
СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

PHYSICAL SENSORS

УДК 621.382.2

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2018.2.136883>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТЫ БАРЬЕРА КОНТАКТОВ Ni - ПОЛУПРОВОДНИК ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В. П. Махний⁺, М. М. Березовский, В. М. Склярчук, А. М. Слётов⁺⁺

Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича
Украина, г. Черновцы, ул. Коцюбинского 2, 58012, 0(37) 224 42 21
[+vpmakhniy@gmail.com](mailto:vpmakhniy@gmail.com), ++O.Slyotov@chnu.edu.ua

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТЫ БАРЬЕРА КОНТАКТОВ Ni - ПОЛУПРОВОДНИК ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В. П. Махний, М. М. Березовский, В. М. Склярчук, А. М. Слётов

Аннотация. Анализируются спектры фототока структур, полученных вакуумным напылением полупрозрачных слоев Ni на химически травленные подложки ряда полупроводников (Si, GaAs, GaP, CdTe и ZnSe) n-типа проводимости. Все структуры обладают фоточувствительностью в области энергий фотонов меньше ширины запрещенной зоны полупроводника при освещении как со стороны никеля, так и со стороны подложки. Оба эти спектральные участки построенные в фаулеровских координатах приводят к одинаковым значениям высоты потенциального барьера для каждого из исследуемых контактов Ni-полупроводник.

Ключевые слова: контакт металл-полупроводник, высота барьера, фоточувствительность, метод Фаулера

ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОТИ БАР'ЄРА КОНТАКТІВ Ni - НАПІВПРОВІДНИК ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМ МЕТОДОМ

В. П. Махній, М. М. Березовський, В. М. Склярчук, О. М. Сльотов

Анотація. Аналізуються спектри фотоструму структур, отриманих вакуумним напиленням напівпрозорих шарів Ni на хімічно травлених підкладках ряду напівпровідників (Si, GaAs, GaP, CdTe та ZnSe) n-типу провідності. Всі структури володіють фоточутливістю в області енергій фотонів менших за ширину забороненої зони напівпровідника при освітленні як зі сторони нікелю, так і зі сторони підкладки. Ці обидві спектральні ділянки побудовані в фаулерівських координатах призводять до однакових значень висоти потенціального бар'єру для кожного з досліджуваних контактів Ni-напівпровідник.

Ключові слова: контакт метал-напівпровідник, висота бар'єру, фоточутливість, метод Фаулера

DETERMINATION OF BARRIER HEIGHT OF Ni-SEMICONDUCTOR CONTACTS BY PHOTOELECTRIC METHOD

V. P. Makhniy, M. M. Berezovski, V. M. Sklyarchuk, A. M. Slyotov

Abstract. The photocurrent spectra of structures obtained by vacuum deposition of semitransparent Ni layers on the chemically etched substrates of a number of semiconductors (Si, GaAs, GaP, CdTe, and ZnSe) of n-type conductivity are analyzed. All structures have photosensitivity in the region of photon energies less than the width of the semiconductor band gap under irradiation from both the nickel side and the substrate side. Both these spectral regions plotted in the Fowler coordinates lead to the same values of the potential barrier height for each of the Ni-semiconductor contacts that investigated.

Keywords: metal-semiconductor contact, barrier high, photosensitivity, Fowler's method

Без преувеличения можно считать, что в данное время трудно найти твердотельные электронные приборы различного уровня интеграции, в которых отсутствуют контакты металл-полупроводник (КМП) [1]. При этом в роли активного элемента выступают КМП с нелинейными вольтамперными характеристиками (ВАХ), одним из главных параметров которых является высота потенциального барьера ϕ_0 . Отметим, что она не только определяет механизм протекания электронных процессов в таких контактах, но и основные физико-технические параметры приборов на их основе – численные значения темновых токов, напряжение пробоя, величину фотоэдс, отношение сигнал/шум и т. п. В связи с этим, разработка

и создание полупроводниковых устройств на базе КМП требует, в первую очередь, адекватной информации о величине ϕ_0 .

Для ее нахождения используют различные методы [2], среди которых следует выделить фотоэлектрический, который считается прямым и самым точным. Его основой является фотоэмиссия электронов из металла в полупроводник, когда энергия фотонов $\hbar\omega$ больше высоты барьера, но меньше ширины запрещенной зоны E_g полупроводника. В этом случае зависимость фототока I_p от $\hbar\omega$ описывается формулой Фаулера [3]

$$I_p \sim (\hbar\omega - \phi_0)^2, \quad (1)$$

в связи с чем участок $\phi_0 < \hbar\omega < E_g$ часто называют фаулеровской областью, а способ нахождения ϕ_0 – методом Фаулера. Очевидно, что при полупрозрачном барьерном контакте, найденная этим методом высота барьера, не должна зависеть от способа освещения структуры – со стороны металла или подложки. Это связано с тем, что большинство полупроводников являются практически прозрачными для фотонов с $\hbar\omega < E_g$ [4] которые, как и в первом случае, частично поглощаясь в металле, вызывают фототок в фаулеровской области. Именно поэтому метод Фаулера широко используется для измерения ϕ_0 контактов металл-полупроводник с различными комбинациями и чередованием компонент этих структур [2, 5, 6].

Исключением из этого правила являются контакты Ni-n-GaAs, исследуемые в работах [7, 8], в которых вообще не наблюдается фаулеровская область при освещении со стороны полупрозрачного Ni. Обнаруженную особенность авторы объясняют отсутствием поглощения фотонов с энергией 0,8-1,3 эВ в слое Ni вследствие сильного зеркального отражения. Однако, этот вывод противоречит результатам исследований тех же авторов контактов Au-n-GaAs [8], поскольку известно [9, 10], что коэффициент отражения золота в указанном выше диапазоне заметно выше нежели никеля. Еще одним весомым аргументом авторы [7, 8] считают также отсутствие в известных авторитетных источниках [2,5] значений ϕ_0 для контактов Ni-n-GaAs определенных фотоэлектрическим методом.

Неоднозначность и противоречивость изложенных выше результатов вызывает необходимость проведения дополнительных исследований, отсутствующих в работах [7, 8]. Главным из них являются измерение и анализ спектров fotocувствительности и оптического пропускания T_ω в фаулеровской области структур Ni-полупроводник на основе более широкого класса материалов. Кроме того, следует использовать вариант освещения структуры со стороны подложки, который был предложен теми же авторами для измерения ϕ_0 контактов Au-n-GaAs [11] и совершенно проигнорирован ими для контактов Ni-n-GaAs.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве базовых подложек нами использовались пластины ряда полупроводников (Si, GaAs, GaP, CdTe и ZnSe,) с электронной проводимостью 10^{-2} - 10^0 Ом⁻¹ см⁻¹ при 300 К. Полупроводниковые пластинки представляли собой квадраты со стороной ~ 4 мм и толщиной 0,3 - 0,5 мм, которые после обработки в соответствующих травителях имели зеркальные поверхности. На одной из больших сторон пластин создавались вплавные омические контакты, которые обладали линейными и симметричными ВАХ. Затем на противоположную сторону подложек через молибденовую маску с отверстием диаметром ~ 3,5 мм напылялся полупрозрачный слой никеля в вакууме не хуже 10^{-4} Торр. Толщина слоя контролировалась «свидетелем» и варьировалась в пределах 15-30 нм путем изменения времени напыления.

Спектры фототока I_p и оптического пропускания T_ω структур измерялись с помощью дифракционного монохроматора типа МДР-23. Источником служила галогенная лампа мощностью 100 Вт с «гладким» спектром излучения, а приемником – германиевый фотодиод с известным спектром чувствительности. Использование специального преобразователя «ток-напряжение» позволяло измерять токи в диапазоне 10^{-12} - 10^{-3} А. Для исключения при измерениях спектров фототока и пропускания «краевых» засветок освещение структур проводилось коллимированным пучком сечением в 2-3 раза меньше диаметра Ni-контакта. Все спектры корректировались с учетом соответствующих аппаратных функций измерительной установки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Детальный анализ спектральных характеристик контактов Ni-полупроводник позволил выделить наиболее характерные особенности, которые присущи всем исследуемым структурам, рис. 1.

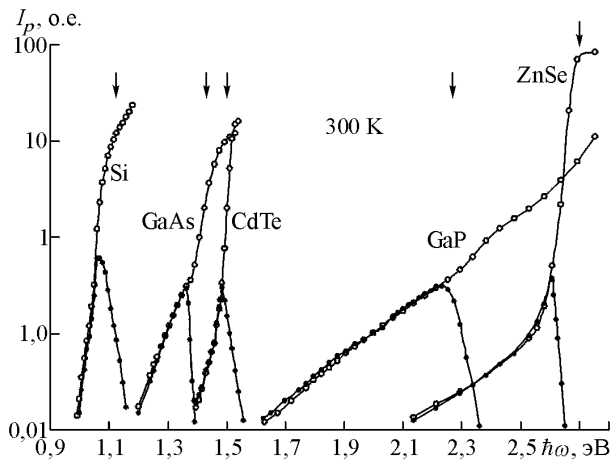


Рис. 1 Низкоэнергетические участки спектров фототока контактов Ni с различными полупроводниками. Вертикальными стрелками отмечены значения E_g используемых подложек.

В первую очередь обратим внимание на наличие фоточувствительности в диапазоне энергий фотонов меньше ширины запрещенной зоны материала подложки, т.е. фаулеровской области. Во-вторых, форма этого фаулеровского «крыла» спектральных характеристик для каждого отдельного КМП практически не зависит от того, с какой стороны освещается структура. Наблюдаемое же резкое уменьшение чувствительности в области энергий фотонов больше E_g при освещении КМП со стороны подложки обусловлено фундаментальным поглощением в последней. И наконец, отметим, что участки спектров фоточувствительности всех исследуемых образцов при $\hbar\omega < E_g$, построенные в фаулеровских координатах, аппроксимируются прямыми, отсекающими на оси энергий величины ϕ_0 . Обратим внимание на то, что значение ϕ_0 для каждого конкретного контакта Ni-полупроводник не зависит от стороны освещения выпрямляющей структуры. Хотя на рис. 2 эти зависимости приведены только для двух образцов, аналогичные результаты получены для всех исследуемых КМП, а численные значения ϕ_0 при 300 К приведены в табл. 1.

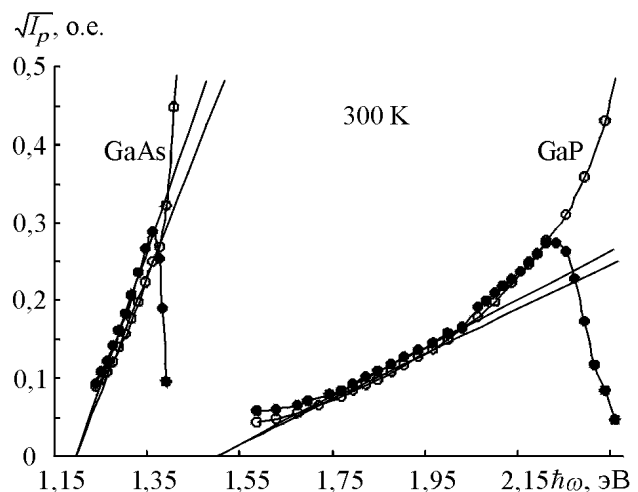


Рис. 2 Сопоставление с формулой Фаулера (1) низкоэнергетических участков спектров фототока двух КМП при освещении со стороны Ni (не заполненные кружки) и полупроводника (заполненные кружки).

Изложенное выше подтверждается также результатами исследования спектров оптического пропускания, что иллюстрируется рис. 3 на примере двух контактов Ni-полупроводник. Видно, что для них отношения T_ω^m/T_ω^s в фаулеровской области, ограниченной энергиями $\phi_0 - E_g$, являются прямыми параллельными оси абсцисс, что эквивалентно равенству $T_\omega^m/T_\omega^s = \text{const}$. Здесь T_ω^m и T_ω^s – спектры пропускания КМП, измеренные при освещении со стороны выпрямляющего контакта и полупроводниковой подложки соответственно.

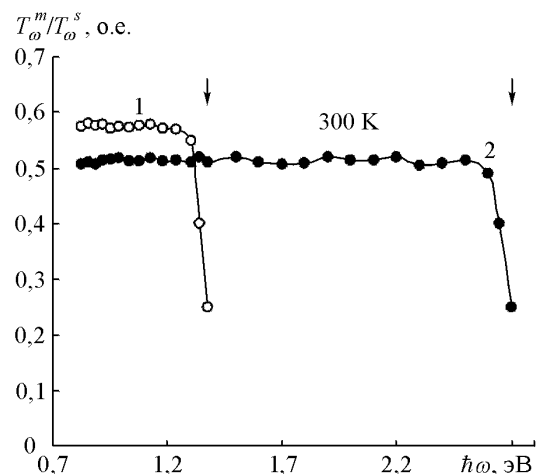


Рис. 3 Спектры относительного пропускания структур Ni-GaAs (1) и Ni-ZnSe (2) при их освещении со стороны металла T_ω^s и полупроводника T_ω^m . Вертикальными стрелками отмечены E_g подложек.

Таблица 1.

Значения величины φ_0 для всех исследуемых КМП

подложка	Si	GaAs	CdTe	GaP	ZnSe
φ_0 , eВ	0,96	1,2	1,2	1,5	1,71

В заключение обсудим влияние толщины слоя никеля на форму и абсолютное значение ординат спектров фототока исследуемых структур. Их анализ, без нарушения общности обсуждения, проведем на примере двух контактов Ni-n-GaAs, отличающихся толщиной d слоя никеля. Различие в значениях d контролировалось по величине пропускания структур при $\hbar\omega = 1$ эВ, которые в данном случае прозрачны независимо от направления освещения, рис. 3. Исследования показали, что увеличение толщины слоя никеля приводит только к уменьшению эффективности фотопреобразования без изменения формы спектра во всем исследуемом диапазоне энергий фотонов. Это иллюстрируется данными рис. 4, на котором приведен спектр фототока для одной из толщин, а также отношение спектров для отношения $d_2/d_1 = 2$ в диапазоне $\hbar\omega \approx 1,25-2,0$ эВ, которое не зависит от энергии падающего на выпрямляющий контакт излучения. Неселективность поглощения тонких слоев Ni в более широком диапазоне 0,8-2,0 эВ подтверждается также отсутствием особенностей в спектрах пропускания слоев никеля, напыленных на стеклянные пластинки в процессе изготовления барьерных контактов на подложках n-GaAs, рис. 4.

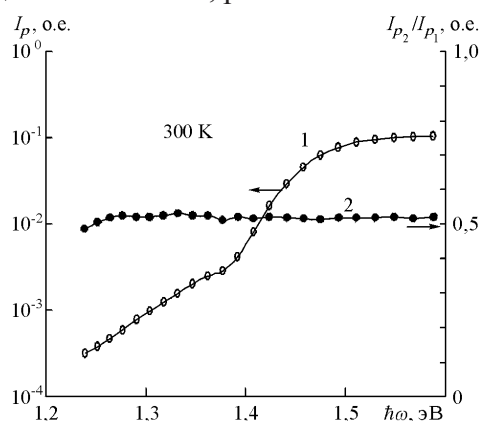


Рис. 4 Типичный спектр фототока структуры Ni-GaAs (1) при освещении со стороны металлического контакта, а также отношение спектров фоточувствительности (2) при соотношении толщин пленки никеля $d_2/d_1 = 2$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе доказана правомерность использования фотоэлектрического метода для измерения высоты барьера структур, изготовленных вакуумным напылением слоев Ni на подложки ряда полупроводников (Si, GaAs, GaP, CdTe и ZnSe,) n-типа проводимости. Экспериментально установлено, что фаулеровские участки в спектрах фоточувствительности отчетливо наблюдаются при освещении образцов как со стороны полупрозрачного барьерного контакта, так и со стороны полупроводниковой подложки. Отсутствие же этих участков в диодах на базе n-GaAs с химически осажденным никелем, по-видимому, связано с образованием некоего промежуточного слоя, который почему-то эффективно отражает кванты с энергией 0,9-1,25 эВ. Вместе с тем, решение этого вопроса выходит за рамки данной работы и требует проведения дополнительных исследований.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. К. А. Valiev, Yu. I. Pashintsev, G. V. Petrov. Application of a metal-semiconductor contact in electronics. Radio i svyaz, M. 303 p. (1980).
- [2]. S. M. Sze. Physics of Semiconductor Devices. Second Edition. John Wiley & Sons, New Jersey 868 p. (1981).
- [3]. R. H. Fowler. The analysis of photoelectric sensitivity curves for clean metals at various temperatures. // Rhys. Rev, 38 (1), pp. 45-56 (1931).
- [4]. V. I. Gavrilenko, A. M. Grekhov, D. V. Korbutyuk, V. G. Litovchenko. Optical properties of semiconductors. Directory. Naukova Dumka, Kiev. 607 p. (1987).

[5]. C. A. Mead Metal-semiconductor for surface barrier // *Solid-State Electron*, 9(11/12), pp. 1023-1033 (1966).

[6]. V. I. Strikha, E. V. Buzanova, I. P. Radzievsky. Semiconductor devices with a Schottky barrier (physics, technology, application). *Sov. Radio*, M. 248 c. (1974).

[7]. D. Melebayew, G. D. Melebayewa, Yu. V. Rud, V. Yu. Rud. Photosensitivity spectrums of Ni-n-GaAs surface-barrier structures // *TKEA*, 1, pp. 31-34 (2008).

[8]. D. Melebayew, G. D. Melebayewa, Yu. V. Rud, V. Yu. Rud. Photosensitivity of Ni-n-GaAs Schottky barrier // *FTP*, 43 (1), pp. 34-37 (2009).

[9]. J. Kay, T. Leby. Tables of physical and chemical constants. Gos. izdat. of fiz. mat. lit., M., 248 c. (1962).

[10]. K. L. Chopra, S. R. Das Thin Film Solar Cells. Plenum, New York 607 p. (1983).

[11]. D. Melebayew, G. D. Melebayewa, Yu. V. Rud, V. Yu. Rud. New possibilities of photoelectric method of determination barrier height in structures Au-n-GaAs // *TKEA*, 3, pp. 33-37 (2007).

Стаття надійшла до редакції 25.05.2018 р.

UDC 621.382.2

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2018.2.136883>

DETERMINATION OF BARRIER HEIGHT OF Ni-SEMICONDUCTOR CONTACTS BY PHOTOELECTRIC METHOD

V. P. Makhniy⁺, M. M. Berezovskiy, V. M. Sklyarchuk, A. M. Slyotov⁺⁺

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2 Kotsjubynskiy Str., Chernivtsi, 58012, Ukraine
0(37)2244221

⁺vpmakhniy@gmail.com, ⁺⁺O.Slyotov@chnu.edu.ua

Summary

The height of the potential barrier j_0 is one of the fundamental parameters of devices based on metal-semiconductor contacts, which are widely used in micro and optoelectronics. Among the known methods of finding j_0 , the photovoltaic method which is based on Fowler's phenomenological theory is considered to be direct and most accurate. A relatively simple expression relating photocurrent to barrier height fairly well describes the experimental dependences of photocurrent on photon energy within a certain spectral range. Instead, the limited number of studies in this context of the Ni-semiconductor structures, as well as the lack of photosensitivity in the Fowler region in the contacts created by the chemical precipitation of Ni on the n-GaAs substrates, led to the appearance of this work.

In this paper, the photocurrent spectra of the structures obtained by vacuum sputtering of semitransparent Ni layers on the chemically etched substrates of a number of semiconductors (Si, GaAs, GaP, CdTe and ZnSe) of n-type conductivity are analyzed. All structures have photosensitivity in the region of photon energies less than the width of the semiconductor band gap under irradiation from both the nickel side and the substrate side. These two spectral regions plotted in the Fowler coordinates lead to the same values of the potential barrier height for each of the Ni-semiconductor contacts under study.

It is established that the shape of the optical transmission spectra in the energy region of $\varphi_0 - E_g$ does not depend of the irradiation side of the rectifying structure. It has been experimentally shown that an increase in the thickness of the nickel layer from 15 to 30 nm leads to a decrease in the photocurrent value by a factor of two in the entire spectral range when the structure is irradiated from the side of the rectifying contact.

Keywords: metal-semiconductor contact, barrier height, photosensitivity and optical transmission spectra, Fowler's method

УДК 621.382.2

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2018.2.136883>

ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОТИ БАР'ЄРА КОНТАКТІВ Ni - НАПІВПРОВІДНИК ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМ МЕТОДОМ

В. П. Махній⁺, М. М. Березовський, В. М. Склярчук, О. М. Сльотов⁺⁺

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
Україна, м. Чернівці, вул. Коцюбинського 2, 58012, 0(37)2244221
⁺vpmakhniy@gmail.com, ⁺⁺O.Slyotov@chnu.edu.ua

Реферат

Висота потенціального бар'єра j_0 є одним з фундаментальних параметрів приладів на основі контактів метал-напівпровідник, які знаходять широке застосування в мікро- та оптоелектроніці. Серед відомих способів знаходження j_0 прямим і найбільш точним вважається фотоелектричний метод, що базується на феноменологічній теорії Фаулера. Відносно простий вираз, що зв'язує фотострум з висотою бар'єра, непогано описує експериментальні залежності фотоструму від енергії фотона у певному спектральному діапазоні. Натомість, обмежене число досліджень у даному контексті структур Ni-напівпровідник, а також відсутність фоточутливості у фаулерівській області в контактах, створених хімічним осадженням Ni на підкладинки n-GaAs, спричинило появу даної роботи.

У ній аналізуються спектри фотоструму структур, отриманих вакуумним напиленням напівпрозорих шарів Ni на хімічно травлених підкладинках ряду напівпровідників (Si, GaAs, GaP, CdTe та ZnSe) n-типу провідності. Всі структури володіють фоточутливістю в області енергій фотонів менших за ширину забороненої зони напівпровідника при освітленні як зі сторони нікелю, так і зі сторони підкладинки. Ці обидві спектральні ділянки, побудовані в фаулерівських координатах, приводять до однакових значень висоти потенціального бар'єру для кожного з досліджуваних контактів Ni-напівпровідник.

Встановлено, що форма спектрів оптичного пропускання в області енергій $\varphi_0 - E_g$ не залежить від сторони освітлення випрямляючої структури. Експериментально показано, що збільшення товщини шару нікелю від 15 до 30 нм призводить до зменшення величини фотоструму в два рази у всьому спектральному діапазоні при освітленні структури зі сторони випрямляючого контакту.

Ключові слова: контакт метал-напівпровідник, висота бар'єра, спектри фоточутливості та оптичного пропускання, метод Фаулера