

УДК 535.247.4:535.243

ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ НА РАБОТУ ФОТОДЕТЕКТОРОВ

Черников Н. Г., Кулышев А. М., Черникова И. Д.

INFLUENCE CONTITION OF THE SURFACE SEMICONDUCTOR TO WORK OF PHOTODETECTOR

Chernikov N. G., Kulyshv A. M., Chernikova I. D.

Известно, что время от времени установившиеся разделы науки переживают периоды скачкообразного развития, обусловленные появлением качественно новых идей, приборов и методов измерений. Наглядный пример тому – оптическая спектроскопия, которая с появлением лазерных источников света значительно преобразилась. Наряду с интенсивным развитием классических направлений возникли принципиально новые методы и приложения. Среди новых направлений особое место занимает статистический и спектральный анализ световых полей с помощью фотодетекторов – спектроскопия оптического смещения. Экспериментальные методы спектроскопии оптического смещения, в частности исследования по статистике фотоотчётов, вызвали перед экспериментаторами определенные требования к эффективности фотодетекторов. В данной работе рассматриваются методы и способы получения эффективных фотодетекторов с помощью фотоэмиссии.

Ключевые слова: фотоэмиссия, квантовый выход, распределение электронов по энергиям, спектральный анализ, работа выхода, электронное сродство, загиб зон, полупроводники, полупроводниковый фотодетектор.

Анализ последних исследований и публикаций: при большой плотности поверхностных состояний на свободной поверхности полупроводника происходит изменение энергетического спектра электронов вследствие загиба зон. Загиб зон обусловлен наличием двойного электрического слоя вблизи поверхности, который образован зарядами в поверхностных состояниях и пространственным зарядом противоположного знака, распространяющимися вглубь кристалла.

Глубина распространения двойного слоя определяется степенью легирования полупроводника. Наличие двойного слоя обуславливает увеличение или уменьшение потенциальной энергии электронов на поверхности на величину φ_0 (рис. 1)

Положение уровня Ферми в объеме зависит от степени легирования, в то время как его положение относительно края валентной зоны E_V и зоны проводимости E_C на поверхности полностью определяется плотностью поверхностных состояний. Таким образом, происходит стабилизация уровня Ферми на поверхности.

Вследствие стабилизации уровня Ферми на поверхности термоэлектронная работа выхода φ_T существенно зависит от загиба зон. Она определяется как энергия (рис. 1а), которую нужно сообщить электрону, чтобы перевести его с уровня Ферми в вакуум:

$$\varphi_m = E_{\text{вак}} - E_F = \chi + (E_C + E_F) = \chi + \zeta \quad (1)$$

Работа выхода φ_T может быть определена (рис. 1б – для полупроводника n-типа; рис. 1в – для полупроводника p-типа) фотоэмиссионным методом. Для этого необходимо произвести фотоэмиссионные измерения металла и полупроводника в одном и том же приборе и при одних и тех же вакуумных условиях.

Электронное сродство не зависит от загиба зон:

$$\chi = (E_{\text{вак}} - E_C)S \quad (2)$$

Фотоэлектронная работа выхода для возбужденных из валентной зоны у самой поверхности электронов

$$\varphi_{\text{fs}} = (E_{\text{вак}} - E_V)S \quad (3)$$

также не зависит от загиба зон. Для электронов, возбужденных из глубины полупроводника, фотоэлектронная работа выхода зависит от загиба зон и определяется как величиной загиба зон, так и глубиной выхода фотоэлектронов.

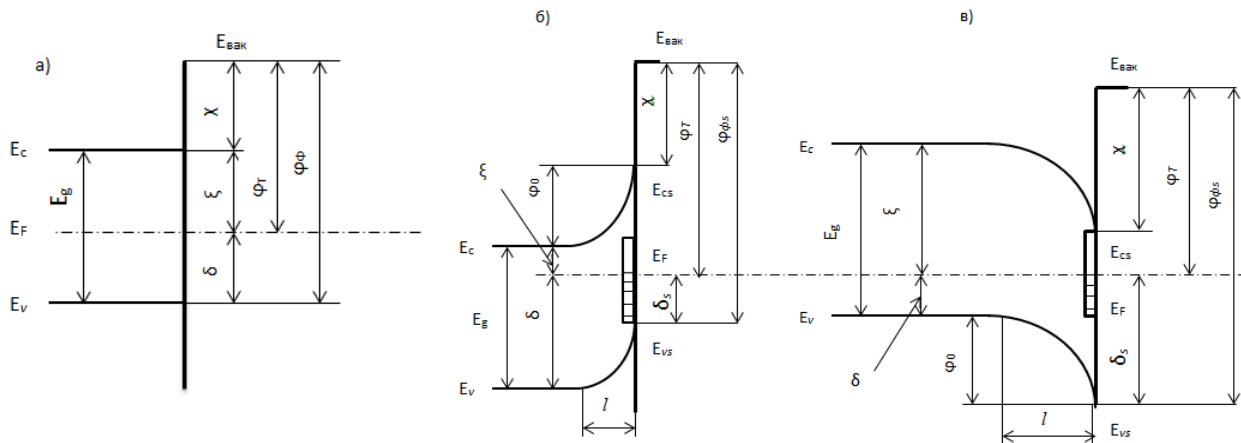


Рис. 1. Схема энергетических спектров поверхности полупроводника:
 а – собственный полупроводник с малой плотностью поверхностных состояний;
 б – электронный полупроводник; в – дырочный полупроводник;
 б и в – для случая большой плотности поверхностных состояний

Поверхностный барьер на поверхности очень сильно зависит от состояния поверхности и от того, каким способом она приготовлена. Фишером [1] был предложен метод определения загиба зон φ_0 и электронного сродства χ по анализу энергетических распределений. Им было показано, что более удобными для изучения поверхностных свойств является полупроводники n-типа проводимости. Как видно из рис. 1б для полупроводника n-типа зоны загнута вверх и электроны в поверхностных состояниях имеют большую энергию, чем электроны валентной зоны в объеме и валентной зоны на поверхности. При возбуждении монохроматическим светом с энергией $h\nu$ эмитированные электроны будут разделены на три группы с различными энергиями. Это позволяет с помощью энергетического распределения непосредственно измерять как изменения в загибе зон φ_0 так и в изменении электронного сродства $\Delta\chi$. В этом случае рассматривают два края в распределении фотоэлектронов по энергиям: низко- и высокоэнергетический (рис. 2).

Высокоэнергетический край H связан с положением зон относительно уровня Ферми, а низкоэнергетический край L работой выхода φ_T . Изменение состояния на поверхности приводит к изменению в загибе зон и работе выхода. Оба эти изменения непосредственно измеряются:

$$\Delta H = -\Delta(E_F E_{v_s}) = \Delta\varphi_0, \quad \Delta L = \Delta\varphi_T \quad (4)$$

Параметры энергетической структуры поверхности полупроводника можно определить, если известны фотоэлектронная работа выхода на поверхности $\varphi_{\phi_s} = h\nu_0$ и термоэлектронная работа выхода φ_m .

Тогда положение уровня Ферми на поверхности определяется разностью:

$$(E_F - E_v)_s = h\nu_0 - \varphi_T \quad (5)$$

а электронное сродство вычисляется по формуле:

$$\chi = (E_{vak} - E_c)_s = h\nu_0 - E_g \quad (6)$$

Так как положение уровня Ферми в объеме определим, зная концентрацию носителей тока, то имеющиеся данные позволяют рассчитать всю энергетическую диаграмму поверхности полупроводников.

И в заключение можно отметить, что некоторые сведения можно получить о плотности поверхностных состояний из вычисления полного объемного заряда. Он должен быть равен отрицательному поверхностному заряду σ , который определяется по формуле Шоттки:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\xi \theta \varphi_0 (N_D - N_A)}{2\pi}} \quad (7)$$

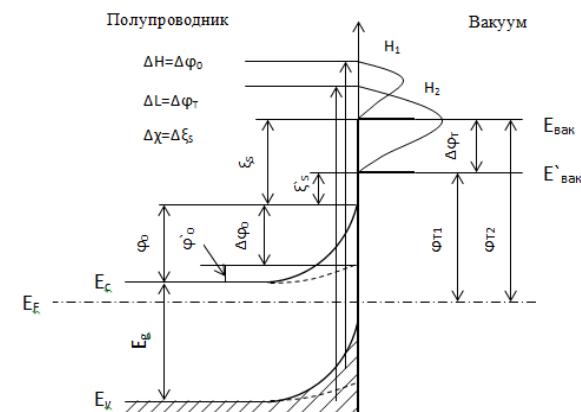


Рис. 2. Энергетический спектр поверхности полупроводника: H – высокоэнергетический край распределения фотоэлектронов; L – низкоэнергетический край распределения фотоэлектронов

где ξ – статистическая диэлектрическая постоянная, φ_0 – общий загиб зон, который равен $(E_v - E_{v_s})$, N_D –

концентрация доноров в полупроводнике, N_A – концентрация акцепторов.

Цель статьи: Исследовать влияние воздействий, как например дополнительного инфрокрасного излучения (подсветки), на фотоэмиссию из GaAs.

Постановка задачи: Исследования проводились в нанометрическом сверхвысоковакуумном фотоэлектронном спектрометре [8] на поверхности образцов GaAs n-типа, физические параметры которых представлены: – концентрации носителей тока соответственно для каждого образца: $1 \cdot 10^{16}$ (см⁻³), $1,24 \cdot 10^{17}$ (см⁻³), $1,31 \cdot 10^{18}$ (см⁻³), $1,05 \cdot 10^{19}$ (см⁻³); подвижности образцов соответственно: 4350(см²/В·сек), 4000(см²/В·сек), 3200(см²/В·сек), 2100(см²/В·сек); удельные сопротивления: $1,16 \cdot 10^2$ (Ом·см), $1,24 \cdot 10^2$ (Ом·см), $1,47 \cdot 10^3$ (Ом·см), $1,6 \cdot 10^3$ (Ом·см). Ориентация плоскостей контролировалась рентгеноструктурным методом, и отклонения от указанного направления не превышало 3^0 . У каждого из четырех (1n ÷ 4n) исследованных образцов плоскости шлифовались и химически полировались. Все исследования были проведены в одинаковых вакуумных [2] условиях ($p = 2 \cdot 10^{-9}$ Торр), полученные результаты для всех образцов можно было сравнить между собой. Измерения проводились абсолютно при одинаковых условиях для всех образцов.

Влияние подсветки на фотоэмиссию из арсенида галлия.

Подсветка осуществлялась от лампы накаливания как неразложенным светом, так и светом, прошедшим через светофильтр КС-18. Интенсивность света подсветки изменялась с помощью нейтральных светофильтров. При подсветке измерялись как спектральные распределения квантового выхода, так и энергетические распределения фотоэлектронов[3]. Как показали результаты эксперимента, при подсветке происходит увеличение квантового выхода фотоэмиссии вплоть до энергии фотонов $h\nu \leq 4,9$ эВ. При энергии фотонов $h\nu > 4,9$ эВ увеличение $Y(h\nu)$ при подсветке не наблюдалось. Эффект подсветки нагляднее проявляется не при рассмотрении спектрального распределения квантового выхода $Y(h\nu)$, а при рассмотрении

вольтамперных характеристик $I = f(V)$, где V – задерживающий потенциал на коллекторе сферического анализатора. Так как фототок насыщения $I_S \sim Y(h\nu)$ то производя измерения фототока насыщения, можно выяснить причину указанного увеличения при подсветке.

Эксперимент показал, что при подсветке увеличивается фототок насыщения I_S и наблюдается смещение вольтамперных характеристик в сторону увеличения потенциала V_K , т.е. контактная разность потенциалов между эмиттером и коллектором возрастает. Увеличение фототока насыщения

$\Delta I_S = I_{Sn} - I_S$, а также величины смещения ΔV_K зависят от энергии фотонов $h\nu$, возбуждающих фотоэмиссию. С увеличением энергии фотонов $h\nu$ значения ΔI_S и ΔV_K уменьшаются. Зависимость относительного увеличения фототока насыщения

$$\xi = \frac{\Delta I_S}{I_S} = \frac{I_{Sn} - I_S}{I_S} \text{ при подсветке от энергии}$$

фотонов $h\nu$ показана на рис. 3а. Величина относительного увеличения $\Delta I_S/I_S$ фототока насыщения с увеличением энергии фотонов уменьшается. Максимальное увеличение наблюдается при пороге фотоэмиссии $h\nu_0$. Значения относительного увеличения фототока зависело от концентрации носителей тока и было тем больше, чем меньше концентрация, достигая у образца 1n величины $\sim 75\%$.

Такое значительное изменение фототока указывает на возможность его модуляции подсветкой, что может найти практическое применение в работе фотокатодов при изучении световых полей.

Зависимость смещения вольтамперных характеристик при подсветке ΔV_K от энергии фотонов $h\nu$ для изученных образцов представлена на рис. 3б. Как видно, величина ΔV_K для образца 4n была небольшой и для определения ее значения проводились многократные повторные измерения. Но ход зависимости ΔV_K у всех образцов от энергии фотонов имел одинаковый характер.

Таблица 1

$h\nu$	4,68 эВ			4,82 эВ			4,89 эВ			4,99 эВ			5,15 эВ			5,22 эВ		
	V_K (В)	V_0 (В)	φ_ϕ (эВ)	V_K (В)	V_0 (В)	φ_ϕ (эВ)	V_K (В)	V_0 (В)	φ_ϕ (эВ)	V_K (В)	V_0 (В)	φ_ϕ (эВ)	V_K (В)	V_0 (В)	φ_ϕ (эВ)	V_K (В)	V_0 (В)	φ_ϕ (эВ)
1n	0,37	0,1	4,21	0,37	0,22	4,23	0,37	0,27	4,25	0,37	0,35	4,27	0,37	0,51	4,28	0,37	0,55	4,30
2n	0,40	0,1	4,18	0,40	0,22	4,220	0,40	0,28	4,21	0,40	0,36	4,23	0,40	0,51	4,25	0,40	0,56	4,26
3n	0,42	0,1	4,16	0,42	0,22	4,18	0,42	0,28	4,19	0,42	0,37	4,20	0,42	0,50	4,24	0,42	0,55	4,25
4n	0,45	0,1	4,13	0,45	0,22	4,15	0,45	0,27	4,17	0,45	0,36	4,18	0,45	0,50	4,21	0,45	0,56	4,22

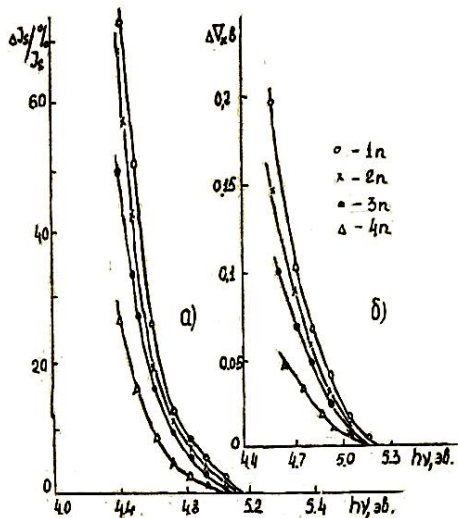


Рис. 3. а – Зависимость относительного увеличения фототока насыщения от энергии фотонов, вызывающих фотоэмиссию; б – зависимость смещения потенциала насыщения от энергии фотонов

Смещение потенциала ΔV_K обусловлено увеличением контактной разности потенциалов. Увеличение последней указывает на уменьшение термоэлектронной работы выхода ϕ_T . Изменение термоэлектронной работы выхода ϕ_T может быть вызвано либо изменением электронного сродства $\Delta\chi$ на поверхности GaAs, либо изменением загиба зон $\Delta\phi_0$ либо изменением одной величины и другой одновременно.

Для выяснения причины уменьшения термоэлектронной работы выхода ϕ_T рассмотрим энергетические распределения фотоэлектронов $N(E)$ при подсветке и без нее (рис. 4). Видно, что при подсветке смещаются как высокоэнергетические края распределения H' , так и низкоэнергетические края L' и величины смещения одинаковы, т.е.

$\Delta H' = \Delta L'$ и составляет 0,1эВ. Как отмечено выше (рис. 2), величина ΔH соответствует изменению загиба зон $\Delta\phi_0$, а величина ΔL – изменению термоэлектронной работы выхода $\Delta\phi_T$. Таким образом, в нашем случае изменение работы выхода обусловлено только изменением загиба зон. Значит, при воздействии подсветки на фотоэмиссию из полупроводников происходит изменение термоэлектронной работы выхода только вследствие изменения загиба зон.

Изменение загиба зон не вызывает изменения фотоэлектронной работы выхода ϕ_ϕ для электронов, возбуждаемых у самой поверхности (рис. 2), но уменьшает ее для фотоэлектронов, возбуждаемых в объеме. Максимальное уменьшение ϕ_ϕ будет для электронов возбуждаемых на глубине, сравнимой с областью изменения загиба зон.

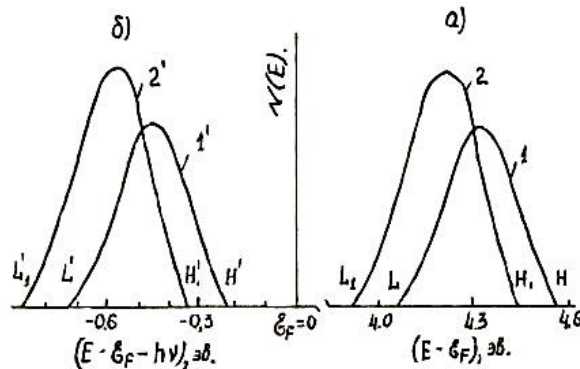


Рис. 4. Энергетические распределения фотоэлектронов для образца 1n при $h\nu = 4,68\text{эВ}$; а – распределения фотоэлектронов, вышедших в вакуум; б – смещенные энергетические распределения на величину энергии фотона $h\nu$. Кривые : 1. – измеренные без подсветки; 2. – с подсветкой

Объемный характер фотоэмиссии объясняет наблюдаемую при подсветке зависимость увеличения фототока насыщения I_S и смещения потенциала задержки фотоэлектронов V_K от энергии $h\nu$ возбуждающих фотоэмиссию фотонов. Эти зависимости обусловлены коэффициентом оптического поглощения, который увеличивается с увеличением энергии фонов [10]. Чем больше коэффициент оптического поглощения α , тем меньше глубина l , с которой происходит возбуждение фотоэлектронов ($l \sim 1/\alpha$), и тем меньше увеличение фототока насыщения при подсветке.

Выводы: В данной работе мы выяснили, что при воздействии подсветки на фотоэмиссию из GaAs – происходит увеличение квантового выхода вплоть до энергии фотонов $h\nu \leq 4,9\text{эВ}$. Экспериментально увидели, что при подсветке увеличится фототок насыщения и наблюдается смещение вольтамперных характеристик в сторону увеличения потенциала. Так же мы выяснили что при воздействии подсветки на фотоэмиссию из полупроводников происходит изменение термоэлектронной работы выхода только вследствие изменения загиба зон.

Л и т е р а т у р а

1. Т. Е. Fischer Determination of Semiconductor Surface properties by means of photoelectric emission // Fischer T. E. / North-Holland Publishing Co., Emgsterdam, Surface Science, 1989,13 – P. 30 – 51.
2. Волошин М. А., Удовиченко С. О., Черникова И. Д. и др. Сверхвысоковакуумный фотоэлектронный спектрометр для исследования поверхности твердых тел //М. А. Волошин, С. О. Удовиченко, И. Д. Черникова, Н. Г. Черников/ Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації, 2011 – №2 (24). С.14-19.
3. Бова А. Р., Волошин М. А., Латыш О. Б. и др. Влияние структурных изменений на поверхности на энергетический спектр электронов в арсениде галлия //А. Р. Бова, М. А. Волошин, О. Б. Латыш, И. Д. Черникова, Н.

Г. Черников/ Вісник СХУ ім. В. Даля. 2010. – №12 (154), ч.2. – с. 10-15.

References

1. T. E. Fischer Determination of Semiconductor Surface properties by means of photoelectric emission // Fischer T. E. / North-Holland Publishing Co., Emgsterdam, Surface Science, 1989,13 – P. 30 – 51
2. Voloshin M. A., Udovichenko S. O., Chernikova I. D. i dr. Sverhvyisokovakuumnyiye fotoelektronnyiye spektrometr dlya issledovaniya poverhnosti tverdykh tel //M. A. Voloshin, S. O. Udovichenko, I. D. Chernikova, N. G. Chernikov/ Pratsi Luganskogo viddilennya Mizhnarodnoyi Akademiyi Informatizatsiyi, 2011
3. Bova A. R., Voloshin M. A., Latyish O. B. i dr. Vliyanie strukturnykh izmeneniy na poverhnosti na energeticheskiy spektr elektronov v arsenide galliya //A. R. Bova, M. A. Voloshin, O. B. Latyish, I. D. Chernikova, N. G. Chernikov/ VIsnik SNU Im. V. Dalya. 2010.

Кулишев О. М. Чернікова І. Д. Черніков М. Г. Вплив підсвічування на фотоemisію з GaAs

Відомо, що час від часу встановилися розділи науки переживають періоди стрибкоподібного розвитку, обумовлені появою якісно нових ідей, приладів і методів вимірювань. Прикладом тому є - оптична спектроскопія, яка з появою лазерних джерел світла значно змінилася. Поряд з інтенсивним розвитком класичних напрямків виникли принципово нові методи та програми. Серед нових напрямків особливе місце займає статистичний і спектральний аналіз світлових полів за допомогою фотодетекторів - спектроскопія оптичного зміщення. Експериментальні методи спектроскопії оптичного зміщення, зокрема дослідження за статистикою фотозвітів, викликали перед експериментаторами певні вимоги до ефективності фотодетекторів. У даній роботі розглядаються методи і способи отримання ефективних фотодетекторів.

Ключові слова: фотоemisія, квантовий вихід, розподіл електронів по енергіях, спектральний аналіз,

робота виходу, електронне спорідненість, загин зон, напівпровідники, напівпровідниковий фотодетектор.

Kulyshov A. M. Chernikova I. D. Chernikov N. G. Influence of illumination on photoemission of GaAs

We know that from time to time established branches of science are experiencing periods of abrupt, caused the emergence of a qualitatively new ideas, devices and measurement methods. An illustrative example of this - optical spectroscopy, which with the advent of the world changed dramatically laser sources. Along with the intensive development of the classic areas of any fundamentally new methods and applications. Among the new areas occupies a special place statistical and spectral analysis of the light fields with the help of photodetectors - optical mixing spectroscopy. Experimental methods of optical mixing spectroscopy, in particular studies on photostatistics, experimenters have caused to specific requirements for the efficiency of photodetectors. This paper discusses the methods and processes for the preparation of efficient photodetectors.

Keywords: photoemission quantum yield, the electron energy distribution, spectral analysis, the work function, electron affinity, bend zones, semiconductors, semiconductor photodetector.

Черніков М. Г., кандидат фіз.-мат наук, доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки СХУ ім. В. Даля.

Кулишев О. М., студент групи ММ-451м кафедри машинобудування та прикладної механіки СХУ ім. В. Даля.

Чернікова І. Д., старший викладач кафедри машинобудування та прикладної механіки СХУ ім. В. Даля.

Рецензент: д.т.н., професор **Суворін О.В.**

Стаття подана 27.10.2016