

УДК 620.91

**ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА  
ЗАВИСИМОСТИ ЭФФЕКТИВНОСТИ КРЕМНИЕВЫХ  
ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ОТ ДЛИНЫ ВОЛНЫ  
МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ****Харченко Валерий Владимирович**

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник  
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва

**Никитин Борис Андреевич**

кандидат технических наук

**Панченко Владимир Анатольевич**

кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник  
Российский университет транспорта МИИТ, Москва,  
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва

**Тихонов Павел Валентинович**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник  
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва

**Аннотация**

В работе представлены положения для оценки коэффициента полезного действия фотоэлектрического преобразователя. Проведено экспериментальное определение эффективности фотоэлектрического преобразователя. Также в статье проведено сравнение теоретической и экспериментальной зависимостей эффективности кремниевого фотоэлектрического преобразователя от длины волны монохроматического излучения. Полученное предельное теоретическое значение коэффициента полезного действия кремниевого фотоэлектрического преобразователя хорошо согласуется с ранее полученными результатами.

**Ключевые слова:** солнечная энергетика, эффективность, фотоэлектрические преобразователи, спектральная плотность, длина волны.

**THEORETICAL AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE  
DEPENDENCE OF EFFICIENCY OF SILICON PHOTOCONVERTERS ON THE  
WAVE LENGTH OF MONOCHROMATIC RADIATION**

**Valeriy V. Kharchenko**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher  
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow

**Boris A. Nikitin**

Candidate of Technical Sciences

**Vladimir A. Panchenko**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher  
Russian University of Transport, Moscow,  
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow

**Pavel V. Tikhonov**

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher  
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow

---

**ABSTRACT**

---

The paper describes the determination of the efficiency of a photoelectric converter for different wavelengths of the spectrum. The experimental data of monochromatic irradiation of a silicon photoelectric converter are presented. The article also presents the theoretical and experimental dependences of the efficiency of a silicon photoelectric converter on the wavelength of monochromatic radiation. The proposed method will be useful in cases of doubt regarding the results of measurements on conventional measuring systems.

---

**Keywords:** solar energy, efficiency, photoelectric converters, spectral density, wavelength.

---

**Введение**

Предельный теоретический коэффициент полезного действия (КПД) кремниевых планарных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) при стандартном уровне солнечного излучения составляет величину 23 % [1]. В работе [2] этот параметр оценен в 26 %. Спектр и условия стандартного солнечного излучения АМ 1,5 (1000 Вт/м<sup>2</sup>) директивно установлены МЭК [3].

Световой поток стандартного солнечного излучения представляет собой совокупность монохроматических фотонных потоков различных длин волн, доленое присутствие которых отражено в спектрограмме АМ 1,5. Интегральное значение мощности светового потока солнечного излучения АМ 1,5 от 0,3 мкм до бесконечности длин волн составляет 1000 Вт/м<sup>2</sup>, в то время как на фотоактивную часть спектра для кремниевых фотопреобразователей приходится всего 802,3 Вт/м<sup>2</sup> [3].

Следует отметить, что эффективность различных участков фотоактивной части солнечного спектра для полупроводникового преобразователя не одинакова. Она минимальна в коротковолновой части спектра и должна возрастать с увеличением длины волны до границы поглощения полупроводника. В связи с вышеизложенным представляется актуальным количественно оценить эффективность работы фотопреобразователя для конкретной длины волны фотоактивной части солнечного спектра [4, 5].

## Оценка коэффициента полезного действия фотоэлектрического преобразователя

Теоретическая оценка зависимости КПД фотопреобразователя от длины волны монохроматического излучения проведена при условии равенства токовых (короткого замыкания) фотооткликов преобразователя, освещённого световым потоком  $\lambda_i$  и при освещении стандартным солнечным излучением АМ 1,5:

$$i_{KЗ \lambda_i} = i_{KЗ АМ1,5} \quad (1)$$

КПД фотопреобразователя согласно определению находится как отношение его максимальной плотности (согласно снятой вольтамперной характеристики) к мощности падающего на него светового потока:

$$КПД = \frac{P_{\max}}{P_{\lambda_i}} = \frac{i_{KЗ \lambda_i} \cdot U_{XX} \cdot FF}{P_{\lambda_i}}, \quad (2)$$

где:  $i_{KЗ \lambda_i}$  – плотность тока короткого замыкания;

$U_{XX}$  – напряжение холостого хода ФЭП;

$FF$  – фил-фактор ВАХ;

$P_{\lambda_i}$  – удельная мощность светового потока с длиной волны  $\lambda_i$ .

На основании работ [1, 6] можно сделать вывод, что в теоретическом плане при низких уровнях освещённости фотопреобразователей, к которым следует отнести и уровень освещённости стандартным солнечным излучением АМ 1,5, произведение напряжения холостого хода  $U_{XX}$  на Фил-Фактор ( $FF$ ) есть величина постоянная. Эта величина определяет разность потенциалов  $U_{XX0}$  на  $p-n$  переходе ФЭП при нулевом уровне освещённости. Эта разность эмпирически определяется температурой перехода и шириной запрещенной зоны полупроводника.

$$U_{XX0} = U_{XX} \cdot FF = \frac{E_g}{2q} \left( 1 - \frac{1,5kT}{E_g} \right), \quad (3)$$

где:  $E_g$  – ширина запрещённой зоны полупроводника;

$q$  – заряд электрона;

$T$  – температура преобразователя;

$k$  – постоянная Больцмана.

Выражение 2 приобретает вид:

$$КПД = \frac{i_{KЗ \lambda_i} \cdot U_{XX0}}{P_{\lambda_i}}. \quad (4)$$

Мощность падающего на ФЭП светового потока можно представить в виде энергии одного фотона заданной длины волны умноженной на удельную плотность фотонного потока:

$$P_{\lambda_i} = \frac{n \cdot h \cdot c}{\lambda_i}, \quad (5)$$

где:  $n$  – удельная плотность фотонного потока;

$h$  – постоянная Планка;

$c$  – скорость света.

Поскольку при фотоэффекте один фотон генерирует лишь одну электронно-дырочную пару в полупроводнике, то при полном собрании  $p-n$  переходом генерированных зарядов получим:

$$i_{КЭ\lambda_i} = n \cdot q. \quad (6)$$

После подстановки этого выражения в выражение 4 получим:

$$КПД_{\lambda_i} = \frac{U_{ХХ0} \cdot q}{h \cdot c} \cdot \lambda_i. \quad (7)$$

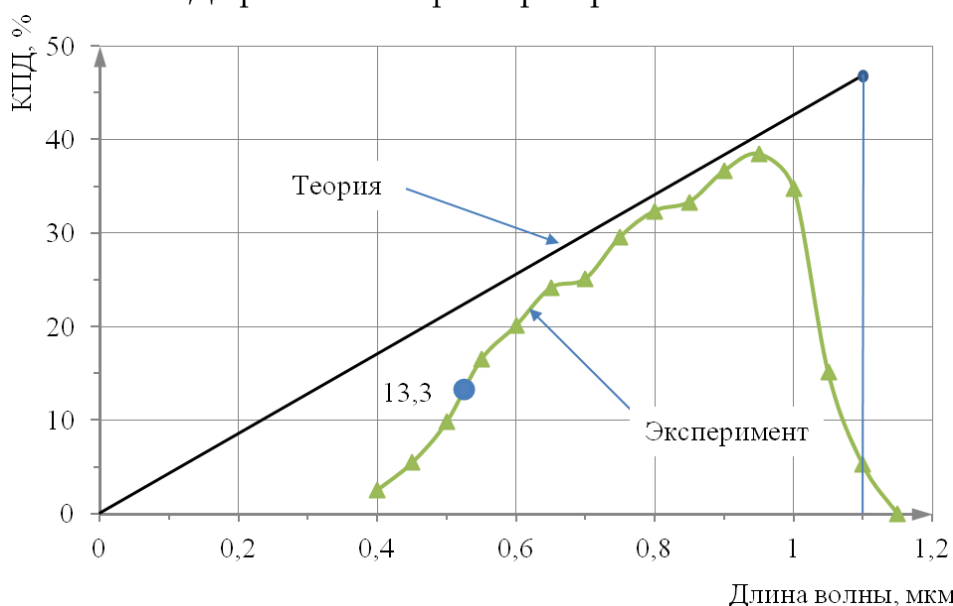
Из анализа выражения 7 следует, что в теоретическом плане КПД фотопреобразователя при монохроматическом освещении линейно зависит от длины волны, поскольку все остальные коэффициенты есть константы.

### Экспериментальное определение эффективности фотоэлектрического преобразователя

В экспериментальном плане поставленная задача решается посредством использования комплекта узкополосных светофильтров и эталонного кремниевого ФЭП, таррированного в условиях освещенности стандартного солнечного излучения АМ 1,5 в виде токовых (короткого замыкания) фотооткликов на длинах волн фотоактивной части спектра, равномерно распределённых с шагом 50 нм.

Это обстоятельство позволяет экспериментально определить мощности световых потоков заданных светофильтрами несущих длин волн и шириной полос пропускания для используемого лабораторного источника света. Измерив токи короткого замыкания исследуемого фотопреобразователя при освещённости от заданной длины волны (т.е. с помощью светофильтров) и зная мощности этих световых полос, не сложно определить спектральные значения КПД фотопреобразователя [7].

На рисунке 1 представлены теоретическая и экспериментально полученная спектральная зависимость КПД кремниевого фотопреобразователя.



**Рисунок 1.** Теоретическая и экспериментальная зависимости  $КПД_{\lambda_i}$  кремниевого ФЭП от длины волны монохроматического излучения при уровне засветки, оцениваемого по токовому фотоотклику эквивалентного току короткого замыкания ФЭП от стандартного солнечного излучения АМ 1,5 ( $1000 \text{ Вт/м}^2$ )

### Результаты

Из анализа представленных на рисунке 1 данных следует, что экспериментальные значения КПД преобразователя наиболее близки к теоретическим при длинах волн монохроматического излучения 0,8-0,95 мкм. При этом максимальное значение  $КПД_{\lambda_i}$  исследуемого серийно выпускаемого образца [8] близко к 40 % на длине волны 0,95 мкм. С

возрастанием длин волн спектральная зависимость резко падает, что объясняется близостью границы поглощения полупроводника, т.е. областью перехода к прозрачности материала на этих длинах волн [9, 10].

С уменьшением длины волны монохроматического излучения также наблюдается уменьшение КПД преобразователя, но не такое резкое как в первом случае. Отчасти это явление связано с ростом неэффективной для образования электронно-дырочных пар энергии фотонов и отчасти мертвым слоем на лицевой стороне преобразователя, обусловленным высоколегированным с малым временем жизни полупроводникового материала, образующего с базовым полупроводником *p-n* переход.

Этот слой становится непреодолимым препятствием на пути высокоэнергичных фотонов. Из рисунка не трудно видеть, что  $KПД_{\lambda_i}$  ФЭП для длин волн меньше 0,35 мкм становится равным нулю. Эта длина волны может служить параметром для оценки толщины легированного слоя данного ФЭП.

На экспериментальной и теоретической зависимостях указаны точки с КПД, адекватного облучению ФЭП солнечным излучением АМ 1,5. Расчеты проведены согласно выражению:

$$KПД_{AM1,5} = \sum K_{\lambda_i} \cdot KПД_{\lambda_i}, \quad (8)$$

где  $K_{\lambda_i}$  – доля мощности светового потока шириной полосы 50 нм стандартного солнечного излучения АМ 1,5 на длине волны  $\lambda_i$  относительно интегрального значения мощности этого излучения, т.е. относительно 1000 Вт/м<sup>2</sup>;

$KПД_{\lambda_i}$  – спектральные значения КПД ФЭП в теоретическом и экспериментальном плане.

### Заключение

Полученное предельное теоретическое значение коэффициента полезного действия кремниевого фотоэлектрического преобразователя для условий освещенности стандартным солнечным излучением АМ 1,5 хорошо согласуется с ранее полученными данными работы [1]. Таким образом количественно оценена эффективность работы фотоэлектрического преобразователя для конкретной длины волны фотоактивной части солнечного спектра.

### Список литературы

1. Стребков Д.С., Никитин Б.А., Гусаров В.А. К вопросу оценки эффективности работы фотопреобразователя при малых и повышенных уровнях освещенности // Вестник ВИЭСХ, 2012, с. 119.
2. Арбузов Ю.Д., Евдокимов В.М. Основы фотоэлектричества, UNESCO-BRESCE 2007, – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007. – 292 с.
3. Bird R.E., Hulstrom. R.L., Lewis L.J. Terrestrial Solar Spectral, data Sets. Solar Energy, v.30, №6, 1983, p. 563-573.
4. Никитин Б.А., Гусаров В.А. Анализ стандартного спектра наземного солнечного излучения интенсивностью 1000 Вт/м<sup>2</sup> и оценка на его основе ожидаемых характеристик кремниевых фотоэлектрических преобразователей // Автономная энергетика: технический прогресс и экономика, М.: НПП “Квант”, №24-25, 2008-2009 г., с. 50-60.
5. Никитин Б.А., Майоров В.А., Харченко В.В. Исследование спектральных характеристик солнечного излучения для различных величин атмосферных масс. Вестник ВИЭСХ. 2015. № 4 (21). С. 95-105.
6. Kharchenko V., Nikitin B., Tikhonov P., Adomavicius V. Utmost efficiency coefficient of solar cells versus forbidden gap of used semiconductor // Proceedings of the 5th

International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2010, Kaunas, Lithuania, 6-7 May 2010, p.289-294.

7. Стребков Д.С., Никитин Б.А., Харченко В.В., Арбузов Ю.Д., Евдокимов В.М., Гусаров В.А., Тихонов П.В. Методика анализа спектра исследуемого источника света посредством тарированного фотопреобразователя и комплекта светофильтров // Вестник ВИЭСХ, 2012, № 4 (9), с. 54-57.
8. Панченко В.А. Обзор и применение солнечных модулей, разрабатываемых и выпускаемых ГНУ ВИЭСХ // Вестник ВИЭСХ, 2014, № 4 (17), С. 20 - 29.
9. Kharchenko V., Nikitin B., Tikhonov P., Panchenko V., Vasant P. Evaluation of the Silicon Solar Cell Modules // Intelligent Computing & Optimization. Advances in Intelligent Systems and Computing, Volume 866, 2019, p. 328-336. doi.org/10.1007/978-3-030-00979-3\_34.
10. Kharchenko V.V., Nikitin B.A., Tikhonov P.V. Estimation and forecasting of PV cells and modules parameters on the basis of the analysis of interaction of a sunlight with a solar cell material // Conference Proceeding - 4th International Conference, TAE 2010, p. 307-310.

### References

1. Strebkov D.S., Nikitin B.A., Gusarov V.A. K voprosu ocenki effektivnosti raboty fotopreobrazovatelya pri malyh i povyshennyh urovnnyah osveshchennosti [On the issue of evaluating the efficiency of the photoconverter at low and high levels of illumination] // Vestnik VIESKH [Bulletin VIESH], 2012, p. 119 [in Russian].
2. Arbuzov Yu.D., Yevdokimov V.M. Osnovy fotoelektrichestva [Fundamentals of Photoelectricity], UNESCO-BRESCE 2007, - M.: GNU VIESH, 2007. - 292 p. [in Russian].
3. Bird R.E., Hulstrom. R.L., Lewis L.J. Terrestrial Solar Spectral, data Sets. Solar Energy, v.30, №6, 1983, p. 563-573.
4. Nikitin B.A., Gusarov V.A. Analiz standartnogo spektra nazemnogo solnechnogo izlucheniya intensivnost'yu 1000 Wt/m<sup>2</sup> i ocenka na ego osnove ozhidaemyh karakteristik kremnievyh fotoelektricheskikh preobrazovatelej [Analysis of the standard spectrum of ground-based solar radiation with an intensity of 1000 W/m<sup>2</sup> and assessment based on it of the expected characteristics of silicon photovoltaic converters] // Avtonomnaya energetika: tekhnicheskij progress i ekonomika [Autonomous Power Engineering: Technical Progress and Economics], M. : NPP Kvant, No. 24-25, 2008-2009, p. 50-60 [in Russian].
5. Kharchenko V., Nikitin B., Tikhonov P., Adomavicius V. Utmost efficiency coefficient of solar cells versus forbidden gap of used semiconductor // Proceedings of the 5th International Conference on Electrical and Control Technologies ECT-2010, Kaunas, Lithuania, 6-7 May 2010, p.289-294 [in Russian].
6. Strebkov D.S., Nikitin B.A., Kharchenko V.V., Arbuzov Yu.D., Yevdokimov V.M., Gusarov V.A., Tikhonov P.V. Metodika analiza spektra issleduemogo istochnika sveta posredstvom tarirovannogo fotopreobrazovatelya i komplekta svetofil'trov [The technique of spectrum analysis of the studied light source by means of a calibrated photoconverter and a set of light filters] // Vestnik VIESKH [Bulletin VIESH], 2012, No. 4 (9), p. 54-57.
7. Panchenko V.A. Obzor i primenenie solnechnykh modulej, razrabatyvaemyh i vypuskaemyh GNU VIESKH [Review and application of solar modules developed and manufactured by GNU VIESKH] // Vestnik VIESKH [Bulletin VIESH], 2014, No. 4 (17), p. 20 - 29 [in Russian].
8. Kharchenko V., Nikitin B., Tikhonov P., Panchenko V., Vasant P. Evaluation of the Silicon Solar Cell Modules // Intelligent Computing & Optimization. Advances in Intelligent

Systems and Computing, Volume 866, 2019, p. 328-336. doi.org/10.1007/978-3-030-00979-3\_34.

9. Kharchenko V.V., Nikitin B.A., Tikhonov P.V. Estimation and forecasting of PV cells and modules parameters on the basis of the analysis of interaction of a sunlight with a solar cell material // Conference Proceeding - 4th International Conference, TAE 2010, p. 307-310.