

# Фотоэлектроника

УДК 621.383.4

## Влияние многократных термоударов на распределение элементов с повышенным шумом в многорядном МФПУ

Д. Л. Балиев, К. О. Болтарь

*В данной работе исследовано распределение элементов с повышенным шумом в линейке фотоприемника формата 6×576 на основе КРТ длинноволнового диапазона спектра при многократном охлаждении от комнатной температуры до 80 К. Проведена оценка вероятности выхода из строя ВЗН-канала при деселекции для полученного распределения элементов с повышенным шумом.*

PACS: 07.57.Kp, 85.60.Dw, 85.60.Gz

*Ключевые слова:* КРТ, шум, соотношение сигнал/шум, деселекция, длинноволновый ИК, ВЗН.

### Введение

Использование многорядных фотоприемных устройств с режимом временной задержки и накопления (ВЗН) позволяет существенно улучшить тепловизионные параметры приемника и уменьшить количество неработоспособных каналов. Для оптимального использования всех доступных линеек необходимо проводить эффективную процедуру деселекции дефектных элементов. В первую очередь, необходимо избавиться от элементов с повышенным уровнем шума.

Многорядный фотоприемник формата 6×576 на основе КРТ длинноволнового спектрального диапазона разработан и изготовлен в АО «НПО «Орион». В состав фотоприемного устройства входит БИС считывания с ВЗН в холодной зоне. Она позволяет выводить каждую из 6 линеек отдельно в режиме «bypass», имеет возможность компенсировать потерю сигнала при деселекции до 2-х дефектных элементов в канале.

Во время работы с опытными образцами было обнаружено, что списки деселектированных фотодиодов при повторном проведении автомати-

зированной деселекции отличаются. При более подробном исследовании оказалось, что набор деселектированных элементов существенно меняется после каждого охлаждения прибора и практически не изменяется при повторном проведении автоматизированной деселекции во время одного охлаждения.

Целью данной работы являлось исследование поведения фотодиодов с повышенным шумом при многократном охлаждении. Заметим, что ранее уже проводились работы по исследованию распределения чувствительности в фотоприемниках на основе КРТ длинноволнового ИК-диапазона при многократном охлаждении [1], однако должного внимания исследованию шумов уделено не было.

### Критерий дефектного элемента

При определении критерия дефектности элемента необходимо понимать, какой параметр мы оптимизируем. К таким параметрам можно отнести соотношение сигнал/шум прибора, а также равномерность постоянной составляющей сигнала или равномерность чувствительности [2—4]. В данной работе мы будем оптимизировать соотношение сигнал/шум, пренебрегая возможной неравномерностью чувствительности.

Выведем критерий дефектного элемента по избыточному постоянному шуму. Для признания элемента дефектным соотношение сигнал/шум канала с отключенным элементом должно быть выше, чем соотношение сигнал/шум канала с включенным. Это можно выразить следующими соотношениями:

Балиев Дмитрий Леонидович, инженер НТК<sup>1</sup>, аспирант<sup>2</sup>.  
Болтарь Константин Олегович, начальник НТК<sup>1</sup>, профессор<sup>2</sup>.  
<sup>1</sup>АО «НПО «Орион».

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

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

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт.

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

Статья поступила в редакцию 18 мая 2015 г.

© Балиев Д. Л., Болтарь К. О., 2015

$$SNR_{N_{def}} = \frac{6S}{\sqrt{5N^2 + N_{def}^2}} < \frac{5S}{\sqrt{5}N}$$

$$N_{def} > \sqrt{\frac{11}{5}}N \approx 1,48N,$$

где  $N$  — шум нормального элемента, а  $N_{def}$  — шум дефектного элемента,  $S$  — сигнал от элемента.

Аналогично можно получить и критерий для отключения второго, третьего, четвертого и пятого фотодиодов в канале:

$$N_{def}(2) > \frac{3}{2}N = 1,5N;$$

$$N_{def}(3) > \sqrt{\frac{7}{3}}N \approx 1,53N;$$

$$N_{def}(4) > \sqrt{\frac{5}{2}}N \approx 1,58N;$$

$$N_{def}(5) > \sqrt{3}N \approx 1,73N.$$

По статистике, полученной на основе автоматизированной деселекции ряда приборов, в одном канале практически не встречается более трех дефектных элементов. Ввиду близости критерия для 1-го, 2-го и 3-го отключаемых фотодиодов, будем использовать единый критерий, а именно,  $N_{def} > 1,5N$ .

Помимо элементов, постоянно имеющих повышенное значение шума, необходимо учесть также элементы, которые имеют «взрывные» шумы. Для их детектирования применим тот же критерий, однако выборку будем проводить на протяжении большого промежутка времени (несколько минут).

### Постановка эксперимента

Исследование проводилось на одной из 6 линеек фотоприемного устройства формата  $6 \times 576$  на основе КРТ для длинноволнового ИК-диапазона, работающего при температуре 80 К и охлаждаемого с помощью микрокриогенной системы. Прибор был включен в режиме bypass для вывода данных с отдельной линейки без ВЗН-суммирования. Фотоприемное устройство было поставлено напротив имитатора плоского АЧТ, нагретого до температуры 300 К. Измерения проводились в течение 5 дней, по 3 измерения в день с перерывом в 3—4 часа. Таким образом, прибор успевал нагреться до комнатной температуры перед каждым измерением.

Для каждого фотодиода снимался большой массив данных (для каждого фотоэлемента снято

4456448 отсчетов), время одного замера  $\sim 7,5$  минут. В общей сложности получено около 70 гигабайт данных.

Подсчет шума проводился в окнах по 8192 отсчета, построенных с половинным перекрытием (всего 1087 окон). Средний шум считается путем построения гистограммы шума для каждого выхода БИС считывания отдельно, чтобы исключить возможное влияние наводок на аналоговые линии передачи. Элемент признается дефектным, если удовлетворяет критерию дефектности в двух и более окнах.

### Результаты исследования

В среднем каждое измерение показывало около 50 элементов с повышенным значением шума (от 42 до 60), за исключением одного замера, в котором было детектировано 82 элемента. Анализ полученных в тот день данных не позволил исключить их из анализа, поскольку никаких аномалий в снятых данных, за исключением количества высокошумящих элементов, выявлено не было.

Основной интерес в исследовании представляет изменение распределения дефектных элементов от охлаждения к охлаждению. На рис. 1 представлена гистограмма элементов, признанных дефектными 1, 2...15 раз за все циклы охлаждения. Лишь 19 элементов были признаны дефектами при всех 15 охлаждениях. Большая часть дефектов были признаны таковыми 1—2 раза. Небольшое количество элементов в середине распределения — элементы, шумящие на границе порога детектирования.

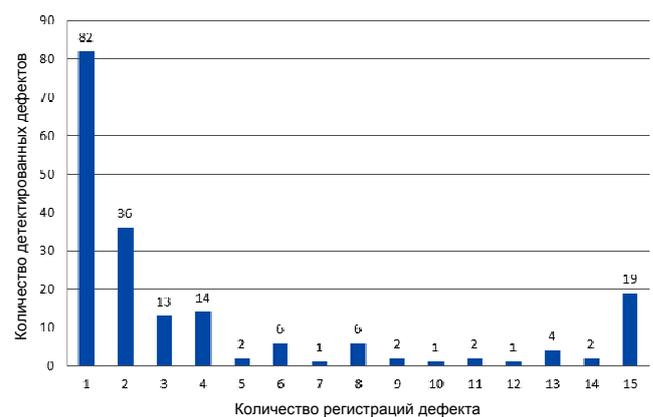


Рис. 1. Частота обнаружения элементов с повышенным значением шума

Всего за время эксперимента были хоть раз помечены как дефект 191 фотодиод из 576. На следующем графике (рис. 2) представлена зависимость количества фотодиодов, каждый из которых был определен хоть один раз как дефектный на

момент текущего измерения. По виду этой зависимости можно сделать вывод, что распределение непостоянных дефектов близко к случайному. По изменению наклона графика, а также исходя из наблюдений за нестабильными шумами, можно сделать вывод, что распределение идет по некоторому подмножеству элементов, а не по всем исследованным 576. Другими словами, есть элементы, которые никогда не покажут повышенный шум (за исключением возможных шумов типа взрывных).

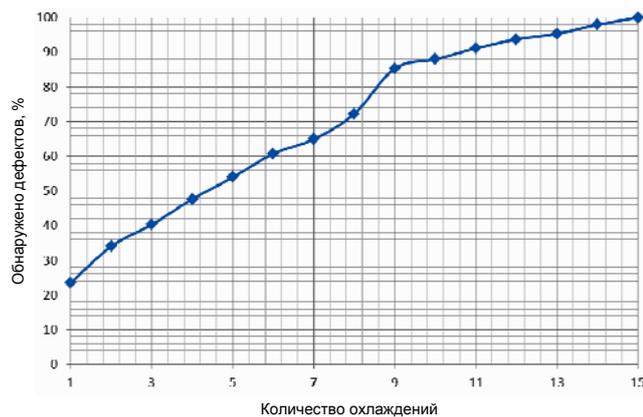


Рис. 2. Количество обнаруженных дефектов за все циклы охладжений.

Приближение полученного ряда полиномиальной функцией позволяет спрогнозировать общее количество возможных высокошумящих элементов, а именно,  $220 \pm 10$  элементов, т. е.  $\sim 38\%$  от общего количества.

Был проанализирован ряд элементов, шумевших лишь в одном из 15 измерений. К удивлению, среди просмотренных элементов не было обнаружено взрывных шумов. Все они имели постоянный высокий шум в данном измерении. Это позволяет предположить низкое дифференциальное сопротивление фотодиодов.

Нужно заметить, что были проанализированы не все элементы, и присутствие взрывных шумов не исключено. Причины и физические механизмы зависимости шума фотодиода КРТ длинноволнового ИК-диапазона спектра от режимов охлаждения в данной работе не исследовались.

### Оценка предполагаемой дефектности каналов ВЗН

Оценим, сколько дефектных каналов будет присутствовать в фотоприемнике с таким распределением дефектов. Для начала определим критерий «дефектного канала»: будем считать канал дефектным, если соотношение сигнал/шум канала в два раза ниже среднего. Без учета распределения чувствительности, сигнал упадет в два раза при

уменьшении количества ВЗН-суммированных элементов в 4 раза, т. е. при суммировании 1,5 «элементов». Таким образом, если отключить больше 4 элементов в канале, признаем его дефектным. Заметим, что мы не рассматриваем возможные кластеры дефектов, возникшие по иным причинам, чем случайное распределение (царапины, пятна большого сопротивления индиевых микроконтактов и т. п. [5]). Таким образом, мы считаем вероятность возникновения дефекта в каждой линейке независимым.

Для начала оценим вероятность присутствия постоянных дефектных каналов:

$$p_{\text{пост}} = \left(\frac{19}{576}\right)^5 \approx 3,91 \cdot 10^{-8}.$$

Оценим общую вероятность появления дефектных каналов во время конкретного охлаждения:

$$p_{\text{общ}} \approx \left(\frac{30}{(220-19)} \cdot \frac{(220-19)}{(576-19)} + \frac{19}{576}\right)^5 \approx 4,94 \cdot 10^{-6}.$$

Таким образом, среднее количество дефектных каналов равно:

$$n \approx p_{\text{общ}} \cdot 576 \approx 0,003.$$

Делаем вывод, что в среднем в 3-х из 1000 охладжений мы будем наблюдать один дефектный канал.

Оценим вероятность появления канала, для которого невозможна компенсация чувствительности в БИС считывания (т. е. каналы с более чем двумя дефектами):

$$p_{\text{gain}} \approx \left(\frac{30}{(220-19)} \cdot \frac{(220-19)}{(576-19)} + \frac{19}{576}\right)^3 \approx 6,55 \cdot 10^{-4}.$$

Таким образом, в среднем в 38 из 100 охладжений мы будем наблюдать один канал с некомпенсированной чувствительностью.

### Заключение

Проведено исследование распределения элементов с повышенным шумом при многократном охлаждении в фотоприемнике формата  $6 \times 576$  длинноволнового ИК-диапазона. Исследование показало наличие в линейке в среднем 50 элементов с повышенным шумом, из которых 19 элементов обладали повышенным шумом всегда. Большая часть элементов имела повышенное значение шума 1—2 раза, а их распределение по линейке близко к случайному распределению в подмножестве из  $\sim 38\%$  элементов. Анализ поведения ряда

шумящих элементов позволяет предположить низкое дифференциальное сопротивление фотодиода. Однако в дальнейшем необходимо провести более полный анализ с автоматизацией детектирования шумов типа взрывных.

Можно сделать вывод, что деселекцию дефектных элементов в матричном фотоприемном устройстве (МФПУ) длинноволнового диапазона ИК-спектра необходимо проводить после каждого запуска микрокриогенной системы.

Проведена оценка вероятности выхода из строя канала ВЗН, показавшая крайне низкую вероятность выхода из строя хоть одного канала ВЗН при полученном распределении дефектных элементов. Однако вероятность появления каналов с нескомпенсированной чувствительностью существенна.

*Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787.2014.9*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кремис И. И. // Прикладная физика. 2010. № 4. С. 91.
2. Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Корнеева М. Д. и др. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 38.
3. Соляков В. Н., Козлов К. В., Бочков В. Д. и др. / Труды XXIII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. 2014. С. 409.
4. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. — М.: Физматкнига. 2005.
5. Коротаев Е. Д., Яковлева Н. И. / Труды XXIII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. 2014. С. 473.

## Effect of multiple cooling cycles on high-noise elements distribution in TDI IR detectors

*D. L. Baliev<sup>1,2</sup> and K. O. Boltar<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Orion R&P Association, Inc.  
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

*Received May 18, 2015*

*In this research, a distribution of high-noise elements in a line of the 6×576 LWIR MCT FPA is investigated during multiple cycles of cooling from the room temperature to 80 K. The probability of getting a defective TDI channel during deselection is evaluated for the measured high-noise elements distribution.*

PACS: 07.57.Kp, 85.60.Dw, 85.60.Gz

*Keywords:* MCT, noise, SNR, deselection, LWIR, TDI.

#### REFERENCES

1. I. I. Kremis, *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 91 (2010).
2. A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, M. D. Korneeva, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 38 (2014).
3. V. N. Solyakov, K. V. Kozlov, V. D. Bochkov, et al., in *Proc. XXIII Intern. Conf. Photoelectron.* (Orion, Moscow, 2014). P. 409.
4. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid State Photoelectronics. Physical Foundation.* (Fizmatkniга, Moscow, 2005) [in Russian].
5. E. D. Korotaev and N. I. Iakovleva, in *Proc. XXIII Intern. Conf. Photoelectron.* (Orion, Moscow, 2014). P. 473.