

УДК 621.383.4/5

Математическое моделирование инфракрасного матричного фотоприемного устройства

А. М. Филачев, А. И. Патрашин, И. Д. Бурлаков, К. О. Болтарь, В. В. Шабаров

Представленная математическая модель инфракрасного матричного фотоприемного устройства (ИК МФПУ) позволяет прогнозировать фотоэлектрические характеристики любого фоточувствительного элемента (ФЧЭ) матрицы, анализировать зависимости этих характеристик от конструктивных и эксплуатационных параметров и осуществлять их оптимизацию. Модель позволяет точно определять все характеристики ИК МФПУ с холодной диафрагмой произвольной формы, в том числе и многосвязной, с учетом всей совокупности паразитных излучений, падающих на матрицу фоточувствительных элементов (МФЧЭ). Для модели разработан новый способ определения облученности МФПУ, использующий новый конструктивный параметр — коэффициент пропускания холодной диафрагмы. Коэффициент пропускания диафрагмы определяется интегралом по площади холодной диафрагмы, включающим координаты заданной точки в плоскости МФЧЭ, расстояние от этой плоскости до плоскости диафрагмы, форму и размеры диафрагмы. Доказано, что фоновая облученность прямо пропорциональна произведению коэффициента пропускания диафрагмы на облученность от протяжённого источника излучения (абсолютно черное тело) с известной температурой, расположенного в полусфере вокруг заданной точки МФЧЭ. Проведена экспериментальная оценка корректности модели сравнением сигналов, шумов и фотоэлектрических характеристик ФЧЭ ИК МФПУ на основе фотодиодов с известными конструктивными и эксплуатационными параметрами. Их МФЧЭ чувствительны в диапазонах 0,9—1,7 мкм, 3—5 мкм и 8—10,6 мкм. Получены хорошие совпадения характеристик, подтверждающие корректность модели.

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

Ключевые слова: ИК МФПУ, холодный экран, коэффициент пропускания диафрагмы, сигнал, шум, параметры и характеристики.

Введение

В работе рассматривается метод моделирования смотрящих и сканирующих матричных фотоприемных устройств (МФПУ) на основе фотодиодов,

позволяющий прогнозировать их сигналы, шумы и все фотоэлектрические характеристики до проведения технологических процессов производства. Метод основан на введении такого нового параметра, как коэффициент пропускания холодной диафрагмы, позволяющий учесть практически все составляющие полной облученности МФЧЭ и осуществить корректное обоснование фотоэлектрических характеристик устройства с учётом заданных конструктивных и эксплуатационных параметров. Полученные выражения фотоэлектрических характеристик МФПУ позволяют прямо использовать их в экспериментальных исследованиях. Метод позволяет анализировать зависимости характеристик от любых заданных конструктивных и эксплуатационных параметров ИК МФПУ с целью их оптимизации.

Филачев Анатолий Михайлович, генеральный директор¹.
Патрашин Александр Иванович, ведущий научный сотрудник¹.
Бурлаков Игорь Дмитриевич, зам. генерального директора¹, профессор².

Болтарь Константин Олегович, начальник НТК¹, профессор³.

Шабаров Владимир Вениаминович, начальник управления¹.
¹ АО «НПО «Орион».

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

Тел. 8 (499) 374-81-30. E-mail: apatrashin@rambler.ru

² Московский технологический университет (МИРЭА).

Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78.

³ Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 27 апреля 2016 г.

© Филачев А. М., Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Шабаров В. В., 2016

Состав, параметры, характеристики и типы ИК МФПУ

ИК МФПУ включает матрицу фоточувствительных элементов (МФЧЭ), большую интеграль-

ную схему (БИС), светоизолирующий холодный экран с диафрагмой, холодный светофильтр, систему охлаждения и фиксации рабочей температуры МФЧЭ, вакуумированный корпус с входным просветлённым оптическим окном.

Сигнальное излучение попадает на ФЧЭ сквозь входное окно, холодный светофильтр и диафрагму. Вместе с ним на ФЧЭ попадает фоновое излучение, излучения от входного окна с просветляющим покрытием, от холодного светофильтра, и от внутренней поверхности холодного экрана. Все они генерируют фототоки в ФЧЭ и учитываются в нашей модели. Суммарный фототок и темновой ток ФЧЭ поступают в ячейку БИС, накапливаются в течение заданного времени, преобразуется в напряжение, и считываются с выходов БИС в аналоговом или цифровом формате.

Для моделирования работы МФПУ требуются его конструктивные и эксплуатационные параметры.

Конструктивными мы назовём параметры, изменение которых невозможно после изготовления МФПУ. Это формат и размеры МФЧЭ, шаг и площадь ФЧЭ, форма, размеры и расстояние холодной диафрагмы от МФЧЭ, коэффициенты пропускания входного окна и холодного светофильтра, коэффициент пропускания холодной диафрагмы, спектральные границы пропускания светофильтра, величина накопительной емкости в ячейке БИС, шум БИС, степень черноты входного окна, холодного светофильтра и светоизолирующего экрана.

Эксплуатационными мы назовём параметры, которые могут изменяться как без нашего участия, так и с ним в процессе работы МФПУ. Это температуры сигнального и фонового излучения, входного окна, светофильтра и светоизолирующего экрана, степень черноты фонового излучения, полная и полезная облученности ФЧЭ, квантовая эффективность и темновой ток ФЧЭ, время накопления, напряжение перезарядки емкости накопления, и т. д.

В результате проведения моделирования мы сможем определить любые фотоэлектрические характеристики, в том числе следующие: сигналы, шумы и отношения сигнал/шум ФЧЭ, пороговую облученность, мощность и разность температур ФЧЭ, удельную обнаружительную способность ФЧЭ, динамический диапазон ФЧЭ, токовую, вольттовую и температурную чувствительность ФЧЭ с учетом их расположения в МФЧЭ относительно потока облучения. Мы сможем также подробно анализировать зависимости вышеуказанных характеристик от конструктивных и эксплуатационных параметров. Это позволит определить допустимые значения этих параметров, необходимые для достижения заданных характеристик МФПУ.

Оптические схемы МФПУ

Существует два типа МФПУ. Первый тип — смотрящие МФПУ, а второй тип — сканирующие МФПУ.

Смотрящие МФПУ — устройства, в которых изображение полностью и одновременно попадает на все ФЧЭ, а одному ФЧЭ соответствует один элемент изображения.

Сканирующие МФПУ — устройства, в которых на каждый ФЧЭ столбца (строки) поочередно попадают все элементы столбца (строки) изображения, а сигналы, генерированные одним элементом изображения, суммируются со всех ФЧЭ, по которым он прошел.

Каждое МФПУ работает с конкретной холодной диафрагмой, позволяющей по заданному принципу согласовать фоточувствительное поле МФЧЭ с заданной оптической системой.

Всего существует лишь четыре базовые оптические схемы МФПУ. Они позволяют согласовать оптическую систему, проецирующую изображение, с МФЧЭ по определенным принципам. Эти схемы показаны на рисунке 1. Они отличаются формами и размерами холодных диафрагм, согласующих фоточувствительное поле МФЧЭ размером $a \times b$ с выходным зрачком оптической системы радиуса R , отстоящим от МФЧЭ на расстояние L . Холодные диафрагмы расположены на расстоянии l от плоскости МФЧЭ. Первые три схемы известны, а четвертая является оригинальной [1].

На рисунке 1, *a* показана оптическая схема МФПУ типа 1.

Форма диафрагмы представляет собой внешнюю огибающую семейства окружностей, центры которых расположены на внешней границе прямоугольника, подобного МФЧЭ с коэффициентом подобия $(1 - l/L)$, а радиусы окружностей имеют с выходным зрачком объектива коэффициент подобия равный R/l . В указанной схеме любой ФЧЭ матрицы видит весь выходной зрачок объектива сквозь указанную диафрагму. Следовательно, ФЧЭ получают максимально возможный сигнальный поток излучения из объектива. Помимо сигнального потока на каждый ФЧЭ падает также и фоновый поток, который можно разделить на две части. Первая — исходящий из объектива поток излучения, вместе с которым проходит и сигнальное излучение. Вторая — исходящий из областей, расположенных вне объектива полностью паразитный фоновый поток. В рассмотренной оптической схеме он является максимально возможным. Такая оптическая схема может быть использована лишь в диапазоне, где уровень фонового излучения мал. Это длины волн короче двух микрон.

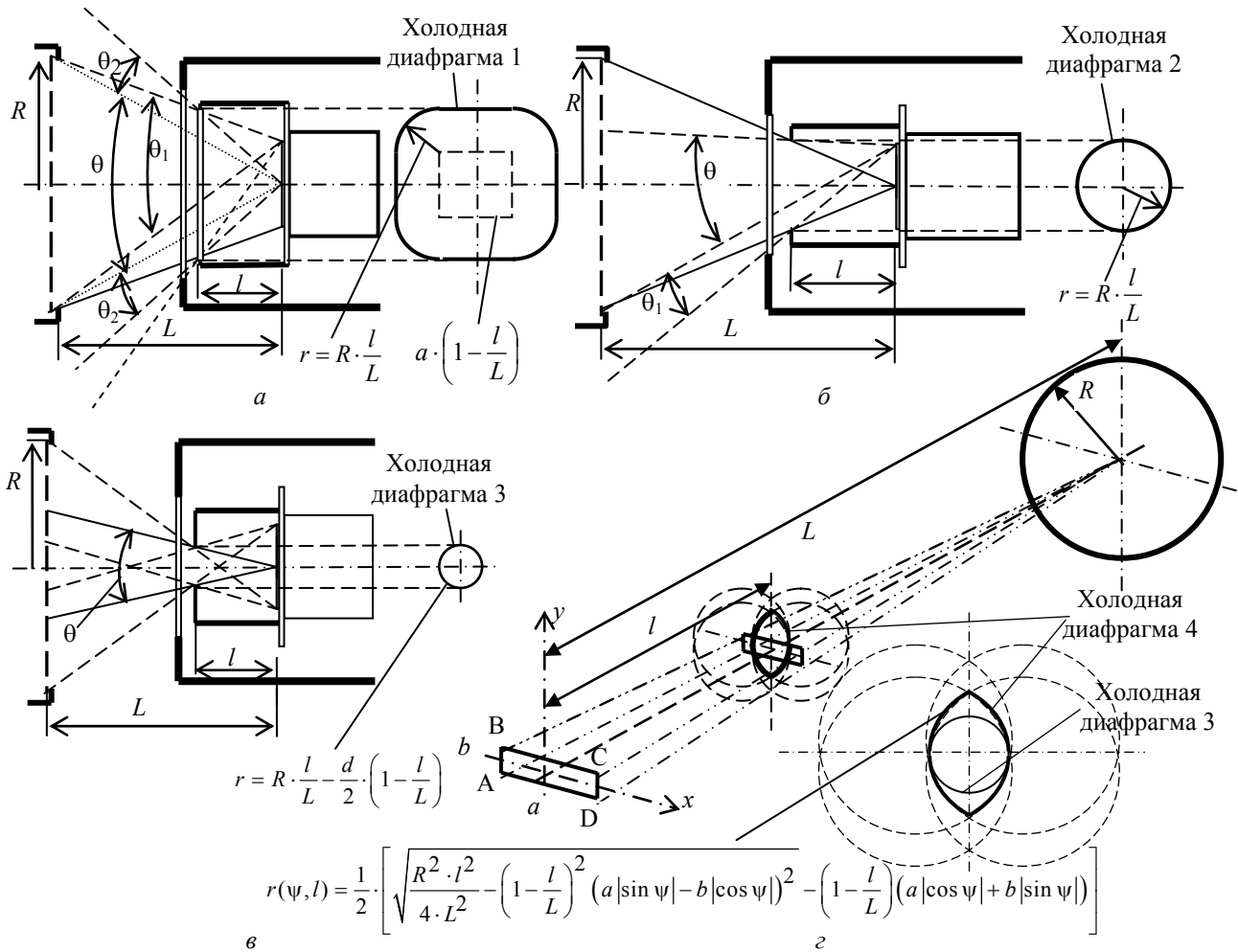


Рис. 1. Оптические схемы МФПУ: а — оптическая схема типа 1, б — оптическая схема типа 2, в — оптическая схема типа 3, г — оптическая схема типа 4.

На рисунке 1, б показана оптическая схема МФПУ типа 2.

Форма диафрагмы представляет собой окружность радиуса R/l , являющуюся сечением конуса, вершина которого лежит в центре МФЧЭ, а основание совпадает с выходным зрачком объектива. В таком МФПУ лишь несколько центральных ФЧЭ принимают полный поток сигнального и фонового излучения, исходящий из объектива. По мере удаления от центра МФЧЭ соответствующие ФЧЭ «видят» монотонно уменьшающуюся часть выходного зрачка объектива и монотонно увеличивающуюся часть пространства, расположенного вне объектива, из которого исходит не сигнальное, а лишь паразитное фоновое излучение [3]. Такая оптическая схема имеет постепенно ухудшающуюся фоновую обстановку для МФЧЭ, но позволяет использовать МФПУ на длинах волн вплоть до пяти микрон.

На рисунке 1, в показана оптическая схема МФПУ типа 3.

Форма диафрагмы представляет собой окружность, вписанную в общую часть семейства

окружностей, центры которых расположены на внешней границе прямоугольника, подобного МФЧЭ с коэффициентом подобия $(1 - l/L)$, а радиусы окружностей имеют с выходным зрачком объектива коэффициент подобия равный R/l . Сквозь такую диафрагму любой ФЧЭ видит часть выходного зрачка объектива, но совсем не получает паразитную фоновую облученность из областей, находящихся вне оптического тракта. Такую оптическую схему можно использовать уже на всех длинах волн.

На рисунке 1, г показана оптическая схема МФПУ типа 4.

Форма диафрагмы представляет собой внутреннюю касательную к семейству окружностей, центры которых расположены на внешней границе прямоугольника, подобного МФЧЭ с коэффициентом подобия $(1 - l/L)$, а радиусы окружностей имеют с выходным зрачком объектива коэффициент подобия равный R/l . Сквозь такую диафрагму любой ФЧЭ видит наибольшую часть выходного зрачка объектива, но совсем не получает паразитную фоновую облученность из областей,

находящихся вне оптического тракта. Такая оптическая схема позволяет получить максимально возможный уровень отношения сигнал/шум любого ФЧЭ в сравнении с вышерассмотренными оптическими схемами МФПУ.

Метод моделирования облучённости МФЧЭ

Вначале рассмотрим метод моделирования фоновой облучённости МФЧЭ с холодной диафрагмой произвольной формы [2], в том числе и неодносвязной, а затем запишем соотношения,

которые позволят нам рассчитывать полную облучённость любого ФЧЭ с учетом всех её компонентов и его расположения в МФЧЭ. Геометрия задачи показана на рисунке 2.

Плоскость МФЧЭ $S(x, y)$ расположена внутри светонепроницаемого экрана с диафрагмой произвольной формы, расположенной в параллельной плоскости $S''(\xi, \eta)$, и отстоит от нее на расстоянии l . Бесконечная излучающая поверхность $S'(x', y')$ расположена снаружи экрана, имеет ламбертовское распределение излучения и распределение температуры $T(x', y')$.

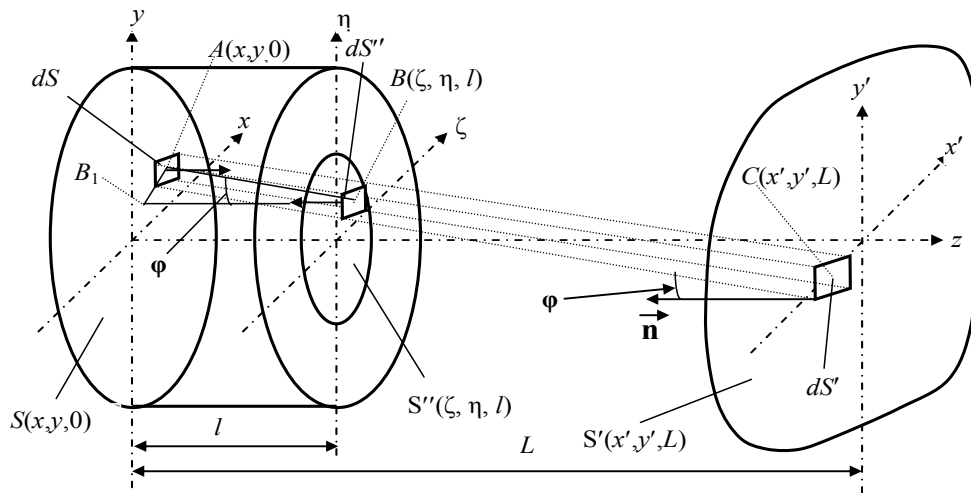


Рис. 2. Оптическая схема метода расчёта фоновой облучённости.

Спроектируем бесконечно малый элемент dS' плоскости $S'(x', y')$ с температурой $T(x', y')$ на бесконечно малый элемент dS плоскости $S(x, y)$. Элемент dS' можно считать плоским, а ориентация его плоскости задаётся нормалью \vec{n} . Проектирование проведем вдоль линии, проходящей сквозь диафрагму и соединяющей точку $A(x, y)$, в которой необходимо рассчитать облучённость, и точку $C(x', y')$ излучающей поверхности S' . Мощность излучения в спектральном интервале $d\lambda$, попадающая на элемент плоскости dS от элемента dS' с температурой T_0 , определяется следующим соотношением:

$$dW' = \frac{1}{\pi} M_{2\pi}(\lambda, T_0) \frac{\cos^2 \varphi}{AC^2} dS' dS \quad (1)$$

где AC — длина прямой, соединяющей точку $C(x', y')$ на поверхности S' и точку $A(x, y)$ в плоскости S , см;

φ — угол между нормалью к элементу dS' в точке C и прямой AC ;

$M_{2\pi}(\lambda, T)$ — спектральная энергетическая или фотонная светимость плоскости S' [2], Вт·см⁻²·мкм⁻¹ или фотон·см⁻²·с⁻¹·мкм⁻¹.

Мощность излучения или число квантов в спектральном интервале $d\lambda$, попадающие на площадку dS искомой плоскости от элемента плоского излучателя dS'' , расположенного в плоскости диафрагмы и являющегося промежуточной проекцией элемента плоского излучателя dS' , с той же температурой T_0 , определяется соотношением:

$$dW'' = \frac{1}{\pi} M_{2\pi}(\lambda, T_0) \frac{\cos^2 \varphi}{AB^2} dS'' dS \quad (2)$$

где AB — длина прямой, соединяющей точку $B(\xi, \eta)$ в плоскости S'' и точку $A(x, y)$ в плоскости S , см.

При указанной на рисунке 2 оптической схеме

$$dS'' = dS' \frac{l^2}{L^2} = dS' \frac{AB^2}{AC^2}. \quad (3)$$

Подставляя выражение для dS'' в (2), получим:

$$dW'' = \frac{1}{\pi} M_{2\pi}(T; \lambda) \frac{\cos^2 \varphi}{AB^2} dS \frac{AB^2}{AC^2} dS' = dW'. \quad (4)$$

Выражение (4) показывает, что световой поток, падающий на бесконечно малый элемент dS от элемента dS' бесконечной излучающей поверх-

ности S' , равен потоку от бесконечно малого элемента dS'' , расположенного в плоскости диафрагмы и являющегося проекцией излучателя dS в направлении элемента dS .

Суммируем излучатели dS'' по площади диафрагмы. Получим интегральную облучённость в точке А в спектральном интервале $d\lambda$ от плоского излучателя, расположенного в плоскости S'' (холодная диафрагма). Следовательно, облучённость бесконечно малого элемента dS плоскости S от бесконечной излучающей поверхности S' будет равна облучённости от плоского излучателя $S''(\xi, \eta)$, расположенного в плоскости диафрагмы. Этот излучатель будет являться проекцией излучающей поверхности S' вдоль линий, соединяющих её элементы с указанным элементом dS плоскости S , а распределение температуры по плоскости S'' будет соответствовать проекции распределения температуры по поверхности S' .

$$L(x, y; l; T; \lambda) = \frac{1}{dS} \iint_{S''} dW'' = \frac{1}{\pi} M_{2\pi}(T; \lambda) \iint_{S''} \frac{\cos^2 \varphi(x, y; l; \xi, \eta)}{AB^2} dS'' \quad (5)$$

Для нахождения $\cos \varphi$ рассмотрим прямоугольный треугольник ABB_1 на рис. 2.

$$AB^2 = l^2 + (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2. \quad (6)$$

Теперь рассмотрим угол φ и рассчитаем значение $\cos^2 \varphi$:

$$\cos^2 \varphi = \frac{BB_1^2}{AB^2} = \frac{l^2}{l^2 + (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2}. \quad (7)$$

Подставим (6) и (7) в (5) и получим спектральную плотность фоновой облучённости любого ФЧЭ матрицы, расположенной в светонепроницаемом экране, от излучения с температурой T :

$$L(x, y; l) = \frac{l^2}{\pi} M_{2\pi}(T; \lambda) \iint_{S''} \frac{dS''}{[l^2 + (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2]^2}, \quad (8)$$

где ξ, η — координаты в плоскости диафрагмы;

x, y — координаты точки a в плоскости приемника;

l — расстояние от плоскости диафрагмы до плоскости приемника;

$M_{2\pi}$ — спектральная плотность мощности или спектральная плотность потока фотонов в полусфере, выражаемые законом Планка.

Выражение для облучённости, полученное интегрированием $M_{2\pi}$ в спектральном диапазоне $[\lambda_1, \lambda_2]$, будет иметь следующий вид:

$$L(x, y; l) = K_{np}(x, y; l) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{2\pi}(T; \lambda) \cdot d\lambda \quad (9)$$

где $K_{np}(x, y, l)$ — коэффициент пропускания фонового излучения холодной диафрагмой;

λ_1, λ_2 — коротковолновая и длинноволновая граница пропускания светофильтра.

Интеграл в выражении (9) описывает планковскую облучённость единичной площадки в телесном угле равно полушере и имеет размерность либо $\text{Вт} \cdot \text{см}^{-2}$:

$$P(T; \lambda_1; \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{ch}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]} d\lambda, \quad (10)$$

либо $\text{фотон} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$:

$$N(T; \lambda_1; \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi c}{\lambda^4 \left[\exp\left(\frac{ch}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]} d\lambda, \quad (11)$$

где $c = 2,998 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ — скорость света;

$k_B = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ Вт} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{-1}$ — постоянная Больцмана;

$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Вт} \cdot \text{с}^2$ — постоянная Планка.

Тогда коэффициент пропускания диафрагмы $K_{np}(x, y; l)$, выраженный безразмерной величиной, в прямоугольных и полярных координатах будет иметь следующий вид:

$$K_{np}(x, y; l) = \iint_{S''} \frac{l^2 d\xi d\eta}{\pi [l^2 + (\xi - x)^2 + (\eta - y)^2]^2} \quad (12)$$

$$K_{np}(x, y; l) = \iint_{S''} \frac{l^2 r dr d\varphi}{\pi [l^2 + (r \cos \varphi - x)^2 + (r \sin \varphi - y)^2]^2}. \quad (13)$$

Параметр S'' — площадь холодной диафрагмы, по которой ведётся интегрирование. Она может иметь любую форму, связность и расположение.

Использование $K_{np}(x, y, l)$ позволяет рассчитать зависимость облучённости по площади МФЧЭ, зависимость облучённости любого ФЧЭ от расстояния между МФЧЭ и диафрагмой, однородность облучённости по площади МФЧЭ и величину внешней паразитной облучённости, исходящей из пространства вне объектива. Примеры расчёта фоновой облучённости для разных типов диафрагм приведены в работе [3].

При моделировании облучённости МФПУ необходимо учитывать следующие виды излучения [4].

1 Фоновое излучение с температурой T_ϕ от -60°C до $+60^\circ \text{C}$ и степенью черноты ϵ_ϕ в диапазоне $0,9—0,96$ [5].

2 Излучение входного окна МФПУ с диэлектрическим антиотражающим покрытием, температура которого T_1 , степень черноты ε_1 в диапазоне 0,02—0,04 и коэффициент пропускания K_1 в диапазоне 0,98—0,96 [5].

3 Излучение холодного светофильтра МФПУ на основе многослойного диэлектрического покрытия, температура которого T_2 , степень черноты ε_2 в рабочем диапазоне 0,05—0,07 и коэффициент пропускания K_2 в рабочем диапазоне 0,95—0,92 [5].

4 Излучение внутренней поверхности светоизолирующего экрана с температурой T_3 и степенью черноты ε_3 в диапазоне 0,92—0,95 [5].

Паразитным излучением, отраженным от стенок светоизолирующего экрана и попадающим на МФЧЭ, мы пренебрегаем, т. к. существует достаточно много конструктивных решений и способов изготовления таких экранов, в которых оно практически отсутствует. Тогда, используя формулы (12) или (13), получим аналитические выражения для указанных облученностей.

Фоновая или сигнальная облученность МФЧЭ:

$$L_{\text{сигн}}(x; y; l) = K_1 K_2 K_{\text{пр}}(x; y; l) \varepsilon_{\text{сигн}} N(T_{\text{сигн}}; \lambda_1; \lambda_2). \quad (14)$$

Облученность МФЧЭ от входного окна с антиотражающим покрытием:

$$L_1(x; y; l) = K_2 K_{\text{пр}}(x; y; l) \varepsilon_1 N(T_1; \lambda_1; \lambda_2). \quad (15)$$

Облученность МФЧЭ от холодного светофильтра:

$$L_2(x; y; l) = K_{\text{пр}}(x; y; l) \varepsilon_2 N(T_2; \lambda_k; \lambda_d). \quad (16)$$

Облученность МФЧЭ от светоизолирующего экрана:

$$L_3(x; y; l) = (1 - K_{\text{пр}}(x; y; l)) \varepsilon_3 N(T_3; \lambda_k; \lambda_d). \quad (17)$$

В выражении (17) стоят пределы интегрирования λ_k и λ_d (коротковолновая и длинноволновая граница чувствительности ФЧЭ). Учитывая низкую температуру экрана, можно быть уверенным, что эта облученность всё равно будет существенно ниже облученностей (14) и (15).

Интегральная квантовая облученность ФЧЭ равна сумме (14), (15), (16) и (17).

$$L_0(x; y; l) = \sum_k^n L_k(x; y; l). \quad (18)$$

Наша математическая модель позволяет анализировать характеристики ИК МФПУ при любом распределении температуры в пространстве вне холодной диафрагмы. Следует отметить, что при практическом измерении параметров, как и при

теоретическом анализе, очень удобно использовать плоский АЧТ, перекрывающий весь угол обзора МФЧЭ [6].

Сигнал ФЧЭ

Сигнал ФЧЭ или ИК МФПУ может выражаться в вольтах, или в единицах АЦП, или в количестве накопленных электронов, или в величине накопленного заряда. Мы будем вычислять сигнал и шум в количестве электронов.

В данной модели ИК МФПУ можно использовать экспериментальное значение квантовой эффективности ФЧЭ. Для этого следует провести измерение спектра чувствительности тестового ФЧЭ и последующий пересчет его в спектр квантовой эффективности. Затем необходимо рассчитать сигнал ФЧЭ как свертку спектрального значения квантовой эффективности со спектром излучения сигнала в диапазоне чувствительности МФПУ, определяемом холодным светофильтром. Можно также использовать среднее значение квантовой эффективности ФЧЭ в спектральном диапазоне чувствительности [7]:

$$\eta(T) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi c \eta(\lambda)}{\lambda^4 \left[\exp\left(\frac{ch}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi c}{\lambda^4 \left[\exp\left(\frac{ch}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]} d\lambda}. \quad (19)$$

Отличие сигнала, рассчитанного с использованием средней величины $\eta(T)$, от сигнала, рассчитанного с помощью свертки, ничтожно. По этой причине мы будем использовать сигналы, рассчитанные с использованием формулы (19).

Полезный сигнал смотрящего МФПУ ($M = 1$) или канала сканирующего МФПУ ($M \geq 2$) в электронах, где M — число ФЧЭ в канале, при облучении протяженным АЧТ, перекрывающим апертуру, будет определяться выражением:

$$S_{\text{полезн}}(x; y) = A_s \tau_0 K_1 K_2 \times \left[\sum_{i=1}^M K_{\text{пр}_i}(x; y; l) \eta_i(T_S) \right] \varepsilon_{\text{сигн}} N(T_{\text{сигн}}; \lambda_1; \lambda_2) \quad (20)$$

где $\varepsilon_{\text{сигн}}$ — степень черноты источника сигнального излучения (АЧТ);

$T_{\text{сигн}}$ — температура сигнального излучения (АЧТ).

Полный сигнал ФЧЭ смотрящего ($M = 1$) или канала сканирующего МФПУ ($M \geq 2$) в электронах будет определяться темновым током ФЧЭ и рассмотренными ранее излучениями (14), (15), (16), (17)

$$S_{\text{полн}}(x; y) = A_s \tau_0 \sum_{j=1}^M \left\{ \left[\sum_{k=1}^n \eta_{jk}(T_k) L_k(x; y; l) \right] + \frac{I_{d-j}}{q} \right\}. \quad (21)$$

При этом время накопления τ_0 должно удовлетворять следующему неравенству

$$\tau_0 \leq \frac{k_{\text{раз}} C_n E_0}{q S(x; y; l)}, \quad (22)$$

где k — степень разряда емкости за время накопления ($k = 0, 2 \dots 0, 8$);

C_n — время накопления, с;

E_0 — напряжение перезарядки емкости накопления, В.

Шум МФПУ

Источниками шума МФПУ являются все излучения, падающие на ФЧЭ, темновой ток ФЧЭ и

шумы мультиплексора. Суммарный шум определяет пороговые характеристики МФПУ [8].

Общее выражение для количества шумовых электронов, накопленных на емкости C_n в ячейке мультиплексора за время τ_0 от любого излучения в заданном спектральном диапазоне, имеет следующий вид [9, 10]:

$$N_{\text{ш}_k}(x; y; l) = \sqrt{L_k(x; y; l) \eta(T_k) A_s \tau_0}. \quad (23)$$

Количество шумовых электронов, накопленных на емкости C_n за время τ_0 от темнового тока ФЧЭ I_d , определяется выражением:

$$N_{\text{ш}_d}(x, y) = \sqrt{\frac{I_d(x, y)}{q}} \tau_0. \quad (24)$$

Тогда суммарный шум ФЧЭ смотрящего МФПУ с аналоговым мультиплексором с учетом шума ячейки накопления $N_{\text{ш}_\text{инт}}(x; y)$ и шума выходного каскада мультиплексора $N_{\text{ш}_M}$ будет определяться по формуле:

$$N_{\text{ш}_\text{см}_A}(x; y) = \sqrt{\sum_{k=1}^n [N_{\text{ш}_k}]^2 + [N_{\text{ш}_d}]^2 + [N_{\text{ш}_\text{инт}}]^2 + [N_{\text{ш}_M}]^2}. \quad (25)$$

Суммарный шум ФЧЭ смотрящего МФПУ с цифровым накоплением регистрируемого сигнала,

с учетом шума аналого-цифрового преобразования $N_{\text{ш}_\text{АЦП}}(x; y)$, будет определяться выражением

$$N_{\text{ш}_\text{смотр}_\text{АЦП}}(x; y) = \sqrt{\sum_{k=1}^n [N_{\text{ш}_k}]^2 + [N_{\text{ш}_d}]^2 + [N_{\text{ш}_\text{АЦП}}]^2}. \quad (26)$$

Суммарный шум канала сканирующего МФПУ с аналоговым мультиплексором и сумми-

рованием сигналов в мультиплексоре вычисляется следующим образом:

$$N_{\text{ш}_\text{скан}_A}(x; y) = \sqrt{\sum_{i=1}^M \left\{ [N_{\text{ш}_\text{смотр}_A_i}]^2 - [N_{\text{ш}_M}]^2 \right\} + [N_{\text{ш}_\text{сум}}]^2 + [N_{\text{ш}_M}]^2}, \quad (27)$$

где $N_{\text{ш}_\text{сум}}$ — шум узла суммирования сигналов ФЧЭ канала.

Суммарный нормированный шум канала сканирующего МФПУ с цифровым накоплением регистрируемого сигнала в ячейке и последующим цифровым суммированием сигналов ФЧЭ канала определяется формулой:

$$N_{\text{ш}_\text{скан}_\text{АЦП}}(x; y) = \sqrt{\sum_{i=1}^M [N_{\text{ш}_\text{смотр}_\text{АЦП}_i}]^2}. \quad (28)$$

Видно, что применение мультиплексора с цифровым накоплением в ячейке и последующим суммированием цифровых сигналов позволяет получить минимальную величину шума МФПУ.

Фотоэлектрические характеристики МФПУ

Отношение сигнал/шум (SNR) — отношение полезного сигнала (АЧТ) (20) к полному шуму (25), (26), (27), (28) [8]. Чем больше эта безразмерная величина — тем лучше фотоприемник.

Пороговая облученность (NEI) — величина сигнальной облученности, при которой отношение сигнал/шум равно единице. Чем меньше эта величина — тем лучше фотоприемник. Размерность пороговой облученности — фотонов·см⁻²·с⁻¹.

NEI ячейки смотрящего МФПУ ($M = 1$) или канала сканирующего МФПУ ($M \geq 2$) с M ФЧЭ в канале определяется следующим выражением:

$$NEI(x; y) = \frac{N_{ш}(x; y)}{A_S \tau_0 \left(\prod_{i=1}^2 K_i \right) \varepsilon_{сигн} \sum_{j=1}^M [K_{пр_j}(x; y; l) \eta_{сигн_j}(T_{сигн})]} \quad (29)$$

Величина $N_{ш}$ — шум ФЧЭ смотрящего или канала сканирующего МФПУ.

Пороговая мощность (NEP) — мощность сигнального излучения, падающего на ФЧЭ, при которой отношение сигнал/шум равно единице [8]. Чем меньше NEP — тем лучше приемник. Размерность пороговой мощности — $Вт \cdot элемент^{-1}$.

Выражение для NEP ячейки смотрящего МФПУ ($M = 1$) или канала сканирующего МФПУ ($M \geq 2$) будет иметь следующий вид:

$$NEP(x; y; l) = \frac{P(T_{сигн}; \lambda_1; \lambda_2)}{N(T_{сигн}; \lambda_1; \lambda_2)} \times \frac{N_{ш}(x; y)}{M \cdot \tau_0} \times \frac{\sum_{i=1}^M K_{пр_i}(x; y; l)}{\sum_{i=1}^M [K_{пр_i}(x; y; l) \eta_i(T_{сигн})]} \quad (30)$$

Здесь выражения для $P(T_{сигн}; \lambda_1; \lambda_2)$ и $N(T_{сигн}; \lambda_1; \lambda_2)$ определяются выражениями (10) и (11) при температуре равной эффективной температуре сигнального излучения.

Удельная обнаружительная способность (D^*) — параметр, обратный пороговой мощности, нормированный на единичную площадку и на единичную рабочую частоту [8]. Удельная обнаружительная способность имеет размерность $см \cdot Вт^{-1} \cdot с^{-1/2}$.

D^* ячейки смотрящего МФПУ ($M = 1$) или канала сканирующего МФПУ ($M \geq 2$) определяется следующим выражением:

$$D^*(x; y) = \frac{N(T_{сигн}; \lambda_1; \lambda_2)}{P(T_{сигн}; \lambda_1; \lambda_2)} \times \frac{\sum_{i=1}^M [K_{пр_i}(x; y; l) \eta_i(T_{сигн})]}{N_{ш}(x; y) \sum_{i=1}^M K_{пр_i}(x; y; l)} \times \sqrt{\frac{MA_S \tau_0}{2}} \quad (31)$$

$$DR(x; y) = 20 \cdot \lg \left(\frac{M \cdot C_0 \cdot E_0 - q \cdot [S_{полн}(x; y) - S_{полезн}(x; y)]}{q \cdot N_{ш}(x; y)} \right) \quad (35)$$

Размерность динамического диапазона — дБ.

Токовая чувствительность (Current Respon-sivity) — величина сигнального фототока, отнесенная к световой мощности сигнала в полосе чувствительности ФЧЭ [8]. Размерность токовой чувствительности — $А \cdot Вт^{-1}$.

Пороговая разность температур ($NETD$) — наименьшая разность температур протяженного теплового объекта и фона, при которой отношение сигнал/шум равно единице [8]. Иначе говоря, прирост облученности ФЧЭ, обусловленный приращением температуры полезного сигнала (АЧТ), равен пороговой облученности и записывается следующим выражением:

$$[N(T + \delta T, \lambda_1, \lambda_2) - N(T, \lambda_1, \lambda_2)] = NEI \quad (32)$$

Преобразуя соотношение (32), получим выражение для пороговой разности температур ФЧЭ смотрящего МФПУ ($M = 1$) или канала сканирующего МФПУ ($M \geq 2$):

$$NETD(x; y) = \left(\frac{k_B T_{сигн}^2}{ch} \right) \times [SNR(x; y)]^{-1} \times \frac{N(T_{сигн}, \lambda_1, \lambda_2)}{Z(T_{сигн}, \lambda_1, \lambda_2)} \quad (33)$$

Функция $Z(T; \lambda_1; \lambda_2)$ в выражении (33) возникает при разложении формулы Планка в ряд по малому параметру δT и имеет вид:

$$Z(T, \lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2\pi c}{\lambda^5} \frac{\exp\left(\frac{ch}{k_B T \lambda}\right)}{\left[\exp\left(\frac{ch}{k_B T \lambda}\right) - 1\right]^2} d\lambda \quad (34)$$

Размерность пороговой разности температур — градус Кельвина.

Динамический диапазон (DR) — отношение максимальной величины регистрируемого полезного сигнала к его минимальной величине. Величина динамического диапазона ФЧЭ смотрящего МФПУ ($M = 1$) или канала МФПУ ($M \geq 2$) будет определяться выражением:

Токовые чувствительности ФЧЭ в смотрящем МФПУ ($M = 1$) или канала в сканирующем МФПУ ($M \geq 2$) имеют классический вид, не зависящий от величины времени накопления:

$$S_I(x; y) = q \times \frac{\sum_{i=1}^M [K_{пр_i}(x; y; l) \eta_i(T_{сигн})]}{\sum_{i=1}^M K_{пр_i}(x; y; l)} \times \frac{N(T_{сигн}; \lambda_1; \lambda_2)}{P(T_{сигн}; \lambda_1; \lambda_2)} \quad (36)$$

Вольтовая чувствительность (Voltage Responsivity) — отношение вольтового сигнала ФЧЭ (канала) к падающей на ФЧЭ (канал) мощности сигнального излучения [8]. Размерность вольтовой чувствительности — Вольт·Ватт⁻¹.

Вольтовая чувствительность ФЧЭ смотрящего МФПУ ($M = 1$) или канала сканирующего МФПУ ($M \geq 2$) имеет следующий вид:

$$S_U(x; y) = \frac{q \tau_0 \sum_{i=1}^M [K_{пр_i}(x; y; l) \eta_i(T_{сигн})]}{MC_{инт} \sum_{i=1}^M K_{пр_i}(x; y; l)} \times \frac{N(T_{сигн}; \lambda_1; \lambda_2)}{P(T_{сигн}; \lambda_1; \lambda_2)} \quad (37)$$

Температурная чувствительность (Temperature Responsivity) — отношение приращения полезного вольтового сигнала ФЧЭ (канала) к приращению температуры полезного сигнального

излучения, падающего на ФЧЭ (канал), определяется формулой:

$$S_T(x; y) = \frac{ch}{k_B T^2} \times \frac{q \sum_{j=1}^M S_{полезн_j}}{MC_{инт}} \times \frac{Z(T_{сигн}; \lambda_1; \lambda_2)}{N(T_{сигн}; \lambda_1; \lambda_2)} \quad (38)$$

Размерность температурной чувствительности — Вольт·К⁻¹.

Экспериментальная проверка модели

Экспериментальная проверка проводилась с помощью трёх МФПУ, чувствительных в диапазонах 0,9—1,7 мкм (InGaAs), 3—5 мкм (InSb) и 7,8—10,6 мкм (CdHgTe) [11], [12].

Первая и вторая МФЧЭ имели формат 320×256, а третья — 6×576. Температура первой МФЧЭ стабилизировалась с помощью ТЭО, а второй и третьей — с помощью микрокриогенной системы. Время накопления задавалось аппаратным методом.

Проводились измерения сигналов, шумов, зависимости отношения сигнал/шум и фотоэлектрических характеристик от времени накопления или температуры сигнального АЧТ. Графики теоретических и экспериментальных зависимостей измеренных характеристик представлены на рисунках 3, 4, 5 и 6.

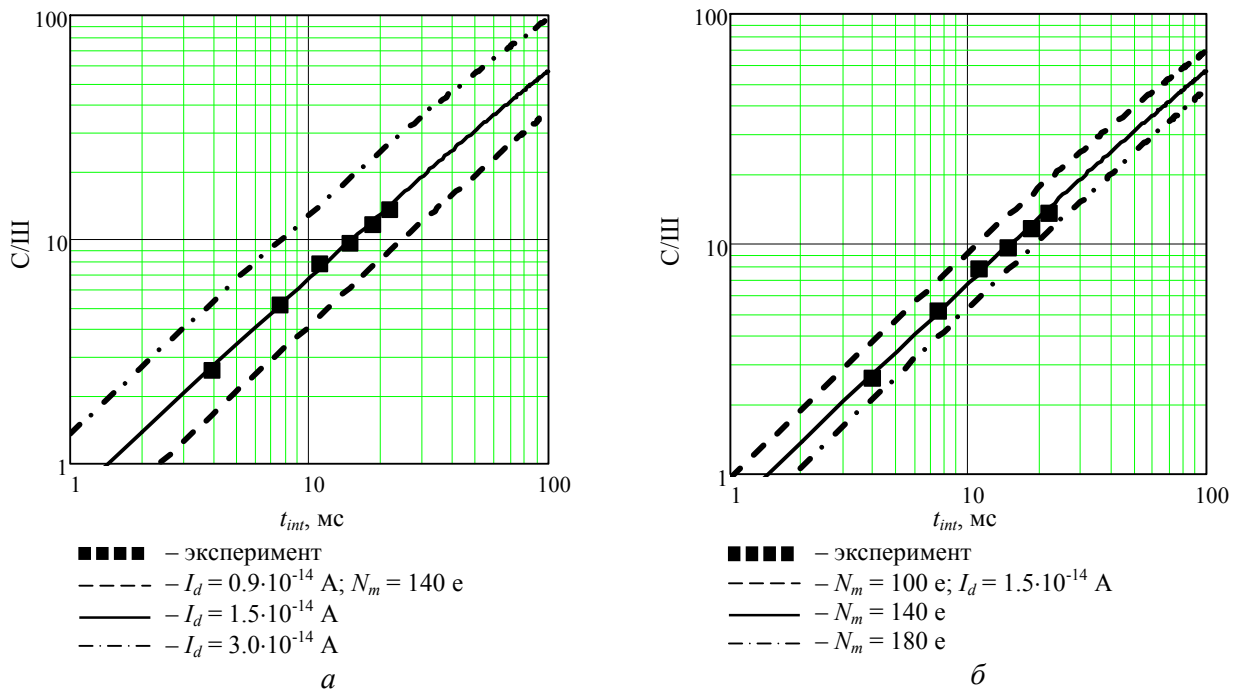


Рис. 3. Экспериментальная и теоретическая зависимость отношения темновой сигнал/шум ФЧЭ МФПУ № 1 (InGaAs) от времени интегрирования. Пунктирные и сплошные линии — расчет.

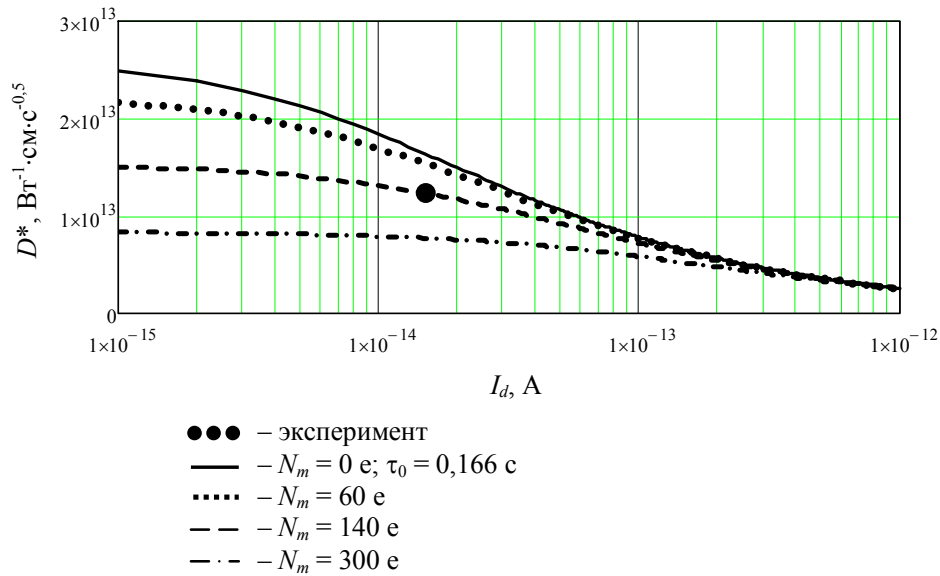


Рис. 4. Экспериментальная и теоретическая зависимость удельной обнаружительной способности ФЧЭ МФПУ № 1 (InGaAs) от темнового тока. Пунктирные и сплошные линии — расчет.

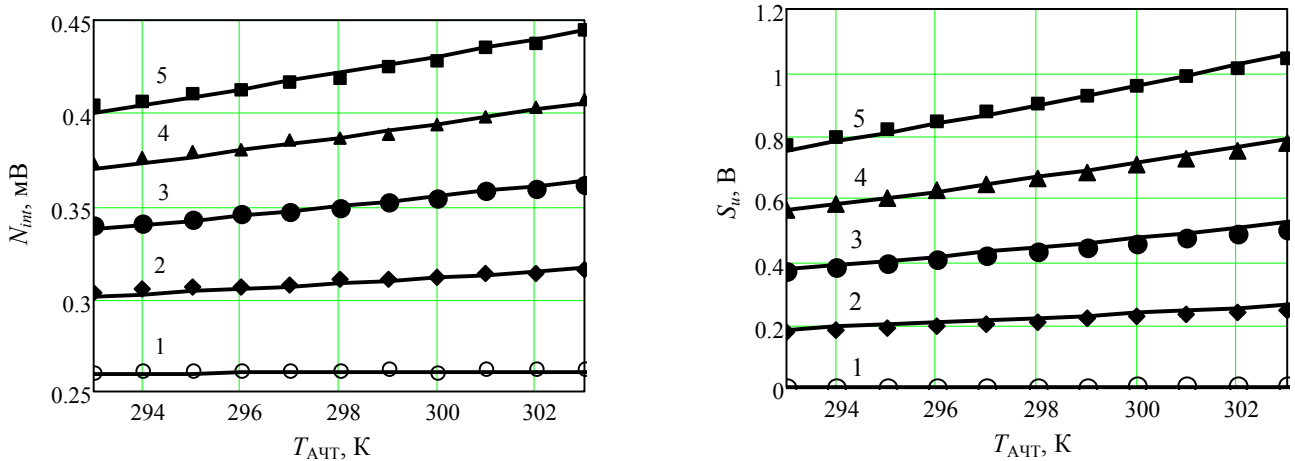


Рис. 5. Экспериментальная и теоретическая зависимость интегрального шума N_{int} и полезного сигнала S_u ФЧЭ МФПУ № 2 (InSb) формата 320x256 от температуры АЧТ при $I_d = 1,18 \cdot 10^{-11} \text{ А}$, $\eta = 0,48$, для заданных значений времени накопления. 1 — $\tau_0 = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ с}$; 2 — $\tau_0 = 1,98 \cdot 10^{-4} \text{ с}$; 3 — $\tau_0 = 3,93 \cdot 10^{-4} \text{ с}$; 4 — $\tau_0 = 5,88 \cdot 10^{-4} \text{ с}$; 5 — $\tau_0 = 7,88 \cdot 10^{-4} \text{ с}$. Сплошные линии — расчет.

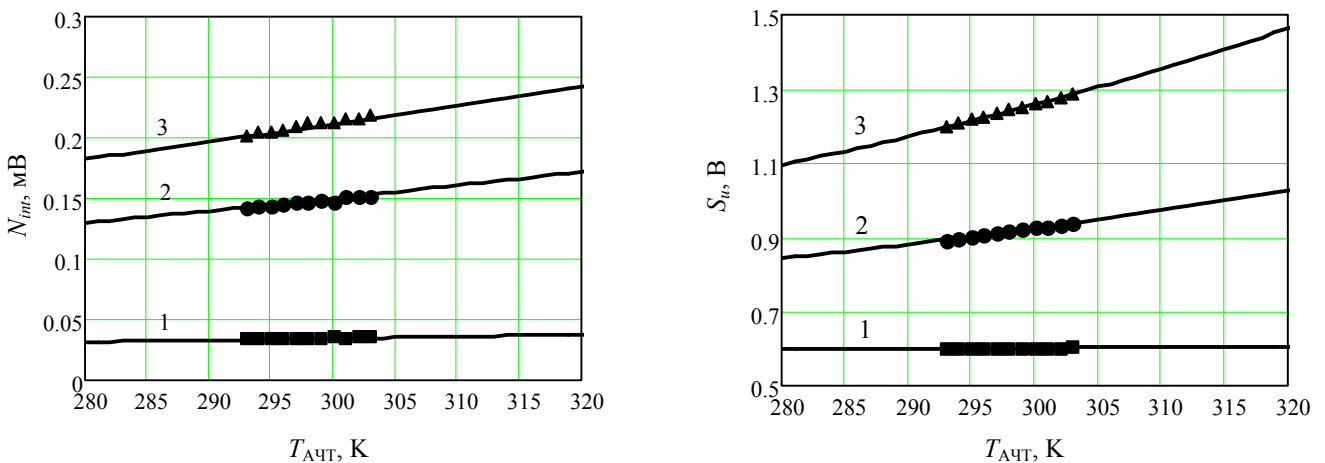


Рис. 6. Экспериментальная и теоретическая зависимость интегрального шума N_{int} и полезного сигнала S_u ФЧЭ МФПУ № 3 (CdHgTe) формата 6x576 от температуры АЧТ при $I_d = 3,9 \cdot 10^{-9} \text{ А}$, $\eta = 0,42$, для разных значений времени накопления. 1 — $\tau_0 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ с}$; 2 — $\tau_0 = 30 \cdot 10^{-6} \text{ с}$; 3 — $\tau_0 = 60 \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

Как видно из графиков, получены хорошие совпадения экспериментальных и теоретических данных для всех трех образцов.

Заключение

Представленная аналитическая модель позволяет достаточно хорошо предсказать фотоэлектрические характеристики разрабатываемых ИК МФПУ и любые их зависимости от конструктивных и эксплуатационных параметров, что позволит оптимизировать эти характеристики. Разработанная аналитическая модель успешно проверена экспериментально на ИК МФПУ, чувствительных в трёх основных спектральных рабочих диапазонах.

Благодарим всех сотрудников АО «НПО «Орион» за помощь в данной работе.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации по государственной поддержке ведущих научных школ НШ-2787.2014.9

ЛИТЕРАТУРА

1. Патрашин А. И. // Прикладная физика. 2011. № 4. С. 65.
2. Патрашин А. И. // Прикладная физика. 2010. № 3. С. 123.
3. Патрашин А. И. // Прикладная физика. 2011. № 3. С. 98.
4. Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Корнеева М. Д., Шабаров В. В. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 1. С. 50.
5. Smith F. G. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook. Vol. 2. — SPIE Optical Engineering Press, 1978.
6. Patrashin A. I., Ivanov G. A. Proc. SPIE. 1998. Vol. 3379. P. 555.
7. Патрашин А. И. // Прикладная физика. 2010. № 2. С. 103.
8. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фоторезисторы и фотоприемные устройства. — М.: Физматкнига, 2012.
9. Курбатов Л. Н. Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра. — М.: МФТИ, 1999.
10. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. — М.: Физматкнига, 2005.
11. Патрашин А. И., Балиев Д. Л., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Лазарев П. С., Полунеев В. В., Яковлева Н. И. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 4. С. 367.
12. Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Лопухин А. А., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 91.

IR FPA performance modeling and testing

A. M. Filachev¹, A. I. Patrashin¹, I. D. Burlakov^{1,2}, K. O. Boltar^{1,3}, and V. V. Shabarov¹

¹ Orion R&P Association, Inc.

9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia

² Moscow Technological University (MIREA)

78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia

³ Moscow Institute of Physics and Technology

9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

Received April 27, 2016

Infrared Focal Plane Array (IR FPA) performance modeling allows to predict signals, noise and photoelectric characteristics of any Photo Detecting Assembly (PDA), to analyze a dependence of these characteristics from design and operating parameters and to carry out their optimization. Advantage of this model is the accurate calculation of characteristics for the IR FPA with an arbitrary aperture of the cold shield. This capability is based on a new concept of the FPA irradiation. It is proved that a background irradiation at array arbitrary point of IR FPA is product of an aperture transmittance and array irradiance of the extended source located outside of the aperture in a hemisphere. The cold shield aperture transmittance is a new parameter. It is determined by integral of aperture area. The integral includes coordinates of an array arbitrary point, cold shield aperture shape, distance between the array plane and the cold shield aperture plane. An outside array irradiance in hemisphere is defined by Planks' formula. In other words, the FPA irradiation is the irradiation from a source which is filling the cold shield aperture. A source temperature distribution over the aperture is defined by projection of outside source temperature points to preset array point through aperture. Experimental testing of model correctness was made by comparing the signal and noise characteristics of different IR FPA with known structural and operational parameters. They

were sensitive in the spectral ranges of 0.9—1.7 μm , 3—5 μm and 8—11 μm . An adequate confirmation of the model correctness was received.

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

Keywords: analytical model, IR FPA, cold shield aperture transmittance, FPA irradiation, signal, noise, parameters and characteristics.

REFERENCES

1. A. I. Patrashin, *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 65 (2011).
2. A. I. Patrashin, *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 123 (2010).
3. A. I. Patrashin, *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 98 (2011).
4. A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, M. D. Korneeva, and V. V. Shabarov, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **2** (1), 50 (2014).
5. F. G. Smith, *The Infrared&Electro-Optical Systems Handbook, Vol. 2* (SPIE Optical Engineering Press, 1978).
6. A. I. Patrashin and G. A. Ivanov, *Proc. SPIE* **3379**, 555 (1998).
7. A. I. Patrashin, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 103 (2010).
8. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid State Photoelectronics. Photoresistors and Photoreceiving Devices* (Fizmatkniga, Moscow, 2012) [in Russian].
9. L. N. Kurbatov, *Optoelectronics of Visible and Infrared Spectral Ranges* (MPTI, Moscow, 1999) [in Russian].
10. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid State Photoelectronics. Physical Principles* (Fizmatkniga, Moscow, 2005) [in Russian].
11. A. I. Patrashin, D. L. Baliev, K. O. Boltar, I. D. Burlakov, P. S. Lazarev, V. V. Poluneev, and N. I. Yakovleva, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **2** (4), 367 (2014).
12. A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, A. A. Lopuhin, and N. I. Yakovleva, *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 91 (2012).