

УДК 621.383.4/5:621.315.5

Метод разработки сканирующего ФПУ с повышенной безотказностью

А. И. Патрашин, И. Д. Бурлаков

Рассмотрен метод разработки сканирующего ФПУ, предназначенного для работы в автономном режиме с повышенной безотказностью в течение заданного продолжительного интервала времени. ФПУ включает заданное число модулей на основе многорядной линейки с фоточувствительными элементами (ФЧЭ), имеющими меньшее среднее время безотказной работы, чем заданный временной интервал. Метод включает использование аналитической модели МФПУ и аналитической модели безотказности МФПУ.

Аналитическая модель безотказности МФПУ использовалась для определения необходимого числа ФЧЭ в канале сканирующего ФПУ, зависящего от известного среднего времени безотказной работы одного ФЧЭ. В этом случае обеспечивается высокая вероятность безотказной работы каналов, модулей и ФПУ в течение заданного интервала времени.

Аналитическая модель МФПУ применялась для расчёта и анализа фотозлектрических параметров разрабатываемого устройства.

Совместное использование указанных аналитических моделей позволяет достаточно быстро и корректно определять конструктивные, эксплуатационные и фотозлектрические параметры любого многоканального ФПУ с заданными надёжностными параметрами.

В качестве примера рассматривается разработка ИК ФПУ на спектральный диапазон (10,5—12,6) мкм с 1024 каналами, с гамма-процентной наработкой до 10 лет при вероятности безотказной работы не менее 0,99.

PACS: 42.79.Ag; 72.20.Jv; 07.57.Kp; 61.80.Ba

Ключевые слова: сканирующие ФПУ, заданная безотказность, среднее время безотказной работы, гамма-процентная наработка до отказа, фотозлектрические параметры.

Введение

Сканирующие многорядные ФПУ [1—3] используются в различных системах наблюдения, контроля, теплопеленгации и т. д. Эти устройства имеют различные форматы, спектральные диапазоны чувствительности и фотозлектрические параметры, и каждое из них предназначено для решения конкретной технической задачи, имеющей различное применение. Разработка и изготовление любого из них, также является достаточно сложной задачей.

В данной работе рассматривается метод разработки сканирующего ФПУ, предназначенного

для работы в автономном режиме с повышенной безотказностью в течение заданного интервала времени без технического обслуживания. Такие ФПУ, при близкой к единице вероятности безотказной работы в течение 7—10 лет наработки, необходимы для использования в различных системах космического наблюдения. Наиболее сложным при этом является ИК ФПУ. Устройство включает вакуумированный корпус (ВК) с оптическим окном, расположенную в нём матрицу или линейку ФЧЭ (МФЧЭ) на основе фотодиодов, состыкованных поэлементно с кремниевой БИС, холодный экран (ХЭ) с диафрагмой и, если это необходимо, охлаждаемый светофильтр. Корпус интегрирован с системой охлаждения ФПУ.

Использование такого ФПУ наталкивается на сложность сохранения полного числа функционирующих каналов устройства с приемлемыми фотозлектрическими параметрами в течение достаточно протяжённого временного интервала. Для достижения этой цели можно использовать два типа ФПУ. Первый тип — линейные ФПУ, содержащие один ФЧЭ в канале с необходимой длительностью гамма-процентной наработки до отказа. Второй тип — многорядное ФПУ, содержащее заданное число ФЧЭ в канале. ФПУ считается работоспособным, пока вероятность его без-

Патрашин Александр Иванович, ведущий научный сотрудник¹.

Бурлаков Игорь Дмитриевич, зам. генерального директора¹, профессор².

¹АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Тел. 8 (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

²Московский институт радиоэлектроники и автоматики (МИРЭА).

Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78.

Статья поступила в редакцию 18 мая 2015 г.

© Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., 2015

отказной работы не ниже заданной величины, а количество и распределение дефектных каналов соответствует заданным требованиям. Канал считается работоспособным, пока его фотоэлектрические характеристики удовлетворяют заданным техническим требованиям. ФЧЭ считается работоспособным, пока его пороговый фотоэлектрический параметр соответствует заданной величине.

Первый тип ФПУ маловероятен, т. к. указанная длительность гамма-процентной наработки означает, что среднее время до отказа составит более 994 лет или более $8,7 \cdot 10^6$ ч, что соответствует слишком малой величине интенсивности отказов ФПУ $\lambda = 1,15 \cdot 10^{-7}$ ч⁻¹. Такая величина интенсивности отказов пока не отвечает ни одной из известных ИК МФЧЭ.

В настоящей работе описывается метод разработки на примере многоэлементного сканирующего ФПУ второго типа. ФПУ должно работать в спектральном диапазоне от 10,5 мкм до 12,6 мкм и включать 1024 канала. ФПУ предназначено, например, для метеонаблюдений земной поверхности из космоса. ФПУ должно иметь высокую продолжительность гамма-процентной наработки ФПУ, 7—10 лет или 61 320—87 600 ч, при близкой к единице вероятности безотказной работы $\gamma \geq 0,99$. Такая продолжительность обусловлена практически непрерывной работой ФПУ в течение всего срока нахождения на орбите и невозможностью замены устройства при выходе его из строя. ФПУ будет работоспособно пока работоспособны все его каналы. Канал ФПУ и ФЧЭ является работоспособными, пока пороговая разность температур канала и ФЧЭ, например, не выше 25 мК.

Для данной работы мы выбрали достаточно простые технические требования, чтобы не загромождать её изложение. Технические требования могут содержать любые разумные фотоэлектрические параметры и критерии работоспособности ФПУ, канала и ФЧЭ.

Показано, что необходимое количество элементов в канале ФПУ определяется известными параметрами безотказности одного ФЧЭ и необходимой величиной гамма-процентной наработки всего ФПУ. Исследованы возможные параметры такого ФПУ.

Поскольку гамма-процентная наработка ФПУ является необходимым условием, а фотоэлектрические параметры — достаточным, то анализ начнём с определения количества ФЧЭ в канале многоэлементного ФПУ, необходимого для получения заданной гамма-процентной наработки устройства.

Определение необходимого количества ФЧЭ в канале ФПУ

Для определения необходимого количества ФЧЭ в канале ФПУ воспользуемся результатами

нашей работы [1], описывающей аналитическую модель безотказности многорядного ФПУ. Рассмотрим многорядное ФПУ, включающее $N = 1024$ канала в B фотоприёмных модулях (ФПМ), где $B = 1, 2, 4$ или 8 . Тогда каждый ФПМ будет включать не менее N/B рабочих каналов. Пусть каждый канал такого ФПМ содержит M ФЧЭ. Фоточувствительные площадки крайних ФЧЭ в соседних ФПМ перекрываются, как показано на рис. 1.

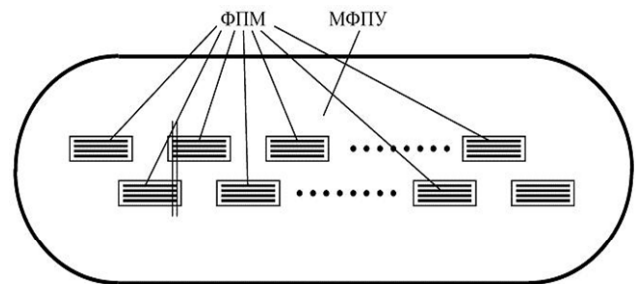


Рис. 1. Расположение ФПМ в ФПУ

В нашем случае $N = 1 \times 1024; 2 \times 512; 4 \times 256; 8 \times 128$, а величина M будет определяться необходимой величиной гамма-процентной наработки ФПУ.

Можно считать, что гамма-процентная наработка кремниевой БИС при заданном γ много больше, чем гамма-процентная наработка МФЧЭ. Поэтому именно МФЧЭ будет определять безотказность ФПУ.

Будем считать ФПУ работоспособным, пока работоспособны все B ФПМ, входящие в его состав. Также будем считать ФПМ работоспособным, пока работоспособны все его каналы. Канал будем считать работоспособным, пока в нём работоспособен хотя бы один ФЧЭ. ФЧЭ, в свою очередь, будем считать работоспособным, пока заданный пороговый параметр $S(t)$, характеризующий пороговую фоточувствительность ФЧЭ (удельная обнаружительная способность, пороговая облучённость, пороговая мощность, эквивалентная шуму разность температур), равен или лучше заданной величины S_0 . В нашей работе [2] получена аналитическая связь измеряемого порогового параметра ФЧЭ $S(t)$ с вероятностью его безотказной работы или гамма-процентной наработки. Используя её можно определять величину среднего времени безотказной работы ФЧЭ, чтобы затем использовать его в расчетах.

Сигнал канала (в зависимости от организации работы БИС-мультиплектора) — это нормированный сигнал, сформированный в режиме временной задержки и накопления (ВЗН), или средний сигнал по работоспособным ФЧЭ в канале, или максимальный из сигналов работоспособных ФЧЭ в канале [3].

Каждый ФЧЭ, канал, ФПМ или МФПУ может находиться в работоспособном (A) состоянии или неработоспособном (\bar{A} , отказ) состоянии. Вероятности этих состояний мы считаем известными и одинаковыми для всех ФЧЭ. Все отказы рассматриваются как случайные события, независимые в совокупности.

МФПУ организовано по иерархическому принципу: первый уровень — ФЧЭ; второй — канал с заданным количеством ФЧЭ; третий — фотоприёмный модуль с известным числом каналов; четвертый — МФПУ с заданным количеством ФПМ.

Из независимости отказов ФЧЭ следует независимость отказов всех узлов и устройств более высокого уровня (каналов, ФПМ и ФПУ). При этом расчет вероятности безотказной работы устройства более высокого иерархического уровня требует решения задачи [1], соответствующей заданному критерию отказа (число отказавших ФЧЭ, каналов и модулей) и знания вероятностей состояния устройства предыдущего иерархического уровня.

При расчетах вероятностей безотказной работы во всех выражениях подстрочный индекс 1 будет относиться к ФЧЭ, индекс 2 — к каналу ФПМ, индекс 3 — к ФПМ, индекс 4 — к ФПУ.

Установим следующие критерии отказа ФПУ (они могут быть скорректированы):

- максимальное число отказавших ФЧЭ в канале $K = M-1$;
 - число отказавших каналов $L = 0$;
 - число отказавших ФПМ $L_1 = 0$.
- Зададим величину $\gamma = 0,99$.

$$q_3 = \sum_{n=0}^N C_N^n \cdot \left(\sum_{m=0}^{M-1} C_M^m \cdot q_1^m \cdot p_1^{M-m} \right)^{N-n} \cdot \left(1 - \sum_{m=0}^{M-1} C_M^m \cdot q_1^m \cdot p_1^{M-m} \right)^n. \quad (5)$$

Тогда вероятность безотказной работы такого ФПУ будет иметь следующий вид:

$$p_3 = 1 - q_3. \quad (6)$$

Вероятность безотказной работы и вероятность отказа ФПУ с B ФПМ, в силу независимости отказов, будет описываться следующими формулами [4]:

$$p_4 = (p_3)^B \quad (7)$$

$$q_4 = 1 - p_4. \quad (8)$$

Вероятность работоспособного состояния — $p(t)$, вероятность отказа — $q(t)$. Сумма этих вероятностей всегда равна единице.

С учётом экспоненциальной модели отказов, справедливой для ФЧЭ [1], получим

$$p_1 = \exp\left(-\frac{t}{T_0}\right) \quad (1)$$

$$q_1 = 1 - p_1, \quad (2)$$

где T_0 — известная величина среднего времени безотказной работы ФЧЭ.

Канал включает M ФЧЭ, допускается отказ не более K элементов ($K = M-1$). Тогда вероятность работоспособного состояния канала при отказе не более K ФЧЭ описывается выражением:

$$p_2 = p_2(A) = \sum_{m=0}^{M-1} C_M^m \cdot q_1^m \cdot p_1^{M-m}, \quad (3)$$

а вероятность отказа канала ФПМ:

$$q_2 = p_2(\bar{A}) = 1 - p_2. \quad (4)$$

Здесь p_1 и q_1 определяются выражениями (1) и (2).

В нашем случае ФПУ включает 1024 канала и состоит из одного ФПМ с 1024 каналами, или двух ФПМ с 512 каналами, или четырёх ФПМ с 256 каналами и т. д.

Вероятность отказа ФПМ, включающего N каналов и M элементов в канале, при недопустимости отказа любого канала и более $M-1$ ФЧЭ в канале, определяется выражением [1]:

На рис. 2 показаны зависимости вероятности безотказной работы четырёх ФПУ с одинаковым заданным числом каналов, но с разным количеством ФПМ при $T_0 = 5 \cdot 10^4$ ч и $M = 10$ в диапазоне вероятностей от 0,98 до 1. Видно, что все кривые идентичны, что и должно выполняться при $L = 0$. Также видно, что гамма-процентная наработка ФПУ при $\gamma = 0,99$ равна $1,9 \cdot 10^4$ ч, что ниже её необходимой длительности.

Для увеличения длительности гамма-процентной наработки существует два пути.

Первый путь — увеличение числа ФЧЭ в канале при сохранении остальных требований. Рас-

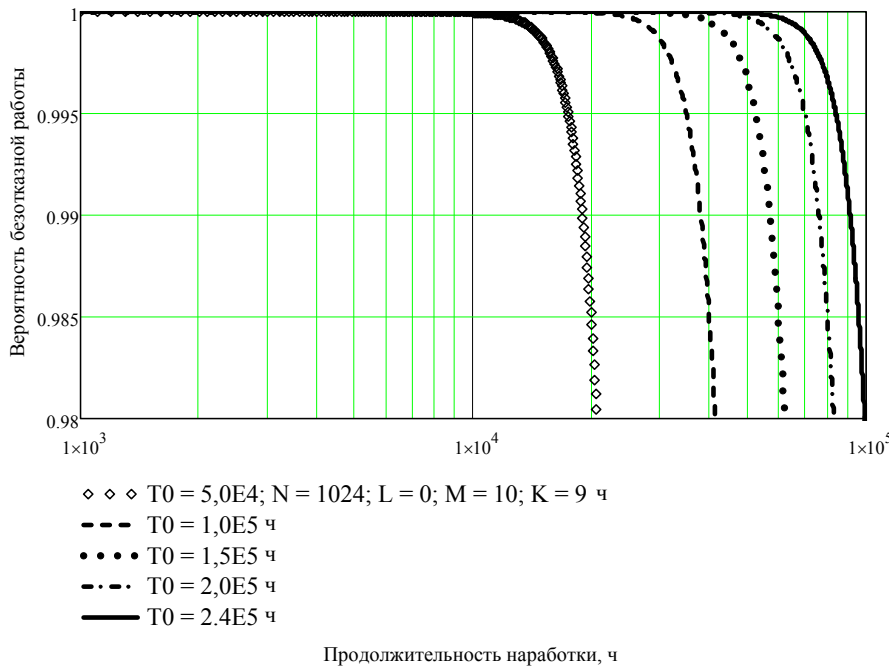


Рис. 4. Зависимость вероятности безотказной работы ФПУ при разных средних временах безотказной работы ФЧЭ

Из графиков следует, что необходимая длительность гамма-процентной наработки, позволяющая ФПУ с 10 ФЧЭ в канале функционировать в течение 10 лет с высокой вероятностью безотказной работы $\gamma = 0,99$, достигается при $T_0 \cong 2,4 \cdot 10^5$ ч.

Резюмируя, можно сказать, что при разработке многорядных ФПУ с высоким значением гамма-процентной наработки при достаточно высоком значении γ необходимо экспериментально оценить среднее время безотказной работы ФЧЭ [5], а затем уже на его основе рассчитывать необходимое число ФЧЭ в канале для получения заданной гамма-процентной наработки. Необходимое число каналов можно набирать с помощью конечного числа фотомодулей с заданным количе-

ством ФЧЭ в канале, которые могут быть реально изготовлены.

Сказанное иллюстрирует рис. 5, на котором изображены графики зависимости вероятностей безотказной работы для четырёх ФПУ с 1024 работоспособными каналами, но с разным числом ФЧЭ в канале (64; 16; 8; 4) и с отличающимися средними временами безотказной работы ($5 \cdot 10^4$ ч; $1,35 \cdot 10^5$ ч; $3,35 \cdot 10^5$ ч; $1,57 \cdot 10^6$ ч). Все они имеют одинаковую гамма-процентную наработку при $\gamma = 0,99$. Самую высокую вероятность безотказной работы в течение гамма-процентной наработки имеет ФПУ с наибольшим количеством ФЧЭ в канале и наименьшим средним временем их безотказной работы.

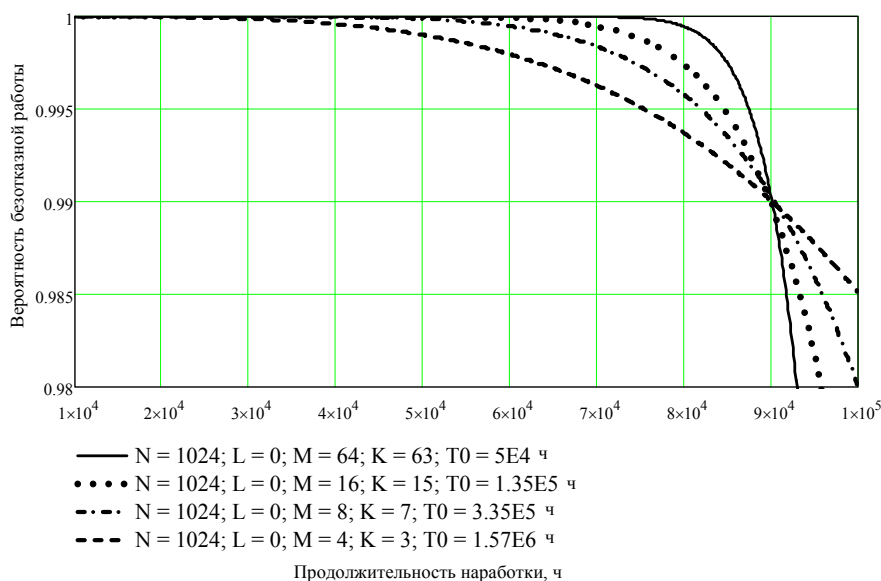


Рис. 5. Зависимость вероятности безотказной работы ФПУ с разным числом ФЧЭ в канале и с отличающимися средними временами безотказной работы

Теперь мы можем перейти к расчёту и анализу параметров ФПУ.

Расчет и анализ параметров ФПУ

В предыдущем разделе были определены возможные форматы ФПУ, удовлетворяющего требованию безотказности при работе в автономных условиях, но при разумных длительностях средних времён безотказной работы. Теперь можно перейти к расчёту и анализу возможных параметров ФПУ. ФПУ должно иметь формат $1024 \times M$, где M может изменяться от $M = 4$ при $T_0 = 1,57 \cdot 10^6$ ч до $M = 64$ при $T_0 = 5 \cdot 10^4$ ч. Возможная топология МФЧЭ такого ФПУ [6] изображена на рис. 6.

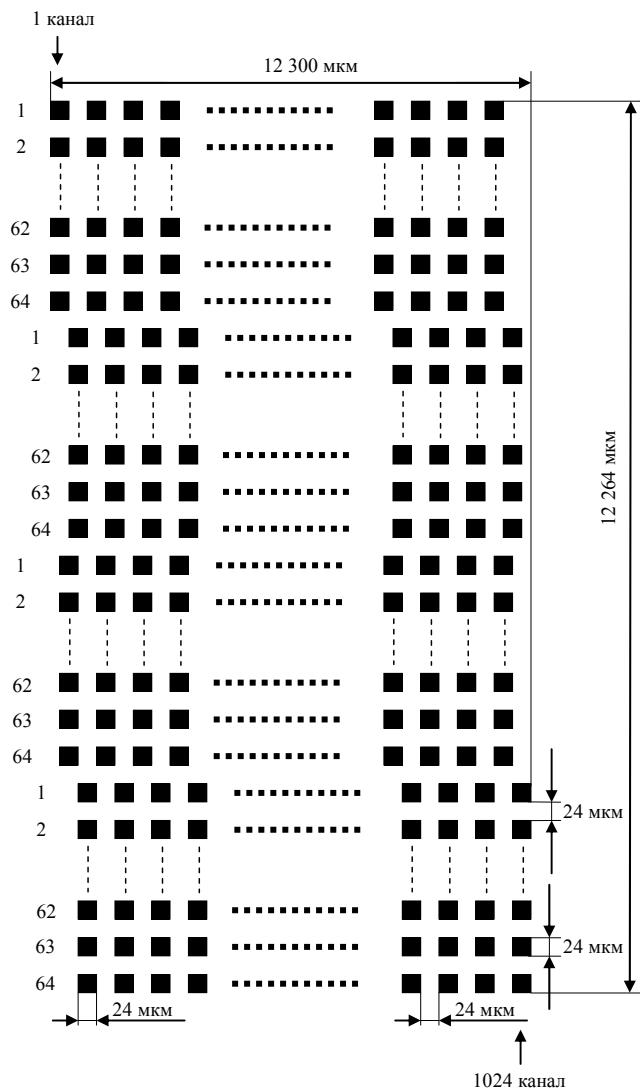


Рис. 6. Топология МФЧЭ

Для расчёта и анализа параметров ФПУ воспользуемся нашей работой [7].

Рассмотрим необходимый для анализа перечень конструктивных параметров ФПУ, приведенный в табл. 1. Это параметры, изменение которых невозможно после изготовления ФПУ.

Таблица 1

Конструктивный параметр	Обозначение	Значение
Формат МФЧЭ	$N \times M$	1024×64
Размеры площадки МФЧЭ	$a; b$	12 264 мкм; 12 300 мкм
Шаг МФЧЭ и площадь ФЧЭ	$a_x; a_y; A_s$	$24 \times 24 \text{ мкм}^2 =$ $= 5,76 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$
Радиус и расстояние диафрагмы от МФЧЭ	$r_0; l$	1 см; 3,2 см
Коэффициент пропускания входного окна	$K_{во}$	0,93
Степень серости входного окна	$\epsilon_{во}$	0,8
Коэффициент пропускания светофильтра	$K_{сф}$	0,95
Степень серости светофильтра	$\epsilon_{сф}$	0,8
Коэффициент пропускания диафрагмы в центре МФЧЭ	K_d	0,089
Степень серости светоизолирующего экрана	$\epsilon_{сэ}$	0,9
Границы фоточувствительности ФЧЭ	$\lambda_1; \lambda_2$	12,6 мкм; 10,5 мкм
Средняя квантовая эффективность ФЧЭ	η	0,67
Величина емкости накопления в ячейке	C_n	2,4 пФ

Все вышеуказанные параметры взяты из реальных конструкций ФПУ и легко могут быть изменены или пересчитаны.

При моделировании ФПУ учитывались следующие источники облучения.

1 Излучение фона с температурой T_ϕ и степенью черноты ϵ_ϕ .

2 Излучение просветленного входного окна с температурой $T_{во}$, со степенью черноты $\epsilon_{во}$ и коэффициентом пропускания $K_{во}$.

3 Излучение светоизолирующего холодного экрана с температурой $T_{сэ}$ и степенью черноты $\epsilon_{сэ}$.

4 Излучение холодного светофильтра ФПУ с температурой $T_{сф}$, степенью черноты $\epsilon_{сф}$ и коэффициентом пропускания $K_{сф}$.

Паразитным внешним излучением, отраженным от стенок светоизолирующего экрана и попадающим на МФЧЭ, мы пренебрегаем, т. к. существует достаточно много конструктивных решений и способов создания таких экранов, в которых оно практически отсутствует.

Облученность, создаваемая фоном (АЧТ) с температурой T_ϕ и коэффициентом черноты ϵ_ϕ , определялась выражением [7]:

$$L_\phi = K_{во} \cdot K_{сф} \cdot K_d \cdot \epsilon_\phi \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^4 \cdot \left[\exp\left(\frac{c \cdot h}{\lambda \cdot k_B \cdot T_\phi}\right) - 1 \right]} d\lambda \quad (9)$$

где λ_1 и λ_2 соответственно коротковолновая и длинноволновая граница чувствительности ФЧЭ; k_B — постоянная Больцмана; c — скорость света; h — постоянная Планка; K_D — коэффициент пропускания холодной диафрагмы.

Круглая диафрагма в холодном экране имеет коэффициент пропускания, K_D , описываемый следующим выражением [8, 9]:

$$K_D = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \frac{\rho \cdot l^2 \cdot d\rho \cdot d\varphi}{\left[l^2 + (\rho \cdot \cos \varphi - x)^2 + (\rho \cdot \sin \varphi - y)^2 \right]^2} \quad (10)$$

где r_0 — радиус круглой диафрагмы; l — расстояние от диафрагмы до МФЧЭ.

Величина коэффициента пропускания диафрагмы выражает отношение облученности, создаваемой фоновым излучением, в точке плоскости МФЧЭ с координатами x и y к облученности в той же точке при отсутствии светоизолирующего экрана с диафрагмой [8, 9].

Облученность, создаваемая входным окном МФПУ с температурой $T_{\text{во}}$ и коэффициентом черноты $\varepsilon_{\text{во}}$, равна [7]

$$L_{\text{во}} = K_{\text{сф}} \cdot K_D \cdot \varepsilon_{\text{во}} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^4 \cdot \left[\exp\left(\frac{c \cdot h}{\lambda \cdot k_B \cdot T_{\text{во}}}\right) - 1 \right]} d\lambda. \quad (11)$$

Облученность, создаваемая светоизолирующим экраном с температурой $T_{\text{сэ}}$ и коэффициентом черноты $\varepsilon_{\text{сэ}}$, равна [7]

$$L_{\text{сэ}} = [1 - K_D] \cdot \varepsilon_{\text{сэ}} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^4 \cdot \left[\exp\left(\frac{c \cdot h}{\lambda \cdot k_B \cdot T_{\text{сэ}}}\right) - 1 \right]} d\lambda. \quad (12)$$

Облученность, создаваемая светофильтром с температурой $T_{\text{сф}}$ и коэффициентом черноты $\varepsilon_{\text{сф}}$, равна [7]

$$L_{\text{сф}} = \varepsilon_{\text{сф}} \cdot K_D \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda^4 \cdot \left[\exp\left(\frac{c \cdot h}{\lambda \cdot k_B \cdot T_{\text{сф}}}\right) - 1 \right]} d\lambda. \quad (13)$$

Из всех указанных облученностей лишь облученность $L_{\text{ф}}$ можно считать полезной. Все остальные облученности являются паразитными и по-

вышают минимальную детектируемую величину сигнала ФЧЭ и, следовательно, ухудшают пороговые параметры МФПУ. Полная облученность ФЧЭ равна сумме всех вышеуказанных облученностей.

Облученность в любой точке МФЧЭ может быть рассчитана при подстановке соответствующих значений x и y в выражение для K_D . В рассматриваемом МФПУ один элемент изображения последовательно во времени экспонируется на каждый ФЧЭ канала в течение времени накопления. Накопленные сигналы усиливаются, выводятся на внешние устройства обработки, деселектируются, складываются и усредняются или нормируются.

Генерируемые облученностями (9), (11), (12) и (13) фототоки, вместе с темновым током, формируют полный сигнал ФЧЭ. При наличии паразитных облученностей интегральный ток можно разделить на фоновый (сигнальный) ток и эффективный темновой ток, который равен сумме темнового тока и паразитных фототоков ФЧЭ. Эффективный темновой ток определяется следующим выражением:

$$I_{d_eff} = I_d + I_{\text{во}} + I_{\text{сф}} + I_{\text{сэ}}, \quad (14)$$

где I_d — темновой ток ФЧЭ; $I_{\text{во}}$ — паразитный фототок, генерируемый излучением входного окна; $I_{\text{сф}}$ — паразитный фототок, генерируемый излучением холодного светофильтра; $I_{\text{сэ}}$ — паразитный фототок, генерируемый излучением холодного экрана.

Температура фонового излучения лежит в диапазоне от 213 К (−60 °С) до 333 К (+60 °С). Максимально возможные значения температур светоизолирующего экрана, светофильтра и входного окна мы определим ниже.

Модель позволяет рассчитать величины всех компонентов полного тока и сам полный ток ФЧЭ в любой точке МФЧЭ. В табл. 2 представлены рассчитанные в центре МФЧЭ при величине среднего квантового выхода $\eta = 0,67$, темнового тока $I_d = 1,4 \cdot 10^{-8}$ А, $T_{\text{ф}} = 300$ К, $T_{\text{во}} = 130$ К и $T_{\text{сф}} = T_{\text{сэ}} = 100$ К величины всех вышеуказанных компонент полного тока ФЧЭ. Видно, что при заданных температурах величины паразитных фототоков ниже фототока, генерированного фоновой облученностью. В этом случае отрицательное воздействие на фотоэлектрические параметры сможет оказывать лишь темновой ток ФЧЭ I_d .

Таблица 2

Параметр, единица измерения	Фоновый фототок, А	Фототок от излучения входного окна, А	Фототок от излучения холодного фильтра, А	Фототок от излучения холодного экрана, А	Полный фототок, А	Темновой ток, А
Значение	$1,647 \cdot 10^{-8}$	$6,55 \cdot 10^{-11}$	$1,051 \cdot 10^{-12}$	$1,211 \cdot 10^{-12}$	$1,654 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-8}$

На рис. 7 показана зависимость эффективного темнового тока ФЧЭ от температуры холодного светофильтра и холодного экрана (поскольку они, практически, равны) для трех величин темнового тока ФЧЭ при температуре входного окна $T_{60} = 130$ К. Из представленного графика следует, что в заданном диапазоне изменения указанной температуры эффективный темновой ток начинает отличаться от темнового тока ФЧЭ при увеличении температуры T_{cf} (T_{xz}) выше 100 К.

На рис. 8 показана зависимость эффективного темнового тока ФЧЭ от температуры входного окна T_{60} при температуре $T_{cf} = T_{xz} = 100$ К для трех значений темнового тока ФЧЭ. Эффективный темновой ток начинает возрастать и отличаться от темнового тока ФЧЭ при $T_{60} = 130$ К. Для темновых токов $I_d \geq 1 \cdot 10^{-8}$ А эффективный темновой ток, практически, не отличается от темнового тока ФЧЭ при любых T_{60} .

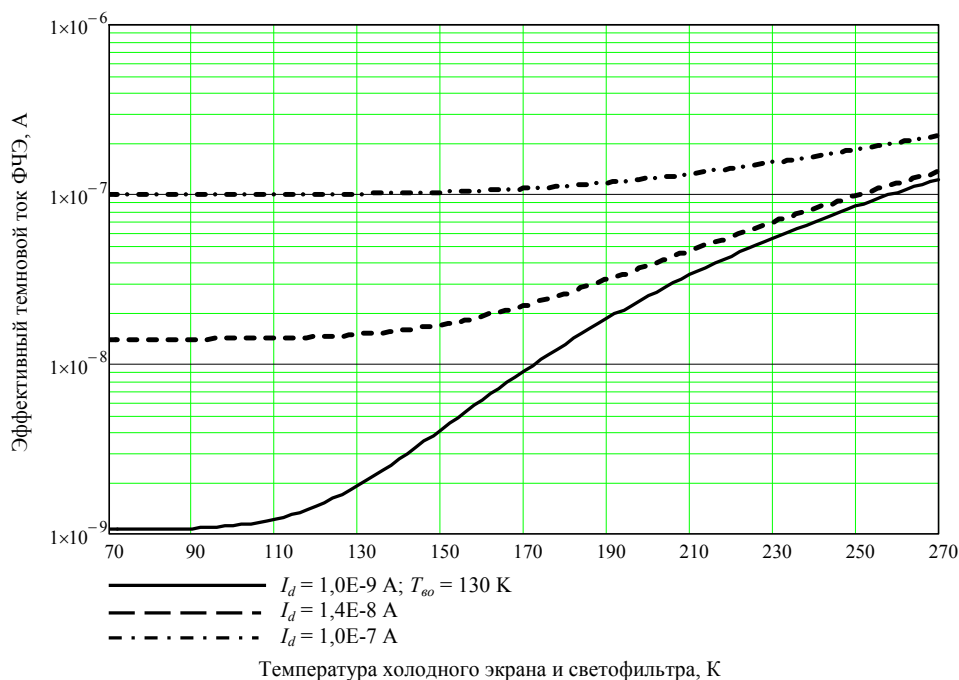


Рис. 7. Зависимость эффективного темнового тока ФЧЭ от температуры холодного светофильтра и холодного экрана

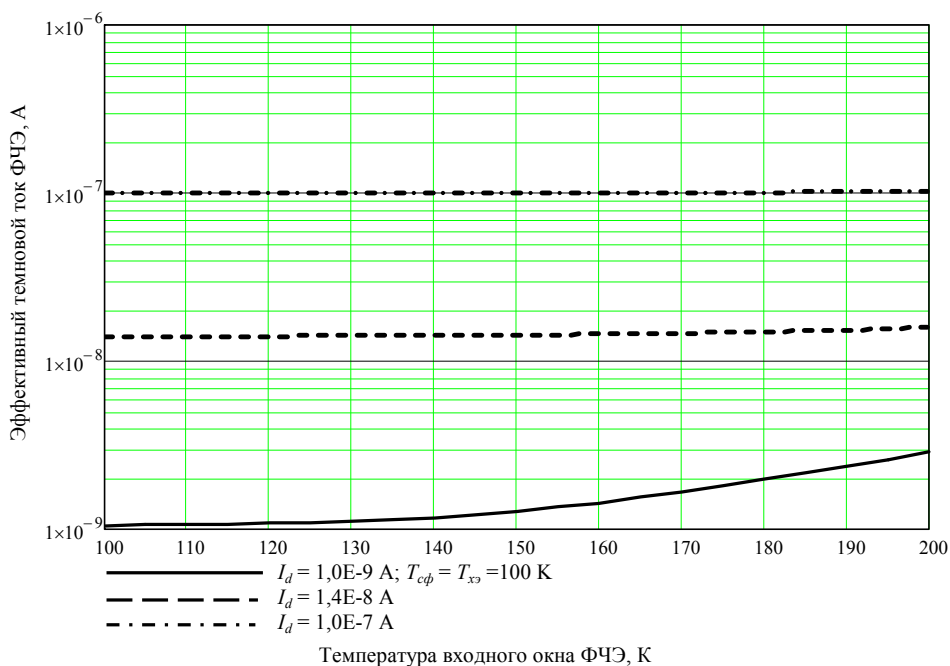


Рис. 8. Зависимость эффективного темнового тока ФЧЭ от температуры входного окна

Таким образом, одним из важнейших эксплуатационных параметров МФПУ является темновой ток ФЧЭ при рабочей температуре МФЧЭ. Поэтому в реальной конструкции температуры холодного экрана, светофильтра и входного окна должны выбираться в зависимости от средней величины темнового тока МФЧЭ. Контроль этого параметра на 100 % ФЧЭ [10] возможен на МФЧЭ, состыкованной с БИС.

Результаты исследований эффективного темнового тока ФЧЭ показывают, что при $T_{\text{во}} \leq 130$ К и $T_{\text{сф}} = T_{\text{хэ}} \leq 100$ К отрицательное воздействие паразитных излучений входного окна, холодного светофильтра и экрана не будет сказываться на величине эффективного темнового тока ФЧЭ.

Теперь определим время накопления, в течение которого накопительный конденсатор в ячейке мультиплексора разрядится до заданной степени под действием эффективного темнового тока и сигнального фототока ФЧЭ.

В дальнейшем все расчёты будут проводиться при вышеуказанных температурах входного окна, холодного светофильтра и экрана, а также при темновом токе ФЧЭ $I_d = 1,4 \cdot 10^{-8}$ А. Графики будут строиться при темновых токах ФЧЭ, лежащих в интервале от 10^{-9} до 10^{-7} А.

Величина времени накопления сигнала рассчитывается по следующей формуле:

$$\tau_n = \frac{k_{\text{раз}} \cdot E_0 \cdot C_n}{I_d + I_{\text{ф}} + I_{\text{во}} + I_{\text{сф}} + I_{\text{хэ}}}, \quad (15)$$

где C_n — величина ёмкости накопления, Ф; E_0 — напряжение перезарядки ёмкости накопления, В; $k_{\text{раз}}$ — степень разряда ёмкости за время накопления.

Расчёты показывают, что при температуре фона $T_{\text{ф}} = 333$ К (+60 °С) минимальное время на-

копления в заданном диапазоне темновых токов ФЧЭ при коэффициенте разряда накопительной ёмкости 0,7 изменяется от $2,25 \cdot 10^{-4}$ до $4,7 \cdot 10^{-5}$ с. При температуре фона $T_{\text{ф}} = 300$ К (+27 °С) в том же диапазоне темновых токов ФЧЭ время накопления изменяется от $3,35 \cdot 10^{-4}$ до $5,05 \cdot 10^{-5}$ с. Для дальнейших расчётов взято значение времени накопления при температуре фона $T_{\text{ф}} = 300$ К и темновом токе ФЧЭ $I_d = 1,4 \cdot 10^{-8}$ А, равное $\tau_n = 1,9 \cdot 10^{-4}$ с.

Теперь мы можем сформировать вторую группу параметров, а именно, эксплуатационные параметры. Часть этих параметров мы можем корректировать, а часть их может изменяться под действием внешних факторов без нашего участия.

В табл. 3 указаны необходимые эксплуатационные параметры, некоторые из которых являются расчётными. Расчёты проводились в соответствии с [7].

Теперь мы можем рассчитать и проанализировать третью группу параметров. Третья группа — выходные параметры, характеризующие качество ФПУ и вычисляемые с использованием первой и второй группы параметров.

Источниками полного сигнала ФЧЭ всегда являются фототоки и темновой ток, которые накапливаются на соответствующей ёмкости в ячейке мультиплексора. Величина полезного сигнала ФЧЭ в электронах, источником которого в нашем случае является фоновое излучение, выражается следующей формулой:

$$N_{u_ФЧЭ} = \tau_n \cdot \eta \cdot A_s \cdot L_{\text{ф}} = \tau_n \cdot \frac{I_{\text{ф}}}{q} \quad (16)$$

где τ_n — величина времени накопления, с; A_s — эффективная площадка ФЧЭ, см²; η — квантовая эффективность ФЧЭ.

Таблица 3

Эксплуатационный параметр	Обозначение	Значение
Диапазон температур фонового излучения	$T_{\text{ф}}$	213 К ÷ 333 К
Степень серости фонового излучения	$\varepsilon_{\text{ф}}$	0,96
Температура входного окна МФПУ	$T_{\text{во}}$	≤ 130 К
Температура светоизолирующего экрана	$T_{\text{сэ}}$	≤ 100 К
Температура холодного светофильтра	$T_{\text{сф}}$	≤ 100 К
Полезная облученность в центре МФЧЭ при $T_{\text{ф}} = 300$ К	$L_{\text{рн} \text{ и}}^{\text{рн} \text{ и}}$ $E_{\text{в} \text{ и}}^{\text{в} \text{ и}}$	$2,667 \cdot 10^{16}$ фотон·см ⁻² ·с ⁻¹ ; $4,596 \cdot 10^{-4}$ Вт·см ⁻²
Полная облученность в центре МФЧЭ при $T_{\text{ф}} = 300$ К	$L_{\text{рн} \text{ р}}$	$2,679 \cdot 10^{16}$ фотон·см ⁻² ·с ⁻¹
Время накопления МФПУ при $T_{\text{ф}} = 300$ К в диапазоне темновых токов	τ_n	$3,34 \cdot 10^{-4}$ — $5,04 \cdot 10^{-5}$ с
Напряжение зарядки ёмкости накопления	E_0	3,5 В
Темновой ток ФЧЭ	I_d	$1 \cdot 10^{-9}$ ÷ $1 \cdot 10^{-7}$ А
Шум мультиплексора	N_m	10 ÷ 10 000 электронов

Сигналы всех ФЧЭ усиливаются до необходимого уровня и преобразуются в цифровой формат, затем цифровые сигналы ФЧЭ, относящихся к одному каналу, деселектируются, суммируются и обрабатываются по заданному алгоритму вне ФПУ. Так мы получаем сигнал канала ФПУ.

Преобразование сигнала в цифру можно выполнять как в «холодной» зоне МФПУ, так и в «тёплой» его зоне.

Полный усреднённый сигнал канала МФПУ по недефектным элементам включает составляющие от всех компонент облучённости и от темнового тока каждого ФЧЭ.

Полезный средний сигнал канала сканирующего МФПУ по M годным ФЧЭ в электронах будет определяться следующим выражением:

$$N_{u_кан} = \frac{\tau_n \cdot A_s}{M} \cdot \sum_{i=1}^M [\eta_i \cdot L_{\phi i}], \quad (17)$$

где τ_n — величина времени накопления, с; A_s — эффективная площадка ФЧЭ, см²; η_i — средняя квантовая эффективность i -го ФЧЭ в канале; M — количество годных ФЧЭ в канале.

Суммарный шум канала, как и полный сигнал канала, также определяется всеми компонентами сигнала и шумами мультиплексора. Как правило, это дробовые шумы, определяемые как корень квадратный из соответствующей компоненты интегрального сигнала, выраженной в электронах.

Средний шум канала сканирующего МФПУ (в случае суммирования сигналов вне мультиплексора) будет определяться шумами годных ФЧЭ, относящихся к каналу, и иметь следующий вид:

$$N_{ш} = \frac{\sum_{i=1}^M N_{ш_ФЧЭ_i}}{M}. \quad (18)$$

В выражении (18) полный шум ФЧЭ $N_{ш_ФЧЭ_i}$ будет определяться выражением

$$N_{ш_ФЧЭ} = \sqrt{N_{ш\phi}^2 + N_{ш\text{ВО}}^2 + N_{ш\text{СФ}}^2 + N_{ш\text{ХЭ}}^2 + N_{ш\text{ТТ}}^2 + N_{ш\text{М}}^2}, \quad (19)$$

где $N_{ш\phi}$ — шум ФЧЭ, обусловленный накопленным зарядом, генерированным фоновым излучением;

$N_{ш\text{ВО}}$ — шум ФЧЭ, обусловленный накопленным зарядом, генерированным излучением от входного окна;

$N_{ш\text{СФ}}$ — шум ФЧЭ, обусловленный накопленным зарядом, генерированным излучением от холодного светофильтра;

$N_{ш\text{ХЭ}}$ — шум ФЧЭ, обусловленный накопленным зарядом, генерированным излучением от холодного экрана;

$N_{ш\text{ТТ}}$ — шум ФЧЭ, обусловленный накопленным зарядом темнового тока ФЧЭ;

$N_{ш\text{М}}$ — интегральный шум мультиплексора, включающий шум накопленного сигнала и шум его предусилителя или оцифровки;

M — количество годных ФЧЭ в канале.

В табл. 4 представлены величины компонент шума и интегральный шум ФЧЭ, расположенного в центре МФЧЭ, при $T_{\phi} = 300$ К, $T_{\text{во}} = 130$ К, $T_{\text{сф}} = T_{\text{хэ}} = 100$ К, $I_d = 1,4 \cdot 10^{-8}$ А, $\eta = 0,67$, $\tau_n = 190$ мкс.

Рассчитанный в соответствии с выражениями (17) и (18) полезный сигнал ФЧЭ при температуре фона 300 К и времени накопления 190 мкс, будет иметь величину $S_u = 1,955 \cdot 10^7$ электронов или 1,303 В, а полный шум ФЧЭ будет равен $N_{ш} = 7,454 \cdot 10^3$ электронов или 4,06 мВ.

Теперь мы можем рассмотреть ключевую характеристику фотоприёмника — отношение сигнал/шум и её зависимости от темнового тока ФЧЭ, температуры фона, шума мультиплексора, температуры входного окна и холодного фильтра (экрана). Выражение для расчёта отношения сигнал/шум определяется отношением выражений (17) к (18). Рассмотрим вышеуказанные зависимости.

На рис. 9—14 показаны расчётные зависимости среднего значения отношения сигнал/шум канала ФПУ формата 1024×64 с холодной диафрагмой радиусом 1 см, расположенной на расстоянии 3,2 см от МФЧЭ, от величины различных конструктивных и эксплуатационных параметров — темнового тока ФЧЭ, температуры фонового излучения, шума мультиплексора и температуры холодного экрана (светофильтра). При этом, величина квантового выхода ФЧЭ $\eta = 0,67$, а время накопления $\tau_n = 190$ мкс соответствует температуре фона 300 К и темновому току $1,4 \cdot 10^{-8}$ А. Наилучшие результаты, как видно, будут получены при шуме мультиплексора не выше 1000 электронов, при температуре холодного экрана и светофильтра не выше 100 К.

Таблица 4

Параметр	Фон	Входное окно	Холодный фильтр	Холодный экран	Мультиплексор	Темновой ток ФЧЭ	ФЧЭ
Шум, эл.	$4,42 \cdot 10^3$	$2,79 \cdot 10^2$	$6,96 \cdot 10^1$	$2,36 \cdot 10^2$	$9,0 \cdot 10^2$	$4,08 \cdot 10^3$	$7,45 \cdot 10^3$

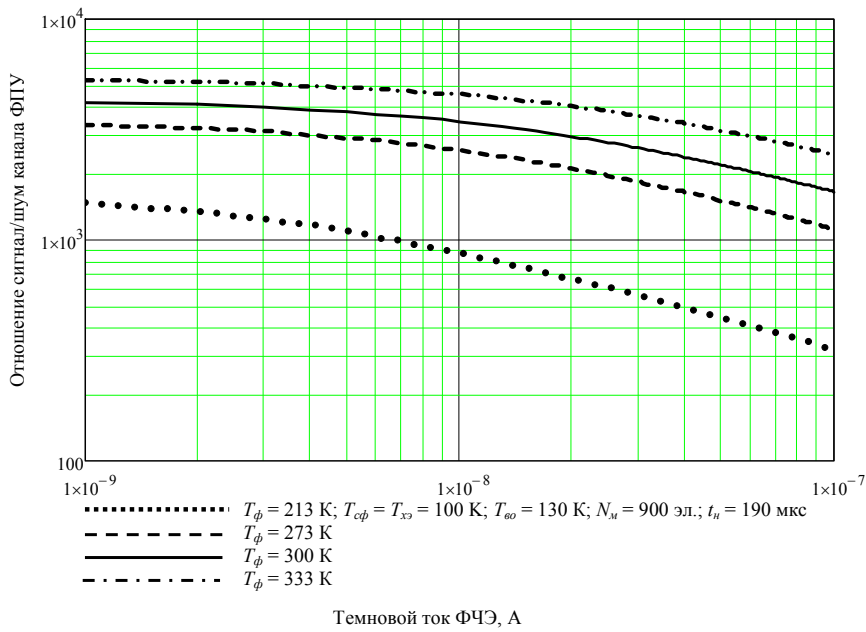


Рис. 9. Зависимость отношения сигнал/шум канала ФПУ от темнового тока ФЧЭ

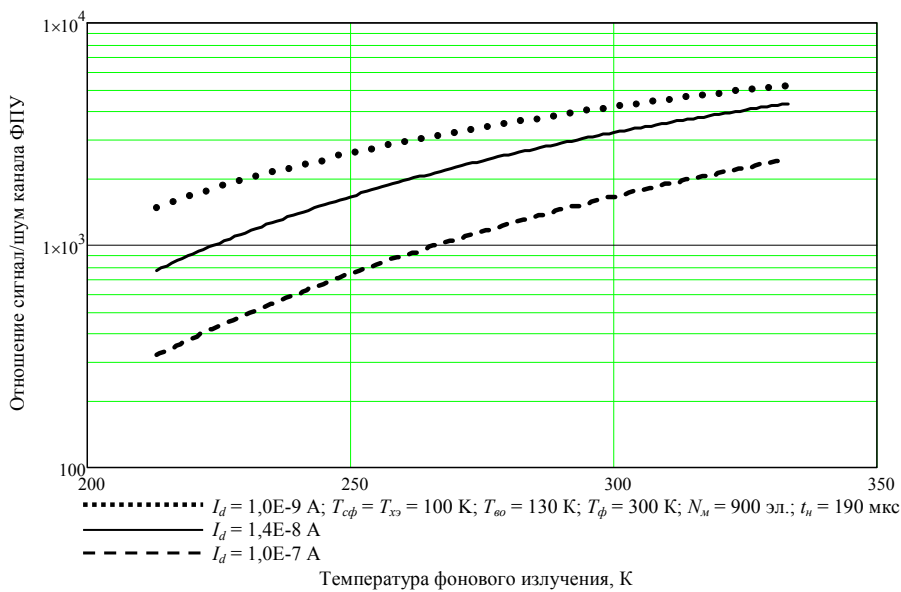


Рис. 10. Зависимость отношения сигнал/шум канала ФПУ от температуры фонового излучения

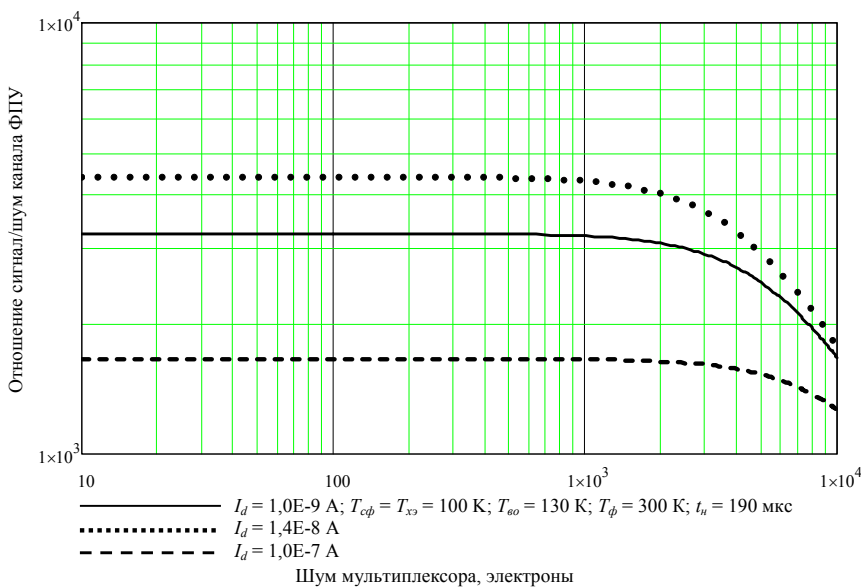


Рис. 11. Зависимость отношения сигнал/шум канала ФПУ от шума мультиплексора при разных темновых токах ФЧЭ

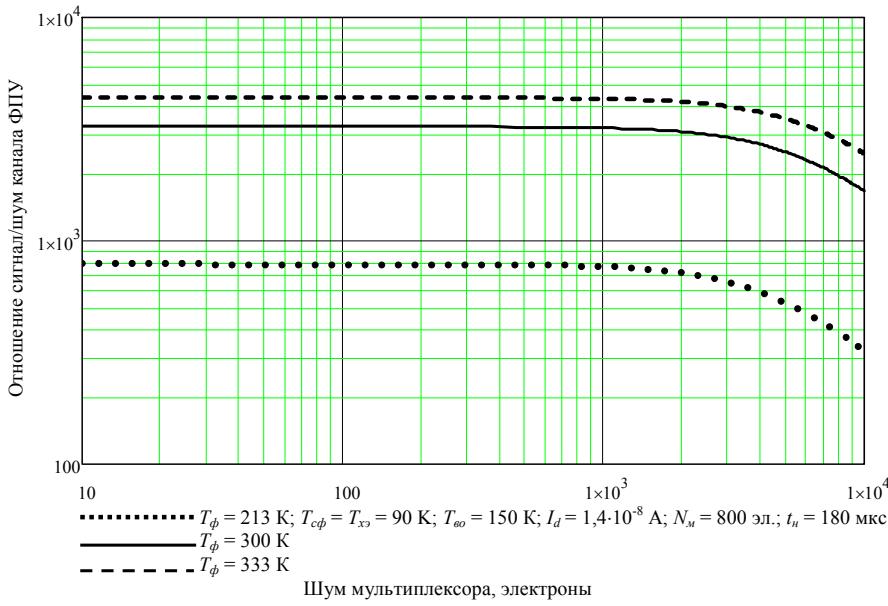


Рис. 12. Зависимость отношения сигнал/шум канала ФПУ от шума мультиплексора при разных температурах фонового излучения

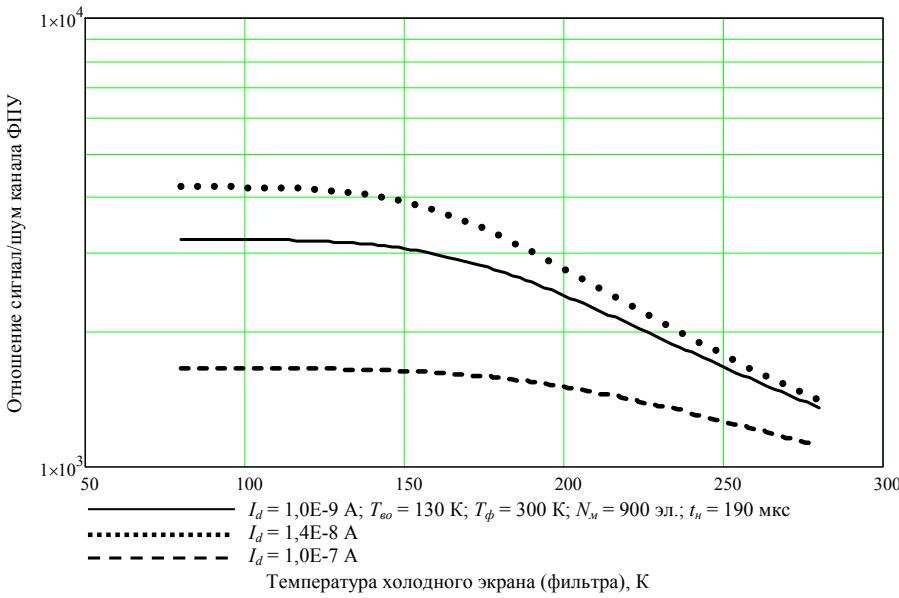


Рис. 13. Зависимость отношения сигнал/шум канала ФПУ от температуры холодного экрана (фильтра) для разных темновых токов

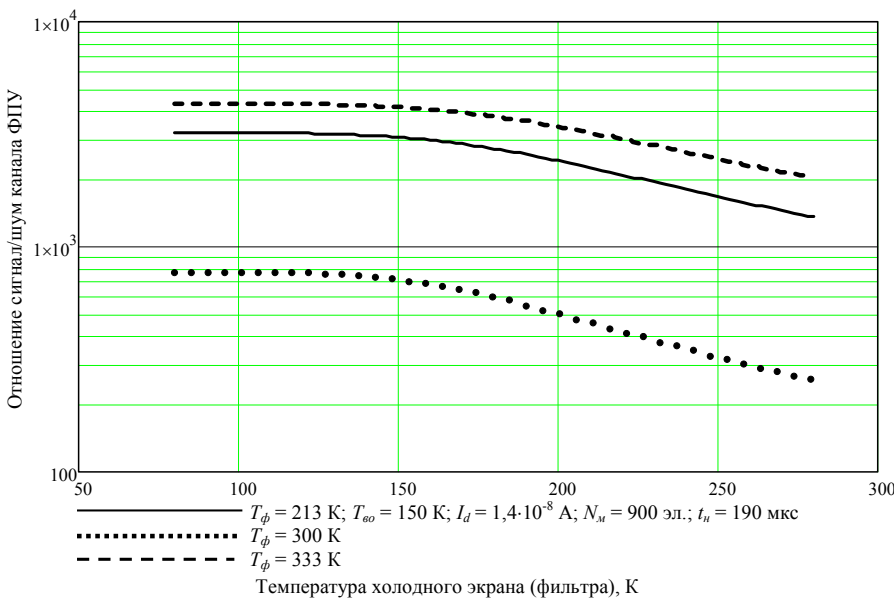


Рис. 14. Зависимость отношения сигнал/шум канала ФПУ от температуры холодного экрана (фильтра) для разных температур фонового излучения

В табл. 5 приведены все рассчитанные и оптимизированные фотоэлектрические параметры ФПУ. Параметры получены в соответствии с аналитической моделью МФПУ [7] при величине квантового выхода ФЧЭ $\eta = 0,67$, шуме мультимплектора 900 электронов, температуре фона 300 К,

казной работы ФПУ, рассчитать необходимое количество ФЧЭ в канале с учётом количества ФЧЭ в группе, обеспечивающего заданные фотоэлектрические параметры.

С помощью аналитической модели МФПУ рассчитать необходимые конструктивные, экс-

Таблица 5

Фотоэлектрические параметры ФПУ, условные обозначения	Значения параметров, единицы измерения (при указанных темновых токах и временах накопления ФЧЭ)	
	1,4·10 ⁻⁸ А; 1,9·10 ⁻⁴ с	1,4·10 ⁻⁹ А; 3,2·10 ⁻⁴ с
Полезный сигнал ФПУ; $N_c; U_c$	1,96·10 ⁷ эл.; 1,3 В	2,53·10 ⁷ эл.; 1,68 В
Интегральный шум ФПУ; $N_{ш}; U_{ш}$	7,45·10 ³ эл.; 4,06·10 ⁻⁴ В	7,27·10 ³ эл.; 3,59·10 ⁻⁴ В
Отношение сигнал/шум ФПУ; SNR	3,209·10 ³	4,684·10 ³
Токовая чувствительность ФПУ; S_i	6,03 А·Вт ⁻¹	6,03 А·Вт ⁻¹
Вольтовая чувствительность ФПУ; S_u	4,53·10 ⁸ В·Вт ⁻¹	8,05·10 ⁸ В·Вт ⁻¹
Температурная чувствительность ФПУ; S_T	16,9·10 ⁻³ В·град ⁻¹	22,5·10 ⁻³ В·град ⁻¹
Пороговая облученность ФПУ; L_n	1,16·10 ¹⁴ фотон·см ⁻² ·с ⁻¹	5,89·10 ¹³ фотон·см ⁻² ·с ⁻¹
Пороговая мощность ФПУ; P_n	8,672·10 ⁻¹³ Вт	4,311·10 ⁻¹³ Вт
Удельная обнаружительная способность ФПУ; D^*	1,46·10 ¹¹ см·Вт ⁻¹ ·с ^{-1/2}	2,2·10 ¹¹ см·Вт ⁻¹ ·с ^{-1/2}
Пороговая разность температур ФПУ; $NETD$	23 мК	16 мК
Динамический диапазон ФПУ; DR	76 дБ	79 дБ

температуре холодного экрана (светофильтра) 100 К и входного окна ФПУ 130 К, при темновом токе ФЧЭ 1,4·10⁻⁸ А и времени накопления ФЧЭ $\tau_n = 190$ мкс, а также при темновом токе ФЧЭ 1,4·10⁻⁹ А и соответствующем ему времени накопления $\tau_n = 320$ мкс.

Заключение

Рассмотрен метод разработки сканирующего ИК ФПУ с заданными фотоэлектрическими параметрами при заданной величине гамма-процентной наработки и заданном значении вероятности безотказной работы.

Для разработки следует выбрать ФЧЭ с необходимым спектральным диапазоном и экспериментально определить его среднее время наработки до отказа.

С помощью аналитической модели МФПУ сравнить заданные и известные фотоэлектрические параметры ФЧЭ. Сформировать группу ФЧЭ, для работы в режиме ВЗН и получения заданных фотоэлектрических параметров.

Затем с помощью аналитической модели безотказности МФПУ, используя известное среднее время наработки ФЧЭ до отказа, заданное возможное количество и распределение дефектных каналов, заданное время гамма-процентной наработки при заданном значении вероятности безот-

казной работы ФПУ, рассчитать необходимые конструктивные и эксплуатационные параметры ФПУ. Оптимизировать полученные фотоэлектрические параметры с помощью корректировки конструктивных и эксплуатационных параметров.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787.2014.9

ЛИТЕРАТУРА

1. Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Иванов Г. А. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 5. С. 520.
2. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Патрашин А. И. и др. // Прикладная физика. 2010. № 4. С. 119.
3. Филачёв А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фоторезисторы и фотоприёмные устройства. — М.: Физматкнига, 2012.
4. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1973.
5. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Патрашин А. И. и др. // Прикладная физика. 2009. № 4. С. 124.
6. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Филачёв А. М. и др. // Прикладная физика. 2012. № 3. С. 61.
7. Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Корнеева М. Д. и др. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 38.
8. Патрашин А. И. // Прикладная физика. 2010. № 3. С. 123.
9. Патрашин А. И. // Прикладная физика. 2011. № 3. С. 98.
10. Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Болтарь К. О. и др. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 5.

Development method of the scanning FPA with the high reliability for long autonomous work

A. I. Patrashin¹ and I. D. Burlakov^{1,2}

¹Orion R&P Association, Inc.
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia

²Moscow Institute of Radio Electronics and Automatics (MIREA)
78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia

Received May 18, 2015

Development method of the scanning FPA having specified c -percentile time before failure with high c -value is presented. The FPA reliability value and work time are specified. The FPA includes given number of channels. Every channel includes the calculated number of photosensitive elements. This number depends on the required reliability value, work time and photosensitive element's mean time before failures (MTBF). The element's MTBF can be lower than a FPA's MTBF. The method is supported by the FPA analytical model and the FPA reliability analytical model.

The FPA reliability analytical model was used for estimation of the required channel's elements number. This number depends on element's MTBF, FPA's c -percentile time before failure and ensured high reliability during the specified work time. The FPA analytical model was used for the parameters calculation and analysis.

Joint usage of both analytical models allows us to define the structural, operational and photoelectrical parameters of the scanning FPA with specified reliability parameters.

As an example, an IR FPA for the spectral range 10.5—12.6 microns, 1024 channels and with c -percentile time before failure equals to 10 years and probability 0.99 was developed and analyzed.

PACS: 42.79.Ag; 72.20.Jv; 07.57.Kp; 61.80.Ba

Keywords: scanning FPA, required reliability value, mean time before failure, photoelectrical parameters.

REFERENCES

1. A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, and G. A. Ivanov, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **2**, 520 (2014).
2. I. D. Burlakov, K. O. Boltar, A. I. Patrashin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 119 (2010).
3. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photoresistors and Photodetectors*. (Fizmatkniga, Moscow, 2012) [in Russian].
4. G. Korn and T. Korn, *Mathematical Handbook* (Mcgraw-Hill Book Company, New York-London, 1968; Nauka, Moscow, 1974).
5. I. D. Burlakov, K. O. Boltar, A. I. Patrashin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 124 (2009).
6. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, A. M. Filachev, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 124 (2009). 2012. № 3. С. 61.
7. A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, M. D. Korneeva, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 38 (2014).
8. A. I. Patrashin, *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 123 (2010).
9. A. I. Patrashin, *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 98 (2011).
10. A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, K. O. Boltar, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 6, 5 (2013).