

Сигнальные и шумовые характеристики элементов МФПУ формата 640×512 SWIR-диапазона

А. М. Моисеев, П. Е. Новиков

Проведены сравнительные измерения нескольких однотипных матричных фотоприемных устройств (МФПУ) SWIR-диапазона при различных режимах работы для определения характеристик и их разброса (сигнальные и шумовые характеристики, эквивалентная мощность шума, количество дефектных пикселей) и для выбора режима работы МФПУ в камере. Необходимые для этого данные в описаниях на МФПУ не приводятся. Выявлено хорошее совпадение средних характеристик всех МФПУ и значительный разброс пороговой эквивалентной мощности шума от количества дефектных пикселей для разных МФПУ. Рассмотрены преимущества и недостатки режимов: «низкого» и «высокого усиления», «с фильтром» и «без фильтра», при разной температуре МФПУ (изменяемой током термоэлектрического модуля Пельтье). Выявлено отсутствие зависимости шумовых характеристик от температуры МФПУ, измерены зависимости количества дефектных пикселей и темновых токов от температуры МФПУ. Предложено информативное, но лаконичное представление параметров МФПУ и камер при выборе МФПУ (или камер) для разрабатываемой системы при оценке качества конкретной МФПУ (или камеры) для комплектации изделий.

Ключевые слова: МФПУ, SWIR-диапазон, InGaAs, эквивалентная мощность шума, ЭМШ, дефектные пиксели, режимы высокого и низкого усиления.

Введение

В описаниях матричных фотоприемных устройств (МФПУ) всегда не хватает данных по характеристикам возможных режимов работы (по сигнальным и шумовым характеристикам, обнаружительным способностям, количеству дефектных пикселей). Поэтому нелегко сравнивать разные МФПУ между собой до их покупки и испытаний. При этом трудно объективно выбрать режим работы МФПУ, под который необходимо разрабатывать электронные платы и программное обеспечение. Не существует сравнительных каталогов МФПУ и камер, испытанных во всех режимах по однотипным методикам.

В идеале необходим предварительный этап сравнительных испытаний всех подходящих по описаниям МФПУ, но это невозможно по срокам проведения разработок и экономическим соображениям. На этапе испытаний изготовленной каме-

ры целесообразно было бы сравнить измеренные характеристики камер с характеристиками, полученными производителями этих МФПУ и другими разработчиками, но таких данных нет [1–13].

Целью данной работы является представление результатов измерений МФПУ SWIR-диапазона (спектрального диапазона 1–1,7 мкм) на основе гетероструктур InGaAs, формата 640×512, которые могут помочь разработчикам камер SWIR-диапазона в выборе подходящих МФПУ, а также производителям МФПУ – в совершенствовании параметров своих изделий.

Характеристики МФПУ

Диапазон 1–1,7 мкм применяется для наблюдения звезд, в т. ч. и днем, т. к. в этом диапазоне мало свечение атмосферы и рассеяние солнечного света при большом коэффициенте пропускания. В соответствии с требованиями к разрабатываемой камере необходимо обнаружение звезд 9-й звездной величины в ночных условиях. Данные о таких измерениях в литературе отсутствуют.

Заметим, что МФПУ SWIR-диапазона на основе гетероструктур InGaAs являются наиболее чувствительными в указанном диапазоне и доступны на рынке.

Моисеев Андрей Михайлович, нач. группы.
Новиков Павел Евгеньевич, зам. нач. отдела.
АО «НИК «СП».
Россия, 111250, Москва, ул. Авиамоторная, 53.
E-mail: 113@npk-spp.ru

Статья поступила в редакцию 20 августа 2018 г.

© Моисеев А. М., Новиков П. Е., 2018

Паспортные характеристики МФПУ:

– спектральный диапазон $\lambda = 1-1,7$ мкм (InGaAs);

– формат 640×512 пикселей;

– размер пикселя 25×25 мкм (Fill Factor > 99 %);

– режимы работы:

«низкое усиление» (=1): $N_{em} = 2\,500\,000$ е,

$\sigma = 45$ е (интегрирующая емкость 135 фФ);

«высокое усиление» (=27): $N_{em} = 93\,000$ е,

$\sigma = 360$ е (интегрирующая емкость 5 фФ);

– BW = 0 – «без фильтра»;

– BW = 1 – «с фильтром»,

где использованы обозначения:

N_{em} – глубина потенциальной ямы пикселя

мультиплексора, е (в электронах);

σ – шум мультиплексора, е (в электронах);

– ток термоэлектрического модуля (ТЭМ)

Пельтье: 0–0,8 А ($t^\circ = +30^\circ - 0^\circ$ °С);

– квантовая эффективность $\eta > 0,7$;

– обнаружительная способность D^* : не менее 5×10^{11} Jones (в режиме «высокого усиления», при выдержке 0,016 с, $\lambda = 1,55$ мкм);

– количество дефектных пикселей (для центральной области 636×508, по трем критериям для пяти МФПУ): 100–600 пикселей (0,03–0,2 %);

– один канал считывания (режимы 2 и 4 канала считывания не использовались).

Методика измерений

Измерения проводились на световом шаре. Источник излучения – галогеновая лампа со стабилизированным питанием. Контроль освещенности МФПУ осуществлялся фотоприемником, входящим в реестр Росстандарта. При заданной освещенности записывались фильмы, которые затем обрабатывались с помощью программного обеспечения для построения графиков.

Сигнальные характеристики

На представленных графиках (рис. 1) сигнальные характеристики пересчитаны из мощности освещения МФПУ и величины сигналов в «цифровых уровнях АЦП» непосредственно в фотоны и электроны на пиксель, т. к. эти характеристики теоретически должны быть одинаковы для всех выдержек и частично совпадать для режимов низкого и высокого усиления. Это позволяет сравнить разброс характеристик разных МФПУ при разных режимах.

По глубине потенциальной ямы и квантовой эффективности фотоприемника можно посчитать идеальную теоретическую сигнальную характеристику (рис. 1, графики 4, 5):

$$N_e = \eta N_f, \quad (1)$$

где использованы обозначения:

N_f – количество фотонов f , попавших в пиксель,

N_e – количество электронов e в сигнале пикселя,

η – квантовая эффективность, e/f .

На рис. 1 представлены зависимости сигнальных характеристик двух из пяти (лучшей и худшей по количеству дефектных пикселей) МФПУ (для режима «низкого усиления», выдержка 120 мс, ток Пельтье 0,4 А (при +3 °С)), границы максимальных и минимальных сигнальных характеристик (для порога эквивалентной мощности шума (ЭМШ), соответствующего 0,5 % дефектных пикселей).

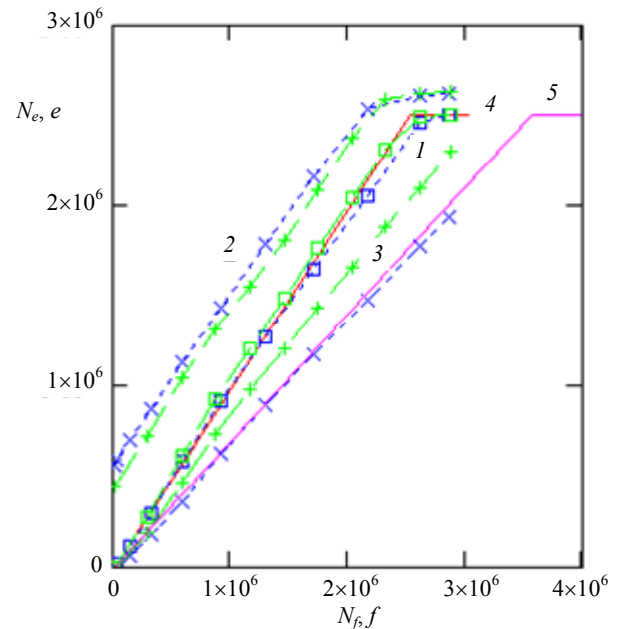


Рис. 1. Сигнальные характеристики двух МФПУ: линии 1 (□) – средние сигнальные характеристики; 2 (+, ×) – максимальные границы сигнальных характеристик; 3 (+, ×) – минимальные границы сигнальных характеристик; 4 – теоретическая сигнальная характеристика для $\eta = 1$; 5 – теоретическая сигнальная характеристика для $\eta = 0,7$.

Из рис. 1 видно, что совпадение измеренных и теоретических графиков происходит при средней квантовой эффективности, близкой к единице. Причиной этого могут быть неточности параметров (размер пикселя и Fill Factor, поток излучения на измерителе оптической мощности, энергия кванта), входящие в пересчет N_e и N_f . При погрешности в каждой из них до 10–15 % графики N_e (рис. 1, графики 1) могут совпасть с графиком 5 ($\eta = 0,7$). Для уточнения этого расхождения необходимо провести дополнительные измерения.

Представляется, что удобно вместе с измеренными характеристиками для сравнения исполь-

зывать какие-то известные ориентиры, чтобы проверять правильность измеренных характеристик и соответствие требуемым параметрам. В качестве такового можно принять СКО шума сигнала. Это одна из самых больших составляющих временных шумов, поэтому ее удобно использовать в качестве минимально возможного теоретического шума, а также для расчета минимального теоретического значения ЭМШ (англ. NEP) (см. рис. 2, график 4) [1]:

$$\sigma = \sqrt{N_e} \quad (2)$$

На рис. 2 построены графики ЭМШ (NEP) двух МФПУ для тех же условий, что и для рис. 1.

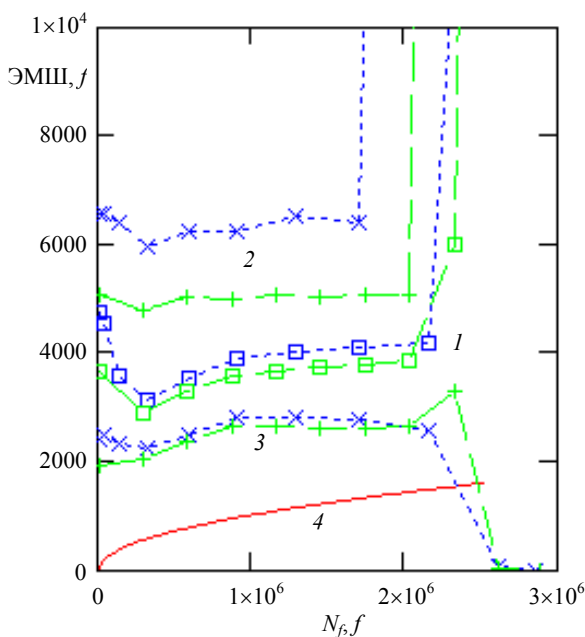


Рис. 2. Значения ЭМШ: 1 – средние ЭМШ; 2 – максимальные ЭМШ; 3 – минимальные ЭМШ; 4 – теоретическая ЭМШ.

Для сравнения с данными рис. 2 необходимо отметить, что звезды 9-й звездной величины через оптическую систему создают поток излучения на пикселе МФПУ 3×10^{-14} Вт, его можно пересчитать в число фотонов в секунду ($f \text{ c}^{-1}$) и в фотоны (f) на пиксель (для выдержки 0,12 с):

$$2 \times 10^5 f \text{ c}^{-1} \times 0,12 \text{ c} = 25\,400 f, \quad (3)$$

что в 6 раз больше чем ЭМШ = $4000 f$ (см. рис. 2, графики 1).

Изменение температуры МФПУ и выдержек при «низком усилении» не ухудшают совпадение средних характеристик по сравнению с рис. 1 и 2 (графики не приведены). Влияние изменения температуры при «высоком усилении» пока не измерилось.

На рис. 3 и 4 приведены те же графики, что на рис. 1 и 2, но для режима «высокого усиления» («с фильтром» и «без фильтра»).

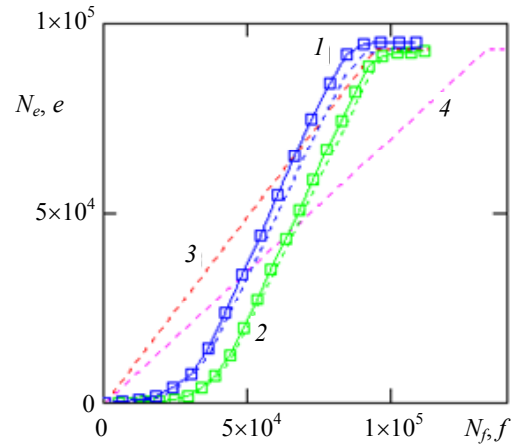


Рис. 3. Средние сигнальные характеристики для режима высокого усиления: 1 – выдержка 100 мс (□ – «с фильтром»); 2 – выдержка 10 мс (□ – «с фильтром»); 3 – теоретическая сигнальная характеристика для квантовой эффективности равной единице; 4 – теоретическая сигнальная характеристика для квантовой эффективности равной 0,7.

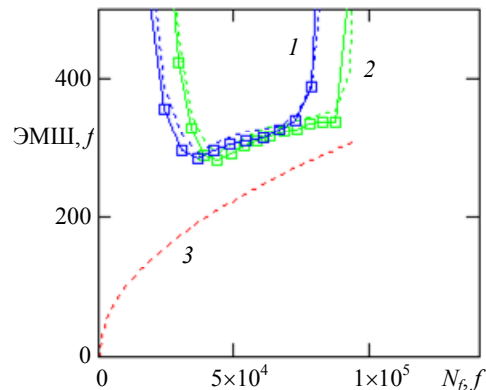


Рис. 4. Средние ЭМШ для режима высокого усиления: 1 – выдержка 100 мс (□ – «с фильтром»); 2 – выдержка 10 мс (□ – «с фильтром»); 3 – теоретическая ЭМШ.

Для сопоставления с рис. 4 обнаружительную способность из описания МФПУ можно пересчитать (по формуле (9) из работы [2] для выдержки 0,016 с):

$$2 \times 10^5 f \text{ c}^{-1} \times 0,016 \text{ c} = 3\,400 f, \quad (4)$$

что в 11 раз больше чем ЭМШ = $300 f$ (см. рис. 4).

Из рис. 3 и 4 следуют выводы:

– режим «высокого усиления» имеет нелинейную сигнальную характеристику (возможно, ее удастся исправить подбором опорных напряжений

МФПУ), из-за этого при низких освещенностях – высокая ЭМШ,

- в режиме «высокого усиления» средняя ЭМШ в 10 раз ниже, чем при «низком усилении»,
- в режиме «высокого усиления» диапазон рабочих освещенностей в 30 раз меньше, чем при «низком усилении».

Из совокупности рис. 1–4 можно сделать вывод, что графики средних характеристик всех пяти МФПУ расположены между средними характеристиками лучшей и худшей МФПУ, т. е. пять измеренных МФПУ мало отличаются по средним характеристикам, но значительно отличаются друг от друга по характеристикам дефектных пикселей (рис. 2, графики 2).

Данные рис. 5 позволяют оценить возможность работы с известными уровнями освещенности и выбрать необходимые выдержки и режимы работ для получения минимально возможных ЭМШ.

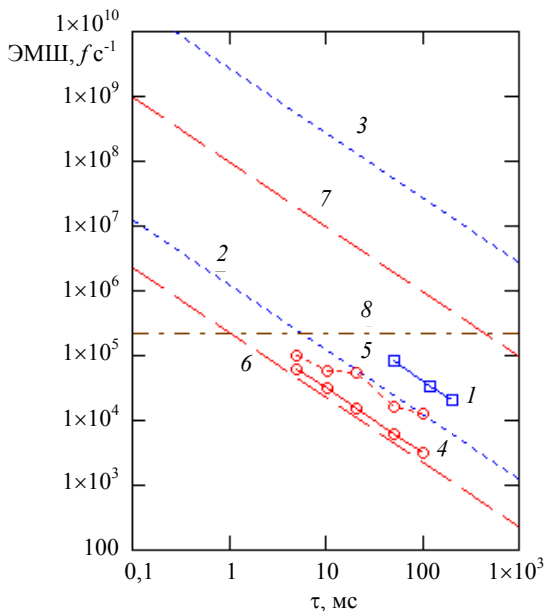


Рис. 5. Зависимость ЭМШ от выдержки. 1 – средние измеренные ЭМШ для режима «низкого усиления» (почти сливаются с максимальными измеренными ЭМШ при 0,5 % дефектных пикселей, для режима «низкого усиления»); 2 – ограничение ЭМШ «шумом сигнала» (2) для режима «низкого усиления»; 3 – насыщение для режима «низкого усиления»; 4 – средние измеренные ЭМШ для режима «высокого усиления»; 5 – максимальные измеренные ЭМШ при 0,5 % дефектных пикселей для режима «высокого усиления»; 6 – ограничение ЭМШ «шумом сигнала» (2) для режима «высокого усиления»; 7 – насыщение для режима «высокого усиления»; 8 – освещенность от звезд 9 звездной величины (3) совпала с ЭМШ пересчитанной из обнаружительной способности (4) (при выдержке 16 мс).

Количество дефектных пикселей

Как уже сказано, пять измеренных МФПУ почти не отличаются по средним характеристикам,

но значительно отличаются друг от друга по характеристикам дефектных пикселей.

Критериев дефектности пикселей может быть много. В паспортах на МФПУ приводятся такие критерии:

- уровень темнового тока;
- квантовая эффективность;
- нелинейность сигнальной характеристики.

Кроме этих критериев можно использовать следующие данные:

- отклонение сигнальной характеристики от средней (см. рис. 1);
- отклонение характеристики СКО временного шума от средней;
- отклонение характеристики ЭМШ от средней (см. рис. 2);
- максимальную ЭМШ рабочих пикселей (порог ЭМШ дефектных пикселей);
- обнаружительную способность D^* (среднюю или максимальную без учета дефектных пикселей).

Для простоты и определенности лучше использовать один критерий. Самый простой и универсальный из перечисленных – это порог ЭМШ (в зоне линейности сигнальной характеристики). Данный критерий является самым близким аналогом обнаружительной способности, но проще и достовернее для измерения и вычисления. Он соответствует самой простой и самой распространенной задаче, а именно, обнаружению однопиксельного слабого объекта на равномерном фоне (при наличии только временных шумов) во всем диапазоне линейности сигнальной характеристики.

Типичная гистограмма кадра ЭМШ в зоне линейности сигнальной характеристики представлена на рис. 6.

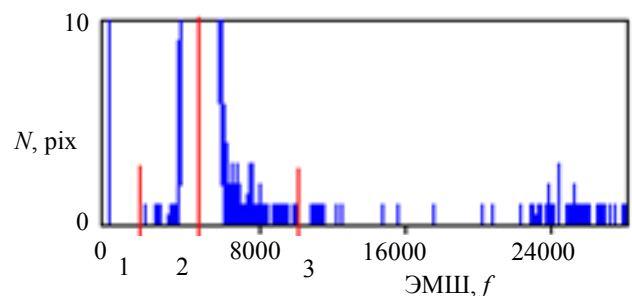


Рис. 6. Гистограмма кадра ЭМШ: линия 1 – минимальная ЭМШ; 2 – средняя ЭМШ; 3 – порог (максимальной) ЭМШ.

Установка порога максимальной ЭМШ отделяет рабочие пиксели от дефектных, пиксели с ЭМШ = 0 – тоже дефектные. Задавая разные пороги ЭМШ по рис. 8 (в зоне линейности сигнальной характеристики) можно построить графики зави-

симости количества дефектных пикселей, что отражено на рис. 7 и 9.

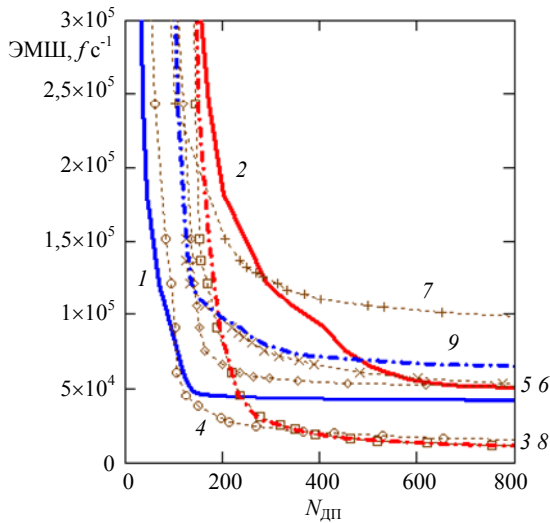


Рис. 7. Зависимость порога ЭМШ [фот / с] от количества дефектных пикселей $N_{дп}$

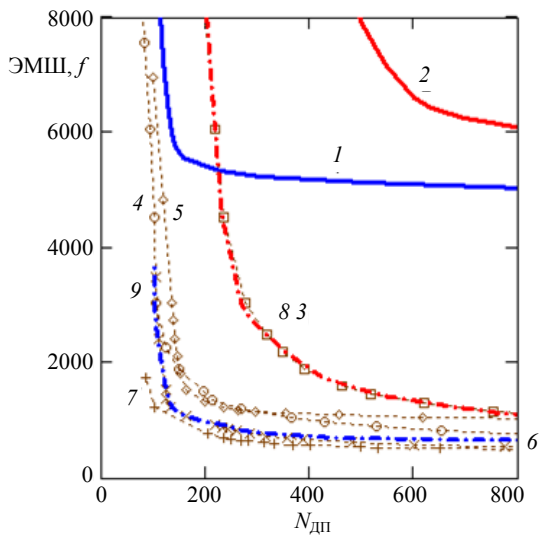


Рис. 8. Зависимость порога ЭМШ [фот] от количества дефектных пикселей $N_{дп}$.

1 – порог ЭМШ для режима «низкого усиления» «хорошей» МФПУ (120 мс, 0,4А); 2 – порог ЭМШ для режима «низкого усиления» «плохой» МФПУ (120 мс, 0,4А); 3–7 – пороги ЭМШ для режима «высокого усиления» МФПУ № 4 (0,4А, $BW=0$):

- – $\tau = 100$ мс,
- – $\tau = 50$ мс,
- ◇ – $\tau = 20$ мс,
- × – $\tau = 10$ мс,
- + – $\tau = 5$ мс,

8, 9 – пороги ЭМШ для режима «высокого усиления» МФПУ № 4 (0,4А, $BW=1$) штрих-пунктир:

- красный – $\tau = 100$ мс,
- синий – $\tau = 10$ мс.

Для сравнения с данными рис. 7 заметим, что ЭМШ, пересчитанная из обнаружительной способности (4), и освещенность от звезд 9-й звездной

величины (см. формулу (3)) составляет 2×10^5 фотонов в секунду на пиксель. Другими словами, обнаружительная способность D^* в описании МФПУ сильно занижена (а ЭМШ завышена) относительно измеренной – и средней, и минимальной ЭМШ (видимо, для гарантированного запаса по количеству дефектных пикселей).

Для сопоставления с данными рис. 8 отметим, что освещенность от звезд 9-й звездной величины составляет 25400 фотонов на пиксель (см. формулу (3)).

При пересчете графиков из «фотонов в секунду на пиксель» [$f \text{ c}^{-1}$] (рис. 7) в «фотоны на пиксель» [f] (рис. 8) графики для разных выдержек накладываются друг на друга (т. е. группируются в плотную группу), и тогда группы характеристик удобно описывать одним параметром.

Графики рис. 7 и 8 являются индивидуальными для каждой МФПУ, поэтому по этим графикам можно отличать разные МФПУ друг от друга и измерять деградацию МФПУ от времени по смещению каждого графика.

Зависимость графиков порогов ЭМШ от температуры фотоприемной матрицы МФПУ (эту температуру можно менять изменением тока ТЭМ Пельтье) представлена на рис. 9.

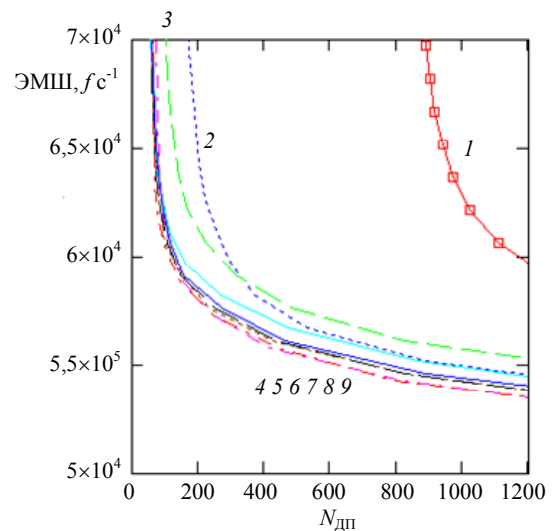


Рис. 9. Зависимость порога ЭМШ [фот/сек] от количества дефектных пикселей $N_{дп}$ для разных температур МФПУ:

- 1 – +31 °C (0,0А),
- 2 – +21 °C (0,1А),
- 3 – +13 °C (0,2А),
- 4 – +7,4 °C (0,3А),
- 5 – +2,7 °C (0,4А),
- 6 – +0,7 °C (0,5А),
- 7 – +0 °C (0,6А),
- 8 – +0 °C (0,7А),
- 9 – +1,3 °C (0,8А).

Из рис. 9 следует ответ на вопрос: как выбрать температуру МФПУ (ток ТЭМ Пельтье) по порогу ЭМШ и количеству дефектных пикселей? Видно, что не нужно поддерживать максимальный ток Пельтье (0,5–0,8А, ≈ 0 °С), т. к. то же количество дефектных пикселей достигается уже при 0,2–0,4А (+13–+7 °С), причем при значительном снижении тепловой нагрузки на систему термостабилизации камеры.

Из рис. 7 и 8 видно, что звезды 9-й звездной величины можно увидеть (с большим запасом) и в режиме «высокого усиления», и в режиме «низкого усиления» (при таких же выдержках).

Кроме того, из рис. 7 и 8 видно, как выбрать порог ЭМШ. Его нужно выбирать около изгиба графика из тех же соображений, что выбирается порог обнаружения (т. е. 2–10 СКО шума), а именно:

1 – чем выше требования к вероятности пропусков объекта (и, соответственно, ниже – к обнаружению ложных объектов), тем ниже порог ЭМШ;

2 – если вычислитель (в соответствии с алгоритмами обнаружения и слежения) может работать с большим количеством дефектных пикселей, то можно понижать порог ЭМШ.

Вопрос: повышается ли обнаруживаемая звездная величина при переходе от режима «низкого усиления» к «высокому»? Ответ может быть такой:

– средняя ЭМШ уменьшается примерно в 10 раз, при этом порог максимальной ЭМШ уменьшается всего в 4 раза, но только для выдержек больше 20 мс;

– при высоком усилении сузится диапазон освещенностей (зона линейности сигнальной характеристики сузится в 30 раз, примерно, пропорционально отношению потенциальных ям); при этом, если зона линейности сигнальной характеристики станет меньше гистограммы освещенностей кадра, то часть кадра будет в насыщении, и там нельзя будет обнаруживать и сопровождать объекты.

Следовательно, нельзя однозначно сказать, что «режим высокого усиления лучше, чем низкого», это зависит от конкретной задачи.

Следующий вопрос: есть ли разница между режимами $BW = 0$ и $BW = 1$? В наших исследованиях значительной разницы не обнаружено.

На рис. 10 приведены гистограммы геометрического и временного шума. СКО геометрического шума – 194 электрона на пиксель. Это почти в 10 раз больше, чем СКО временного шума (19,7 электронов на пиксель). Это соотношение означает, что для увеличения обнаружительной способности

надо использовать коррекцию геометрического шума (КГШ).

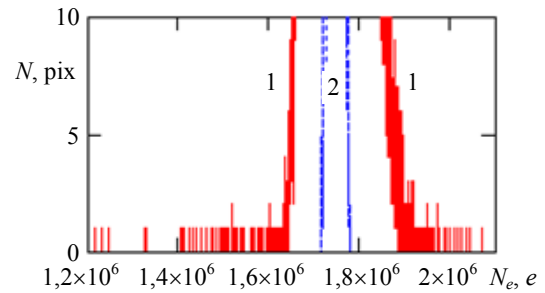


Рис. 10. Гистограммы геометрического и временного шума: 1 – геометрический шум, 2 – временной шум.

Периодичность необходимости перекалибровки массива коррекции КГШ определяется временем ухода СКО геометрического шума за диапазон СКО временного шума. Для дополнения приведенной информации этими данными необходимо провести дополнительные измерения.

Измеренный темновой ток равен 8×10^4 электронов в секунду вплоть до выдержки 10 с; при больших выдержках измеренный темновой ток плавно уменьшается.

В работе измерено увеличение диаметра некоторых дефектных пикселей (и рамки кадра) при увеличении выдержки, при нулевой освещенности. Увеличение начиналось с 100 мс, при 1 с – 3 пикселя, а при 10 с доходило до 5 пикселей (по уровню 0,5 от максимума). По горизонтали кадра эффект незначительно больше, чем по вертикали. До выдержки 0,5 с увеличение количества дефектных пикселей около периметра кадра скрывается «обрезанием рамки кадра» производителем (с формата 640×512 до формата 636×508 пикселей).

Заключение

Основные выводы данной работы состоят в следующем:

– предложены перечень параметров МФПУ и методика их оценки для расчета и выбора режимов работы МФПУ,

– измерены и приведены параметры пяти однотипных МФПУ на основе InGaAs при разных режимах работы для сравнения с другими МФПУ и камерами,

– выявлено хорошее совпадение средних характеристик всех МФПУ и значительный разброс пороговой эквивалентной мощности шума от количества дефектных пикселей для разных МФПУ,

– выявлено отсутствие сильной зависимости шумовых характеристик от температуры МФПУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. – Л.: Машиностроение, 1977.
2. Балиев Д. Л., Бедарева Е. А., Деомидов А. Д., Полесский А. В., Сидорин А. В., Хамидуллин К. А., Юдовская А. Д., Цыганкова Г. М. // Прикладная физика. 2014. № 6. С. 95.
3. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Власов П. В., Лопухин А. А., Торопов А. И., Журавлев К. С., Фадеев В. В. // Прикладная физика. 2017. № 3. С. 58.
4. Балиев Д. Л., Болтарь К. О., Власов П. В., Киселева Л. В., Ложников В. Е., Лопухин А. А., Мансветов Н. Г., Полунеев В. В., Рудневский В. С., Савостин А. В. // Прикладная физика. 2014. № 2. С. 41.
5. Болтарь К. О., Власов П. В., Ерошенков В. В., Лопухин А. А. // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 45.
6. Жегалов С. И. // Прикладная физика. 2017. № 5. С. 42.
7. Кузнецов П. А., Моцев И. С. // Прикладная физика. 2017. № 5. С. 52.
8. Хамидуллин К. А., Балиев Д. Л., Лазарев П. С., Болтарь К. О., Полесский А. В., Бурлаков И. Д., Чепурнов Е. Л., Гусарова Н. И., Попов С. В. // Прикладная физика. 2017. № 6. С. 95.
9. Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Корнеева М. Д., Шабаров В. В. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 38.
10. Филачев А. М., Таубкин И. И., Тришенков М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. – М.: Физматкнига, 2005.
11. Филачев А. М., Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Шабаров В. В. // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 3. С. 272.
12. Хадсон Р. Инфракрасные системы. – М.: Мир, 1972.
13. Ллойд Дж. Системы тепловидения. – М.: Мир, 1978.

PACS: 06.20.fb, 85.60.Gz

InGaAs 640×512 SWIR camera pixels signal and noise characteristics

A. M. Moiseev and P. E. Novikov

NPK “SPP”, JSC
53 Aviamotornaya str., Moscow, 111250, Russia
E-mail: 113@npk-spp.ru

Received August 20, 2018

The target of research was to measure characteristics of camera and matrix photodetector for all operating modes in the particular range. This information is not provided in device datasheets: they contain usually only ‘one-point’ measurement results. Basing on the bunch of films for different levels of sensor illumination there was calculated histograms of value distribution and pixel signal characteristics across the whole illumination ranges from the absolute darkness to full saturation of the sensor. These data are critical for defect pixel detection. There was discovered defect pixel “spreading” (area extension) effect (unknown before) on large expositions. A dark current dependence from the sensor pixels temperature was measured. In the whole range of sensor temperature regulation, there were no temperature impact on the signal RMS (and so – on the noise equivalent power) detected. System designers could get useful results using comparative measurements performed in the research: 1 – to select the most suitable matrix photodetector (or camera) among multiply variants for the system they are designing; 2 – to make a reasoned conclusion about the suitability of the particular photodetector (or camera) for the design.

Keywords: FPA, SWIR, InGaAs, noise equivalent power, NEP, defective pixels.

REFERENCES

1. M. M. Miroshnikov *Theoretical bases of optoelectronic devices*. (Mashinostroenie, Leningrad, 1977) [in Russian].
2. D. L. Baliev, E. A. Bedareva, A. D. Deomidov, A. V. Poleskiy, A. V. Sidorin, K. A. Khamidullin, A. D. Yudovskaya, and G. M. Tsygankova, *Prikl. Fiz.*, No. 6, 95 (2014).
3. I. D. Burlakov, K. O. Boltar, P. V. Vlasov, A. A. Lopukhin, A. I. Toropov, K. S. Juravlev, and V. V. Fadeev, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 58 (2017).
4. D. L. Baliev, K. O. Boltar., P. V. Vlasov, L. V. Kiseleva, V. E. Lozhnikov, A. A. Lopuhin, N. G. Mansvetov, V. V. Poluneev, V. S. Rudnevsky, and A. V. Savostin, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 41 (2014).
5. K. O. Boltar, P. V. Vlasov, V. V. Eroshenkov, and A. A. Lopuhin, *Prikl. Fiz.*, No. 4, 45 (2014).
6. S. I. Zhegalov, *Prikl. Fiz.*, No. 5, 42 (2017).
7. P. A. Kuznetsov and I. S. Moschev, *Prikl. Fiz.*, No. 5, 52 (2017).
8. K. A. Khamidullin, D. L. Baliev, P. S. Lazarev, K. O. Boltar, A. V. Poleskiy, I. D. Burlakov, E. L. Chepurnov, N. I. Gusarova, and S. V. Popov, *Prikl. Fiz.*, No. 6, 95 (2017).
9. A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, M. D. Korneeveva, and V. V. Shabarov, *Prikl. Fiz.*, No. 1, 38 (2014).
10. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Physical Base*. (Fizmatkniga, Moscow, 2005) [in Russian].
11. A. M. Filachev, A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, K. O. Boltar, and V. V. Shabarov, *Usp. Prikl. Fiz.* 4 (3), 272 (2014).
12. Richard D. Hudson, *Infrared System Engineering* (Wiley-Interscience, 1969; Mir, Moscow, 1972).
13. J. M. Lloyd, *Thermal Imaging Systems* (Plenum Press, New York and London, 1975; Mir, Moscow, 1978).