

06:07

Фоточувствительность и определение высоты барьеров Шоттки в структурах Au–*n*-GaAs

© Д. Мелебаев,¹ Г.Д. Мелебаева,¹ В.Ю. Рудь,² Ю.В. Рудь³¹ Туркменский государственный университет им. Магтымгулы, 744000 Ашхабад, Туркменистан² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 195251 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: rudvas@spbstu.ru³ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 7 июня 2007 г.)

Исследованы спектры фоточувствительности полученных химическим методом барьеров Шоттки Au–*n*-GaAs в спектральной области 0.9–2.2 eV. Определена высота барьера как при освещении со стороны полупрозрачного слоя Au, так и со стороны GaAs при $T = 300$ К. Обнаружено, что при освещении структур со стороны GaAs их фоточувствительность в фаулеровской области спектра $h\nu = 0.95\text{--}1.25$ eV возрастает по сравнению с освещением со стороны барьерного контакта примерно на порядок, что может найти применение при изучении фундаментальных свойств границ раздела металл–полупроводник и металл–диэлектрик–полупроводник, а также при разработке новых приборов полупроводниковой электроники.

PACS: 78.20.-e, 29.40.w, 07.85.F

Барьеры Шоттки (БШ) на основе арсенида галлия давно привлекают внимание исследователей как перспективные структуры для создания радиационно-стойких полупроводниковых приборов [1]. Одним из фундаментальных параметров полупроводниковых приборов металл(*m*)–полупроводник(*s*) и металл–диэлектрик–полупроводник (*mis*), используемых в современной опто- и микроэлектронике, является высота барьера Шоттки ($q\phi_{B0}$), причем прямым и самым точным методом определения $q\phi_{B0}$ считается основанный на теории Фаулера фотоэлектрический метод [2,3]. Полуфеноменологическая теория Фаулера применительно к выпрямляющему не точечному контакту металл–полупроводник впервые была использована в работах [2,4,5], в которых и был сформирован основанный на измерении спектров фоточувствительности поверхностно-барьерных структур фотоэлектрический метод определения $q\phi_{B0}$.

Принципиальная схема фотоэлектрических измерений и энергетическая диаграмма процесса фотовозбуждения приведены в работах [6,7], где проанализирован метод определения $q\phi_{B0}$ для *m*–*s*-структур при освещении *m*–*s*-перехода как со стороны металла, так и со стороны полупроводника. Если энергия фотонов $h\nu$ больше высоты барьера, но меньше ширины запрещенной зоны полупроводника E_G , то наступает фотоэмиссия электронов из металла в полупроводник, при которой в соответствии с теорией Фаулера фототок короткого замыкания I_{f0} , отнесенный к равному числу падающих фотонов, связан с энергией фотона следующим соотношением:

$$I_{f0} \sim (h\nu - q\phi_{B0}^2)^2$$

при $h\nu - q\phi_{B0} > 3kT$, где k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура. Поэтому зависимость величины фототока $I_{f0}^{1/2}$ от $h\nu$ должна изображаться прямой линией, а экстраполяция этой прямой к оси энергии дает величину $q\phi_{B0}$.

В фаулеровской области спектра фототока ($q\phi_{B0} < h\nu < E_g$) экспериментальное определение $q\phi_{B0}$ для структур Au–*n*-GaAs фотоэлектрическим методом до сих пор проводилось только при освещении БШ со стороны слоя металла [8–14], а величина $q\phi_{B0}$ при комнатной температуре находилась в пределах 0.83–0.92 eV. Настоящая работа содержит результаты первых экспериментальных исследований фоточувствительности структур Au–*n*-GaAs в зависимости от геометрии фоторегистрации и обнаружения резкого увеличения фототока при освещении БШ со стороны GaAs. В данной работе величина $q\phi_{B0}$ для структур Au–*n*-GaAs при освещении со стороны GaAs определена впервые.

1. Барьеры создавались на пластинах GaAs с кристаллографической ориентацией (100) и концентрацией свободных электронов, указанной в таблице. На одной стороне пластин химическим методом осаждался барьерный контакт из золота, а на противоположной — кольцевой омический контакт (In + 3%Te). Омический контакт к *n*-GaAs изготавливался сплавлением сплава, содержащего 97%In + 3%Te, в атмосфере водорода при температуре около 500°C в течение около 5 min. Полупрозрачный барьерный контакт создавался химическим осаждением слоя золота при комнатной температуре из водного раствора $\text{HAuCl}_4(4 \text{ g/l}) + \text{HF}(100 \text{ ml/l})$ по методике [15,16]; толщина слоя золота была 100–150 Å.

Электрические и фотоэлектрические параметры структур Au-*n*-GaAs при $T = 300$ К (данные получены до открытия „окна“ в GaAs)

№	S, cm^2	$N_d - N_a, \text{cm}^{-3}$	$E_{m0}, \text{V/cm}$	β	$q\varphi_{B0}, \text{eV}$ ($C-U$)	$q\varphi_{B0}, \text{eV}$ ($I_{f0}-h\nu$)
1	0.112	$2.2 \cdot 10^{16}$	$7.1 \cdot 10^4$	1.10	0.98	0.88
2	0.069	$3 \cdot 10^{17}$	$2.8 \cdot 10^5$	1.09	0.90	0.89
3	0.062	$3 \cdot 10^{16}$	$8.5 \cdot 10^4$	1.08	0.91	0.89
4	0.270	$2 \cdot 10^{17}$	$2 \cdot 10^5$	1.10	0.85	0.86
5	0.163	$1.9 \cdot 10^{17}$	$2.1 \cdot 10^5$	1.21	0.96	0.90
6	0.125	$1.5 \cdot 10^{16}$	$6.45 \cdot 10^4$	1.27	1.08	0.92

Перед химическим осаждением золота либо перед формированием диэлектрического (оксидного) слоя поверхность GaAs обрабатывалась в бром-метиловом травителе $4\% \text{Br}_2 + 96\% \text{CH}_3\text{OH}$.

Промежуточным диэлектрическим слоем служил собственный окисл арсенида галлия [17]. Ширина запрещенной зоны диэлектрического (оксидного) слоя, которая составляет $E_{\text{Gok}} \cong 4.9 \text{ eV}$, определялась по методике [18], что хорошо согласуется с данными [19]. Оксидный слой на поверхности GaAs *n*-типа создавался по методике [20]. Диэлектрические слои были разной толщины, причем максимальная — 45 \AA . На ряде исследованных структур полупроводник–диэлектрический слой до формирования барьерного контакта эллипсометрическим методом с помощью прибора ЛЭФ-3М (длина волны падающего света 632.8 nm) была измерена толщина диэлектрического слоя (δ).

Площадь барьерного контакта (S) для полученных БШ составляла $0.05-0.3 \text{ cm}^2$. К омическому и барьерному контактам припаивались индием серебряные проводники, после чего измерялись вольт-фарадные ($C-U$) и вольт-амперные ($I-U$) характеристики, а также спектры фототока короткого замыкания $I_{f0} = f(h\nu)$. Все измерения были выполнены при комнатной температуре (300 K).

2. Экспериментальные исследования свойств БШ Au-*n*-GaAs выполнялись в два этапа. На первом этапе до открытия „окна“ в пластине GaAs проводились исследования $C-U$, $I-U$, $I_{f0}-h\nu$ характеристик структур. На основе анализа электрических и фотоэлектрических свойств БШ определялись параметры кристаллов GaAs: концентрация свободных электронов $n = N_d - N_a$, энергия прямых межзонных переходов $E_0 = E_G$, а также оценивались параметры энергетических диаграмм БШ: ширина слоя объемного заряда W_0 , максимальное электрическое поле E_{m0} при нулевом смещении и $q\varphi_{B0}$. Измерялась также зависимость прямого темнового тока I от напряжения U , которая в интервале плотностей токов $10^{-7}-10^{-2} \text{ A/cm}^2$ оказалась экспоненциальной

$$I = I_s \exp(qU/\beta kT),$$

где I_s — ток насыщения. Из этого выражения определялся коэффициент идеальности структуры β , кото-

рый зависит от толщины промежуточного диэлектрического слоя [21]. Значение высоты барьера Шоттки определялось двумя разными методами: фотоэлектрическим, а также, для сравнения, методом вольт-фарадных характеристик на частоте 10 kHz . Полученные двумя независимыми методами значения $q\varphi_{B0}$, когда $\beta < 1.1$, практически совпадают (см. таблицу). На данном этапе исследования для определения $q\varphi_{B0}$ и E_G измерялись спектры фоточувствительности в диапазоне энергии фотонов $h\nu = 0.9-2.2 \text{ eV}$ в условиях освещения БШ Au-*n*-GaAs со стороны Au. Измеренные характеристические параметры типичных БШ приведены в таблице.

3. При освещении полученных БШ со стороны GaAs важным параметром становится толщина пластины полупроводника d . Для получения заметного фототока генерация неравновесных носителей заряда светом должна происходить в основном в области толщиной $d \sim 2(W+L)$ [22], около *m-s*-перехода, где L — диффузионная длина неосновных носителей заряда. В наших экспериментах, согласно выполненным измерениям, толщина слоя объемного заряда W_0 в отсутствие смещения составляла $\sim 0.06-0.31 \text{ \mu m}$, а диффузионная длина дырок $L_p \sim 0.6-1.5 \text{ \mu m}$.

Для анализа характеристик структур, сравнения их фоточувствительности при освещении *m-s*-перехода как со стороны Au, так и со стороны полупроводника и определения $q\varphi_{B0}$ в фаулеровской области спектра возьмем в качестве критерия величину вентиляльной фотоЭДС (U_{f0}). При освещении *m-s*-перехода монохроматическим светом как со стороны металла, так и со стороны полупроводника и соблюдении условия $d \sim 2(W_0 + L_p)$ вентиляльные фотоЭДС для фоточувствительных *m-s*-структур должны быть близкими, т. е. $U_{f0} \cong U_{f0m} \cong U_{f0s}$. Для удовлетворения этих условий проводилось контролируемое вытравливание пластины для создания „окна“ в GaAs, чтобы свет поступал в активную область *m-s*-перехода через полупроводник. Согласно расчету для БШ, Au-*n*-GaAs после открытия „окна“ для падающего излучения, толщина d должна быть близкой $1.5-4 \text{ \mu m}$. Чтобы обеспечить такую толщину полупроводника, глубина травления GaAs контролировалась по измерению значения U_{f0} на основании того, что как только d становится близким к $2(W_0 + L_p)$, вентиляльные фотоЭДС по величине сближаются друг с другом, т. е. $U_f \cong U_{f0s}$.

Прохождение света к *m-s*-переходу в условиях освещения БШ со стороны GaAs обеспечивалось химическим травлением GaAs в готовых структурах Au-*n*-GaAs с полупрозрачным металлическим барьером, в которых толщина пластины *n*-GaAs $\sim 250 \text{ \mu m}$.

Для открытия „окна“ в пластинах GaAs применялась следующая методика. Кольцевые омические и барьерные контакты предварительно покрывались лаком ХСЛ. Затем внутри кольцевого омического контакта в центре пластинки GaAs травителем HNO_3 $\text{HF}:\text{H}_2\text{SO}_4 = 7:1:1$ [23] окрывалось „окно“. Требуемая глубина травления GaAs обеспечивалась периодическим контрольным измерением величины U_{f0} . Когда толщина

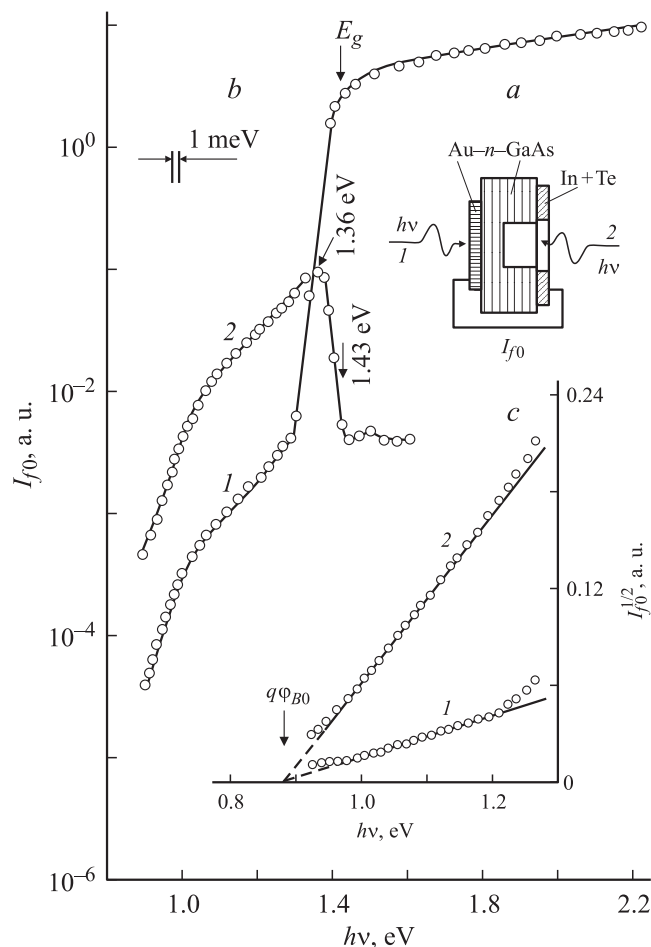


Рис. 1. Схема измерений фототока короткого замыкания I_{f0} (a) и зависимости фототока ($I_{f0}, I_{f0}^{1/2}$) от энергии фотона ($h\nu$) для структур Au-n-GaAs (b,c) для структуры № 1 при $T = 300$ К. Геометрия освещения: кривая 1 — со стороны Au, 2 — со стороны GaAs. Фототок приведен к равному числу падающих фотонов.

полупроводника d становилась такой, что выполнялось условие $U_{f0m} \cong U_{f0s}$, травление прекращалось. В изготовленных нами различных $m-s$ -структурах диаметр „окна“ составлял 0.2–0.3 см. После открытия „окна“ лак ХСЛ снимался механически, и структуры промывались этиловым спиртом. Структуры Au-n-GaAs, предназначенные для дальнейших исследований, обладали фоточувствительностью при освещении как со стороны слоя Au, так и со стороны GaAs (рис. 1, a). В наших экспериментах значения U_{f0} при освещении структуры как со стороны Au (U_{f0m}), так и со стороны GaAs (U_{f0s}) были близкими и находились в пределах 0.35–0.45 В. Источником немонохроматического света служила лампа накаливания.

4. После открытия „окна“ в пластинах GaAs исследуемые $m-s$ -структуры приобретали „двустороннюю“ фоточувствительность (рис. 1, a). На втором этапе рассматриваемого исследования выполнялись уже только исследования фотоэлектрических свойств таких струк-

тур. При измерении спектров фототока соблюдались одинаковые условия освещения. Освещаемая площадь как при освещении со стороны слоя Au, так и при освещении со стороны „окна“ в пластине GaAs исследованных структур составляла ~ 0.01 см².

Типичные спектральные характеристики двусторонней фоточувствительной структуры Au-n-GaAs в области энергии фотонов 0.9–2.2 eV как при освещении со стороны полупрозрачного слоя Au, так и со стороны GaAs представлены на рис. 1, b. Из него хорошо видно, что в исследуемых структурах форма спектра фототока короткого замыкания зависит от геометрии освещения (рис. 1, b). При освещении БШ со стороны Au спектр фототока I_{f0} был широкополосный (рис. 1, b, кривая 1), а в диапазоне энергий падающих фотонов $h\nu = 0.9–1.3$ eV его значение, как правило, падало уже на 2–3 порядка ниже, чем при энергиях фотонов, превышающих ширину запрещенной зоны полупроводника E_g . Важно подчеркнуть, что зависимость фототока I_{f0} от $h\nu$ в диапазоне $h\nu = 0.95–1.25$ eV подчиняется закону Фаулера, т. е.

$$I_{f0} \sim (h\nu - q\phi_{B0})^2.$$

Экспериментальная зависимость $I_{f0}^{1/2}$ от $h\nu$ (рис. 1, c, кривая 1) оказывается линейной, и высота барьера $q\phi_{B0}$ определялась путем экстраполяции этой зависимости к значению $I_{f0}^{1/2} = 0$. В исследованных структурах величина $q\phi_{B0}$ лежит в пределах 0.86–0.92 eV. Для разных структур величины $q\phi_{B0}$ были разными (см. таблицу). При анализе экспериментальной зависимости I_{f0} от $h\nu$ для структур Au-n-GaAs по известной методике [24] было определено значение ширины запрещенной зоны (рис. 1, b, кривая 1), которое составляет 1.43 eV при 300 К. Спектр фототока при энергиях фотонов $h\nu > E_g$ подробно изучался в [25] и в нашей работе не рассматривается.

На рис. 1, b (кривая 2) приведено наблюдаемое экспериментальное спектральное распределение фоточувствительности БШ Au-n-GaAs (структура № 1) при ее освещении со стороны GaAs. Обнаружено, что зависимость фототока I_{f0} от $h\nu$ при такой геометрии освещения имеет селективный характер и максимум фоточувствительности расположен вблизи $h\nu_m \cong 1.36$ eV. Установлено, что при освещении БШ со стороны GaAs зависимость фототока I_{f0} от энергии фотонов в области $h\nu = 0.95–1.25$ eV также подчиняется закону Фаулера

$$I_{f0} \sim (h\nu - q\phi_{B0})^2.$$

Из этой зависимости определено значение $q\phi_{B0} = 0.88$ eV. Для одной и той же структуры как при освещении со стороны Au, так и при освещении GaAs получены практически одинаковые значения $q\phi_{B0}$ (рис. 1, c), например, для структуры Au-n-GaAs (№ 1) значение $q\phi_{B0}$ оказалось равным 0.88 eV. Следовательно, экспериментальные исследования спектров фототока структур Au-n-GaAs показывают, что независимо от условий их освещения в области энергий падающих фотонов

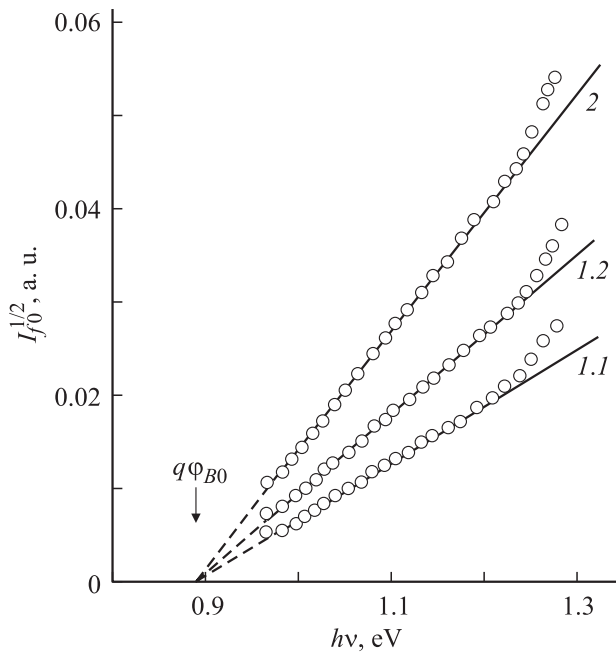


Рис. 2. Зависимости фототока ($I_{f0}^{1/2}$) от энергии фотона ($h\nu$) для БШ Au–n-GaAs (образец № 2) при разных геометриях освещения ($T = 300\text{ K}$): 1.1 — освещение со стороны Au до открытия „окна“ в пластине GaAs; 1.2 — освещение со стороны Au после открытия „окна“ в пластине GaAs; 2 — освещение со стороны GaAs.

$h\nu = 0.95\text{--}1.25\text{ eV}$ фоточувствительность в основном определяется эмиссией электронов из золота.

Важно подчеркнуть, что выполненные эксперименты позволили впервые установить, что при освещении БШ со стороны GaAs фототок в фаулеровской области $h\nu = 0.95\text{--}1.25\text{ eV}$ в близких условиях фотовозбуждения воспроизводимо во всех полученных структурах возрастает примерно на порядок величины относительно случая освещения БШ со стороны Au (рис. 1, б, кривая 2). Это увеличение может быть вызвано различиями в спектрах оптического пропускания пленки золота и „окна“ в пластине GaAs в пределах фаулеровского диапазона энергий. Следует также указать, что в случае определения $q\phi_{B0}$ структур Au–n-GaAs при освещении со стороны GaAs появляется возможность использовать толстый слой барьерного металлического контакта и тем самым обойти технологические трудности, связанные с изготовлением тонких полупрозрачных металлических слоев.

На рис. 2 представлена зависимость $I_{f0} \sim (h\nu - q\phi_{B0})^2$ фаулеровского участка спектра для структуры Au–n-GaAs до и после открытия „окна“ в пластине GaAs при разных условиях освещения. Как видно из этого рисунка, для одной и той же структуры величина $q\phi_{B0}$ оказалась независимой от условий освещения и проведения процесса химической обработки пластины GaAs (рис. 2). Действительно, для одной и той же структуры как до открытия (рис. 2, кривая 1.1), так и после открытия

„окна“ (рис. 2, кривая 1.2) получены одинаковые значения $q\phi_{B0}$, которые для структуры № 2 равны 0.89 eV . Следовательно, развитая в работе технология вскрытия „окна“ из GaAs в БШ Au–n-GaAs не вносит каких-либо необратимых изменений в свойства структуры, и поэтому значение $q\phi_{B0}$ остается практически неизменным (рис. 2, кривые 1.1 и 1.2), по этой причине значение высоты БШ можно использовать в качестве фундаментального параметра при диагностике качества границы раздела металл–полупроводник.

5. Из анализа экспериментальных зависимостей фототока короткого замыкания I_{f0} от энергии фотонов $h\nu$ для разных фоточувствительных структур Au–n-GaAs, освещаемых со стороны GaAs, найдены значения высоты барьера Шоттки $q\phi_{B0}$ (рис. 3).

На рис. 3, а представлены зависимости $I_{f0}^{1/2}$ от $h\nu$ в фаулеровской области спектра для почти идеальных структур Au–n-GaAs ($\beta < 1.1$; $\delta < 15\text{ \AA}$) при освещении $m\text{--}s$ -перехода со стороны GaAs. Как видно из рис. 3, а, для двух структур Au–n-GaAs (№ 2, 3) получены одинаковые значения $q\phi_{B0}$, которые равны 0.89 eV . Важно подчеркнуть, что в таких БШ Au–n-GaAs образование очень тонкого промежуточного диэлектрического слоя ($\delta < 15\text{ \AA}$) между полупроводником и металлом не приводит к изменению высоты потенциального барьера.

На рис. 3, б представлены зависимости $I_{f0}^{1/2}$ от $h\nu$ в фаулеровской области спектра для структур Au–n-GaAs ($\beta = 1.10\text{--}1.30$; $\delta = 15\text{--}45\text{ \AA}$), содержащих тонкий диэлектрический слой между полупроводником и металлом. Как видно из рис. 3, б, при освещении структуры Au–n-GaAs со стороны „окна“ в GaAs зависимость $I_{f0}^{1/2}$ от $h\nu$ оказывается линейной, и на этом основании высота барьера $q\phi_{B0}$ определялась по экстраполяции этой зависимости к значению $I_{f0}^{1/2} = 0$. На этом основании можно сделать заключение о том, что величина $q\phi_{B0}$ в этих БШ зависит от толщины промежуточного диэлектрического (оксидного) слоя δ (рис. 3, б). Присутствие на границе раздела металл–полупроводник в БШ Au–n-GaAs тонкого промежуточного диэлектрического слоя ($\beta = 1.1\text{--}1.3$; $\delta = 15\text{--}45\text{ \AA}$) между полупроводником и металлом изменяет свойства границы раздела, что и вызывает изменения высоты барьера Шоттки (рис. 3, б). Эти исследования показали, что по измерениям высоты барьера $q\phi_{B0}$ можно получить важную информацию о свойствах границы раздела металл–полупроводник, металл–диэлектрик–полупроводник. В выполненном цикле исследований впервые экспериментально установлено, что присутствие между полупроводником и металлом тонкого диэлектрического слоя толщиной от 15 до 40 \AA не снижает высоту потенциального барьера структур Au–n-GaAs.

В фаулеровской области спектра фототока $h\nu = 0.95\text{--}1.25\text{ eV}$ найденные значения $q\phi_{B0}$ для структур Au–n-GaAs при освещении $m\text{--}s$ -перехода со стороны GaAs хорошо согласуются с литературными данны-

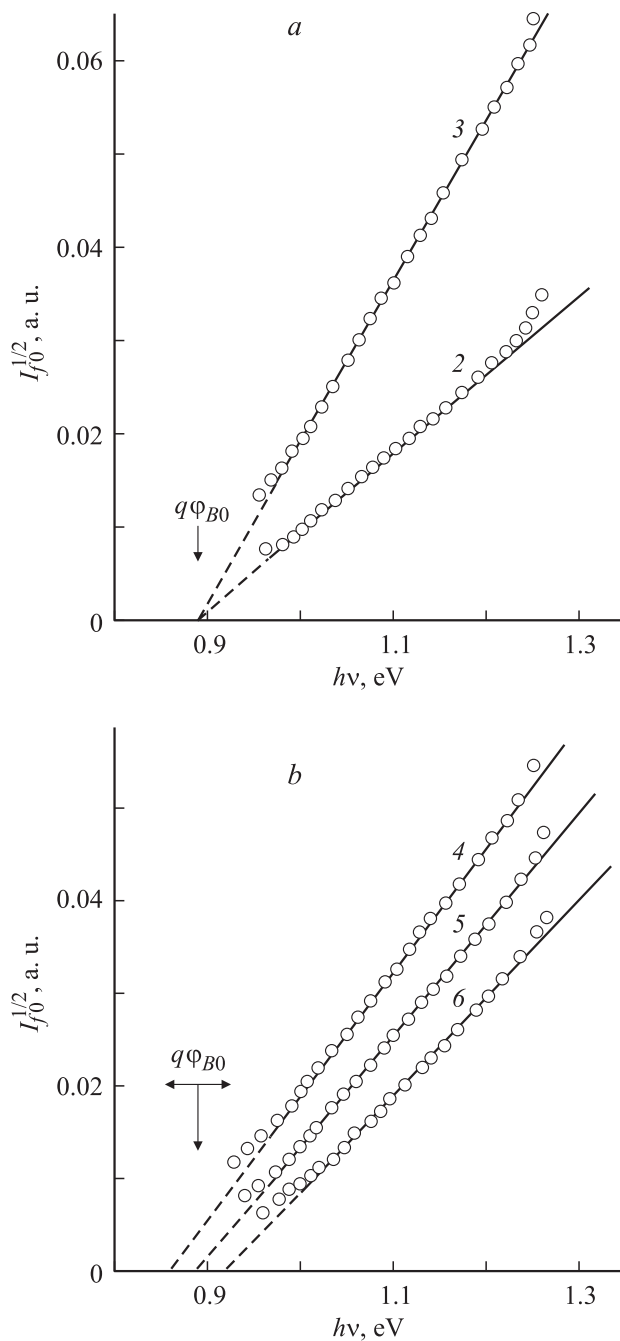


Рис. 3. Зависимость фототока ($I_{f0}^{1/2}$) от энергии фотона ($h\nu$) для БШ Au–n-GaAs при освещении со стороны „окна“ в пластине GaAs ($T = 300$ К). *a* — спектры почти идеальной структуры, кривые 2 и 3 ($\beta < 1.1$; $\delta < 15$ Å); *b* — спектры структуры Au–n-GaAs (кривые 4–6) с тонким диэлектрическим слоем. Толщина диэлектрического слоя δ : кривая 4 — 15, 5 — 32, 6 — 40 Å. Цифровые обозначения у кривых соответствуют номерам структур в таблице.

ми [26–31], полученными фотоэлектрическим методом при освещении m – s -перехода со стороны полупрозрачного слоя металла.

6. Таким образом, на основании результатов комплексных исследований барьеров Шоттки можно сделать

вывод о том, что для точного определения высоты барьера можно использовать контактный фотоэлектрический метод. Этот метод позволяет определить высоту потенциального барьера без разрушения структур металл–GaAs как при освещении m – s -перехода со стороны металла, так и при освещении со стороны GaAs. Высота барьера для структур Au–n-GaAs при освещении со стороны GaAs определена впервые. По высоте потенциального барьера, найденной фотоэлектрическими методами, можно судить о качестве границы раздела металл–полупроводник. В результате проведенных исследований

— предложен новый вариант фотоэлектрического метода определения $q\Phi_{B0}$ для структур металл–GaAs при освещении m – s -перехода со стороны GaAs;

— обнаружено, что этот метод дает возможность реализовать высокую фоточувствительность, поскольку в фаулеровской области спектра при освещении со стороны GaAs фоточувствительность структур Au–n-GaAs возрастает на порядок.

В силу этого указанный метод представляет интерес для исследования свойств границ раздела металл–полупроводник и металл–диэлектрик–полупроводник. Данный метод особенно перспективен для изучения фундаментальных свойств межфазной границы раздела, а также полезен при разработке новых полупроводниковых приборов для современной электроники.

Работа поддержана программой ОФН РАН „Новые принципы преобразования энергии в полупроводниковых структурах“.

Список литературы

- [1] Арсенид галлия в микроэлектронике / Пер. с англ.; под ред. Н. Айнспрука, У. Уиссмана. М.: Мир, 1988. 555 с.
- [2] Growell C.R., Spitzer W.G., Howarth L.E., Labate E. // Phys. Rev. 1962. Vol. 127. P. 2006.
- [3] Fowler R.H. // Phys. Rev. 1931. Vol. 38. P. 45–56.
- [4] Growell C.R., Spitzer W.G., Howarth L.E., Labate E. // Appl. Phys. Lett. 1962. Vol. 1. P. 3.
- [5] Kahg D. // IRE Solid-State Device Conf. Durham, New Hampshire, 1962.
- [6] Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов / Пер. с англ.; под ред. Р.А. Сурица. М.: Мир, 1984. 456 с.
- [7] Mead C.A. // Solid-State Electron. 1966. Vol. 9. N 11/12. P. 1023–1033.
- [8] Mead C.A., Spitzer W.G. // Phys. Rev. 1964. Vol. 134. P. 713–716.
- [9] Kahg D. // Bell. Syst. Techn. J. 1964. Vol. 43. P. 215–224.
- [10] Padovani F.A. // Solid-State Electron. 1968. Vol. 11. P. 193.
- [11] Yamamoto T., Ota Y. // Solid-State Electron. 1968. Vol. 11. P. 219.
- [12] Вяткин А.П., Максимова Н.К., Поплавной А.С., Степанов В.Е., Чалдышев В.А. // ФТП. 1970. Т. 4. Вып. 5. С. 915–922.
- [13] Гуткин А.А., Дмитриев М.В., Наследов Д.Н., Пашковский А.В. // ФТП. 1971. Т. 5. Вып. 10. С. 1927–1932.

- [14] Гольдберг Ю.А., Поссе Е.А., Царенков Б.В. // ФТП. 1975. Т. 9. Вып. 3. С. 513–518.
- [15] Гольдберг Ю.А., Наследов Д.Н., Царенков Б.В. // ПТЭ. 1971. Вып. 3. С. 207–209.
- [16] Беркелиев А., Гольдберг Ю.А., Мелебаев Д., Царенков Б.В. // ФТП. 1976. Т. 10. Вып. 8. С. 1532–1534.
- [17] Торхов Н.Н. // ФТП. 2003. Т. 37. Вып. 10. С. 1205–1214.
- [18] Мелебаев Д., Назаров Н. // Тр. VI Междунар. научн.-практич. конф. „СИЭТ-2005“. Одесса, 2005. С. 280.
- [19] Кашкаров П.К., Образцов А.Н., Сорокин И.Н., Сосновских Ю.Н. // Неорганические материалы. 1986. Т. 22. № 10. С. 1606–1609.
- [20] Вигдорович Е.Н., Гольдберг Ю.А., Дурдымырадова М.Г., Мелебаев Д., Царенков Б.В. // ФТП. 1991. Т. 15. Вып. 8. С. 1419–1421.
- [21] Gard C., Roderick E.H. // J. Phys. D. Appl. Phys. 21971. Vol. 4. P. 1589–1601.
- [22] Гуткин А.А., Дмитриев М.В., Наследов Д.Н. А.с. СССР № 383125. Б.И. 1973. № 23.
- [23] Готра З.Ю. Технология микроэлектронных устройств. М., 1991. 528 с.
- [24] Беркелиев А., Гольдберг Ю.А., Именков А.Н., Мелебаев Д., Розыева М.Х. // Изв. АН ТССР. Сер. ФТХ и ГН. 1986. Вып. 1. С. 8–14.
- [25] Конников С.Г., Мелебаев Д., Рудь В.Ю., Беркелиев А., Дурдымырадова М.Г., Корнякова О.В. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 4. С. 57–64.
- [26] Yeh Y.-Ch., Stirn R. // Conf. Rec. 11th IEEE Photovolt. Specialilists Conf. Scottsdale Ariz. N.Y., 1975. P. 391–397.
- [27] Окутига Т., Ти Н.К. // J. Appl. Phys. 1987. Vol. 61. P. 2955–2961.
- [28] Конников С.Г., Мелебаев Д., Рудь В.Ю. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 13. С. 47–54.
- [29] Бедный В.И. // ФТП. 1999. Т. 33. Вып. 10. С. 1350–1354.
- [30] Дмитрук Н.Л., Борковская О.Ю., Конакова Р.В., Мамонтов И.Б., Мамыкин С.В., Войцеховский Д.И. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 6. С. 44–49.
- [31] Мелебаев Д., Мелебаева Г.Д., Рудь Ю.В., Рудь В.Ю. // Тр. VII Междунар. научн.-практич. конф. „СИЭТ-2006“. Одесса, 2006. С. 165.