

Фотоэлектроника: элементная база и технология

УДК 621.383.3./4

Методы ускоренных испытаний надежности матричных фотоприемников

И. Д. Бурлаков, К. О. Болтарь, А. И. Патрашин
ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия
E-mail: orion@orion-ir.ru

Е. В. Дегтярев, А. А. Солодков
ФГУП "22 ЦНИИ МО РФ"

В результате анализа физических процессов, проходящих в ИК-матричных фотоприемных устройствах (МФПУ) при их работе и хранении, разработаны методы ускоренных испытаний безотказности и сохраняемости этих устройств. Метод ускоренных испытаний безотказности основан на учете распределения величины скорости отказов на разных этапах рабочего цикла МФПУ и представляет собой метод с уплотнением рабочих циклов. Показано, что для охлаждаемых до температур жидкого азота матричных фотоприемников определяющее влияние на надежность оказывает число циклов "включение—выключение". Метод ускоренных испытаний сохраняемости основан на контролируемом воздействии, ускоряющем процессы старения МФПУ. Экспериментально оценено влияние температурных воздействий на характеристики старения матричных фотоприемников на основе фотодиодов из КРТ. Разработанные методы позволяют существенно сократить время испытаний на безотказность и сохраняемость.

PACS: 07.57.Kp, 85.60.-q

Введение

Испытания безотказности и сохраняемости ИК-матричных фотоприемных устройств являются не только важной частью этих испытаний, позволяющих подтвердить выполнение технических требований (ТТ) к ним, но и одной из самых трудоемких частей комплекса испытаний, подтверждающих параметры соответствующей конструкции приемника.

Действительно, современные ИК-МФПУ должны иметь среднее время наработки до отказа в типовом режиме эксплуатации (8—12 ч непрерывной работы при нормальных климатических условиях (НКУ)) от 8000 до 12 000 ч и средний срок сохраняемости (отапливаемое или кондиционированное хранилище или в составе изделия) до 10—12 лет. Это означает, что продолжительность непрерывного испытания изделия на безотказность будет составлять 7—17 мес, а продолжительность испытания на сохраняемость — более 10—12 лет.

При проведении опытно-конструкторских работ (ОКР) новых типов матричных фотоприемников и фотоприемных устройств встает необ-

ходимость проведения испытаний этих изделий на безотказность и сохраняемость для подтверждения выполнения вышеуказанных требований.

Естественно, временные затраты на указанные испытания оказываются слишком велики, поэтому необходимы методы испытаний, которые позволили бы корректно оценить безотказность и сохраняемость изделий за более короткие сроки.

Исходные данные

Известно, что МФПУ подчиняются экспоненциальному закону [1], при котором распределение вероятности отказа и плотность распределения отказов во времени описываются следующими выражениями:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t},$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda \cdot t}.$$

При этом распределение вероятности безотказной работы имеет вид $P(t) = e^{-\lambda \cdot t}$, а средняя наработка до отказа T_{mid} равна

$$T_{mid} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \frac{1}{\lambda} \cdot e^{-\lambda \cdot t} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda}.$$

Гамма-процентная наработка до отказа T_γ связана со средней наработкой до отказа следующим выражением:

$$T_\gamma = -T_{mid} \ln(\gamma/100),$$

где γ — вероятность отказа, %.

Постепенный отказ МФПУ характеризуется снижением его параметра — критерия годности до определенной величины, задаваемой ТТ.

Параметрами, ухудшающимися в процессе работы МФПУ, являются следующие [2]:

- пороговая облученность (NEI)

$$NEI = N_T K_1; \quad (1)$$

- пороговая мощность (NEP)

$$NEP = N_T K_2; \quad (2)$$

- удельная обнаружительная способность

$$D^* = N_T^{-1} K_3; \quad (3)$$

- пороговая разность температур (NETD)

$$NETD = N_T K_4, \quad (4)$$

где K_1 — K_4 — постоянные величины;

N_T — полный шум МФПУ, который определяется выражением

$$N_T = \sqrt{N_{d\tau}^2 + N_{l\tau}^2}; \quad (5)$$

$N_{d\tau}$ — число носителей, накопленное в течение заданного промежутка времени τ от темнового тока фоточувствительного элемента (ФЧЭ);

$N_{l\tau}$ — число носителей, накопленное в течение заданного времени τ от светового излучения, падающего на ФЧЭ.

Из выражений (1)—(5) следует, что ухудшение параметров МФПУ обусловлено повышением величины шума ФЧЭ.

Анализ процессов, происходящих в МФПУ во время его работы и хранения

Проанализируем работу и хранение МФПУ с точки зрения протекающих физических процессов, для чего рассмотрим сначала их конструкцию.

Любое современное ИК-МФПУ включает следующие основные узлы.

- Охлаждаемая фоточувствительная сборка, включающая матрицу фоточувствительных элементов, состыкованную с помощью индиевых столбиков с кремниевым мультиплексором.

- Диэлектрический (сапфировый, кремниевый и т. д.) растр, имеющий высокую теплопроводность, на котором закреплена и разварена вышеуказанная сборка.

- Холодный экран с диафрагмой, окружающий сборку от избытка фонового излучения.

- Внешний корпус фотоприемника, включающий входное окно для ИК-излучения, холодный палец для охлаждения сборки и экрана, электрические контакты для подачи на сборку рабочих напряжений питания и управления, и вывода выходных и контрольных напряжений.

- Интегрированная с корпусом и холодным пальцем газовая криогенная машина (ГКМ) системы охлаждения.

- Электронный блок сопряжения фотоприемника с внешней системой питания, управления и обработки сигналов.

- Газопоглотители, предназначенные для улучшения вакуума внутри корпуса МФПУ.

Работу МФПУ можно условно разбить на пять этапов, каждый из которых имеет свою продолжительность:

1. Охлаждение выключенной фоточувствительной сборки МФПУ до рабочей температуры (5—8 мин в зависимости от используемой ГКМ).
2. Электрическое включение МФПУ (≤ 1 с).
3. Стационарная работа МФПУ (8—10 ч).
4. Электрическое выключение МФПУ (≤ 1 с).
5. Естественный нагрев выключенной фоточувствительной сборки МФПУ до комнатной температуры (20—40 мин в зависимости от величины охлаждаемой массы).

Работа МФПУ на первом этапе характеризуется уменьшением размеров МФЧЭ и большой интегральной схемы (БИС), обусловленным изменением их температуры от НКУ до рабочей температуры 80 К. Величины уменьшений пропорциональны их коэффициентам термического расширения (КТР), но отличаются вследствие разных величин КТР.

МФЧЭ и БИС связаны между собой распределенной по их площади системой индиевых микростолбиков, в силу чего процесс охлаждения вызывает возникновение сил деформации, воздействующих на микростолбики.

Распределение сил по площади МФЧЭ и БИС радиально. Силы возрастают от центра к периферии кристаллов. Их воздействие в процессе снижения температуры вызывает упругую деформацию столбиков, сначала возрастающую во времени, а затем, вследствие пластичности индия, уменьшающуюся после окончания процесса охлаждения практически до нуля.

- На первом этапе вследствие вышесказанного возможны следующие последствия:

растрескивание столбиков с повышением их сопротивления, что приводит к постепенному повышению шума контактов или вероятности ухудшения параметров ФЧЭ;

ухудшение электрического и механического контактов столбиков с контактами МФЧЭ и БИС, что также приводит к повышению переходного сопротивления между МФЧЭ и БИС и постепенному повышению шума контактов, т. е. к вероятности ухудшения параметров ФЧЭ;

отстыковка отдельных столбиков с наиболее ухудшенными механическими контактами в основном на периферии кристаллов, что приводит к отсоединению (неработоспособности) отдельных ФЧЭ.

Эти же процессы происходят в охлаждаемой сборке на пятом этапе. Разница состоит лишь в скорости повышения температуры, которая ниже примерно в пять раз. Соответственно, ниже и скорость деформации (укорочения) кристаллов, хотя абсолютная величина деформации та же, что на этапе захлаживания фотозлектронного модуля (ФЭМ). На индиевые столбики воздействуют те же механические напряжения, приводящие к таким же последствиям, как и на этапе захлаживания ФЭМ.

• Второй и четвертый этапы работы МФПУ характеризуются теоретической возможностью воздействия на электронную схему БИС лишь экстра-токов замыкания и размыкания электрической цепи. Однако эти токи могут вызвать лишь катастрофический отказ БИС (выход из строя), что немедленно приводит к выходу МФПУ из строя, а не к постепенному ухудшению ее параметров.

Таким образом, интенсивность отказа на этих этапах исчезающе мала по сравнению с интенсивностью отказа на первом и пятом этапах и может быть сведена к нулю при использовании улучшенной конструкции электронного узла.

• Третий, самый продолжительный этап работы, является стационарным. На этом этапе отсутствуют электрические перегрузки и механические нагрузки охлаждаемой сборки МФПУ-БИС. По этой причине и интенсивность отказа на этом этапе исчезающе мала.

Итак, первый и пятый этапы работы являются наиболее "травмоопасными" с точки зрения ухудшения параметров МФПУ, а интенсивность отказа на этих этапах работы значительно превышает интенсивности отказов на втором, третьем и четвертом этапах. Вследствие этого максимальное количество включений, которое необходимо произвести для достижения заданной величины параметра — критерия годности, и является мерой безотказности МФПУ.

Проведенные во ФГУП «НПО "Орион"» исследования, частично изложенные в работах [3, 4], подтвердили этот вывод.

Сохраняемость МФПУ (среднее время хранения в условиях отапливаемого хранилища или в составе изделия) — вторая, не менее важная их характеристика.

Длительность времени хранения (10—12 лет) не позволяет подтверждать его прямым образом. Следовательно, и здесь необходим метод, позволяющий корректно оценить это время за существенно более короткий промежуток времени.

Рассмотрим процессы, происходящие в МФПУ при его хранении.

При хранении МФПУ выключен, а температура его соответствует НКУ. При этом внутри герметизированного корпуса МФПУ происходит лишь газовыделение из боковой поверхности клеевых соединений, скрепляющих растр с холодным пальцем ГКМ, охлаждаемую сборку с растром и холодный экран с основанием. Это газовыделение достаточно слабое, но в начальный период хранения оно влияет на теплоприток в охлаждаемую зону корпуса МФПУ. Повышенный теплоприток повышает время выхода на режим или мощность питания ГКМ. В связи с этим МФПУ может даже перестать выходить на температурный режим.

Исследования, проведенные во ФГУП «НПО "Орион"», показали, что в свежизготовленных МФПУ уже за первые несколько месяцев хранения теплоприток повышается на 30—80 %. Затем наблюдается постепенное снижение газовыделения, подтверждаемое меньшим изменением теплопритока, обусловленное постепенным высыханием клеевых соединений.

Для улучшения вакуума в МФПУ применены специальные газопоглотители (геттеры). Процедура их использования приводит к восстановлению теплопритока. Допустимое количество их применений (более 20 раз) позволяет восстанавливать вакуум в течение всего срока эксплуатации МФПУ. Продолжительность всех других процессов, которые могут происходить в МФПУ, например самодиффузия компонентов МФЧЭ и БИС, намного больше, чем время хранения изделия.

Метод испытания безотказности МФПУ

В результате анализа деградационных процессов при работе изделия был выработан режим проведения наработки МФПУ при испытании безотказности. Наработка проводилась в режиме включения — выключения МФПУ. Один цикл наработки включал: захлаживание образца в течение заданного времени выхода на режим (5—8 мин); включение электронной схемы охлаждаемого узла МФПУ на 1 мин; выключение и отогрев образца в течение 21—24 мин. Общая длитель-

ность цикла составляла 30 мин. Цикл был эквивалентен отрезку времени непрерывной работы МФПУ. Число циклов, которое должен выдержать образец, выражается формулой

$$N_0 = \frac{T_0}{t_c}, \quad (6)$$

где t_c — длительность времени непрерывной работы МФПУ (8—10 ч), заданное в ТТ;

T_0 — среднее время наработки до отказа, заданное в ТТ.

В этом режиме изделие работало с уплотнением рабочих циклов, ответственных за появление отказов изделия, и с сохранением заданного количества периодов непрерывной работы, выраженного в количестве включений. Такой режим является автотельным форсированным режимом работы изделия. В этом режиме достигается интенсификация деградационных процессов изделия в единицу времени за счет исключения из циклограммы работы МФПУ нагрузок, практически не оказывающих влияния на безотказность изделия. Он позволяет существенно сократить время испытания. Охлаждаемая сборка МФЧЭ-БИС в этом случае испытывает частое "включение—выключение" рабочей температуры (термоциклирование) и питающих напряжений охлаждаемого узла. Это приводит к постепенному увеличению уровня шума элементов МФПУ и постепенному ухудшению параметра — критерия годности до заданной в ТТ величины.

Параметром—критерием годности может быть любой из фотоэлектрических параметров (1)—(4). В процессе испытания должно производиться периодическое измерение этого параметра для оценки пригодности изделия для продолжения испытания.

В качестве примера оценим длительность испытания на безотказность МФПУ, которое должно иметь среднее время наработки до отказа 10 000 ч при времени непрерывной работы 10 ч.

Параметром — критерием годности МФПУ — является среднее значение удельной обнаружительной способности D^* годных ФЧЭ. Годными считаются ФЧЭ, у которых $D^* \geq D_0$. За время наработки допустимо снижение величины параметра — критерия годности — до величины D_1 .

Рассчитаем по формуле (6) число включений МФПУ. Оно будет равно 1000. Умножим это число на длительность цикла, равную 0,5 ч. Получим для общей длительности испытания — $0,5 \text{ ч} \cdot 1000 = 500 \text{ ч}$. За это время параметр — критерий годности МФПУ должен снизиться до величины $D^*(T_0) \geq D_1$. Если это условие будет выполнено, то образец выдержал испытание. При обычном испытании образец должен отработать 10 000 ч.

Таким образом, данный метод позволяет сократить время испытания в 20 раз при длительности непрерывной работы 10 ч.

Данный метод применим ко всем МФПУ, имеющим конструкцию, описанную выше, так как процессы, определяющие отказ МФПУ, проходят в области межсоединений МФПУ и БИС и не затрагивают полупроводниковую структуру МФПУ.

Метод испытания сохраняемости МФПУ

В результате анализа деградационных процессов при хранении изделия был выработан режим проведения испытания сохраняемости МФПУ. Задача состояла в том, чтобы зная процессы, происходящие в МФПУ при его хранении, необходимо было определить параметры МФПУ, на которые они воздействуют. Затем следует подобрать такие воздействия, которые интенсифицируют процесс ухудшения этих параметров. Необходимо было также определить такую длительность воздействий, при которой эти параметры изменялись на величину, эквивалентную величине изменения при годовом хранении в условиях отапливаемого хранилища или в составе изделия.

Во ФГУП «НПО "Орион"» были проведены исследования изменения фотоэлектрических параметров и теплопритока МФПУ при обычном хранении и хранении с воздействием на них повышенной температуры и термоциклирования от повышенной температуры к пониженной.

Измерения теплопритока проводили методом измерения времени испарения жидкого азота из колодца корпуса МФПУ с выключенной электронной схемой перед стыковкой с ГКМ. Испарение контролировали расходомером газообразного азота типа 179А. Расходомер через мультиметр MXD-4660А подсоединяли к компьютеру, который записывал его показания в процессе испарения. Затем проводили воздействие повышенной температуры и термоциклирования, активирующие процесс газовой выделения в МФПУ, и повторное измерение теплопритока. После такого воздействия теплоприток повышался. Максимальная относительная величина его повышения соответствовала величине повышения теплопритока образца, хранящегося в комнатных условиях в течение одного года. Далее проводился процесс геттерирования МФПУ и еще одно измерение теплопритока, который после геттерирования полностью восстанавливался.

В результате исследований были определены режимы воздействий повышенной температуры и термоциклирования, приводящие к росту теплопритока и эквивалентному годовому хранению в

условиях отапливаемого хранилища или в составе изделия (таблица).

Вид и режим воздействия	Продолжительность воздействия, сут	Примечание
Повышенная температура (+50 °С)	5	
Термоциклирование (+50 ÷ -50 °С)	1	4 цикла. По 2 ч при каждой температуре. 60 мин — на переход от T_1 к T_2 в каждом цикле

Общая длительность воздействия составляет 6 сут.

Хранение изделия при указанных воздействиях является автотельным форсированным режимом его хранения. В этом режиме достигается интенсификация деградационных процессов, воздействующих на изделие в единицу времени за счет интенсификации газоотделения в вакуумированной полости корпуса МФПУ.

Итак, для испытания сохраняемости МФПУ необходимо провести следующие действия:

1. Измерение фотоэлектрических параметров МФПУ в рабочем режиме.
2. Измерение теплопритока МФПУ.
3. Стыковка МФПУ с ГКМ.
4. Настройка ГКМ на рабочий температурный режим, чтобы результаты повторного измерения фотоэлектрических параметров МФПУ с ГКМ совпали с их измерением без ГКМ.
5. Измерение времени выхода на режим и токов потребления ГКМ при выходе на режим и в стационарном режиме.
6. Отстыковка ГКМ от МФПУ.
7. Воздействие на выключенное МФПУ повышенной температуры и термоциклирования в соответствии с таблицей.
8. Стыковка МФПУ с ГКМ.
9. Измерение времени выхода на режим и токов потребления ГКМ при выходе на режим и в стационарном режиме.
10. Проведение геттерирования МФПУ.
11. Измерение времени выхода на режим и токов потребления ГКМ при выходе на режим и в стационарном режиме.
12. Измерение фотоэлектрических параметров МФПУ.
13. Повторение п.п. 6—12 необходимое число раз, равное числу лет сохраняемости минус единица.

Измерение времени выхода МФПУ на режим и токов потребления ГКМ при выходе на режим и в стационарном режиме необходимо для сопоставления с нормальным и повышенным теплопритоками изделия.

Если фотоэлектрические параметры МФПУ, время выхода и токи потребления ГКМ при последнем измерении будут удовлетворять ТТ, то изделие выдержало испытание.

Данный метод испытания сохраняемости МФПУ без учета проводимых измерений параметров и геттерирования занимает, например, 72 сут при сроке сохраняемости 12 лет.

Метод применим как к МФПУ на основе КРТ, так и к любым другим МФПУ, имеющим конструкцию, описанную выше.

Заключение

Разработаны методы ускоренных испытаний безотказности и сохраняемости МФПУ, использующие автотельные форсированные режимы работы и хранения изделия.

Метод ускоренного испытания безотказности основан на использовании рабочих циклов, имеющих интенсивность отказа много большую, чем в остальных циклах работы МФПУ. Метод позволяет сократить время наработки до 20 раз.

Метод ускоренного испытания сохраняемости основан на форсировании режимов хранения с помощью воздействий, ускоряющих газоотделение в полости МФПУ и приводящих к повышению теплопритока изделия. Метод позволяет сократить время испытания на сохраняемость примерно в 60 раз.

Разработанные методы ускоренных испытаний безотказности и сохраняемости МФПУ применимы к всем МФПУ, деградация параметров которых определяется повышением уровня шума, конструкция которых вакуумирована, а МФЧЭ и мультиплексор стыкованы с помощью индиевых столбиков.

Литература

1. Испытания на надежность: Реферат/ФГУП «НПО "Орион"», 2006.
2. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Патрашин А. И., Дегтярев Е. В., Солодков А. А. Метод оценки характеристик безотказности матричных ФПУ по зависимости фотоэлектрических параметров от наработки: Тез. XX Междунар. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — М.: ФГУП «НПО "Орион"», 2008.
3. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Патрашин А. И., Яковлева Н. И. и др. Испытания на безотказность многорядных и матричных фотоприемников на основе фотодиодов из КРТ// Прикладная физика. 2008. № 2.
4. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Козлачков А. А. и др. Испытания на безотказность многорядных и матричных фотоприемников на основе фотодиодов из КРТ: Тез. XIX Междунар. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — М.: ФГУП «НПО "Орион"», 2006.

Статья поступила в редакцию 3 февраля 2009 г.

Methods of the accelerated tests of reliability for the array photodetectors

I. D. Burlakov, K. O. Boltar, A. I. Patrashin
Orion R&P Association, Moscow, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

E. V. Degtyarev, A. A. Solodkov
The 22-nd Central Research Institute, Russia

Methods of the accelerated tests of non-failure operation and conservability for the array photodetective assemblies (APDA) have been developed as a result of the analysis of the physical processes occurring in IR devisces at their work and storage. The developed methods allow to reduce essentially time of tests for non-failure operation and conservability.

PACS: 07.57.Kp, 85.60.-q

УДК 621.383.3/4

Метод оценки характеристик безотказности матричных ФПУ по зависимости фотоэлектрических параметров от наработки

И. Д. Бурлаков, К. О. Болтарь, А. И. Патрашин
ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия
E-mail: orion@orion-ir.ru

Е. В. Дегтярев, А. А. Солодков
ФГУП "22 ЦНИИ МО РФ"

Рассмотрены вопросы оценки вероятности безотказной работы матричных фотоприемных устройств (МФПУ) через такие измеряемые параметры, как удельная обнаружительная способность, ограниченная шумом мощность (NEP) и облученность (NEI). Показано, что технические требования к МФПУ позволяют однозначно оценивать вероятность безотказной их работы.

PACS: 07.57.Kp, 85/60.-q

Введение

В технических требованиях к МФПУ указывается один из параметров безотказной работы — среднее время наработки до отказа T_{mid} , либо гамма-процентная наработка до отказа T_γ при вероятности безотказной работы изделия $P(T_\gamma) = 90\%$. Минимальная величина параметра, определяющего работоспособность изделия, не должна снизиться за время наработки более чем на $n\%$.

Главными фотоэлектрическими параметрами, определяющими работоспособность МФПУ, являются пороговая облученность (ограниченная шумом облученность — NEI), пороговая мощность (ограниченная шумом мощность — NEP), обнаружительная способность D^* , а также пороговая разность температур (ограниченная шумом разность температур — NETD). Во время работы

МФПУ эти параметры, усредненные по фоточувствительным элементам (в случае матричных устройств) или по каналам (в случае многорядных устройств) ухудшаются, постепенно приводя устройство в неработоспособное состояние.

Связи между параметрами безотказности и фотоэлектрическими параметрами МФПУ посвящена данная работа.

Источник ухудшения фотоэлектрических параметров МФПУ

• *Полный шум*, создаваемый накопленными на емкости C_{ac} носителями, определяется выражением

$$N_T = \sqrt{N_{d\tau}^2 + N_{I\tau}^2}, \quad (1)$$