

## Анализ механизмов световой деградации в солнечных фотопреобразователях $\alpha$ -Si : H/ $\mu$ -Si : H

© В.М. Емельянов\*<sup>¶</sup>, А.С. Абрамов\*<sup>+</sup>, А.В. Бобыль\*, В.Н. Вербицкий\*<sup>≠</sup>, А.С. Гудовских\*,  
Е.М. Ершенко\*, С.А. Кудряшов\*, Е.И. Теруков\*<sup>+</sup>, О.И. Честа\*, М.З. Шварц\*<sup>+</sup>

\* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>+</sup> ООО „НТЦ тонкопленочных технологий в энергетике при ФТИ им. А.Ф. Иоффе“,  
194064 Санкт-Петербург, Россия

<sup>\*</sup> Санкт-Петербургский академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

<sup>≠</sup> ООО „Хевел“,

123022 Москва, Россия

(Получена 18 января 2013 г. Принята к печати 31 января 2013 г.)

Проведен анализ световой деградации слоя  $i$ - $\alpha$ -Si : H в tandemных фотопреобразователях на основе структур  $\alpha$ -Si : H/ $\mu$ c-Si : H с использованием моделей „Н-коллизий“ и „плавающих“ связей, а также их модификаций. Показано, что форма деградационной зависимости хорошо описывается всеми рассмотренными моделями. Оригинальные модели „Н-коллизий“ и „плавающих связей“ в сравнении с модифицированными дают оценки для концентраций свободных связей при насыщении деградации, которые во всех случаях зависят от интенсивности вызвавшего деградацию света. Модифицированная модель „плавающих связей“ позволяет исключить такую зависимость, а модифицированная модель „Н-коллизий“ описывает наличие этой зависимости в одном диапазоне освещенностей и ее отсутствие в другом, что наилучшим образом согласуется с экспериментальными данными.

### 1. Введение

Фотоэлектрические модули на основе тонких пленок  $\alpha$ -Si : H и  $\mu$ c-Si : H считаются на сегодняшний день одними из наиболее перспективных преобразователей солнечной энергии с точки зрения их коммерческого использования. Поэтому особенно актуальным является исследование проблем, затрудняющих достижение теоретического предела КПД в подобных фотопреобразователях (ФП).

К числу наиболее значимых эффектов, влияющих на эффективность преобразования солнечного излучения, относится световая (фотоиндуцированная) деградация [1], более известная как эффект Стаблера–Вронского, в честь ученых, впервые описавших его в своей работе в 1977 г. [2]. Снижение КПД ФП вследствие эффекта Стаблера–Вронского составляет от 10 до 30%, в зависимости от числа субэлементов, толщин и химического состава фотоактивных слоев [3–6]. Приблизительно такие же цифры для структуры  $\alpha$ -Si : H/ $\mu$ c-Si : H были получены ранее авторами данной работы [7].

Фотоиндуцированная деградация проявляется в снижении времен жизни неравновесных носителей заряда и, как следствие, увеличении фотосопротивления и уменьшении доли разделяющихся в  $p$ – $n$ -переходе ФП электронно-дырочных пар. Причиной этого является возрастание числа свободных (ненасыщенных) связей, играющих роль рекомбинационных центров. На сегодняшний день единая общепринятая теория данного явления отсутствует, но существуют различные модели, используемые для объяснения эффекта фотоиндуциро-

ванной деградации, наиболее известные из которых следует отметить:

- примесная модель [8,9];
- модель изменения зарядового состояния [10,11];
- модель разрыва слабых связей между атомами кремния [12];
- модель „плавающих“ связей [13–16];
- модель „Н-коллизий“ [17–19].

Краткий обзор перечисленных моделей приведен в работе [20]. Первые две модели показали свою неадекватность экспериментально получаемым результатам, в рамках модели разрыва слабых связей существует ряд неразрешимых сложностей, свидетельствующих о ее неполноте. Поэтому на сегодняшний день наиболее широко используются две последние модели или их вариации.

Целью данной работы являлся сравнительный модельный анализ экспериментальных результатов по фотоиндуцированной деградации слоя  $i$ - $\alpha$ -Si : H в tandemном  $\alpha$ -Si : H/ $\mu$ c-Si : H ФП, которые были представлены в статье [7], с использованием подходов моделей „плавающих“ связей и „Н-коллизий“. Фотопреобразователи, для которых проводилось исследование, были получены по технологии Oerlikon Solar Ltd (Швейцария) и имели начальный КПД 10.4%.

### 2. Математические модели световой деградации

#### 2.1. Модель „плавающих“ связей

В основе модели „плавающих“ связей лежит гипотеза о том, что процесс возникновения свободных связей в

<sup>¶</sup> E-mail: resso2003@bk.ru

слоях аморфного кремния тесно связан с процессами возникновения, перемещения и аннигиляции так называемых „плавающих“ связей — состояний, в которых какой-либо атом кремния одновременно связан с пятью другими. Детально эта модель описана в работах [13–16,20]. Уравнения динамики для свободных и „плавающих“ связей в ее рамках имеют вид

$$\frac{dN_r}{dt} = C_1 - C_2 N_r N_f + C_3 N_f - C_4 N_r, \quad (1)$$

$$dN_f/dt = C_1 - C_2 N_r N_f - C_3 N_f + C_4 N_r, \quad (2)$$

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

В нормализованном виде уравнения (1)–(2) записываются следующим образом:

$$d\tilde{N}_r/d\tilde{t} = b_1 (\tilde{g}/\tilde{N}_r)^2 - b_2 \tilde{g} \tilde{N}_r \tilde{N}_f + b_3 \tilde{g} \tilde{N}_f - b_4 \tilde{g} \tilde{N}_r, \quad (3)$$

$$d\tilde{N}_f/d\tilde{t} = b_1 (\tilde{g}/\tilde{N}_r)^2 - b_2 \tilde{g} \tilde{N}_r \tilde{N}_f - b_3 \tilde{g} \tilde{N}_f + b_4 \tilde{g} \tilde{N}_r, \quad (4)$$

где  $\tilde{N}_r, \tilde{N}_f$  — приведенные значения  $N_r, N_f$ , измеряемые в  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ ;  $\tilde{g}$  — приведенная функция генерации, измеряемая в  $10^{22} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\tilde{t}$  — приведенное время, измеряемое в  $10^3 \text{ с}$ ; 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

$$N_r^* = \sqrt[4]{\frac{b_1 b_3}{b_2 b_4} G 10^{42}} = \sqrt[4]{\frac{b_1 b_3}{b_2 b_4} \tilde{g}} 10^{16}, \quad (5)$$

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

Выражение (5) задает зависимость концентрации свободных связей при насыщении пропорциональной корню четвертой степени от интенсивности падающего на ФП излучения. В работе [7] было отмечено, что для исследованных тандемных ФП  $\alpha$ -Si : H/ $\mu$ c-Si : H такая зависимость отсутствовала. По этой причине уравнения (3) и (4) были заменены следующими:

$$d\tilde{N}_r/d\tilde{t} = b_1 (\tilde{g}/\tilde{N}_r)^2 - b_2 \tilde{g}^2 \tilde{N}_r \tilde{N}_f + b_3 \tilde{g} \tilde{N}_f - b_4 \tilde{g} \tilde{N}_r, \quad (6)$$

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

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

$$N_r^* = \sqrt[4]{\frac{b_1 b_3}{b_2 b_4}} 10^{16}. \quad (8)$$

## 2.2. Модель „Н-коллизий“

Недостатком модели „плавающих“ связей является то, что ее экспериментальная проверка затруднена [20]. В значительной степени по этой причине модель „Н-коллизий“, предложенная в работах [17–19], по-прежнему вызывает интерес, несмотря на то что она неспособна объяснить корреляцию между свободными связями в подрешетках кремния и германия и в их аморфных сплавах [21], а также использует неверное предположение о преобладании водорода в  $\alpha$ -Si : H в состоянии „Si-H“, а не в метастабильном „Si-H-H-Si“ [22].

В основу модели „Н-коллизий“ положена гипотеза о том, что генерация неравновесных носителей в аморфном материале приводит к разрыву связей Si-H и появлению плавающих связей и подвижных атомов водорода соответственно. Большая часть подвижных атомов водорода вновь заполняет свободные связи, однако часть из них формирует метастабильные Si-H-H-Si комплексы (эффект „Н-коллизий“). Количество свободных связей возрастает до тех пор, пока процесс генерации новых метастабильных комплексов не начнет уравниваться процессом их диссоциации (термической или иной природы).

Уравнения динамики для модели „Н-коллизий“ выглядят следующим образом:

$$dN_m/dt = k_H N_H G - k_r N_m N_r - 2k_c N_m^2 + 2k_p N_p, \quad (9)$$

$$dN_r/dt = k_H N_H G - k_r N_m N_r, \quad (10)$$

$$dN_H/dt = -k_H N_H G + k_r N_m N_r, \quad (11)$$

$$dN_p/dt = k_c N_m^2 - k_p N_p, \quad (12)$$

где  $N_m$  — концентрация подвижных атомов водорода;  $N_H$  — концентрация связей Si-H;  $N_p$  — концентрация связей Si-H-H-Si;  $G$  — объемная функция генерации электронно-дырочных пар;  $k_H, k_r$  — коэффициенты, вероятность генерации и аннигиляции пары „свободная связь“–„подвижный атом водорода“ соответственно;  $k_c, k_p$  — коэффициенты, отражающие вероятность формирования парой подвижных атомов на существующей связи Si-Si метастабильного комплекса Si-H-H-Si и его диссоциации соответственно.

Численный анализ показывает, что физические процессы, описываемые уравнениями (9)–(12), являются устойчивыми, когда  $N_m$  достаточно медленно меняется во времени. Это достижимо, если  $N_m$  и  $N_r$  имеют один порядок, а  $N_p$  по порядку не превосходит их. Если учесть, что при насыщении световой деградации количество свободных связей в  $\alpha$ -Si : H достигает порядка  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ , а величина  $N_H$  с учетом принятой в данной модели гипотезы приблизительно равна количеству введенного водорода ( $10^{20}$ – $10^{21} \text{ см}^{-3}$ , удельная концентрация 0.01–0.1), то зависимость (11) оказывается крайне слабой и ей можно пренебречь. В этом случае темп увеличения числа свободных связей на значительном

временном промежутке будет выражаться формулой

$$\frac{dN_r}{dt} = \frac{2k_c k_H^2 N_H^2 G^2}{k_r^2 N_r^2} = A \left( \frac{G}{N_r} \right)^2, \quad (13)$$

которая приводит к согласующейся с экспериментом [12] зависимости концентрации свободных связей от количества генерируемых электронно-дырочных пар  $G$  (пропорционального интенсивности облучения) и времени  $N_r \propto G^{2/3} t^{1/3}$ .

Значение концентрации свободных связей при насыщении световой деградации в этих же условиях можно выразить в форме:

$$N_r^* = \sqrt[3]{\frac{2k_c}{k_p} \left( \frac{k_H}{k_r} \right)^2 N_H^2 G^2} = \sqrt[3]{\frac{A}{B}}, \quad (14)$$

где  $A = 2k_c k_H^2 N_H^2 / k_r^2$ ,  $B = k_p / G^2$ .

Выражение (14) задает пропорциональность для количества свободных связей при насыщении фотоиндуцированной деградации, равной  $N_r^* \propto G^{2/3}$ . Если  $k_r \propto G$  (вероятность диссоциации метастабильного комплекса Si-H-H-Si пропорциональна интенсивности облучения ФП), то эта зависимость окажется более слабой —  $N_r^* \propto G^{1/3}$ , что хорошо согласуется с данными работы [23]. Для полного исключения зависимости концентрации свободных связей при насыщении световой деградации от интенсивности облучения коэффициент диссоциации метастабильного комплекса должен быть пропорционален квадрату интенсивности облучения.

### 3. Модифицированная модель „Н-коллизий“

В работе [24] была предпринята попытка совместить модель „Н-коллизий“ с подходом, основанным на образовании свободных связей вследствие разрыва слабых связей между атомами полупроводника [12]. В этом случае удается сохранить все достоинства модели „Н-коллизий“ и одновременно объяснить связь процессов фотоиндуцированной генерации и отжига свободных связей атомов кремния и германия в их аморфных сплавах Si-Ge, а также учесть тот факт, что большая часть водорода в  $\alpha$ -Si:H находится в метастабильном состоянии Si-H-H-Si.

Модель базируется на предположении, что образование свободных связей происходит при нахождении в непосредственной близости слабой связи и метастабильного комплекса Si-H-H-Si. В этом случае, когда разрывается связь Si-Si, то следом разрушается и метастабильный комплекс, в результате чего образуются две свободные связи и две гидрогенизированные Si-H. Причем атом водорода перемещается при этом на тетраэдрическую позицию. Последнее обеспечивает расстояние между двумя атомами 0.4–0.5 нм, что согласуется с экспериментальными результатами [25].

Изменения концентраций свободных связей  $N_r$ , слабых связей Si-Si  $N_w$ , гидрогенизированных связей Si-H  $N_H$  и метастабильных комплексов Si-H-H-Si  $N_p$  будут описываться уравнением

$$\begin{aligned} \frac{dN_r}{dt} = \frac{dN_H}{dt} = -2 \frac{dN_p}{dt} = -2 \frac{dN_w}{dt} \\ = 2C_5 N_w N_p - C_6 N_r^2 N_H^2, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $C_5$  — коэффициент, характеризующий вероятность образования двух свободных и двух гидрогенизированных связей при локализации в одной точке слабой связи и метастабильного комплекса;  $C_6$  — коэффициент, характеризующий вероятность обратного процесса.

Если считать, что большая часть водорода в полупроводнике находится в состоянии Si-H-H-Si, то концентрация метастабильных комплексов при удельной концентрации водорода 0.01–0.1 будет иметь порядок  $10^{20}$ – $10^{21}$  см<sup>-3</sup>, что намного больше концентрации свободных связей в материале даже при насыщении световой деградации. По этой причине величину  $N_p$  на практике можно считать постоянной.

При сравнительно малых концентрациях свободных связей зависимость в уравнении (15) будет определяться в основном первым членом. Если считать вероятность разрыва слабой связи пропорциональной  $(G/N_r)^2$  [12], а процесс ее восстановления считать обусловленным исключительно термической активацией атомов водорода на гидрогенизированных связях, то (15) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} \frac{dN_r}{dt} = \frac{dN_H}{dt} = -2 \frac{dN_p}{dt} = -2 \frac{dN_w}{dt} \\ = d_r \frac{G^2 N_w N_p}{N_r^2} - d_p N_r^2 N_H^2, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $d_r = 2C_5 N_r^2 / G^2$ ;  $d_p = C_6$ . Коэффициент  $d_p$  ( $C_6$ ) может зависеть от температуры фотопреобразователя.

В области, где  $N_w$  меняется достаточно медленно ( $N_w \gg N_r$ ), выражение (16) приведет к такой же, как и (13), зависимости для скорости возрастания концентрации свободных связей  $N_r \propto G^{2/3} t^{1/3}$ , согласующейся с экспериментом [12].

Концентрация свободных связей при насыщении фотоиндуцированной деградации зависит от концентраций слабых и гидрогенизированных связей в исходном материале —  $N_w^{(0)}$  и  $N_H^{(0)}$  соответственно.

При  $N_w^{(0)}, N_H^{(0)} \gg N_r^*$  (т.е. исходная концентрация как слабых, так и гидрогенизированных связей высока) стабилизация будет достигнута при условии

$$N_r^* = \sqrt[4]{\frac{d_r G^2 N_w^{(0)} N_p}{d_p N_H^{(0)}}} \propto G^{1/2}. \quad (17)$$

В случае, когда  $N_w^{(0)} \gg N_r^*$ , но  $N_H^{(0)} \ll N_r^*$  (исходная концентрация слабых связей высока, а гидрогенизиро-

ванных мала), насыщение происходит по другому закону:

$$N_r^* = \sqrt[6]{\frac{d_r G^2 N_w^{(0)} N_p}{d_p}} \propto G^{1/3}, \quad (18)$$

что хорошо согласуется с данными работы [23]. Тем не менее выполнение условия (18) маловероятно, т.к. в негидрогенизированном аморфном материале типично содержится дефектов много больше, чем  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ .

В случае, когда концентрация слабых связей до светового воздействия сравнима с концентрацией свободных связей, возникающих при облучении, изменением величины  $N_w$  пренебречь нельзя. Она может быть выражена через концентрацию свободных связей по формуле

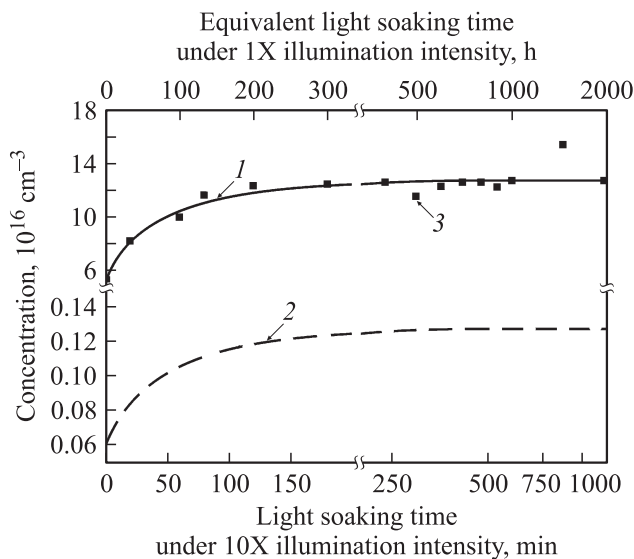
$$N_w = N_w^{(0)} - \frac{1}{2} N_r. \quad (19)$$

В момент, когда количество слабых связей приближается к нулю, дальнейший рост числа свободных становится невозможным, что дает закон насыщения, в котором отсутствует интенсивность светового облучения фотопреобразователя:

$$N_r^* \leq 2N_w^{(0)}. \quad (20)$$

#### 4. Результаты моделирования

С использованием рассмотренных моделей рассчитывались зависимости концентрации свободных связей в слое  $i$ - $\alpha$ -Si : H двухпереходного  $\alpha$ -Si : H/ $\mu$ c-Si : H ФП от длительности светового воздействия. Моделирование



**Рис. 1.** Концентрации свободных и „плавающих“ связей в слое  $i$ - $\alpha$ -Si : H исследованного ФП  $\alpha$ -Si : H/ $\mu$ c-Si : H в зависимости от длительности светового воздействия, полученные с использованием модели „плавающих“ связей: 1 — свободные связи (расчет), 2 — „плавающие“ связи (расчет), 3 — свободные связи (эксперимент [7]).

**Таблица 1.** Используемые при расчете параметры модели „плавающих связей“

Коэффициенты	Значение коэффициента для слоя $i$ - $\alpha$ -Si : H в модели	
	оригинальной	модифицированной
$b_1$		4.5
$b_2$	0.064	0.017
$b_3$		67*
$b_4$		0.67*

Примечание. \* Значения параметров были взяты из работы [20].

**Таблица 2.** Используемые при расчете параметры модели „Н-коллизий“

Параметр	$k_H, \text{ см}^3$	$k_r, \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	$k_c, \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$	$k_p, \text{ с}^{-1}$
Значение	$6 \cdot 10^{-29} *$	$1.2 \cdot 10^{-17} *$	$3.4 \cdot 10^{-19} *$	$7.2 \cdot 10^{-5}$

Параметр	$N_H, \text{ см}^{-3}$	$A, \text{ см}^{-3} \text{ с}$	$B, \text{ см}^6 \text{ с}$
Значение	$2.49 \cdot 10^{21}$	105.27	$5.3 \cdot 10^{-50}$

Примечание. \* Значения могут изменяться в достаточно широких пределах при сохранении неизменной величины параметра А.

проводилось для кратности концентрирования солнечного излучения 10 X ( $10\,000 \text{ Вт/м}^2$ , AM1.5G). Параметры моделирования варьировались с целью обеспечения наилучшего согласования с экспериментальными данными, полученными в работе [7].

На рис. 1 представлены зависимости концентраций свободных и „плавающих“ связей от длительности светового воздействия, полученные при помощи оригинальной и модифицированной моделей „плавающих“ связей. Используемые при вычислениях параметры приведены в табл. 1. Концентрации свободных и „плавающих“ связей для двух расчетов совпадают с точностью до построения графика в масштабе рисунка.

Результаты моделирования, полученные с использованием модели „Н-коллизий“, приведены на рис. 2, а соответствующие параметры для расчетной модели указаны в табл. 2.

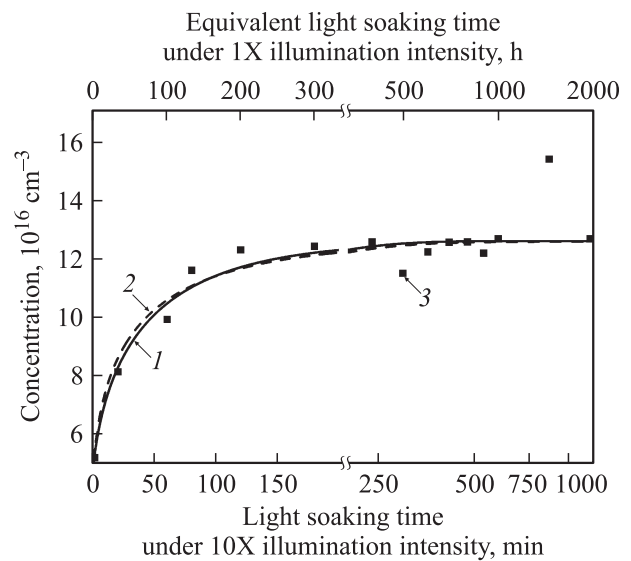
Видно, что и модель „плавающих“ связей, и модель „Н-коллизий“ позволяют достаточно точно аппроксимировать экспериментальную зависимость концентрации свободных связей. При этом следует отметить, что варьирование параметров  $k_H, k_r, k_c$  в достаточно широких пределах (плюс-минус 2 порядка) позволяет получать одинаковые зависимости для концентраций свободных связей  $N_r$ , при условии сохранения неизменного значения параметра А. При этом зависимости для концентраций подвижных атомов водорода  $N_m$  и метастабильных комплексов  $N_p$  будут отличаться. Влияние различных параметров на форму зависимости в модели „плавающих“ связей имеет более сложный вид.

**Таблица 3.** Используемые при расчете параметры модифицированной модели „Н-коллизий“

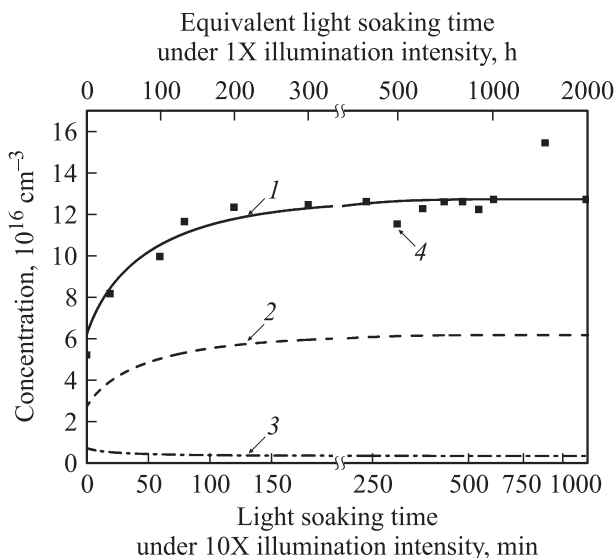
Концентрация слабых связей в слое $i\text{-}\alpha\text{-Si} : \text{H}$ до светового воздействия, $N_w^{(0)}$ , $\text{см}^{-3}$	Значение коэффициента для слоя $i\text{-}\alpha\text{-Si} : \text{H}$	
	$d_r$ , $\text{см}^3\text{с}$	$d_p$ , $\text{см}^{12}\text{с}^{-1}$
$1.5 \cdot 10^{17}$	$4 \cdot 10^{-37}$	$5 \cdot 10^{-65}$
$3 \cdot 10^{17}$	$1.5 \cdot 10^{-37}$	$4.8 \cdot 10^{-63}$

Зависимости концентраций свободных связей от времени светового воздействия, полученные при помощи модифицированной модели „Н-коллизий“ для двух значений концентраций слабых связей, приведены на рис. 3. Значения параметров представлены в табл. 3. Видно, что как в случае достижения насыщения при отсутствии дефицита слабых связей, так и при ограничении числом слабых связей (см. выражение (20)), данная модель позволяет удовлетворительно описать экспериментальную зависимость.

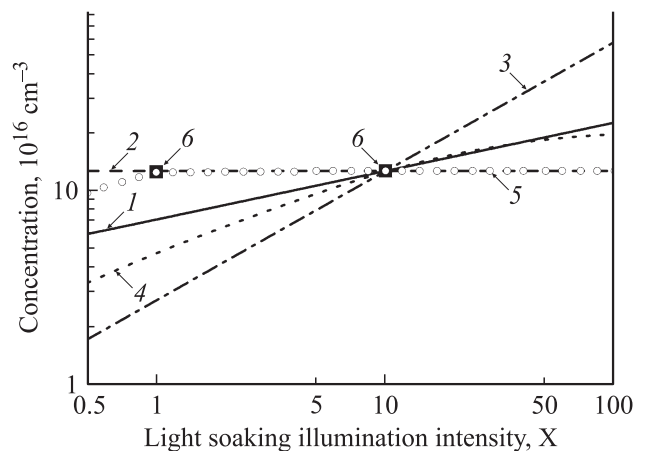
На рис. 4 изображены зависимости концентраций свободных связей, достигаемых при насыщении световой деградации, от кратности концентрирования солнечного излучения для рассмотренных моделей при параметрах из табл. 1–3. Видно, что модифицированная модель „плавающих“ связей, а также модифицированная модель „Н-коллизий“ при задании определенных параметров приводят к оценкам концентраций свободных связей



**Рис. 3.** Концентрации свободных связей в слое  $i\text{-}\alpha\text{-Si} : \text{H}$  исследованного ФП  $\alpha\text{-Si} : \text{H} / \mu\text{c-Si} : \text{H}$  в зависимости от длительности светового воздействия, полученные с использованием модифицированной модели „Н-коллизий“: 1 — исходная концентрация слабых связей  $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (расчет), 2 — исходная концентрация слабых связей  $1.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (расчет), 3 — экспериментальные данные [7].



**Рис. 2.** Концентрации свободных связей мобильных атомов водорода и метастабильных комплексов Si-H-H-Si в слое  $i\text{-}\alpha\text{-Si} : \text{H}$  исследованного ФП  $\alpha\text{-Si} : \text{H} / \mu\text{c-Si} : \text{H}$  в зависимости от длительности светового воздействия, полученные с использованием модели „Н-коллизий“: 1 — свободные связи (расчет), 2 — мобильные атомы водорода (расчет), 3 — метастабильные комплексы Si-H-H-Si (расчет), 4 — свободные связи (эксперимент [7]).



**Рис. 4.** Концентрации свободных связей, достигаемые в слое  $i\text{-}\alpha\text{-Si} : \text{H}$  исследованного ФП  $\alpha\text{-Si} : \text{H} / \mu\text{c-Si} : \text{H}$  при насыщении фотоиндуцированной деградации в зависимости от интенсивности облучения: 1 — модель „плавающих“ связей, 2 — модифицированная модель „плавающий“ связей, 3 — модель „Н-коллизий“, 4 — модифицированная модель „Н-коллизий“ при исходной концентрации слабых связей  $3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , 5 — модифицированная модель „Н-коллизий“ при исходной концентрации слабых связей  $1.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , 6 — экспериментальные данные [7].

при насыщении фотоиндуцированной деградации, не зависящим от уровня освещенности, что было отмечено в предыдущей работе [7].

При этом модифицированная модель „Н-коллизий“ позволяет получить сублинейную зависимость числа

свободных связей при насыщении от интенсивности облучающего света в одном диапазоне кратностей концентрирования и отсутствие этой зависимости в другом, что может означать непротиворечивость данных, представленных в работах [7] и [23].

## 5. Заключение

В данной работе были исследованы наиболее известные модели фотоиндуцированной деградации аморфных материалов с точки зрения их применимости для описания процессов изменения фотоэлектрических характеристик  $\alpha$ -Si : H/ $\mu$ -Si : H фотопреобразователей. Показано, что как модель „плавающих“ связей, так и две разновидности модели „Н-коллизий“ позволяют удовлетворительно аппроксимировать экспериментальную зависимость концентрации свободных связей в слое ФП  $i$ - $\alpha$ -Si : H при заданных условиях светового воздействия.

При этом отсутствие зависимости концентрации свободных связей при насыщении фотоиндуцированной деградации от интенсивности светового воздействия может быть объяснено только в рамках модифицированной модели плавающих связей [7] и модифицированной модели „Н-коллизий“. По этой причине именно эти модели стоит считать наиболее перспективными для дальнейших исследований.

Для дополнительной проверки корректности модельных представлений целесообразно исследовать процессы фотоиндуцированной деградации в широком диапазоне освещенностей и при различных температурах. Также представляет интерес исследование восстановления свойств фотопреобразователя путем его отжига при разных температурах.

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

## Список литературы

- [1] C.R. Wronsky. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **469**, 7 (1997).
- [2] D.L. Staebler, C.R. Wronski. *Appl. Phys. Lett.*, **31**, 292 (1977).
- [3] A. Kolodziej. *Opto-electron. Rev.*, **12**, 21 (2004).
- [4] X. Deng, M. Izu, K.L. Narasimhan, S.R. Ovshinsky. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **336**, 699 (1994).
- [5] A. Luque, S. Hegedus. *Handbook of photovoltaic science and engineering* (John Wiley and Sons, 2003), p. 551.
- [6] W. Luft, B. van Roedem, B. Stafford, L. Mrig. *23rd IEEE PVSC*, **93**, 158 (1993).
- [7] В.М. Емельянов и др. *ФТП*, **5** (2013, в печати).
- [8] N. Ishii, M. Kumeda, T. Shimizu. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **24**, L244 (1985).
- [9] D. Redfield, R.H. Bube. *Phys. Rev. Lett.*, **65**, 464 (1990).
- [10] D. Adler. *Solar Cells*, **9**, 133 (1983).
- [11] D. Adler. *J. de Phys.*, **42**, C4–3 (1981).
- [12] M. Stutzmann, W.B. Jackson, C.C. Tsai. *Phys. Rev. B*, **32**, 23 (1985).
- [13] T. Shimizu, M. Kumeda. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35**, L816 (1996).
- [14] T. Shimizu, R. Durny, M. Kumeda. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **420**, 553 (1996).
- [15] T. Shimizu, M. Kumeda. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, L911 (1999).
- [16] R. Biswas, Y.P. Li, B.C. Pan. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **609**, A3.5 (2000).
- [17] H.M. Branz. *Sol. St. Commun.*, **105**, 387 (1998).
- [18] H.M. Branz. *Phys. Rev. B*, **59**, 5498 (1999).
- [19] H.M. Branz. *Sol. Energy Mater. Solar Cells*, **78**, 425 (2003).
- [20] T. Shimizu. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43**, 3257 (2004).
- [21] K.C. Palinginis, J.D. Cohen, S. Guha, J. Yang. *Phys. Rev. B*, **63**, 201 203 (2001).
- [22] N.H. Nickel, W.B. Jackson. *Phys. Rev. B*, **51**, 4872 (1995).
- [23] Z.Y. Wu, J.M. Siefert, B. Eguer. *J. Non-Cryst. Solids*, **137/138**, 227 (1991).
- [24] M.J. Powell, R.B. Wehrspohn, S.C. Deane. *J. Non-Cryst. Sol.*, **299–302**, 556 (2002).
- [25] M.S. Brandt, M.W. Bayerl, M. Stutzmann, C.F.O. Graef. *J. Non-Cryst. Sol.*, **227–230**, 343 (1998).

Редактор Т.А. Полянская

## Light-induced degradation mechanisms analysis in $\alpha$ -Si : H/ $\mu$ -Si : H solar photoconverters

V.M. Emelyanov\*, A.S. Abramov\*\*+, A.V. Bobyl\*, V.N. Verbitsky\*<sup>≠</sup>, A.S. Gudovskikh\*, E.M. Ershenko\*, S.A. Kudryashov\*, E.I. Terukov\*\*+, 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** An analysis of light-induced degradation of a  $i$ - $\alpha$ -Si : H layer in tandem photoconverters based on  $\alpha$ -Si : H/ $\mu$ -Si : H structures with „H-collision“ and „floating bond“ models and their modifications was carried out. It was shown that the shape of the degradation dependence could be approximated with all of the studied models. The original „H-collision“ and „floating bond“ models, in comparison with the modified ones, estimate saturated concentrations of dangling bonds depending on an intensity of a light that caused the degradation. The modified „floating bond“ model allows to exclude this dependence, and the modified „H-collision“ model gives such dependence in one range of light intensities and the lack of it in another what exhibits the best compliance with experimental data.