

07

## Моделирование изменения характеристик солнечных элементов на основе $a\text{-Si:H}$ в течение светового дня

© Ю.В. Крюченко,<sup>1</sup> А.В. Саченко,<sup>1</sup> А.В. Бобыль,<sup>2</sup> В.П. Костылев,<sup>1</sup> И.О. Соколовский,<sup>1</sup> Е.И. Теруков,<sup>2,3</sup> В.Н. Вербицкий,<sup>2</sup> Ю.А. Николаев<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, 03028 Киев, Украина

<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, 194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 194021 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: sach@isp.kiev.ua

(Поступило в Редакцию 5 декабря 2012 г.)

Проведено теоретическое моделирование временных зависимостей ключевых характеристик солнечных элементов на основе  $a\text{-Si:H}$  в течение светового дня. Модель позволила рассчитать временные зависимости для произвольной географической широты в пределах от  $30^\circ$  до  $60^\circ$  и для произвольного дня в году. Проиллюстрированы результаты расчетов для географической широты  $45^\circ$  в день равноденствия. Полученные результаты для относительных изменений характеристик солнечных элементов на основе  $a\text{-Si:H}$  с достаточно хорошей точностью справедливы и для солнечных элементов на основе других полупроводников, если их КПД находится в диапазоне от 7 до 20%.

### Введение

Поскольку солнечные электростанции, работающие в земных условиях при неконцентрированном солнечном освещении, обычно не имеют системы автоматической ориентации на Солнце, то вырабатываемая ими мощность изменяется как на протяжении светового дня, так и в течение года. В существующих в настоящее время стандартах имеется лишь достаточно ограниченная информация о зависимостях мощности солнечных элементов (СЭ), привязанная к нескольким географическим широтам. В то же время в ряде случаев необходимо рассчитать и измерить временные зависимости вырабатываемой мощности значительно более подробно. Так, в частности, при небольших углах нахождения Солнца над горизонтом интенсивность освещения сильно уменьшается, поэтому необходимо знать, обусловлено ли уменьшение вырабатываемой мощности лишь уменьшением освещенности вследствие увеличения атмосферной массы или также и физическими процессами, связанными с механизмами токопрохождения и рекомбинации.

В настоящей работе проведено теоретическое моделирование временных зависимостей выходной мощности (КПД), а также других характеристик солнечных элементов на основе  $a\text{-Si:H}$ . Получены общие выражения, позволяющие описать указанные зависимости на протяжении любого из 365 дней года для произвольной географической широты между  $30^\circ$  и  $60^\circ$ . Конкретная иллюстрация полученных результатов приведена для дней равноденствия на широте  $45^\circ$ . Как показали проведенные оценки, полученные результаты для изменений относительных характеристик солнечных элементов на протяжении светового дня (нормированных на значение,

реализующееся в 12 h дня), справедливы не только для солнечных элементов на основе  $a\text{-Si:H}$ , но и в случае других солнечных элементов (либо солнечных батарей) с реализующимся на практике КПД фотопреобразования.

### 1. Метод расчета временных (угловых) зависимостей базовых характеристик солнечных элементов на основе аморфного кремния

#### 1.1. Расчет временных зависимостей углов

В настоящей работе расчет проведен на основе модели [1] для частного случая ориентации СЭ строго на юг, нормаль к поверхности которого направлена в точку нахождения Солнца в зените в день равноденствия (22 марта или 22 сентября). Применительно к этому случаю для нахождения угла падения  $\theta(t)$  солнечного излучения на СЭ и угла  $\psi(t)$  между „пальцами“ контактной сетки и проекцией плоскости падения на поверхность как функции времени (и соответственно временных зависимостей всех зависящих от этих углов коэффициентов отражения и прохождения, фигурирующих в модели [1]) введем локальную систему координат  $\{X, Y, Z\}$ , где ось  $Z$  направлена по вертикали к земной поверхности в месте расположения СЭ, ось  $X$  — на запад, а ось  $Y$  — на юг (рассматриваем северное полушарие) (рис. 1). Кроме этого, введем также связанную с СЭ систему координат  $\{X_m, Y_m, Z_m\}$ , где ось  $Z_m$  направлена по вертикали к поверхности СЭ, а лежащая в плоскости СЭ ось  $X_m$  — на запад (рис. 2).

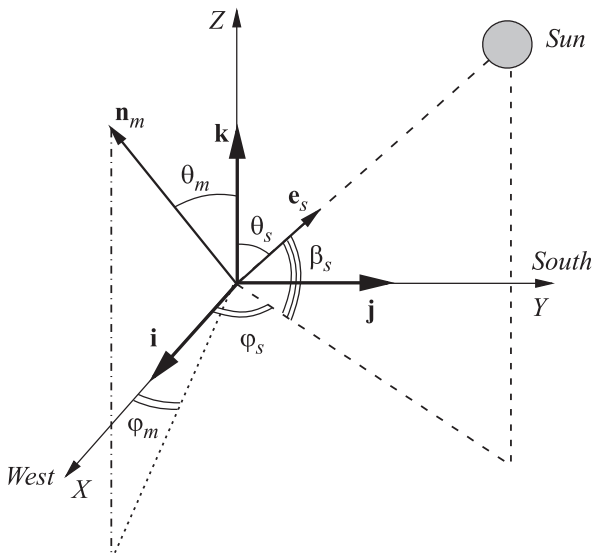


Рис. 1. Локальная система координат и углы, характеризующие ориентацию Солнца и СЭ в этой системе.

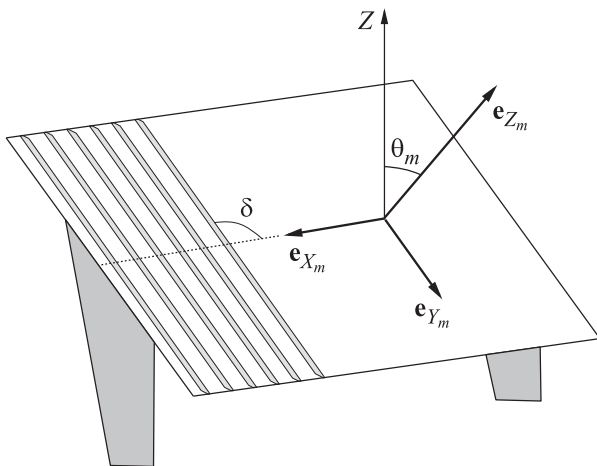


Рис. 2. Координатная система, связанная с СЭ и характеризующаяся тремя оортами  $e_{X_m}$ ,  $e_{Y_m}$  и  $e_{Z_m}$ .

В локальной системе координат ориентацию направленного на Солнце единичного вектора  $e_s$  можно характеризовать зенитным углом  $\theta_s$  (или углом подъема Солнца над горизонтом  $\beta_s$ ) и азимутальным углом  $\varphi_s$ . Временная зависимость зенитного угла  $\theta_s$  (или угла подъема  $\beta_s$ ) определяется следующей формулой [2,3]:

$$\cos(\theta_s) = \sin(\beta_s) = \cos(\alpha) \cos(\varepsilon) \cos\left[\frac{2\pi}{T_e} \left(t - \frac{T_e}{2}\right)\right] + \sin(\alpha) \sin(\varepsilon), \quad (1)$$

где  $T_e = 24 \text{ h}$  — длительность суток,  $t$  — локальное суточное время ( $0 \leq t \leq T_e$ ),  $\alpha$  — широта места расположения СЭ ( $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ ),  $\varepsilon$  — угол склонения Земли, который в свою очередь является функцией номера

текущего дня  $T(D)$  в годовом цикле ( $0 \leq T(D) \leq 365$ ):

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \left(\frac{23.45^\circ}{180^\circ} \pi\right) \sin\left(\frac{T}{365} 2\pi\right) \\ &= 0.40928 \sin(0.0172142T) \\ &= -0.40928 \cos[0.0172142(D + 10)]. \end{aligned} \quad (2)$$

В этой формуле  $T$  — номер дня, отсчитываемый от 22 марта ( $T = 0$ ), а  $D$  — от 1 января ( $D = 1$ ). Поскольку 22 марта  $\varepsilon = 0$ , то в этот день  $\cos(\theta_s) = \cos(\alpha) \cos[\pi(t/12 - 1)]$ .

Для каждого дня из условия  $\cos(\theta_s) = 0$  можно определить времена восхода и заката Солнца  $t_1$  и  $t_2$ :

$$t_{1,2} = \frac{T_e}{2} \mp T_e \frac{\arccos[-\text{tg}(\alpha) \text{tg}(\varepsilon)]}{2\pi}. \quad (3)$$

Максимально возможный рабочий период СЭ  $\Delta t$  определяется разностью  $t_2 - t_1$ :  $\Delta t = T_e \arccos[-\text{tg}(\alpha) \text{tg}(\varepsilon)]/\pi$ . Применительно к 22 марта  $t_1 = 6$ ,  $t_2 = 18$ ,  $\Delta t = 12 \text{ h}$ . Определив  $\theta_s(t, T)$ , можно рассчитать азимутальный угол падения солнечного излучения  $\varphi_s(t, T)$ , используя следующую формулу [2,3]:

$$\cos(\varphi_s) = -\frac{\cos(\varepsilon) \sin[2\pi(t - T_e/2)/T_e]}{\sin(\theta_s)}. \quad (4)$$

Соответственно 22 марта имеем  $\cos(\varphi_s) = -\sin[\pi(t/12 - 1)]/\sin(\theta_s)$ .

На рис. 1  $n_m$  — единичный вектор вдоль оси  $Z_m$  (т.е. по нормали к поверхности СЭ). Для указанного частного случая ориентации СЭ из общих формул (1) и (4) имеем  $\theta_m = \alpha$  и  $\varphi_m = \pi/2$ .

Определим орт  $e_{X_m}$  как единичный вектор вдоль оси  $X_m$  (направлен строго на запад),  $e_{Y_m}$  — как единичный вектор вдоль оси  $Y_m$  и  $e_{Z_m} = n_m$  как единичный вектор вдоль оси  $Z_m$  в координатной системе, связанной с СЭ (рис. 2). В локальной системе координат, изображенной на рис. 1, эти векторы покомпонентно можно записать как

$$\begin{aligned} e_{X_m} &= \{1, 0, 0\}, \quad e_{Y_m} = \{0, \cos \theta_m, -\sin \theta_m\}, \\ e_{Z_m} &= \{0, \sin \theta_m, \cos \theta_m\}. \end{aligned}$$

Единичный вектор  $e_s$  (рис. 1) в той же локальной системе координат имеет следующий покомпонентный состав:  $e_s = \{\sin \theta_s \cos \varphi_s, \sin \theta_s \sin \varphi_s, \cos \theta_s\}$ . Используя эти явные выражения для  $e_{Z_m}$  и  $e_s$ , можно найти временную зависимость угла падения  $\theta(t, T)$  солнечного излучения на СЭ (фигурирующие в [1] коэффициенты отражения и пропускания зависят именно от этого угла):

$$e_{Z_m} e_s = \cos \theta = \sin \theta_m \sin \theta_s \sin \varphi_s + \cos \theta_m \cos \theta_s. \quad (5)$$

Время начала освещения СЭ прямыми солнечными лучами  $t'_1$  ( $t_1 \leq t'_1 \leq t_2$ ) и окончания освещения  $t'_2$  ( $t'_1 \leq t'_2 \leq t_2$ ), а следовательно, и рабочий период СЭ

в этот день  $t'_2 - t'_1$  могут быть определены из условия  $\cos \theta = 0$ .

Пусть  $\delta$  — угол, характеризующий ориентацию „пальцев“ контактной сетки на поверхности СЭ относительно оси  $X_m$ . Для ситуации, изображенной на рис. 2,  $\delta = \pi/2$ . Если электроды будут направлены параллельно  $X_m$ , то этот угол соответственно будет равен нулю.

Для определения угла между осью  $X_m$  и проекцией плоскости падения солнечных лучей на поверхность СЭ рассмотрим векторное произведение

$$\mathbf{v} = [\mathbf{e}_{Z_m} \times \mathbf{e}_s] = \sin \theta \mathbf{e}_{v_m},$$

где  $\mathbf{e}_{v_m} = \mathbf{v}/v$  — единичный вектор в направлении  $\mathbf{v}$ .

Очевидно, что единичные векторы  $\mathbf{e}_{Z_m}$  и  $\mathbf{e}_s$  лежат в плоскости падения. Следовательно,  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{e}_{v_m}$  лежат в плоскости СЭ, поскольку она перпендикулярна к плоскости падения. Используя записанное ранее покомпонентное разложение вектора  $\mathbf{e}_{Z_m}$  в локальной системе координат с ортами  $\mathbf{i}$ ,  $\mathbf{j}$  и  $\mathbf{k}$  (рис. 1) и аналогичное разложение вектора  $\mathbf{e}_s$ , получим

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= v_X \mathbf{i} + v_Y \mathbf{j} + v_Z \mathbf{k} \\ &= (\sin \theta_m \cos \theta_s - \cos \theta_m \sin \theta_s \sin \varphi_s) \mathbf{i} \\ &+ (\cos \theta_m \sin \theta_s \cos \varphi_s) \mathbf{j} + (-\sin \theta_m \sin \theta_s \cos \varphi_s) \mathbf{k}. \end{aligned} \quad (6)$$

Поскольку  $|\mathbf{v}| = v = \sin(\theta)$ , то  $\mathbf{e}_{v_m} = \mathbf{v}/\sin(\theta)$ .

Угол  $\varphi_{vX_m}$  между векторами  $\mathbf{e}_{v_m}$  и  $\mathbf{e}_{X_m}$ , лежащими в плоскости СЭ, можно легко найти из выражения для скалярного произведения векторов  $\mathbf{e}_{v_m} \mathbf{e}_{X_m} = |\mathbf{e}_{v_m}| |\mathbf{e}_{X_m}| \cos(\varphi_{vX_m}) = \cos(\varphi_{vX_m})$ . Используя записанные ранее покомпонентные разложения векторов  $\mathbf{e}_{v_m}$  и  $\mathbf{e}_{X_m}$ , получим

$$\begin{aligned} \cos(\varphi_{vX_m}) &= e_{v_m, X} \\ &= (\sin \theta_m \cos \theta_s - \cos \theta_m \sin \theta_s \sin \varphi_s) / \sin \theta. \end{aligned} \quad (7)$$

Так как  $\mathbf{e}_{v_m}$  ортогонален плоскости падения, то угол  $\psi_{sX}$  между осью  $X_m$  и проекцией плоскости падения солнечных лучей на поверхность СЭ равен  $\psi_{sX} = \pi/2 - \varphi_{vX_m}$ . Угол  $\psi$  между „пальцами“ контактной сетки и проекцией плоскости падения солнечных лучей на поверхность СЭ соответственно будет определяться как  $\psi = \psi_{sX} - \delta$ . Именно от этого угла зависят коэффициенты отражения и пропускания, рассчитанные методом многократного отражения лучей в [1].

## 1.2. Спектр падающего на поверхность Земли прямого солнечного излучения при произвольных углах падения $\theta_s$

Спектр падающего на СЭ солнечного излучения будет зависеть от угла падения  $\theta_s(t)$ , рассчитанного по формуле (1). В качестве солнечного спектра АМ0, соответствующего условиям ближнего космоса, использовался оцифрованный эталонный ETR-спектр  $\mathfrak{S}_0(\lambda)$  ASTM

G173-03 [4,5] (ETR означает extraterrestrial). По мере прохождения солнечного излучения сквозь атмосферу оно ослабляется из-за поглощения и рассеивания фотонов атомами и молекулами различных газов, из которых состоит атмосфера, а также содержащимися в ней аэрозолями. Каждая из составляющих атмосферы вносит соответствующие модификации в спектральную плотность  $\mathfrak{S}_0(\lambda)$  исходного спектра АМ0. Степень этих модификаций зависит от длины пути, пройденного светом в атмосфере Земли, т.е. от угла падения  $\theta_s$  солнечного излучения на Землю в месте расположения СЭ. В настоящей работе непрерывное изменение спектра, падающего на СЭ-излучения по мере движения Солнца по небосклону, учитывается на базе модели SMARTS2 [5]. Мы рассматриваем в настоящей работе только прямое солнечное излучение без учета дополнительного вклада конуса  $2.5-3.5^\circ$  вокруг направления на Солнце (так называемого circumsolar radiation [4]) и рассеянного в атмосфере света, хотя в принципе оба эти фактора также могут быть учтены в рамках модели [5]. Согласно [5], основной вклад в ослабление исходного спектра АМ0 в этом случае дают следующие шесть механизмов:

- 1) рэлеевское рассеяние излучения,
- 2) поглощение озоном,
- 3) поглощение двуокисью азота  $\text{NO}_2$ ,
- 4) поглощение однородной смесью остальных газов,
- 5) поглощение парами воды,
- 6) аэрозольная экстинкция.

В результате спектральная плотность  $\mathfrak{S}(\lambda, \theta_s)$  падающего на поверхность Земли прямого солнечного излучения в месте расположения СЭ определяется по следующей формуле:

$$\mathfrak{S}(\lambda, \theta_s) = \mathfrak{S}_0(\lambda) \prod_{i=1}^6 T_i(\lambda, m_i(\theta_s)), \quad (8)$$

где  $T_i(\lambda, m_i(\theta_s)) \leq 1$  — соответствующие коэффициенты ослабления (затухания). Оптические массы  $m_i$  каждой из основных компонент воздуха, приводящих к ослаблению спектра  $\mathfrak{S}_0(\lambda)$ , можно определить по следующей эмпирической формуле:

$$m_i(\theta_s) = \left\{ \cos \theta_s + a_1(i) [\theta_s]^{a_2(i)} / [a_3(i) - \theta_s]^{a_4(i)} \right\}^{-1}, \quad (9)$$

где величины  $\theta_s(t)$  следует подставлять в градусах. Значения коэффициентов  $a_1(i) - a_4(i)$  и коэффициентов ослабления  $T_i(\lambda, m_i(\theta_s))$  рассчитываются для заданных значений параллели, высоты СЭ над уровнем моря, времени года и других параметров. С этой целью используется приведенная в [5] таблица реперных атмосфер (табл. 1).

При заданной высоте  $z$  положения СЭ над уровнем моря по каждой из реперных атмосфер производилась линейная аппроксимация параметров атмосфер между их значениями при  $z = 0$  и  $1$  km. Затем аналогичная линейная аппроксимация для уже определенных значений для конкретного  $z$  производилась по широте  $\alpha$

**Таблица 1.** Показатели атмосфер

Атмосфера, широта	Высота над уровнем моря <i>z</i> , km	Температура воздуха <i>T<sub>a</sub></i> , К	Эффективная температура озона <i>T<sub>eo</sub></i> , К	Давление <i>p</i> , mb	Относительная влажность <i>RH</i> , %	Эффективная длина пути <i>u</i>				
						O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>
USSA 45°N	0	288.2	225.4	1013.3	45.5	4.9635	4.6854	1.419	0.3434	2.04 · 10 <sup>-4</sup>
	1	281.7	223.4	898.8	48.7	3.9637	3.6853	0.899		
MLS 45°N	0	294.2	232.1	1013.3	75.7	4.9383	4.8866	2.927	0.3316	2.18 · 10 <sup>-4</sup>
	1	289.7	229.7	902.0	65.6	3.9622	3.8792	1.727		
MLW 45°N	0	272.2	220.6	1018.0	77.0	5.0762	4.5566	0.855	0.3768	1.99 · 10 <sup>-4</sup>
	1	268.7	218.7	897.3	70.4	3.9953	3.5658	0.549		
SAS 60°N	0	287.2	233.6	1010.0	74.9	4.9309	4.7057	2.079	0.3448	2.16 · 10 <sup>-4</sup>
	1	281.7	231.7	896.0	69.8	3.9325	3.7118	1.316		
SAW 60°N	0	257.2	217.4	1013.0	80.4	5.0968	4.3277	0.424	0.3757	1.87 · 10 <sup>-4</sup>
	1	259.1	216.1	887.8	69.3	3.9512	3.3635	0.295		
STS 30°N	0	301.2	224.5	1013.5	80.0	4.9006	4.9444	4.219	0.3000	2.00 · 10 <sup>-4</sup>
	1	293.7	221.5	904.6	65.0	3.9623	3.9412	2.593		
STW 30°N	0	287.2	221.2	1021.0	80.0	5.0198	4.8180	2.101	0.2800	1.00 · 10 <sup>-4</sup>
	1	284.2	218.3	906.4	70.0	4.0054	3.8100	1.218		

Примечание. USSA — U.S. Standard Atmosphere, MLS — летняя на средних широтах, MLW — зимняя на средних широтах, SAS — полярктическая летняя, SAW — полярктическая зимняя, STS — субтропическая летняя, STW — субтропическая зимняя.

**Таблица 2.** Коэффициенты для расчета оптических масс

Индекс <i>i</i>	Механизм ослабления излучения	<i>a</i> <sub>1</sub> ( <i>i</i> )	<i>a</i> <sub>2</sub> ( <i>i</i> )	<i>a</i> <sub>3</sub> ( <i>i</i> )	<i>a</i> <sub>4</sub> ( <i>i</i> )
1	Рэлеевское рассеяние	4.5665 · 10 <sup>-1</sup>	0.07	96.4836	1.6970
2	Поглощение озоном	2.6845 · 10 <sup>-2</sup>	0.5	115.420	3.2922
3	Поглощение двуокисью азота NO <sub>2</sub> (стратосферный NO <sub>2</sub> )	6.0230 · 10 <sup>-2</sup>	0.5	117.960	3.4536
4	Поглощение однородной смесью остальных газов	4.5665 · 10 <sup>-1</sup>	0.07	96.4836	1.6970
5	Поглощение парами воды	3.1141 · 10 <sup>-2</sup>	0.1	92.4710	1.3814
6	Аэрозольная экстинция	3.1141 · 10 <sup>-2</sup>	0.1	92.4710	1.3814

места расположения СЭ на основе реперных значений при α = 30, 45 и 60°N. Затем, используя найденные показатели для „летних“ (*S*) и „зимних“ (*W*) атмосфер, определялись показатели „весенней“ атмосферы как среднее между показателями *S*- и *W*-атмосфер.

Значения коэффициентов, входящих в формулу (9) для определения оптических масс, приведены в табл. 2.

**1.2.1. Рэлеевское рассеяние (*i* = 1)**

$$T_1(\lambda, \theta_s) = \exp \left[ -\frac{m_1(\theta_s)P}{A_1\lambda^4 + A_2\lambda^2 + A_3 + A_4\lambda^{-2}} \right], \quad (10)$$

где *P* = *p*/*p*<sub>0</sub> (значения *p*, как и другие параметры, предварительно определены указанными линейными аппроксимациями по реперным значениям табл. 1), *p*<sub>0</sub> = 1013.25 mb, *A*<sub>1</sub> = 117.2594, *A*<sub>2</sub> = -1.3215, *A*<sub>3</sub> =

= 3.2073 · 10<sup>-4</sup>, *A*<sub>4</sub> = -7.6842 · 10<sup>-5</sup>. В этой и последующих формулах значения длины волны λ подставляются в μm.

**1.2.2. Поглощение озоном O<sub>3</sub> (*i* = 2)**

$$T_2(\lambda, \theta_s) = \exp[-m_2(\theta_s)u_2\alpha_2(\lambda, T_{eo})], \quad (11)$$

где *u*<sub>2</sub>(*u*<sub>03</sub>) — определенная по табл. 1 эффективная длина пути для случая озона в единицах atm-cm, α<sub>2</sub>(λ, *T*<sub>eo</sub>) — спектральный коэффициент поглощения при эффективной температуре озона *T*<sub>eo</sub> (*T*<sub>eo</sub> также определяется по табл. 1). Коэффициент поглощения α<sub>2</sub>(λ, *T*<sub>ro</sub>) при референсной лабораторной температуре *T*<sub>ro</sub> = 228 К табулирован в приложении к [5].

В области  $\lambda < 0.344 \mu\text{m}$  имеет место следующая коррекция:

$$\alpha_2(\lambda, T_{eo}) = \max\{0, \alpha_2(\lambda, T_{ro}) + c_1(T_{eo} - T_{ro}) + c_2(T_{eo} - T_{ro})^2\}. \quad (12)$$

При  $\lambda < 0.310 \mu\text{m}$

$$c_1 = (0.25326 - 1.7253\lambda + 2.9285\lambda^2)/(1 - 3.589\lambda),$$

$$c_2 = (9.6635 \cdot 10^{-3} - 6.3685 \cdot 10^{-2}\lambda + 0.10464\lambda^2)/(1 - 3.6879\lambda). \quad (13)$$

В области  $0.310 \mu\text{m} < \lambda < 0.344 \mu\text{m}$

$$c_1 = 0.39626 - 2.3272\lambda + 3.4176\lambda^2,$$

$$c_2 = 1.8268 \cdot 10^{-2} - 0.10928\lambda + 0.16338\lambda^2. \quad (14)$$

В области  $0.344 \mu\text{m} < \lambda < 0.407 \mu\text{m}$  температурная коррекция практически отсутствует и  $\alpha_2(\lambda, T_{eo}) \approx \alpha_2(\lambda, T_{ro})$ . В области  $0.407 \mu\text{m} < \lambda < 0.560 \mu\text{m}$  температурная коррекция имеет следующий вид:

$$\alpha_2(\lambda, T_{eo}) = \max\{0, \alpha_2(\lambda, T_{ro})[1 + 0.0037083(T_{eo} - T_{ro}) \times \exp[28.04(0.4474 - \lambda)]]\}. \quad (15)$$

В области  $\lambda > 0.560 \mu\text{m}$  температурная коррекция практически отсутствует и  $\alpha_2(\lambda, T_{eo}) \approx \alpha_2(\lambda, T_{ro})$ .

### 1.2.3. Поглощение двуокисью азота $\text{NO}_2$ ( $i = 3$ )

Двуокись азота обычно находится в стратосфере и принимает участие в формировании озона. Тогда ее оптическая масса  $m_3(\theta_s)$  описывается формулой (9) со „стратосферными“ значениями соответствующих коэффициентов  $\alpha_3(j)$ , приведенными в табл. 2. Но над большими городами или промышленными районами кроме стратосферного имеется еще и прилегающий к Земле слой тропосферного  $\text{NO}_2$ . В случае, если высота столбца  $h_{tr}$  (эффективная длина пути  $u_{tr}$ ) тропосферного  $\text{NO}_2$  значительно превышает высоту столбца  $h_{st}$  (эффективную длину пути  $u_{st}$ ) стратосферного  $\text{NO}_2$ , то вместо  $m_3(\theta_s)$  следует использовать аэрозольную оптическую массу  $m_6(\theta_s)$ . В случае сопоставимых высот столбцов (эффективных длин пути) тропосферного и стратосферного  $\text{NO}_2$  берется усредненное значение

$$\bar{m}_3(\theta_s) = m_3(\theta_s)u_{st}/(u_{st} + u_{tr}) + m_6(\theta_s)u_{tr}/(u_{st} + u_{tr}).$$

Коэффициент ослабления при этом равен

$$T_3(\lambda, \theta_s) = \exp[-\bar{m}_3(\theta_s)\tilde{u}_3\alpha_3(\lambda, T_{en})], \quad (16)$$

где  $\tilde{u}_3 = u_{st} + u_{tr}$  — эффективная длина пути для случая двуокиси азота в единицах  $\text{atm}\cdot\text{cm}$ ,  $\alpha_3(\lambda, T_{en})$  — спектральный коэффициент поглощения при эффективной температуре  $T_{en}$ . Если  $\tilde{u}_3 \leq 5.0 \cdot 10^{-4} \text{atm}\cdot\text{cm}$ ,

то  $T_{en} = T_{eo}$  (где  $T_{eo}$  определяется по табл. 1); если  $\tilde{u}_3 \geq 5.0 \cdot 10^{-3}$ , то  $T_{en} = T_a$  (тропосферное значение температуры, также определяемое по табл. 1); если  $5.0 \cdot 10^{-4} < \tilde{u}_3 < 5.0 \cdot 10^{-3}$ , то  $T_{en}$  — среднее (с соответствующими весовыми коэффициентами) от  $T_{eo}$  и  $T_a$ . Спектральный коэффициент поглощения  $\alpha_3(\lambda, T_{en})$  имеет следующий вид:

$$\alpha_3(\lambda, T_{en}) = \max\left\{0, \alpha_3(\lambda, T_{rn}) \times \left[1 + (T_{en} - T_{rn}) \sum_{i=0}^{i=5} f_i \lambda^i\right]\right\}, \quad (17)$$

где  $\alpha_3(\lambda, T_{rn})$  — табулированный в приложении к [5] спектральный коэффициент поглощения при референсной температуре  $T_{rn} = 243.2 \text{K}$ ,  $f_0 = 0.69773$ ,  $f_1 = -8.1829$ ,  $f_2 = 37.821$ ,  $f_3 = -86.136$ ,  $f_4 = 96.615$ ,  $f_5 = -42.635$  при  $\lambda < 0.625 \mu\text{m}$  или  $f_0 = 0.03539$ ,  $f_1 = -0.04985$ ,  $f_2 = f_3 = f_4 = f_5 = 0$  при  $\lambda > 0.625 \mu\text{m}$ .

Значения полной эффективной длины пути  $\tilde{u}_3$  в промышленных районах могут колебаться от  $4.4 \cdot 10^{-5}$  до  $1.3 \cdot 10^{-2} \text{atm}\cdot\text{cm}$  со средним значением  $1.66 \cdot 10^{-3} \text{atm}\cdot\text{cm}$ . В чистых районах, где только стратосферная двуокись азота влияет на прохождение лучей,  $\tilde{u}_3 = u_3$ , где  $u_3 = 2 \cdot 10^{-4} \text{atm}\cdot\text{cm}$  (табл. 1).

### 1.2.4. Поглощение однородной смесью остальных газов ( $i = 4$ )

Для однородной смеси остальных газов, основными из которых являются кислород  $\text{O}_2$  и углекислый газ  $\text{CO}_2$ , коэффициент прохождения  $T_4(\lambda, \theta_s)$  описывается следующей формулой:

$$T_4(\lambda, \theta_s) = \exp\left[-(m_4(\theta_s)u_4\alpha_4(\lambda))^a\right], \quad (18)$$

где  $m_4(\theta_s) = m_1(\theta_s)$  (оптическая масса для механизма рэлеевского рассеяния),  $\alpha_4(\lambda)$  — табулированный в приложении к [5] спектральный коэффициент поглощения для смеси остальных газов. В качестве эффективной длины пути  $u_4$  используется  $u_{\text{O}_2}$  (определяется по табл. 1) для  $\lambda < 1 \mu\text{m}$  и  $u_{\text{CO}_2}$  для  $\lambda > 1 \mu\text{m}$ . Показатель  $a$  в экспоненте соответственно принимает значения 0.5641 для  $\lambda < 1 \mu\text{m}$  и 0.7070 для  $\lambda > 1 \mu\text{m}$ .

### 1.2.5. Поглощение парами воды ( $i = 5$ )

Коэффициент прохождения  $T_5(\lambda, \theta_s)$  в случае поглощения излучения парами воды описывается следующей формулой:

$$T_5(\lambda, \theta_s) = \exp\left[-([m_5(\theta_s)u_5]^{1.05} f_w^n B_w \alpha_5(\lambda))^c\right], \quad (19)$$

где  $m_5(\theta_s)$  — оптическая масса водяного пара,  $\alpha_5(\lambda)$  — табулированный в приложении к [5] спектральный коэффициент поглощения для паров воды,  $u_5$  — эффективная

**Таблица 3.** Коэффициенты  $c_i$  и  $d_i$ , входящие в выражение для  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$

Условия	Коэффициенты						
	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$
Сельские	0.581	16.823	17.539	0.8547	78.696	0	54.416
Городские	0.2595	33.843	39.524	1.0	84.254	-9.1	65.458
Морские	0.1134	0.8941	1.0796	0.04435	1.6048	0	1.5298
Тропосферные	0.6786	13.899	13.313	1.8379	14.912	0	5.96

длина пути (высота столба преципитата паров воды),

$$f_w = k_w [0.394 - 0.26946 \lambda + (0.46478 + 0.23757 \lambda) P], \quad (20)$$

где  $P = p/p_0$ , (значения  $p$  рассчитываются по табл. 1),  $k_w = 1$  для  $\lambda < 0.67 \mu\text{m}$  и  $k_w = (0.98449 + 0.0023889 \lambda) u_5^q$  для  $\lambda > 0.67 \mu\text{m}$ ,  $q = -0.02454 + 0.037533 \lambda$ . Степенные показатели  $n$  и  $c$  в (19) выражаются как

$$n = 0.88631 + 0.025274 \lambda - 3.5949 \exp(-4.5445 \lambda), \quad (21)$$

$$c = 0.53851 + 0.003262 \lambda + 1.5244 \exp(-4.2892 \lambda). \quad (22)$$

Корректирующий множитель  $B_w$  равен

$$B_w = h(m_5 u_5) \exp(0.1916 - 0.0785 m_5 + 4.706 \cdot 10^{-4} m_5^2), \quad (23)$$

где

$$h(m_5 u_5) = 0.624(m_5 u_5)^{0.457}, \quad \text{если } \alpha_5(\lambda) < 0.01,$$

$$h(m_5 u_5) = (0.525 + 0.246 m_5 u_5)^{0.45}, \quad \text{если } \alpha_5(\lambda) > 0.01. \quad (24)$$

### 1.2.6. Аэрозольная экстинкция ( $i = 6$ )

Коэффициент прохождения  $T_6(\lambda, \theta_s)$ , связанный с аэрозолями, описывается следующей формулой:

$$T_6(\lambda, \theta_s) = \exp[-m_6(\theta_s) \beta_i \lambda^{-\alpha_i}], \quad (25)$$

где  $\alpha_i = \alpha_1$ , если  $\lambda < \lambda_0$  ( $\lambda_0 = 0.5 \mu\text{m}$ ), и  $\alpha_1 = \alpha_2$ , если  $\lambda > \lambda_0$ ,

$$\alpha_1 = (c_1 + c_2 X_{rh}) / (1 + c_3 X_{rh}),$$

$$\alpha_2 = (d_1 + d_2 X_{rh} + d_3 X_{rh}^2) / (1 + d_4 X_{rh}),$$

$$X_{rh} = \cos(0.9RH), \quad (26)$$

где относительная влажность  $RH$  рассчитывается по табл. 1, а коэффициенты  $c_i$  и  $d_i$  приведены в табл. 3. Для  $\beta_i$  имеют место следующие выражения:

$$\beta_i = \beta_1 = 2^{\alpha_2 - \alpha_1} \beta, \quad \text{если } \lambda < \lambda_0,$$

$$\text{и } \beta_i = \beta_2 = \beta, \quad \text{если } \lambda > \lambda_0,$$

$$\beta = 0.55^{\alpha_2} [1.3307(V_r^{-1} - V_m^{-1})^{0.614} + 3.4875(V_r^{-1} - V_m^{-1})], \quad (27)$$

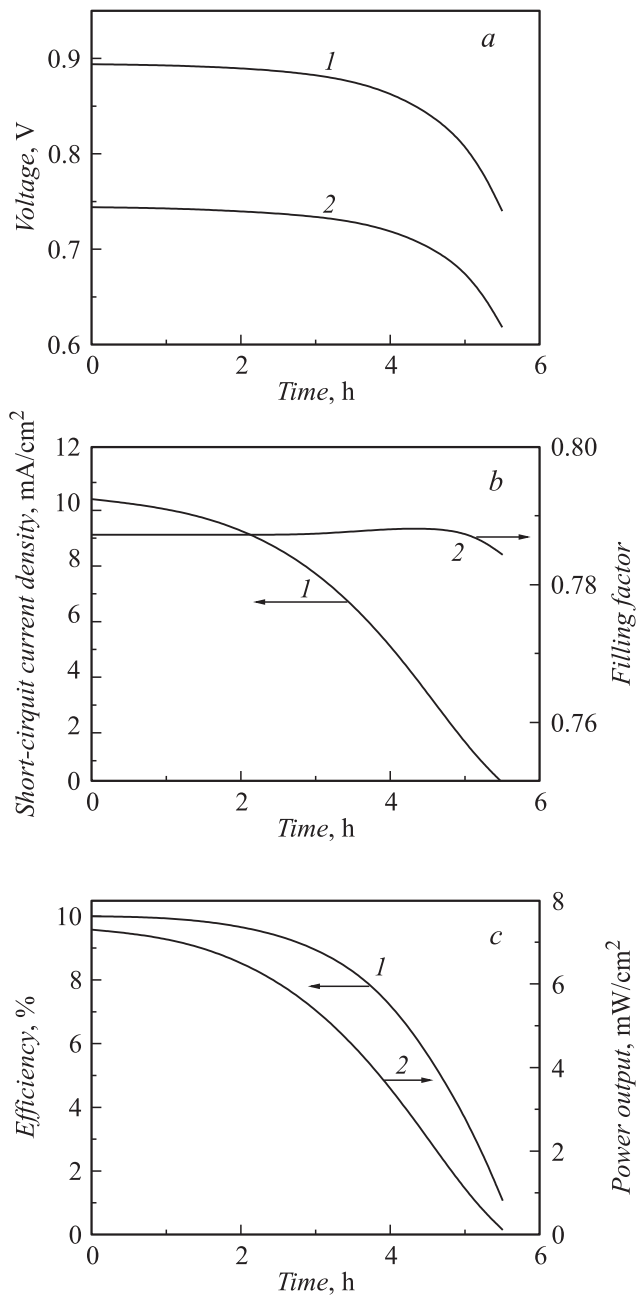
где  $V_m = 340.85 \text{ km}$  — теоретическое значение максимальной метеорологической дальности, теоретическое соотношение между метеорологической дальностью  $V_r$  и видимостью  $V$  имеет вид

$$V_r = \ln(0.02) / \ln(0.05) V = 1.306V. \quad (28)$$

В реальных условиях коэффициент при видимости  $V$  в (28) может варьироваться от 1.0 до 1.6. Видимость  $V$  сообщается метеорологическими службами аэропортов (как и относительная влажность, давление и прочие характеристики). Для сельской местности реальной является величина  $V_r = 25 \text{ km}$  ( $V = 19 \text{ km}$ ).

## 2. Результаты расчетов

Расчеты временных (угловых) зависимостей характеристик СЭ на базе  $a\text{-Si:H}$  были проведены для следующего набора основных параметров: широта  $\alpha = 45^\circ$ , высота над уровнем моря  $z = 0$ , тип атмосферы — весенняя, номер дня начиная с 22 марта — 0, угол между осью  $X_m$  и направлением „пальцев“ контактной сетки на поверхности СЭ  $\delta = 0^\circ$ , длина пути для тропосферного  $\text{NO}_2$   $u_{tr} = 0 \text{ atm}\cdot\text{cm}$ , видимость  $V = 19 \text{ km}$ , параметры для аэрозольной экстинкции соответствуют случаю сельской местности, содержание водорода в  $a\text{-Si:H}$   $[\text{H}] = 10\%$ , толщина  $p^+$ -слоя  $d_p = 0.24 \mu\text{m}$ , толщина  $i(n)$ -слоя  $d = 0.6 \mu\text{m}$ , толщина технологического  $n^+$ -слоя  $d_n = 0.02 \mu\text{m}$ , толщина слоя ИТО  $d_{\text{ИТО}} = 0.4 \mu\text{m}$ , толщина покрытия  $\text{SiO}_2$   $d_{\text{SiO}_2} = 0.09 \mu\text{m}$ , коэффициент металлизации фронтальной поверхности СЭ „пальцами“ контактной сетки  $m = 0.05$ , ширина „пальцев“ контактной сетки на фронтальной поверхности СЭ  $L_F = 0.02 \mu\text{m}$ , концентрация дырок в ИТО  $n_{p^{\text{ИТО}}} = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , плотность тока насыщения  $j_s = 10^{-12} \text{ A/cm}^{-2}$ , фактор неидеальности  $r = 1.5$ , подвижность фотоэлектронов в  $p^+$ -слое  $\mu_n^p = 2 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ , подвижность электронов в  $i(n)$ -слое  $\mu_n^{i(n)} = 2 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ , время жизни фотоэлектронов в  $p^+$ -слое  $\tau_n^p = 10^{-7} \text{ s}$ , время жизни электронов в  $i(n)$ -слое  $\tau_n^{i(n)} = 10^{-7} \text{ s}$ , скорость поверхностной рекомбинации электронов на фронтальной поверхности СЭ  $S_0 = 100 \text{ cm/s}$ , подвижность фотодырок в  $i(n)$ -слое  $\mu_p^{i(n)} = 0.3 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ , подвижность дырок в  $p^+$ -слое  $\mu_p^{(p)} = 0.3 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ , время жизни фотодырок в  $i(n)$ -слое  $\tau_p^{i(n)} = 10^{-5} \text{ s}$ , время жизни фотодырок в



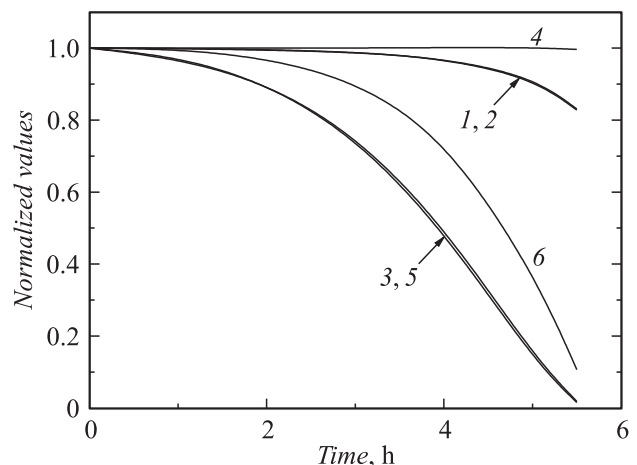
**Рис. 3.** Абсолютные изменения характеристик СЭ на протяжении половины светового дня: *a* — напряжение разомкнутой цепи (кривая 1) и фотонапряжение в условиях максимальной отбираемой мощности (кривая 2), *b* — ток короткого замыкания (кривая 1) и фактор заполнения ВАХ (кривая 2), *c* — КПД фотопреобразования (кривая 1) и выходная мощность (кривая 2).

$p^+$ -слое  $\tau_p^{(p)} = 10^{-5}$  s, скорость поверхностной рекомбинации дырок на тыльной поверхности СЭ  $S_d = 10$  cm/s, подвижность дырок в слое ПТО  $\mu_p^{\text{ITO}} = 25$  cm<sup>2</sup>/(V·s), концентрация доноров в  $i(n)$ -области  $N_{D0} = 10^{17}$  cm<sup>-3</sup>, глубина залегания максимума гауссовского распределения донорных состояний по энергии  $E_D = 0.3$  eV,

среднеквадратичная ширина распределения донорных состояний по энергии  $\sigma_D = 0.1$  eV, концентрация акцепторов в  $p^+$ -области  $N_{A0} = 10^{19}$  cm<sup>-3</sup>, глубина залегания максимума гауссовского распределения акцепторных состояний по энергии  $E_A = 0.2$  eV, среднеквадратичная ширина распределения акцепторных состояний по энергии  $\sigma_A = 0.1$  eV, характеристическая энергия хвоста  $N_{ct}(E) = N_{ct0} \exp[(E - E_g)/E_{c0}]$  акцептороподобных состояний зоны проводимости в запрещенной зоне  $E_{c0} = 0.025$  eV, характеристическая энергия хвоста  $N_{vt}(E, T) = N_{vt0} \exp[-E/E_{v0}(T)]$  донороподобных состояний валентной зоны в запрещенной зоне  $E_{v0}(300 \text{ K}) = 0.045$  eV, корреляционная энергия для обусловленных оборванными связями глубоких дефектных состояний  $u = 0.2$  eV, эффективная масса электрона в  $a$ -Si:H  $m_e = 2.78 m_0$ , эффективная масса дырки в  $a$ -Si:H  $m_h = 2.34 m_0$ .

На рис. 3 и 4 соответственно приведены абсолютные и относительные временные изменения на протяжении половины светового дня таких характеристик солнечных элементов на основе  $a$ -Si:H, как ток короткого замыкания, напряжение разомкнутой цепи, фотонапряжение в условиях максимальной отбираемой мощности, фактор заполнения ВАХ, выходная мощность и КПД. Относительные величины получены делением абсолютных величин на значения, реализующиеся в 12 h дня. Как показали теоретические оценки, полученные зависимости для относительных изменений с точностью не хуже 5% справедливы и для других солнечных элементов, если их КПД находится в диапазоне от 7 до 20%.

Таким образом, в настоящей работе развит теоретический подход к расчету временных зависимостей ключевых характеристик солнечных элементов на основе  $a$ -Si:H в течение светового дня в любой из дней



**Рис. 4.** Относительные изменения характеристик СЭ на протяжении половины светового дня: 1 — напряжение разомкнутой цепи, 2 — фотонапряжение в условиях максимальной отбираемой мощности, 3 — ток короткого замыкания, 4 — фактор заполнения ВАХ, 5 — выходная мощность, 6 — КПД фотопреобразования.

года. Конкретная иллюстрация полученных результатов приведена для дней равноденствия. Показано, что относительные временные зависимости приведенных характеристик справедливы и для солнечных элементов на основе других полупроводников.

## Список литературы

- [1] *Kryuchenko Yu.V., Sachenko A.V., Bobyl A.V., Kostilyov V.P.* et al. // *Semicond. Phys. Quant. Electron. and Optoelectron.* 2012. Vol. 15. N 2. P. 91–116.
- [2] *Biometeorology, ESPM 129, Lecture 9, Solar Radiation, Part 2, Earth-Sun Geometry,*  
<http://nature.berkeley.edu/biometlab/espm129/pdf/Lecture%209%20espm%20129.pdf>.
- [3] *Solar Concepts,* [http://www.usc.edu/dept/architecture/mbs/tools/vrsolar/Help/solar\\_concepts.html](http://www.usc.edu/dept/architecture/mbs/tools/vrsolar/Help/solar_concepts.html).
- [4] <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/ASTMG173.html>;  
[http://www.lehigh.edu/imi/docs\\_pitt/pdf\\_Pitt/T2f\\_Fangman.pdf](http://www.lehigh.edu/imi/docs_pitt/pdf_Pitt/T2f_Fangman.pdf).
- [5] *Christian Gueymard, SMARTS2: A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: algorithms and performance assessment (1995),*  
<http://www.fsec.ucf.edu/en/publications/pdf/FSEC-PF-270-95.pdf>.