

ПРОГНОЗНЫЕ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Слипченко Н.И., Письменецкий В.А., Фролов А.В.
Харьковский национальный университет радиоэлектроники
61166, Харьков, пр. Ленина, каф. МЭЭПУ, тел. (057)702-13-43,
e-mail: cntm@ukr.net

The regressive models of temperature degradation of optimum tension and temporal degradation of current of loading of silicic monocrystalline fotopreobrazovateley are offered providing the calculation of conditional intensity of refusals of these devices depending on the levels of degradation of the indicated parameters and energy of activating.

В настоящее время классическая статистическая оценка надежности с учетом современной высоконадежной элементной базы практически невозможна, так как требует число образцов, равное практически объему производства, а продолжительность испытаний существенно превышает время разработок и освоения в производстве.

Поэтому все чаще применяются косвенные оценки надежности и ускоренные испытания в форсированных режимах, в частности, при температурах, существенно превышающих рабочую.

Вероятность отказа в единицу времени будем оценивать с помощью величины λ , которую называют средней частотой или интенсивностью отказов.

Далее, как известно, по величине λ можно оценить вероятность безотказной работы ИС в течение заданного времени эксплуатации:

$$P = e^{-\lambda t}. \quad (1)$$

Среднее время безотказной работы или средний срок службы фотопреобразователя получим из условия $\lambda t = 1$:

$$t_{cp} = 1/\lambda \quad (2)$$

Известно, что связь между долговечностью и рабочей температурой образца для большинства механизмов отказов описывается уравнением Аррениуса [1]

$$R = R_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (3)$$

где R – скорость реакции; R_0 – постоянная; E_a – энергия активации, эВ; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура, К.

Как известно [1], и время отказа должно подчиняться температурной зависимости уравнения Аррениуса.

Отсюда следует, что средний срок службы при повышенной температуре будет существенно меньше, чем при нормальной:

$$t_y = t_n \exp\left[-\left(W_a / k\right)\left(T_n^{-1} - T_y^{-1}\right)\right], \quad (4)$$

где индексы «н» и «у» относятся к нормальной и повышенной абсолютным температурам.

Проводя ускоренные испытания при повышенной температуре, форсируют отказы прибора, добиваясь их появления за разумное время. Полученное значение λ_y пересчитывают к нормальной температуре.

Однако при значениях $\lambda \leq 10^{-9}1/ч$ и такое ускорение оказывается недостаточным. Отсюда следует, что на этапе современной микроэлектроники обычные статистические методы оценки надежности оказываются неприемлемыми.

Поэтому в последние годы большое внимание уделялось разработке физических методов оценки и прогнозирования надежности.

Таким образом, если известна энергия активации E_a то можно осуществлять прогнозирование надежности микроэлектронных элементов методом ускоренных испытаний при повышенных температурах.

Для оперативного контроля обрабатываемых технологий необходимо иметь методику ускоренных испытаний и пересчета экспериментальных результатов на срок службы фотоприбора.

Для этого необходима информация о деградации используемых параметров как функция времени.

В настоящее время температурные испытания (термоциклирование) [2] являются эффективным средством выявления дефектных изделий. Поэтому неперенным условием получения высоких показателей надежности считается проведение электротермотренировки в ужесточенных режимах и отбраковка дефектных образцов.

Деградация характеристик ФП определяется следующими основными воздействиями [3]:

- действие частиц высоких энергий (радиационная деградация);
- термоциклирование;
- световое воздействие;
- сильные электромагнитные поля;
- электрические режимы работы БФ;

При термоциклировании к деградации и отказу ФП приводят усталостное разрушение металлов и сплавов, а также накопление повреждений. Типичные виды отказов: растрескивание стекол, образование воздушных пузырей, нарушение контактных соединений кристаллов, отрыв коммутирующих шин от кристалла, трещины в кристалле и деградация электрических параметров.

Для оценки надежности монокристаллических ФП со структурой $n^+ - p - p^+$, изготовленных по базовой технологии первоначально были проведены испытания малой партии (5 штук) образцов в нормальных климатических условиях[4]:

- температура окружающей среды (15 - 25) °С;
- относительная влажность – (45 - 80)%;
- атмосферное давление – $8,6 \cdot 10^4 - 10,7 \cdot 10^4$ Па.

Далее испытания были продолжены при высоких рабочих температурах (+75°С в течение 5 минут). Контролировалось значение параметра U_{opt} при нормальных условиях ($T=25^\circ\text{C}$) и повышенной рабочей температуре ($T=75^\circ\text{C}$). Результаты испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1

№ образца	6	7	8	9	10	Средние значения
U_{opt} при $T=25^\circ\text{C}$, В	0,502	0,501	0,503	0,502	0,497	0,501
U_{opt} при $T=75^\circ\text{C}$, В	0,357	0,361	0,363	0,349	0,366	0,359
$\Delta U = U_{opt}(25^\circ\text{C}) - U_{opt}(75^\circ\text{C})$	1,145	0,140	0,140	0,153	0,131	0,142
$\Delta U / \Delta T$, В/°С	-0,0029	-0,0028	-0,0028	-0,003	-0,0026	-0,0028

Как видно из табл. 1, с ростом температуры параметр U_{opt} уменьшается. Скорость уменьшения (деградации) параметра U_{opt} в среднем составляет

$$U_{opt} / \Delta T = 0.0028 \text{ В} / ^\circ \text{C} .$$

Среднее значение коэффициента деградации U_{opt} при максимальной рабочей температуре 75°С равно

$$K_d = \Delta U_{omn} / U_{omn} (25^0 C) = 0.28.$$

Аналогичные экспериментальные результаты приведены в работе [3], по которым построена регрессионная зависимость $U_{omn}(T)$, представленная на рис. 1.

С помощью графика на рис. 1 вычислена скорость деградации параметра U_{omn} , которая составила $U_{omn} / \Delta T = 0.0026 B / ^0 C$.

Для оценки срока службы (времени безотказной работы) были проведены ускоренные термоциклические испытания солнечной батареи, состоящей из двух монокристаллических ФП, изготовленных по базовой технологии.

В течение одного термоцикла минимальная температура составляла $(-100 \pm 5)^0C$ и выдерживалась 10 минут, а затем в течение 4 минут повышалась до $(+100 \pm 5)^0C$ и также выдерживалась 10 минут. В результате общая продолжительность термоцикла составляла 28 минут. Далее термоциклирование повторялось в среднем 200 раз, что определяло временную продолжительность одного периода испытаний, по истечении которого измерялся ток нагрузки I_H . Нулевой период испытаний соответствует исходным нормальным начальным условиям. Результаты ускоренных термоциклических испытаний СБ из двух монокристаллических ФП представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты ускоренного термоциклирования ФП.

Номер периода	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Кол-во термоциклов	0	103	105	97	93	112	111	107	106
Длительность периода, час		48	49	45	60	52	52	50	49
Общая длительность испытаний, час	0	48	97	142	202	254	306	356	405
Значение тока, I_H , mA	502	497	490	488	486	478	470	465	461
Изменение тока $\Delta I_H = I_H - I_{H0}$, mA	-	-5	-12	-14	-16	-24	-32	-37	-41
Отн.изменение тока $I_H(t)/I_{H0}$	1,0	0,99	0,976	0,972	0,968	0,952	0,936	0,926	0,92

По данным таблицы построена линейная регрессионная модель зависимости нормированного тока нагрузки от времени термоциклирования t (рис.2).

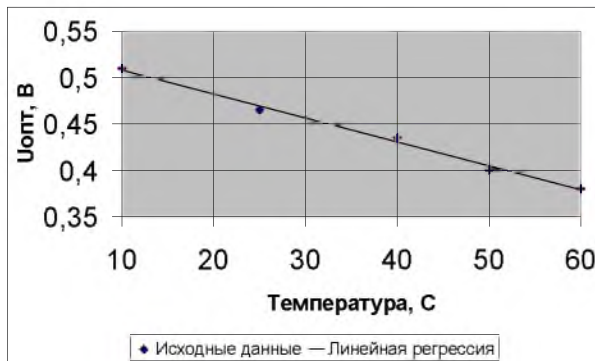


Рисунок 1

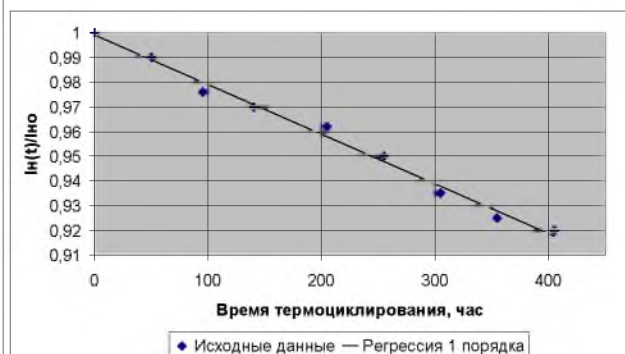


Рисунок 2

$$I_H(t)/I_{H0} = 1 - 1.99 \cdot 10^{-4} t \quad (5)$$

Приведенное соотношение позволяет определить по заданной деградации параметра I_H время термоциклирования или время ускоренных испытаний t_y .

Кроме этого для оценки деградации параметра I_H от времени использовалось соотношение, предложенное в работе [3]

$$I_H(t)/I_{H0} = a_0 + (1 - a_0) \exp(-t/a_1) \quad (6)$$

С учетом данных таблицы $a_0 = -0.037$ и $a_1 = 5.058 \cdot 10^{-3}$.

С помощью соотношения (5) при заданных значениях $I_H(t)/I_{H0}$ равных 0.9 и 0.8 вычисляем время ускоренных испытаний $t_y = 500ч$ и $t_y = 1000ч$ соответственно. Используя соотношение (4) и для интервалов рабочих температур 20 ± 10 ; 20 ± 20 ; 20 ± 30 и $20 \pm 40^\circ C$ вычисляем условное время безотказной работы t_n , условную интенсивность отказов λ при значениях параметров E_a 0,4 и 0,8 эВ, а также K_o 0,1 и 0,2. Результаты вычислений условной интенсивности отказов λ в зависимости от температуры представлены на рис. 3 и 4.

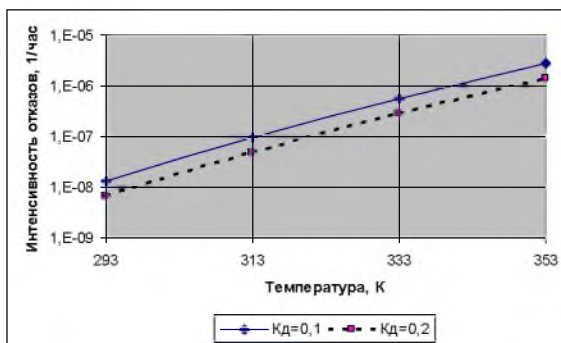


Рисунок 3

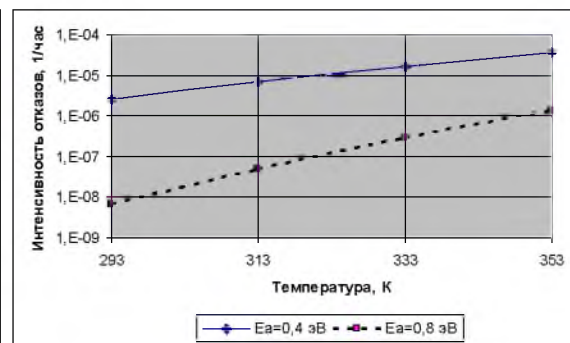


Рисунок 4

Предложенные регрессионные модели температурной деградации оптимального напряжения U_{opt} и временной деградации тока нагрузки I_H (оптимального тока), полученных на основе ускоренных термоциклических испытаний для кремниевых монокристаллических ФП, позволяют выполнять прогнозные оценки надежности этих изделий с учетом реальных температурных режимов работы, заданного ресурса функционирования и допустимой деградации основных параметров.

Список литературы

1. Технология, надежность и автоматизация производства БГИС и микросборок: Учеб. пособие для вузов/ А.В. Фомин, Ю.И. Боченков, В.А. Сорокопуд; Под ред. А.В. Фомина. – М.: Радио и связь, 1981. – 352 с.
2. Климович Б.В. Прогнозирование срока службы короткоканальных МОП полевых транзисторов по результатам ускоренных испытаний/ Электронная техника. Сер. Микроэлектроника. 1990. Вып. 4 (138). С. 39 – ?.
3. Присяков В.Ф. К вопросу о деградации солнечных батарей на космических аппаратах// Космічна наука і технологія. 1996. Т. 2. №1 – 2. С. 73 – 81.
4. Антонова В.А., Борщев В.Н., Листратенко А.М., Тымчук И.Т. Разработка и исследование солнечных батарей для системы энергоснабжения украинского молодежного спутника// Космічна наука і технологія. 2005. Т. 11. №3/4 – 2. С. 92 – 95.