

Исследование световой деградации tandemных α -Si:H/ μ c-Si:H солнечных фотопреобразователей

© В.М. Емельянов^{*†}, А.С. Абрамов^{*+}, А.В. Бобыль^{*}, А.С. Гудовских^{*}, Д.Л. Орехов[‡], Е.И. Теруков^{*+}, Н.Х. Тимошина^{*}, О.И. Честа^{*}, М.З. Шварц^{*+}

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

⁺ ООО „НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе“, 194064 Санкт-Петербург, Россия

[•] Санкт-Петербургский Академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

[‡] ООО „Хевел“,

123022 Москва, Россия

(Получена 13 августа 2012 г. Принята к печати 20 августа 2012 г.)

Исследована фотоиндуцированная деградация tandemных α -Si:H/ μ c-Si:H фотопреобразователей с начальным кпд 10.4% при плотностях потока падающего излучения 1 и 10 кВт/м² (AM1.5G). Установлено, что стабилизированное состояние достигается после 500 ч экспозиции при стандартной плотности потока излучения или после 300 минут при плотности, повышенной в 10 раз. Снижение кпд в обоих случаях составило 1.2–1.4 абс%. Из экспериментально измеренных спектральных и вольт-амперных характеристик фотопреобразователей определены значения времен жизни неравновесных носителей заряда и рассчитаны зависимости изменения концентрации свободных (оборванных) связей в слоях i - α -Si:H и i - μ c-Si:H. Аппроксимация зависимостей осуществлялась по модифицированной модели плавающих связей. Вычисленные значения концентраций свободных связей при различных длительностях экспозиции использовались при моделировании зависимостей параметров фотопреобразователей от времени светового воздействия. Полученные результаты показали хорошее согласование расчетных темпов деградации тока и кпд tandemного фотопреобразователя с экспериментальными данными.

1. Введение

Солнечные батареи на основе тонких пленок аморфного и микрокристаллического гидrogenизированного кремния в последние годы приобретают все большее распространение [1]. Рекордные значения кпд для однопереходных α -Si:H фотопреобразователей (ФП) составляют 10.1%, а для tandemных двухпереходных α -Si:H/ μ c-Si:H и трехпереходных α -Si:H/ μ c-Si:H/ μ c-Si:H ФП — 12.3 и 12.4% (AM1.5G) соответственно [2]. Несмотря на то, что кпд ФП на основе кристаллического кремния и материалов A^{III}B^V выше в 3–4 раза [2,3], именно тонкопленочные ФП позволяют получить наименьшую стоимость ватта вырабатываемой электроэнергии [4]. Это достигается, в первую очередь, за счет невысокой себестоимости таких фотопреобразователей, обусловленной относительной простотой технологией и малым расходом полупроводниковых материалов.

Характерной особенностью тонкопленочных ФП с аморфными слоями является постепенное снижение их фотоэлектрических характеристик при воздействии солнечного излучения, называемое фотоиндуцированной (световой) деградацией [5]. Этот процесс тесно связан с явлением снижения фотопроводимости α -Si:H пленок при их длительном освещении, который известен как эффект Стаблера–Вронского [6]. Типичное сниже-

ние кпд фотопреобразователей на основе аморфного и микрокристаллического кремния вследствие световой деградации составляет от 10 до 30%, в зависимости от числа субэлементов, толщин и химического состава фотоактивных слоев [7–10]. Теоретическое и экспериментальное изучение процессов световой деградации ФП позволяет установить основные механизмы, определяющие потери кпд ФП α -Si:H/ μ c-Si:H, и произвести оптимизацию структур фотопреобразователей для повышения стабильности их характеристик.

В данной работе решалась задача экспериментального и теоретического исследования фотоиндуцированной деградации ФП на основе tandemной структуры α -Si:H/ μ c-Si:H с двумя фотоактивными p – n переходами с начальным кпд 10.4%. Исследованные ФП были получены по технологии Oerlikon Solar Ltd (Швейцария).

2. Световые испытания тестовых образцов фотопреобразователей

Структуры для экспериментальных ФП получались на стеклянной полноразмерной (1300 × 1100 мм) подложке методом плазмохимического осаждения. Схематическое изображение структуры представлено на рис. 1.

Для исследования световой деградации структур изготавливались тестовые образцы ФП размером 100 × 100 мм, в которых методом лазерного скрайбирования выделялась фотоактивная часть размером

[†] E-mail: resso2003@bk.ru

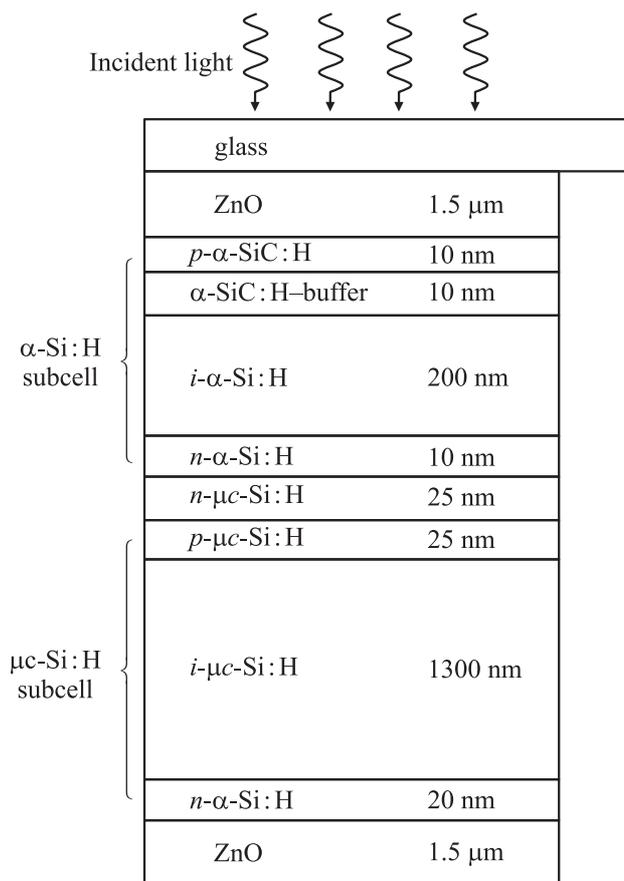


Рис. 1. Структура исследованных tandemных $\alpha\text{-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$ фотопреобразователей.

60×66 мм с площадью открытой поверхности 37.95 см^2 , состоящая из 10 фотоэлектрических ячеек равной площади, соединенных последовательно. Формирование контактов тестового образца осуществлялось путем приклеивания контактных полос серебросодержащей пастой. Затем сторона с контактами покрывалась ламинирующей пленкой на основе этиленвинилацетата, и тестовый образец подвергался термической обработке при температуре 150°C в течение 15–30 мин для полимеризации пленки.

Основной причиной деградации ФП на основе аморфного и микрокристаллического гидрогенизированного кремния при длительном воздействии света является рост в слоях из этих материалов числа ненасыщенных связей, которые являются дополнительными центрами безызлучательной рекомбинации [11,12]. Экспериментальная зависимость числа фотоиндуцированных рекомбинационных центров от количества падающих на фотопреобразователь в единицу времени фотонов G и времени светового воздействия t до момента достижения насыщения может быть выражена формулой [13]

$$N_r(t) \propto G^{2/3} t^{1/3}. \quad (1)$$

Из выражения (1) видно, что динамика изменения параметров пропорциональна квадрату интенсивности

облучения, т.е. при облучении светом с эквивалентной интенсивностью, равной 10 солнечным постоянным, время, необходимое для достижения стабилизации фотоэлектрических параметров фотопреобразователя, уменьшается в 100 раз.

Для исследования фотоиндуцированной деградации были отобраны тестовые образцы $\alpha\text{-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$ ФП с исходно близкими характеристиками, один из которых затем подвергался облучению светом со стандартной плотностью потока 1 кВт/м^2 (1 X), а второй — с повышенной 10 кВт/м^2 (10 X).

Для испытаний в условиях облучения 1 X был разработан и изготовлен специальный стенд на основе галогенной лампы Philips 13163/5H мощностью 250 Вт и сроком службы 500 ч. Испытания при 10 X проводились с использованием имитатора солнечного излучения ИС-160. Суммарная продолжительность светового воздействия составляла 1000 и 19 ч (эквивалент 1900 ч) для уровней освещенности 1 X и 10 X, соответственно. Перед испытаниями и по завершении их были измерены спектральные характеристики тестовых образцов (рис. 2). Регистрация вольт-амперных характеристик (ВАХ) тестовых образцов ФП проводилась периодически в процессе фотоиндуцированной деградации. Определенные из них фотоэлектрические параметры: ток короткого замыкания I_{sc} , напряжение холостого хода V_{oc} , фактор заполнения ВАХ FF и КПД представлены на рис. 3 символами.

Контроль темпа фотоиндуцированной деградации параметров ВАХ второго образца (освещенность 10 X) производился измерительными средствами лабораторной установки на основе имитатора ИС-160 непосредственно в процессе испытаний. Уменьшение уровня освещенности до 1 X производилось за счет отодвигания образца от осветителя. Вольт-амперные характеристики

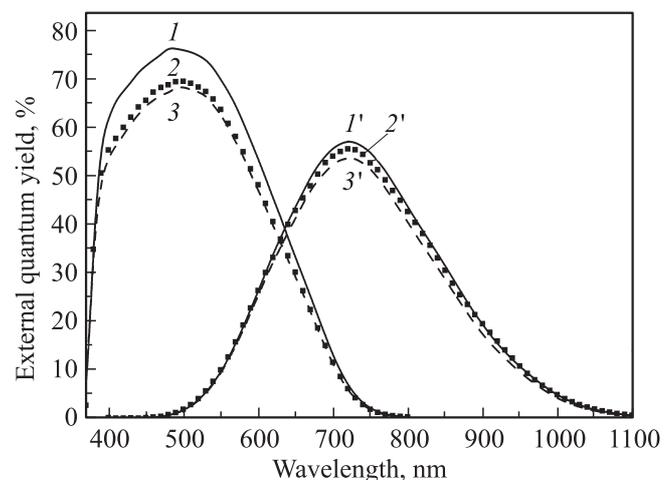


Рис. 2. Спектральные характеристики $\alpha\text{-Si:H}$ (1–3) и $\mu\text{c-Si:H}$ (1'–3') субэлементов исследованных tandemных $\alpha\text{-Si:H}/\mu\text{c-Si:H}$ ФП: 1, 1' — до экспозиции; 2, 2' — после 1000 ч воздействия световым потоком 1 X; 3, 3' — после 19 ч воздействия световым потоком 10 X.

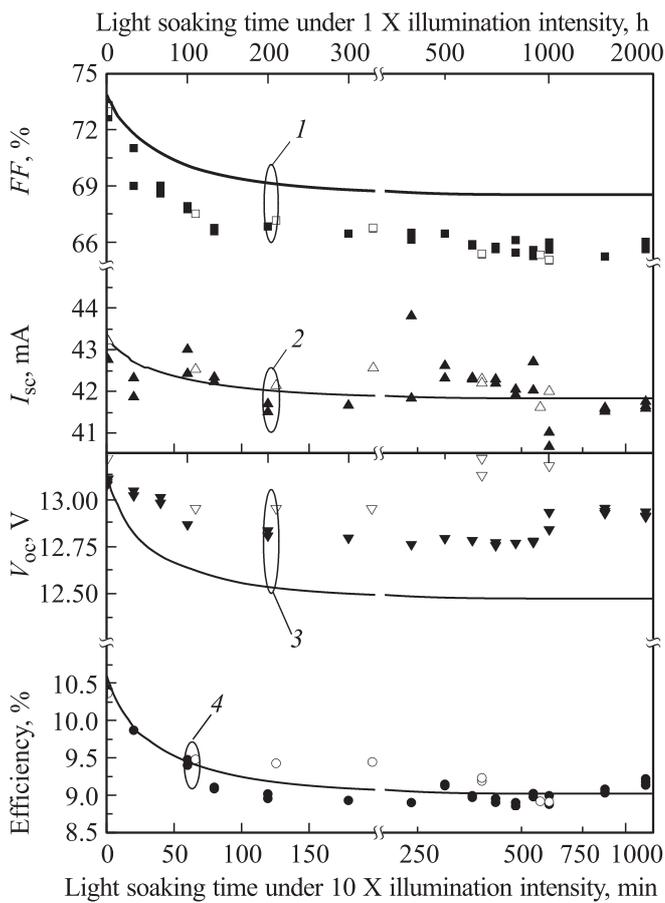


Рис. 3. Дegradационные зависимости фотоэлектрических параметров α -Si:H/ μ c-Si:H ФП: 1 — фактор заполнения ВАХ, 2 — ток короткого замыкания, 3 — напряжение холостого хода, 4 — КПД. Линиями показаны результаты моделирования, полными и закрашенными символами изображены экспериментальные значения, полученные соответственно при уровнях освещенности 1 X и 10 X.

первого образца, а также второго до облучения и после 10, 14.5 и 19 ч светового воздействия были измерены на имитаторе постоянного горения SS-80AA (AM1.5G, 1000 Вт/м², класс имитатора AAA по IEC 60904-9).

3. Модель для описания фотоиндуцированной деградации

На сегодняшний день существует значительное количество моделей, разработанных для объяснения эффекта фотоиндуцированной деградации в ФП на основе аморфного гидрогенизированного кремния, тем не менее единая общепринятая теории этого явления пока не сформулирована. Из наиболее известных подходов следует отметить следующие:

- примесная модель [14,15],
- модель изменения зарядового состояния [16,17],
- модель разрыва слабых связей между атомами кремния [13],

- модель „Н-коллизий“ [18–20],
- модель „плавающих связей“ [21–24].

Краткий обзор перечисленных моделей приведен в работе [25]. Первые две модели показали свою неадекватность экспериментально получаемым результатам, в рамках третьей модели существует ряд неразрешимых сложностей, свидетельствующих о ее неполноте. Поэтому на сегодняшний день наиболее широко используются две последние модели или их вариации, в частности в работе [26] модель „Н-коллизий“ применялась для описания зависимости напряжения холостого хода СЭ α -Si:H от времени освещения.

Необходимо отметить, что модель „Н-коллизий“ предполагает преобладание изолированных состояний Si–H в сравнении с Si–H–H–Si, что противоречит эксперименту [27], а также не позволяет объяснить корреляцию между процессами отжига плавающих связей кремния и германия в их аморфных сплавах [28]. По этим причинам в рамках данной работы было принято решение базировать теоретические построения на модели „плавающих связей“.

3.1. Определение концентрации свободных связей в слоях ФП α -Si:H/ μ c-Si:H

Для модельного анализа процесса фотоиндуцированной деградации необходимо определить экспериментальные зависимости концентраций рекомбинационных центров в фотоактивных слоях от длительности экспозиции образца. В исследованных ФП α -Si:H и μ c-Si:H субэлементы имеют $p-i-n$ -структуры, в которых толщины собственных i -слоев намного превосходят толщины слоев, легированных донорами и акцепторами (см. рис. 1), генерация практически всего фототока происходит в слоях i - α -Si:H и i - μ c-Si:H. С учетом этого задача сводится к определению концентраций рекомбинационных центров в них.

В табл. 1 приведены отношения фототоков субэлементов до и после светового воздействия с интенсивностью 1 X и 10 X. Видно, что, несмотря на отличия в величине деградации фототока μ c-Si:H субэле-

Таблица 1. Изменение фототоков субэлементов исследованных α -Si:H/ μ c-Si:H ФП при фотоиндуцированной деградации

Параметр	Интенсивность освещения		
	1 X	10 X	
Снижение фототока субэлемента после экспозиции, %	α -Si:H	10	11
	μ c-Si:H	2	7
Отношение фототоков субэлементов α -Si:H до светового воздействия	1.10		
и μ c-Si:H $I_{ph}^{\alpha-Si:H} / I_{ph}^{\mu c-Si:H}$ После светового воздействия	1.02	1.08	

Таблица 2. Значения подвижностей носителей заряда, использованные при моделировании спектральных и вольт-амперных характеристик

Слой	Подвижность, $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ [32]	
	электронов μ_n	дырок μ_p
$i\text{-}\alpha\text{-Si:H}$	13	0.67
$i\text{-}\mu\text{-Si:H}$	32	8.0

мента, фототок $\alpha\text{-Si:H}$ субэлемента во всех случаях превосходит его. Таким образом, экспериментальная зависимость тока короткого замыкания тестового образца $\alpha\text{-Si:H}/\mu\text{-Si:H}$ ФП отражает динамику деградации слоя $i\text{-}\mu\text{-Si:H}$, в то время как остальные параметры образца — слоев $i\text{-}\mu\text{-Si:H}$ и $i\text{-}\alpha\text{-Si:H}$ одновременно. Этот факт позволяет восстановить зависимости числа рекомбинационных центров в указанных слоях от длительности экспозиции путем моделирования спектральных и вольт-амперных характеристик тестовых образцов $\alpha\text{-Si:H}/\mu\text{-Si:H}$ ФП.

Для получения зависимостей плотностей фототоков субэлементов ФП от времен жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) проводилось моделирование спектральных характеристик с использованием модели, описанной в работе [29]. Полученные результаты были использованы для расчета ВАХ при помощи метода, описанного в [30]. Оптические параметры слоев структуры, использованные в вычислениях, брались из работы [31]. Значения подвижностей носителей заряда соответствовали [32], они приведены в табл. 2. При моделировании учитывалось снижение напряжения тестового образца ФП и возрастание его последовательного сопротивления.

Основной причиной изменения напряжения ФП в ходе деградации считалось увеличение плотности рекомбинационного тока j_r , величина которого обратно пропорциональна времени жизни ННЗ τ в i -области [33]:

$$j_r \propto \tau^{-1}, \quad \tau = (\gamma_{\text{eff}} N_r)^{-1}, \quad (2)$$

где N_r — концентрация рекомбинационных центров, $\gamma_{\text{eff}} = \gamma_n \gamma_p / (\gamma_n + \gamma_p)$ — эффективный коэффициент захвата ННЗ на рекомбинационный центр, $\gamma_{n,p}$ — коэффициенты захвата электронов и дырок на рекомбинационный центр, соответственно.

Средняя проводимость i -области фотопреобразователя при прямом смещении на переходе может быть выражена формулой [33]

$$\sigma = \frac{(\mu_n + \mu_p)(G - j)\tau}{d}, \quad (3)$$

где $\mu_{n,p}$ — подвижности электронов и дырок, соответственно; G — количество фотонов, поглощаемых в i -области на единице площади ФП; j — плотность тока ФП; d — толщина i -слоя.

С учетом выражения (3) последовательное сопротивление ФП определяется как

$$R_{\text{series}} = R_{\text{series}}^0 + \frac{M}{S} \left(\frac{d_{\alpha\text{-Si:H}}}{\sigma_{\alpha\text{-Si:H}}} + \frac{d_{\mu\text{-Si:H}}}{\sigma_{\mu\text{-Si:H}}} \right), \quad (4)$$

где M — число последовательно соединенных в ФП ячеек; S — площадь ячейки ФП; R_{series}^0 — последовательное сопротивление ФП, за исключением сопротивления i -слоев.

Несмотря на большую толщину i -слоя в $\mu\text{-Si:H}$ субэlemente по сравнению с $\alpha\text{-Si:H}$ субэlementом, второй член в скобках в формуле (4) оказывается намного меньше первого вблизи точки максимальной мощности из-за существенного отличия во времена жизни и подвижностях ННЗ для $i\text{-}\alpha\text{-Si:H}$ и $i\text{-}\mu\text{-Si:H}$ слоев. Поэтому динамика изменения последовательного сопротивления ФП при фотоиндуцированной деградации отражает в первую очередь динамику изменения параметров слоев $i\text{-}\alpha\text{-Si:H}$.

По формулам (2)–(4) были рассчитаны величины рекомбинационного тока и последовательного сопротивления для различных времен жизни ННЗ. Совместно с зависимостями плотностей фототоков от времен жизни ННЗ, полученными из спектральных характеристик, они позволили получить семейство ВАХ, соответствующих различным временам жизни ННЗ в слоях $i\text{-}\alpha\text{-Si:H}$ и $i\text{-}\mu\text{-Si:H}$. Начальные значения рекомбинационных токов были приняты равными $3.4 \cdot 10^{-10}$ и $1.8 \cdot 10^{-6}$ А/см² для $\alpha\text{-Si:H}$ и $\mu\text{-Si:H}$ субэлементов, соответственно. Величина последовательного сопротивления до фотоиндуцированной деградации подбиралась для обеспечения наилучшего согласования измеренных ВАХ с промоделированной зависимостью. Его значение в точке максимальной мощности составляло 18.4 Ом.

Из семейства промоделированных ВАХ были определены значения времен жизни ННЗ в слоях $i\text{-}\alpha\text{-Si:H}$ и $i\text{-}\mu\text{-Si:H}$ в зависимости от длительности светового воздействия. Времена жизни ННЗ в $i\text{-}\mu\text{-Si:H}$ находились из условия равенства расчетного и измеренного значений токов короткого замыкания при заданном времени экспозиции, а времена жизни ННЗ в $i\text{-}\alpha\text{-Si:H}$ — из условия равенства промоделированного и измеренного значений кпд при заданном времени экспозиции с учетом уже найденных параметров для слоя $i\text{-}\mu\text{-Si:H}$.

В слое $i\text{-}\alpha\text{-Si:H}$ концентрация свободных (оборванных) связей, играющих роль рекомбинационных центров, при насыщении принималась по данным работы [25]. С учетом этого, по определенным значениям времен жизни ННЗ были рассчитаны эффективный коэффициент захвата и концентрации свободных связей для слоя $i\text{-}\alpha\text{-Si:H}$. Принимая величины эффективных коэффициентов захвата для слоев $i\text{-}\alpha\text{-Si:H}$ и $i\text{-}\mu\text{-Si:H}$ равными, из значений времен жизни ННЗ для слоя $i\text{-}\mu\text{-Si:H}$ также были рассчитаны концентрации свободных связей. Полученные зависимости показаны на рис. 4 точками. Рекомбинационные параметры, им соответствующие, представлены в табл. 3. Необходимо отметить,

Таблица 3. Рекомбинационные параметры исследованных α -Si:H/ μ c-Si:H ФП

Наименование параметра	Слой	Значение параметра, определенное	
		по спектральной характеристике	по величине последовательного сопротивления
Время жизни неравновесных носителей до деградации τ_0 , с	i - α -Si:H	$7 \cdot 10^{-10}$	$1.1 \cdot 10^{-9}$
	i - μ c-Si:H	$1 \cdot 10^{-7}$	—*
Эффективный коэффициент захвата на рекомбинационный центр свободной связи $\gamma_{\text{эф}}$, $\text{см}^3 \text{с}^{-1}$		$2.5 \cdot 10^{-8}$	$1.6 \cdot 10^{-8}$

Примечание. * Параметр не может быть определен, так как последовательное сопротивление модуля в основном определяется последовательными сопротивлениями слоев i - α -Si:H

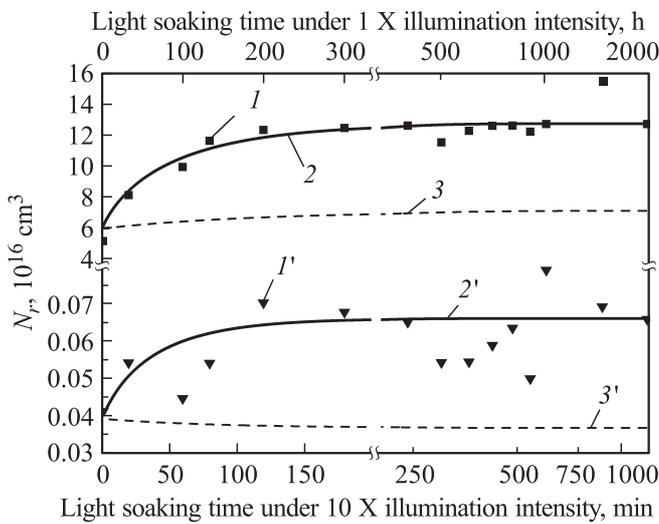


Рис. 4. Изменение числа свободных связей в i - α -Si:H ($I-3$) и i - μ c-Si:H ($I'-3'$) областях исследованного ФП в зависимости от длительности светового воздействия: I, I' — значения, определенные по экспериментальным ВАХ ФП, $2, 2'$ — результат моделирования в модифицированной модели „плавающих связей“; $3, 3'$ — результат моделирования в оригинальной модели „плавающих связей“ при освещении потоком 1 X.

что оценки начальных значений времен жизни ННЗ, полученные из спектральных и вольт-амперных (по величине последовательного сопротивления в точке максимальной мощности) характеристик, отличаются между собой в 1.5 раза. Это обусловлено, по всей видимости, погрешностями измерения спектральных характеристик, а также оптической модели, использованной при расчете внешнего квантового выхода. Эти погрешности привели к некоторому занижению фактических значений времен жизни ННЗ.

3.2. Моделирование фотоиндуцированной деградации

Для аппроксимации зависимостей концентраций свободных связей в слоях i - α c-Si:H и i - μ c-Si:H от длитель-

ности светового воздействия была выбрана модель „плавающих связей“ [23]. В ее рамках уравнения динамики записываются в форме:

$$\frac{dN_r}{dt} = C_1 - C_2 N_r N_f + C_3 N_f - C_4 N_r, \quad (5)$$

$$\frac{dN_f}{dt} = C_1 - C_2 N_r N_f - C_3 N_f + C_4 N_r, \quad (6)$$

где N_r — концентрация свободных связей, являющихся рекомбинационными центрами; N_f — концентрация плавающих связей; C_1, C_2 — члены, отражающие генерацию и аннигиляцию пар „свободная связь“ — „плавающая связь“; C_3, C_4 — члены, отражающие превращение плавающей связи в свободную и обратно.

В нормализованном виде уравнения (5), (6) записываются следующим образом:

$$\frac{d\tilde{N}_r}{d\tilde{t}} = b_1 \left(\frac{\tilde{g}}{\tilde{N}_r} \right)^2 - b_2 \tilde{g} \tilde{N}_r \tilde{N}_f + b_3 \tilde{g} \tilde{N}_f - b_4 \tilde{g} \tilde{N}_r, \quad (7)$$

$$\frac{d\tilde{N}_f}{d\tilde{t}} = b_1 \left(\frac{\tilde{g}}{\tilde{N}_r} \right)^2 - b_2 \tilde{g} \tilde{N}_r \tilde{N}_f - b_3 \tilde{g} \tilde{N}_f + b_4 \tilde{g} \tilde{N}_r, \quad (8)$$

где \tilde{N}_r, \tilde{N}_f — приведенные значения N_r, N_f , измеряемые в 10^{16} см^{-3} ; \tilde{g} — приведенная функция генерации, измеряемая в $10^{22} \text{ см}^{-3} \text{ с}^{-1}$; \tilde{t} — приведенное время, измеряемое в 10^3 с ; коэффициенты $b_1 - b_4$ независимы от концентраций связей и падающего светового потока.

Можно показать, что концентрация свободных связей, соответствующая условию насыщения, при фотоиндуцированной деградации выражается в форме

$$N_r^* = \sqrt[4]{\frac{b_1 b_3}{b_2 b_4} g 10^{42}} = \sqrt[4]{\frac{b_1 b_3}{b_2 b_4} \tilde{g} 10^{16}}, \quad (9)$$

где g — объемная плотность генерации светом электронно-дырочных пар (функция генерации).

Из выражения (9) следует, что при изменении уровня освещенности в 10 раз, предельно достижимая концентрация свободных связей изменится приблизительно-

Таблица 4. Используемые при расчете параметры модели „плавающих связей“

Коэффициент	Значение коэффициента для слоя	
	<i>i</i> -α-Si:H	<i>i</i> -μс-Si:H
<i>b</i> ₁	4.5	6 · 10 ⁻⁵
<i>b</i> ₂	0.017	310
<i>b</i> ₃		67*
<i>b</i> ₄		0.67*

Примечание. Значения параметров были взяты из работы [25].

но 1.8 раза. Таким образом, фотоэлектрические параметры тестового образца ФП, облучавшегося световым потоком 10 X, должны были бы стабилизироваться на существенно более низком уровне, чем у ФП, испытывавшего воздействие потоком света 1 X. Однако в полученных экспериментальных результатах (см. рис. 2 и 3) подобного явления не наблюдалось.

Если предположить, что второй член в уравнениях (7) и (8) пропорционален квадрату функции генерации (это может означать, что для совершения акта аннигиляции необходимо возбуждение как свободной, так и плавающей связи), то можно получить модифицированные уравнения динамики:

$$\frac{d\tilde{N}_r}{dt} = b_1 \left(\frac{\tilde{g}}{\tilde{N}_r}\right)^2 - b_2 \tilde{g}^2 \tilde{N}_r \tilde{N}_f + b_3 \tilde{g} \tilde{N}_f - b_4 \tilde{g} \tilde{N}_r, \quad (10)$$

$$\frac{d\tilde{N}_f}{dt} = b_1 \left(\frac{\tilde{g}}{\tilde{N}_r}\right)^2 - b_2 \tilde{g}^2 \tilde{N}_r \tilde{N}_f - b_3 \tilde{g} \tilde{N}_f + b_4 \tilde{g} \tilde{N}_r. \quad (11)$$

Концентрация свободных связей при насыщении фотоиндуцированной деградации в рамках модифицированной модели уже не будет зависеть от уровня облученности:

$$N_r^* = \sqrt[4]{\frac{b_1 b_3}{b_2 b_4}} 10^{16}. \quad (12)$$

Уравнения (10) и (11) были использованы для моделирования зависимостей концентрации свободных связей от длительности световой экспозиции. Значения коэффициентов *b*₃ и *b*₄ были взяты из [25], значения коэффициентов *b*₁ и *b*₂ варьировались для обеспечения наилучшего согласования расчетных и экспериментальных зависимостей, их выбранные значения представлены в табл. 4. Результаты моделирования приведены на рис. 4 (линии 2, 2'). Внешний вид графиков для условий освещения 1 X и 10 X полностью совпадает в пределах погрешности построения рисунка. На рис. 5 приведены результаты моделирования изменения времен жизни ННЗ и последовательного сопротивления тестового образца ФП (линии 1–3).

Для иллюстрации различий результатов, получаемых с использованием оригинальной (формулы (7)–(9)) и модифицированной (формулы (10)–(12)) моделей „плавающих связей“, также выполнялись расчеты и с

использованием оригинальной модели. Коэффициенты *b*₁–*b*₄ варьировались до обеспечения полного совпадения расчетной зависимости концентрации плавающих связей при освещении потоком 10 X. Затем были рассчитаны графики изменения концентрации плавающих связей при освещенности 1 X. Они также приведены на рис. 4 (линии 3 и 3'), а зависимости изменения времен жизни ННЗ и последовательного сопротивления, соответствующие этим концентрациям, — на рис. 5 (линии 1', 2', 3'). Видно, что наблюдаемые изменения параметров являются крайне малыми. Это означает, что, если считать результаты оценки темпа фотоиндуцированной деградации при 10 X верными, то в рамках оригинальной модели „плавающих связей“ существенной деградации при освещении 1 X не наблюдалось бы.

Полученные при помощи модифицированной модели расчетные зависимости концентрации свободных связей от длительности светового воздействия были использованы для моделирования ВАХ исследованных образцов ФП. Результаты вычисления основных параметров их ВАХ в ходе фотоиндуцированной деградации представлены на рис. 3 линиями. Видно, что модифицированная модель плавающих связей позволяет достаточно хорошо описать экспериментальные зависимости для КПД и тока короткого замыкания. В то же время на участке стабилизации фотоэлектрических параметров расчетная величина снижения фактора заполнения ВАХ оказывается выше экспериментально измеренной, а напряжения холостого хода — ниже. Необходимо отметить, что сходный результат был получен и в работе [26] при применении модели „Н-коллизий“.

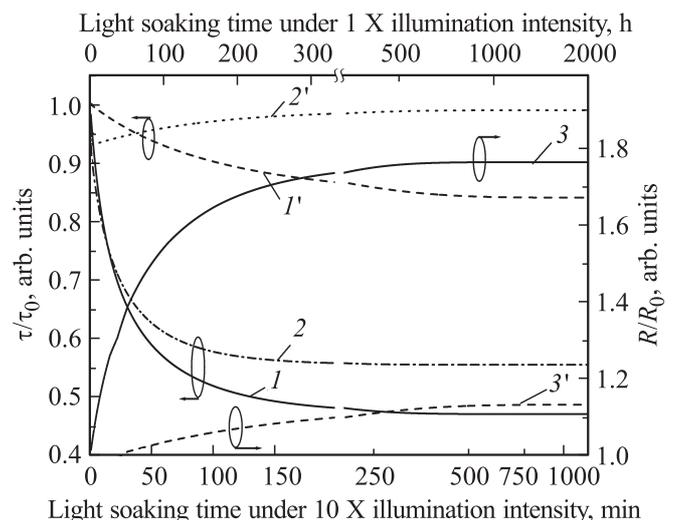


Рис. 5. Относительное изменение времен жизни фотогенерированных носителей в *i*-α-Si:H (1, 1') и *i*-μс-Si:H (2, 2') слоях, а также последовательного сопротивления структуры в точке максимальной мощности (3, 3') в зависимости от длительности светового воздействия: 1, 2, 3 — результат моделирования в модифицированной модели „плавающих связей“; 1', 2', 3' — результат моделирования в оригинальной модели „плавающих связей“ при освещении потоком 1 X.

4. Заключение

В данной работе была исследована фотоиндуцированная деградация ФП на основе tandemной структуры α -Si:H/ μ c-Si:H при стандартной 1 X (1 кВт/м²), а также повышенной освещенности 10 X (10 кВт/м²). В ходе испытаний были измерены спектральные и вольтамперные характеристики специально изготовленных тестовых образцов ФП. Оценки изменения фотоэлектрических свойств под воздействием излучения в условиях стандартного освещения 1 X и в условиях повышенной освещенности 10 X с учетом различий в температурах, методик и погрешностей измерения находятся во взаимном соответствии. Абсолютное снижение кпд при условии достижения стабилизации фотоэлектрических параметров составляет 1.2–1.4% и оно достигается после 500 ч облучения 1 X или 300 мин облучения 10 X.

Из экспериментально измеренных спектральных и вольт-амперных характеристик были определены времена жизни ННЗ в *i*-областях α -Si:H и μ c-Si:H субэлементов в процессе фотоиндуцированной деградации, а также значения коэффициентов захвата на рекомбинационные центры свободных связей.

Для описания динамики деградации исследованных ФП была применена модель „плавающих связей“. Показано, что оригинальная модель „плавающих связей“ не позволяет описывать экспериментально наблюдаемые характеристики исследованных α -Si:H/ μ c-Si:H ФП. В целях разрешения этой проблемы была проведена модификация модели. Результаты сравнения экспериментальных зависимостей с полученными с использованием модифицированной модели „плавающих связей“ показали хорошее согласование для тока короткого замыкания и кпд ФП, но при этом определенное расхождение для фактора заполнения ВАХ и напряжения холостого хода.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (ГК 16.526.12.6017).

Список литературы

- [1] *Photon international* (March 2009) p. 170.
- [2] M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta, E.D. Dunlop *Progr. in Photovolt.: Res. Appl.*, **20**, 606 (2012).
- [3] R.R. King, A. Boca, W. Hong, X.-Q. Liu, D. Bhusari, D. Larrabee, K.M. Edmondson, D.C. Law, C.M. Fetzer, S. Mesropian, N.H. Karam. *Proc. 24th EU PVSEC* (Hamburg, 2009) p. 55.
- [4] V. Fthenakis, S. Gualtero, R. van der Meulen, H.C. Kim. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* (2008) v. 1041, p. 25.
- [5] C.R. Wronsky. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* (1997) v. 469, p. 7.
- [6] D.L. Staebler, C.R. Wronski. *Appl. Phys. Lett.*, **31**, 292 (1977).
- [7] A. Kolodziej. *Opto-electron. Rev.*, **12**, 21 (2004).
- [8] X. Deng, M. Izu, K.L. Narasimhan, S.R. Ovshinsky. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* (1994) v. 336, p. 699.
- [9] A. Luque, S. Hegedus. *Handbook of photovoltaic science and engineering* (John Wiley and Sons, 2003), p. 551.

- [10] W. Luft, B. van Roedem, B. Stafford, L. Mrig. *Proc. 23rd IEEE PVSC* (1993) v. 93, p. 158.
- [11] I. Hirabayashi, K. Morigaki, S. Nitta. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **19**, L357 (1980).
- [12] H. Dersch, J. Stuke, J. Beichler. *Appl. Phys. Lett.*, **38**, 456 (1981).
- [13] M. Stutzmann, W.B. Jackson, C.C. Tsai. *Phys. Rev. B*, **32**, 23 (1985).
- [14] N. Ishii, M. Kumeda, T. Shimizu. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **24**, L244 (1985).
- [15] D. Redfield, R.H. Bube. *Phys. Rev. Lett.*, **65**, 464 (1990).
- [16] D. Adler. *Solar Cells*, **9**, 133 (1983).
- [17] D. Adler. *J. de Phys.*, **42**, C4-3 (1981).
- [18] H.M. Branz. *Sol. St. Commun.*, **105**, 387 (1998).
- [19] H.M. Branz. *Phys. Rev. B*, **59**, 5498 (1999).
- [20] H.M. Branz. *Sol. Energy Mater. Solar Cells*, **78**, 425 (2003).
- [21] T. Shimizu, M. Kumeda. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35**, L816 (1996).
- [22] T. Shimizu, R. Durny, M. Kumeda. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* (1996) v. 420, p. 553.
- [23] T. Shimizu, M. Kumeda. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, L911 (1999).
- [24] R. Biswas, Y.P. Li, B.C. Pan. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* (2000) v. 609, A3.5.
- [25] T. Shimizu. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43**, 3257 (2004).
- [26] J. Liang, E.A. Schiff, S. Guha, B. Yan, J. Yang. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* (2005) v. 862, A13.6.1.
- [27] N.H. Nickel, W.B. Jackson. *Phys. Rev. B*, **51**, 4872 (1995).
- [28] K.C. Palanginis, J.D. Cohen, S. Guha, J. Yang. *Phys. Rev. B*, **63**, 201 203 (2001).
- [29] А.М. Васильев. *РЭ*, **13**, 108 (1968).
- [30] В.М. Емельянов, Н.А. Калюжный, М.А. Минтаиров, С.А. Минтаиров, М.З. Шварц, В.М. Лантратов. *Науч.-техн. ведомости СПбГПУ: Физ.-мат. науки*, **116**, 11 (2011).
- [31] K. Ding et al. *Sol. Energy Mater. Solar Cells*, **95**, 3318 (2011).
- [32] S.T. Chang, B.F. Hsieh, Y.C. Liu. *Thin Sol. Films*, **520**, 3369 (2012).
- [33] А.М. Васильев, А.П. Ландсман. *Полупроводниковые фотопреобразователи* (М., Сов. радио, 1971), гл. 2, с. 121.

Редактор Т.А. Полянская

Investigation of light-induced degradation of tandem α -Si:H/ μ c-Si:H photoconverters

V.M. Emelyanov*, A.S. Abramov*+, A.V. Bobyl*, A.S. Gudovskikh•, D.L. Orekhov≠, E.I. Terukov*+, N.Kh. Timoshina*, O.I. Chosta*, M.Z. Shvarts*+

* Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

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

• Saint-Petersburg Academic University —
Nanotechnology Research and Education Centre
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia

≠ „Hevel LLC“,

123022 Moscow, Russia

Abstract Photo-induced degradation of tandem α -Si:H/ μ c-Si:H photoconverters with initial efficiency of 10.4% under light flux densities of 1 and 10 kW/m² (AM1.5G) has been investigated. It has been established that the stabilized state is achieved after 500 h of light soaking under standard light flux density and after 300 minutes under 10 times raised flux density. In both cases reduction of efficiency of the photoconverters averaged about 1.2–1.4% (absolute). From the experimentally measured spectral and voltage-current characteristics of the photoconverters lifetimes of non-equilibrium charge carriers have been estimated and dependencies of dangling bonds' concentration change in i - α -S:H and i - μ c-Si:H layers have been calculated. Approximation of the dependencies was performed with the floating bond model. Rated concentrations of the dangling bonds after different exposure periods were used in simulation of dependencies of photoconverters' parameters versus lime length of the light soaking. The obtained results showed a good coincidence between the simulated current and efficiency degradation rates and the experimental data.