

Моделирование натуральных характеристик вертикальных тандемных солнечных элементов $a\text{-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$.

2. Анализ результатов и сравнение с экспериментом

© Ю.В. Крюченко, А.В. Саченко[†], А.В. Бобыль^{*†}, В.П. Костылев, Е.И. Теруков^{**},
А.С. Абрамов^{**}, В.Н. Вербицкий^{*}, С.А. Кудряшов^{*},
К.В. Емцев^{*}, И.О. Соколовский

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины,
03028 Киев, Украина

^{*} Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

[†] НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе,
194064 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 27 октября 2014 г. Принята к печати 7 ноября 2014 г.)

На основе общих соотношений, полученных в наших предыдущих работах, выполнен расчет и анализ фотовольтаических характеристик модельного тандемного солнечного элемента $a\text{-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$. Произведено сравнение экспериментальных и теоретических вольт-амперных характеристик (ВАХ) тандемных солнечных элементов как в условиях освещения $\text{AM1.5G}(1000 \text{ Вт/м}^2)$, так и в темновых условиях. Показано, что результаты теоретических расчетов достаточно хорошо согласуются с результатами эксперимента. Для широты 45N построены годовые почасовые зависимости фактора неидеальности ВАХ тандемного солнечного элемента, плотности тока насыщения диодной составляющей его ВАХ, напряжения разомкнутой цепи, тока короткого замыкания, выходной мощности, коэффициента полезного действия (кпд) и фактора заполнения ВАХ. Сравнение относительных изменений этих параметров на протяжении светового дня в день равноденствия с ранее рассчитанными аналогичными изменениями в случае СЭ на основе $a\text{-Si:H}$ показало, что они практически совпадают в соответствии со сделанными нами ранее предположениями. Соответственно остаются в силе и рекомендации относительно целесообразности строительства в тех или иных регионах солнечных электростанций, которые были сделаны нами ранее на основе расчетов годовых объемов энергии, производимой единицей площади СЭ $a\text{-Si:H}$ с учетом статистических трехчасовых помесечных данных NASA по облачности, температуре, влажности и другим параметрам.

1. Введение

В первой части данной работы [1] была развита общая модель, которая позволяет рассчитывать плотности токов короткого замыкания (ПТКЗ) и напряжения холостого хода для отдельных компонент тандемного СЭ при произвольных углах падения солнечного излучения на тандемный СЭ $a\text{-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$. На основе этих результатов становится возможным расчет плотностей токов насыщения и факторов неидеальности диодных составляющих ВАХ как отдельных компонент тандемного СЭ, так и тандемного СЭ в целом. Это в свою очередь позволяет рассчитать все фотовольтаические характеристики такого тандемного СЭ. В данной работе проведен расчет для модельного тандемного СЭ в условиях $\text{AM1.5G}(1000 \text{ Вт/м}^2)$, а также в условиях движения Солнца по небосклону в случае нахождения СЭ на широте 45N . Показано, что результаты расчетов для условий AM1.5G достаточно хорошо согласуются с результатами эксперимента на реальных тандемных СЭ $a\text{-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$.

2. Расчет фотовольтаических параметров модельного тандемного СЭ $a\text{-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$

В первой части данной работы [1] для оптимизированного в условиях AM1.5G модельного тандемного СЭ $a\text{-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$ были рассчитаны плотности токов короткого замыкания (ПТКЗ) $j_{\text{SC},1} = j_{\text{SC},a\text{-Si:H}} = 10.2 \text{ мА/см}^2$ и $j_{\text{SC},2} = j_{\text{SC},\mu\text{c-Si:H}} = 17.85 \text{ мА/см}^2$ отдельных компонент тандемного СЭ и $j_{\text{SC}} = 11.76 \text{ мА/см}^2$ тандемного СЭ в целом, а также напряжения холостого хода $V_{\text{OC},1} = V_{\text{OC},a\text{-Si:H}} = 0.775 \text{ В}$ и $V_{\text{OC},2} = V_{\text{OC},\mu\text{c-Si:H}} = 0.564 \text{ В}$. Значения $V_{\text{OC},1}$ и $V_{\text{OC},2}$ были определены на основе решения уравнения генерационно-рекомбинационного баланса для k -й компоненты многокомпонентного (в том числе и тандемного) СЭ в приближении „эффективного“ двухуровневого донорно-акцепторного описания, которое имеет вид [2]

$$J_{\text{SC},k} = q \left[\frac{D_k}{L_k} \tanh\left(\frac{d_k}{L_k}\right) + S_k \right] \Delta p_k^* + q V_{\text{SC},k} (\Delta p_k^*) \Delta p_k^*, \quad (1)$$

где все обозначения и величины те же, что и в формуле (14) первой части данной работы [1]. В случае усло-

[†] E-mail: sach@isp.kiev.ua

^{*†} E-mail: boby1@theory.ioffe.ru

вий AM1.5G в результате решения уравнения (1) относительно эффективной концентрации избыточных дырок Δp_k^* были получены значения $\Delta p_1^* = 0.68 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$ и $\Delta p_2^* = 0.3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и, таким образом, полностью определены обе составляющие ПТКЗ в правой части (1).

С другой стороны, формулу (1) можно представить в виде [2]

$$J_{SC,k} = j_{0,k}^{(1)} \exp\left(\frac{qV_{OC,k}}{k_B T}\right) + j_{0,k}^{(2)} \exp\left(\frac{qV_{OC,k}}{2k_B T}\right). \quad (2)$$

В результате, для $a\text{-Si:H}$ в условиях AM1.5G имеем

$$\begin{aligned} q\left[\frac{D_1}{L_1} \tanh\left(\frac{d_1}{L_1}\right) + S_1\right] \Delta p_1^* &= 0.363 \cdot 10^{-7} \text{ А/см}^2 \\ &= j_{0,1}^{(1)} \exp\left(\frac{qV_{OC,1}}{k_B T}\right), \end{aligned} \quad (3)$$

$$qV_{SC,1} \Delta p_1^* = 0.106 \cdot 10^{-1} \text{ А/см}^2 = j_{0,1}^{(2)} \exp\left(\frac{qV_{OC,1}}{2k_B T}\right), \quad (4)$$

а для $\mu\text{-Si:H}$

$$\begin{aligned} q\left[\frac{D_2}{L_2} \tanh\left(\frac{d_2}{L_2}\right) + S_2\right] \Delta p_2^* &= 0.509 \cdot 10^{-2} \text{ А/см}^2 \\ &= j_{0,2}^{(1)} \exp\left(\frac{qV_{OC,2}}{k_B T}\right), \end{aligned} \quad (5)$$

$$qV_{SC,2} \Delta p_2^* = 0.115 \cdot 10^{-1} \text{ А/см}^2 = j_{0,2}^{(2)} \exp\left(\frac{qV_{OC,2}}{2k_B T}\right). \quad (6)$$

Из (3)-(6) легко находятся плотности токов насыщения $j_{0,k}^{(1)}$ и $j_{0,k}^{(2)}$ диодных составляющих j - V -характеристики

$$j_k(V) = -j_{SC,k} + j_{0,k}^{(1)} \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) + j_{0,k}^{(2)} \exp\left(\frac{qV}{2k_B T}\right) \quad (7)$$

для k -й компоненты СЭ. Второе и третье слагаемые в (7) являются вкладами областей вне ОПЗ и непосредственно ОПЗ, соответственно. Однако, для дальнейших расчетов предпочтительнее использовать одноэкспоненциальные диодные характеристики с соответствующими коэффициентами неидеальности m_k . Это означает, что сумма двух последних слагаемых в (7) должна быть выражена в виде

$$j_{0,k}^{(1)} \exp\left(\frac{qV}{2k_B T}\right) + j_{0,k}^{(2)} \exp\left(\frac{qV}{2k_B T}\right) = j_{0,k} \exp\left(\frac{qV}{m_k k_B T}\right). \quad (8)$$

Фактически формула (8) является уравнением для определения плотности тока насыщения $j_{0,k}$ и фактора неидеальности m_k диодной характеристики k -й компоненты последовательного многокомпонентного СЭ. Если бы выполнялось неравенство $j_{0,k}^{(1)} \exp(qV/k_B T) \gg j_{0,k}^{(2)} \exp(qV/2k_B T)$, то можно было

бы однозначно записать $J_{0,k} = J_{0,k}^{(1)}$, $m = 1$. И наоборот, если бы выполнялось неравенство

$$j_{0,k}^{(2)} \exp(qV/2k_B T) \gg j_{0,k}^{(1)} \exp(qV/k_B T),$$

то можно было бы однозначно записать $j_{0,k} = j_{0,k}^{(2)}$, $m_k = 2$. Однако в общем случае, когда соотношение между этими двумя слагаемыми произвольное, уравнение (8) само по себе не дает возможности определить $j_{0,k}$ и m_k однозначно. Поэтому необходимо записать еще одно уравнение. Для этого воспользуемся тем обстоятельством, что в окрестности $T = 300 \text{ К}$ предэкспоненциальные множители (плотности токов насыщения $j_{0,k}^{(1)}$, $j_{0,k}^{(2)}$ и результирующая плотность $j_{0,k}$), по идее, должны зависеть от температуры слабее, чем соответствующие экспоненты, при которых они стоят. Тогда, дифференцируя (8) по температуре, получим

$$\begin{aligned} j_{0,k}^{(1)} \exp\left(\frac{qV_{OC,k}}{k_B T}\right) + \frac{1}{2} j_{0,k}^{(2)} \exp\left(\frac{qV_{OC,k}}{2k_B T}\right) \\ \approx \frac{1}{m_k} j_{0,k} \exp\left(\frac{qV_{OC,k}}{m_k k_B T}\right) = \frac{j_{SC,k}}{m_k}, \end{aligned} \quad (9)$$

откуда

$$m_k = \left[\frac{j_{0,k}^{(1)}}{j_{SC,k}} \exp\left(\frac{qV_{OC,k}}{m_k k_B T}\right) + \frac{1}{2} \frac{j_{0,k}^{(2)}}{j_{SC,k}} \exp\left(\frac{qV_{OC,k}}{2k_B T}\right) \right]^{-1}. \quad (10)$$

Для области $a\text{-Si:H}$ формула (10) в условиях AM1.5G дает значение $m_1 = 2.00$, а для $\mu\text{-Si:H}$ — $m_2 = 1.67$. Близкие значения фактора неидеальности m_2 для $\mu\text{-Si:H}$ фигурируют и в других работах (см., например, данные, приведенные в табл. 1 работы [3]).

Найдя значения m_k , можно рассчитать и плотности токов насыщения $j_{0,k}$:

$$j_{0,k} = j_{SC,k} \exp(-qV_{OC,k}/m_k k_B T). \quad (11)$$

Для области $a\text{-Si:H}$ формула (11) в условиях AM1.5G дает значение $j_{0,1} = 0.318 \cdot 10^{-8} \text{ А/см}^2$, а для $\mu\text{-Si:H}$ — $j_{0,2} = 0.375 \cdot 10^{-7} \text{ А/см}^2$.

Напряжение разомкнутой цепи V_{OC} тандемного СЭ в целом находится из общей формулы для n последовательно соединенных СЭ [4]:

$$V_{OC} = \frac{k_B T}{q} \sum_{k=1}^n \ln\left(\frac{j_{SC}}{j_{0,k}}\right)^{m_k}, \quad (12)$$

где j_{SC} — плотность тока короткого замыкания всего тандемного СЭ. В условиях AM1.5G имеем

$$\begin{aligned} V_{OC} = V_{OC,1} + V_{OC,2} + k_B T/q [m_1 \ln(j_{SC}/j_{SC,1}) \\ + m_2 \ln(j_{SC}/j_{SC,2})] = 1.337 \text{ В}. \end{aligned} \quad (13)$$

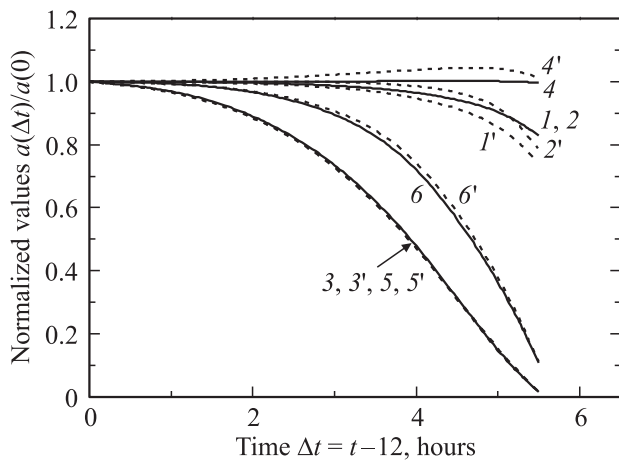


Рис. 1. Относительные изменения фотовольтаических характеристик солнечных элементов на протяжении половины светового дня в день равноденствия. Кривые (1–6) соответствуют СЭ *a-Si:H*, кривые (1'–6') — тандемному СЭ *a-Si:H/μc-Si*. Кривые 1, 1' — напряжение разомкнутой цепи, 2, 2' — фотонапряжение в условиях максимальной отбираемой мощности, 3, 3' — ток короткого замыкания, 4, 4' — фактор заполнения ВАХ, 5, 5' — выходная мощность, 6, 6' — КПД фотопреобразования. Расчет для широты 45N, высоты $h = 0$ над уровнем моря.

Фактор неидеальности m и плотность тока насыщения j_0 диодной составляющей ВАХ $j(V) = -j_{SC} + j_0 \exp(qV/mk_B T)$ тандемного СЭ *a-Si:H/μc-Si:H* определяются как $m = m_1 + m_2$ и $j_0 = (j_{0,1}^{m_1} j_{0,2}^{m_2})^{1/(m_1+m_2)}$ [4] соответственно. В результате в условиях AM1.5G имеем $m = 3.67$, $j_0 = 0.98 \cdot 10^{-8}$ А/см².

Определив таким образом коэффициент неидеальности и плотность тока насыщения диодной характеристики тандемного СЭ *a-Si:H/μc-Si:H* в целом, можно рассчитать и все его ключевые фотовольтаические характеристики. В результате расчета были получены значения $\eta = 11.69\%$ для эффективности фотопреобразования, $P_{opt} = 9.92$ мВт/см² для оптимальной генерируемой мощности и $FF = 0.64$ для фактора заполнения в условиях AM1.5G.

Все вышеприведенные формулы и методика расчета справедливы и при произвольных углах падения прошедшего сквозь атмосферу солнечного излучения AM0 на поверхность СЭ (т.е. при произвольных атмосферных массах AM). Используя подход, описанный в наших предыдущих работах [5–8], мы рассчитали временные зависимости основных вольтаических характеристик тандемного СЭ *a-Si:H/μc-Si:H* на протяжении половины светового дня в день равноденствия, а также на протяжении всего годового цикла на широте 45N. При этом для определения угла падения солнечного излучения на земную поверхность и соответствующего азимутального угла в процессе движения Солнца по небосклону (что в совокупности дает возможность определить угол падения солнечных лучей на поверхность

СЭ) мы воспользовались в данной работе формулами, приведенными в [9], которые являются более точными и удобными для расчетов, чем те, что использовались в [5–8].

Для сравнения, на рис. 1 представлены относительные временные изменения на протяжении половины светового дня в день равноденствия на широте 45N таких характеристик тандемного СЭ *a-Si:H/μc-Si:H* и СЭ *a-Si:H* (в последнем случае — по результатам нашей предыдущей работы [6]), как ток короткого замыкания, напряжение разомкнутой цепи, фотонапряжение в условиях максимальной отбираемой мощности, фактор заполнения ВАХ, выходная мощность и КПД фотопреобразования. Относительные величины получены делением абсолютных величин на значения, реализующиеся в 12 часов дня (это время соответствует моменту нахождения Солнца в зените). Нормаль к поверхности СЭ полагалась направленной в точку нахождения Солнца в зените в день равноденствия, т.е. угол между нормалью к СЭ и нормалью к земной поверхности в месте нахождения СЭ составлял 45°.

При расчетах временных зависимостей фотовольтаических характеристик необходимо знание глобального (G) спектра падающего излучения, который состоит из спектра прошедшего сквозь атмосферу прямого (D) солнечного излучения AM0 и диффузионного спектра, обусловленного рассеянием солнечных лучей в атмосфере. При расчетах коэффициентов поглощения, а также всех коэффициентов отражения и прохождения лучей внутри СЭ следует учитывать, что для прямой компоненты солнечного излучения угол падения на СЭ зависит от угла падения солнечного излучения на земную поверхность в месте нахождения СЭ, а для диффузионной компонен-

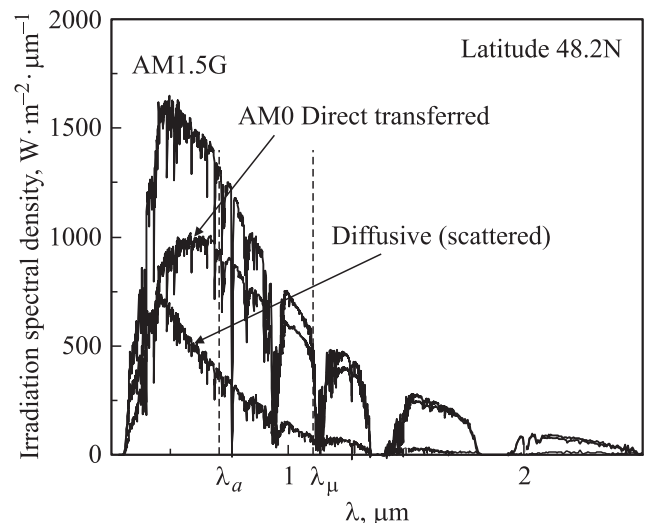


Рис. 2. Сопоставление прошедшего сквозь атмосферу спектра прямого солнечного излучения (D) в 12 часов дня в день равноденствия на широте 48,2° с табулированным спектром AM1.5G. Разница между ними — диффузионная компонента спектра AM1.5G. Вертикальные штриховые линии — границы щелей подвижности в *a-Si:H* и $\mu c-Si:H$.

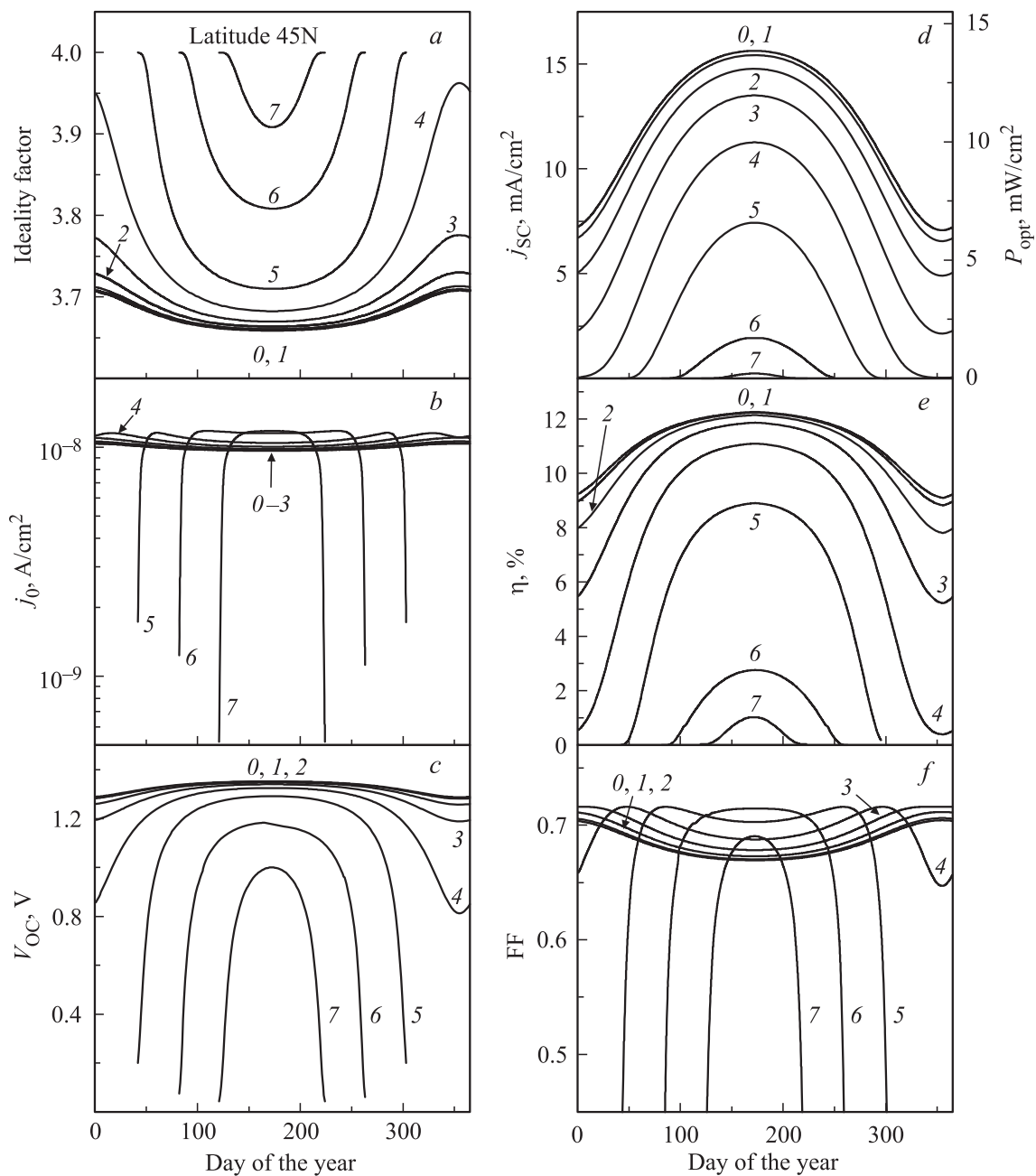


Рис. 3. Годовые зависимости коэффициента неидеальности ВАХ (а), плотности тока насыщения j_0 (b), напряжения разомкнутой цепи V_{OC} (c), плотности тока короткого замыкания j_{sc} и оптимальной генерируемой мощности P_{opt} (d), КПД фотопреобразования η (e) и фактора заполнения ВАХ FF (f) тандемного СЭ $a\text{-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$ на широте 45N; цифры при кривых соответствуют величинам $\Delta t = t - 12$, где t — время суток.

ты — не зависит. Для диффузионной компоненты, строго говоря, необходимо проводить усреднение по всем углам с использованием второй части работы [10], однако это требует знания большого количества дополнительных параметров (которые не всегда могут быть заданы) и большого объема вычислений. В данной работе, как и во всех предыдущих, мы использовали упрощенный вариант с использованием только первой части работы [10], позволяющей рассчитывать прошедший сквозь атмосферу спектр прямого солнечного излучения, а для

„эффективной“ диффузионной компоненты излучения угол падения на СЭ полагался равным нулю вне зависимости от угла падения солнечного излучения на земную поверхность. Сам спектр падающего на СЭ „эффективного“ диффузионного излучения при произвольных временах рассчитывался в этом приближении следующим образом. Согласно [10] проводился расчет спектра прошедшего сквозь атмосферу прямого солнечного излучения на широте 48.2N в 12 часов дня в день равноденствия и проводилось его сопоставление с

известным табулированным спектром глобального солнечного излучения AM1.5(G), который соответствует именно этим условиям. Разность между этими двумя спектрами дает спектр „эффективного“ диффузионного излучения на этой широте. Результат сопоставления представлен на рис. 2 (вертикальными штриховыми линиями отмечены границы фотогенерации в $a\text{-Si:H}$ и $a\text{-Si:H}/\mu\text{s-Si:H}$, т. е. границы щелей подвижности).

Далее для каждой i -й длины волны $\lambda(i)$ из 1882, для которых табулирован спектр AM0 в [10], находились коэффициенты соответствия $c(i)$ между полученным диффузионным спектром и прошедшим сквозь атмосферу спектром AM0 путем деления спектральной величины первого на спектральную величину второго. Эти коэффициенты соответствия в первом приближении полагались сохраняющимися при произвольных углах падения солнечного излучения на земную поверхность (т. е. при нахождении СЭ на произвольных широтах, для произвольных дней в году и произвольного дневного времени). Таким образом, можно оценить вклад диффузионного излучения исходя из рассчитанного спектра прямого солнечного излучения, прошедшего сквозь атмосферу при произвольном положении солнца на небосклоне. При этом на широте 45N для дневных времен $|\Delta t| > 6$ ч, где $\Delta t = t - 12$ ($t = 12$ ч соответствует моменту нахождения Солнца в зените), прямое солнечное излучение при указанной ориентации СЭ на протяжении всего года не дает вклада в фотогенерацию, даже если световой день длится более 12 часов, так как эта компонента глобального излучения при таких временах падает на СЭ с тыльной стороны. Поэтому при $|\Delta t| > 6$ ч вплоть до момента восхода (захода) Солнца фотогенерацию на широте 45N обеспечивает диффузионная составляющая глобального спектра.

На рис. 3 для модельного тандемного СЭ $a\text{-Si:H}/\mu\text{s-Si:H}$ [1] показаны рассчитанные для широты 45N годовые почасовые зависимости коэффициента неидеальности m ВАХ, плотности тока насыщения j_0 диодной составляющей ВАХ ($j-V$), напряжения разомкнутой цепи V_{oc} , плотности тока короткого замыкания j_{sc} и оптимальной генерируемой мощности P_{opt} , КПД фотопреобразования η и фактора заполнения ВАХ FF .

3. Экспериментальные фотоэлектрические модули на основе $a\text{-Si:H}/\mu\text{s-Si:H}$ каскадов и анализ их характеристик

3.1. Формирование последовательных фотопреобразующих pin -каскадов $a\text{-Si:H}$ и $\mu\text{s-Si:H}$. Особенности технологического процесса

В качестве подложки для изготовления двухкаскадного фотоэлектрического модуля (ФЭМ) использовалось стекло с пониженным содержанием железа AGC Sunmax производства компании Asahi Glass Corporation.

На подложку методом осаждения из газовой фазы при пониженном давлении наносился слой оксида цинка (ZnO), легированного бором, выступавший в качестве фронтального прозрачного токосъема. Для осаждения использовался прототип промышленной установки TCO 1-1200 производства компании TEL Solar. Температура процесса составляла 190°C. В качестве прекурсоров при осаждении использовались металлорганическое соединение диэтилцинк (DEZ) и деионизованная вода. Для легирования ZnO в газовую фазу добавлялся диборан (B_2H_6). Технологические параметры процесса (температура подложки, давление в процессном модуле, потоки газов) были подобраны таким образом, что поверхностный рельеф слоя ZnO имел пирамидальный характер, а структура слоя являлась поликристаллической. Развитый поверхностный рельеф позволил получить высокие показатели светорассеяния слоя (до 30% на длине волны 600 нм). Характерная толщина слоев составляла 1600–1700 нм, значения удельного сопротивления составляли 15–18 Ом/см². Величина оптического пропускания в диапазоне длин волн 400–1100 нм составляла не менее 85%.

После осаждения лицевого токосъемного слоя осуществлялось его разделение на ячейки с помощью лазерного скрайбирования (абляции) P1 на установке LSS 1-1200 R & D производства компании TEL solar.

Формирование фотопреобразующих каскадов осуществлялось методом плазмохимического осаждения из газовой фазы на установках KAI 1-1200 R & D производства компании TEL Solar в плазме ВЧ разряда с частотой 40.68 МГц при температуре подложки 200°C. Для осаждения аморфного и микрокристаллического каскадов ФЭМ использовались две установки, отличающиеся дизайном некоторых компонентов реактора.

На подложку, поверх слоя ZnO, перед осаждением pin -каскада аморфной ячейки наносился тонкий (2–3 нм) контактный слой для уменьшения контактного сопротивления на барьере $n\text{-ZnO}/p\text{-a-Si}$. При осаждении p -слоя в состав газовой смеси добавлялся метан. Включение углерода позволило расширить ширину запрещенной зоны и уменьшить паразитное поглощение света в p -слое. Для создания диффузионного барьера, а также согласования ширины запрещенной зоны между p -слоем и собственным слоем осаждался тонкий (~ 10 нм) нелегированный буферный слой с более низким, чем в p -слое, содержанием углерода. При осаждении собственного слоя использовалась малая мощность ВЧ разряда (~ 12 мВт/см²) и, как следствие, низкая скорость осаждения (0.2 нм/с), что позволило получить слой высокого качества со значением микроструктурного фактора менее 0.2. Толщина собственного слоя аморфной ячейки составляла около 200 нм. В качестве n -слоя использовалась сложная периодическая структура, включавшая в себя легированный микрокристаллический нестехиометрический оксид кремния ($n\text{-}\mu\text{s-SiO}_x$). Использование оксидных слоев с показателем преломления $n \approx 2$, позволило сформировать промежуточный отражатель между верхней и нижней ячейкой и увеличить ток верхней

ячейки за счет поглощения отраженного от оксидных слоев света.

После осаждения верхнего перехода осуществлялось осаждение *pin*-структуры нижнего перехода. Для осаждения применялась система, аналогичная той, что была использована для осаждения аморфного перехода. Осаждение проводилось при температуре подложки 160°C. Осаждение собственного слоя микрокристаллического каскада осуществлялось с использованием двух различных рецептов: со стандартной мощностью ВЧ разряда и с пониженной на 15% мощностью разряда. Время осаждения собственного слоя при использовании рецепта с пониженной мощностью ВЧ разряда было увеличено приблизительно на 10% для сохранения толщины слоя на уровне 800–900 нм.

С помощью установки измерения спектров комбинационного (рамановского) рассеяния с использованием возбуждающего излучения на длине волны 532 нм измерялась степень кристалличности собственного слоя. Уменьшение мощности разряда привело к уменьшению степени кристалличности с 64 до 58%. В качестве материала *n*-слоя использовался микрокристаллический нестехиометрический оксид кремния. Использование оксидного материала с показателем преломления ниже показателя преломления микрокристаллического кремния позволило получить частичное отражение света от интерфейса *i/n*. Использование материала с низкой проводимостью также позволило минимизировать эффект шунтирования ячеек фотоэлектрического модуля по *n*-слою.

После осаждения фотопреобразующего каскада осуществлялась процедура лазерного скрайбирования *P2*, после которой осаждался слой тыльного токосъемного контакта. За осаждением тыльного контакта следовала последняя процедура лазерного скрайбирования *P3*. Последовательное осаждение слоев и применение процедур лазерного скрайбирования *P1*, *P2*, *P3* позволили сформировать последовательное монолитное электрическое соединение ячеек.

Для осаждения тыльного токосъемного слоя, как и для осаждения лицевого токосъемного слоя, использовалась установка ТСО 1-1200 производства компании TEL Solar. Параметры получаемого слоя оказались близки к параметрам лицевого токосъемного слоя, однако, удельное сопротивление тыльного контакта оказалось на 15–20% ниже лицевого.

Финишная сборка модулей состояла из следующих этапов: лазерная изоляция краев, нанесение токосъемных контактов, ламинация и герметизация, установка контактной коробки. В качестве капсулирующего материала использовалась пленка поливинилбутирала с коэффициентом отражения более 96% в оптическом диапазоне, которая также выполняет функцию тыльного отражателя. Полностью собранный модуль состоит из тыльного и фронтального стекла с капсулирующим материалом между ними, а также коммутационной коробкой с электрическими выводами.

3.2. Анализ фотовольтаических характеристик модулей из *pin*-каскадов *a-Si:H/μc-Si:H* и их сравнение с результатами, полученными на модельном тандемном СЭ

Для определения фотовольтаических характеристик сформированных модулей в условиях AM1.5G воспользуемся следующим обобщенным выражением при описании экспериментально измеренных световых ВАХ (*j–V*) таких модулей:

$$j(V) = j_{ph}(V) - j_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V - j(V)SR_s)}{mk_B T} \right] - 1 \right\}, \quad (14)$$

где $j_{ph} = j_{sc} - aV$ — плотность фототока, j_{sc} — плотность тока короткого замыкания, j_0 — плотность тока насыщения, S — площадь СЭ (модуля), R_s — последовательное сопротивление, m — коэффициент неидеальности. Здесь слагаемое aV учитывает уменьшение фототока при приложении прямого смещения из-за сокращения ОПЗ на *p–n*-переходах в *a-Si:H* и в микрокристаллическом кремнии. Выражение (14) является общим как для отдельного тандемного СЭ *a-Si:H/μc-Si:H*, так и для модуля, сформированного из идентичных последовательных каскадов *a-Si:H/μc-Si:H*.

Соответственно выражение для темновой ВАХ при прямом смещении может быть записано как

$$I(V) = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V - I(V)R_s)}{mk_B T} \right] - 1 \right\}, \quad (15)$$

где $I(V)$ — протекающий ток, I_0 — ток насыщения.

Применим выражение (14) для описания измеренной ВАХ модуля из 10 последовательно соединенных тандемных фотогенерирующих *pin*-каскадов *a-Si:H/μc-Si:H*. Практически полное согласие между экспериментом и теорией (см. рис. 4) достигается при следующих параметрах: $j_{sc} = 11.27 \text{ mA/cm}^2$, $a = 3.5 \cdot 10^{-2} \text{ mA/(B} \cdot \text{cm}^2)$, $j_0 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, $SR_s = 11 \text{ Ом} \cdot \text{cm}^2$, $m = 39.9$. При указанных параметрах расчетное напряжение разомкнутой цепи V_{oc} составляет 13.25 В и совпадает с экспериментальным значением. Фактор заполнения ВАХ при этом равен 0.713, а КПД равен 12%. Соответственно, в пересчете для модуля из одного тандемного СЭ *a-Si:H/μc-Si:H* плотности тока короткого замыкания j_{sc} и тока насыщения j_0 остаются теми же, что и для модуля из 10 последовательно соединенных СЭ *a-Si:H/μc-Si:H*, а величины m и V_{oc} уменьшаются в 10 раз и составляют 3.99 и 1.33 В. Последняя величина, как видно, весьма близка к V_{oc} , рассчитанному в условиях AM1.5G для модельного тандемного СЭ. То же самое можно сказать и о факторе заполнения ВАХ и КПД фотопреобразования. Наибольшие расхождения наблюдаются для плотности тока насыщения и параметра неидеальности. В частности, при самосогласованном расчете и вариации параметров модельной структуры в условиях AM1.5G получались значения m , лежащее в пределах 3.5–3.7, в то время как экспериментальная величина составила 4. Причина расхождения может быть связана с проявлением эффекта Стаблера-Вронского.

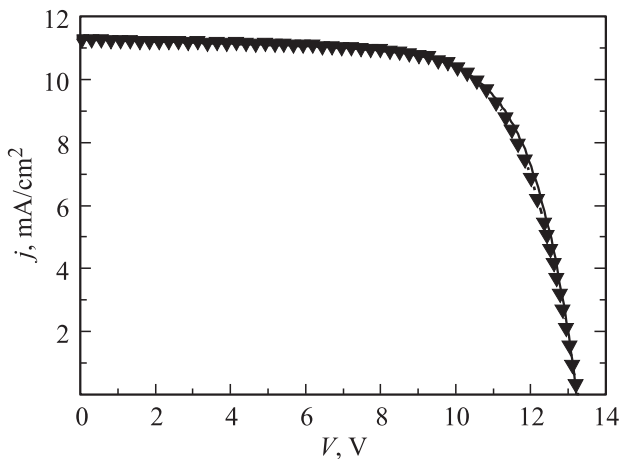


Рис. 4. Сопоставление экспериментальной (треугольники) и теоретической (сплошная кривая) зависимостей плотности тока от приложенного напряжения в условиях освещения AM1.5G для модуля из 10 последовательных тандемных СЭ $a\text{-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$.

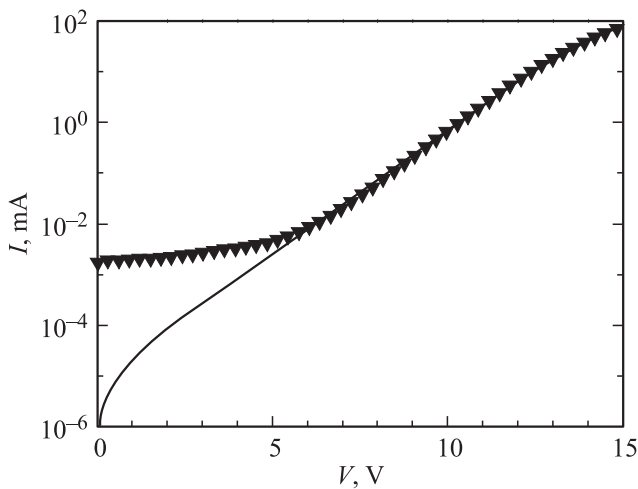


Рис. 5. Сопоставление экспериментальной (треугольники) и теоретической (сплошная кривая) зависимости темнового тока от приложенного напряжения для модуля из 10 последовательных тандемных СЭ $a\text{-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$.

На рис. 5 приведены экспериментальная и расчетная темновые ВАХ модуля из 10 солнечных элементов. Расчетная ВАХ построена по формуле (15) с использованием следующих параметров: $J_0 = 10^{-8}$ А, $R_s = 9$ Ом и $m = 34.5$. В этом случае хорошее согласие между экспериментом и теорией достигается лишь при $V > 6$ В. В области напряжений, меньших 5 В, экспериментальное значение $J(V)$ существенно превышает расчетное и слабо зависит от приложенного напряжения. Это свидетельствует о превалировании туннельной рекомбинации, которая не учтена в (15). Следует, однако, отметить, что в области напряжений, близких к V_{oc} , согласие между расчетной и экспериментальной кривыми хорошее, а значение фактора неидеальности, равное 3.45, близко к

величине, полученной для модельного СЭ в предположении, что существенны лишь объемная рекомбинация Шокли–Рида–Холла и рекомбинация в ОПЗ.

4. Заключение

Таким образом, в настоящей работе развит теоретический подход, позволяющий рассчитывать параметры тандемных СЭ на основе $a\text{-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$ не только в условиях освещения AM1.5G, но и при произвольных углах падения солнечного освещения на СЭ. В частном случае условий освещения AM1.5G проведено сопоставление развитой теории с экспериментом. Между результатами теоретических расчетов и экспериментальными данными наблюдается неплохое соответствие.

Рассчитаны годовые зависимости параметров тандемных СЭ на основе $a\text{-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$, в частности, для плотности тока короткого замыкания, выходной мощности и коэффициента полезного действия. Показано, что относительные изменения в течение дня ряда ключевых фотовольтаических характеристик СЭ на основе $a\text{-Si:H}$ и тандемных СЭ на основе $a\text{-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$ либо практически совпадают, либо весьма близки. Это подтверждает сделанное ранее в [4,5] предположение о том, что рекомендации относительно целесообразности строительства солнечных электростанций на основе СЭ $a\text{-Si:H}$ в различных регионах земного шара остаются в силе и для случая электростанций на основе других типов СЭ, если их кпд фотопреобразования лежит в диапазоне 7–20%.

Работа выполнена в рамках проекта Министерства образования и № 14.607.21.0075.

Список литературы

- [1] Ю.В. Крюченко, А.В. Саченко, А.В. Бобыль, В.П. Костылев, Е.И. Теруков, А.С. Абрамов, Е.В. Мальчукова, И.О. Соколовский. ФТП **49** (5), 697 (2015).
- [2] А.В. Саченко, В.П. Костылев, Н.Р. Кулиш, И.О. Соколовский, А.И. Шкретгий. ФТП, **48** (5), 693 (2014).
- [3] S. Reynolds, A. Gordijn, V. Smirnov. Energy Procedia, **44**, 192 (2014).
- [4] В.М. Андреев, В.В. Евстропов, В.С. Калиновский, В.М. Лантратов, В.П. Хвостиков. ФТП, **43** (5), 671 (2009).
- [5] Yu.V. Kryuchenko, A.V. Sachenko, A.V. Bobyl, V.P. Kostilyov, P.N. Romanets, I.O. Sokolovskiy, A.I. Shkrebtiy, E.I. Terukov. Semicond. Phys. Quant. Electron. Optoelectron., **15** (2), 91 (2012).
- [6] Ю.В. Крюченко, А.В. Саченко, А.В. Бобыль, В.П. Костылев, И.О. Соколовский, Е.И. Теруков, В.Н. Вербицкий, Ю.А. Николаев. ЖТФ, **83** (11), 78 (2013).
- [7] Ю.В. Крюченко, А.В. Саченко, А.В. Бобыль, В.П. Костылев, И.О. Соколовский, Е.И. Теруков, В.Н. Вербицкий, Ю.А. Николаев. ЖТФ, **83** (11), 86 (2013).
- [8] Yu.V. Kryuchenko, A.V. Sachenko, A.V. Bobyl, V.P. Kostilyov, I.O. Sokolovskiy, E.I. Terukov, S.Zh. Tokmoldin, A.V. Smirnov. Energy Policy, **68** (5), 116 (2014).

- [9] Photovoltaic Education Network. Доступно на: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunligh>.
- [10] C. Gueymard. SMARTS2: *A Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine: Algorithms and Performance Assessment* (1995). Доступно на: <http://www.fsec.ucf.edu/en/publications/pdf/FSEC-PF-270-95.pdf>.

Редактор Т.А. Полянская

Simulation of natural characteristics of vertical tandem $a\text{-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$ solar cells. 2. Analysis of the results and comparison with the experiment

Yu.V. Kryuchenko, A.V. Sachenko, A.V. Bobyl, V.P. Kostylyov, E.I. Terukov**+, A.S. Abramov**+, V.N. Verbitskiy*, K.V. Emtsev*, S.A. Kudryashov*, I.O. Sokolovs'kyi*

V.E. Lashkarev Institute of Semiconductor Physics,
National Academy of Sciences of Ukraine,
03028 Kiev, Ukraine

* Ioffe Physical-Technical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

+ R&D Center of Thin Film Technologies in Energetics
under Ioffe Institute,
194064 St. Petersburg, Russia

Abstract On the basis of the general relations obtained in our previous studies we have carried out the calculations and analysis of the photovoltaic characteristics of a model tandem $a\text{-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$ solar cell (SC). Comparison of experimental and theoretical current-voltage characteristics ($I-V$ curves) of tandem solar cells has been made both at AM1.5G (1000 W/m^2) illumination conditions and in the dark. It is shown, that the results of theoretical calculations are in quite good agreement with experimental ones. In the case of latitude 45N annual 1-hour step dependences have been obtained for the ideality factor of the tandem SC, the saturation current density of the diode component of its $I-V$ curve, the open circuit voltage, the short-circuit current, the optimal output power, the efficiency of photoconversion and the fill factor. Comparison of the relative changes in these parameters during the daylight hours at an equinox day with the previously calculated analogous changes in the case of $a\text{-Si:H}$ -based SCs has shown that these changes are practically the same in accordance with our assumptions made earlier. Respectively, the recommendations remain in force on the feasibility of solar power stations building in different regions, that have been made in our earlier studies based on the calculations of annual amounts of the energy produced by unit area of $a\text{-Si:H}$ SC with an account of NASA three-hour step monthly statistical data on cloudiness, temperature, humidity and other parameters.