

11. Свентицкий И.И. Энергосбережение в АПК и энергетическая экстремальность самоорганизации / И.И. Свентицкий. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2008. – 466 с.
12. Эбелинг В. Физика процессов эволюции / Эбелинг В., Энгель А. Файстель Р. – М.: УРСС, 2001. – 267 с.
13. Kasumov N., Sventitskij I., Mudrik V. а) Антропный принцип как следствие прогрессивной эволюции и уровень ее прецизионности. //XX111 Congress of Philosophy. Philosophy as inquiry and Way of Life. Abstrakts, Athens, P. 330. 808 p. б) Kasumov N., Sventitsky I., Mudrik V. The anthropic principle as consequence of progressive evolution and level of its precision // Research in Agricultural Electric Engineering. 2013. – № 3. – P. 108-112.
14. Sventitskij I.I. Bioenergetics trends – a key to solving energy, food and ecological problems. // Beyond energy crisis opportunity and challenges. Pergamon press, Oxford and New York, 1981, p. 1863 – 1870.
15. Sventitskij I.I., Antoninova M.V. Photosynthetic Model for nceptual Combination of Plant Growing and Enviroment // Photosynthetica, 1989. – N 23(4). – P. 617 – 628.

*Розроблено природничонаукову методологію спільного ексергетичного аналізу біоконверсії природної енергії рослинами і перетворень техногенної енергії в агротехнологіях. Це дозволяє оптимізувати енергозабезпечення сільських споживачів і раціонально використовувати основні засоби аграрного виробництва.*

***Феноменальні явища, другий початок термодинаміки, закон виживання, еволюція біосфери.***

*Developed naturalistic methodology joint exergetic analysis of bioconversion of natural energy plants and technological transformations of energy in agro-technologies. This allows you to optimize the energy supply of rural consumers and rational use of the basic means of agricultural production.*

***Phenomenal phenomena, the second law of thermodynamics, the law of survival, the evolution of the biosphere.***

УДК 621.315.592

## **НАПРЯЖЕНИЕ ХОЛОСТОГО ХОДА СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА КАК КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ЕГО ОСВЕЩЕННОСТИ**

***В.В. Харченко, доктор технических наук  
В.А. Гусаров, Б.А. Никитин, кандидаты технических наук  
Всероссийский научно-исследовательский институт  
электрификации сельского хозяйства, г. Москва***

*Рассмотрены значения напряжения холостого хода солнечного элемента ( $U_{xx}$ ) при различных уровнях освещенности. Показано, что*

величина  $U_{xx}$  может адекватно характеризовать уровень освещенности поверхности солнечного элемента и использоваться для оценки уровня освещенности поверхности различных объектов.

**Солнечный элемент, вольт-амперная характеристика, напряжение холостого хода, уровень освещенности, плотность фотонного потока.**

В литературе, посвященной фотоэлектричеству, уровни освещенности преобразователей подразделяются на несколько различных областей. Так, в частности, в [1] предложено рассматривать слабые, сильные, сверхсильные и промежуточные уровни освещенности фотопреобразователей. В качестве критерия такой градации принято соотношение концентрации генерированных излучением неравновесных электронно-дырочных пар и концентрации основной легирующей (акцепторной или донорной) примеси в базовом слое преобразователя.

**Цель исследований** – использование напряжения холостого хода солнечного элемента как критерия оценки уровня его освещенности.

**Материалы и методика исследований.** В практическом плане вышеуказанный подход качественного определения уровня освещенности затруднен в силу того, что примесная концентрация базовой области преобразователя, как правило, величина недостаточно конкретная. Она может существенно отличаться от образца к образцу, концентрация неравновесных носителей заряда заведомо непостоянна по толщине базового слоя, как в планарных, так и в матричных [4] солнечных элементах. Поэтому следует специально рассматривать вопрос о том, к какому качественному поддиапазону излучения из вышеупомянутых областей следовало бы отнести освещенность на уровне стандартного солнечного излучения AM 1,5 (1000 Вт/м<sup>2</sup>), характеристики которого директивно утверждены Международным электротехническим комитетом [5].

**Результаты исследований.** Несложные математические расчеты на основе спектра излучения AM 1,5 показывают, что за время жизни носителей зарядов  $\tau \approx 10$  мкс, характерное для кремния солнечного качества (Solar Grade Silicon), плотность фотоактивных фотонов, поступающих на рабочую поверхность преобразователя, более чем в 500 раз меньше поверхностной плотности атомов кремния (рис.1).

Учитывая непрерывность силовых линий электрического поля в р-п переходе солнечного элемента на уровне поверхностной плотности атомов полупроводника, насыщенность р-п перехода по разделению генерированных излучением зарядов можно оценить величиной порядка 0,2 % от теоретического предела.

Поскольку в работе [1] качественная оценка уровня освещенности связана с сопоставлением концентрации неравновесных носителей зарядов с концентрацией доминирующей примеси в базовой области преобразователя, то стало быть речь идет об излучении, проникшем в его базу, а не о внешнем излучении, которое явно больше первого в силу световых потерь.

К причинам прямых световых потерь следует отнести три основных фактора. Во-первых, это потери, обусловленные затенением части рабочей поверхности преобразователя контактной сеткой (до 10 % у планарных ФЭП). Во-вторых, это потери, обусловленные отражением части светового потока от рабочей поверхности преобразователя. Для преобразователей, содержащих селективное покрытие, коэффициент отражения оценивается величиной 6–9 %, в то время как без покрытия величиной около 32 %.



**Рис. 1. Расчётные данные соотношения поверхностных плотностей атомов кремния фотопреобразователя и фотоактивного для него фотонного потока стандартного солнечного излучения AM 1,5 ( $1000 \text{ Вт/м}^2$ ) за время жизни  $\tau = 10$  мкс неосновных носителей зарядов (величина  $\tau$  характерна для кремния солнечного качества ( $S = 1 \text{ см}^2$ )).**

К третьему фактору следует отнести потери светового потока в сильно легированном фронтальном слое преобразователя за счет быстрой рекомбинации генерированных излучением зарядов, поскольку в этом слое их время жизни  $\tau$  весьма мало. Согласно работе [2] в легированном слое толщиной 1 мкм полупроводника (кремния) теряется до 18 % фотоактивного потока излучения.

К косвенным причинам потерь светового потока относится рекомбинация генерированных носителей зарядов в базовой области преобразователя, в которой время жизни носителей зарядов заметно больше, чем в легированной области, однако оно ограничено указанной выше величиной порядка 10 мкс. Играет также важную роль и сток части разделенных p-n переходом зарядов через шунтирующее сопротивление в преобразователе.

Итоговая концентрация генерированных излучением неравновесных носителей зарядов в базовой области вблизи p-n перехода

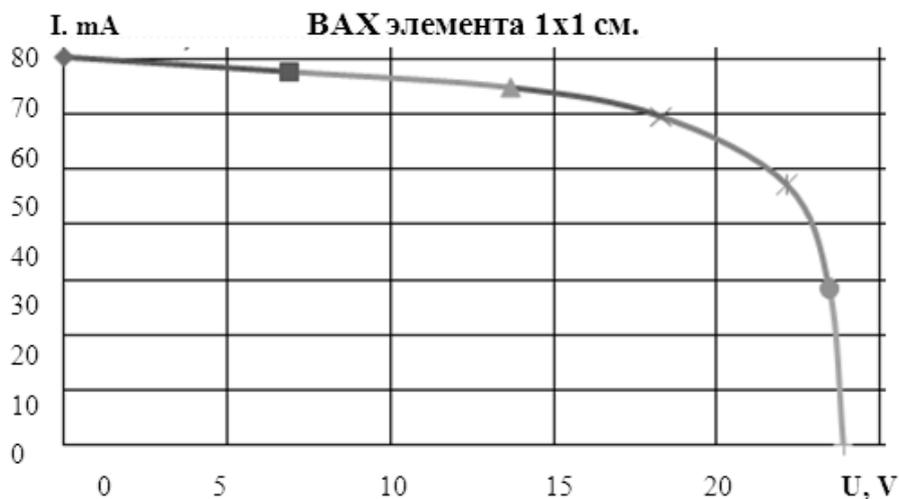
непосредственно отражается на величине напряжения холостого хода  $U_{xx}$ . Эта физическая величина есть функция концентрации неравновесных носителей зарядов в базе преобразователя.

В связи с этим представляется возможным проводить идентификацию уровня освещенности на поверхности конкретного фотопреобразователя по величине напряжения холостого хода.

В [3] показано, что напряжение холостого хода кремниевого преобразователя экспоненциально зависит от величины освещенности. При нулевой освещенности преобразователя (температура  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )  $U_{xx0}$  (т.е. потенциал на р-п переходе) составляет величину  $0,53\text{ В}$ . При этом теоретически предельное значение  $U_{xx}$  преобразователя составляет величину равную удвоенному значению темнового потенциала  $U_{xx0}$ .

На основании вышеизложенного, уровни освещенности преобразователей можно оценивать по величине напряжения холостого хода, разделив весь диапазон потенциального роста его на пять соответствующих поддиапазонов, например равновеликих.

Результаты решения поставленной задачи представлены в таблице для двух типов кремниевых преобразователей, планарного и матричного, с учетом экспериментально полученных параметров исследуемых образцов. На рис.2 показана реальная вольт–амперная характеристика, снятая при пятидесятикратной концентрации солнечного излучения.



**Рис. 2. Вольт–амперная характеристика матричного солнечного элемента  $S=1\text{ см}^2$ , содержащего 30 структур с р-п переходом при концентрированном (50 крат) освещении (напряжение холостого хода одной структуры составляет  $0,727\text{ В}$ ).**

Оценка величины концентрированного излучения на границах условного перехода из одного поддиапазона в другой осуществлялись с учетом индивидуальных параметров исследуемых образцов согласно выражению (1).

$$U_{xxi} = U_{xx0} \left[ 2 - \exp \left( - \frac{(R_i/R_0)^{0,5}}{k_0} \right) \right], \quad (1)$$

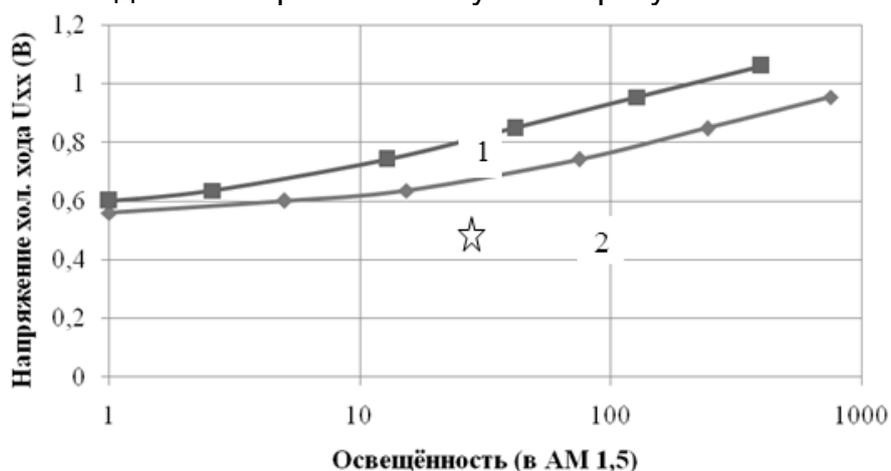
где  $U_{xxi}$  – расчетное значение напряжения холостого хода преобразователя, согласно выбранного алгоритма, В;  $U_{xx0}$  – потенциал р-п перехода преобразователя при нулевой освещенности (темновой), В;  $R_i/R_0$  – концентрация солнечного излучения, обеспечивающая получение расчетного значения напряжения холостого хода преобразователя;  $k_0$  – параметр экспоненты, учитывающий факторы потерь световых и зарядовых в данном преобразователе. Величины  $k_0$  для исследуемых преобразователей найдены согласно выражению (1) при  $R_i/R_0 = 1$  с учетом соответствующих вольт-амперных характеристик.

**Расчётные данные уровней освещённостей кремниевых фотопреобразователей планарного и матричного типов на основе экспериментальных значений  $U_{xx}$ .**

Напряжение холостого хода, В	Уровень освещенности (качественная оценка)	$K = \frac{U_{xxmax}}{U_{xx0}}$	Освещённость в АМ 1,5	
			План. ФЭП $K_0=7$	Матр. ФЭП $K_0=17$
0,53	Нулевой	1	0	0
0,53-0,636	Сверхслабый	1.2	2,6	15,355
0,636-0,742	Слабый	1.4	12,816	74,96
0,742-0,848	Умеренный	1.6	41,628	243,36
0,848-0,954	Сильный	1.8	127,69	751,811
>0,954	Сверхсильный	2.0	>127,69	>751,811

На рис. 3 представлены расчетные зависимости напряжения холостого хода исследуемых кремниевых преобразователей от освещенности при переходе от одного качественного уровня к другому для двух типов: планарного и матричного. На этом же рисунке показаны экспериментально полученные точки при освещенности одного солнца (АМ 1,5) и при некоторой (около 50 крат) концентрированном излучении.

Расчетные данные хорошо согласуются с результатами эксперимента.



**Рис.3. Ожидаемые зависимости напряжения холостого хода кремниевых фотопреобразователей от освещённости:**

1 – для планарных ФЭП; 2 – для матричных солнечных элементов (экспериментальное значение  $U_{xx}$  согласно данным рис.2.)

Заметное отставание в увеличении напряжения холостого хода с возрастанием уровня освещенности для матричных солнечных элементов относительно планарных можно объяснить конструктивными особенностями этого типа

### **Выводы**

Из анализа представленных в таблице и на рис.3 данных следует, что стандартное солнечное излучение AM 1,5 (т.е. одно Солнце) для кремниевых преобразователей следует отнести к категории сверхслабого.

Предложенное деление диапазона возможных значений напряжения холостого хода преобразователя в сопоставлении с экспериментально полученными значениями этого параметра позволяет оперативно оценивать как качественный уровень освещенности поверхности различных объектов, так и его количественную величину.

### **Список литературы**

1. Арбузов Ю.Д. Основы фотоэлектричества, UNESCO-BRESCE 2007, / Ю.Д. Арбузов, В.М. Евдокимов/. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007. – 292 с.
2. Никитин Б.А. Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве. / Б.А. Никитин, В.А. Гусаров, В.С. Вершинин/ Труды 7-й Международной науч. – практ. конф. –М.: ВИЭСХ, 2010. – С 42– 6.
3. Никитин Б.А. Анализ стандартного спектра наземного солнечного излучения интенсивностью  $1000 \text{ Вт/м}^2$  и оценка на его основе ожидаемых характеристик кремниевых фотоэлектрических преобразователей / Б.А. Никитин, В.А. Гусаров // Автономная энергетика: технический прогресс и экономика. – М.: НПП «Квант», 2008-2009 гг. – № 24-25. С. 50–60.
4. Стребков Д.С. Матричные солнечные элементы: в 3 т. / Д.С. Стребков. – М.:ГНУ ВИЭСХ, 2009. – Т.1. – 228 с.
5. R.E. BIRD, R.L. Hulstrom, L.J. LEWIS: "Terrestrial Solar Spectral, data Sets", "Solar Energy", v.30, №6, 1983, p. 563-573.

*Розглянуто значення напруги холостого ходу сонячного елемента ( $U_{xx}$ ) при різних рівнях освітленості. Показано, що величина  $U_{xx}$  може адекватно характеризувати рівень освітленості поверхні сонячного елемента і використовуватися для оцінки рівня освітленості поверхні різних об'єктів.*

**Сонячний елемент, вольт-амперна характеристика, напруга холостого ходу, рівень освітленості, щільність фотонного потоку.**

*Consider the value of the open circuit voltage of the solar cell ( $U_{xx}$ ) at various levels of illumination. It is shown that the magnitude  $U_{xx}$  can adequately characterize the level of illumination of a surface of the solar cell and used to evaluate the level of surface illumination of different objects.*

**Solar cell, current-voltage characteristic, the open circuit voltage, the light level, the density of the photon flux.**