

Фотоэлектроника: элементная база и технология

УДК 621.383

Испытания безотказности многорядных и матричных фотоприемников на основе фотодиодов из КРТ

И. Д. Бурлаков, К. О. Болтарь, А. И. Патрашин, Н. И. Яковлева
ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

Е. В. Дегтярев, А. А. Солодков
ФГУП "22 ЦНИИ МО РФ", г. Мытищи, Московская обл., Россия

Приведены результаты испытаний на безотказность работы трех групп многорядных и матричных фотоприемных устройств (МФПУ) ФУК5М формата 4×288 элементов и ФУК6М формата 384×288 элементов, предназначенных для аппаратуры регистрации тепловых изображений в спектральном диапазоне 8—12 мкм. В процессе испытаний контролировались средние значения вольтовой чувствительности S_u и удельной обнаружительной способности D^ каналов ФУК5М и фоточувствительных элементов (ФЧЭ) ФУК6М.*

Надежностные характеристики изделий, как и стойкость к внешним воздействующим факторам, определяют возможность использования их в аппаратуре применения. Для использования МФПУ в аппаратуре, особенно специального назначения, большое значение имеет показатель безотказности их работы.

В соответствии с общими техническими требованиями к модулям, в том числе к МФПУ, предназначенным для аппаратуры военного назначения, гамма-процентная наработка на отказ при $\gamma = 0,9$ должна составлять не менее 1500 ч. При этом техническими требованиями в зависимости от типовой модели эксплуатации устанавливается число включений изделия.

В многорядном фотоприемном устройстве (ФПУ) ФУК5М формата 4×288 элементов для обеспечения гамма-процентной наработки требовалось провести 150 включений при 10-часовом периоде непрерывной работы при НКУ (типовая модель эксплуатации).

В матричном фотоприемном устройстве ФУК6М формата 384×288 элементов число включений равнялось 160 при 8-часовом периоде непрерывной работы.

За время средней наработки до отказа значение средней обнаружительной способности образцов не должно было снизиться более чем на 30 % от минимальной заданной величины D_0^* , т. е. достигнуть значения $D(T_{mid}) = D_{TT} = 0,7 \cdot D_0^*$.

Разработанные МФПУ подчиняются экспоненциальному закону распределения отказов, при котором распределение вероятности отказа равно

$F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t}$, а плотность распределения отказов во времени описывается формулой

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

При этом распределение вероятности безотказной работы определяется как

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

а средняя наработка до отказа T_{mid} равна

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

При этом гамма-процентная наработка до отказа T_γ связана со средней наработкой до отказа T_{mid} следующим выражением:

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

где γ — интенсивность отказа (%).

На рис. 1 показана требуемая для МФПУ ФУК5М и ФУК6М минимальная вероятность безотказной работы $P(t)$ в типовом режиме эксплуатации, заданная техническими требованиями к образцам.

$$P(1500 \text{ ч}) = 0,9; \quad P(T_{mid}) = 14237 \text{ ч} = 0,368 \\ \text{и } \lambda = 7,02 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}.$$

Испытания проводили на трех образцах МФПУ ФУК5М и трех образцах ФУК6М. Один образец из каждой тройки работал при типовой модели

эксплуатации, а два других — в форсированных режимах. В результате испытаний установлено, что в процессе наработки как при дополнительных воздействиях, так и без них, средние значения обнаружительной способности образцов снижаются также по экспоненциальному закону, а изменения вольтовой чувствительности отсутствуют. Такой результат указывает на "расшумливание" ФЧЭ в процессе наработки.

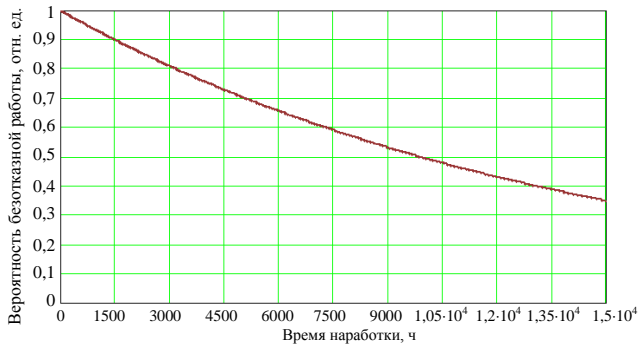


Рис. 1. Вероятность безотказной работы МФПУ ФУК5М и ФУК6М

Зависимость шумового напряжения U_n ФЧЭ от времени выражается следующим образом:

$$U_n(t) = U_{n0} \cdot \exp(t/T_1),$$

где T_1 — характерное время "расшумливания" ФЧЭ в e раз.

Тогда

$$D^*(t) = \frac{U_c}{U_{n0} \cdot \exp(t/T_1)} \cdot \frac{\sqrt{A \cdot \Delta f}}{E} = D_0^* \exp(-t/T_1),$$

где D_0^* — заданное значение обнаружительной способности МФПУ при $t = 0$.

Как указывалось выше $D_{TT}^*/D_0^* = 0,7$, а $\ln(D_0^*/D_{TT}^*) = 0,3567$.

Учитывая, что $D_{TT}^* = D^*(T_{mid})$, мы получим связь T_{mid} с T_1 ,

$$T_1 = T_{mid} / \ln(D_0^*/D_{TT}^*) = 2,8 \cdot T_{mid}.$$

Тогда можно записать выражение для $D^*(t)$ с использованием времени T_{mid} .

$$D^*(t) = D_0^* \cdot \exp(-t/2,8 \cdot T_{mid}).$$

Это выражение описывает границу нормированных значений $D^*(t)$, изображенную на рис. 2,

ниже которой измеряемая величина $D_m^*(t)$, нормированная на D_0^* , в течение наработки не должна попадать.

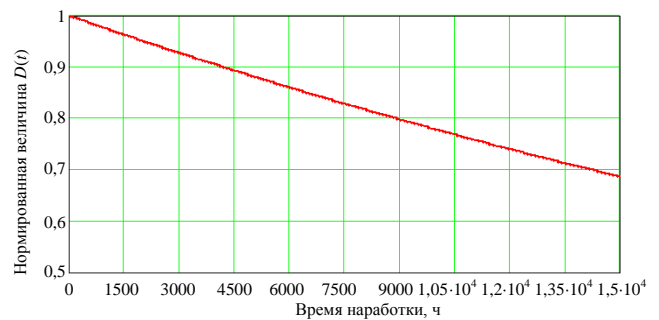


Рис. 2. Нижняя граница значений нормированной $D^*(t)$, удовлетворяющей техническим требованиям к МФПУ

Мы получили возможность расчета вероятности безотказной работы МФПУ с использованием времени T_1 , которое определяется экспериментально при измерении $D^*(t)$

$$P(t) = \exp\left(-\frac{2,8 \cdot t}{T_1}\right).$$

Испытания каждого из трех образцов МФПУ обоих типов (ФУК5М и ФУК6М) проводили в трех режимах.

Первые образцы МФПУ охлаждали с помощью микрокриогенной системы МСМГ-3В-1/80 и работали в типовом режиме эксплуатации, а вторые работали при НКУ в режиме "включение-выключение".

Охлаждаемый узел МФПУ подвергали многократному термоциклированию от комнатной температуры до температуры жидкого азота и обратно с включением и выключением его электронной схемы. МФПУ ФУК5М охлаждали заливкой жидкого азота в колодец МФПУ, а отогревали сжатым воздухом; МФПУ ФУК6М охлаждали штатной МКС, а отогревали естественным теплообменом с окружающей средой. Третьи образцы МФПУ, охлаждаемые МКС, работали при НКУ при воздействии многократных ударов, вибрации и многократном повторении таких циклов. Длительность циклов, наработки и число включений МФПУ приведены в таблице.

Номер числа	Режим	Наработка, ч		Число включений		Длительность цикла, ч	
		ФУК5М	ФУК6М	ФУК5М	ФУК6М	ФУК5М	ФУК6М
1	Нормальный	1000	1000	100	125	10	8
2	"Включение-выключение"	250	533	1500	1600	10 мин	20 мин
3	Удары-вибрация	500	600	151	226	10	8

При проведении испытаний на безотказность было использовано следующее основное оборудование: стенды измерения основных параметров МФПУ 384×288 элементов ЕЖЯИ.468214.003 и 4×288 элементов ЕЖЯИ.468214.007; стенды вибрационный УВЭ 100/5-3000 и ударный СУ-1М.

В процессе наработки МФПУ №1 контролировали среднее значение удельной обнаружительной способности $D_{m1}^*(t)$. На рис. 3 показаны экспериментальные результаты измерений и аппроксимирующие их кривые для интервала, примерно равного необходимой гамма-процентной наработке МФПУ. Результаты для каждого МФПУ нормированы на соответствующие минимальные допустимые значения D_0^* .

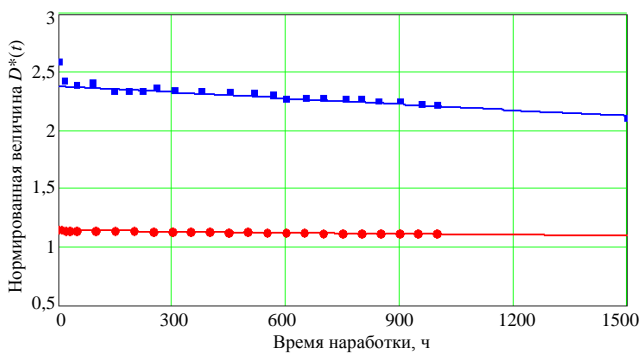


Рис. 3. Экспериментальный график $D_m^*(t)$ для МФПУ ФУК5М №1 и МФПУ ФУК6М №1 в типовом режиме эксплуатации:
■ ■ ■ — ФУК6М; ● ● ● — ФУК5М

Аппроксимирующие функции для обоих образцов имеют следующий экспоненциальный вид:

$$\text{для ФУК5М} \quad \frac{D_{\text{ФУК5М №1}}^*}{D_{0\text{,ФУК5М}}^*} = \exp\left(-\frac{t}{35000}\right);$$

$$\text{для ФУК6М} \quad \frac{D_{\text{ФУК6М №1}}^*}{D_{0\text{,ФУК6М}}^*} = \exp\left(-\frac{t}{13100}\right).$$

На рис. 4 приведены аппроксимирующие кривые нормированных значений $D_{\text{ФУК5М}}^*(t)$, $D_{\text{ФУК6М}}^*(t)$ и $D_{\text{min}}^*(t)$ в интервале времени наработки до T_{mid} .

Сплошной линией отмечена нижняя граница возможных значений, нормированных на величину D_0^* ; штрихпунктирной линией — возможная минимальная величина обнаружительной способности образцов в конце наработки.

Экспериментальные точки нормированных кривых хорошо описываются экспоненциальной зависимостью $\frac{D_{\text{МФПУ}}^*(t)}{D_{\text{min}}^*(0)} = \exp\left(-\frac{t}{T}\right)$ и лежат выше граничной кривой. Время достижения значения

D_{TT}^* , являющееся средним временем наработки на отказ, для МФПУ ФУК5М равно 17100 ч, для МФПУ ФУК6М — 15900 ч.

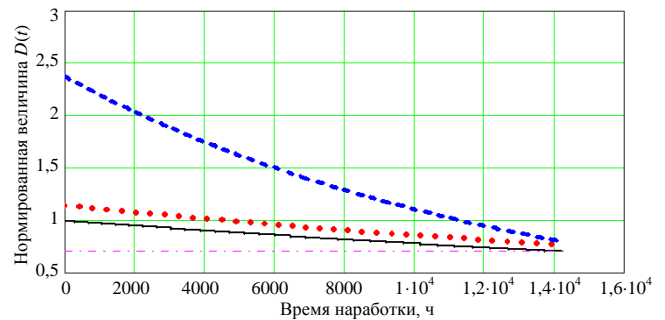


Рис. 4. Аппроксимирующие кривые нормированных значений $D_{\text{ФУК5М}}^*(t)$, $D_{\text{ФУК6М}}^*(t)$ и $D_{\text{min}}^*(t)$ в интервале наработки до T_{mid} :
■ ■ ■ — ФУК6М; ● ● ● — ФУК5М

Таким образом, при 1500 ч работы вероятность безотказной работы образцов превышает браковочную величину $\gamma = 0,9$.

МФПУ в форсированном режиме с термоциклами, обусловленными включениями-выключениями охлаждения изделия и включениями-выключениями его электронной схемы, отработали, соответственно, 1500 и 1600 циклов для ФУК5М и ФУК6М. Число циклов соответствует полному числу включений за среднее время наработки до отказа.

При испытаниях МФПУ ФУК5М через 1 мин после заливки жидкого азота его электронную схему включали на 1 мин, после выключения схемы с помощью сжатого воздуха, подаваемого в колодец, охлаждаемый узел МФПУ отогревали до комнатной температуры. Указанный цикл повторялся каждые 10 мин. Для МФПУ ФУК6М цикл составлял 20 мин. Электронную схему изделия включали на 1 мин после достижения рабочей температуры криостатирования (~5—6 мин), затем систему охлаждения выключали. Экспериментальные результаты измерения $D^*(t)$ показаны на рис. 5, а.

Аппроксимация дает следующие экспоненциальные зависимости:

$$\text{для ФУК5М} \quad \frac{D_{\text{ФУК5М №2}}^*}{D_{\text{minФУК5М}}^*} = \exp\left(-\frac{t}{10000}\right);$$

$$\text{для ФУК6М} \quad \frac{D_{\text{ФУК6М №2}}^*}{D_{\text{minФУК6М}}^*} = \exp\left(-\frac{t}{1600}\right).$$

Коэффициенты ускорения деградации D^* испытываемых МФПУ при работе в режиме "включение-выключение" в сравнении с работой в типовом режиме эксплуатации составили $K_{ac1 \text{ ФУК5М}} = 3,5$ и $K_{ac1 \text{ ФУК6М}} = 8,2$.

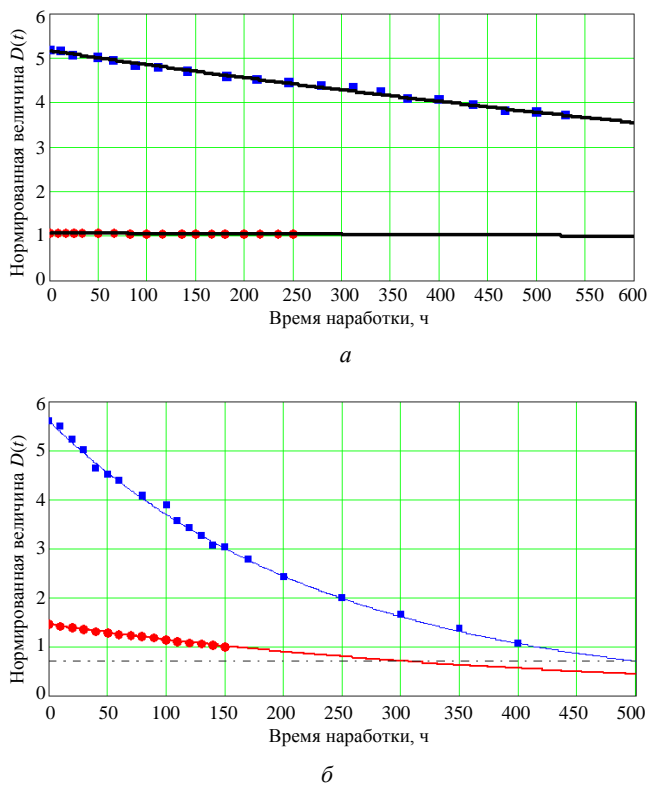


Рис. 5. Экспериментальный график $D^*(t)$ МФПУ ФУК5М и МФПУ ФУК6М в режимах:
 а — "включение–выключение"; б — "взлет–посадка";
 ■■■■ — ФУК6М; ●●●● — ФУК5М

Заметна разница в коэффициентах ускорения для ФУК5М и ФУК6М, которая, по-видимому, обусловлена более высокой составляющей надежности многорядных МФПУ, зависящей от воздействия температурных деформаций фоточувствительного слоя на индиевые столбики за счет различия коэффициентов температурного расширения КРТ и кремния и большей величины диагонали кристаллов МФЧЭ в матричных МФПУ.

МФПУ ФУК5М и ФУК6М работали в форсированном режиме при воздействии механических факторов. В каждом цикле МФПУ обоих типов подвергали воздействию в течение 4 ч сканирую-

щей синусоидальной вибрации в диапазоне частот 10—500 Гц при максимальном ускорении 3g в трех ориентациях и в течение 4 ч — ударам многократного действия с максимальным ускорением 6g длительностью действия 15 мс в трех ориентациях, при этом число ударов составляло 2400. На рис. 5, б показаны экспериментальные результаты измерения $D^*(t)$ и аппроксимирующие их кривые.

Аппроксимация точек дает экспоненциальные зависимости:

$$\text{для ФУК5М} \quad \frac{D_{\text{ФУК5М \#3}}^*}{D_{\text{minФУК5М}}^*} = \exp\left(-\frac{t}{410}\right);$$

$$\text{для ФУК6М} \quad \frac{D_{\text{ФУК6М \#3}}^*}{D_{\text{minФУК6М}}^*} = \exp\left(-\frac{t}{240}\right).$$

Коэффициенты ускорения деградации D^* испытуемых МФПУ при воздействии механических факторов составили $K_{\text{ac2_ФУК5М}} = 85,4$ и $K_{\text{ac2_ФУК6М}} = 54,6$.

Воздействие механических факторов в бóльшей степени влияет на снижение средней обнаружительной способности, чем режим "включение—выключение". Следует отметить, что при испытаниях как в нормальном режиме, так и в форсированных режимах отсутствовали конструкционные и катастрофические отказы МФПУ. Более высокая скорость снижения обнаружительной способности многорядных МФПУ при механических воздействиях объясняется, по-видимому, бóльшей величиной распределенной массы МФЧЭ, приходящейся на один индиевый столбик (будет исследована дополнительно).

Полученные коэффициенты ускорений снижения среднего значения удельной обнаружительной способности позволяют проводить ресурсные испытания аналогичных МФПУ в ускоренных режимах.

Статья поступила в редакцию 14 ноября 2007 г.

Tests of non-failure operation for multi-row and array photodetectors on the basis of CdHgTe photodiodes

I. D. Burlakov, K. O. Boltar, A. I. Patrashin, N. I. Yakovleva
 Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

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

Results of tests for non-failure operation of three groups of multi-row and array photodetector devices such as the 4×288 multi-row FUK5M and the 384×288 array FUK6M, which are intended for registration of 8—12 μm thermal images, are described.