

Фоточувствительность барьеров Шоттки Ni—*n*-GaAs

© Д. Мелебаев, Г.Д. Мелебаева, В.Ю. Рудь*, Ю.В. Рудь⁺

Туркменский государственный университет им. Магтымгулы,
744000 Ашхабад, Туркменистан

* Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия

⁺ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 18 декабря 2007 г. Принята к печати 24 января 2008 г.)

Методом химического осаждения получены структуры с барьером Шоттки Ni—*n*-GaAs. Толщина слоев никеля с зеркальной наружной поверхностью варьировалась в пределах 150–220 Å. Впервые экспериментально обнаружено, что фоточувствительность полученных барьеров при их освещении со стороны полупрозрачных слоев Ni в фаулеровской области спектра $h\nu = 0.9–1.5$ эВ практически отсутствует. Эта закономерность связывается в основном с тем, что при освещении со стороны слоя Ni излучение с энергией фотонов $h\nu < 1.3$ эВ сильно отражается от поверхности никеля. Установлено, что разработанные структуры Ni—*n*-GaAs могут использоваться в качестве высокоэффективных широкодиапазонных фотопреобразователей видимого и ультрафиолетового излучения.

PACS: 78.20.-e, 81.15.-z

Барьеры Шоттки (БШ) на основе арсенида галлия остаются одной из наиболее перспективных структур для разработок полупроводниковых приборов, используемых в современной микро- и оптоэлектронике [1–4].

Вопрос о том, как вычислить высоту барьера Шоттки ($q\phi_{\text{ВО}}$) на контакте металл (*m*)—полупроводник (*s*), остается, несмотря на многолетние исследования, актуальной задачей теории полупроводников [5]. В этой связи несомненный интерес представляют исследования БШ Ni—*n*-GaAs. Высота барьера в этих структурах преимущественно определялась вольт-амперным и вольт-фарадным методами [6], а фотоэлектрический метод [7], основанный на изменениях спектра фототока при освещении структур со стороны полупрозрачного слоя никеля, остается практически не реализованным. Известна только попытка определить высоту барьера в структурах Ni—*n*-GaAs при освещении БШ со стороны полупрозрачного слоя никеля [8]. Однако в фаулеровской области спектра ($h\nu = 0.9–1.25$ эВ) фоточувствительность в таких структурах не удалось наблюдать, из-за чего причина этой особенности в литературе вообще не обсуждалась. В настоящей работе приводятся результаты впервые выполненных исследований спектров фоточувствительности структур Ni—*n*-GaAs в условиях их освещения со стороны полупрозрачного слоя никеля в диапазоне энергий фотонов $h\nu = 0.9–2.4$ эВ и установлено, что они практически не реагируют на свет из фаулеровской области спектра $h\nu = 0.9–1.25$ эВ. Для выяснения причины отсутствия фототока структур Ni—*n*-GaAs в фаулеровском диапазоне сопоставляются спектры фоточувствительности БШ Ni—*n*-GaAs и Au—*n*-GaAs.

1. Исследованные БШ Ni—*n*-GaAs/*n*⁺-GaAs и Au—*n*-GaAs/*n*⁺-GaAs формировались на пластинах *n*⁺-GaAs ($n^+ \approx 8 \cdot 10^{17}$ см⁻³) толщиной ≈ 250 мкм,

выращенных методом Чохральского. Активные слои *n*-GaAs [$n = N_d - N_a = (2-4) \cdot 10^{15}$ см⁻³] толщиной 20–40 мкм выращивались на пластинах *n*⁺-GaAs методом жидкофазной эпитаксии. Омический контакт к подложке *n*⁺-GaAs изготовлялся сплавлением сплава In + 3%Te в атмосфере очищенного водорода при температуре около 500°C. Полупрозрачный барьерный контакт Ni на активном эпитаксиальном слое *n*-GaAs создавался химическим осаждением при температурах 90–95°C из водных растворов сульфатов диаммония-никеля [Ni(NH₄)₂(SO₄)₂ · 6H₂O] и гидразина [(N₂H₆) · SO₄] [8], куда добавочно вводился нашатырный спирт (NH₄OH) до pH ≈ 10 . Контрольные БШ Au—*n*-GaAs на основе эпитаксиальных структур создавались химическим осаждением из водного раствора HAuCl₄(4 г/л) + HF(100 мг/л) слоя золота при комнатной температуре [9]. Толщина барьерных слоев никеля и золота d_m , согласно эллипсометрическим данным, достигала 150–250 Å. Перед химическим осаждением слоев никеля и золота поверхность эпитаксиального слоя *n*-GaAs обрабатывалась в бромметаноловом травителе 4%Br₂ + 96%CH₃OH [10]. Площадь барьерного контакта у разных структур составляла 0.03–0.1 см². Конструктивная схема барьеров Шоттки Ni—*n*-GaAs и условия освещения представлены на рис. 1, а.

2. Исследуемые БШ Ni—*n*-GaAs (см. таблицу) обнаружили фоточувствительность при освещении со стороны полупрозрачного барьерного слоя Ni. Спектр фототока короткого замыкания $I_{f0} = f(h\nu)$ Ni—*n*-GaAs и Au—*n*-GaAs структур измерялся с помощью монохроматора ДМР-4, а в качестве источников света использовались лампы СИ-8-200 или ДРТ-375. Высокая фоточувствительность БШ наблюдалась в области 1–2.8 эВ. Абсолютное значение квантовой эффективности полученных структур в области $h\nu = 1–5.2$ эВ определяется с использованием эталонных фотоприемников, калиброванных в интервале 1–5.4 эВ.

✉ E-mail: rudvas@spbstu.ru

Параметры энергетических диаграмм БШ Ni(Au)-n-GaAs при $T = 300$ К

№	Структуры	$d_m, \text{Å}$	$N_d - N_a, \text{см}^{-3}$	$E_{m0}, \text{В/см}$	$q\phi_{B0}, \text{эВ}$ $C = f(U)^*$	$q\phi_{B0}, \text{эВ}$ $I_{f0} = f(h\nu)^*$
1	Ni-n-GaAs	160–180	$2.1 \cdot 10^{15}$	$2.0 \cdot 10^4$	0.900	—
2	Ni-n-GaAs	180–220	$2.0 \cdot 10^{15}$	$1.9 \cdot 10^4$	0.901	—
3	Ni-n-GaAs	150–160	$2.6 \cdot 10^{15}$	$2.2 \cdot 10^4$	0.895	—
4	Au-n-GaAs	150–160	$3.6 \cdot 10^{15}$	$2.8 \cdot 10^4$	0.887	0.89

Примечание. * Указаны зависимости, по которым определялась величина $q\phi_{B0}$. Освещение структур производилось со стороны полупрозрачного слоя металла.

Полученные барьеры Шоттки, согласно данным измерений стационарных вольт-амперных характеристик, можно отнести к идеальным (показатель $\beta \approx 1.1$), максимальная фоточувствительность ($S_I, \text{А/Вт}$) которых при освещении со стороны полупрозрачного слоя металла (Ni, Au) для разных БШ была достаточно высокой и достигала $0.11\text{--}0.15 \text{ А/Вт}$ ($h\nu = 2.35 \text{ эВ}$). В спектральных измерениях освещаемая площадь полученных $m\text{--}s$ -переходов составляла $\approx 0.01 \text{ см}^2$, а фототок приводился к равному числу падающих фотонов.

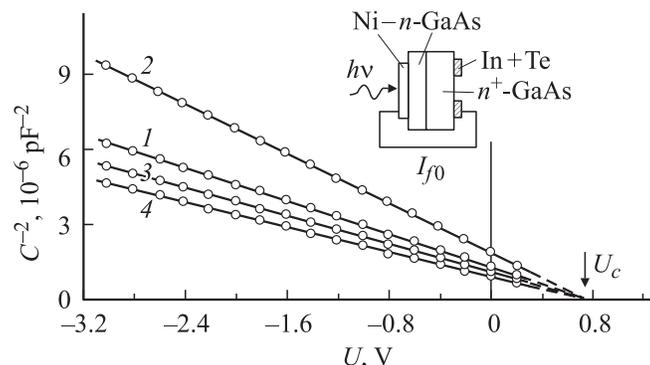


Рис. 1. Зависимость дифференциальной емкости от напряжения смещения БШ Ni-n-GaAs (1-3) и Au-n-GaAs (4) при $T = 300$ К. Здесь и далее номера образцов указаны у кривых и соответствуют таблице. На вставке — конструкция и схема измерений БШ Ni-n-GaAs.

Для определения параметров энергетической диаграммы структур Ni(Au)-n-GaAs измерялись вольт-фарадные характеристики на частоте $\approx 1 \text{ МГц}$. Зависимость дифференциальной барьерной емкости C от напряжения смещения U на потенциальном барьере в координатах $1/C^2 = f(U)$ при $U = -3.0 \text{ -- } +0.4 \text{ В}$ для всех исследованных структур подчинялась линейному закону (рис. 1), что соответствует теории Шоттки и позволяет непосредственно определять высоту барьера Шоттки ($q\phi_{B0}$) из выражения

$$q\phi_{B0} = qU_D - \mu = qU_C + kT - \mu, \quad (1)$$

где U_D — диффузионный потенциал, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, U_C — емкостное напряжение отсечки, μ — отсчитанная от дна зоны проводимости энергия уровня Ферми в объеме GaAs.

При $T = 300$ К величина напряжения отсечки, полученная из пересечения экспериментальных зависимостей $C = f(U)$ с осью абсцисс, составляла $U_0^C = U_C \approx 0.74 \text{ В}$. Оказалось, что для структур Ni-n-GaAs и Au-n-GaAs значения U_C при близких значениях разностной концентрации ионизованных доноров и акцепторов ($N_d - N_a$), определенной из $C = f(U)$ характеристик БШ, оказались практически одинаковыми, а найденные значения высоты барьера $q\phi_{B0}$ для исследованных $m\text{--}s$ -структур на кристаллах GaAs приведены в таблице.

3. Типичные спектры фоточувствительности БШ Ni-n-GaAs в спектральном диапазоне $1.3\text{--}2.3 \text{ эВ}$ при их освещении со стороны слоев Ni представлены на рис. 2 (кривые 1 и 2, см. таблицу). Из рис. 2 видно, что фоточувствительность структур Ni-n-GaAs при энергиях фотонов $h\nu \geq E_g$ для GaAs обусловлена возбуждением электронно-дырочных пар в эпитаксиальном слое GaAs и последующим разделением их полем поверхностного потенциального барьера E_{m0} (см. таблицу). По зависимости I_{f0} от $h\nu$ [11] на этом участке определена ширина

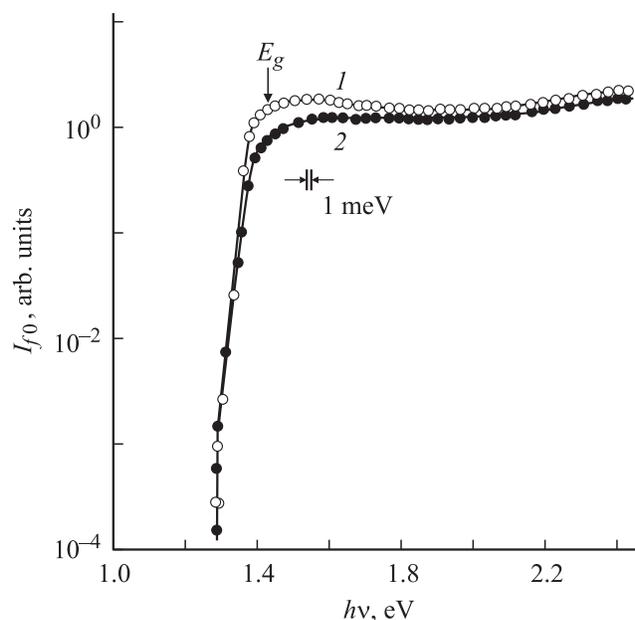


Рис. 2. Спектральные зависимости фототока короткого замыкания БШ Ni-n-GaAs при освещении со стороны барьерного контакта. $T = 300$ К.

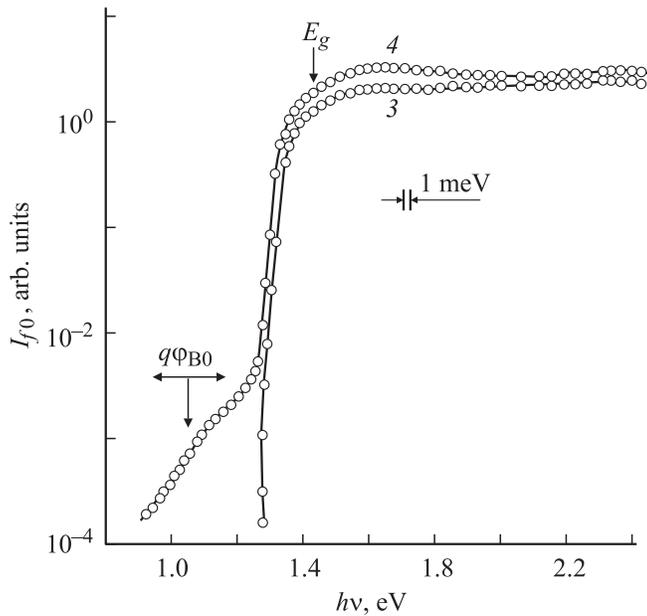


Рис. 3. Спектральные зависимости фототока короткого замыкания БШ Ni–*n*-GaAs (3) и Au–*n*-GaAs (4). $T = 300$ К.

запрещенной зоны *n*-GaAs (рис. 2 и 3) $E_g \approx 1.43$ эВ при 300 К.

С учетом [12] можно полагать, что при $E_g > hv > q\Phi_{B0}$ фоточувствительность структур Ni–*n*-GaAs должна определяться фотоэмиссией электронов из никеля в арсенид галлия и для этого участка следует ожидать выполнения соотношения Фаулера $I_{f0} \propto (hv - q\Phi_{B0})^2$. Как показали результаты эксперимента (рис. 2), при освещении структур Ni–*n*-GaAs со стороны слоя никеля фотоны с энергией $hv < 1.3$ эВ еще не возбуждают электроны в слое никеля и по этой причине эмиссии электронов из металла в полупроводник не происходит. Такое явление оказалось характерным для всех без исключения БШ Ni–*n*-GaAs (рис. 2, кривые 1, 2 и рис. 3, кривая 3).

С целью выяснения природы обнаруженной особенности проводился сравнительный анализ спектров фототока короткого замыкания БШ Ni–*n*-GaAs и Au–*n*-GaAs (рис. 3) при их освещении со стороны полупрозрачных слоев металлов (Ni, Au). На основании [13] следует считать, что в структурах Au–*n*-GaAs полупрозрачный слой золота хорошо пропускает ближнее инфракрасное излучение ($hv = 0.8–1.3$ эВ), и в связи с отсутствием в литературе сведений об оптическом пропускании пленок никеля в данной работе особое внимание уделялось детальным исследованиям фоточувствительности БШ Ni–*n*-GaAs в фаулеровской области спектра.

Результаты измерений фототока I_{f0} показали, что структуры Ni–*n*-GaAs (рис. 3, кривая 3) практически не чувствуют света в фаулеровском диапазоне спектра $hv = 0.9–1.25$ эВ. Именно по этой причине оказалось принципиально невозможным определить из закона Фаулера величину $q\Phi_{B0}$ для Ni–*n*-GaAs-структур при их

освещении со стороны слоя никеля и, вероятно, поэтому до сих пор отсутствуют полученные методом фотоответа данные о высоте барьера Ni в таких структурах [12,14].

Корректность применения измерений фототока I_{f0} в фаулеровской области спектра для нахождения высоты барьера была подтверждена на структурах Au–*n*-GaAs (рис. 3, кривая 4). Зависимость I_{f0} от hv в последнем случае следует закону Фаулера $I_{f0} \propto (hv - q\Phi_{B0})^2$, и из этой зависимости найдена величина $q\Phi_{B0} = 0.89$ эВ для барьера Au–*n*-GaAs (см. таблицу). Это значение высоты БШ $q\Phi_{B0}$ для структуры Au–*n*-GaAs при ее освещении со стороны слоя Au хорошо согласуется с данными [11,15], полученными по методу фотоответа при освещении БШ со стороны GaAs.

Главный результат настоящей работы (рис. 3, кривая 3) дает основания полагать, что отсутствие фототока в БШ Ni–*n*-GaAs в условиях освещения со стороны полупрозрачного слоя Ni в основном связано с тем, что излучение с энергией фотонов $hv = 0.9–1.25$ эВ из-за его сильного отражения от поверхности в сам слой никеля практически не попадает и по этой причине в нем не поглощается [16]. Очевидно, что это принципиальное отличие БШ Ni–*n*-GaAs от Au–*n*-GaAs в фаулеровской области спектра может быть интерпретировано не только сильным отражением инфракрасного излучения от поверхности никеля, но и другими специфическими свойствами тонких пленок никеля [17].

4. Типичные спектры квантовой эффективности фотопреобразования γ барьеров Шоттки Ni–*n*-GaAs для излучения видимого и ультрафиолетового диапазонов при разной толщине слоев никеля d_m приведены на рис. 4. Из него видно, что значения γ структуры Ni–*n*-GaAs в основной полосе поглощения GaAs обнаруживают зависимость от толщины слоя никеля и в структуре с $d_m \approx 160$ Å в максимуме при $hv = 2.35$ эВ составляют 0.33 эл/фотон, а в ультрафиолетовом диапазоне при $hv = 3.4$ эВ понижаются до 0.23 эл/фотон (рис. 4, кривая 2).

Полученные в настоящей работе экспериментальные данные показывают, что изготовленные согласно разработанному технологическому режиму БШ Ni–*n*-GaAs могут использоваться как высокоэффективные фотоприемники видимого и ультрафиолетового излучения. Абсолютная величина квантовой эффективности фотопреобразования падающего излучения γ и вид ее спектральной зависимости в области фундаментального поглощения GaAs от толщины слоя никеля (рис. 4) показывают, что при используемых толщинах барьерного слоя никеля (110–220 Å) существенное влияние на величину γ БШ уже начинает оказывать поглощение света в слое никеля. Выполненные исследования (рис. 4) также дают основания сделать вывод о том, что в разработанных на БШ Ni–*n*-GaAs фотоприемниках максимальная эффективность γ достигается при толщинах слоя никеля в окрестности 160 Å.

5. Таким образом, в данной работе впервые экспериментально установлено, что при освещении структур

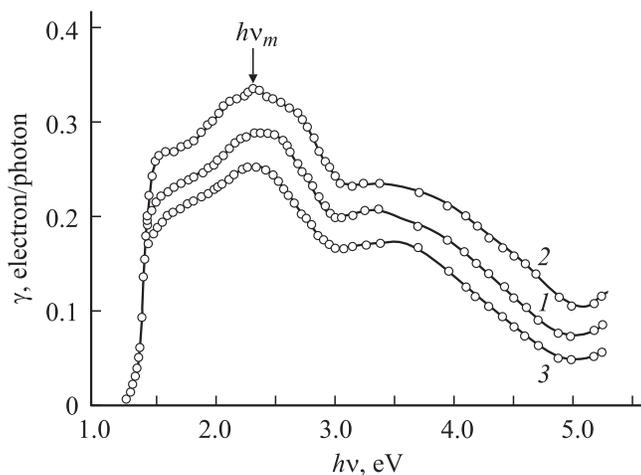


Рис. 4. Спектры квантовой эффективности фотопреобразования БШ Ni-n-GaAs в зависимости от толщины барьерного слоя никеля при освещении со стороны барьерного контакта при $T = 300$ К. $d_m, \text{Å}$: 1 — 110, 2 — 160, 3 — 220.

Ni-n-GaAs со стороны полупрозрачного слоя Ni фотоны с энергией $h\nu = 0.9\text{--}1.25$ эВ в слое Ni практически не поглощаются и, следовательно, не наступает эмиссия электронов из слоя Ni в GaAs, а фототок в фаулеровской области спектра не возникает вообще. Поэтому можно полагать, что именно по указанной причине в [12,14] не удалось определить значение $q\varphi_{\text{в0}}$ для БШ Ni-n-GaAs.

Очевидно, что результаты настоящего исследования следует также учитывать в разработках солнечных элементов с БШ Ni-n-GaAs, поскольку тонкие слои Ni одновременно могут выполнять не только функцию надежного барьерного контакта, но и подавлять разогрев солнечного элемента ближним инфракрасным излучением Солнца при $h\nu < 1.3$ эВ, а обнаруженное влияние толщины полупрозрачного слоя никеля на коротковолновую область квантовой эффективности фотопреобразования (рис. 4) показывает, что созданные барьеры Шоттки Ni-n-GaAs в принципе могут использоваться как высокоэффективные фотопреобразователи излучения видимого и ультрафиолетового диапазонов.

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

Список литературы

- [1] *Арсенид галлия в микроэлектронике*, пер. под ред. Н. Айнспрука, У. Уиссмана (М., Мир, 1988).
- [2] Г.А. Ашкинази, Ю.В. Жилиев, М.И. Шульга, В.Е. Челноков. *Письма ЖТФ*, **9** (7), 414 (1983).
- [3] С.Г. Конников, Г.Д. Мелебаева, Д. Мелебаев, В.Ю. Рудь, М. Сергинов. *Письма ЖТФ*, **18** (24), 32 (1992).
- [4] Ю.А. Гольдберг, О.В. Константинов, В.М. Лантратов, О.И. Оболенский, Т.В. Петелина, Е.А. Поссе, М.З. Шварц. *ФТП*, **33**, 876 (1999).

- [5] С.Ю. Давыдов, А.А. Лебедев, О.В. Посредник, Ю.М. Таиров. *ФТП*, **35**, 1437 (2001).
- [6] А.П. Вяткин, Н.К. Максимова, А.С. Поплавной, В.Е. Степанов, В.А. Чалдышев. *ФТП*, **4**, 915 (1970).
- [7] С.R. Crowell, W.G. Spitzer, H.G. White. *Appl. Phys. Lett.*, **1**, 3 (1962).
- [8] Г.Д. Мелебаева, Д. Мелебаев, Я. Агаев, Ю.А. Гольдберг, И.В. Попов, М. Сергинов. *Тр. XI Всес. конф. по фотоэлектрическим явлениям в полупроводниках*. Ашхабад, 200 (1991).
- [9] А. Беркелиев, Ю.А. Гольдберг, Д. Мелебаев, Б.В. Царенков. *ФТП*, **10**, 1532 (1976).
- [10] А. Беркелиев, Ю.А. Гольдберг, А.Н. Именков, Д. Мелебаев, Б.В. Царенков. *ФТП*, **12**, 96 (1978).
- [11] Д. Мелебаев, Г.Д. Мелебаева, Ю.В. Рудь, В.Ю. Рудь. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, **3**, 33 (2007).
- [12] С.А. Mead. *Sol. St. Electron.*, **9**, 1023 (1966).
- [13] А.А. Гуткин, М.В. Дмитриев, Д.Н. Наследов, А.В. Пашковский. *ФТП*, **5**, 1927 (1971).
- [14] С.М. Зи. *Физика полупроводниковых приборов*, пер. под ред. А.Ф. Труто (М., Энергия, 1973).
- [15] Д. Мелебаев, Г.Д. Мелебаева, Ю.В. Рудь, В.Ю. Рудь. *Тр. VII Межд. науч.-практ. конф. „СИЭТ-2006“* (Одесса, Украина, 2006) с. 165.
- [16] Г.Д. Мелебаева, Д. Мелебаев, Ю.В. Рудь, В.Ю. Рудь. *Тр. VIII Межд. науч.-практ. конф. „СИЭТ-2007“* (Одесса, Украина, 2007) с. 346.
- [17] М.Г. Коттон, Д.Дж. Локфуд. *Рассеяние света в магнетиках*, под ред. Н.М. Крейнс (М., Наука, 1991).

Редактор Л.В. Беляков

Photosensitivity of Ni-n-GaAs Schottky barriers

D. Melebaev, G.D. Melebaeva, V.Yu. Rud*, Yu.V. Rud +

Magtumguly Turkmen State University,
744000 Ashgabat, Turkmenistan

* St. Petersburg State Polytechnical University,
195251 St. Petersburg, Russia

+ Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Ni-n-GaAs Schottky barriers have been created by chemical deposition of the Ni thin films (160–220 Å) on the surface of GaAs crystal and the spectra of quantum efficiency for photoconversion for these structures were obtained. The discovered characteristics of the photoconversion at the different conditions of the lighting are discussed. The main peculiarity of Ni-n-GaAs Schottky barriers consisted in the photosensitivity absence in Fowler spectral range 0.9–1.25 eV at the lighting Ni-n-GaAs structure from Ni film. The obtained peculiarity explain the high reflection of Ni film in spectral range 0.9–1.25 eV. It is concluded that Ni-n-GaAs Schottky barriers can be used in the creation of high-efficiency thin film solar cells.