

PACS numbers: 71.55.Gs, 72.80.Ey, 73.20.Hb, 73.30.+y, 73.40.Gk, 73.40.Lq, 85.60.Bt

## Вплив наноструктуризації кремнію на електричні та фотоелектричні властивості діод Шоттки Ni/*n*-Si

М. М. Солован<sup>1</sup>, А. І. Мостовий<sup>1</sup>, В. В. Брус<sup>1,2</sup>, П. Д. Мар'ячук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,  
вул. Коцюбинського, 2,  
58012 Чернівці, Україна

<sup>2</sup>Center for Polymers and Organic Solids,  
Department of Chemistry and Biochemistry,  
University of California at Santa Barbara,  
CA 93106 Santa Barbara, U.S.A.

В даній роботі представлено результати досліджень фізичних властивостей планарних і наноструктурованих діод Шоттки Ni/*n*-Si, виготовлених шляхом нанесення тонких плівок Ni на планарні та наноструктуровані підкладинки кремнію методом магнетронного розпорошення при постійній напрузі. Досліджено електричні та фотоелектричні властивості одержаних діод Шоттки Ni/*n*-Si і встановлено домінуючі механізми струмоперенесення при прямих і зворотніх зміщеннях. Встановлено, що для планарних діод Шоттки Ni/*n*-Si при прямих зміщеннях в області напруг  $3kT/e < V < 0,1$  В домінуючим механізмом є надбар'єрна емісія, а в області напруг  $V > 0,1$  В — тунельний механізм струмоперенесення; для наноструктурованих діод Шоттки Ni/*n*-Si для початкових прямих зміщень домінуючим є емісійно-рекомбінаційний механізм струмоперенесення, а для напруг  $V > 0,2$  В — тунельний механізм струмоперенесення. При зворотніх зміщеннях для планарних і наноструктурованих діод Шоттки Ni/*n*-Si домінуючим механізмом струмоперенесення є тунелювання. Запропоновано нову методу визначення активної площі наноструктурованих поверхнево-бар'єрних структур. Визначено значення опору з'єдненої області та бар'єрної ємності досліджуваних структур. Встановлено, що досліджувані діоди Шоттки Ni/*n*-Si можна успішно використовувати як фотодіоди у фотодіодному режимі роботи.

This paper presents the results of studies of the physical properties of the planar and nanostructured Schottky diodes Ni/*n*-Si fabricated by means of the thin nickel films' deposition by the magnetron sputtering onto the planar and nanostructured substrates of *n*-type Si. The electrical and photoelectric properties of the Schottky diodes Ni/*n*-Si are investigated, and the

dominating current-transport mechanisms are established: at forward bias, it is well described by the over-barrier emission in the voltage range  $3kT/e < V < 0.1$  V and the tunnel mechanism in the voltage range  $V > 0.1$  V; at reverse bias, there is the tunnel mechanism for the planar Schottky diodes Ni/n-Si; at forward bias, it is well described by the emission recombination in the region of initial forward displacements and the tunnelling mechanism in the region of voltages  $V > 0.2$  V; and at reverse bias, there is the tunnel mechanism for the nanostructured Schottky diodes Ni/n-Si. The obtained Schottky diodes Ni/n-Si possess sharply determined rectifying properties with height of the potential barrier  $\phi_0 = 0.27$  eV. A new method for determining the active area of nanostructured surface-barrier structures is proposed. The resistance value of the depleted area and the barrier capacity of the studied Schottky diodes are determined. As established, the studied Schottky diodes Ni/n-Si can be successfully used as photodiodes in photodiode operation.

В данной работе представлены результаты исследований физических свойств планарных и наноструктурированных диодов Шоттки Ni/n-Si, изготовленных путём нанесения тонких плёнок Ni на планарные и наноструктурированные подложки кремния методом магнетронного распыления при постоянном напряжении. Исследованы электрические и фотоэлектрические свойства полученных диодов Шоттки Ni/n-Si и установлены доминирующие механизмы токопереноса при прямых и обратных смещениях. Установлено, что для планарных диодов Шоттки Ni/n-Si при прямых смещениях в области напряжений  $3kT/e < V < 0,1$  В доминирующим механизмом является надбарьерная эмиссия, а в области напряжений  $V > 0,1$  В — туннельный механизм токопереноса; для наноструктурированных диодов Шоттки Ni/n-Si в области начальных прямых смещений доминирующим является эмиссионно-рекомбинационный механизм токопереноса, а в области напряжений  $V > 0,2$  В — туннельный механизм токопереноса. При обратных смещениях для планарных и наноструктурированных диодов Шоттки Ni/n-Si доминирующим механизмом токопереноса является туннелирование. Предложен новый метод определения активной площади наноструктурированных поверхностно-барьерных структур. Определено значение сопротивления обеднённой области и барьерной ёмкости исследуемых структур. Установлено, что исследуемые диоды Шоттки Ni/n-Si можно успешно использовать как фотодиоды в фотодиодном режиме работы.

**Ключові слова:** нікель, тонка плівка, кремній, наноструктури, діода Шоттки, механізми струмоперенесення.

**Key words:** nickel, thin film, silicon, nanostructures, Schottky diode, current transport mechanisms.

**Ключевые слова:** никель, тонкая плёнка, кремний, наноструктуры, диод Шоттки, механизмы токопереноса.

*(Отримано 12 березня 2019 р.; після доопрацювання — 18 березня 2019 р.)*

## 1. ВСТУП

Бар'єри Шотткі мають ряд якостей, незамінних для сучасної електроніки, де основними вимогами є ефективність і швидкість роботи [1, 2]. На відміну від електронно-діркових переходів, такі бар'єри оперують основними носіями заряду; тому діоди Шотткі мають мале падіння прямої напруги, малий час релаксації та високу швидкодію, що визначає перспективність їх для подальшого розвитку електроніки. Ще однією перевагою є порівняно проста технологія виготовлення діод Шотткі, тому що при їх виготовленні не потрібні надто високі температури, які необхідні для утворення  $p$ - $n$ -переходу [3, 4].

Також відомий спосіб виготовлення фотодіод на основі контакту Шотткі, де наносять тонкий напівпрозорий шар металу на напівпровідник. Основним недоліком таких фотодіод є відносно мале пропускання світла напівпрозорим шаром металу, і тому такі фотодіоди потрібно виготовляти більшої площі в порівнянні з гомо- та гетеропереходами.

Одним із шляхів зменшення розмірів фотодіод Шотткі є використання наноструктурованого базового матеріалу. Велика активна площа наноструктурованих діод Шотткі підвищує поглинання світла, а також ефективність розділення фотогенераованих носіїв заряду. В той же час, велике відношення площі до об'єму викликає зростання швидкості поверхневої рекомбінації, що є основним чинником обмеження ефективності фотоелектричних приладів. Тому виготовлення наноструктурованих діод Шотткі та дослідження їхніх бар'єрних параметрів, умов струмоперенесення та фотоелектричних параметрів залишається актуальною задачею для подальшого поліпшення ефективності новітніх наноструктурованих діод Шотткі.

Кремній є найпоширенішим напівпровідниковим матеріалом в електроніці. Завдяки великим запасам кремнію та досконалості відпрацьованих технологій його використовують для промислового виробництва фотодіод. Поверхні кремнію, модифіковані масивами нанодротів, мають низьке відбивання та велику активну площу, що уможлиблює успішне практичне застосування їх [5]. Найперспективнішою методою вироцування кремнійових нанодротів є хемічне цавлення при сприянні наночастинок срібла, оскільки це — проста і дешева метода для виготовлення масивів кремнійових нанодротів великої площі з контрольованими властивостями [6]. Тому дана метода використовувалася для виготовлення наноструктурованих підкладинок для виготовлення діод Шотткі.

Кремній утворює бар'єр Шотткі з багатьма металами. Але перспективнішим для виготовлення діод Шотткі є кремній  $n$ -типу

провідності, тому що рухливість електронів у кремнії є більшою за рухливість дірок у ньому, що приводить до зростання швидкодії діоди Шотткі. Для їх виготовлення вибирають метали з великою роботою виходу електронів, зокрема Au, Pt, Ni та ін.

В даній роботі виготовлено планарні та наноструктуровані діоди Шотткі Ni/*n*-Si, досліджено їхні електричні та фотоелектричні властивості, запропоновано нову методу визначення активної площі наноструктурованих поверхнево-бар'єрних структур.

## 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

Для виготовлення діод Шотткі використовували монокристалічний кремній *n*-типу провідності товщиною у 330 мкм з питомим опором  $\rho = 5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$  і концентрацією носіїв заряду  $n = 7,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  при температурі 295 К. Глибина залягання рівня Фермі становить  $E_c - E_F = 0,27 \text{ еВ}$ .

Кремнійові підкладинки промивалися у бідистильованій воді й ацетоні в ультразвуковій ванні з подальшим щавленням у розчині сірчаної кислоти та 30% перекису водню ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) у співвідношенні 3:1 для видалення органічних забруднень. Після цього частина зразків використовувалася для створення діод Шотткі Ni/*n*-Si, а інша — для вирощування нанодротів.

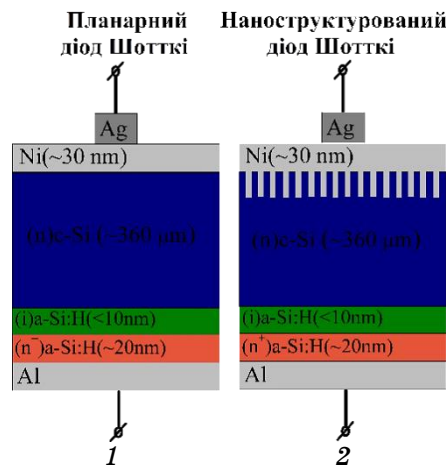
Після очистки кремнійові зразки занурювалися у водні розчини 0,02М  $\text{AgNO}_3$  і 5М плавикової кислоти (HF) у співвідношенні 1:1 на 5–10 секунд для того, щоб наночастинки срібла осіли на підкладинки. Наступним кроком було щавлення кремнійових підкладинок з наночастинками срібла в розчині 5М HF і 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$  у співвідношенні 10:1 для створення нанодротів. Останній етап — це вищавлення наночастинок срібла з підкладинки за допомогою азотної кислоти.

Нанесення тонких плівок Ni на поверхні наноструктурованого та планарного монокристалічного кремнію (розмір  $5 \times 5 \times 0,33 \text{ мм}$ ) з орієнтацією (100) проводилося в універсальній вакуумній установці Leybold-Heгаeus L560 за допомогою магнетронного розпоршення мішені чистого Ni у атмосфері аргону при сталій напрузі.

Для того, щоб забезпечити однорідність плівок по товщині підкладинки розміщували над магнетроном з подальшим обертанням столика. Перед початком напорошення вакуумна камера відкачувалася до тиску  $5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ .

В процесі напорошення тиск аргону в вакуумній камері становив 0,4 Па. Встановлена потужність магнетрона — 30 Вт. Процес напорошення тривав 5 хв. при температурі підкладинок  $\cong 430 \text{ К}$ .

Фронтальний точковий електричний контакт до тонкої плівки Ni формувався за допомогою струмопровідної пасти на основі срібла.



**Рис. 1.** Схематичне зображення виготовлених планарних (1) і наноструктурованих (2) діод Шотткі Ni/n-Si.<sup>1</sup>

Щоб уникнути рекомбінації на тильній стороні кремнію та забезпечити хороше збирання фотогенерованих носіїв заряду, ми використовували підкладинки, які вже мали тильний контакт з вбудованим внутрішнім полем. Він був виготовлений шляхом напорошення шару власного гідрогенізованого аморфного кремнію ( $a\text{-Si:H}$ ) товщиною  $y \cong 10$  нм для пасивації поверхні підкладинки. Наступний шар сильнолегованого Фосфором гідрогенізованого аморфного кремнію  $n^+$  ( $a\text{-Si:H}$ ) товщиною  $\cong 20$  нм для створення ізотипного переходу з висотою бар'єру  $\cong 0,1$  еВ на задній стороні Si, а останнім наносили шар Al методом термічного випаровування [7]. Схематичне зображення одержаних діод Шотткі показано на рис. 1.

Вимірювання ВАХ структур проводили на установці для дослідження вольт-амперних характеристик, побудованій на базі керування комп'ютером вольтметра, амперметра та джерела живлення. Програму для керування цими всіма блоками під час вимірювання ВАХ створено у програмному середовищі LabView. Вимірювання імпедансних характеристик досліджуваних діод Шотткі проводилися на вимірному пристрої LCR Meter BR2876.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

#### 3.1. Фотоелектричні властивості діод Шотткі Ni/n-Si

На рисунку 2 представлено темнові та світлові вольт-амперні характеристики планарних і наноструктурованих діод Шотткі Ni/n-Si.

Як видно з рис. 2, при освітленні зворотній струм  $I_{light}$  зростає в порівнянні з його величиною при затемненні  $I_{dark}$  внаслідок розділення фотогенерованих електрон-діркових пар.

Велике відношення фотоструму та темного зворотнього струму  $I_{light}/I_{dark}$  (рис. 3) показує, що досліджувані діоди Шоттки Ni/n-Si можна успішно використовувати як фотодіоди у фотодіодному режимі роботи.

Оцінити продуктивність фотоприймача кількісно можна через визначення чутливості ( $R$ ) і детективності ( $D^*$ ), які відображають чутливість фотоприймача до падного випромінення [8]:

$$R = \frac{I_{light} - I_{dark}}{P_{opt}}, \tag{1}$$

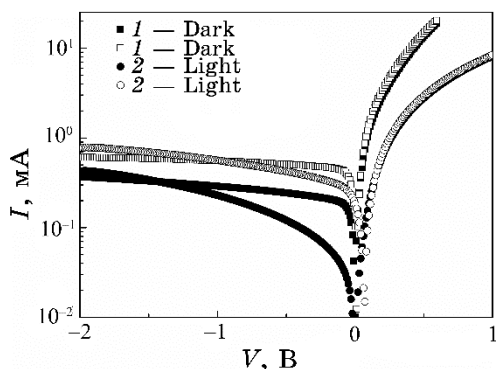


Рис. 2. Темнові та світлові ВАХ планарних (1) і наноструктурованих (2) діод Шоттки Ni/n-Si в напівлогаритмічному масштабі.<sup>2</sup>

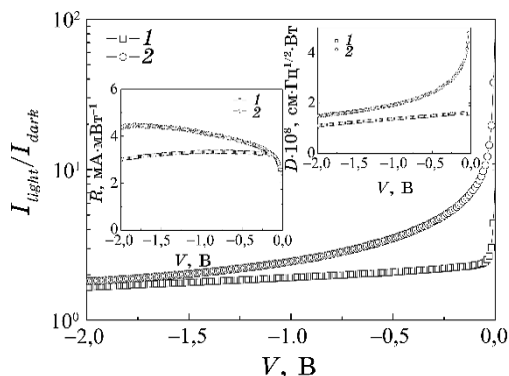


Рис. 3. Залежність відношення  $I_{light}/I_{dark}$  від напруги планарних (1) і наноструктурованих (2) діод Шоттки Ni/n-Si. На вставках наведено залежності чутливості ( $R$ ) та детективності ( $D^*$ ) від напруги для двох діод Шоттки.<sup>3</sup>

$$D^* = \sqrt{\frac{A}{2qI_{dark}}} R. \quad (2)$$

На вставках до рис. 3 наведено криві залежностей  $R = R(V_{rev})$  та  $D^* = D^*(V_{rev})$ , з яких видно, що чутливість ( $R$ ) при зміщеннях  $V_{rev} > 0,2$  В для зразка 1 виходить на насичення і практично не залежить від напруги, а для зразка 2 плавно збільшується при зростанні зворотнього зміщення, що зумовлено розширенням ОПЗ, внаслідок чого зростає ефективність розділення фотогенерованих електрон-діркових пар. Детективність ( $D^*$ ), яка описує нормовану потужність опромінення, необхідну для одержання сигналу від фотоприймача на рівні шуму, зменшується для двох структур, що зумовлено зростанням темнового зворотнього струму  $I_{dark}$ .

### 3.2. Електричні властивості планарних і наноструктурованих діод Шотткі Ni/n-Si

На рисунку 4 представлено вольт-амперні характеристики планарних і наноструктурованих діод Шотткі Ni/n-Si. Екстраполяцією лінійних ділянок ВАХ до перетину з віссю напруг визначено значення висоти потенціального бар'єру. У таблиці на вставці до рис. 4 наведено числові значення висоти потенціального бар'єру та послідовного опору для двох досліджуваних діод Шотткі.

Величину послідовного опору  $R_s$  та шунтувального опору  $R_{sh}$  діод Шотткі можна визначити із залежності їх диференційного опору  $R_{dif}$  від напруги (рис. 5).

З рисунка 5 видно, що криві  $R_{dif}(V)$  виходять на насичення при прямому зміщенні  $V > V_{bi}$ . Це свідчить про те, що спад напруги на

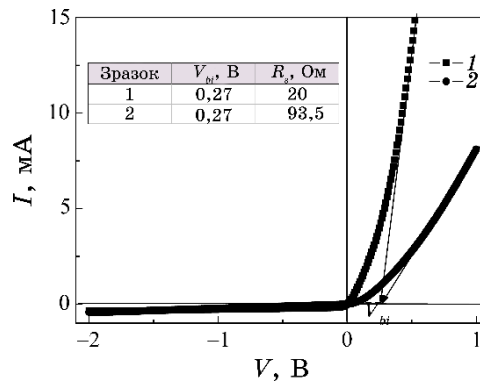


Рис. 4. Вольт-амперні характеристики планарних (1) і наноструктурованих (2) діод Шотткі Ni/n-Si.<sup>4</sup>

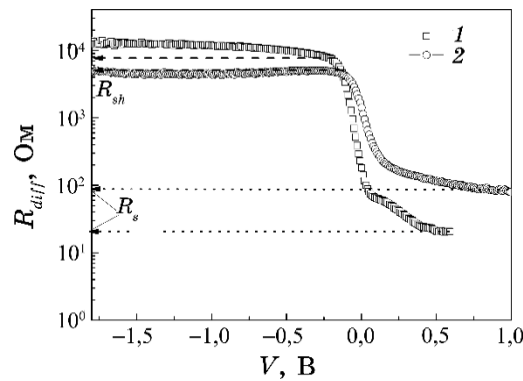


Рис. 5. Залежність диференційного опору планарних (1) і наноструктурованих (2) діод Шоттки Ni/n-Si від напруги.<sup>5</sup>

області просторового заряду стає постійним, тобто бар'єр діод Шоттки відкривається, і струм через діоди Шоттки обмежується тільки його послідовним опором. Значення послідовного опору ( $R_s$ ) може бути легко визначено шляхом екстраполяції області насичення до перетину з віссю опорів, а при відсутності зміщення визначаємо шунтувальний опір  $R_{sh}$ .

Також з рис. 5 видно, що створення наноструктурованої поверхні на підкладках n-Si приводить до істотного зростання послідовного опору діод Шоттки та зменшення його шунтувального опору. Зростання послідовного опору зумовлене окисненням наноструктурованої поверхні кремнію у процесі хемічного вищавлювання наночастинок срібла у азотній кислоті [9].

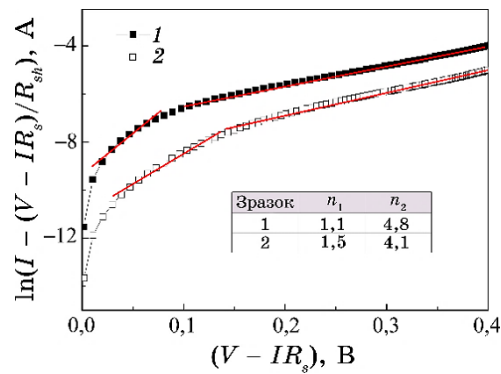
### 3.3. Механізми струмоперенесення

#### 3.3.1. Прямі зміщення

Аналіза прямих гілок ВАХ діод Шоттки Ni/n-Si, побудованих в напівлогаритмічному масштабі (рис. 6) з врахуванням впливу послідовного та шунтувального опорів, показала, що залежність  $\ln[I - (V - IR_s) / R_{sh}] = f(V - IR_s)$  складається з двох прямолінійних ділянок, а це свідчить про експоненційну залежність струму від напруги та наявність двох домінуючих механізмів переносу заряду в досліджуваному інтервалі напруг. Значення коефіцієнта неідеальності  $\Delta \ln[I - (V - IR_s) / R_{sh}] / \Delta(V - IR_s) = e / (nkT)$ , де  $n$  — коефіцієнт неідеальності, визначені для обох ділянок напруг, наведено в таблиці на вставці до рис. 6.

Невелике значення висоти потенціального бар'єру  $\phi_0 = 0,27$  еВ, як правило, приводить до протікання надбар'єрного струму. Зна-





**Рис. 6.** Прямі гілки ВАХ планарних (1) і наноструктурованих (2) діод Шотткі Ni/n-Si в напівлогаритмічному масштабі з врахуванням впливу послідовного та шунтувального опорів.<sup>6</sup>

чення показника неідеальності для планарної структури в області початкових прямих напруг близькі до одиниці, що є доказом домінування надбар'єрної емісії для досліджуваної структури при малих прямих зміщеннях, а в області напруг  $V > 0,1$  В невеликий нахил (велике значення показника неідеальності  $n > 2$ ) експериментальних залежностей  $\ln[I - (V - IR_s) / R_{sh}] = f(V - IR_s)$  є свідченням тунельної природи механізму струмоперенесення [10].

Для структури №2 в області початкових прямих зміщень залежність  $I(V)$  добре описується виразом для емісійно-рекомбінаційного механізму струмоперенесення з урахуванням впливу послідовного та шунтувального опорів (пряма рекомбінація носіїв заряду через енергетичні стани на роздільчій поверхні, яка визначається висотою потенціального бар'єру) [11]:

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{(V - IR_s)q}{nkT}\right) - 1 \right] + \frac{V - IR_s}{R_{sh}}, \quad (3)$$

де  $I_s = B_0 \exp(\phi_0(T)/(nkT))$ ,  $B_0$  — коефіцієнт, який слабо залежить від температури.

Для випадку домінування емісійно-рекомбінаційного механізму вважають, що центри рекомбінації рівномірно розподілені за енергією та зосереджені у вузькій області біля роздільчої межі; наявність останніх зумовлено великою кількістю обірваних ковалентних зв'язків у кремнії внаслідок його наноструктуризації.

Прологаритмувавши вираз (3), одержуємо:

$$\ln\left(I - \frac{V - IR_s(T)}{R_{sh}}\right) = \ln(I_s) + \frac{q(V - IR_s(T))}{nkT}. \quad (4)$$

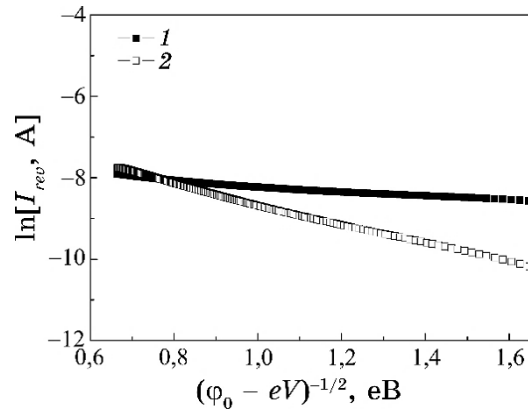


Рис. 7. Зворотні гілки ВАХ планарних (1) і наноструктурованих (2) діод Шоттки Ni/n-Si.<sup>7</sup>

Звідси видно, що залежності  $\ln[I - (V - IR_s) / R_{sh}] = f(V - IR_s)$  мають апроксимуватися прямими лініями з нахилом, що і спостерігається в дійсності (рис. 6).

В області напруг  $0,2 < V < 0,4$  В для наноструктури також спостерігається невеликий постійний нахил (велике значення показника неідеальності  $n > 2$ ) експериментальних залежностей  $\ln(I) = f(V)$ , що є свідченням тунельної природи механізму струмоперенесення [10].

### 3.3.2. Зворотні зміщення

У випадку різкого переходу вираз для тунельного струму при зворотньому зміщенні має вигляд [12]:

$$I_{rev} \approx a_0 \exp\left(\frac{b_0}{\sqrt{\phi_0(T) - eV}}\right), \quad (5)$$

де  $a_0$  і  $b_0$  — параметри, незалежні від напруги.

Таким чином, згідно з виразом (5), зображення зворотніх гілок ВАХ прямими лініями у координатах  $\ln(I_{rev}^t) = f((\phi_0 - eV)^{-1/2})$  (рис. 7) підтверджує домінування тунельного механізму струмоперенесення в області зворотніх зміщень, коли  $|V| > 3kT/e$ , для досліджуваних діод Шоттки.

### 3.4. Імпеданс-спектроскопія діод Шоттки Ni/n-Si

Дослідження ємнісних властивостей напівпровідникових струк-

тур з потенціалним бар'єром представляє значний інтерес і є ефективним інструментом для визначення електричних властивостей напівпровідникових приладів та їхніх компонентів.

Нижче визначено дійсне значення бар'єрної ємності діоди Шотткі Ni/n-Si на основі простої методи, основаної на аналізі спектральної залежності імпедансу досліджуваної структури  $Z(\omega)$ . Розглянемо одержані діоди Шотткі Ni/n-Si в рамках загальноприйнятої еквівалентної схеми (вставка до рис. 8).

Відомо, що імпеданс системи, зображеної на вставці до рис. 8, визначається виразом [13]:

$$Z = R_s + \frac{R_d}{1 + i\omega C_b R_d}, \quad (6)$$

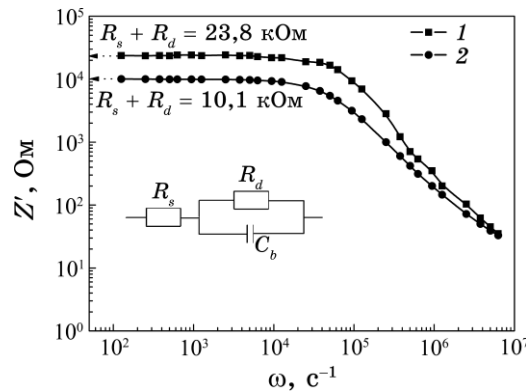
де  $\omega = 2\pi\nu$  — циклічна частота. Після перетворень вираз (6) набуває вигляду:

$$Z = R_s + \frac{R_d}{1 + \omega^2 C_b^2 R_d^2} - i \frac{\omega R_d^2 C_b}{1 + \omega^2 C_b^2 R_d^2} = Z' + iZ'', \quad (7)$$

де  $Z'$  і  $Z''$  — дійсна (активна) й уявна (реактивна) частина імпедансу відповідно:

$$Z' = R_s + \frac{R_d}{1 + \omega^2 C_b^2 R_d^2}, \quad (8)$$

$$Z'' = -\frac{\omega R_d^2 C_b}{1 + \omega^2 C_b^2 R_d^2}. \quad (9)$$



**Рис. 8.** Спектральна залежність дійсної частини виміряного імпедансу  $Z'$  для планарних (1) і наноструктурованих (2) діод Шотткі Ni/n-Si. На вставці — еквівалентна схема досліджуваних діод.<sup>8</sup>

Спочатку проаналізуємо вираз для спектрального розподілу дійсної частини виміряного імпедансу  $Z'$  (8). Оскільки бар'єрна ємність  $C_b$  набуває дуже маленького значення, то для області низьких частот змінного сигналу ( $\omega < 20 \text{ с}^{-1}$ ) можна записати, що  $(\omega C_b R_d)^2 \ll 1$ ; тому дійсна частина імпедансу переставляє залежати від частоти і визначається як  $Z' = R_s + R_d$  (рис. 8). Для випадку високої частоти збуджувального сигналу ( $\omega > 10^7 \text{ с}^{-1}$ ) можна записати, що  $(\omega C_b R_d)^2 \gg R_d$ ; тому крива спектральної залежності  $Z'$  має виходити на насичення ( $Z' = R_s$ ). Проте, як показано на рис. 8, криві не виходять на насичення, оскільки для виконання вищеописаної умови недостатньо частоти, яка обмежується технічними можливостями LCR-метра ( $f_{\max} = 1 \text{ МГц}$ ).

Перед аналізом спектрального розподілу уявної компоненти імпедансу  $Z''$  варто відмітити, що послідовний опір  $R_s$  не входить у вираз (9). Ця обставина, як буде показано нижче, дає можливість дуже просто визначити дійсне значення бар'єрної ємності напівпровідникової діоди без необхідності врахування впливу паразитного послідовного опору [14].

З виразу (9) видно, що спектральна залежність уявної компоненти виміряного імпедансу  $Z''$  є кривою з мінімумом (рис. 9). Для визначення частоти змінного сигналу  $\omega_{\min}$ , за якої уявна частина імпедансу набуває мінімального значення  $Z''_{\min}$ , візьмо похідну  $dZ''/d\omega$  (рис. 10):

$$\frac{dZ''}{d\omega} = \frac{\omega^2 C_b^3 R_d^4 - C_b R_d^2}{(1 + \omega^2 C_b^2 R_d^2)^2}. \quad (10)$$

З цього виразу видно, що  $dZ''/d\omega = 0$ , коли  $\omega^2 C_b^3 R_d^4 - C_b R_d^2 = 0$ . За цієї умови одержуємо вираз для циклічної частоти  $\omega_{\min}$ , при якій уявна складова імпедансу набуває мінімального значення:

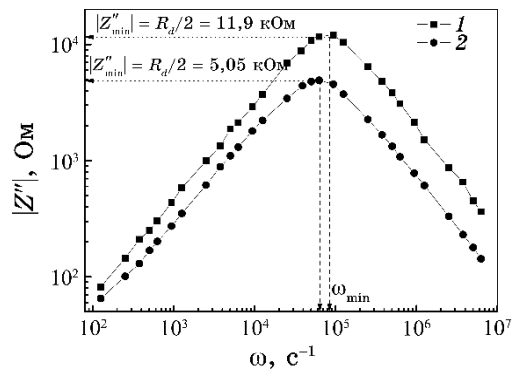
$$\omega_{\min} = \frac{1}{C_b R_d} = \frac{1}{\tau}, \quad (11)$$

де  $\tau = C_b R_d$  — характеристичний час.

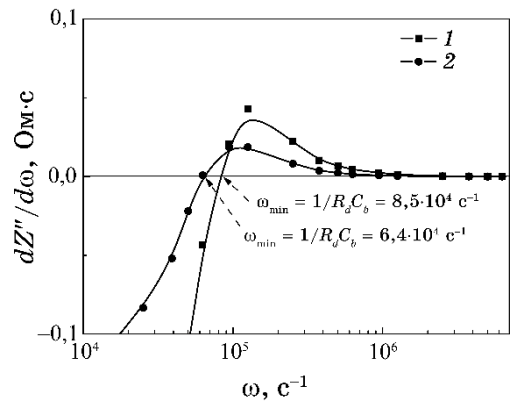
Підставивши  $\omega_{\min}$  у рівняння (9), враховуючи (11), бачимо, що модуль мінімального значення реактивної складової імпедансу  $|Z''_{\min}|$  дорівнює половині опору області просторового заряду  $R_d$ :

$$Z''_{\min} = -\frac{\omega_{\min} R_d^2 C_b}{1 + \omega_{\min}^2 C_b^2 R_d^2} = -\frac{R_d}{2}. \quad (12)$$

Підставивши визначене значення опору збідненої області  $R_d$  з спектрального розподілу уявної частини імпедансу  $Z''$  (рис. 9) у вираз (11), можна легко розрахувати дійсне значення бар'єрної ємності  $C_b$  (табл.):



**Рис. 9.** Спектральна залежність модуля уявної частини виміряного імпедансу  $|Z''|$  для планарних (1) і наноструктурованих (2) діод Шотткі Ni/n-Si.<sup>9</sup>



**Рис. 10.** Похідна від спектральної залежності уявної частини виміряного імпедансу  $dZ''/d\omega$  для планарних (1) і наноструктурованих (2) діод Шотткі Ni/n-Si.<sup>10</sup>

**ТАБЛИЦЯ.** Значення опору збідненої області та бар'єрної ємності для планарних (1) і наноструктурованих (2) діод Шотткі Ni/n-Si.<sup>11</sup>

	$R_d$ , кОм	$C_b$ , Ф
1) Планарна діода Шотткі Ni/n-Si	23,8	$4,94 \cdot 10^{-10}$
2) Наноструктурована діода Шотткі Ni/n-Si	10,1	$1,55 \cdot 10^{-9}$

$$C_b = \frac{1}{\omega_{\min} R_d} = \frac{1}{2\omega_{\min} |Z''_{\min}|}. \quad (13)$$

Відомо, що бар'єрна ємність діоди Шотткі визначається аналогічно до ємності плаского конденсатора:

$$C_b = \frac{\varepsilon_{\text{Si}}\varepsilon_0 A_b}{W}, \quad (14)$$

де  $\varepsilon_0$  — абсолютна діелектрична проникність вакууму,  $\varepsilon_{\text{Si}}$  — відносна діелектрична проникність кремнію,  $A_b$  — активна площа,  $W$  — ширина області просторового заряду.

З виразу (14) можна легко визначити ширину області просторового заряду досліджуваних діод Шотткі:

$$W = \frac{\varepsilon_{\text{Si}}\varepsilon_0 A_b}{C_b}. \quad (15)$$

З останньої таблиці видно, що ємність наноструктурованої діоди Шотткі Ni/*n*-Si на порядок більша від ємності планарної діоди Шотткі Ni/*n*-Si. Це зумовлено більшою активною площею переходу в наноструктурованому кремнії. Використовуючи визначену ширину області просторового заряду, яка складає  $3,24 \cdot 10^{-4}$  см, і значення бар'єрної ємності наноструктурованої діоди Шотткі Ni/*n*-Si, можна визначити активну площу переходу для наноструктурованої діоди Шотткі Ni/*n*-Si:

$$A_b = \frac{WC_b}{\varepsilon_{\text{Si}}\varepsilon_0}. \quad (16)$$

Варто відмітити, що визначена активна площа переходу для наноструктурованої діоди Шотткі Ni/*n*-Si ( $A'_b = 0,51 \text{ см}^2$ ) більше ніж втричі перевищує активну площу переходу планарної діоди Шотткі Ni/*n*-Si ( $A_b = 0,16 \text{ см}^2$ ).

#### 4. ВИСНОВКИ

Виготовлено планарні та наноструктуровані діоди Шотткі Ni/*n*-Si методом магнетронного розпорошення при постійній напрузі мішені чистого нікелю на підкладинки плаского та наноструктурованого кремнію. Наноструктуровані підкладинки кремнію одержували шляхом цавлення кремнійових підкладинок з наночастинками срібла в розчині 5M HF і 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

З вольт-амперних характеристик встановлено, що одержані діоди Шотткі Ni/*n*-Si мають яскраво виражені діодні характеристики з висотою потенціального бар'єру за кімнатної температури  $\phi_0 = 0,27 \text{ eV}$ .

Аналіза прямих гілок ВАХ одержаних діод Шотткі Ni/*n*-Si, побудованих в напівлогаритмічному масштабі, показала, що для

планарних діод Шотткі Ni/n-Si значення показника неідеальності ( $n$ ) в області напруг  $3kT/e < V < 0,1$  В близькі до одиниці, що є доказом домінування надбар'єрної емісії, а в області напруг  $V > 0,1$  В показник неідеальності дорівнює 4,8, що є свідченням тунельної природи механізму струмоперенесення. Для наноструктурованих діод Шотткі Ni/n-Si в області початкових прямих зміщень показник неідеальності дорівнює 1,5; тому, із врахуванням наявності центрів рекомбінації, які зумовлені великою кількістю обірваних ковалентних зв'язків у кремнії внаслідок його наноструктуризації, домінуючим є емісійно-рекомбінаційний механізм струмоперенесення. В області напруг  $V > 0,2$  В показник неідеальності набуває великого значення ( $n = 4,1$ ), що є свідченням тунельної природи механізму струмоперенесення.

При аналізі зворотніх гілок ВАХ досліджуваних структур встановлено, що для планарних і наноструктурованих діод Шотткі Ni/n-Si домінуючим механізмом струмоперенесення є тунелювання.

Аналізою спектральних залежностей дійсної ( $Z'$ ) й уявної ( $Z''$ ) частин вимірюваного імпедансу для планарних і наноструктурованих діод Шотткі Ni/n-Si було визначено значення опору збідненої області та бар'єрної ємності досліджуваних структур. Також було визначено активну площу переходу для наноструктурованої діоди Шотткі Ni/n-Si ( $A'_b = 0,51$  см<sup>2</sup>), яка більше ніж в три рази перевищує активну площу переходу планарної діоди Шотткі Ni/n-Si ( $A_b = 0,16$  см<sup>2</sup>).

Було встановлено, що досліджувані діоди Шотткі Ni/n-Si можна успішно використовувати як фотодіоди у фотодіодному режимі роботи.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. I. Q. Pashaev, *Semiconductors*, **46**: 1085 (2012); <https://doi.org/10.1134/S1063782612080155>.
2. E. Ozerden, Y. S. Ocak, A. Tombak, T. Kilicoglu, and A. Turut, *Thin Solid Films*, **597**: 14 (2015); <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.11.013>.
3. I. Jyothi, V. Janardhanam, H. Hong, and Ch.-J. Choi, *Materials Science in Semiconductor Processing*, **39**: 390 (2015); <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.05.043>.
4. W. Filali, N. Sengouga, S. Oussalah, R. H. Mari, D. Jameel, N. A. Al Saqri, M. Aziz, D. Taylor, and M. Henini, *Superlattices and Microstructures*, **111**: 1010 (2017); <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2017.07.059>.
5. X. Shen, B. Sun, D. Liu, and S.-T. Lee, *J. Am. Chem. Soc.*, **133**, No. 48: 19408 (2011); DOI: 10.1021/ja2071237.
6. M. M. Solovan, V. V. Brus, A. I. Mostovyi, P. D. Maryanchuk, I. G. Orletskiy, T. T. Kovaliuk, and S. L. Abashin, *Semiconductors*, **51**: 542 (2017); <https://doi.org/10.1134/S1063782617040200>.

7. M. M. Solovan, *J. Nano- Electron. Phys.*, **10**, No. 2: 02030 (2018); [https://doi.org/10.21272/jnep.10\(2\).02030](https://doi.org/10.21272/jnep.10(2).02030).
8. X. Zhang, D. Hu, Z. Tang, and D. Ma, *Applied Surface Science*, **357**: 1939 (2015); <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.09.146>.
9. J. Oh, H.-Ch. Yuan, and H. M. Branz, *Nature Nanotechnology*, **7**: 743 (2012); <https://doi.org/10.1038/nnano.2012.166>.
10. A. I. Mostovyi, V. V. Brus, and P. D. Maryanchuk, *Semiconductors*, **47**: 799 (2013); <https://doi.org/10.1134/S1063782613060171>.
11. B. L. Sharma and R. K. Purohit, *Semiconductor Heterojunctions* (Oxford–New York: Pergamon Press: 1974).
12. S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 3<sup>rd</sup> Ed. (Eds. S. M. Sze and K. Kwok) (New Jersey: Wiley: 2007), p. 815.
13. V. V. Brus, *Semicond. Sci. Technol.*, **27**: 035024 (2012); <https://doi.org/10.1088/0268-1242/27/3/035024>.
14. V. V. Brus, *Semiconductors*, **46**: 1012 (2012); <https://doi.org/10.1134/S1063782612080040>.

<sup>1</sup>*Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,  
2, Kotsiubynsky Str.,*

*UA-58012 Chernivtsi, Ukraine*

<sup>2</sup>*Center for Polymers and Organic Solids,  
Department of Chemistry and Biochemistry,  
University of California at Santa Barbara,  
CA 93106 Santa Barbara, U.S.A.*

<sup>1</sup> Fig. 1. Schematic representation of the planar (1) and nanostructured (2) Schottky diodes Ni/n-Si.

<sup>2</sup> Fig. 2. Dark and light  $I$ – $V$  characteristics of the planar (1) and nanostructured (2) Schottky diodes Ni/n-Si on the semi-logarithmic scale.

<sup>3</sup> Fig. 3. Dependence of the ratio  $I_{light}/I_{dark}$  on the voltage of the planar (1) and nanostructured (2) Schottky diodes Ni/n-Si. The inset shows the dependences of sensitivity ( $R$ ) and detectivity ( $D^*$ ) on voltage for two Schottky diodes.

<sup>4</sup> Fig. 4.  $I$ – $V$  characteristics of the planar (1) and nanostructured (2) Schottky diodes Ni/n-Si.

<sup>5</sup> Fig. 5. Dependence of the differential resistance of the planar (1) and nanostructured (2) Schottky diodes Ni/n-Si.

<sup>6</sup> Fig. 6. Forward  $I$ – $V$  characteristics of the planar (1) and nanostructured (2) Schottky diodes Ni/n-Si on the semi-logarithmic scale with accounting the effect of both series resistance and shunt resistance.

<sup>7</sup> Fig. 7. Reverse bias of the  $I$ – $V$  characteristics of the planar (1) and nanostructured (2) Schottky diodes Ni/n-Si.

<sup>8</sup> Fig. 8. Spectral dependence of the real part  $Z'$  of the measured impedance for the planar (1) and nanostructured (2) Schottky diodes Ni/n-Si. The inset shows the equivalent circuit of the Schottky diodes Ni/n-Si.

<sup>9</sup> Fig. 9. Spectral dependence of the module of the imaginary part  $|Z''|$  of the measured impedance for the planar (1) and nanostructured (2) Schottky diodes Ni/n-Si.

<sup>10</sup> Fig. 10. Derivative  $dZ''/d\omega$  of the spectral dependence of the imaginary part of the measured impedance for the planar (1) and nanostructured (2) Schottky diodes Ni/n-Si.

<sup>11</sup> TABLE. Values of depleted-region resistance and barrier capacitance for the planar (1) and nanostructured (2) Schottky diodes Ni/n-Si.