

# ОЦЕНКА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ПРЕДЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАСКАДНЫХ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

*Б.А. Никитин, В.А. Гусаров*

Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ВИЭСХ)  
109456 Москва, 1-й Вешняковский проезд, д. 2  
Тел.: (499) 171-19-20, 8-905-549-01-21, e-mail: cosinys50@mail.ru

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

Работа посвящена оценке оптимальных параметров каскадных кремниевых фотоэлектрических преобразователей. В отличие от матричных солнечных элементов направление светового потока в каскадном варианте предусматривается перпендикулярным к плоскости нескольких переходов, созданных последовательно на одной базовой пластине кремния. Из анализа конструктивного оформления каскадного фотопреобразователя следует, что оптимальным режим его работы будет только тогда, когда солнечный световой поток, проходящий сквозь базовые слои полупроводника, будет генерировать в них равное количество электронно-дырочных пар в единицу времени. Это требование может быть реализовано соответствующим расчетом протяженностей базовых слоев полупроводника. Толщины высоколегированных слоев  $n^+$  и  $p^+$  между базовыми слоями должны быть минимальны и не превышать 0,5 мкм каждый.

Особо важное значение для определения оптимальных значений базовых слоев в каскадных кремниевых фотопреобразователях имеет расчетная зависимость плотности короткого замыкания кремниевых фотоэлементов от толщины слоя полупроводника при стандартном солнечном излучении AM-1,5. Расчеты оптимальных значений базовых слоев каскадных фотопреобразователей представлены в работе для двух, трех, четырех и пяти многопереходных структур. Анализ параметров многопереходных фотопреобразователей позволяет сделать вывод, что рассматриваемые полупроводниковые структуры могут быть успешно использованы в устройствах прямого электролиза воды на водород и кислород, поскольку потенциал такого освещенного солнечным светом каскадного фотоэлемента заметно превышает потенциал связи атомов водорода и кислорода в молекуле воды. Это же обстоятельство поможет извлекать из богатой минералами морской воды и другие химические элементы, представляющие интерес для определенных отраслей промышленности и сельского хозяйства.

Ключевые слова: каскадные солнечные элементы, базовая пластина кремния, высоколегированные слои, многопереходные фотопреобразователи.

## CALCULATION OF OPTIMUM PARAMETERS AND LIMIT CHARACTERISTICS OF CASCADE SILICON PHOTOCONVERTERS

*B.A. Nikitin, V.A. Gusarov*

The All-Russian Research Institute for Electrification of Agriculture (VIESH)  
2, 1<sup>st</sup> Veshnyakovskii str., Moscow, 109456, Russia  
Tel.: 8-905-549-01-21, e-mail: cosinys50@mail.ru

Referred: 01.11.15 Expertise: 05.11.15 Accepted: 09.11.15

Work is devoted to an assessment of optimum parameters of cascade silicon photo-electric converters. Unlike matrix solar elements the direction of a light stream is provided in cascade option perpendicular to the plane of several transitions created consistently on one basic plate of silicon. Follows from the analysis of constructive registration of the cascade photoconverter that the optimum mode of its work will be only when the solar light stream passing through basic layers of the semiconductor generates in them equal number of electron-hole couples in unit of time. This requirement can be realized by the corresponding calculation of extents of basic layers of the semiconductor. Thickness of high-alloyed layers  $n^+$  and  $p^+$  between basic layers have to be minimum and not exceed 0.5 microns everyone.

Especially for determination of optimum values of basic layers in cascade silicon photoconverters settlement dependence of density of short circuit of silicon photo cells on semiconductor layer thickness at standard sunlight of AM-1.5 has importance. Calculations of optimum values of basic layers of cascade photoconverters are presented in work for two, three, four and five multitransitional structures. The analysis of parameters of multitransitional photoconverters allows to draw a conclusion that the considered semiconductor structures can be successfully used in devices of direct electrolysis of water on hydrogen and oxygen as the potential of such cascade photo cell lit with a sunlight considerably exceeds the potential of communication of atoms of hydrogen and oxygen in a water molecule. The same circumstance will help to take from sea water rich with minerals and other chemical elements which are of interest to certain industries and agriculture.

Keywords: cascade solar elements, a basic plate of silicon, the high-alloyed layers, multitransitional photoconverters.



Борис Андреевич  
Никитин  
Boris A. Nikitin

**Сведения об авторе:** канд. техн. наук, старший научный сотрудник ВИЭСХ.  
**Образование:** Всесоюзный заочный политехнический институт (1966), инженер-электрик.  
**Область научных интересов:** возобновляемые источники энергии, энергоснабжение, энергоэффективность.  
**Публикации:** 189.

**Information about the author:** PhD, senior researcher, VIESH.  
**Education:** Union Correspondence Polytechnic Institute (1966), electrical engineer.  
**Research area:** renewable energy sources, energy supply, energy efficiency.  
**Publications:** 189.



Валентин  
Александрович  
Гусаров  
Valentin A. Gusarov

**Сведения об авторе:** канд. техн. наук, зав. лабораторией ВИЭСХ.  
**Образование:** Московский инженерно-строительный институт (1981), инженер-строитель.  
**Область научных интересов:** возобновляемые источники энергии, энергоснабжение, энергоэффективность.  
**Публикации:** 84.

**Information about the author:** PhD, head of laboratory, VIESH.  
**Education:** Moscow Engineering Building Institute (1981), builder engineer.  
**Research area:** renewable energy sources, energy supply, energy efficiency.  
**Publications:** 84.



Дальнейшая модернизация кремниевых фотоэлектрических преобразователей в части повышения рабочего напряжения связана с разработкой и применением многопереходных, т.е. каскадных солнечных элементов [1] направление светового потока в каскадном варианте предусматривается перпендикулярным к плоскости нескольких переходов, созданных последовательно на одной базовой пластине кремния. Принципиальная схема такого рода кремниевых каскадных элементов представлена на рис. 1.

Из анализа представленной схемы каскадного фотопреобразователя следует, что оптимальным режим его работы будет только тогда, когда солнечный световой поток, проходящий сквозь базовые слои полупроводника, будет генерировать в них равное количество электронно-дырочных пар в единицу времени. Это требование может быть реализовано соответствующим расчетом протяженностей базовых слоев полупроводника. Толщины высоколегированных слоев  $n^+$  и  $p^+$  между базовыми слоями должны быть минимальны и не превышать 0,5 мкм каждый.

Спектральное распределение стандартной солнечной энергетической освещенности AM-1,5 представлено в работе [2]. Эта освещенность, суммарной мощностью 1000 Вт/м<sup>2</sup>, представляет собой сумму прямого солнечного излучения, поступающего на

плоскость, расположенную под углом 37 градусов относительно горизонта, и отраженного от земли излучения с коэффициентом отражения 0,2.

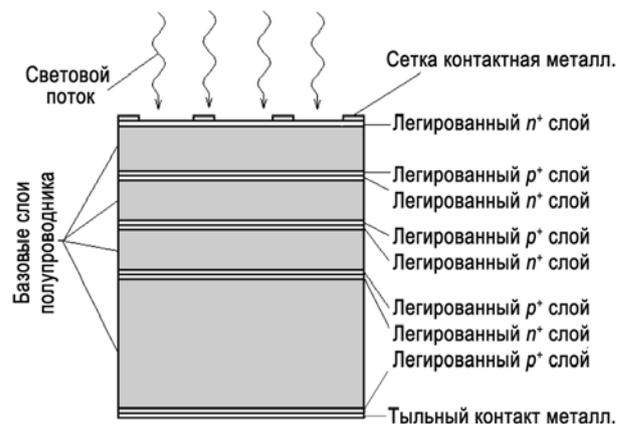


Рис. 1. Принципиальная схема 4-переходного каскадного кремниевое фотопреобразователя  
Fig. 1. Schematic diagram of the 4th transitional cascade silicon photoconverter

В этой же работе [2] в виде табличных данных представлена спектральная фотонная плотность стандартного солнечного излучения AM-1,5. На рис. 2

показана зависимость фотонной плотности этого излучения от длины волны в границах поглощения кремния.

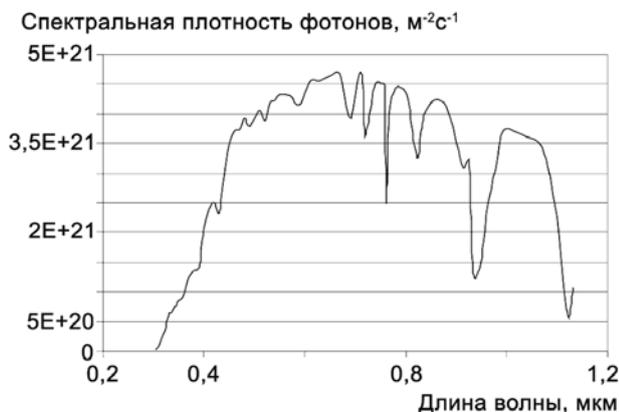


Рис. 2. Спектральная фотонная плотность стандартного наземного солнечного излучения AM-1,5  
 Fig. 2. Spectral photon density of standard land sunlight of AM-1.5

Интегральное значение спектральной фотонной плотности солнечного излучения в границах поглощения полупроводника-кремния позволяет определить теоретический предел плотности удельного тока короткого замыкания кремниевых фотопреобразователей.

В отличие от механизма Комpton-эффекта (механизма взаимодействия кванта электромагнитного излучения большой энергии с электроном), когда энергия фотона передается электрону частично, при фотоэффекте энергия фотона передается электрону полностью и фотон при этом поглощается. При этом часть переданной электрону энергии фотона расходуется на разрыв связи валентного электрона в полупроводнике (для кремния  $E_{св} = 1,1$  эВ), а остаток энергии — на сообщение этому электрону кинетической энергии. Даже самые высокоэнергичные фотоны стандартного спектра с длиной волны около 0,3 мкм не способны образовывать более одной электронно-дырочной пары, поскольку удельный расход энергии на создание одной электронно-дырочной пары в кремнии составляет величину 3,55 эВ [2]. Исходя из вышеизложенного, можно утверждать, что один фотон, поглощенный в кремнии, может образовывать только одну электронно-дырочную пару. Из этого обстоятельства следует вывод, что наиболее эффективными фотонами для работы кремниевых фотопреобразователя будут фотоны с энергией, близкой по величине к ширине запрещенной зоны. При поглощении более энергичных фотонов лишняя энергия фотона будет рассеяна образованным электроном в виде тепла.

Для приведенного выше стандартного солнечного спектра излучения представляется возможным подсчитать общую плотность фотонного потока, способного образовывать электронно-дырочные пары.

Просуммировав потоки фотонов в каждом шаге  $\Delta\lambda$  замеров по всему спектру от максимальных значений до энергий, соответствующих ширине запрещенной зоны полупроводника 1,1 эВ, получили величину фотонного потока  $\Sigma n$ :

$$\Sigma n = 2,7247 \cdot 10^{21} \text{ м}^2 \cdot \text{с} \quad (1)$$

При полном поглощении светового потока и полном разделении генерированных солнечным излучением зарядов можно было бы ожидать с кремниевых фотопреобразователей плотность тока короткого замыкания  $i_{кз}$  величиной

$$i_{кз} = \Sigma n \cdot e = 4,35 \text{ А/дм}^2, \quad (2)$$

где  $e$  — заряд электрона.

На практике у фотоэлектрических преобразователей таких значений плотностей тока не наблюдается. Определенную роль в этом играет контактная сетка элемента, площадь затенения которой, по нашим подсчетам, для фотопреобразователей 1 дм<sup>2</sup> составляет 11%. Дополнительными причинами заниженных значений плотностей токов короткого замыкания следует считать частичное отражение светового потока от лицевой (даже просветленной) поверхности фотопреобразователя и частичную рекомбинацию генерированных зарядов в базовой области элемента. Корректная оценка влияния отмеченных причин является самостоятельной темой другой работы, которую следовало бы провести. В данном случае будем считать, что влияние указанных факторов не существенно. Однако в качестве основной причины заниженных значений наблюдаемых плотностей тока короткого замыкания фотопреобразователей следует рассматривать наличие мертвого слоя на рабочей поверхности фотоэлемента, в котором поглощается часть светового потока без разделения зарядов на  $p$ - $n$  переходе, т.е. образованные заряды рекомбинируют.

Мертвым слоем служит в основном высоколегированный лицевой слой кремния фотопреобразователя. Он образуется за счет перекомпенсации основной примеси исходного полупроводника методом диффузии легирующей примеси при длительном воздействии высокой температуры (более 1000 °С в течение 1 часа). Это воздействие приводит к резкому снижению и до того небольшого времени жизни неосновных носителей зарядов в легированном слое, что и обуславливает быструю рекомбинацию неравновесных носителей, создаваемых воздействием солнечного излучения.

Доля поглощенных фотонов в слое будет определяться толщиной этого слоя кремния и коэффициентом поглощения  $\alpha$  для соответствующих длин волн стандартного спектра солнечного излучения.

На рис. 3, представленном в работе [3], показана зависимость коэффициента поглощения в кремнии от длины волны солнечного излучения в интересующем нас диапазоне.



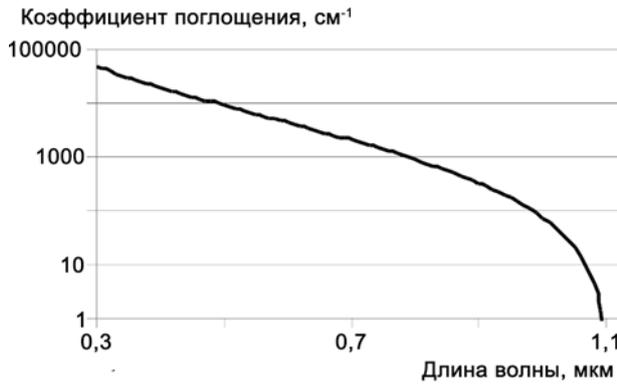


Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения  $\alpha$  в кремнии от длины волны светового потока

Fig. 3. Dependence of coefficient of absorption of  $\alpha$  in silicon from the wavelength of a light stream

Из анализа величин этих показателей  $\alpha$  в представленной зависимости следует, что коэффициент поглощения  $\alpha$  в кремнии с увеличением длины волны падает и весьма мал ( $\alpha = 10 \text{ мкм}^{-1}$ ). В области длин волн  $\lambda \approx 1 \text{ мкм}$  кремний становится все прозрачнее для длинноволновых фотонов. Однако для длин волн в области  $\approx 0,3 \text{ мкм}$  коэффициент поглощения достаточно велик ( $\alpha = 10^4 \text{ мкм}^{-1}$ ) и практически объясняет высокую поглощающую способность легированного слоя фотоэлемента в этой области спектра. Аналитическое выражение коэффициента поглощения в кремнии, согласно работе [3], имеет вид

$$\alpha = 0,526367 - 1,14425\lambda^{-1} + 0,585368\lambda^{-2} + 0,039958\lambda^{-3}. \quad (3)$$

Анализ представленных на рис. 3 зависимостей позволяет осуществлять в перспективе неразрушающий контроль толщины мертвого слоя уже изготовленных преобразователей. Для этого можно воспользоваться методом оценки и сравнения величины фототока (тока короткого замыкания, полагая, что коэффициент собирания генерированных излучением зарядов близок к единице) фотопреобразователя и величины фотонной плотности светового потока от калиброванного источника света. Оптимальным значением длины волны такого лазерного источника, согласно представленной зависимости, является величина в диапазоне длин волн от 0,6 мкм до 0,7 мкм.

Дополнительный анализ представленных в работе [4] зависимостей коэффициентов пропускания слоев кремния от длины волны светового потока приводит к возможности подсчета численных величин световых потоков стандартного солнечного излучения, прошедших сквозь легированные слои различной толщины и способных образовывать электронно-дырочные пары в базе фотоэлемента. Такой подсчет заключается в суммировании произведений спектральных коэффициентов пропускания световых потоков различными толщинами слоев легированного

кремния на конкретные в диапазоне  $\Delta\lambda$  фотонные потоки солнечного спектра. Конечный результат подсчета позволяет оценить ожидаемую величину тока короткого замыкания такого фотоэлемента. На рис. 4 представлена интегральная зависимость ожидаемого фототока солнечного элемента от толщины его мертвого (легированного) слоя. Зная величину плотности тока короткого замыкания конкретного фотопреобразователя в первом приближении, можно оценить и толщину легированного в нем слоя.

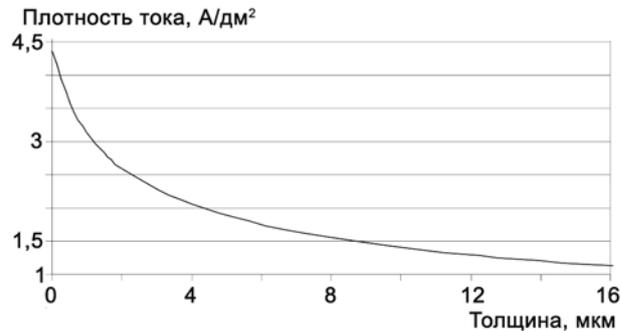


Рис. 4. Расчетная зависимость плотности тока короткого замыкания кремниевых фотоэлементов от толщины легированного слоя при освещенности  $1000 \text{ Вт/м}^2$  стандартного спектрального распределения плотности солнечной радиации при AM1,5 без учета отражения

Fig. 4. Settlement dependence of density of current of short circuit of silicon photo cells on thickness of the alloyed layer at illumination of  $1000 \text{ W/m}^2$  of standard spectral distribution of density of solar radiation at AM1.5 without reflection

Если допустить, что некоторая часть носителей зарядов из легированной области разделяется  $p$ - $n$  переходом, то толщина легированного слоя преобразователя оценится еще большей величиной, чем дает предлагаемая методика.

В итоге, согласно полученным данным, представляется возможным подойти к теоретической оценке предельного значения КПД кремниевого фотопреобразователя при стандартном спектре солнечного излучения суммарной удельной мощностью в  $1000 \text{ Вт/м}^2$ .

Классический метод расчета КПД фотопреобразователя заключается в снятии его вольт-амперной характеристики и поиска по ней оптимальных значений напряжения и тока. Оптимум соответствует максимальному значению снимаемой с фотоэлемента электрической мощности, отношение которой к мощности светового потока, падающего на этот фотоэлемент, дает расчетную величину КПД. При этой методике такие важнейшие характеристики фотопреобразователя, как величины тока короткого замыкания и напряжения холостого хода, практически не используются, кроме как для справки. Часто снимается лишь срединная часть вольт-амперной характеристики. В настоящей работе оценка КПД фотопреобразователя предусматривает использование оговоренных выше реперных точек ( $i_{кз}$  и  $U_{хх}$ ) вольт-амперной характеристики и фил-фактора  $F$ , параметра той же вольт-амперной характеристики.



Как показано выше, предельная плотность тока короткого замыкания  $i_{кз}$  реального фотоэлемента не будет превышать 4,35 А/дм<sup>2</sup> даже при нулевой толщине мертвого (легированного) слоя. Его уменьшение при сохранении других важных характеристик преобразователя – постоянная проблема технологии изготовления фотоэлементов. На определенном этапе развития технологии эта проблема решалась методом доводки [5], т.е. химическим травлением слоев легированной области преобразователя при одновременном контроле величины фототока в это же время освещаемого элемента.

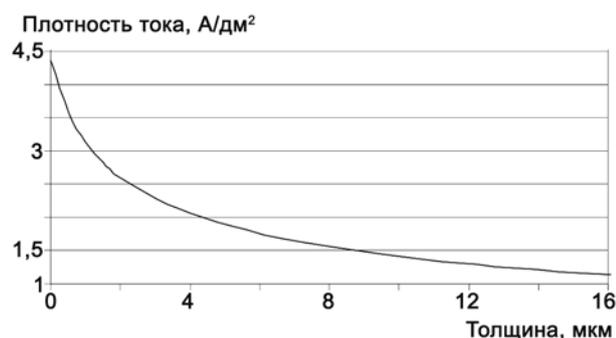
Величина напряжения холостого хода  $U_{xx}$  согласно работе [4] при концентрированных мощных засветках стремится к пределу 1,1 В (ширина запрещенной зоны кремния). Для стандартного спектра излучения (одного солнца) она может быть оценена не более 0,7 В, поскольку плотность неравновесных носителей зарядов в этом случае относительно невелика.

Стандартный вид вольт-амперных характеристик преобразователей говорит о постепенном уменьшении тока, снимаемого с элемента, при повышении напряжения на нем. Фил-фактор  $FF$  как параметр степени заполнения пространства  $U_{xx} \cdot I_{кз}$  пространством  $U_{оп} \cdot I_{оп}$  реальной вольт-амперной зависимостью всегда меньше единицы. Его предельное значение на сегодня можно оценить величиной 0,8.

В общем виде КПД опишется выражением

$$\text{КПД} = i_{кз} U_{xx} FF / R_c, \quad (4)$$

где  $i_{кз}$  – плотность тока короткого замыкания фотоэлемента, А/м<sup>2</sup>;  $U_{xx}$  – напряжение холостого хода фотоэлемента, В;  $F$  – фил-фактор, параметр вольт-амперной характеристики фотоэлемента, безразм. ед.;  $R_c$  – удельная мощность светового потока стандартного спектра солнечного излучения, Вт/м<sup>2</sup>.



**Рис. 5.** Расчетная зависимость плотности тока короткого замыкания кремниевых фотоэлементов от толщины легированного слоя при освещенности 1000 Вт/м<sup>2</sup> стандартного спектрального распределения плотности солнечной радиации при AM1,5 без учета отражения и затенения рабочей поверхности

**Fig. 5.** Settlement dependence of density of current of short circuit of silicon photo cells on thickness of the alloyed layer at illumination of 1000 W/m<sup>2</sup> of standard spectral distribution of density of solar radiation at AM1.5 without reflection from a working surface and when it is in a shadow

Несложные расчеты с использованием оговоренных выше предельных значений входящих в (4) величин показывают, что предельное значение КПД планарного фотоэлектрического преобразователя при стандартном спектре солнечного излучения не должно превышать 24,4%.

Особо важное значение для определения оптимальных значений базовых слоев в каскадных кремниевых фотопреобразователях имеет расчетная зависимость плотности короткого замыкания кремниевых фотоэлементов от толщины слоя полупроводника при стандартном солнечном излучении AM-1,5.

На рис. 5, взятом из работы [4], представлена и проанализирована эта зависимость в свете определения толщин слоев кремния, обеспечивающих заданную величину тока короткого замыкания и находящегося на определенном расстоянии от лицевой поверхности каскадного преобразователя.

Теоретические расчеты, проведенные на основании данных рис. 4, по определению оптимальных слоев и электрических параметров каскадных кремниевых фотопреобразователей представлены в таблице.

Расчетные данные теоретических значений оптимальных толщин слоев полупроводникового материала и соответствующих им электрических параметров каскадных кремниевых фотоэлектрических преобразователей

Settlement data of theoretical values of optimum thickness of layers of semiconductor material and the electric parameters of cascade silicon photo-electric converters corresponding to them

Число переходов в ФЭП	Протяженность базовых слоев ФЭП, мкм				Плотность тока слоя, мА/см <sup>2</sup>	Напряжение холостого хода фотоэлемента, В
	1	2	3	4		
1	100				43,5	0,6
2	3,26	96,74			21,75	1,2
3	1,36	8,0	90,64		14,5	1,8
4	0,815	2,445	11,90	84,84	10,875	2,4
5	0,545	1,435	14,02	32	52,0	3,0

Анализ представленных в таблице параметров многопереходных фотопреобразователей позволяет сделать вывод, что рассматриваемые полупроводниковые структуры могут быть успешно использованы в устройствах прямого электролиза воды на водород и кислород, поскольку потенциал такого освещенного солнечным светом каскадного фотоэлемента заметно превышает потенциал связи атомов водорода и кислорода в молекуле воды. Это же обстоятельство поможет извлекать из богатой минералами морской воды и другие химические элементы, представляющие интерес для определенных отраслей промышленности и сельского хозяйства.

### Список литературы

1. Стребков Д.С. Матричные солнечные элементы: Монография. В 3-х томах. М.: ГНУВИЭСХ, 2010.
2. Bird R.E., Hulstrom R.L., Lewis L.J. Terrestrial Solar Spectral, data Sets // Solar Energy. 1983. Vol. 30NG. P. 563-573.
3. Преобразование солнечной энергии / Под ред. Б.Серафина. Пер.с англ. Колтун М.М., Евдокимов В.М. М.: Энергоиздат, 1982. С. 164.
4. Никитин Б.А., Гусаров В.А. Анализ стандартного спектра наземного солнечного излучения интенсивностью  $1000 \text{ Вт/м}^2$  и оценка на его основе ожидаемых характеристик кремниевых фотоэлектрических преобразователей // Автономная энергетика. Технический прогресс и экономика. М.: НПО КВАНТ. 2008-2009. № 24-25. С. 50-60.
5. Зайцева А.К. Возникновение и развитие высокоэффективных кремниевых фотопреобразователей в НПП «Квант» // Альтернативная энергетика. М.: НПП Квант. 2006. № 21. С. 39-56.

### References

1. Strebkov D.S. Matričnye solnečnye elementy: Monografiâ. V 3-h tomah. M.: GNUVIËSH, 2010.
2. Bird R.E., Hulstrom R.L., Lewis L.J. Terrestrial Solar Spectral, data Sets // Solar Energy. 1983. Vol. 30NG. P. 563-573.
3. Preobrazovanie solnečnoj ènergii / Pod red. B.Serafina. Per.s angl. Koltun M.M., Evdokimov V.M. M.: Ènergoizdat, 1982. S. 164.
4. Nikitin B.A., Gusarov V.A. Analiz standartnogo spektra nazemnogo solnečnogo izlučeniâ intensivnost'û  $1000 \text{ Vt/m}^2$  i ocenka na ego osnove ožidaemykh harakteristik kremnievykh fotoèlektričeskikh preobrazovatelej // Avtonomnaâ ènergetika. Tehničeskij progress i èkonomika. M.: NPO KVANT. 2008-2009. № 24-25. S. 50-60.
5. Zajceva A.K. Vozniknovenie i razvitie vysokoèffektivnykh kremnievykh fotopreobrazovatelej v NPP «Kvant» // Al'ternativnaâ ènergetika. M.: NPP Kvant. 2006. № 21. S. 39-56.

Транслитерация по ISO 9:1995

