

PACS numbers: 71.55.Ak, 73.30.+y, 73.61.Jc, 85.30.Hi, 85.30.Kk, 85.40.Ls, 85.40.Xx

## Контакти з бар'єром Шотткі Au–TiB<sub>x</sub>–n-GaN

Р. Я. Кудрик

*Львівський національний університет імені Івана Франка,  
вул. Драгоманова, 50,  
79000 Львів, Україна*

Досліджено вплив дефектності епітаксійної плівки нітриду галію з концентрацією донорів  $\cong 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  на механізми струмоперенесення в бар'єрних контактах на основі Au–TiB<sub>x</sub>–n-GaN на монокристалічному підложжі Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Проведено дослідження температурної залежності ВАХ в межах 80–600 К. Струмоперенесення в інтервалі температури 80–340 К здійснюється за тунельним механізмом. В області температур 420–600 К домінуючим є термоелектронний механізм струмоперенесення. В області 340–420 К обидва механізми струмоперенесення переважають на різних ділянках ВАХ. Висота бар'єру, визначена з ВФХ, добре узгоджується з висотою бар'єру, визначеною екстраполяцією до  $n = 1$  температурної залежності ефективної висоти бар'єру, одержаної з ВАХ, і складає 1 еВ. Спостережуваний тунельний механізм струмоперенесення може бути пов'язаним з шунтувальними дислокаціями, котрі перетинають область просторового заряду. Оцінка густини дислокацій, зроблена на основі даного припущення, добре узгоджується з даними рентгенодифракційних досліджень таких плівок.

The influence of gallium nitride epitaxial-film structure imperfection with donor concentration of  $\cong 4 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  on the charge-transport mechanisms in barrier contacts based on Au–TiB<sub>x</sub>–n-GaN on a monocrystalline substrate of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> are investigated. The temperature dependence of the voltage–current characteristic at 80–600 K is studied. In the temperature regions of 80–340 K and 420–600 K, the tunnelling mechanism of current transport and thermoelectronic one, respectively, are dominant. In the temperature region of 340–420 K, both current-transport mechanisms are presented on different parts of current–voltage characteristic. The tunnelling current-transport mechanism may be associated with shunt dislocations, which intersect the spatial charge region. The dislocation density is evaluated on the basis of this assumption and is in a good agreement with the results of X-ray diffraction studies.

Исследовано влияние дефектности эпитаксиальной плёнки нитрида галлия с концентрацией доноров  $\cong 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  на механизмы токопереноса в

барьерных контактах на основе  $\text{Au-TiB}_x-n\text{-GaN}$  на монокристаллической подложке  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Исследована температурная зависимость ВАХ в пределах 80–600 К. Токоперенос в интервале температур 80–340 К осуществляется по туннельному механизму. В области температур 420–600 К доминирующим является термоэлектронный механизм токопереноса. В области 340–420 К оба механизма токопереноса преобладают на разных участках ВАХ. Высота барьера, определённая из ВФХ, хорошо согласуется с высотой барьера, определённой экстраполяцией к  $n = 1$  температурной зависимости эффективной высоты барьера, полученной из ВАХ, и составляет 1 эВ. Наблюдаемый туннельный механизм токопереноса связан с шунтирующими дислокациями, которые пересекают область пространственного заряда. Оценка плотности дислокаций, сделанная на основе этого предположения, хорошо согласуется с результатами рентгенодифракционного исследования данных плёнок.

**Ключові слова:** бар'єр Шотткі, нітрид галію, механізм струмоперенесення, ВАХ, ВФХ.

**Key words:** Schottky barrier, gallium nitride, mechanism of charge transport, current–voltage characteristic, capacity–voltage characteristic.

**Ключевые слова:** барьер Шоттки, нитрид галлия, механизм токопереноса, ВАХ, ВФХ.

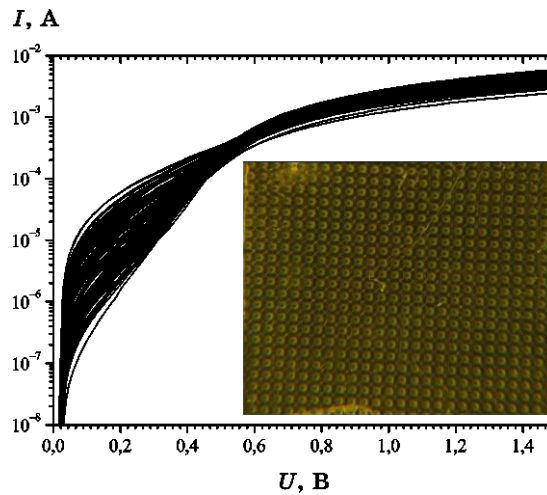
*(Отримано 8 вересня 2015 р.)*

## 1. ВСТУП

Нітрид галію — перспективний матеріал для силової електроніки, НВЧ- та оптоелектроніки [1–3]. Проте, одним із недоліків, що перешкоджають його широкому використанню є відсутність власних підкладок великого діаметра. Найчастіше використовують епітаксійні плівки нітриду галію, вирощені на підкладках  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , це значно дешевше і більш вигідно з технологічної сторони. Проте, у приладах на основі таких плівок виникає низка проблем, пов'язаних із значною дефектністю епітаксійних плівок, внаслідок невідповідності параметрів ґратниці епітаксійної плівки та підкладки. Зокрема, у поверхнево-бар'єрних структурах це призводить до появи нетипових механізмів струмоперенесення. Дослідження і детальний опис механізмів струмоперенесення у контактах з бар'єром Шотткі на основі епітаксійних шарів нітриду галію зі значною дефектністю розглянуто у даній роботі.

## 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МЕТОДИКА

Досліджені в роботі діоди з бар'єром Шотткі (ДБШ)  $\text{Au-TiB}_x-n$ -



**Рис. 1.** ВАХ контактів з бар'єром Шоттки Au-TiB<sub>x</sub>-n-GaN, зібрані з контактів по усій пластині; на вставці — зовнішній вигляд тестової пластини.<sup>1</sup>

GaN були виготовлені на епітаксійній плівці нітриду галію, вирощеній на монокристалічних підкладках Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001) методом металорганічної газофазної епітаксії. Більш докладно технологію та структурні характеристики ДБШ опубліковано в [4]. На вибірці ДБШ на пластині (див. рис. 1, вставка) досліджено вольт-амперні характеристики (ВАХ) та вольт-фарадні характеристики (ВФХ). На одному з типових контактів досліджено температурну залежність ВАХ. На тестовій пластині з аналогічною шаровою структурою, але без фотолітографії рентгенодифракційною методом визначено усереднену густину дислокацій.

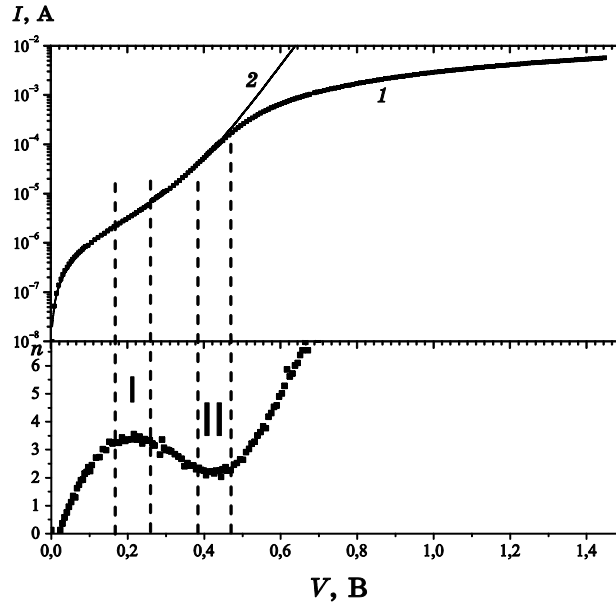
### 3. РЕЗУЛЬТАТИ І ОБГОВОРЕННЯ

Одержані вольт-амперні характеристики галій-нітридних ДБШ мали значний розкид (див. рис. 1). Такий розкид може бути пов'язаний з дефектністю епітаксійної плівки, яка проявляється у вигляді шунтувальних дефектів і на ВАХ спостерігається у вигляді надлишкових струмів при малих значеннях прикладених напруг (див. рис. 2).

Зазвичай ВАХ ДБШ описується залежністю:

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{n(T)kT}\right), \quad (1)$$

звідки



**Рис. 2.** Характерна ВАХ ДБШ (зверху): 1 — експеримент, 2 — теоретичний розрахунок без врахування послідовного опору та залежність ефективного фактора ідеальності, порахованого за формулою (2) з двома ділянками, що відповідають двом механізмам струмоперенесення: I — переважає тунельна складова, II — переважає термоелектронна складова.<sup>2</sup>

$$n(V) = \frac{dV}{d \ln(I)} \frac{q}{kT}. \quad (2)$$

Проте, для нашого випадку ВАХ у деякому інтервалі температур має дві ділянки з різними факторами ідеальності та струмами відсічки (рис. 2). Таку ВАХ на ділянці, де вплив послідовного опору незначний, можна описати сумою двох складових струму, зумовленого термоелектронною та польовою емісією:

$$I = I_{TE} \left[ \exp\left(\frac{qV}{n_{TE}(T)kT}\right) - 1 \right] + I_F \left[ \exp\left(\frac{qV}{n_F(T)kT}\right) - 1 \right], \quad (3)$$

де  $I_{TE} = A^* T^2 S \exp\left(\frac{q\phi_b}{kT}\right)$  — струм насичення для термоелектронної емісії,  $I_F = q\nu_D S \exp\left(\frac{q\phi_b}{n_F(T, \varepsilon)kT}\right)$  — струм насичення для термопольової емісії згідно з моделлю дислокаційного шунту-

вання [5],  $\rho$  — густина дислокацій,  $\nu_D$  — Дебайова частота,  $\varepsilon$  — енергія активації  $n_{TF} = \varepsilon / (kT)$ .

Оскільки фактор ідеальності в струмі насичення польової компоненти, залежний від енергії активації (знаходиться під експонентою), то його вплив досить істотно відобразатиметься на ефективній висоті бар'єру, визначеній із рівняння (1), що видно з рис. 3.

На рисунку 4 представлено температурні залежності ВАХ одного з досліджених контактів. Можна також відзначити те що,

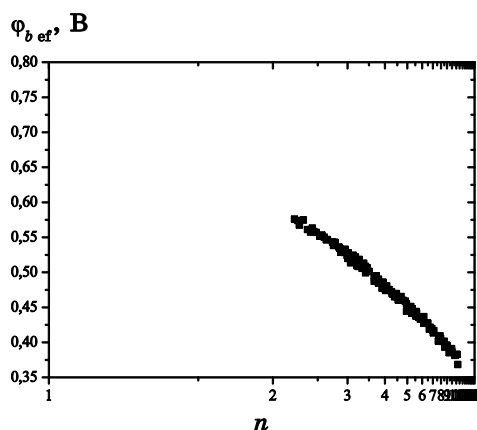


Рис. 3. Ефективна висота бар'єру в залежності від фактора ідеальності (порахована з ВАХ вибірки контактів на рис. 1 при  $V = 0,4$  В).<sup>3</sup>

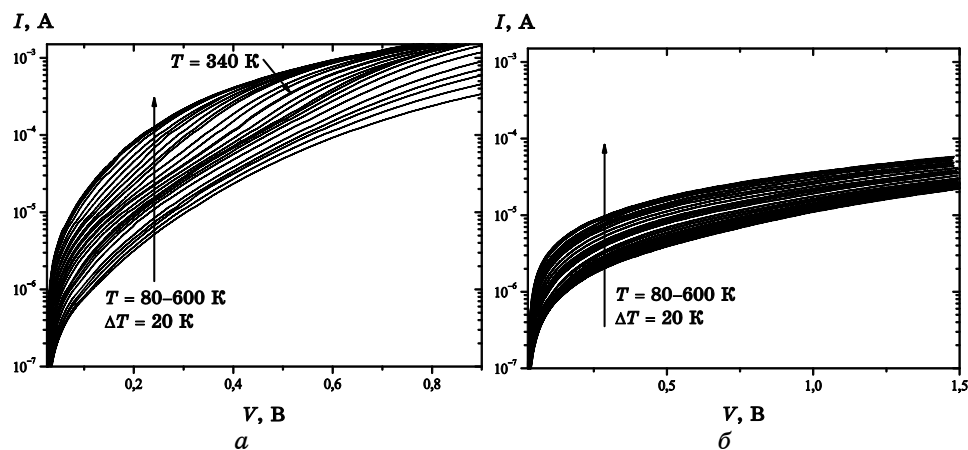
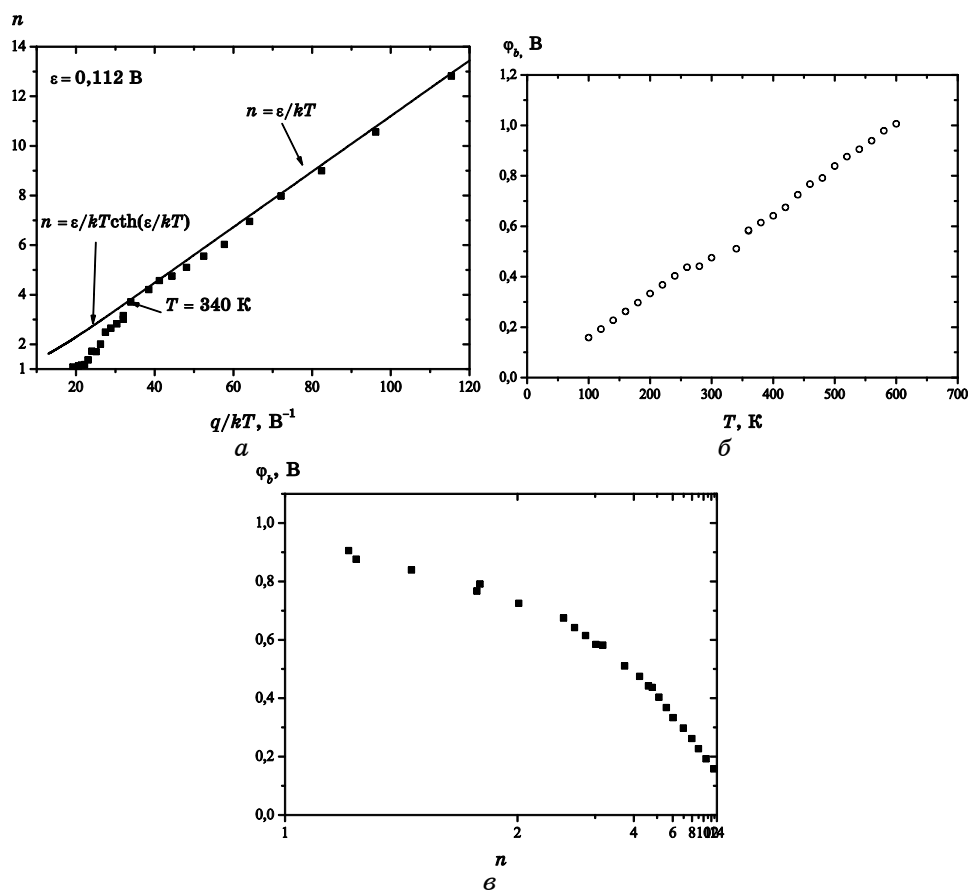


Рис. 4. Температурні залежності ВАХ контактів з бар'єром Шотткі Au-TiB<sub>x</sub>-n-GaN.<sup>4</sup>

що при низьких температурах ВАХ має лише одну експоненційну ділянку, яка відповідає тунелюванню. При підвищенні температури до 280 К починає з'являтися друга експоненційна ділянка, яка, очевидно, належить іншому механізму струмоперенесення, що і зумовлює різке падіння *ефективного фактора ідеальності* (рис. 5, а).

Розрахована густина дислокацій з відомого струму насичення  $I_F$  при низьких температурах склала  $\rho = 1,7 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$ , що узгоджується з даними роботи [4], в якій густину дислокацій визначено рентгенодифракційною методою в шарах GaN, вирощених на сапфірі методом металомежової газофазної епітаксії в ЗАТ «Елма-Малахіт» виявилася рівною  $(1-3) \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$  для різних зразків.



**Рис. 5.** а — температурна залежність ефективного фактора ідеальності; б — температурна залежність ефективного висоти бар'єру; в — залежність ефективного висоти бар'єру від ефективного фактора ідеальності в діапазоні температур 80–600 К.<sup>5</sup>

Спостережуваний тунельний механізм струмоперенесення не може бути пов'язаний із безпосереднім тунелюванням носіїв крізь ОПЗ, оскільки за даної концентрації носіїв ( $\cong 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ) ширина ОПЗ надто велика. У випадку перенесення заряду, пов'язаного з шунтувальними дислокаціями, котрі пересікають ОПЗ, тунелювання може відбуватися з торця дислокації, що збільшує його ефективність.

ВФХ (рис. 6) описується залежністю

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(\phi_b - V - kT/q)}{q\epsilon_s N_d} \quad (4)$$

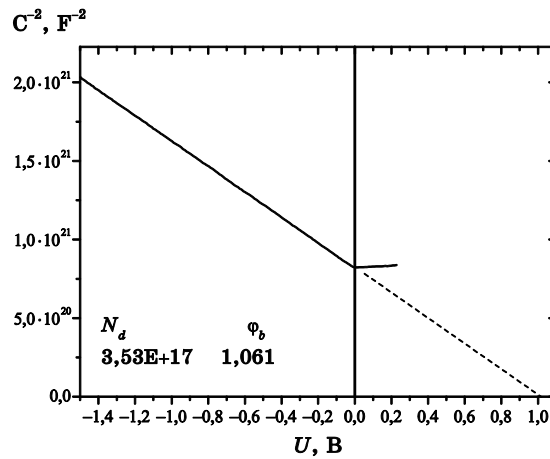


Рис. 6. ВФХ діоди Шоттки Au-TiB<sub>x</sub>-n-GaN, ВАХ якої представлено на рис. 2.<sup>6</sup>

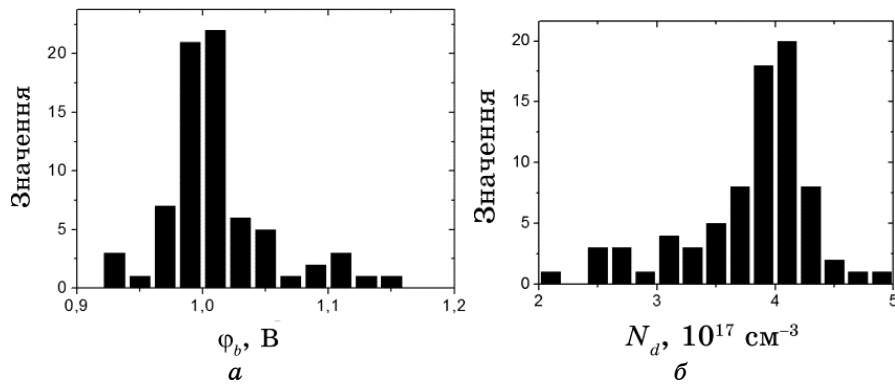


Рис. 7. Гістограми розподілу висоти бар'єру Шоттки (а) та  $N_d$  (б) по пластині, одержані з ВФХ.<sup>7</sup>

Проведено вимірювання вольт-фарадних характеристик вибірки контактів та розраховано параметри — висоту бар'єру Шотткі та концентрацію некомпенсованих донорів, гістограми розподілу яких подано на рис. 7. Висота бар'єру склала  $\cong 1$  В, що добре узгоджується з висотою бар'єру, одержаною з ВАХ при високих температурах або екстраполяцією залежності  $\phi_b(n)$  (рис. 5, в) до значення  $n = 1$ .

#### 4. ВИСНОВКИ

1. В результаті досліджень виявлено, що ВАХ ДБШ при кімнатній температурі має дві характерні ділянки, на одній з яких, в околі 0,2 В, переважає польовий механізм струмоперенесення, на іншій, в околі 0,4 В — термоелектронний механізм струмоперенесення.

2. Протікання струму в бар'єрах Шотткі Au-TiB<sub>x</sub>-n-GaN в інтервалі температур 80–340 К, здійснюється тунельним механізмом, через дислокації, що перетинають ОПЗ. В області температур 420–600 К домінуючим є термоелектронний механізм струмоперенесення. В області 340–420 К обидва механізми перенесення заряду переважають на різних ділянках ВАХ.

3. Значення висоти бар'єру, визначена з даних ВФХ, добре узгоджується з результатами висоти бар'єру, визначеної екстраполяцією до  $n = 1$  температурної залежності висоти бар'єру, одержаної з ВАХ, і складає 1 еВ.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. А. А. Лебедев, В. Е. Челноков, *ФТП*, **33**, № 9: 1096 (1999).
2. В. Войтович, А. Гордеев, А. Думаневич, *Силовая электроника*, № 5: 4 (2010).
3. А. Полищук, *Современная электроника*, № 4: 20 (2006).
4. А. Е. Belyaev, N. S. Boltovets, V. N. Ivanov, V. P. Kladko, R.V. Konakova, Ya. Ya. Kudryk, A. V. Kuchuk, O. S. Lytvyn, V. V. Milenin, Yu. N. Sveshnikov, *16<sup>th</sup> Int. Crimean Conference 'Microwave & Telecommunication Technology' (CriMiCo'2006) (11–15 September 2006)* (Sevastopol, The Crimea, Ukraine: IEEE. Weber Co.: 2006), vol. 2, p. 644.
5. В. В. Евстропов, М. Джумаева, Ю. В. Жилаев и др., *ФТП*, **34**, № 11: 1357 (2000).

#### REFERENCES

1. A. A. Lebedev and V. E. Chelnokov, *Fiz. Tekhn. Poluprovod.*, **33**, No. 9: 1096 (1999) (in Russian).
2. V. Vojtovich, A. Gordeev, and A. Dumanevich, *Silovaya Elektronika*, No. 5:



- 4 (2010) (in Russian).
3. A. Polishhuk, *Sovremennaya Elektronika*, No. 4: 20 (2006) (in Russian).
  4. A. E. Belyaev, N. S. Boltovets, V. N. Ivanov, V. P. Kladko, R.V. Konakova, Ya. Ya. Kudryk, A. V. Kuchuk, O. S. Lytvyn, V. V. Milenin, Yu. N. Sveshnikov, *16<sup>th</sup> Int. Crimean Conference 'Microwave & Telecommunication Technology' (CriMiCo'2006) (11-15 September 2006)* (Sevastopol, The Crimea, Ukraine: IEEE. Weber Co.: 2006), vol. 2, p. 644.
  5. V. V. Evstropov, M. Dzhumaeva, Yu. V. Zhilyaev et al., *Fiz. Tekhn. Poprovod.*, **34**, No. 11: 1357 (2000) (in Russian).

---

*Ivan Franko National University of Lviv,  
50, Drahomanov Str.,  
79005 Lviv, Ukraine*

- <sup>1</sup> Fig. 1. Current-voltage characteristic of the Schottky-barrier Au-TiB<sub>x</sub>-n-GaN contacts. In inset, external view of test plate.
- <sup>2</sup> Fig. 2. Current-voltage characteristic (upper part) of the Schottky-barrier diode: 1—experiment; 2—theoretical calculation without taking into account series resistance. The dependence of efficient factor of perfection (lower part) evaluated with Eq. (2) with two regions of charge transport mechanism: I — tunnelling component is dominant; II — thermoelectric component is dominant.
- <sup>3</sup> Fig. 3. The effective barrier height depending on the perfection factor (calculated on the basis of data in Fig. 1 at  $V=0.4$  V).
- <sup>4</sup> Fig. 4. Temperature dependence of current-voltage characteristic of the Schottky-barrier Au-TiB<sub>x</sub>-n-GaN contacts.
- <sup>5</sup> Fig. 5. (a) temperature dependence of effective factor of perfection; (b) temperature dependence of effective barrier height; (c) dependence of effective barrier height vs. effective factor of perfection in the temperature region of 80–600 K.
- <sup>6</sup> Fig. 6. Capacity-voltage characteristic of the Schottky-barrier diode Au-TiB<sub>x</sub>-n-GaN. Its current-voltage characteristic is shown in Fig. 2.
- <sup>7</sup> Fig. 7. Histograms of distributions of the Schottky-barrier height (a) and  $N_d$  (b) over the plate based on the capacity-voltage characteristic data.