



УДК 621.383

UDC 621.383

**СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ  
ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ  
СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ**

**LIGHT-GENERATION  
CHARACTERISTICS OF  
POLYCRYSTALLINE SOLAR PANEL**

*Е. А. Ивлиев, А. П. Кудря*

*Y. A. Ivliev, A. P. Kudrya*

Донской государственной технической  
университет, Ростов-на-Дону, Российская  
Федерация

Don State Technical University, Rostov-on-Don,  
Russian Federation

[123ivliev123@mail.ru](mailto:123ivliev123@mail.ru)  
[an.kudrya2010@yandex.ru](mailto:an.kudrya2010@yandex.ru)

[123ivliev123@mail.ru](mailto:123ivliev123@mail.ru)  
[an.kudrya2010@yandex.ru](mailto:an.kudrya2010@yandex.ru)

Рассматривается механизм генерации электронно-дырочных пар и возникновения фото-ЭДС при освещении контакта полупроводников *p*-типа и *n*-типа. Приведены ключевые светотехнические характеристики поликристаллических солнечных панелей, описаны их зависимости от величины освещенности и сопротивления нагрузки.

The article is devoted to electron-hole pairs generation mechanism and photo-EMF emergence as a result of the *p-n* transition light exposure. The paper provides main light-generation characteristics of polycrystalline solar panels, describes their dependence on the value of illumination and load resistance.

**Ключевые слова:** фото-ЭДС, поликристаллическая фото-панель, освещенность.

**Keywords:** photo-EMF, polycrystalline PV cell, illuminating intensity.

**Введение.** Уменьшение углеводов в земной коре побуждает человечество использовать альтернативную энергию — солнечную, ветровую, термальную. Наиболее прогрессивной в последние годы является генерация электроэнергии с помощью солнечных панелей. Солнечная панель — это техническое устройство, с которого начинается весь процесс накопления и преобразования солнечной энергии. Поэтому при проектировании любых солнечных электростанций важно знать светотехнические характеристики солнечных панелей.

**Основная часть.** В настоящее время кремневые панели являются самыми популярными, они состоят из монокристаллических или поликристаллических фотоэлектрических элементов. В основе механизма преобразования солнечной энергии в электрическую указанных панелей лежит вентильный фотоэффект. Монокристаллические панели более эффективны, их КПД составляет 14–16%, однако они более дорогостоящие. Поликристаллические панели наиболее распространены ввиду оптимального соотношения цены и КПД (12–14%) и именно они были выбраны для исследования их основных светотехнических характеристик. Внешний вид экспериментальной установки приведен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки

Измерения основных светотехнических характеристик проведены на поликристаллической панели мощностью 30 Вт. В качестве источника света использовалась светодиодная лампа прямого света (ГОСТ Р54350–2011) мощностью 12 Вт с полуширокой КСС. Освещенность панели контролировалось люксметром «ТКА-ПКМ». Для снятия вольт-амперной характеристики использована электрическая схема, изображенная на рис. 2. Нагрузкой солнечной панели является магазин сопротивлений классом точности 0,2.

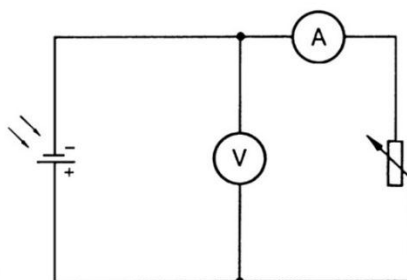


Рис. 2. Электрическая схема для измерения вольт-амперных характеристик солнечной панели

В таблице 1 приведены результаты эксперимента по снятию вольт-амперной характеристики поликристаллической панели, а также вычислены значения ее мощности и КПД. Осевая освещенность солнечной панели  $E=1590$  лк.

Таблица 1

Характеристики солнечной панели при освещённости  $E=1590$  лк

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R, \text{ Ом}$	10000	5000	1100	1000	900	500	100	10	0
$I, \text{ мА}$	0,89	1,68	5,2	5,45	5,75	6,95	7,97	8,13	8,15
$U, \text{ В}$	8,86	8,37	5,75	5,49	5,2	3,54	0,9	0,19	0,11
$P, \text{ мВт}$	7,88	14,06	29,9	29,92	29,9	24,6	7,17	1,54	0,90
$\eta$	0,91	0,83	0,52	0,50	0,47	0,33	0,091	0,010	0

На рис. 3, *a* приведена вольт-амперная характеристика поликристаллической панели; на рис. 3, *b* — зависимость полезной мощности солнечной панели от величины сопротивления нагрузки.

Мощность, выделяемую во внешней цепи, можно представить через величины тока, напряжения и сопротивления нагрузки:

$$P = I \cdot U = I^2 R. \quad (1)$$

Величина тока в замкнутой цепи, согласно закону Ома, зависит от ЭДС источника и полного сопротивления цепи:

$$I = \varepsilon / (R + r). \quad (2)$$

Из уравнений (1) и (2) следует, что мощность, выделяемая во внешней цепи, зависит от ЭДС источника  $\varepsilon$ , его внутреннего сопротивления  $r$  и сопротивления нагрузки  $R$ :

$$P = \frac{\varepsilon^2}{(R + r)^2} R. \quad (3)$$

Исследовав функцию (3) на экстремум, можно определить величину внешней нагрузки, соответствующей максимальной полезной мощности:

$$\frac{dP}{dR} = \varepsilon^2 \frac{(R + r)^2 - 2R(R + r)}{(R + r)^4} = 0. \quad (4)$$

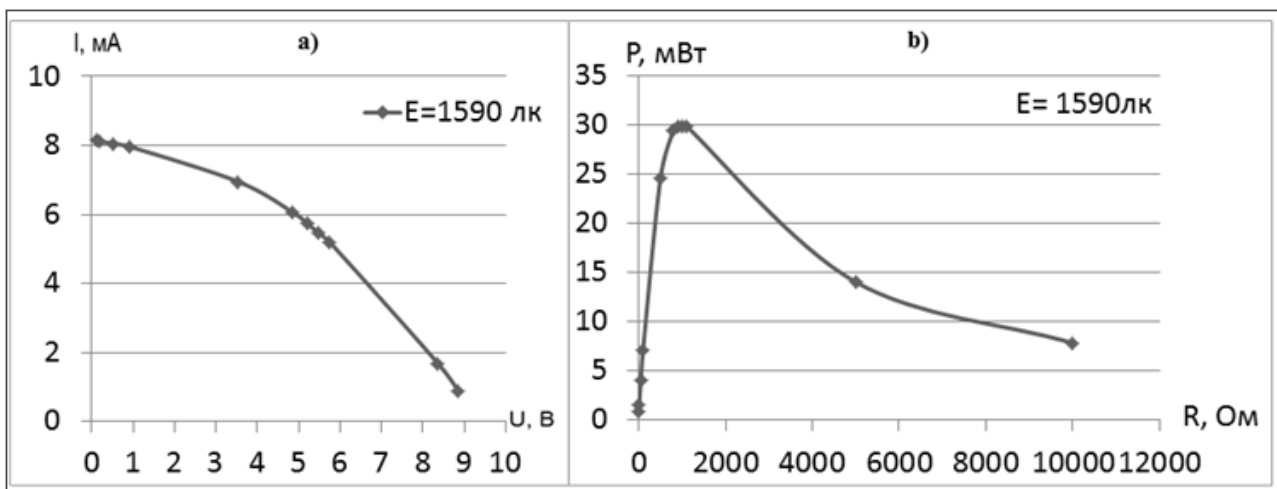


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика поликристаллической панели (*a*) и зависимость полезной мощности солнечной панели от величины сопротивления нагрузки (*b*)

Проведем анализ уравнения 4:

$$(R + r)^2 - 2R(R + r) = 0; (R + r) \cdot (R + r - 2R) = 0; (R + r) \cdot (r - R) = 0.$$

Имеем две критические точки  $R = -r$  и  $R = r$ . Так как  $R > 0$ , то  $R = -r$  не имеет смысла. Производная  $P'$  меняет знак с «+» на «-» в точке  $R = r$ , следовательно,  $R = r$  — точка максимума.

Полезная мощность максимальна, когда сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению источника тока. Например, на рис. 3, *b* при освещенности солнечной панели  $E = 1590$  лк максимальная полезная мощность в 29,92 мВт соответствует сопротивлению нагрузки 1кОм.

При изменении сопротивления нагрузки изменяется и КПД солнечной панели:

$$\eta = \frac{P_{\text{полезн}}}{P_{\text{полн}}} = \frac{U \cdot I}{\varepsilon \cdot I} = \frac{I^2 R}{I^2 (R+r)} = \frac{R}{R+r}. \quad (5)$$

Из уравнения (5) следует, что: 1) при увеличении сопротивления нагрузки и выполнении условия  $R > r$ , КПД стремится к 100%; 2) при коротком замыкании сопротивление нагрузки  $R = 0$ , ток в цепи максимален, а КПД равен нулю; 3) при максимальной полезной мощности, выделяемой на нагрузке, КПД равен 50% [1]. Данные выводы подтверждаются на графиках (рис. 4), где приведены зависимости КПД солнечной панели от величины тока в нагрузке и от сопротивления нагрузки. Например, при освещенности панели  $E = 1590$  лк падение напряжения на сопротивлении нагрузки  $R = 10$  кОм равно 8,86 В, КПД  $\eta = 91\%$ , ток короткого замыкания  $I_{\text{кз}} = 8,15$  мА. Согласно уравнению (5) можно определить ЭДС солнечной батареи, например, для  $E = 1590$  лк она равна  $\varepsilon \approx 9,74$  В.

По величине тока короткого замыкания можно оценить число электронно-дырочных пар, генерируемых в единицу времени:

$$I_{\text{кз}} = \frac{e \cdot N_e}{t} \rightarrow N_e = \frac{I_{\text{кз}} t}{e}. \quad (6)$$

По известной освещенности  $E$  и фотоприемной площади  $S$  солнечной панели вычислим число падающих на нее фотонов [2, 3]:

$$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{h \cdot c}{S \cdot \lambda} N_{\Phi} \rightarrow N_{\Phi} = \frac{E \cdot S \cdot \lambda}{h \cdot c}. \quad (7)$$

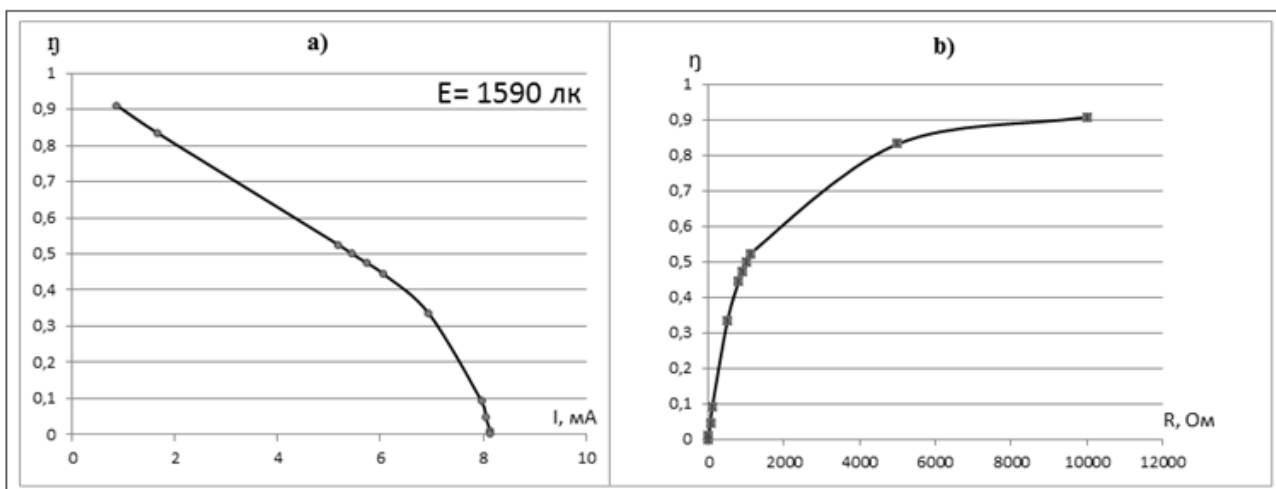


Рис. 4. Зависимость КПД от тока (а) и зависимость КПД от сопротивления нагрузки (б)

Следует иметь в виду, что: 1) не все фотоны, падающие на солнечную панель, вызывают генерацию неравновесных носителей заряда — часть фотонов отражается поверхностью панели, а часть поглощается кристаллической решеткой кремния; 2) при освещении панели солнечным светом, величины светотехнических и электрических характеристик будут другими, но основные закономерности не изменятся.

Механизм образования ЭДС в фотогальванических источниках обусловлен тем, что фотоны в  $p$ - $n$  области генерируют электронно-дырочные пары, которые «сортируют» электрическое поле  $p$ - $n$  перехода. При этом электроны перебрасываются в  $n$ -область, а дырки — в  $p$ -область полупроводника. Накопление объемных зарядов в указанных областях продолжается до тех пор,

пока их электрическое поле не компенсирует электрическое поле  $p$ - $n$  перехода [4]. Согласно уравнениям (7) и (6), увеличение освещенности солнечной панели приводит к дополнительной генерации электронно-дырочных пар в  $p$ - $n$  переходе и увеличению ее ЭДС. При этом изменяется внутреннее сопротивление панели, ее КПД и максимальная полезная мощность на нагрузке [3].

В таблице 2 приведены результаты эксперимента по определению зависимостей ключевых электрических характеристик поликристаллической панели от величины ее освещенности при максимальной мощности  $P_{\max}$  на нагрузке.

Таблица 2

Зависимости ключевых электрических характеристик поликристаллической панели от величины ее освещенности при максимальной мощности

	1	2	3	4	5	6	7
$E$ , лк	500	700	900	1100	1300	1500	1590
$P_m$ , мВт	5,25	8,95	12,98	17,83	22,37	28,02	29,92
$U$ , В	3,24	3,67	4,27	4,82	5,19	5,56	5,49
$I$ , мА	1,62	2,44	3,04	3,7	4,31	5,04	5,45
$r$ , Ом	2000	1500	1400	1300	1200	1100	1000

На рис. 5 приведены зависимости от освещенности: *a*) внутреннего сопротивления панели; *b*) максимальной мощности на нагрузке. Анализ зависимостей  $r(E)$  и  $P_m(E)$  свидетельствует о том, что с увеличением освещенности панели максимум мощности на нагрузке смещается в область меньшего внутреннего сопротивления фотогальванического источника. Это связано с тем, что с увеличением освещенности растет концентрация неравновесных носителей заряда в  $p$ - $n$  переходе, что снижает его сопротивление.

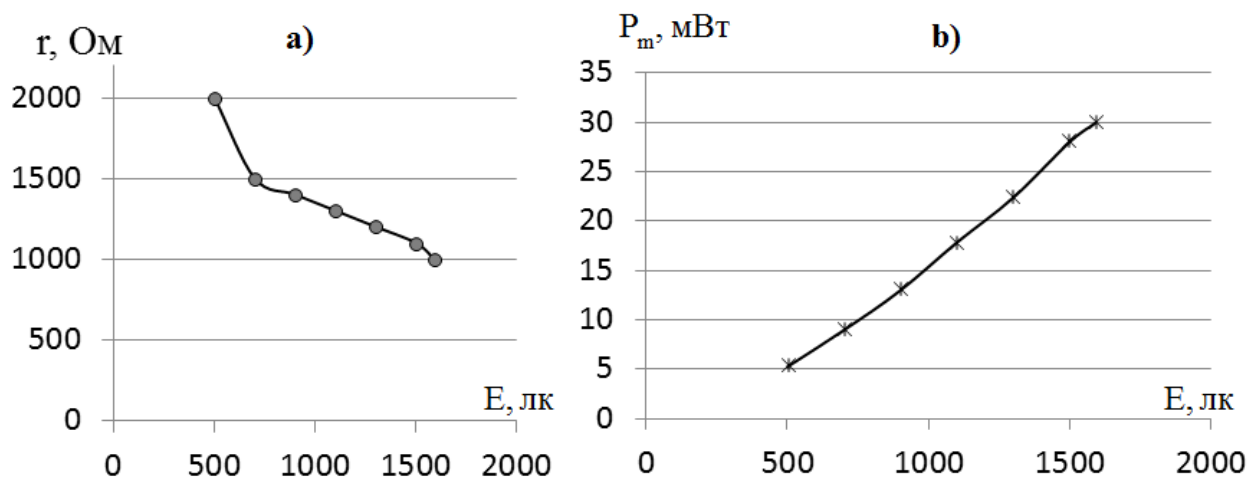


Рис. 5. Зависимость от освещенности внутреннего сопротивления панели (*a*) и зависимость от максимальной мощности на нагрузке (*b*)

**Заключение.** Проведенное исследование показало, что изменение освещенности солнечной панели приводит к изменению ее ключевых параметров — ЭДС и внутреннего сопротивления. Для получения на нагрузке максимальной мощности в процессе эксплуатации солнечной панели необходима автоматизированная следящая система, обеспечивающая необходимую корреляцию между сопротивлением нагрузки и панелью.

**Библиографический список.**

1. Велігорський, О. А. Моделювання вольт-амперних характеристик фотоелектричних перетворювачів / О. А. Велігорський, Д. В. Кулініч // Вісник Чернігівського держ. техн. ун-ту. — 2010. — № 45. — С. 181–182.
2. Кравченко, Е. А. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / Е. А. Кравченко. — Белгород : БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. — 30 с.
3. Солнечная энергетика / В. И. Виссарионов [и др.] ; под ред. В. И. Виссарионова. — Москва : МЭИ, 2008. — 317 с.
4. Messenger, R. Photovoltaic Systems Engineering / R. Messenger, J. Ventre // CRC Press. — 2004. — № 2. — P. 335–339.