

06;07;12

## Влияние гамма-облучения на характеристики фотопреобразования барьерных структур металл–арсенид галлия с текстурированной границей раздела

© Н.Л. Дмитрук, О.Ю. Борковская, Р.В. Конакова, И.Б. Мамонтова, С.В. Мамыкин, Д.И. Войцеховский

Институт физики полупроводников НАН Украины,

03028 Киев, Украина

e-mail: nicola@dep39.semicond.kiev.ua

(Поступило в Редакцию 16 октября 2001 г.)

Проведено сравнительное исследование влияния  $\gamma$ -облучения  $^{60}\text{Co}$  в диапазоне доз  $10^3$ – $2 \cdot 10^5$  Gy на характеристики фотопреобразования и темновые ВАХ солнечных элементов (СЭ) поверхностно-барьерного типа (Au/GaAs) в зависимости от морфологии микрорельефа границы раздела, создаваемого с целью увеличения эффективности фотопреобразования. Показано, что из двух типов морфологии микрорельефа (дендритный и квазирешетчатый), полученных методом химического анизотропного травления (100) поверхности *n*-GaAs, более перспективным для использования в СЭ, особенно космического назначения, является микрорельеф квазирешетчатого типа, поскольку он позволяет получить СЭ с большей эффективностью и радиационной стойкостью.

### Введение

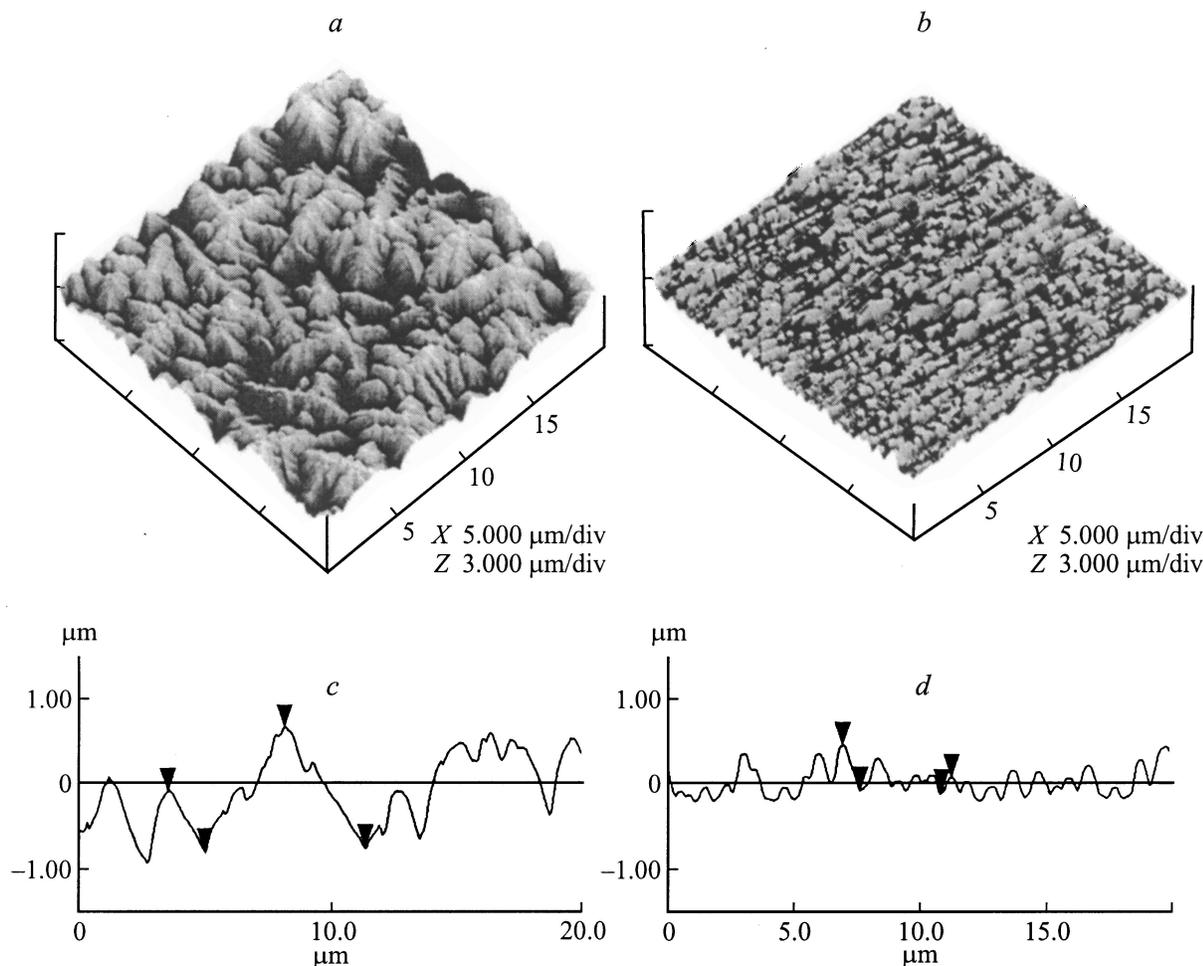
Солнечные элементы с барьером Шоттки на основе GaAs перспективны для использования в космосе как в силу возможности получения высокого отношения коэффициента полезного действия (КПД) к весу элемента, так и вследствие более высокой по сравнению с Si стойкости к жесткой радиации (высокоэнергетические протоны и электроны) [1–4]. Более того, в определенном диапазоне доз облучения быстрыми электронами и  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  наблюдается эффект радиационно-стимулированного упорядочения или геттерирования рекомбинационно-активных центров, проявляющийся в увеличении длины диффузии носителей тока и уменьшении скорости рекомбинации на границе раздела [5,6] (так называемый „эффект малых доз“). При этом граница раздела выполняет роль стока исходных и радиационных дефектов, поэтому как величина эффекта, так и область доз его существования зависят от степени ее структурного совершенства и наличия полей механических напряжений в приграничной области [7]. Одним из наиболее эффективных способов повышения КПД таких элементов является текстурирование его активной границы раздела. При выборе морфологии микрорельефа и способа его формирования обычно исходят из его влияния на оптические и рекомбинационные параметры структуры, т.е. на эффективность фотопреобразования. Однако для применения в космосе необходимо учитывать также влияние морфологии микрорельефа на радиационную стойкость структур. Установлению такой зависимости и посвящена настоящая работа.

В работе исследовано влияние воздействия  $\gamma$ -излучения  $^{60}\text{Co}$  на характеристики фотопреобразования барьерных структур металл (Au)–GaAs с различной морфологией микрорельефа границы раздела, создава-

емого способом химического анизотропного травления поверхности GaAs.

### Технология и методика эксперимента

Барьерные структуры Au/GaAs изготавливали по планарной технологии термическим напылением в вакууме полупрозрачного слоя золота на подготовленные пластины *n*-GaAs с  $N_d = 1$ – $3 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  при температуре подложки  $\sim +120^\circ\text{C}$ . Омический контакт создавался на тыльной стороне пластины вплавлением индия. Исследовались два типа морфологии микрорельефа (100) поверхности GaAs, перспективных для использования в фотодетекторах [8] и солнечных элементах [9]: дендритоподобный, полученный травлением в концентрированной кислоте  $\text{HNO}_3$ , и типа квазирешетки (система ориентированных вдоль направления [110] V-образных канавок с периодом повторения, варьруемым по поверхности в определенных пределах), создаваемый травлением в смеси  $2\text{HF} : 2\text{H}_2\text{SO}_4 : 1\text{H}_2\text{O}_2$ . Степень развития микрорельефа варьровалась режимом травления (длительность, температура). Поверхность плоских образцов обрабатывалась в полирующем травителе. Перед напылением золота, слои оксида, образующиеся в процессе анизотропного травления, стравливались в растворе  $\text{HCl}$ , т.е. окончательная химическая обработка пластин была одинаковой. Напыление золота осуществлялось одновременно на все пластины GaAs и на кварцевую пластину-спутник, используемую для определения толщины и оптических параметров слоя золота методами многоугловой эллипсометрии и спектроскопии отражения и пропускания. Морфология поверхности исследовалась с помощью сканирующего микроскопа атомных сил (МАС) Nanoscope „Dimension 3000“ с острием из нитрида кремния в режиме „tapping mode“. Для определения параметров полупроводника и границы



**Рис. 1.** Микрорельеф поверхности GaAs: *a* — дендритоподобный; *b* — квазирешеточный; *c, d* — соответствующие им профили (для *d* сечение проходит перпендикулярно линиям решетки).

раздела измерялись темновые вольт-амперные характеристики (ВАХ) и высокочастотные (1 МГц) вольт-фарадные характеристики (ВФХ).

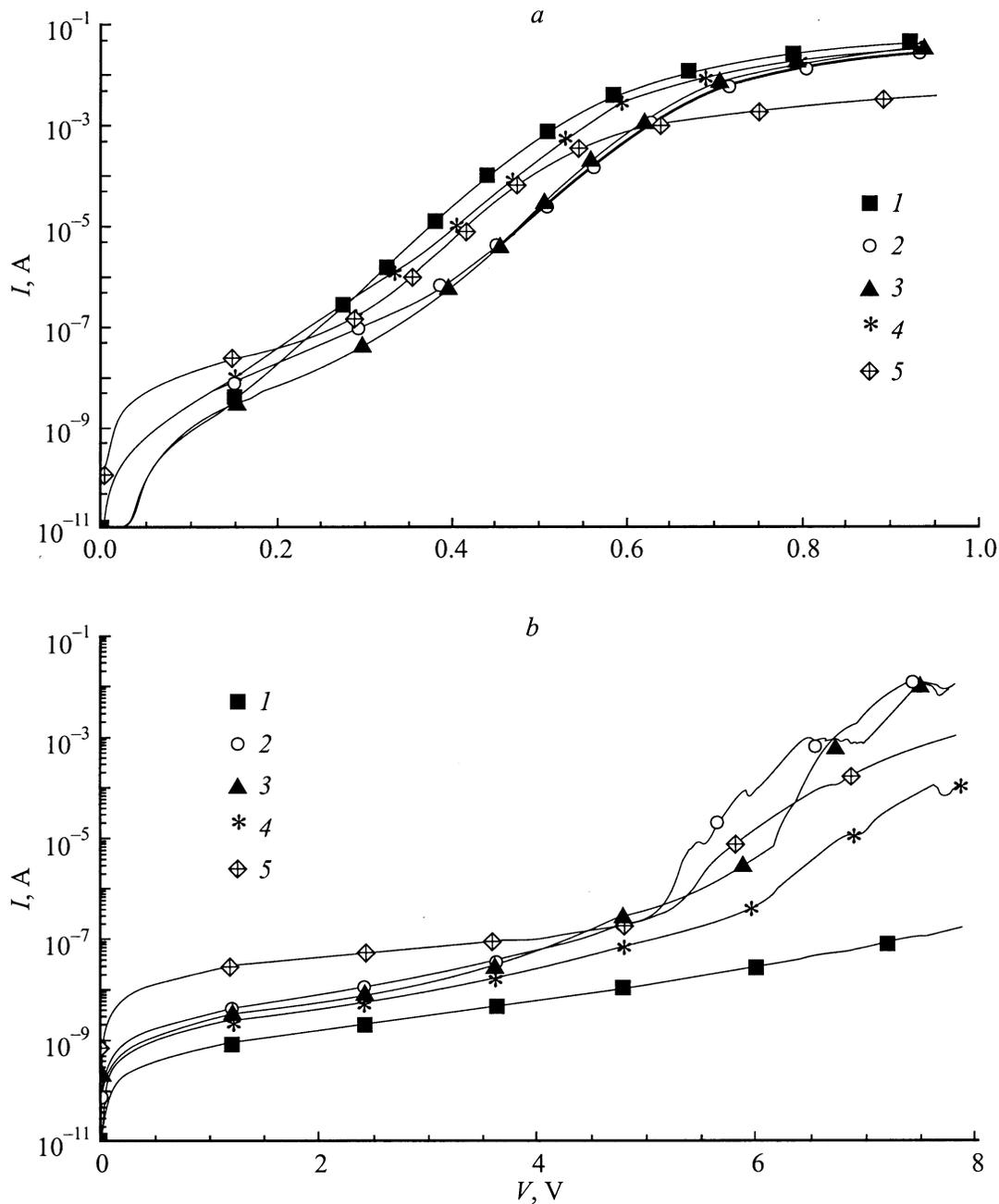
Измерялись спектральные зависимости фототока короткого замыкания диодов и световые ВАХ на имитаторе солнечного излучения, изготовленном на основе лампы с вольфрамовой нитью накаливания и калиброванной с помощью эталонного кремниевого солнечного элемента. Облучения  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  осуществлялось на установке МРХ- $\gamma$ -25М в диапазоне доз  $10^3$ – $2 \cdot 10^5$  Gy.

## Результаты эксперимента и их обсуждение

На рис. 1 показаны МАС изображения микрорельефа поверхности GaAs исследуемых морфологий, а также профили микрорельефа. Их анализ позволяет определить как статистические параметры микрорельефа, так и геометрические (в частности угол наклона микрограней рельефа к плоскости образца, увеличение площади

поверхности и др.), учитываемые при расчете спектра пропускания света в полупроводник, необходимого для определения рекомбинационных параметров границы раздела [9].

С увеличением степени развития микрорельефа типа квазирешетки увеличивается как глубина рельефа ( $h_{\text{max}}$ ), так и основной период повторения расположения канавок (*a*). Так, для двух стадий анизотропного травления получено:  $h_{\text{max}} = 0.3$  и  $1.2 \mu\text{m}$ ,  $a \approx 0.6$  и  $1.4$ – $2 \mu\text{m}$  соответственно. При этом угол наклона микрограней относительно плоскости образца также увеличивается от  $32$ – $42^\circ$  до  $45$ – $48^\circ$ . В то же время микрорельеф дендритного типа в силу его эволюции от пирамидально-призматических форм к дендритоподобным [10] отличается большей сложностью, в том числе наличием микроплоскостей, расположенных как под углом  $40$ – $45^\circ$ , так и под большими углами  $\sim 65^\circ$ . Последнее, в частности, проявляется в большем усилении поля на участках микрорельефа с большей кривизной и соответственно в большем вкладе термополевого механизма в токопрохождение барьерных структур [11]. Это следует из анализа прямых ветвей ВАХ, представленных

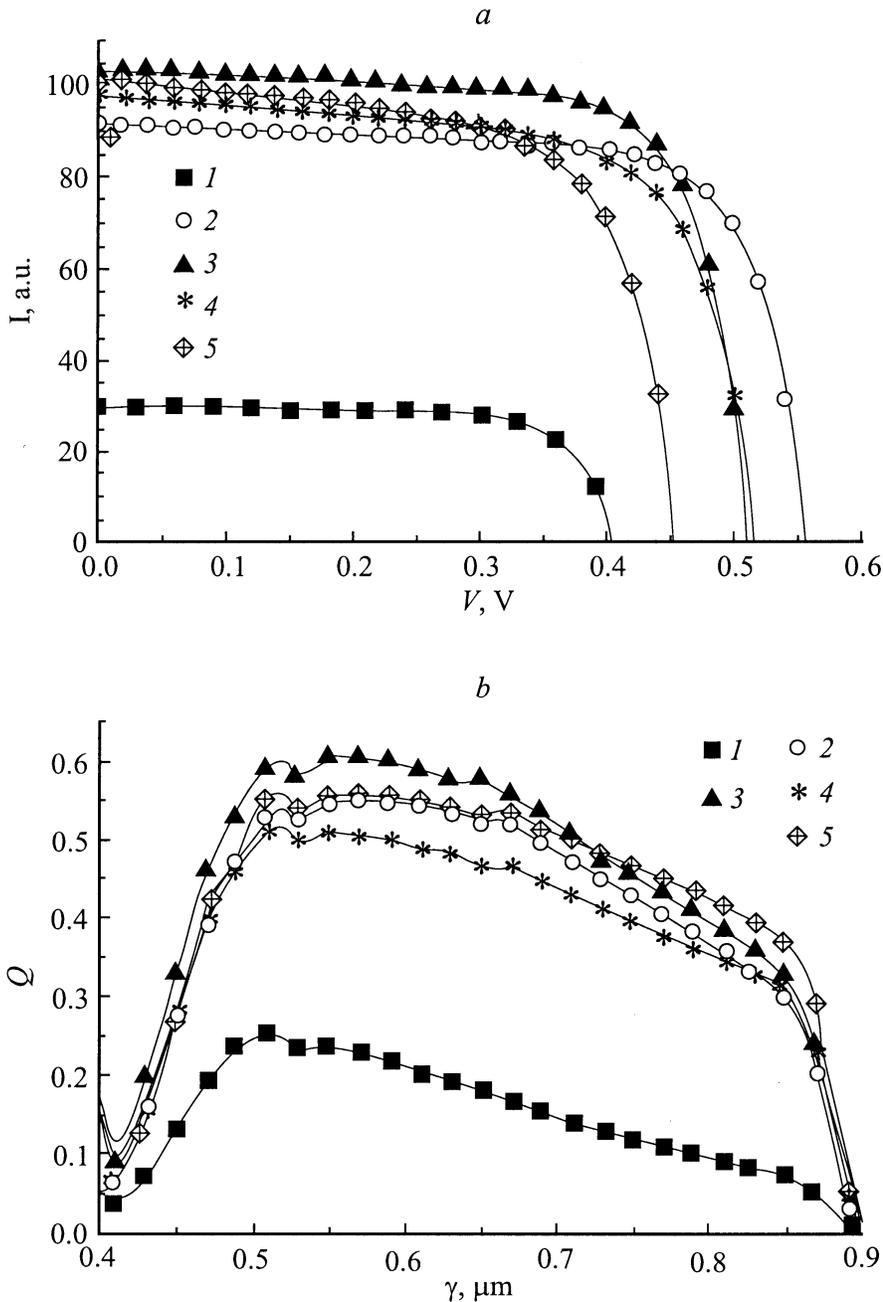


**Рис. 2.** Прямые (а) и обратные (b) темновые ВАХ диодов Au/GaAs с плоской (1) и текстурированной (2–5) границей раздела. 2, 3 — микрорельеф типа квазирешетки; 4, 5 — дендритоподобный (3 и 5 соответствуют более развитому микрорельефу).

на рис. 2 для структур с различным микрорельефом границы раздела. Он свидетельствует о том, что наряду с термоэмиссионным и рекомбинационным механизмом токопрохождения [12] необходимо учитывать также термополевую составляющую тока, которая проявляется как кажущееся уменьшение высоты барьера на некоторых участках поверхности. Учет распределения высоты барьера по поверхности диодной структуры [13], более широкого в случае микрорельефа дендритной морфологии, позволяет описать как увеличение тока на начальном участке ВАХ, так и меньшее значение пара-

метра неидеальности  $n$  (в области больших смещений) в случае структур с развитым микрорельефом. Последнее, однако, может быть также связано с меньшей величиной промежуточного слоя на границе раздела и/или большей плотностью граничных состояний, заполнение которых определяется обменом с металлом.

На рис. 3, а показаны световые ВАХ, а на рис. 3, б — спектры фототока короткого замыкания исследуемых поверхностно-барьерных структур. Как видно, ток короткого замыкания  $I_{sc}$  увеличивается с увеличением степени развития микрорельефа по сравнению с плос-



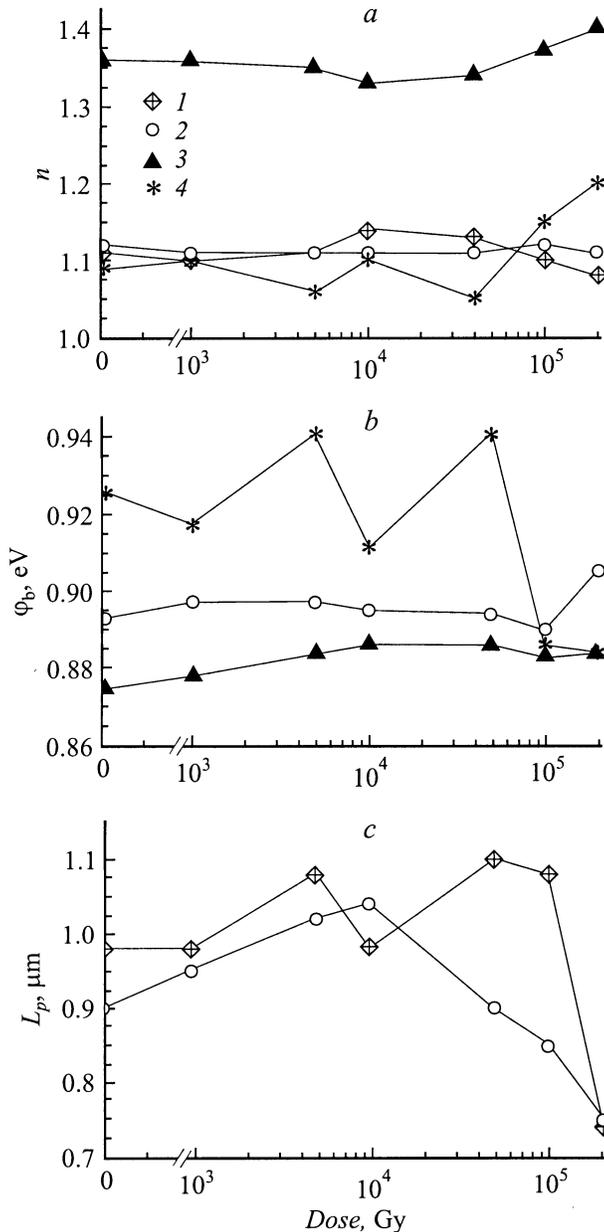
**Рис. 3.** Световые ВАХ (а) и спектральные зависимости фототока короткого замыкания (внешней квантовой эффективности) (б) фотопреобразователей Au/GaAs с плоской (1) и текстурированной (2–5) границей раздела. 2, 3 — микрорельеф типа квазирешетки; 4, 5 — дендритоподобный (3 и 5 соответствуют более развитому микрорельефу).

кой структурой (приблизительно в 3 раза в случае микрорельефа типа квазирешетки и приблизительно в 3.2 раза для развитого дендритного микрорельефа), однако напряжение холостого хода  $V_{oc}$  увеличивается в меньшей степени: в  $\sim 1.3$  раз для квазирешетки и в  $\sim 1.25$  и  $\sim 1.16$  раз для дендритного микрорельефа, менее и более развитого соответственно. Фактор заполнения световых ВАХ  $FF$  у структур с дендритным микрорельефом меньше, чем у плоских, а также структур с квазирешеточным микрорельефом.

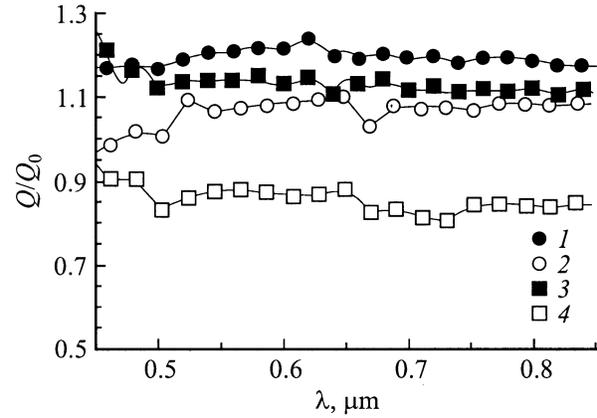
Соответственно и КПД у последних имеет наибольшее значение.

Исследование показало, что влияние  $\gamma$ -облучения сильнее проявляется на структурах с более развитым микрорельефом. Так, эффект малых доз, проявляющийся в уменьшении скорости поверхностной рекомбинации на границе раздела, увеличении длины диффузии неосновных носителей тока  $L_p$ , высоты барьера в контакте  $\phi_B$  и уменьшении параметра неидеальности  $n$  наблюдается на структурах с дендритным и более развитым квазиреше-

точным микрорельефом в области доз,  $< 10^4$  Gy (рис. 4). Из параметров световых вольт-амперных характеристик наиболее чувствителен к облучению ток короткого замыкания  $I_{sc}$ , как и в случае плоских структур на основе Si и GaAs [1–4], облучаемых высокоэнергетическими электронами и протонами. На рис. 5 показаны спектры относительного измерения фототока облученных диодов с развитым микрорельефом для улучшающей ( $\sim 10^3$  Gy) и ухудшающей ( $\sim 2 \cdot 10^5$  Gy) доз облучения. Видно, что основной эффект  $\gamma$ -облучения, практически не завися-



**Рис. 4.** Дозовые зависимости фактора идеальности  $n$  (а), высоты барьера  $\phi_b$  (b) диодов Au/GaAs и длины диффузии неосновных носителей тока в GaAs (с) для случая текстурированной границы раздела. 1, 2 — микрорельеф типа квазирешетки; 3, 4 — дендритоподобный (2 и 4 соответствуют более развитому микрорельефу).



**Рис. 5.** Спектральные зависимости отношения фототока облученной структуры к фототоку необлученной для случая развитого микрорельефа границы раздела типа квазирешетки (1, 2) и дендритоподобного (3, 4). (1, 3) — структуры, облученные дозой  $10^3$  Gy, 2, 4 —  $2 \cdot 10^5$  Gy.

щий от длины волны, связан с влиянием на скорость рекомбинации на границе раздела [14]. Ухудшение световых ВАХ начинается с доз  $> 10^5$  Gy. Наименее устойчивы структуры с развитым микрорельефом дендритного типа, для них наблюдается ухудшение КПД порядка 5% от исходного значения при дозе  $2 \cdot 10^5$  Gy. Наиболее радиационно устойчивы структуры с микрорельефом типа квазирешетки, для которых ухудшение КПД не превышает 2% от исходного значения.

Таким образом, развитый микрорельеф границы раздела металл/GaAs с углами наклона микрограней  $\geq 60^\circ$  (дендритного типа), хотя и обеспечивает большие значения фототока короткого замыкания, менее подходит для использования в солнечных элементах космического назначения, чем микрорельеф типа квазирешетки (по крайней мере без использования специальных пассивирующих обработок [14,15]) как в плане обеспечения большего значения КПД, так и в отношении стойкости к проникающей радиации.

### Список литературы

- [1] Wysocki J. // J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. N 9. P. 2915.
- [2] Gebert H., Edmund J. // J. Electrochem. Soc. 1978. Vol. 125. N 4. P. 678.
- [3] Григорьева Г.М., Грилихес В.А., Звягина К.Н. и др. // Гелиотехника. 1989. № 1. С. 8–12.
- [4] Бакиров М.Я. // Гелиотехника. 1991. № 6. С. 32–39.
- [5] Borkovskaya O.Yu., Dmitruk N.L., Konakova R.V. et al. // Rad. Eff. 1979. Vol. 42. N 3/4. P. 249–251.
- [6] Борковская О.Ю., Дмитрук Н.Л., Конакова Р.В. и др. // ФТП. 1986. Т. 20. Вып. 9. С. 1640–1646.
- [7] Борковская О.Ю., Дмитрук Н.Л., Литовченко В.Г., Мишук О.Н. // ФТП. 1989. Т. 23. Вып. 2. С. 207–212.
- [8] Dmitruk N.L., Borkovskaya O.Yu., Mayeva O.I., Mamontova I.B. // Sensors & Actuators A. 1999. Vol. 75. P. 151–155.

- [9] *Dmitruk N.L., Borkovskaya O.Yu., Mamontova I.B., Mamukin S.V.* // Solar Energy Mater. & Solar Cells. 2000. Vol. 60. P. 379–390.
- [10] *Горбач Т.Я., Пидлисний Е.В., Свечников С.В.* // Оптоэлектроника и полупроводн. техн. 1988. Вып. 13. С. 34–39.
- [11] *Борковская О.Ю., Горбач Т.Я., Дмитрук Н.Л., Мицук О.Н.* // Электронная техника. Сер. 2. 1989. № 5. С. 50–55.
- [12] *Борковская О.Ю., Дмитрук Н.Л., Войцеховский Д.И.* и др. // Поверхность. 1999. № 8. С. 87–91.
- [13] *Dmitruk N.L., Borkovskaya O.Yu., Dmitruk I.N.* et al. // Proc. of ICFSI-8. Sapporo, 2001.
- [14] *Дмитрук Н.Л., Борковская О.Ю., Мамонтова И.Б.* // Гелиотехника. 1998. № 5. С. 3–10.
- [15] *Дмитрук Н.Л., Борковская О.Ю., Мамонтова И.Б.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 6. С. 132–134.