

# ВЛИЯНИЕ ОТРАЖЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРОНОВ ОТ ПОВЕРХНОСТИ НА ФОТОЭДС В ТОНКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНКАХ И СРАВНЕНИЕ ЕЕ С ОБЪЕМНОЙ ФОТОЭДС

*Г. Гулямов<sup>1</sup>, М.Г. Дадамирзаев<sup>1</sup>, Н.Ю. Шарипбаев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Наманганский инженерно-педагогический институт  
Республика Узбекистан, 160103, Наманган, пр. Дустлик, д. 12  
Тел.: (8-369) 234-15-23, факс: (8-3692) 25-52-93, e-mail: gulyamov1949@mail.ru

<sup>2</sup>Наманганский инженерно-технологический институт  
Республика Узбекистан, 160115, Наманган, ул. Касансай, д. 7  
Тел.: +998-69-232-53-27, факс: +998-69-225-05-42, e-mail: sharibayevniti@mail.ru

Заключение совета рецензентов: 01.11.15 Заключение совета экспертов: 05.11.15 Принято к публикации: 09.11.15

Исследовано влияние отражения фотоэлектронов от поверхности на фотоЭДС в тонких полупроводниковых пленках и проведено ее сравнение с объемной фотоЭДС. Показано, что отраженная фотоЭДС может преобладать над объемной электродвижущей силой только в образцах с большой длиной свободного пробега при сильном поглощении света. В тонких пленках отраженная фотоЭДС, по-видимому, наблюдается вместе с другими видами фотоЭДС и при интерпретации результатов эксперимента может быть истолкована как объемная электродвижущая сила.

Ключевые слова: фототок, тонкие пленки, длина свободного пробега, фотонапряжения, реактивные токи, фотоЭДС, косонапыленные пленки, ЭДС Дембера, интенсивность света, коэффициент поглощения света.

## INFLUENCE OF REFLECTION OF PHOTOELECTRONS FROM THE SURFACE PHOTO-EMF IN THIN SEMICONDUCTOR FILMS AND COMPARE IT WITH THE BULK PHOTO-EMF

*G. Gulyams<sup>1</sup>, M.G. Dadamirzayev<sup>1</sup>, N.Yu. Sharibaev<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Namangan Engineering-Pedagogical Institute  
12 Dustlik ave., Namangan, 160103, Republic of Uzbekistan  
Tel.: (8-3692) 34-15-23, fax: (8-3692) 25-52-93, e-mail: gulyamov1949@mail.ru

<sup>2</sup>Namangan Engineering-Technological Institute  
7 Kasanay str., Namangan, 160115, Republic of Uzbekistan  
Tel.: +998-69-232-53-27, fax: +998-69-225-05-42, e-mail: sharibayevniti@mail.ru

Referred: 01.11.15 Expertise: 05.11.15 Accepted: 09.11.15

The influence of the reflection of photoelectrons from the surface photo-EMF in thin semiconductor films and compare it with the bulk photo-EMF. It is shown that the reflected photovoltage can prevail over the bulk of the electromotive force only in samples with a large mean free path with a strong absorption of light. In thin films reflected the photo-EMF, apparently observed with other types of photo-EMF and the interpretation of the experimental results can be interpreted as the volume electromotive force.

Keywords: photocurrent, thin films, the mean free path, the voltage, reactive currents, the photo-EMF, oblique sputtered film, the EMF Dember, the intensity of light, the light absorption coefficient.



*Гафур Гулямов  
Gafur Gulyamov*

**Сведения об авторе:** д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры «Физика» Наманганского инженерно-педагогического института, руководитель гос. гранта Ф2-21 «Математическое моделирование определения плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник-диэлектрик».

**Образование:** Ташкентский гос. университет (1971).

**Область научных интересов:** физика полупроводников и полупроводниковых приборов.

**Публикации:** более 200.

**Information about the author:** doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of "Physics" Namangan Engineering Pedagogical Institute. Head of state grant Ф2-21 "Mathematical modeling of the determination of the density of surface states at the semiconductor-insulator".

**Education:** Tashkent State University (1971).

**Research area:** physics of semiconductors and semiconductor devices.

**Publications:** more than 200.



Мухаммаджон  
Гуломкодирович  
Дадамирзаев  
Muhammadjon G.  
Dadamirzaev

**Сведения об авторе:** канд. физ.-мат. наук, доцент, зав. кафедрой «Физика» Наманганского инженерно-педагогического института. Старший научный сотрудник гос. гранта Ф2-21 «Математическое моделирование определения плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник-диэлектрик».

**Образование:** Ташкентский гос. университет (1993).

**Область научных интересов:** физика полупроводников и полупроводниковых приборов.

**Публикации:** более 70.

**Information about the author:** Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department "Physics" Namangan Engineering Pedagogical Institute, Senior Researcher of the state grant Ф2-21 "Mathematical modeling of the determination of the density of surface states at the semiconductor-insulator".

**Education:** Tashkent State University (1993).

**Research area:** physics of semiconductors and semiconductor devices.

**Publications:** more than 70.



Носир Юсупжанович  
Шарипбаев  
Nosir Yu. Sharibayev

**Сведения об авторе:** канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Высшая математика» Наманганского инженерно-технологического института. Старший научный сотрудник гос. гранта Ф2-21 «Математическое моделирование определения плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник-диэлектрик».

**Образование:** Московский гос. университет (1993).

**Область научных интересов:** физика полупроводников и полупроводниковых приборов.

**Публикации:** более 50.

**Information about the author:** Ph.D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of "Higher Mathematics" Namangan Engineering-Technological Institute. Senior Researcher of the state grant Ф2-21 "Mathematical modeling of the determination of the density of surface states at the semiconductor-insulator".

**Education:** Moscow State University (1993).

**Research area:** physics of semiconductors and semiconductor devices.

**Publications:** more than 50.

## Введение

В настоящее время вопросы исследования фотоэлектрических свойств полупроводниковых пленок привлекают все больше внимания специалистов. Пленки, обладающие эффектом аномального фотонапряжения (АФН), представляют теоретический и практический интерес при создании первичных преобразователей – приемников оптического излучения (ПОИ).

Существующие приемники оптического излучения и устройства на их основе требуют обязательного применения источников питания. В них выходное напряжение, создаваемое  $p$ - $n$ -переходом в вентильном режиме, заведомо ограничено шириной запрещенной зоны полупроводника. Одним из перспективных оптических методов неразрушающего контроля является оптоэлектронный способ на основе излучателя и АФН-приемника, который позволяет исключить внешний источник питания для ПОИ, снизить вес и габариты, обеспечивает полную электрическую развязку между цепями «светоизлучающий диод – ПОИ».

К настоящему моменту в области АФН-эффекта накоплен значительный теоретический и экспериментальный материал, позволяющий утверждать, что АФН-эффект может быть получен при нанесении пленок из любых полупроводниковых материалов. Несмотря на это, не найден единый механизм, который раскрывает физическую природу этого явления [1].

В косонапыленных полупроводниковых пленках при освещении светом наблюдаются фотонапряжения больше ширины запрещенной зоны полупроводника, в единицах напряжения. Такие напряжения называются аномально большими фотонапряжениями (АФН-эффект). Для объяснения этого эффекта часто пользуются различными моделями [2-4]. Как известно по работам [5-7], баллистические и реактивные фототоки могут существенно влиять на фотоЭДС, генерируемую в тонких пленках.

Целью настоящей работы является исследование и сопоставление отраженной фотоЭДС от плоской поверхности, а также от поверхности с косым зубчатым микрорельефом и объемной фотоЭДС, генерируемой в тонких полупроводниковых пленках.



**Теоретические исследование и сопоставление отраженной фотоЭДС от плоской поверхности и объемной фотоЭДС в тонких полупроводниковых пленках**

Оценим величину ЭДС, обусловленной носителями, отраженными от плоской поверхности. ЭДС, генерируемая в образце, определяется выражением

$$U_r = \frac{g(I)(\vartheta_e \tau_e \ell_e - \vartheta_h \tau_h \ell_h)}{\sigma} = \frac{g(I)(\ell_e^2 - \ell_h^2)}{\sigma} = \frac{g(I)(\ell_e - \ell_h)(\ell_e + \ell_h)}{\sigma}, \quad (1)$$

где  $g(I) = \alpha I e$ ;  $\ell_e$  и  $\ell_h$  – длины свободного пробега;  $\tau_e, \tau_h$  – время свободного пробега;  $\vartheta_e, \vartheta_h$  – скорости возбуждаемых светом, соответственно, электронов и дырок;  $\sigma$  – проводимость образца;  $\alpha$  – коэффициент поглощения света;  $I$  – число фотонов, поглощаемых пленкой в единице площади за одну секунду;  $e$  – заряд электрона.

Отсюда видно, что баллистическая фотоЭДС прямо пропорциональна интенсивности света и определяется скоростью фотоэлектронов, временем и длиной свободного пробега возбуждаемых носителей. Обычно электродвижущая сила отраженных носителей складывается из объемной и поверхностной фотоЭДС. В работах [8, 9] ЭДС отраженных носителей сравнивается с ЭДС Дембера и показано, что при  $\alpha \ell^2 > L$  реактивная ЭДС больше ЭДС Дембера. Поэтому для выявления относительной роли ЭДС отраженных носителей в измеряемой ЭДС необходимо еще сравнить ее с объемной фотоЭДС.

Для расчета ЭДС рассмотрим полупроводник  $n$ -типа и будем предполагать, что концентрация избыточных носителей  $\delta n$  и  $\delta p$  зависит только от одной координаты; генерация электронно-дырочных пар происходит в тонком слое шириной  $2a$ , приблизительно равной ширине световой щели, причем  $2a \ll$  длины диффузии  $L$ ; концентрация избыточных носителей в этом слое постоянно; освещение не очень сильное. Тогда объемная фотоЭДС имеет следующий вид [10]:

$$U_V = \frac{e}{S} I L_p^2 \frac{d\rho}{dx}, \quad (2)$$

где  $S$  – сечение образца,  $d\rho/dx$  – градиент темнового сопротивления в месте нахождения световой щели.

Оценим отношение отраженной от плоской поверхности фотоЭДС к объемной электродвижущей силе  $U_r/U_V$ . Для оценки положим, что

$$U_r = \frac{\alpha e \ell_e^2}{\sigma}. \quad (3)$$

Тогда, учитывая (2), для соотношения отраженного напряжения к объемной электродвижущей силе получим

$$\frac{U_r}{U_V} = \frac{\alpha \ell_e^2 S}{L_p^2 \rho^{-1} (d\rho_0/dx)} = \chi \frac{\ell_e^2}{L_p^2}, \quad (4)$$

где

$$\chi = \frac{\alpha S}{\rho^{-1} (d\rho/dx)}. \quad (5)$$

Если  $\chi \ell_e^2 > L_p^2$ , то отраженная ЭДС больше объемной электродвижущей силы. Тогда длина свободного пробега должна быть  $\ell_e > L_p / \sqrt{\chi}$ . Таким образом, следует ожидать, что отраженная фотоЭДС может преобладать над объемной электродвижущей силой только в образцах с большой длиной свободного пробега при сильном поглощении света. В тонких пленках отраженная фотоЭДС, по-видимому, наблюдается вместе с другими видами фотоЭДС и при интерпретации результатов эксперимента может быть истолкована как объемная электродвижущая сила.

**Теоретические исследования и сопоставление реактивной фотоЭДС, отраженной от поверхности с косым зубчатым микрорельефом, и объемной фотоЭДС в тонких полупроводниковых пленках**

Вычислим величину напряжения поперечной реактивной фотоЭДС, отраженной от поверхности с косым зубчатым микрорельефом. Тогда для напряжения холостого хода имеем [8]:

$$U \cong g(I) \ell_e^2 \rho_0 \frac{a}{d}, \quad (6)$$

где  $d$  – толщина образца;  $a$  – длина образца;  $\alpha$  – коэффициент поглощения света;  $\rho_0$  – удельное сопротивление образца.

Отсюда следует, что реактивная фотоЭДС фотоэлектронов в основном зависит от квадрата длины свободного пробега. В низкоомных и толстых образцах ЭДС шунтируется проводимостью слоя и поэтому большие фотонапряжения могут не наблюдаться, а в тонких (порядка длины свободного пробега) и высокоомных ( $\rho_0 \geq 10$  Ом·м) пленках она принимает достаточно большие значения и наряду с существующими механизмами может объяснить аномально большие значения фотоЭДС.

Теперь рассмотрим отношение реактивной фотоЭДС, которая возникает за счет отраженных фотоэлектронов от поверхности с косым зубчатым микрорельефом, к объемной электродвижущей силе  $U_r/U_{Vзуб}$ .

Учитывая (6) и (2), для соотношения реактивного напряжения к объемной электродвижущей силе получим:



$$\frac{U_r}{U_{\text{взб}}} = \frac{\alpha S a \ell_e^2}{\rho^{-1} (d\rho/dx) d L_p^2} = \chi \frac{a}{d} \frac{\ell_e^2}{L_p^2} = \chi \eta \frac{\ell_e^2}{L_p^2}, \quad (7)$$

где  $\eta = a/d$ .

В этом случае, если  $\chi \eta \ell_e^2 > L_p^2$ , то реактивная ЭДС больше объемной электродвижущей силы. Тогда длина свободного пробега должна быть  $\ell_e > L_p / \sqrt{\chi \eta}$  и следует ожидать, что реактивная фотоЭДС может преобладать над объемной электродвижущей силой только в образцах с большой длиной свободного пробега.

### Закключение

Из проведенного анализа видно, что для преобладания фотоЭДС над объемной в случае плоских поверхностей длина свободного пробега должна быть  $\ell_e > L_p / \sqrt{\chi}$ . А в случае поверхности с косым зубчатым микрорельефом длина свободного пробега должна быть  $\ell_e > L_p / \sqrt{\chi \eta}$ . Показано, что в приповерхностном слое в тонких полупроводниковых пленках реактивная фотоЭДС сильно зависит от длины свободного пробега, а также от интенсивности света, степени диффузии, размера и удельного сопротивления образцов.

### Список литературы

1. Рахимов Н.Р., Серьезнов А.Н. АФН пленки и их применение. Монография. Новосибирск: Изд-во «Новосибирск», 2005.
2. Као К., Хуанг В. Перенос электронов в твердых телах. В 2-х т. М.: Мир, 1984.
3. Адирович Э.И., Рубинов В.И., Юабов Ю.М. О природе АФН эффекта // ДАН СССР. 1966. Т. 168. С. 1037.
4. Безногов М.В., Сурис Р.А. Теория баллистических токов, ограниченных объемным зарядом, в наноструктурах разной размерности // Физика и техника полупроводников (Санкт Петербург). 2013. Т. 47, № 4. С. 493-502.
5. Саченко А.В., Снитко О.В. Фотоэффекты в приповерхностных слоях полупроводников. Киев: Наукова думка, 1984.
6. Белиничер В.И., Рывкин С.М. Реактивная фотоэлектродвижущая сила в полупроводниках // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1981. № 10. С. 353-360.
7. Ивченко Е.Л., Пикус Г.Е. Фотогальванические эффекты в полупроводниках // Сб. статей: Проблемы современной физики. Л.: Наука, 1980. С. 275-293.
8. Гулямов Г., Бойдедаев С.Р., Дадамирзаев М.Г., Гулямов А. Аномально большие фотонапряжения в полупроводниковых пленках, обусловленные реактивной фотоЭДС // Альтернативная энергетика и экология – ISJAEЕ. 2007. № 5(49). С. 103-107.
9. Гулямов Г., Дадамирзаев М.Г., Гулямов А. Реактив ЭЮК ни Дембер ЭЮК билан солиштириш // Рост, свойства и применение кристаллов: Тез. докл. респ. науч. конф. 11-12 апреля 2008. Андижан, 2008. С. 138.
10. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1977.

### References

1. Rahimov N.R., Ser'eznov A.N. AFN plenki i ih primeneniye. Monografiya. Novosibirsk: Izd-vo «Novosibirsk», 2005.
2. Kao K., Huang V. Perenos elektronov v tverdyh telah. V 2-h t. M.: Mir, 1984.
3. Adirovič È.I., Rubinov V.I., Ūabov Ū.M. O prirode AFN èffekta // DAN SSSR. 1966. T. 168. S. 1037.
4. Beznogov M.V., Suris R.A. Teoriya ballističeskikh tokov, ograničennyh ob'emnym zarâdom, v nanostrukturah raznoj razmernosti // Fizika i tehnika poluprovodnikov (Sankt Peterburg). 2013. T. 47, № 4. S. 493-502.
5. Sačenko A.V., Snitko O.V. Fotoèffekty v pripoverhnostnyh sloâh poluprovodnikov. Kiev: Naukova dumka, 1984.
6. Beliničer V.I., Ryvkin S.M. Reaktivnaâ fotoèlektrodvižušaâ sila v poluprovodnikah // Žurnal èksperimental'noj i teoretičeskoj fiziki. 1981. № 10. S. 353-360.
7. Ivčenko E.L., Pikus G.E. Fotogal'vaničeskie èffekty v poluprovodnikah // Sb. statej: Problemy sovremennoj fiziki. L.: Nauka, 1980. S. 275-293.
8. Gulâmov G., Bojdedaev S.R., Dadamirzaev M.G., Gulâmov A. Anomal'no bol'sie fotonaprâženiâ v poluprovodnikovyh plenkah, obuslovlennye reaktivnoj fotoÈDS // Al'ternativnaâ ènergetika i èkologiâ – ISJAEЕ. 2007. № 5(49). S. 103-107.
9. Gulâmov G., Dadamirzaev M.G., Gulâmov A. Reaktiv ÈÛK ni Dember ÈÛK bilan solištiriš // Rost, svojstva i primeneniye kristallov: Tez. dokl. resp. nauč. konf. 11-12 aprilâ 2008. Andižan, 2008. S. 138.
10. Bonč-Bruevič V.L., Kalašnikov S.G. Fizika poluprovodnikov. M.: Nauka, 1977.

Транслитерация по ISO 9:1995

