

ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ БАРЬЕРОВ ШОТТКИ Au—GaAs С МИКРОРЕЛЬЕФНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ (ОБЛАСТЬ СОБСТВЕННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕТА)

Борковская О. Ю., Дмитрук Н. Л., Мищук О. Н.

Исследовано влияние характера микрорельефа поверхности GaAs, созданного способом химического анизотропного травления, и предварительной обработки поверхности, предшествующей напылению слоя металла, на величину и спектральные зависимости фоточувствительности барьеров Шоттки Au—GaAs в области собственного поглощения света. Определен оптимальный характер микрорельефа. Проведен анализ, позволивший оценить вклад различных факторов в формирование фоточувствительности структур с микрорельефной поверхностью — оптических (увеличение пропускания света в полупроводник за счет многократных отражений на рельефе фронтальной поверхности и уменьшения толщины пленки Au) и изменения рекомбинационных свойств границы раздела Au—GaAs.

Текстурирование поверхности полупроводниковых структур, широко используемое при изготовлении солнечных элементов, может быть также полезным для фотоприемников с барьером Шоттки, поскольку позволяет управлять величиной и спектральной характеристикой их фоточувствительности. Ранее [1, 2] нами было установлено, что фоточувствительность диодов Шоттки Au—GaAs с микрорельефной поверхностью, полученной анизотропным травлением [3], превышает фоточувствительность плоских диодов как в области фотоэмиссии электронов из металла в полупроводник, так и в области собственного поглощения света. В то же время, поскольку при создании микрорельефа могут изменяться не только оптические свойства структуры, определяющие интенсивность фотогенерационных процессов, но и рекомбинационные характеристики поверхности GaAs [4], вопрос о механизме влияния микрорельефа на спектр фоточувствительности диодов требует дальнейшего исследования. Поискам ответа на данный вопрос и посвящена настоящая работа.

В работе исследованы зависимости фоточувствительности в области собственного поглощения света барьеров Шоттки Au—GaAs от характера микрорельефа их поверхности, полученного способом химического анизотропного травления эпитаксиальных пленок $n-n^+$ -GaAs с ориентацией (100), и наличия на границе раздела металл—полупроводник (МП) образуемого при травлении слоя оксида. Диоды Шоттки создавались напылением в вакууме через маску с отверстиями диаметром 1 мм полупрозрачного слоя Au одновременно на структуре с микрорельефными и плоскими поверхностями при подогреве подложки до $T \sim \sim +120^\circ\text{C}$. В том же процессе золото напылялось на кварцевую пластину для определения толщины слоя и его спектра пропускания. Омический контакт изготавливался на тыльной поверхности подложки вплавлением индия.

Для определения параметров диодных структур, кроме спектров фототока короткого замыкания $i_{\text{ф}}$, измерялись их вольт-амперные (ВАХ) и вольт-фарадные характеристики (ВФХ), а также зависимость $i_{\text{ф}}$ от обратного смещения. Характер микрорельефа изучался с помощью оптического и растрового электронного микроскопов. Во всех случаях геометрические размеры микрорельефа превышали толщину области пространственного заряда (ОПЗ).

1. Прежде всего рассмотрим влияние на характеристики диодов оксидной пленки, образующейся на поверхности микрорельефной структуры при анизо-

№ диода	Поверхность	n	φ_B^{J-V} , эВ	φ_B^{C-V} , эВ	$\frac{s_{\text{рел}}}{s_{\text{пл}}}$	L_p , мкм
1.3.3	Плоская	1.16	0.92	1.2	1.0	1.50
1.1.1	Рельефная с оксидом	2.34	0.74	0.7	1.46	0.69
1.1.3		2.40	0.73	1.3	1.84	0.54
1.1.6		2.35	0.75	1.25	1.13	0.35
1.2.1	Рельефная без оксида	2.22	0.73	1.2	1.18	1.60
1.2.2		2.18	0.71	1.2	1.18	1.56
1.2.4		1.46	0.77	1.12	1.09	0.98

тропном травлении и отличающейся неоднородными составом и толщиной [3, 4]. Для этого с части структур перед изготовлением диодов Шоттки слой оксида стравливался. Прямые ВАХ обнаружили слабое различие характеристик (параметр неидеальности n , высота барьера φ_B в контакте) этих двух типов структур (см. таблицу). В таблице приведено также увеличение площади поверхности микрорельефных диодов (по сравнению с плоскими) $s_{\text{рел}}$, $s_{\text{пл}}$, оцениваемое

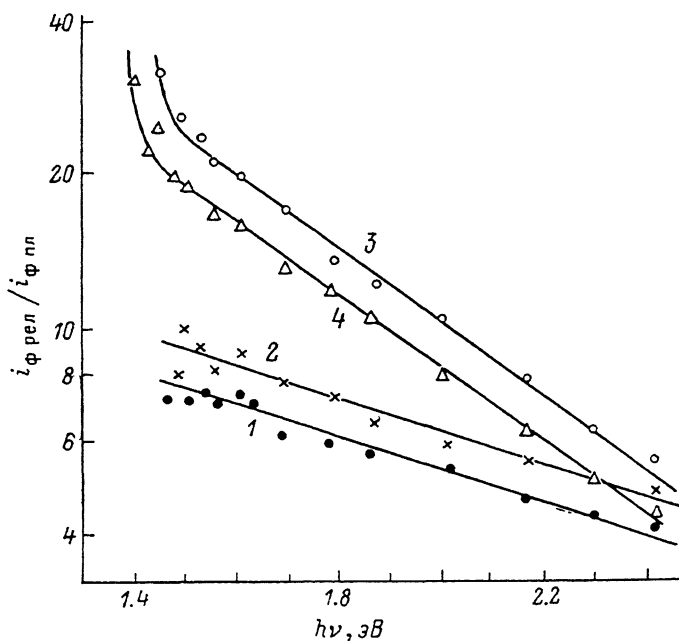


Рис. 1.

Спектральная зависимость отношения фоточувствительности диодов $\text{Au}-\text{GaAs}$ с микрорельефной и плоской поверхностями для пластины: 1 — 1, 2; 2 — 3, 4; 2, 4 — со слоем оксида; 1, 3 — без него.

по высокочастотной ВФХ $C(V)$ и учитываемое при определении диффузионной длины неравновесных носителей тока L_p по зависимости i_ϕ (1°C) на краю собственного поглощения света. Видно, что величина L_p в структурах со слоем оксида меньше, чем в плоских, и практически восстанавливается после стравливания оксида.

На рис. 1 приведены спектры относительного увеличения фоточувствительности барьеров с микрорельефной границей раздела МП по сравнению с плоскими как со слоем оксида, так и без него. Из этих спектральных характеристик следует: 1) в области $h\nu = 1.5 \div 2.4$ эВ зависимости $i_{\phi \text{ рел}}/i_{\phi \text{ пл}}(h\nu)$ можно аппроксимировать экспонентой, причем ее наклон в полулогарифмическом масштабе одинаков для диодов из одной пластины и с одинаковым характером микрорельефа; 2) абсолютная величина увеличения i_ϕ в пределах разброса параметров

диодов одной пластины совпадает для диодов со слоем оксида и без него. Эти результаты можно объяснить, если предположить, что при изготовлении диодов Шоттки атомы Au диффундируют сквозь слой оксида к поверхности GaAs. Меньшие значения L_p в них, по-видимому, связаны с введением дополнительных центров рекомбинации в приповерхностной области GaAs в процессе анизотропного травления, что согласуется с выводами [3, 4]. При удалении слоя оксида (травлением в КОН), по-видимому, стравливается и нарушенный слой GaAs, причем рельеф при этом несколько сглаживается.

2. Зависимость фоточувствительности от характера микрорельефа изучалась на структурах со стравленным слоем оксида. Далее приводятся данные для диодов Шоттки, изготовленных на достаточно толстой (~ 43 мкм) жидкостно-

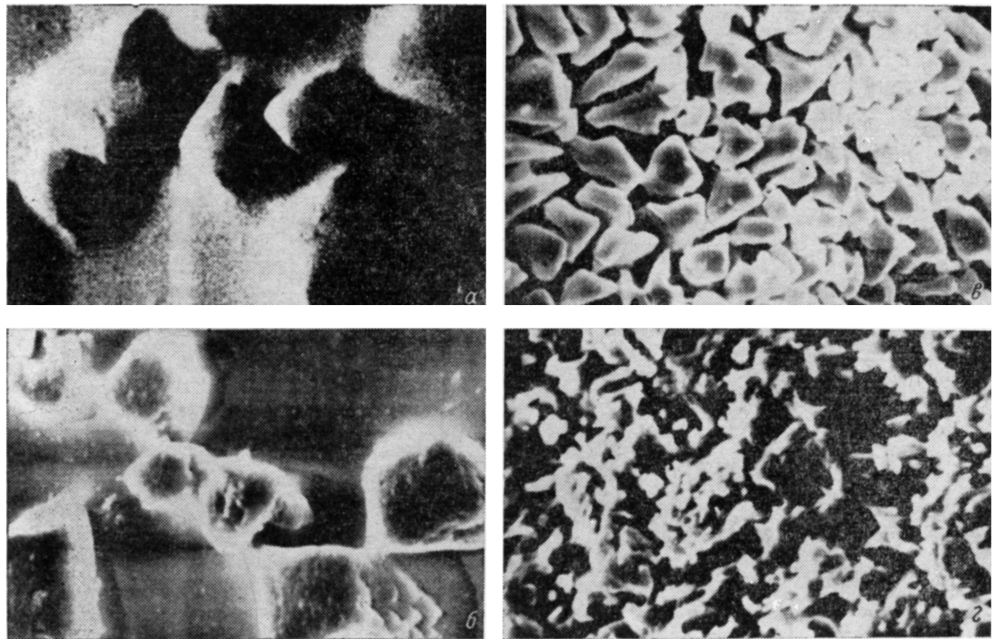


Рис. 2. Микрофотографии поверхности структур 5.1 (а), 5.2 (б), 5.4 (в) и 5.6 (г).

Увеличение 5000.

эпитаксиальной пленке $n-n^+$ -GaAs с $N_a - N_a = (0.6 \div 1.8) \cdot 10^{17}$ см⁻³, $L_p = 0.8$ мкм. Исследовано шесть типов «спонтанного» микрорельефа, представляющего собой различные стадии перехода от полиэдральной морфологии к дендритной. Микрофотографии поверхности исследуемых структур, снятые с помощью растрового электронного микроскопа МРЭМ-200, показаны на рис. 2. Переход от пирамидально-призматичной формы рельефа (структуры 5.1, 5.2) к дендритной (5.4) сопровождался увеличением плотности заполнения поверхности микрорельефом и изменением его глубины. Последняя определялась с помощью оптического микроскопа на сколе барьерных структур после выявления границы пленка-подложка [5]. Высота микрорельефных образований структуры 5.1 составляет $2.5 \div 3$, 5.3 — порядка 6, 5.4, 5.5 — $0.9 \div 1.5$, 5.6 — $1.5 \div 3$ мкм с отдельными выступами высотой $7 \div 8$ мкм, причем глубина стравленного слоя пленки также различна (в частности, структура 5.6 дотравлена до n^+ -слоя подложки). Величина $s_{\text{ред}}/s_{\text{пл}}$ для структуры 5.1 составляет 1.3, для структуры 5.4 — 2. На рис. 3 представлены спектры фототока короткого замыкания исследуемых структур, а на рис. 4 — спектры относительного увеличения фоточувствительности микрорельефных барьеров по сравнению с плоскими для структур 5.1 (а) и 5.4 (б). Видно, что по мере увеличения плотности заполнения поверхности микрорельефом фоточувствительность и наклон зави-

симости $\lg \frac{i_{\Phi p.1}}{i_{\Phi n.1}} = f(h\nu)$ возрастают. Наилучшими характеристиками обладают структуры 5.4, 5.5 с рельефом глубиной около 1 мкм.

3. Проанализируем роль различных факторов в увеличении фоточувствительности диодов с микрорельефной поверхностью. Толщину пленки Au на плоской структуре определяли из сравнения измеренного спектра пропускания слоя Au на кварце (рис. 3) с литературными данными [6]. Для представленного случая она составляла 25.5 нм. С учетом данных о толщинной зависимости показателя преломления n и коэффициента поглощения k нанобленных пленок Au [7] и спектральной зависимости n и k для GaAs [8] были рассчитаны по формулам работы [6] спектры пропускания T и отражения пленок Au на GaAs толщиной 25.5 (рис. 3) и 13.4 нм (последняя соответствует средней толщине пленки Au на наклонных плоскостях рельефа 5.1 и усредненной по площади

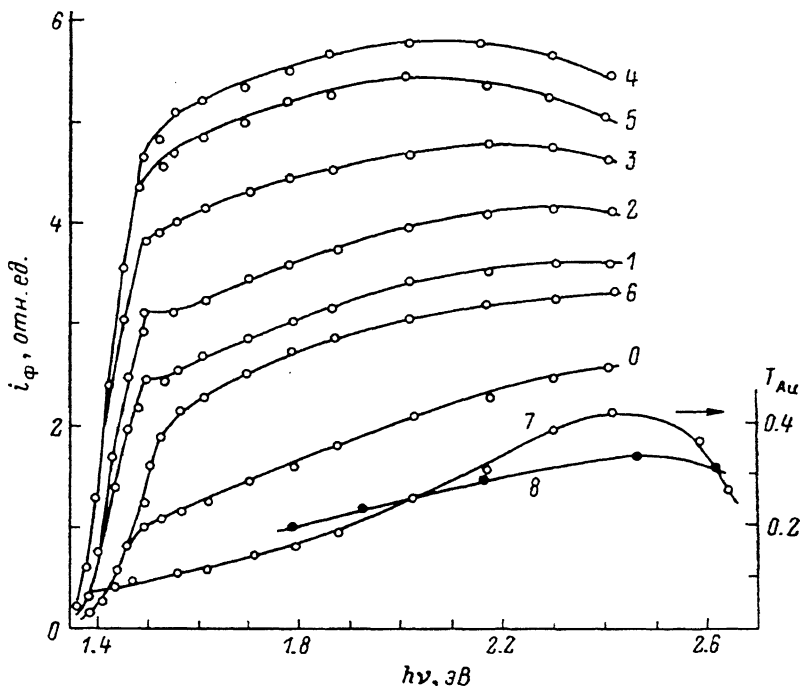


Рис. 3. Спектральные зависимости фототока короткого замыкания диодов Au—GaAs с плоской (0) и микрорельефными (1—6) поверхностями для структур 5.0—5.6 соответственно.

Спектры пропускания пленки Au на кварце (7) и GaAs (8).

эффективной толщине пленки Au на структуре 5.4). Это позволило перейти от измеренного спектра квантовой эффективности исследуемых структур к спектру фототока короткого замыкания, приведенного к одному кванту света, прошедшего в GaAs i_{Φ}^* , сравнить его с расчетным и определить рекомбинационные параметры границы раздела Au—GaAs. Расчет i_{Φ}^* проводился по формуле, учитывающей доминирующие механизмы рекомбинационных потерь: рекомбинацию в объеме, на поверхности и непосредственный перенос основных носителей тока из полупроводника в металл [9],

$$i_{\Phi}^* = \left(\frac{1}{1 + s/v_p} \right) \left(1 - \frac{e^{-\alpha l}}{1 + \alpha L_p} \right) - \frac{\alpha}{\alpha - \frac{qE(0)}{kT}} \left(1 - \frac{qE_0}{kTv_n/D_n} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где α — коэффициент поглощения света в полупроводнике, D_n — коэффициент диффузии электронов, l — толщина ОПЗ, s , v_n , v_p — скорости поверхностной рекомбинации и переноса электронов и дырок из полупроводника в металл соответственно, $E(0)$ — электрическое поле на границе раздела. Для случая плоской структуры 5.0 были получены параметры $s/v_p = 38$, $v_n/D_n = 10^7$ см²/с.

Поскольку микрорельеф структуры 5.1 имеет простую геометрическую форму (усеченные четырехгранные пирамиды) (рис. 2, а), можно приближенно рассчитать влияние геометрического фактора на ее фоточувствительность (рис. 4, а), рассчитывая толщину пленки Au и ее пропускание отдельно для плоских и наклонных участков рельефа. Эффект увеличения пропускания пленки Au за счет уменьшения ее толщины на наклонных участках рельефа приводит к увеличению i_{ϕ} , отраженному на рис. 4, а (прямая 1). Учет двукратного отражения света, падающего на наклонные плоскости, сдвигает эту зависимость вверх (прямая 2), но не меняет ее наклона, который остается меньше наблюдаемого. Согласие с экспериментом достигается при других (по сравнению с плоской поверхностью) рекомбинационных параметрах границы раздела: $s/v_p=30$, $v_n/D_n=2.25 \cdot 10^7$ см²/с (рис. 4, а, кривая 3).

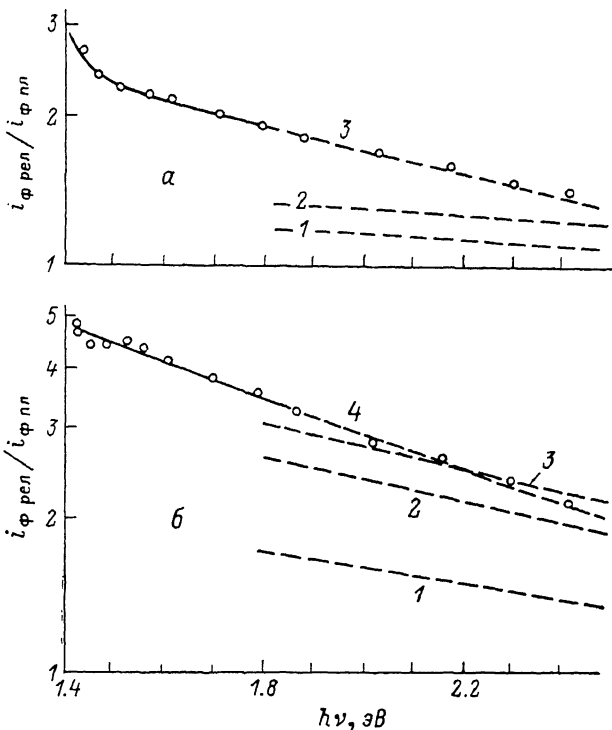


Рис. 4. Экспериментальные (точки) и расчетные (пунктир) спектральные зависимости $i_{\phi \text{ refl}}/i_{\phi \text{ пл}}$ для диодов пластины 5.1 (а) и 5.4 (б).

Для структуры 5.4 изменение оптических параметров определяем усредненно по всей площади. Учет увеличения T за счет уменьшения толщины пленки Au, 2- и 3-кратного отражения света на рельефе фронтальной поверхности показан прямыми 1—3 соответственно (рис. 4, б). Видно, что 3-кратного отражения света достаточно для объяснения величины наблюдаемого эффекта, по крайней мере, в коротковолновой области спектра, однако наклон экспериментальной зависимости больше. Следовательно, и в этом случае необходимо учесть изменение рекомбинационных параметров границы раздела Au—GaAs: $s/v_p=38$, $v_n/D_n=2.5 \cdot 10^6$ см²/с.

Таким образом, проведенный анализ хотя и является приближенным, однако позволяет оценить вклад различных факторов в формирование фоточувствительности диодов Шоттки с микрорельефной поверхностью в прикраевой области собственного поглощения света. В более длинноволновой области спектра $1.43 < h\nu < 1.5$ эВ на некоторых микрорельефных структурах наблюдается дополнительное изменение относительной фоточувствительности. По-видимому, это связано с профилем легирования (и L_p) пленок. Так, в структурах, в которых глубина рельефа практически распространяется на всю пленку или даже достигает подложки (например, 5.6), обычно наблюдается уменьшение относи-

тельной величины фоточувствительности, которое на краю поглощения может смениться ее дополнительным ростом за счет эффекта «захвата» света в образце [10] вследствие его рандомизации на рельефе и многократных внутренних отражений.

Таким образом, можно сделать следующие выводы.

1. Фоточувствительность барьеров Шоттки с микрорельефной поверхностью, изготовленных напылением металла в вакууме на подогреваемую поверхность GaAs, слабо зависит от наличия на ней оксидной пленки, образующейся при создании микрорельефа методом химического анизотропного травления. Тем не менее целесообразно предварительно стравливать ее для уменьшения разброса параметров диодных структур.

2. Определен оптимальный характер микрорельефа (обеспечивающий наибольшее увеличение фоточувствительности барьеров Шоттки в области собственного поглощения света GaAs) — плотное заполнение поверхности рельефом с глубиной 0.9–1.5 мкм.

3. Основной эффект увеличения фоточувствительности диодов Шоттки с микрорельефной поверхностью обусловлен оптическими факторами — увеличением пропускания света в полупроводник за счет многократных отражений на рельефе фронтальной поверхности и уменьшением толщины пленки металла за счет увеличения площади поверхности осаждения.

4. Рекомбинационные параметры микрорельефной границы раздела Au—GaAs даже со стравленным слоем оксида отличаются от параметров плоских диодов, изготовленных на естественной поверхности роста эпитаксиальных пленок $n-n^+$ -GaAs; при этом меньше изменяется величина скорости поверхностной рекомбинации ($\sim 20\%$), а скорость надбарьерного переноса основных носителей тока в металл для оптимального микрорельефа уменьшается на порядок величины из-за усиления поверхностного поля.

В заключение авторы выражают благодарность Т. Я. Горбач за изготовление микрорельефных поверхностей и Р. И. Марченко за электронную микроскопию образцов.

Список литературы

- [1] Борковская О. Ю., Горбач Т. Я., Дмитрук Н. Л., Мищук О. Н. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 12. С. 2113–2117.
- [2] Борковская О. Ю., Горбач Т. Я., Дмитрук Н. Л., Мищук О. Н., Свечников С. В. // Тез. докл. Всес. конф. по фотоэлектрическим явлениям в полупроводниках. Ташкент, 1989. С. 476–477.
- [3] Горбач Т. Я., Пидлисний Е. В., Свечников С. В. // Оптоэлектрон. и полупроводн. техн. 1988. № 13. С. 34–39.
- [4] Горбач Т. Я., Свечников С. В. // УФЖ. 1987. Т. 32. В. 7. С. 1110–1113.
- [5] Возмилова Л. Н., Буц Э. В. // Изв. АН СССР. Неорг. матер. 1968. № 4. С. 1340–1344.
- [6] Дображанский Ю. А., Преснов В. А., Коноваленко Л. Д. // Гелиотехника. 1975. № 5. С. 19–23.
- [7] Гуткин А. А., Дмитриев М. В., Смыслов Ю. И. // Гелиотехника. 1972. № 1. С. 19–25.
- [8] Оптические свойства полупроводников (полупроводниковые соединения A^3B^5) / Под ред. Е. Ф. Гросса. М., 1970. С. 488.
- [9] Борковская О. Ю., Дмитрук Н. Л., Зюганов А. Н. // Оптоэлектрон. и полупроводн. техн. 1983. № 4. С. 82–89.
- [10] Yablonovich E. // J. Opt. Soc. Am. 1982. V. 72. N 7. P. 899–907.

Институт полупроводников АН УССР
Киев

Получена 29.10.1990
Принята к печати 15.11.1990