

ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ СЛОИ И МНОГОСЛОЙНЫЕ КОМПОЗИЦИИ

УДК 621.315.592

ДЕГРАДАЦИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ГИДРОГЕНИЗИРОВАННОГО АМОРФНОГО КРЕМНИЯ

© 2013 г. В. Н. Мурашев¹, С. А. Леготин¹,
А. А. Краснов¹, А. А. Дудкин², Д. А. Зезин³

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
² НПП КВАНТ,

³ Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»

Опыт эксплуатации солнечных элементов (СЭ) на основе гидрогенизированного аморфного кремния показал, что, помимо низкой эффективности, эти преобразователи значительно быстрее деградируют по сравнению с СЭ на основе монокристаллического кремния. Процессы, которые определяют деградацию СЭ на аморфных материалах, изучены недостаточно, а также известны сообщения о деградации подобных образцов без света. Проведен эксперимент по сравнению особенностей изменения во времени основных параметров преобразователя в темноте и под действием естественного освещения. Продемонстрировано снижение тока короткого замыкания в образцах, выдержанных в темноте. Показано, что изменение этого параметра у засвеченных образцов в среднем такое же, а для отдельных образцов падение тока короткого замыкания существенно больше. Это свидетельствует о том, что наблюдаемый эффект не связан с эффектом Стеблера—Вронского.

Ключевые слова: деградация солнечных элементов, тонкопленочные солнечные батареи, гидрогенизированный аморфный кремний, дисперсионные кривые, эффект Стеблера—Вронского.

Введение

Опыт эксплуатации солнечных элементов (СЭ) на основе гидрогенизированного аморфного кремния (α -Si : H) показал, что, помимо низкой эффективности, эти преобразователи значительно быстрее деградируют по сравнению с СЭ на основе монокристаллического кремния.

Поскольку процессы, которые определяют деградацию СЭ на аморфных материалах, изучены недостаточно [1], а также известны сообщения о деградации подобных образцов без света [2], был проведен эксперимент по сравнению осо-

бенностей изменения во времени основных параметров преобразователя в темноте и под естественным освещением. Результаты этого эксперимента и их анализ представлены ниже.

Экспериментальная часть

Для измерений использовали тестовые образцы, изготовленные в качестве контрольных параллельно с СЭ на промышленной технологической линии фирмы ECD (Trois, USA). На рис. 1 схематично изображены основные элементы СЭ, произведенного по данной технологии.

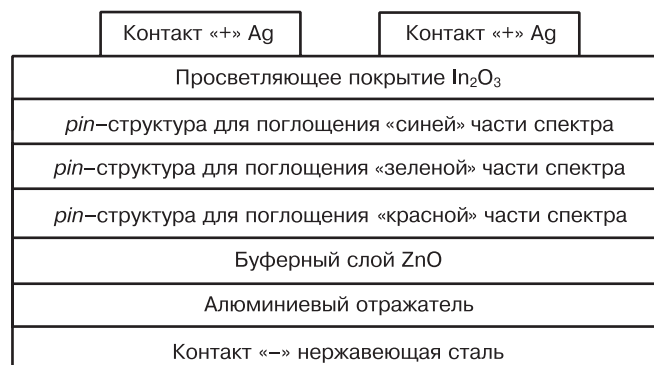


Рис. 1. Структура тестовых СЭ. Свет падает со стороны верхних серебряных контактов

В качестве подложки (отрицательный контакт) использовали тонкий лист нержавеющей стали, на который наносили: слой алюминия (отражатель и контакт), «буферный» слой из проводящего оксида цинка (контакт к слою $a\text{-Si} : \text{H}$ n -типа проводимости), три последовательно соединенные тонкопленочные pin -структуры на основе $a\text{-Si} : \text{H}$, фронтальное просветляющее покрытие из $\text{In}_x\text{Sn}_y\text{O}$ (ITO), служившее контактом к слою $a\text{-Si} : \text{H}$ p -типа проводимости. На фронтальную поверхность наносили токособирающие электроды. Слои аморфного кремния наносили в тлеющем разряде из рабочей смеси газов, содержащих силан и водород.

Для создания слоев с электронным или дырочным типом проводимости в рабочую смесь добавляли фосфин или диборан. За счет изменения состава рабочей смеси и температуры подложки, изменялась кривая оптического поглощения i -области для каждого из каскадов [3]. Основное поглощение фронтального слоя приходилось на «синюю» область солнечного спектра, тыльного — на «красную» и среднего — на «зеленую». Согласование значений фототока осуществляли за счет изменения толщины слоев. Максимальную фотоЭДС генерировал верхний электрод, минимальную — нижний.

Для оценки возможной деградации СЭ на свету и в темноте партия из 40 образцов была разделена на две части. Обе группы были помещены в естественные условия (широта $55^\circ 50'$, долгота $37^\circ 37'$). При этом группу 1 подвергали естественному солнечному освещению, группа 2 все время находилась в темноте. Кроме этих двух партий, имелась небольшая контрольная партия образцов, изготовленных по той же технологии, хранившаяся в сейфе при комнатной температуре. Для каждого из образцов периодически измеряли темновую и световую вольт-амперные характеристики, по которым рассчитывали параметры СЭ: плотность тока короткого замыкания $J_{s,c}$, напряжение холостого хода $U_{o.c.}$, пиковую мощность P_{max} , коэффициент заполнения FF , последовательное и параллельное электрические сопротивление (R_s и R_{sh} соответственно). В таблице даны начальные параметры СЭ, исследованных в ходе эксперимента.

Результаты и их обсуждение

Поскольку результат наблюдений являлся суммой многих случайных слабозависимых величин (считается, что образцы в ходе эксперимента друг на друга не влияли), каждая из которых вносила малый вклад относительно общей суммы (отсутствовали образцы, изменение характеристик которых сильно выделялось

бы из общего количества), то при увеличении числа образцов распределение централизованного и нормированного результата стремится к нормальному, что позволяет широко использовать это распределение при анализе старения приборов электронной техники [4—7]. По этой причине результаты измере-

Начальные и конечные параметры исследованных образцов

№	$J_{s,c}$, мА/см ²		$U_{o.c.}$, В		P_{max} , мВт/см ²		FF		R_s , Ом/см ²	
	Н	К	Н	К	Н	К	Н	К	Н	К
1	5,32	5,01	2,23	2,20	8,07	6,66	0,67	0,60	56,1	76,2
2	5,42	5,10	2,19	2,17	7,16	6,17	0,60	0,55	64,3	95,2
3	5,27	4,94	2,21	2,20	7,40	6,38	0,63	0,58	60,4	85,3
4	5,24	5,00	2,22	2,23	7,73	6,88	0,66	0,61	62,9	65,0
5	5,31	4,92	2,23	2,22	7,93	6,61	0,66	0,60	61,6	82,0
6	5,34	5,01	2,23	2,26	7,95	7,57	0,66	0,66	63,9	67,7
7	5,30	5,16	2,22	2,24	7,68	7,40	0,65	0,63	65,7	74,5
8	5,39	5,14	2,23	2,25	7,65	7,37	0,63	0,63	90,6	89,9
9	5,41	5,07	2,21	2,22	7,40	6,60	0,61	0,58	66,3	91,5
10	5,44	5,18	2,24	2,25	7,81	7,57	0,64	0,64	77,0	75,7
11	5,24	4,88	2,22	2,24	7,36	6,41	0,63	0,58	62,0	101
12	5,23	4,83	2,22	2,23	7,29	6,46	0,62	0,59	62,4	78,1
13	5,29	4,90	2,24	2,26	8,10	7,54	0,68	0,67	58,2	66,4
14	5,28	5,03	2,24	2,26	7,90	7,34	0,66	0,64	61,9	79,1
15	5,27	4,94	2,25	2,26	8,14	7,29	0,68	0,65	58,3	81,4
16	5,08	4,83	2,24	2,27	7,53	7,38	0,65	0,67	67,2	63,2
17	5,04	4,77	2,19	2,22	6,35	6,09	0,57	0,57	65,6	80,4
18	5,11	4,85	2,23	2,24	7,25	6,60	0,63	0,60	61,2	73,3
19	5,11	4,77	2,25	2,02	7,83	3,24	0,68	0,33	60,0	115
20	5,08	4,79	2,24	2,26	7,12	6,85	0,62	0,63	82,8	77,9
21	5,11	4,77	2,23	2,25	7,32	6,86	0,64	0,63	65,0	72,8
22	5,13	4,94	2,25	2,27	7,69	7,57	0,66	0,67	73,6	59,7
23	5,11	4,95	2,26	2,28	7,91	7,77	0,68	0,68	62,0	60,7
24	5,09	4,98	2,26	2,28	7,86	7,69	0,68	0,67	61,7	65,9
25	5,08	4,85	2,26	2,27	7,70	7,54	0,66	0,68	70,3	66,4
26	4,97	4,74	2,20	2,21	6,17	5,89	0,56	0,56	66,0	70,2
27	5,08	4,75	2,26	2,27	7,84	7,29	0,69	0,67	58,6	71,6
28	4,96	4,85	2,25	2,26	7,00	7,06	0,62	0,64	98,5	68,6
29	4,97	4,79	2,25	2,26	7,33	7,20	0,65	0,63	57,8	59,6
30	4,94	4,70	2,27	2,27	7,48	7,20	0,66	0,67	79,6	82,9
31	5,00	4,79	2,27	2,27	7,56	7,56	0,66	0,69	75,0	60,1

Обозначения: «Н», «К» — начальные и конечные параметры соответственно.

ний для каждой из групп усредняли по среднему значению, а затем аппроксимировали нормальным (гауссовым) распределением плотности вероятности по формуле

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где μ — среднее значение; σ^2 — дисперсия результатов выборки.

На всех экспериментальных графиках по оси абсцисс отложены приведенные к среднему значению измеренные величины, обработанные по формуле (1).

На рис. 2 приведены дисперсионные кривые для плотности тока короткого замыкания. Нормирование характеристик образцов, засвеченных в ходе эксперимента, осуществляли на 5,33 мА/см². Среднее значение плотности тока после эксперимента составило 4,99 мА/см², а для образцов, не подвергавшихся засветке, — 5,17/4,90 мА/см² (Здесь и далее: первым числом является среднее значение характеристики до эксперимента, вторым — после эксперимента). Из рис. 2 видно, что для освещенных и неосвещенных образцов средние значения плотности тока короткого замыкания изменились на близкие по абсолютному значению величины, при этом образцы, хранившиеся в темноте, показали большее снижение параметра.

Аналогичные расчеты проведены для напряжения холостого хода. Средние значения для образцов, засвеченных в ходе эксперимента, составили

2,22/2,20 В, для образцов, не подвергавшихся засветке, — 2,24/2,26 В.

Следует отметить, что все образцы, выставленные под естественное освещение, показали снижение напряжения холостого хода, в то время как образцы, находившиеся в темноте, повысили этот параметр.

Далее были рассчитаны зависимости для последовательного сопротивления СЭ. Средние значения для образцов, засвеченных в ходе эксперимента, составили 60,60/84,68 Ом/см², для образцов, не подвергавшихся засветке, — 68,23/73,21 Ом/см².

Незасвеченные образцы показали низкое изменение параметра, в то время как засвеченные образцы демонстрируют самое высокое изменение среднего значения.

Похожие кривые получены для шунтирующего сопротивления. Средние значения для образцов, засвеченных в ходе эксперимента, составили 3975/4375 Ом/см², для образцов, не подвергавшихся засветке, — 5612/5850 Ом/см².

Таким образом, можно сделать следующие выводы. Ток короткого замыкания солнечной батареи приблизительно равен фототоку, поэтому можно предположить, что облучение батареи естественным светом не влияет на деградацию фоточувствительности данных преобразователей.

В диодной модели солнечного элемента [8] деградация напряжения холостого хода означает деградацию обратного тока насыщения диодной структуры:

$$U_{o.c} = kT \ln \left(\frac{I_{\phi}}{I_0} + 1 \right), \quad (2)$$

где I_{ϕ} — фототок; I_0 — обратный ток насыщения диода; k — постоянная Больцмана; T — температура.

Изменение максимальной мощности, коэффициента заполнения и последовательного сопротивления весьма существенны как для освещенных, так и для неосвещенных образцов.

Следует отметить, что изменения параметров образцов незасвеченной группы примерно соответствовали изменениям параметров засвеченных образцов. Это свидетельствует о том, что колебания температуры и влажности не оказывали решающего влияния на изменения параметров СЭ.

Заключение

Установлено, что со временем как для экспонированных на свету, так и неэкспонированных СЭ происходит уменьшение плотности тока короткого замыкания. Обнаружено, что напряжение холостого хода падает для засвеченных образцов и растет для незасвеченных. При этом дисперсия распределения параметров изменяется очень слабо. Это может свидетельствовать о том, что приводящие к таким изменениям процессы примерно одинаково воздействуют на все образцы, т. е. не связаны с их возможными первоначальными различиями. Выявлено, что

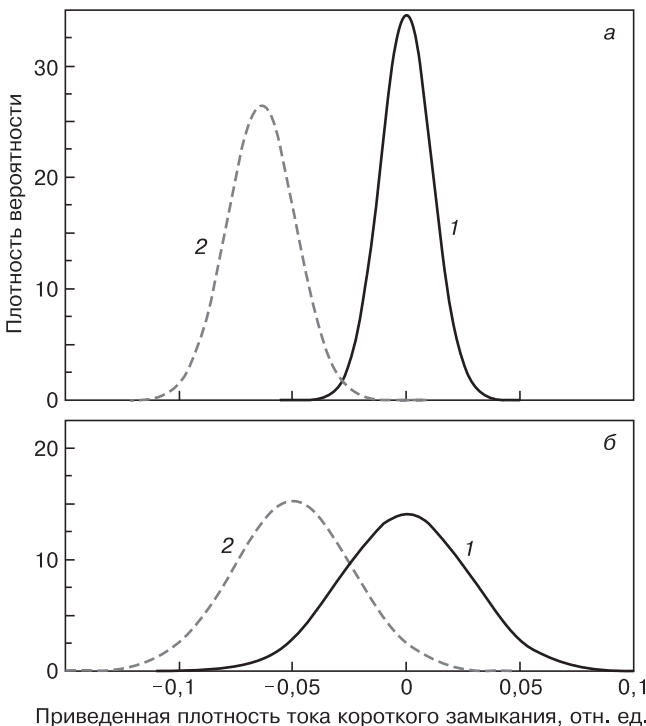


Рис. 2. Плотности тока короткого замыкания для засвеченных (а) и незасвеченных (б) образцов:
а: 1 — до эксперимента $\sigma = 0,011541$; 2 — после эксперимента $\sigma = 0,015126$;
б: 1 — до эксперимента $\sigma = 0,028491$; 2 — после эксперимента $\sigma = 0,026393$

очень слабо со временем изменяется шунтирующее сопротивление, несмотря на значительные изменения фототока и напряжения холостого хода. Это свидетельствует о том, что основная часть этого сопротивления связана с пассивными шунтами, скорее всего образованными сквозными микропорами в пленке. В то же время обнаружено значительное возрастание последовательного сопротивления для экспонированных образцов, при сравнительно слабом изменении этого параметра у образцов неэкспонированных. Одним из наиболее интересных результатов работы следует считать демонстрацию изменения тока короткого замыкания в образцах, выдержанных в темноте. Причем любопытно, что эти изменения примерно совпадают с изменениями этого параметра на свету. Это свидетельствует в пользу того, что этот эффект не связан с эффектом Стеблера—Вронского.

Библиографический список

1. Yang, Jeffrey. Metastability of amorphous silicon / Jeffrey Yang, Subhendu Guha // PV Module Reliability Workshop. – Golden (CO), 2010. (http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/pvmrw_2010.html).
2. Zezin, D. A. Ocenka nekotoryh faktorov, vliyayushih na degradaciyu solnechnyh elementov na osnove a-Si : H / D. A. Zezin, D. V. Latohin // Amorfnye i mikrokrystallicheskie poluprovodniki: sbornik trudov VIII Mezhdunarodnoi konferencii. – SPb.: Izd-vo Politehn. un-ta, 2012. – 452 s.
3. Meden, A. Fizika i primenenie amorfnyh poluprovodnikov / A. Meden, M. Sho. – M.: Mir, 1991. – 670 s.
4. Belyaev, Yu. K. Nadezhnost' tehniceskikh sistem: Spravochnik / Yu. K. Belyaev, V. A. Bogatyrev, V. V. Bolotin i dr. – M.: Radio i svyaz', 1985. – 608 s.
5. Zenova, E. V. Osnovy teorii i rascheta nadezhnosti izdelii elektronnoi tehniki / E. V. Zenova. – M.: Izd-vo MEI, 2005. – 68 s.
6. Voronkov, E. N. Nadezhnost' poluprovodnikovyyh priborov i mikroshem / E. N. Voronkov. – M.: Izd-vo MEI, 1986. – 47 s.
7. Kapur, K. C. Reliability in engineering design / K. C. Kapur, L. R. Lamberson. – N. Y.: John Wiley and Sons, 1977.
8. Raushenbah, G. Spravochnik po proektirovaniyu solnechnyh elementov / G. Raushenbah. – M.: Energoatomizdat, 1983.

Авторы выражают благодарность Э. Н. Воронкову за полезное обсуждение результатов работы.

УДК 621.315.592

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ Ge НА РАДИАЦИОННУЮ И ТЕРМИЧЕСКУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИБОРНЫХ *n-p-n-p*-СТРУКТУР НА ОСНОВЕ CZ-Si<P, Ge>

© 2013 г. С. В. Быткин¹, Т. В. Критская², С. П. Кобелева³

¹ ОАО Металлургический комбинат «Запорожсталь», Украина

² Запорожская государственная инженерная академия, Украина,

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Исследованы характеристики мало-мощных и силовых тиристоров на основе бездислокационных монокристаллов кремния, легированных германием в диапазоне концентраций $N_{Ge} \sim (0,05 \div 1,5) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. С использованием методов обработки экспериментальных данных в среде STATISTICA и MathCAD оценены критериальные параметры тиристоров при действии облучения и высоких температурных градиентов. Показана целесообразность использования кремния, легированного германием, для повышения термической стабильности и радиационной стойкости приборов, подвергнутых действию γ -облучения в диапазоне доз до $2,94 \cdot 10^6 \text{ мЗв}$.

Ключевые слова: монокристалл, кремний, легирование германием, тиристор, γ -облучение, критериальные параметры.

Введение

Отсутствие силовых полупроводниковых приборов с высокой радиационной стойкостью является основным риском при создании электрооборудования космической техники, предназначенной для эксплуатации в условиях облучения [1].

Более того, в настоящее время проблема устойчивости к космическому излучению актуальна для диодов, тиристоров, запираемых тиристоров (GTO, *gate turn off*), запираемых тиристоров с жестким выключением (IGCT, *integrated gate-comutated thyristor*), биполяр-

ных транзисторов с изолированным затвором (IGBT, *insulated-gate bipolar transistor*), используемых в различных отраслях техники. Для доказательства подтверждения стойкости к этим воздействиям проводят испытания изделий в зонах с высоким уровнем космического излучения (вершины в Альпах), а также в специализированных лабораториях. Примером может служить накопленный опыт внедрения технологии GTO [2]. В процессе приемки тягового электропривода поездов нередко имели место отказы полупроводниковых элементов, выход из строя не только GTO-тиристоров,