n \left[\ln(SA^*) + 1 \right]$ та $b = n\phi_b$.

З коефіцієнта a розраховується коефіцієнт неідеальності n , а після цього з коефіцієнту b – висота потенціального бар'єру ϕ_b .

До недоліків слід віднести те, що розрахунок проводиться по одній точці ВАХ, що може негативно позначитися на точності.

E. Методика прямої апроксимації

Ще одним способом вирішення означеної проблеми є використання методики прямої апроксимації (ПА) [5] всієї довжини ВАХ виразом (1).

Недоліком цієї методики є визначення параметрів лише за однією точкою ВАХ, що може внести суттєву похибку у розрахунок.

Електричні параметри діода Шоттки на основі карбиду кремнію, розраховані за допомогою різних методик, представлені в таблиці 1 [5]

Причиною збільшення похибки розрахунку електричних параметрів у всіх п'ятьох методиках є зменшення протяжності ВАХ в логарифмічних координатах. При використанні будь-якої з розглянутих методик розрахунок проводиться у логарифмічних координатах, що ускладнює визначення меж ділянки ВАХ, на якій залежність параметрів діода Шоттки від напруги є незначною.

В даній роботі запропоновано нову методику визначення електричних параметрів діода Шоттки, яка порівняно з описаними вище методиками має суттєво меншу похибку.

IV. МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДІОДА ШОТТКІ

Для отримання значної точності розрахунку необхідно визначити на прямій гілці вольт-амперної характеристики лінійну частину, оскільки у реальному контакті метал-напівпровідник його ВАХ близька до експоненціальної лише за малих значень густини струму.

За збільшення прямої напруги зростання густини струму сповільнюється. За великих прямих напруг густина струму через перехід зростає лінійно зі збільшенням напруги. Цю лінійну ділянку ВАХ називають омичною, так як при цьому струм обмежується послідовним опором напівпровідникової підкладки R_s .



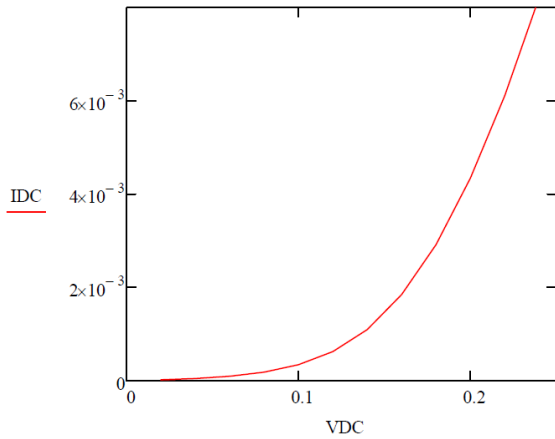


Рис.2 Експериментальна ВАХ досліджуваного діода Шоттки на основі IGZO

Спочатку визначимо температурний потенціал ϕ_t , який є функцією температури:

$$\phi_t(T) = \frac{k \cdot T}{q}$$

Експериментальна ВАХ досліджуваного діода приведена на рис.2.

Обираємо початкові наближення параметрів шляхом лінеаризації високоомної ділянки прямої гілки ВАХ діода. У нашому випадку початкові значення склали: $n = 1,9$, $I_s = 5 \cdot 10^{-7}$ А.

Обираємо точки з експериментальної ВАХ діода, які знаходяться за низьких рівнів струму (які мінімально віддалені одна від одної), і складаємо систему нелінійних рівнянь на основі виразу (2).

$$\begin{cases} I_s \left[\exp\left(\frac{U_{pn1}}{n \cdot \phi_t(T)}\right) - 1 \right] - I_1 = 0, \\ I_s \left[\exp\left(\frac{U_{pn2}}{n \cdot \phi_t(T)}\right) - 1 \right] - I_2 = 0, \end{cases} \quad (7)$$

де I_1 , U_{pn1} , I_2 , U_{pn2} – точки з експериментальної ВАХ.

Дану систему нелінійних рівнянь для досліджуваного діода розв'язуємо за допомогою модифікованого методу Ньютона [10].

Результатом розв'язку системи (7) є уточненні значення коефіцієнта неідеальності та струму насичення: $n = 1,318$, $I_s = 1,887 \cdot 10^{-7}$ А.

Значення послідовного опору R_s визначає різницю між падінням напруги на діоді Шоттки та ідеальному переході метал-напівпровідник за високого рівня струму.

Вольт-амперна характеристика ідеального переходу Шоттки має вигляд:

$$I_{d_i} = I_s \left[\exp\left(\frac{U_i}{n \cdot \phi_t(T)}\right) - 1 \right]. \quad (8)$$

Звідки

$$U_d(I) = \ln\left(\frac{I + I_s}{I_s}\right) \cdot n \cdot \phi_t(T).$$

Для визначення послідовного опору R_s обираємо значення напруги на лінійній ділянці ВАХ та відповідне значення струму:

$$R_s = \frac{(U_{\text{лін}} - U_d(I_{\text{лін}}))}{I_{\text{лін}}}, \quad (9)$$

де $U_{\text{лін}}$, $I_{\text{лін}}$ – напруга та струм в обраній точці лінійної ділянки експериментальної ВАХ.

Згідно виразу (9) значення опору $R_s = 4,539$ Ом.

За допомогою методу січних [8], який заснований на послідовному звуженні інтервалу, що містить єдиний корінь рівняння, багаторазово розв'язуємо наступне нелінійне рівняння:

$$f(I_s, n, R_s, U_i) = \left\{ I_s \left[\exp\left(\frac{(U_n - x \cdot R_s)}{n \cdot \phi_t(T)}\right) - 1 \right] - x \right\}, x = I_i$$

Побудуємо графіки вольт-амперних характеристик: експериментальної, ідеальної, яка описується рівнянням (8), та теоретичної з урахуванням R_s (рис. 3).

Як видно з рис. 3, експериментальна крива майже співпадає з ВАХ з урахуванням послідовного опору, Отже, електричні параметри діода Шоттки розраховані із достатньою точністю.

Похибку розрахунку можна оцінити за допомогою функції середньоквадратичного відхилення:

$$SSE(I_s, n, R_s) = \sum_i \left[\frac{f(I_s, n, R_s) - I_i}{I_i} \right]^2.$$

Для дослідного зразка $SSE(I_s, n, R_s) = 0,091$.

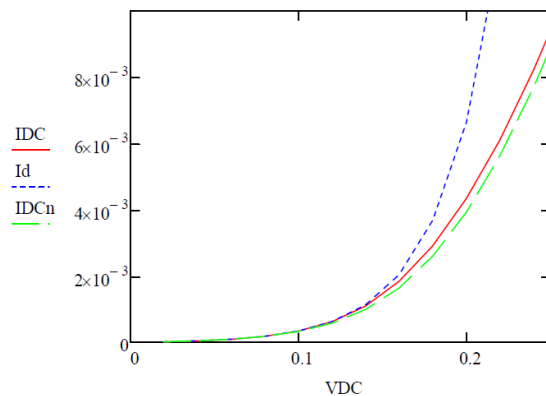


Рис.3 Графіки ВАХ: IDC – експериментальна, I_d – ідеальний за виразом (8), IDC_n – теоретичний з врахуванням електричного параметру R_s

Для підвищення точності розрахунку електричних параметрів діодів Шотткі I_s , n та R_s необхідно провести мінімізацію функції середньо-квадратичного відхилення SSE .

V. УТОЧНЕННЯ ВИЗНАЧЕНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДІОДІВ ШОТТКІ

Для проведення оптимізації функції середньо-квадратичного відхилення використовуємо метод спряжених градієнтів [10].

Мінімізуємо функцію помилки, яка дорівнює сумі квадратів нормованих різниць між значеннями струму в точках експериментальної $I_{екс}$ і розрахованої по формулі (6) $I_{роз}$ ВАХ переходу Шотткі.

$$f(I_s, n, R_s) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{I_{екс_i}(U) - I_{роз_i}(U)}{I_{екс_i}(U)} \right)^2,$$

де N – кількість точок експериментальної ВАХ.

Після розрахунків оптимальних електричних параметрів діода, маємо такі їх значення: $n = 1,231$; $I_s = 1,595 \cdot 10^{-5}$ А; $R_s = 4,918$ Ом.

Розрахунок середньоквадратичного відхилення після оптимізації показав $SSE(I_s, n, R_s) = 1,659 \cdot 10^{-3}$.

Також була розрахована мінімальна та максимальна абсолютна похибка (абсолютна похибка була розрахована з графіків ВАХ) які складають відповідно $0,133 \cdot 10^{-3}$ та $0,237 \cdot 10^{-3}$, тобто різниця між максимальною і мінімальною похибкою складає $0,104 \cdot 10^{-3}$.

За значенням різниці абсолютної похибки була визначена відносна, яка складає 0,0116.

Отже, за рахунок оптимізації середньо-квадратичне відхилення розрахованих значень від експериментальних зменшилося на 2 порядки.

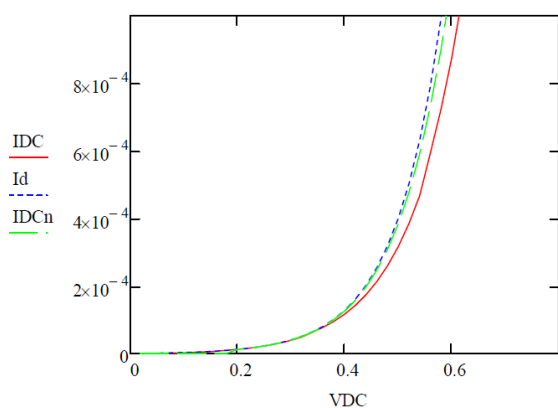


Рис.5 Графіки ВАХ для першого зразка до оптимізації: IDC – експериментальна, I_d – ідеальний за виразом (8), IDC_n – теоретичний з врахуванням електричного параметру R_s

На рисунку 4 наведено графіки вольт-амперних характеристик: експериментальної та теоретичної з оптимальними значеннями електричних параметрів.

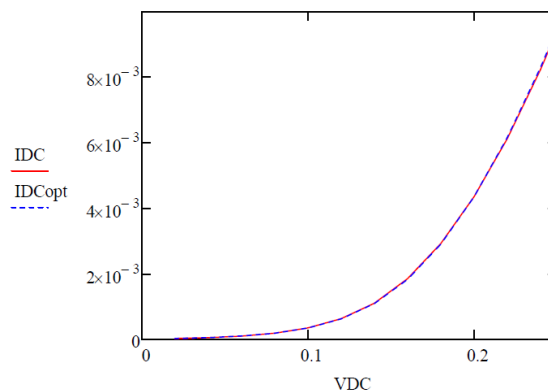


Рис.4 Графіки ВАХ: IDC – експериментальна, IDC_{opt} – теоретична з оптимальними значеннями електричних параметрів діода

VI. ВЕРИФІКАЦІЯ АЛГОРИТМУ

Було досліджено серію зразків діодів Шотткі на основі IGZO. За допомогою вище запропонованого алгоритму, були визначення електричні параметри цих зразків.

Для прикладу на рис. 5, рис. 7 та рис. 9 наведено експериментальні дані та дані до оптимізації розрахункових ВАХ кількох з досліджених діодів Шотткі, а на рис. 6, 8, 10 – після оптимізації.

З аналізу графіків, наведених на рис. 6, 8 та 10, видно, що після оптимізації функції середньо-квадратичного відхилення теоретична ВАХ має набагато краще співпадіння із експериментальною, що також підтверджується даними, наведеними в табл. 2, 3 та 4.

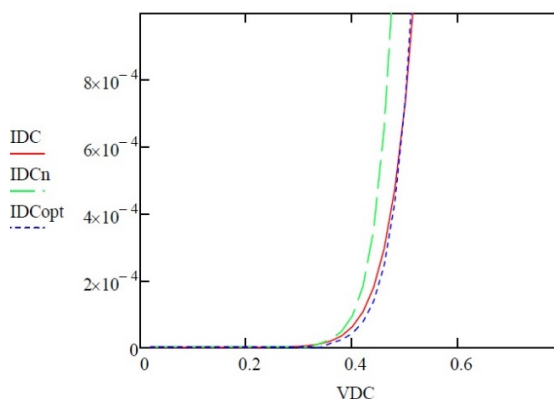


Рис. 6 Графіки ВАХ для першого зразка після оптимізації: IDC – експериментальна, IDC_n – теоретичний з врахуванням електричного параметру R_s до оптимізації, IDC_{opt} – теоретична з оптимальними значеннями електричних параметрів діода



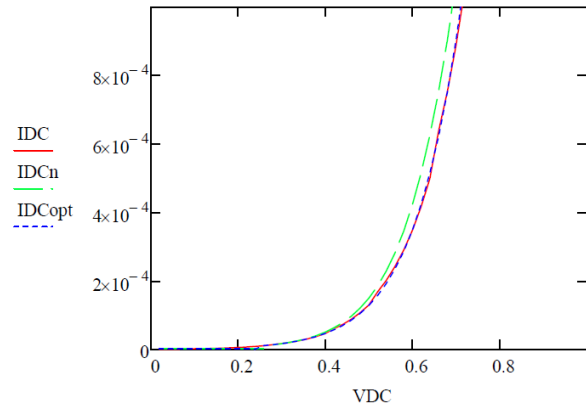
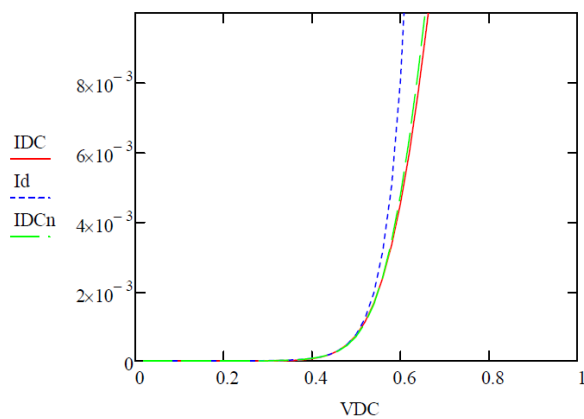
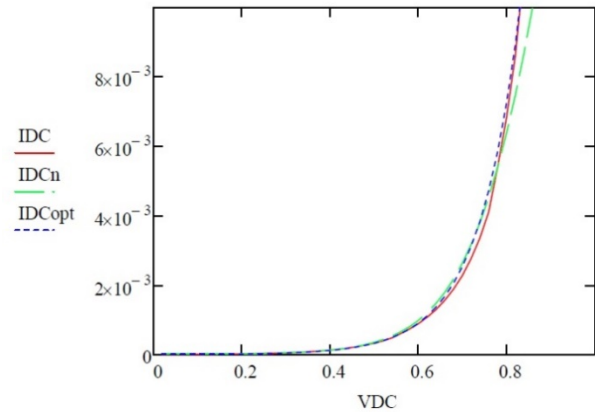
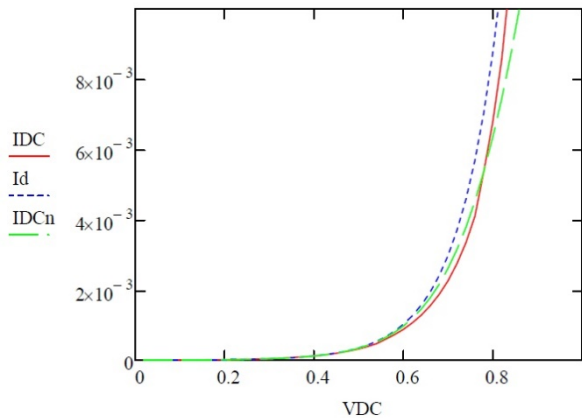


Рис.9 - Графіки ВАХ для третього зразка до оптимізації: IDC – експериментальна, I_d – ідеальний за виразом (8), IDC_n – теоретичний з врахуванням електричного параметру R_s

Рис.10 – Графіки ВАХ для третього зразка після оптимізації: IDC – експериментальна, IDC_n – теоретичний з врахуванням електричного параметру R_s до оптимізації, IDC_{opt} – теоретична з оптимальними значеннями електричних параметрів діода

	Електричні параметри			
	n	I_s, A	$R_s, \text{Ом}$	$SSE(I_s, n, R_s)$
До оптимізації	3,994	$1,371 \cdot 10^{-6}$	3,232	0,115
Після оптимізації	3,775	$1,898 \cdot 10^{-5}$	1,521	$0,71 \cdot 10^{-3}$

ТАБЛИЦЯ 3 ЕЛЕКТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ДРУГОГО ЗРАЗКА ДІОДА ШОТТКІ ДО І ПІСЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ

	Електричні параметри			
	n	I_s, A	$R_s, \text{Ом}$	$SSE(I_s, n, R_s)$
До оптимізації	3,855	$8,33 \cdot 10^{-6}$	9,374	0,913
Після оптимізації	3,775	$1,898 \cdot 10^{-5}$	1,521	$0,71 \cdot 10^{-3}$

ТАБЛИЦЯ 4 ЕЛЕКТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ ТРЕТЬОГО ЗРАЗКА ДІОДА ШОТТКІ ДО І ПІСЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ

	Електричні параметри			
	n	I_s, A	$R_s, \text{Ом}$	$SSE(I_s, n, R_s)$
До оптимізації	4,132	$5,21 \cdot 10^{-8}$	45,762	0,055
Після оптимізації	3,866	$1,245 \cdot 10^{-6}$	44,949	$1,05 \cdot 10^{-3}$

ВИСНОВКИ

Існуючі методики розрахунку електричних параметрів діодів Шотткі мають значне середньоквадратичне відхилення розрахованих значень від експериментальних, що обумовлено температурною залежністю висоти потенціального бар'єру і залежністю коефіцієнту неідеальності від напруги.

Авторами запропоновано методику розрахунку таких електричних параметрів діодів Шотткі, як коефіцієнт неідеальності, висота потенціального бар'єру, струм насичення та послідовний опір матеріалу та контактів за даними, отриманими з ВАХ, яка

включає етап оптимізації функції середньоквадратичного відхилення розрахованих значень від експериментальних на основі методу спряжених градієнтів. Застосування оптимізації дало змогу зменшити середньоквадратичне відхилення більше, ніж на порядок.

Верифікація розробленої методики показала, що результати розрахунку добре узгоджуються з експериментальними даними.

Запропонований метод може бути використаний як у науковій роботі для дослідження властивостей напівпровідникових матеріалів, так і у виробництві для контролю якості діодів Шоттки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] V. Ulianova *et al.*, "Fabrication, Characterization and Simulation of Sputtered Pt/In-Ga-Zn-O Schottky Diodes for Low-Frequency Half-Wave Rectifier Circuits," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 111783–111790, 2020, DOI: [10.1109/ACCESS.2020.3002267](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3002267).
- [2] J.-W. Kim, T.-J. Jung, and S.-M. Yoon, "Device characteristics of Schottky barrier diodes using In-Ga-Zn-O semiconductor thin films with different atomic ratios," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 771, pp. 658–663, Jan. 2019, DOI: [10.1016/j.jallcom.2018.08.289](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.08.289).
- [3] S. K. Dargar and V. M. Srivastava, "Design and analysis of IGZO thin film transistor for AMOLED pixel circuit using double-gate tri active layer channel," *Helvion*, vol. 5, no. 4, p. e01452, Apr. 2019, DOI: [10.1016/j.helivion.2019.e01452](https://doi.org/10.1016/j.helivion.2019.e01452).
- [4] G. T. Dang *et al.*, "IGZO MESFET with enzyme-modified Schottky gate electrode for glucose sensing," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 58, no. 9, p. 090603, May 2019, DOI: [10.7567/1347-4065/AB1A65](https://doi.org/10.7567/1347-4065/AB1A65).
- [5] Ya. Ya. Kudryk, V. V. Shynkarenko, V. S. Slipokurov, R. I. Bigun, and Ya. Ya. Kudryk, "Methods for determination of Schottky barrier height from I-V curves," in *CriMiCo 2014*, 2014, pp. 673–674.
- [6] H. Norde, "A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance," *Journal of Applied Physics*, vol. 50, no. 7, p. 5052, Jul. 2008, DOI: [10.1063/1.325607](https://doi.org/10.1063/1.325607).
- [7] E. H. Rhoderick and R. H. Williams, *Metal-semiconductor contacts*, vol. 19. New York, USA: Oxford University Press, 1988.
- [8] S. K. Cheung and N. W. Cheung, "Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics," *Applied Physics Letters*, vol. 49, no. 2, p. 85, Jun. 1998, DOI: [10.1063/1.97359](https://doi.org/10.1063/1.97359).
- [9] K. Sato and Y. Yasumura, "Study of forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance," *Journal of Applied Physics*, vol. 58, no. 9, p. 3655, Aug. 1998, DOI: [10.1063/1.335750](https://doi.org/10.1063/1.335750).
- [10] R. Fletcher, *Practical Methods of Optimization*. Chichester, West Sussex England: John Wiley & Sons, Ltd, 2000, ISBN: 9781118723203. DOI: [10.1002/9781118723203](https://doi.org/10.1002/9781118723203)

Надійшла до редакції 10 вересня 2021 р.

Прийнята до друку 04 грудня 2021 р.



Method for Determining the Schottky Diodes Electrical Parameters

O. V. Tsukanov^f, ORCID [0000-0003-0489-4753](https://orcid.org/0000-0003-0489-4753)

Yu. V. Didenko^s, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0001-7305-8519](https://orcid.org/0000-0001-7305-8519)

D. D. Tatarchuk^s, Dr.Sc.(Eng.) Assoc.Prof., ORCID [0000-0003-1171-6701](https://orcid.org/0000-0003-1171-6701)

Department of Microelectronics, me.kpi.ua

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" ROR [00syn5v21](https://ror.org/00syn5v21)

Kyiv, Ukraine

O. H. Dramaretskyi, Senior Researcher, ORCID [0000-0002-2157-3444](https://orcid.org/0000-0002-2157-3444)

Ukrainian Research Institute of Special Equipment and Forensic Science of the Security Service of Ukraine

Kyiv, Ukraine

Abstract—When studying the operation of Schottky diodes the most important electrical parameters are the height of the potential barrier, the coefficient of ideality, the saturation current and the series resistance of the material and contacts. These parameters can be determined from the experimental volt-ampere characteristics. The article considers the methods of determining these electrical parameters of Schottky diodes, as well as the factors that affect the accuracy of calculations.

The existing methods for calculating the electrical parameters of Schottky diodes are analyzed, namely: the method of Norde, Roderick, Chong, Sato and the method of direct approximation. The Norde method was developed for a coefficient of ideality equal to one for cases where the effect of series resistance on the I–V characteristics makes a significant error in determining the barrier height by simpler methods. A significant disadvantage of this method is that in many cases the coefficient of ideality is not equal to one, even in the case of an ideal diode, which makes an error in the calculation result. The advantage of Roderick's method is the possibility of describing the forward and reverse branches of the I–V characteristics by one dependence, as well as taking into account measurements at voltages less than tripled temperature potential. The disadvantages of this method include the lack of consideration of the effect of series resistance, which may result in additional errors. The main advantage of the Chong method is the determination of the series resistance together with the height of the barrier and the coefficient of ideality, which not only provides additional information about the contact, but also convenient in terms of automation of the calculation process. The disadvantages include the possibility of applying the method only to the voltage range above the tripled temperature potential. The disadvantages of Sato methods and direct approximation include the fact that the calculation is performed at one point of the I–V curve, which can negatively affect the accuracy.

It is also shown that these methods have a significant standard deviation of the calculated values from the experimental ones, which is due to the temperature dependence of the height of the potential barrier and the dependence of the coefficient of ideality on the voltage. Also, the reason for the increase in the calculation error of the electrical parameters in all five methods is the decrease in the length of the I–V characteristics in logarithmic coordinates. When using any of the considered methods, the calculation is performed in logarithmic coordinates, which complicates the determination of the boundaries of the I–V section, where the dependence of the parameters of the Schottky diode on the voltage is insignificant.

A new algorithm for calculating the electrical parameters of Schottky diodes has been developed. Based on the conjugate gradient method, a method for optimizing the algorithm for calculating the electrical parameters of Schottky diodes was developed, which made it possible to reduce the standard deviation by more than an order of magnitude.

The developed algorithm is verified by comparing the calculated volt-ampere characteristics of Schottky diodes with those obtained experimentally. To construct the calculated volt-ampere characteristics, the values of the electrical parameters of Schottky diodes were used, which were determined by the presented algorithm. The results of the calculation are in good agreement with the experimental data.

The proposed method can be used both in scientific work to study the properties of semiconductor materials, and in production to control the quality of Schottky diodes.

Keywords — Schottky diode; electrical parameters; current-voltage characteristics; amorphous In-Ga-Zn-O.

