

УДК 621.315.592

## ВЛИЯНИЕ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТА МЕТАЛЛ—ПОЛУПРОВОДНИК С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ ФОТОЭМИССИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Борковская О. Ю., Горбач Т. Я., Дмитрук Н. Л., Мищук О. Н.

Исследовано влияние микрорельефной анизотропно травленной поверхности на спектры фотоэмиссионного тока диодов Шоттки Au—GaAs. Обнаружено повышение fotocувствительности барьеров Шоттки и увеличение примерно вдвое температурного коэффициента высоты барьера.

Создание микрорельефа поверхности путем химического анизотропного травления широко используется для ослабления отражения света и усиления поглощения. Вблизи края фундаментального поглощения непрямозонных полупроводников типа Si увеличение поглощения может достигать значений  $2n^2$  ( $n$  — показатель преломления света) за счет многократных отражений [1]. Это приводит к увеличению фототока поверхностно-барьерных структур, используемых в качестве фотоприемников или солнечных элементов [2]. Однако при этом из-за увеличения поверхности перехода возрастает темновой ток, что может привести к снижению напряжения холостого хода. Кроме того, создание микрорельефа поверхности полупроводника и последующей границы раздела металл—полупроводник (МП) может привести к ухудшению характеристик барьера Шоттки за счет неоднородности и усиления роли краевых эффектов, обусловленных возрастанием электрического поля в области выступов. Для выяснения механизма токопрохождения в контакте металл—микрорельефная поверхность полупроводника и определения параметров границы раздела нами проведено сравнительное экспериментальное исследование характеристик барьеров Шоттки (на примере Au—GaAs) на полированной поверхности и микрорельефной с высотой неровностей порядка или больше протяженности области пространственного заряда (ОПЗ) методами прямых вольтамперных (ВАХ), вольтфарадных характеристик (ВФХ) и спектров фотоэмиссионного тока в диапазоне температур  $T=300-77$  К. Последнему вопросу посвящена первая часть работы.

### 1. Методика эксперимента и приготовления образцов

Исследовались эпитаксиальные  $n-n^+$ -структуры GaAs (100) с концентрацией электронов  $n=N_n-N_a=(1\div 2.6)\cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Микрорельеф создавался химическим анизотропным травлением [3]. Морфология поверхности исследовалась в металлографическом и электронном микроскопах. Барьеры Шоттки изготавливались вакуумным напылением золота через маску с отверстиями диаметром 1 мм при подогреве подложки до +150 °С. Омический контакт к подложке  $n^+$ -GaAs получен путем сплавления индия. Все технологические операции на идентичных пластинах с плоской и текстурированной поверхностями проводились в одном цикле. На рис. 1 приведена фотография микрорельефной поверхности с дендритной морфологией (начальная стадия), на которой форми-

ровались диоды Шоттки Au—GaAs. Выступы на поверхности представляют собой дендриты, ограниченные плоскостью (111) [реже (100) или (110)]. Глубина микрорельефа достигает 1–2 мкм, т. е. существенно превышает толщину ОПЗ.

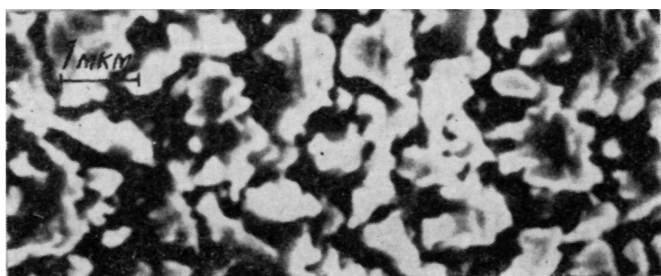


Рис. 1. Микрофотография микрорельефной поверхности диодов Au—GaAs (увел. 5 000).

## 2. Результаты измерений и их интерпретация

Известно, что наиболее достоверные значения высоты барьера на границе МП дает фотоэлектрический метод, основанный на измерении спектров фототока  $i_{\phi}$ , обусловленного переходом электронов из металла в полупроводник *n*-типа.

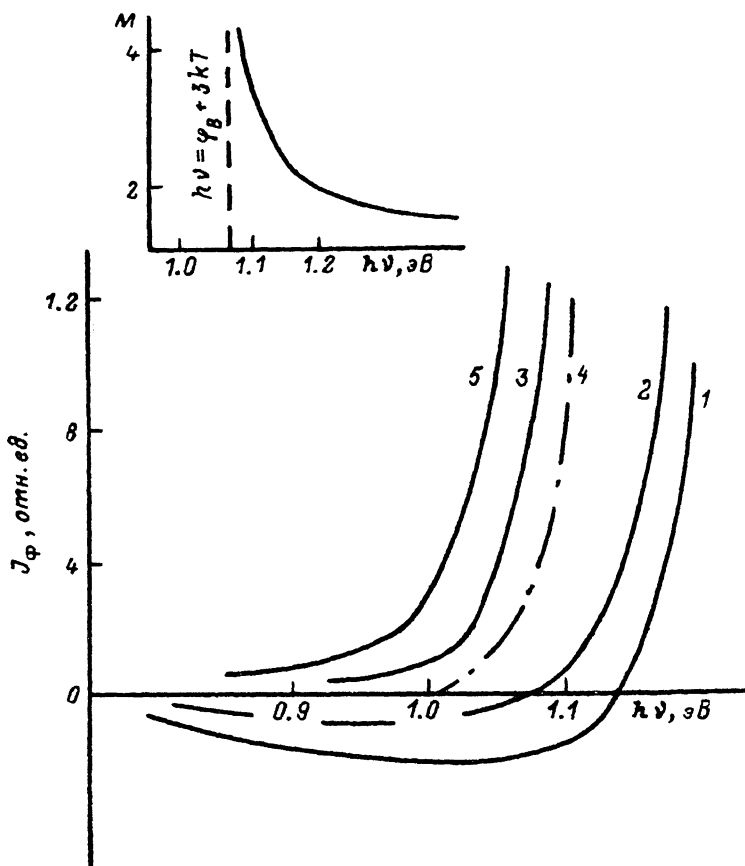


Рис. 2. Спектральная зависимость фототоклика при различных температурах для диодов Au—GaAs с микрорельефной (сплошные линии) и плоской (штрихпунктирная) поверхностями.

$T, K$ : 1 — 160, 2 — 195, 3 — 220, 4, 5 — 300. На вставке — спектральная зависимость увеличения фототоклика, обусловленного понижением высоты барьера.

На рис. 2 показаны спектральные характеристики фотоэмиссионного тока для плоской и микрорельефной поверхностей при разных температурах, из которых

следует: 1) возрастание положительного фотоэмиссионного тока в 5—10 раз после профилирования поверхности; 2) коротковолновый сдвиг с понижением температуры; 3) наличие в длинноволновой области фототока обратного знака на рельефной поверхности при низких температурах. Поскольку последнее, по-видимому, обусловлено перезарядкой глубоких уровней в ОПЗ у границы МП и на самой границе МП, при определении высоты барьера отрицательный фототок вычитался.<sup>1</sup> На рис. 3 показаны соответствующие зависимости  $i_{\phi}(h\nu)$  для ряда температур, отсечка  $h\nu_0$  прямолинейной части которых при  $h(\nu - \nu_0) \gg kT$  дает высоту барьера  $\varphi_B$  с учетом снижения ее силами зеркального изображения [4]. По полученным значениям  $\varphi_B$  была построена температурная зависимость высоты барьера (см. вставку на рис. 3). Как видно из таблицы, на микрорельефной границе МП температурный коэффициент  $\beta$  зависимости  $\varphi_B(T) = \varphi_{B0} - \beta T$  почти вдвое больше по сравнению со случаем плоской границы раздела.

Результаты фотоэмиссионных измерений

№ образца	Тип	$\varphi_B$ , эВ	$\frac{d\varphi_B}{dT}$ , $10^{-4}$ эВ/град
2	} Плоский {	0.990	3.30
3		1.000	3.26
5а	} Профили- рованный {	0.950	5.80
6а		0.925	5.85
8а		0.925	5.60

Определяемая фотоэлектрическим методом (с точностью  $\pm 0.01$  эВ) эффективная высота барьера диодов Шоттки на микрорельефной поверхности оказалась меньше на величину  $\Delta\varphi = 0.04 - 0.075$  эВ по сравнению с высотой барьера диодов Шоттки с плоской границей раздела. Это понижение нельзя связать с образованием барьеров на гранях (110) и (111), появляющихся на поверхности (100) в результате химического анизотропного травления [3], поскольку экспериментальные данные [4] свидетельствуют об обратном: высота барьера на плоскостях (110) и (111) выше на  $\sim 0.1$  эВ по сравнению с высотой барьера на поверхности (100).

Наблюдаемое понижение высоты барьера, по-видимому, обусловлено макронеподобностью микрорельефной поверхности GaAs, а именно наличием выступов, в которых поле повышено настолько, что становятся существенными процессы туннелирования основных носителей тока через ОПЗ. Существование таких участков на поверхности с преобладанием термополевой эмиссии (а не термоэлектронной) эквивалентно снижению высоты барьера на этих участках на величину [4]

$$\Delta\varphi \approx (s/2)^{2/3} (E_{00})^{2/3} (V_D)^{1/3}, \quad (1)$$

где  $V_D$  — диффузионный потенциал, а параметр  $E_{00}$  характеризует вероятность процессов туннелирования.

Однако основной отличительной чертой ИК спектров фототока диодов Шоттки на микрорельефной поверхности является увеличенное (почти на порядок) значение фототока по сравнению с фототоком диодов Шоттки с плоской поверхностью (рис. 2). Такое увеличение фототоклика может быть обусловлено несколькими причинами: 1) уменьшением коэффициента отражения света микрорельефной (маговой) поверхностью золота; 2) понижением эффективной высоты барьера на границе МП; 3) повышением поглощения света в пленке Au толщиной  $\sim 20$  нм за счет многократных отражений, в том числе от тыльной поверхности GaAs [1]. Максимальное увеличение фототока за счет ослабления коэффициента отражения Au составляет величину менее  $1/(1-R) \approx 3$ , поскольку  $R = 0.7$  для

<sup>1</sup> Для последнего достаточно предположения о насыщении отрицательного фототока с ростом  $h\nu \leq \varphi_B$ , а подтверждением является линейность люксамперных характеристик при таком отсчете.

тонких пленок золота на плоской поверхности GaAs при  $\lambda=0.64$  мкм [5, 6]. Далее, величина возрастания фототока  $M=i_{\phi}/i_{\phi 0}$  из-за снижения высоты барьера на части границы раздела МП, согласно теории Фаулера [4], определяется следующим выражением:

$$M = \frac{\gamma i_{\phi}^* + (1 - \gamma) i_{\phi}}{i_{\phi}} = (1 - \gamma) + \gamma \left( 1 + \frac{\Delta\varphi}{h\nu - \varphi_B} \right)^2, \quad (2)$$

где  $\gamma$  — часть поверхности с пониженной  $\varphi_B$ ,  $i_{\phi}^*$  — фототок через участки с пониженным значением высоты барьера  $\varphi_B^* = \varphi_B - \Delta\varphi$ ,  $i_{\phi}$  — фототок через участки

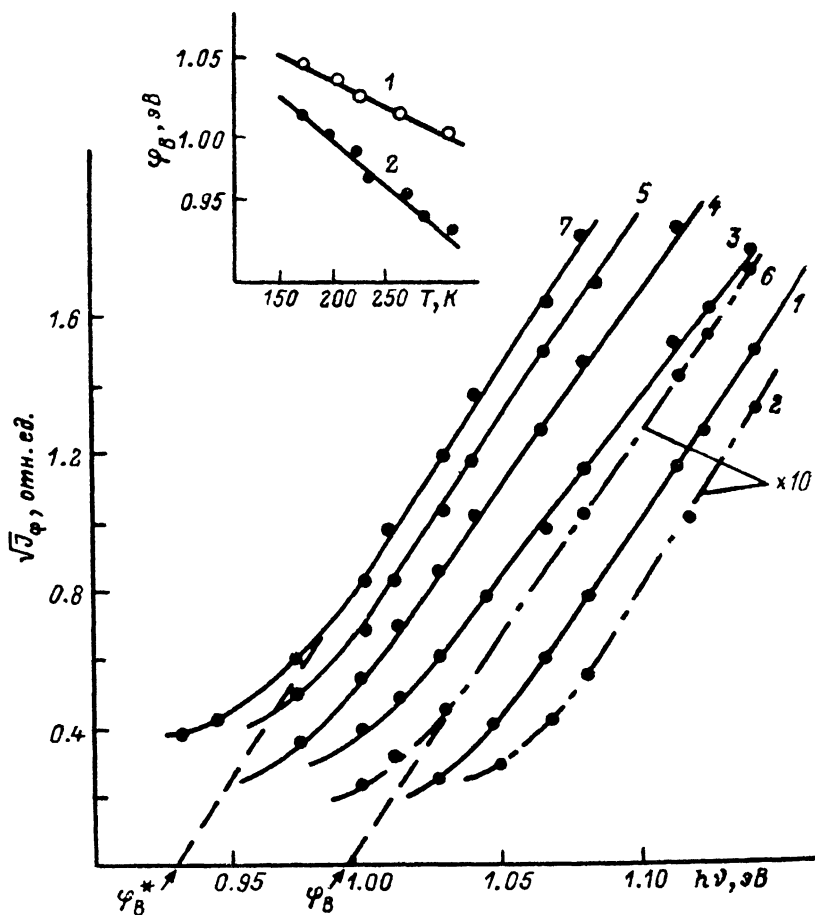


Рис. 3. Зависимость  $i_{\phi}^{1/2}$  от  $h\nu$  для диодов Au—GaAs с микрорельефной поверхностью (сплошные линии) и плоской (штрихпунктирные).

T, К: 1 — 118, 2, 3 — 180, 4 — 230, 5 — 250, 6, 7 — 293. На вставке — температурная зависимость высоты барьера для диодов Au—GaAs на плоской (1) и микрорельефной (2) поверхностях.

с высотой барьера  $\varphi_B$ . На вставке к рис. 2 показано, что величина  $M=1.5 \div 4$  даже при условии  $\gamma=1$ . Таким образом, для объяснения количественного увеличения фототока необходимо учесть также увеличение поглощения в металле за счет многократных отражений света на микрорельефе, рассчитанное в работе [1].

Неоднородность границы раздела металл—полупроводник с микрорельефной поверхностью проявляется также в увеличении (почти вдвое) коэффициента температурной зависимости высоты барьера  $\beta$  по сравнению с плоскими диодами. В общем случае температурный коэффициент  $\beta$  зависит от многих параметров границы раздела [7]:

$$\frac{d\varphi_B}{dT} = \frac{\delta q D_s}{\varepsilon_i + \delta q D_s} \left[ \frac{dE_g}{dT} + \frac{\varepsilon_i}{\delta q D_s} \left( q \frac{d\varphi_m}{dT} - q \frac{d\chi}{dT} \right) \right], \quad (3)$$

т. е. возрастает с увеличением плотности ПЭС реального контакта МП (с зазором). Однако, как показывает расчет, такое увеличенное значение  $\beta$  не может быть объяснено только повышением плотности состояний на микрорельефной поверхности, требуется дополнительный учет эмиссионной неоднородности границы раздела (модель неоднородных барьеров). Если для плоской поверхности основными механизмами, определяющими температурную зависимость работы выхода  $\varphi_m$ , являются тепловое расширение, изменение границы Ферми и т. д., то для микрорельефных поверхностей необходимо учитывать кажущуюся температурную зависимость работы выхода, обусловленную мозаичной структурой поверхности [8].

Таким образом, особенности фотоэмиссионных спектров диодов Шоттки с микрорельефной поверхностью объясняются увеличением фототока из-за многократного отражения от неровностей фронтальной поверхности и от тыльной поверхности образца с учетом пятнистости поверхности.

#### Список литературы

- [1] Yablouovich E., Gody G. D. // IEEE Trans. Electron. Dev. 1982. V. 29. N 2. P. 300—305.
- [2] Roddel R. J., Holm P. M. // Sol. Cells. 1984. V. 11. N 2. P. 221—239.
- [3] Горбач Т. Я., Свечников С. В. // УФЖ. 1987. Т. 32. В. 7. С. 1110—1113.
- [4] Родерик Э. Х. Контакты металл—полупроводник. М., 1982. 208 с.
- [5] Уиллардсон Р., Бир А. Оптические свойства полупроводников. М., 1970. 488 с.
- [6] Гуткин А. А., Дмитриев М. В., Смыслов Ю. И. // Гелиотехника. 1972. № 1. С. 19—25.
- [7] Srivastava A. K., Aroga B. M., Guha S. // Sol. St. Electron. 1981. V. 24. N 1. P. 185—191.
- [8] Добрецов Л. Н., Гомоюнова М. В. Эмиссионная электроника. М., 1966. 554 с.

Институт полупроводников АН УССР  
Киев

Получена 31.10.1988  
Принята к печати 9.06.1989