

Методика исследования световой деградации tandemных фотопреобразователей α -Si:H/ μ c-Si:H при повышенной освещенности

© О.И. Честа^{¶*}, Г.М. Аблаев^{+°}, А.А. Блатов[‡], А.В. Бобыль^{*}, В.М. Емельянов^{*},
Д.Л. Орехов⁺, Е.И. Теруков^{*+,}, Н.Х. Тимошина^{*}, 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

‡ Национальный исследовательский технологический университет „МИСИС“,
119049 Москва, Россия

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

Представлены описание созданной экспериментальной установки и методика ее использования для проведения ускоренных испытаний тонкопленочных фотопреобразователей α -Si:H/ μ c-Si:H размером до 100×100 мм на световую деградацию при повышенной освещенности (до 10 кВт/м^2). Проведено сравнение результатов оценки уровня фотоиндуцированной деградации фотопреобразователей по стандартной и разработанной методике и показано, что методика исследования фотоиндуцированной деградации при повышенной освещенности позволяет в 100 раз сократить время проведения испытаний, обеспечивая полностью адекватную оценку стабильности фотопреобразователей на основе аморфного и микрокристаллического кремния.

1. Введение

Характерной особенностью тонкопленочных фотопреобразователей (ФП) на основе аморфного и микрокристаллического кремния, которые в последние годы приобретают все большее распространение, является постепенное снижение их фотоэлектрических характеристик при воздействии солнечного излучения, называемое фотоиндуцированной (световой) деградацией [1]. Этот процесс тесно связан с явлением снижения фотопроводимости пленок α -Si:H при их длительном освещении, который известен как эффект Стаблера–Вронского [2]. Типичное снижение 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 [3–6]. Теоретическое и экспериментальное изучение процессов световой деградации ФП позволяет установить основные механизмы, определяющие потери КПД ФП, и произвести оптимизацию структур фотопреобразователей для повышения стабильности их характеристик.

В практике создания α -Si:H/ μ c-Si:H тонкопленочных ФП оценки уровня фотоиндуцированной деградации их фотоэлектрических характеристик проводят при освещенности $600\text{--}1000 \text{ Вт/м}^2$ и температуре не более $50\text{--}60^\circ\text{C}$ с общей продолжительностью облучения не менее 1000 ч [6–8].

Из литературы известно [9], что при освещении количество сгенерированных дефектов типа оборванной связи в объеме материала α -Si фотоактивного элемента (именно этот каскад определяет деградацию фотоэлектрических характеристик α -Si:H/ μ c-Si:H ФП) пропорционально времени экспозиции t и квадрату уровня освещенности G :

$$N_d^3(t) \propto G^2 t. \quad (1)$$

Таким образом, увеличивая уровень освещенности, можно значительно сократить время экспозиции и соответственно уменьшить стоимость испытаний. Так, например, увеличив облученность в 10 раз до 10 кВт/м^2 (эквивалент кратности концентрирования солнечного излучения 10 крат), суммарное время экспозиции сократится до 10 ч при обеспечении уровня деградации фотоэлектрических параметров, аналогичного получаемому при продолжительном (1000 ч) облучении с плотностью светового потока в 1 кВт/м^2 .

Цель данной работы состояла в создании экспериментальной установки для проведения ускоренных испытаний α -Si:H/ μ c-Si:H ФП размером до 100×100 мм на световую деградацию при повышенной освещенности (до 10 кВт/м^2), разработке методики испытаний и ее апробации при исследовании и оценке уровня фотоиндуцированной деградации ФП на основе аморфного и микрокристаллического кремния.

Для испытаний были выбраны образцы ФП, в которых фототок верхнего α -Si элемента превышает фототок нижнего μ c-Si элемента, обеспечивая режим ограничения по величине генерируемого тока со стороны

[¶] E-mail: Chesta1955@yandex.ru

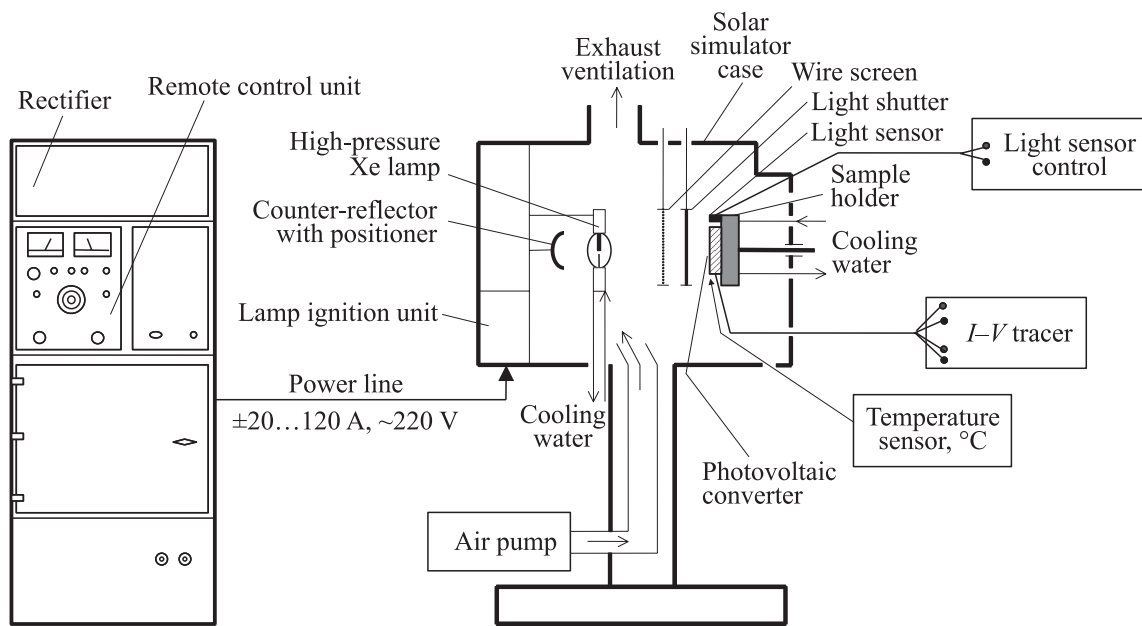


Рис. 1. Схема установки для проведения ускоренных испытаний тестовых образцов на световую деградацию.

последнего. По мере увеличения световой экспозиции фототок α -Si элемента будет уменьшаться вплоть до согласования с фототоком μ c-Si элемента, значение которого практически не изменяется. Таким образом, в исследуемых тонкопленочных ФП α -Si:H/ μ c-Si:H следует ожидать меньшего уровня фотоиндуцированной деградации фотоэлектрических параметров, в совокупности определяющих снижение КПД ФП.

2. Установка для проведения ускоренных испытаний образцов на световую деградацию при повышенной освещенности

Совокупность требований по спектральному составу и плотности мощности излучения, площади и равномерности засветки испытываемого тестового образца ФП, которые определены в [10,11], предопределяет при проведении таких испытаний возможность использования в качестве источника излучения мощной дуговой ксеноновой лампы высокого давления типа ДКсР. Спектральная плотность потока таких ламп распределена следующим образом: 9% УФ область, 35% видимая, 40% ИК от 0.8 до 1 мкм и 16% ИК более 1 мкм. Анализ свето-энергетических характеристик таких источников излучения показал, что для выполнения заданных требований электрическая мощность лампы должна составлять не менее 5 кВт. Так как к условиям эксплуатации ламп типа ДКсР предъявляются высокие требования по обеспечению взрывобезопасности, охлаждения, вентиляции и стабильности энергоснабжения, то установку для проведения ускоренных испытаний ФП

на световую деградацию целесообразно создавать на базе действующего осветителя с такой лампой. В работе в качестве основы для создания установки выбран действующий промышленный имитатор солнечного излучения ИС-160 с дуговой ксеноновой лампой высокого давления ДКсР-5000 и предварительно демонтированной формирующей оптической системой. Схема созданной установки приведена на рис. 1. Лампа размещена вертикально внутри металлического корпуса имитатора на специальном юстировочном устройстве с анодным держателем. Для повышения эффективности использования светового потока за лампой установлен контротражатель, который имеет независимое юстировочное устройство. Время непрерывной работы лампы ДКсР-5000 составляет до 50 ч. Питание лампы производится от регулируемого выпрямителя с устройством для защиты ламп при прекращении циркуляции охлаждающей воды и воздуха. Выпрямитель обеспечивает стабильность светового потока в течение 10 ч при неизменных параметрах питающей сети не ниже 95%, имеет напряжение холостого хода 60 В и функцию плавной регулировки тока лампы в диапазоне от 20 до 300 ампер. Поджиг лампы производится поджигающим устройством, на вход которого подается короткий, 1–2 с, импульс напряжения от сети 220 В, 50 Гц. Для охлаждения лампы используется водопроводная вода в количестве 10 л/мин и воздух в количестве 50 м³/ч. Отвод образующегося при горении лампы озона обеспечивается вытяжной вентиляцией производительностью не менее 50 м³/ч.

Тестовый образец устанавливается в зоне светового облучения от лампы на медный столик, охлаждаемый водой для обеспечения требуемого температурного режима при проведении испытаний. На столике также

закреплен датчик освещенности (солнечный элемент типа GaInP со спектральной фоточувствительностью, близкой к чувствительности субэлемента на основе α -Si, имеющий линейную зависимость фототока от освещенности в диапазоне световых потоков до 100 кВт/м^2 в соответствии с [12]). Узел крепления столика к корпусу ИС-160 позволяет перемещать его по оптической оси „контротражатель–дуга лампы–центр столика (тестового образца)“.

Настройка излучателя для обеспечения требуемого уровня освещенности в плоскости расположения ФП требует конечного времени, поэтому в установке предусмотрен оптический затвор, исключающий прямое облучение испытываемого образца светом лампы при настройке и измерении освещенности контрольным датчиком.

Регулировка уровня освещенности ФП возможна изменением как тока лампы так и (или) варьированием расстояния между лампой и столиком путем перемещения последнего. Для увеличения диапазона регулирования освещенности образца в установке предусмотрена возможность введения в световой поток нейтрального ослабителя (~ 5 крат) в форме сетки с мелкой перфорацией.

В состав установки также входят измеритель температуры тестового образца OMEGA CNI1622 (точность измерения температуры $\pm 0.5^\circ\text{C}$) с датчиком типа RTD 100 (100 Ом, температурный коэффициент $0.00385 \text{ Ом(Ом/град)}$), мультиметр INSTEK GDM-8145 для измерения тока датчика освещенности, калибратор-мультиметр цифровой (измеритель ВАХ) Keithley 2400 и ПК с программой, осуществляющей управление измерением ВАХ и освещенности и регистрацию получаемой информации.

При создании установки и отработке методики испытаний выполнены следующие исследования:

— измерение спектральной характеристики лампы ДКСР-5000 при различных токовых режимах с использованием портативного спектрометра AvaSpec 2048 UV (фирма AVANTES, Нидерланды). Установлено, что в широком диапазоне токов лампы спектральный состав ее излучения не изменяется. Это позволяет считать эквивалентным регулирование освещенности тестового образца изменением расстояния от источника света или током лампы;

— измерение температуры макета тестового образца при различных уровнях освещенности (до 10 крат). Показано, что при расходе воды для охлаждения столика не менее 1 л/мин обеспечивается заданная температура образца ($\sim 25^\circ\text{C}$) во всем диапазоне освещенностей, используемых при испытаниях;

— определение места установки ФП относительно лампы и величины тока лампы, при которых уровень освещенности образца составляет 1 и 10 крат с введением в световой поток нейтрального ослабителя (сетки) и без него соответственно;

— нормирование показаний датчика освещенности, размещенного на столике в периферийной зоне, по показаниям „эталонного“ датчика освещенности, размещенного в центре столика, при различных режимах установки („закрыто–открыто“) нейтрального ослабителя.

3. Методика испытаний и оценки уровня световой деградации солнечных фотопреобразователей

Оценка уровня световой деградации солнечных фотопреобразователей производится на основе сравнения начальных значений фотоэлектрических характеристик с аналогичными характеристиками после испытаний. Испытания проводятся до стабилизации фотоэлектрических характеристик солнечных фотопреобразователей. Критерием достижения стабилизации фотоэлектрических характеристик является выполнение условия $(P_{\max} - P_{\min})/P_{\text{average}} < 2\%$, где P_{\max} , P_{\min} и P_{average} — максимальное, минимальное и среднее значения максимальной мощности ФП, полученные в серии из трех измерений ВАХ, проводимых последовательно по мере накопления уровня световой экспозиции не менее $43 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^2$ по сравнению с предыдущим измерением (в соответствии с IEC 61646 [8]). Таким образом, при уровне облученности 1 кВт/м^2 контрольные измерения ВАХ следует проводить через 43 ч световой экспозиции. В случае организации ускоренных испытаний на световую деградацию, например при уровне облученности 10 кВт/м^2 (эквивалент кратности концентрирования солнечного излучения 10 крат), контроль фотоэлектрических параметров ФП и оценку достижения их стабилизации следует проводить с интервалом в 4.3 ч.

Измерение ВАХ ФП до и после испытаний производилось на установке с имитатором солнечного излучения постоянного горения SS-80AA (PET Photoemission, США), а для определения динамики фотоиндуцированной деградации также и во время испытаний при уровне облученности 1 кВт/м^2 .

В соответствии с этим методика испытаний включает следующую последовательность операций (без учета действий, связанных с выполнением инструкции по эксплуатации экспериментальной установки).

1. Измерение ВАХ ФП на установке с имитатором солнечного излучения постоянного горения SS-80AA.

2. Установка ФП на столик. Для обеспечения эффективного теплоотвода предварительное нанесение на столик слоя кремнийорганической теплопроводной пасты.

3. Установка столика с ФП в держатель корпуса ИС-160.

4. Перевод светового затвора и нейтрального ослабителя (сетка) в положение „ВВЕДЕН“.

5. Регулировка тока лампы для подстройки уровня освещенности в плоскости испытаний (1000 Вт/м^2 по данным предварительных торировочных исследований).

6. Перевод оптического затвора в положение „ОТКРЫТО“.

7. Корректировка уровня облученности ФП для установки режима освещенности 1 кВт/м^2 в соответствии с показаниями датчика освещенности.

8. Измерение ВАХ ФП и значение его температуры.

9. Повтор пунктов 7 и 8 не менее 3 раз.

10. Перевод оптического затвора в положение „ЗАКРЫТО“.

11. Перевод нейтрального ослабителя (сетки) в положение „ВЫВЕДЕН“.

12. Установка тока лампы, при котором обеспечивается освещенность ФП на уровне 10000 Вт/м^2 по данным предварительных торировочных исследований.

13. Перевод оптического затвора в положение „ОТКРЫТО“.

14. Корректировка уровня облученности ФП для установки режима освещенности 10 кВт/м^2 в соответствии с показаниями датчика освещенности.

15. Облучение ФП световым потоком заданной плотности в течение заданного времени.

16. Перевод нейтрального ослабителя в положение „ВВЕДЕН“.

17. Повтор пунктов 7–10.

18. Повтор пунктов 11–17 с интервалом не более 15 мин в первые 3 ч облучения и с интервалом не более 30–60 мин в последующие.

19. По достижении заданной общей продолжительности облучения выключить лампу и снять тестовый образец.

20. Измерение ВАХ ФП на установке с имитатором солнечного излучения постоянного горения SS-80AA.

21. Повтор испытаний до выполнения критерия достижения стабилизации фотоэлектрических характеристик.

4. Результаты исследования фотоиндуцированной деградации ФП $\alpha\text{-Si:H}/\mu\text{-Si:H}$ при повышенной освещенности

Проверка методики испытаний проводилась при исследовании процессов фотоиндуцированной деградации ФП на основе тандемной структуры $\alpha\text{-Si:H}/\mu\text{-Si:H}$ с двумя фотоактивными $p\text{-}n$ -переходами с начальным КПД 10.4% [13].

Для исследования фотоиндуцированной деградации были отобраны тестовые образцы ФП $\alpha\text{-Si:H}/\mu\text{-Si:H}$ с исходно близкими характеристиками, один из которых подвергался испытаниям по стандартной методике при облучении световым потоком стандартной плотности 1 кВт/м^2 (1 X), а второй — потоком повышенной плотности 10 кВт/м^2 (10 X) по изложенной выше методике. Суммарная продолжительность светового воздействия составляла 1000 и 19 ч для уровней освещенности 1 X и 10 X (эквивалент 1900 ч при 1 X) соответственно. С целью контроля и последующего анализа причин

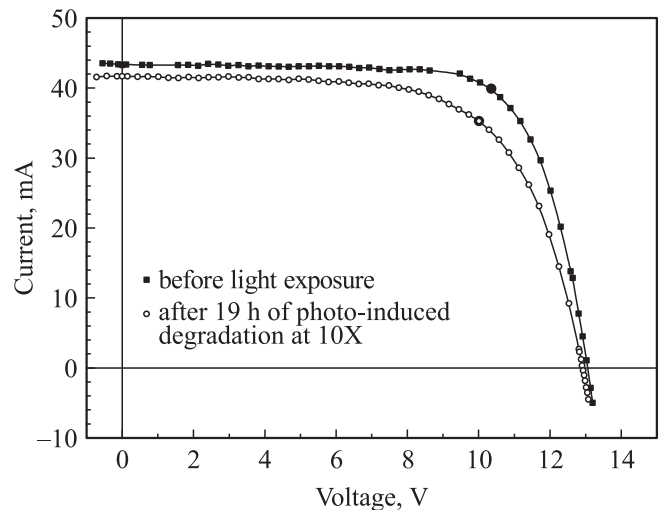


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики фотопреобразователей до и после светового воздействия общей продолжительностью 19 ч при плотности потока излучения 10 X.

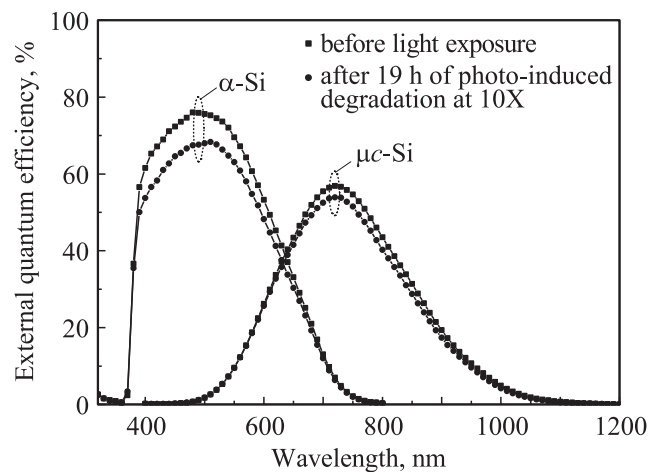


Рис. 3. Спектральные характеристики $\alpha\text{-Si:H}$ и $\mu\text{-Si:H}$ субэлементов двухпереходного ФП до и после 19 ч воздействия световым потоком 10 X.

световой деградации характеристик отдельных фотоактивных $p\text{-}n$ -переходов до, в процессе и по завершении испытаний проводились измерения спектральных и вольт-амперных характеристик ФП.

Результаты измерений ВАХ ФП до и после светового воздействия общей продолжительностью 19 ч при плотности потока излучения 10 X демонстрируют (рис. 2), что имеет место деградация всех фотоэлектрических параметров — фототока, напряжения холостого хода, фактора заполнения ВАХ и КПД.

Анализ спектральных зависимостей (рис. 3) поясняет причину падения фототока — незначительное снижение фоточувствительности $\mu\text{-Si}$ субэлемента. Тем не менее заложенные в усовершенствованную структуру ФП решения позволили в результате фотоиндуцированной деградации практически уравнивать величины фототоков

Изменение величин фототоков субэлементов при фотоиндуцированной деградации в условиях облучения α -Si:H/ μ c-Si:H ФП световым потоком плотностью 10 кВт/м^2

Время светового воздействия, ч	Плотность фототока, мА/см^2	
	α -Si субэлемент	μ c-Si субэлемент
0	11.2	10.2
10	10.1	9.6
14.5	9.9	9.5
19	10.1*	9.5

Примечание. * Некоторое возрастание значения плотности фототока связано с непрерывно протекающими процессами образования и восстановления дефектов типа оборванной связи в объеме материала при освещении α -Si субэлемента, находящегося в застabilизированном состоянии.

субэлементов при переводе ФП в застabilизированное состояние (см. таблицу).

Результаты оценок темпа фотоиндуцированной деградации фотоэлектрических параметров ФП, полученные при измерениях ВАХ по мере достижения уровня световой энергетической экспозиции $100 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^2$ (10 ч облучения при плотности потока излучения 10 X), представлены на рис. 4. Установлена крайне незначительная деградация фототока (в силу причин, описанных выше), что подтверждает правильность выбранного подхода при проектировании и создании оптимизированных α -Si/ μ c-Si структур ФП. Снижение же значений напряжения холостого хода, фактора заполнения ВАХ и максимальной мощности носит фундаментальный характер, связанный с дефектообразованием в объеме $p-i-n$ -структуры, прежде всего α -Si субэлемента. Ход зависимости максимальной мощности от времени светового воздействия показывает, что наиболее высокий темп деградации происходит в первые 3–4 ч вплоть до набора интегральной световой дозы $40 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^2$.

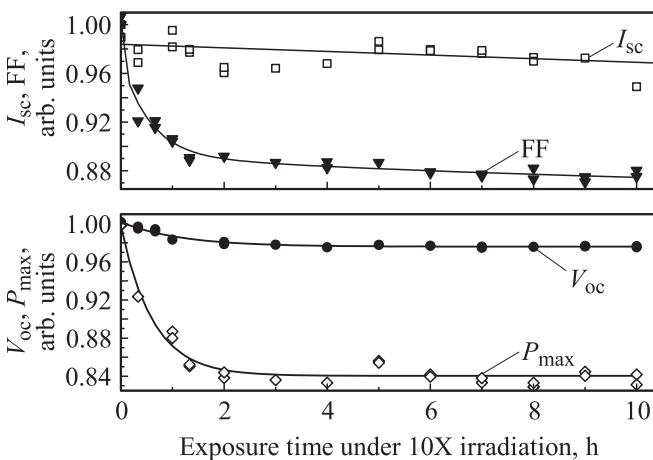


Рис. 4. Темп фотоиндуцированной деградации фотоэлектрических параметров тестового образца: фототока (I_{sc}), напряжения холостого хода (V_{oc}), фактора заполнения ВАХ (FF), максимальной выходной мощности (P_{max}).

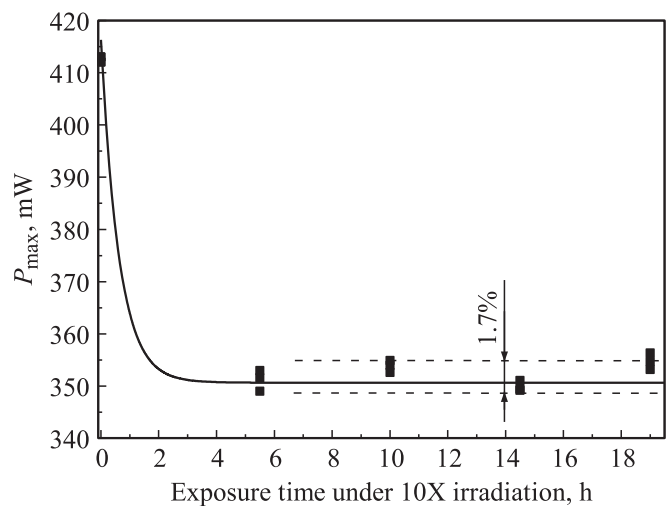


Рис. 5. Снижение выходной мощности тестового образца при фотоиндуцированной деградации: точки — измерения на имитаторе SS80AA (1000 Вт/м^2 , AM1.5G), сплошная линия отражает темп деградации по результатам измерений на имитаторе ИС 160 (1000 Вт/м^2) во время проведения испытаний.

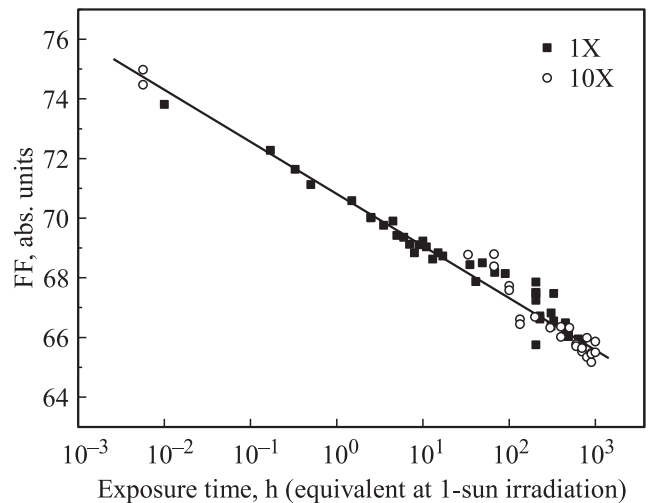


Рис. 6. Зависимость изменения FF от логарифма времени фотоиндуцированной деградации в условиях стандартной освещенности (1X) и логарифма времени, эквивалентного стандартному, для условий повышенной освещенности (10X).

Затем изменение фотоэлектрических параметров прекращается.

Для контроля выполнения критерия по достижению стабилизации фотоэлектрических характеристик измерения ВАХ проводились трижды с интервалом в 4.5 ч (общее время облучения 10, 14.5 и 19 ч соответственно) после стабилизации фотоэлектрических параметров ФП (5 ч от начала облучения с плотностью потока 10 X). Полученные в результате трех последовательных измерений значения максимальной мощности имеют разброс в пределах 1.7% (рис. 5), что свидетельствует о стабилизации ФП [8]. Снижение выходной электрической

мощности и КПД составило около 15–16%, что соответствует современному уровню по световой деградации для данного типа фотопреобразователей.

При сравнении результатов фотоиндуцированной деградации при стандартной и повышенной освещенности необходимо учитывать, что скорость деградации (возрастания плотности состояний) квадратично зависит от интенсивности излучения (формула (1)). Так как интенсивность в условиях повышенной освещенности в 10 раз превосходит стандартную, то для определения времени, эквивалентного стандартному облучению, время повышенной освещенности должно быть умножено на 100. На рис. 6 представлена зависимость изменения FF от продолжительности светового воздействия в условиях стандартной ($1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$) и повышенной ($10 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$) освещенностей в логарифмической шкале времени. Видно, что результаты измерений динамики изменения FF для обеих методик находятся в полном взаимном согласии и полностью соответствуют зависимости, описываемой формулой (1).

Таким образом, результаты исследований изменения фотоэлектрических характеристик $\alpha\text{-Si:H}/\mu\text{-Si:H}$ ФП, полученные в условиях воздействия излучением со стандартной и повышенной плотностью потока, с учетом различий методик проведения испытаний (в частности, контроль температурных режимов при испытаниях) и погрешностей измерения находятся во взаимном соответствии. Разработанная методика исследования фотоиндуцированной деградации при повышенной освещенности позволяет в 100 раз сократить время проведения измерений, обеспечивая полностью адекватную оценку стабильности ФП на основе аморфного и гидрогенизированного кремния.

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, C.R. Wronski, P. Krewniak, S. Nowak. *Opto-Electronics 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. *Proc. 23rd IEEE PVSC* (Louisville, KY, 1993) p. 860.
- [7] T. Tonon, X. Li, A.E. Delahoy. *AIP Conf. Proc.*, **234**, 259 (1991).
- [8] IEC 61646. *Thin-film Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules-Design, Qualification and Type Approval*. 2nd edn (2008).
- [9] M. Stutzmann, W.B. Jackson, C.C. Tsai. *Phys. Rev. B*, **32**, 23 (1985).
- [10] IEC 60904-9 *Photovoltaic devices. Pt 9: Solar simulator performance requirements*, 2nd edn (2007).

- [11] Werner Luft, Bolko von Roedern. *Proc. of 1st WCPEC* (Waikoloa, Hawaii, 1994) p. 457.
- [12] IEC 60904-10 *Photovoltaic devices. Pt 10: Methods of linearity measurement*. 2nd edn (2009).
- [13] В.М. Емельянов и др. ФТП, **45**, 667 (2013).

Редактор Т.А. Полянская

Method of light-induced degradation study of $\alpha\text{-Si:H}/\mu\text{-Si:H}$ solar photoconverters at increased irradiance

O.I. Chesta*, G.M. Ablayev^{+o}, A.A. Blatov[‡],
A.V. Bobyl*, V.M. Emelyanov*, D.L. Orekhov⁺,
E.I. Terukov^{*+}, N.Kh. Timoshina*, 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

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

[‡] National University of Science and Technology
„MISIS“,
119049 Moscow, Russia

Abstract Presented are the description of the created experimental installation and the procedure of its application for carrying out accelerated tests of the thin-film solar cells (SCs) of up to $100 \times 100 \text{ mm}$ in size for light degradation at elevated illumination (up to $10 \text{ kW}/\text{m}^2$). Comparison of the results of the SC photo-induced degradation level by the standard and elaborated procedures has been done. It has been shown that the procedure of the photo-induced degradation study at elevated illumination allows reducing in 100 times the duration of tests completely ensuring the adequate estimation of stability of SCs based on amorphous and microcrystalline silicon.