

# Фотоэлектроника: элементная база и технология

УДК 621.383.5.029.71/73

## Результаты исследования чувствительности фотоэлементов матричных КРТ фотоприемников в различных температурных режимах

И. И. Кремис

*Представлены результаты исследования чувствительности фотоэлементов матричных фотоприемных устройств (ФПУ) производства Sofradir, ИФП СО РАН и ФГУП «НПО "Орион"» при прохождении ФПУ циклов заморозки при температуре от 293 до 77 К. Рассмотрены зависимости чувствительности элементов от температуры абсолютно черного тела (АЧТ). Дана оценка частоты появлений дефектных по чувствительности элементов при разных температурах АЧТ и многократных циклах заморозки ФПУ. Предложен алгоритм обнаружения дефектных по чувствительности элементов приемника. Рабочий диапазон длин волн исследуемых приемников соответствует дальней ИК-области 8—14 мкм.*

PACS: 85.60.Bt

*Ключевые слова:* дефектные элементы, нечувствительные элементы.

### Введение

Накопленный опыт работы с матричными ФПУ разных производителей и разных ФПУ одного производителя [1] позволяет отметить, что поведение элементов приемника является нестабильным. Так, элементы ФПУ, проявляющие себя на изображении как шумящие или мерцающие, через некоторое время работы прибора могут приобрести параметры, свойственные большинству фотоэлементов приемника. Причем при каждом цикле охлаждения приемника от 293 до 77 К картина шумящих элементов также изменяется. Пиксели, которые являлись "нормальными", при новой заморозке начинают шуметь, выделяясь из общей шумовой картины кадра. Аналогичная ситуация наблюдалась с нечувствительными (имеют постоянный уровень сигнала и не реагируют на излучение) и чувствительными элементами приемника. Первые могут приобрести чувствительность (или наоборот, чувствительные элементы теряют чувствительность), а вторые изменяют свою чувствительность при каждом новом цикле заморозки ФПУ.

Одним из объяснений такого "поведения" сигнала элементов могут быть изменение контакта элементов КРТ со схемой считывания при охлаждении ФПУ, что соответствует изменению сопротивления контактов, и появление чувствительности у ранее нечувствующих элементов (и наоборот), а также резкое изменение чувствительности элементов [2, 3]. Следствием изменения контакта элементов КРТ со схемой считывания также может быть и изменение шумовых свойств элемента приемника.

Ввиду большого объема обрабатываемой информации и объема полученных результатов в рамках данной статьи рассмотрены только те вопросы, которые касаются изменения чувствительности элементов приемников.

Предприятие КТИ ПМ на основе фотоприемников КРТ разрабатывает тепловизионные приборы, при этом номенклатура применяемых охлаждаемых приемников включает широкий спектр изделий, отличающихся производителем, технологией изготовления, размером и характеристиками [1, 2, 4]. Причем информация в представляемой производителем документации о стабильности свойств элементов приемников отсутствует. В то же время создание унифицированной электроники обработки сигналов [1] для приемников КРТ требует применения алгоритмов и критериев, способных работать со всем спектром используемых приемников. В связи с этим была поставлена цель —

**Кремис Игорь Иванович**, младший научный сотрудник. Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники. Россия, 630090, г. Новосибирск, просп. Лаврентьева, 2/1. Тел.: 8-923-231-66-98. E-mail: igor21738@ngs.ru

Статья поступила в редакцию 5 декабря 2009 г.

изучить поведение сигнала фотоэлементов ФПУ при режимах приемника, для которых наблюдалось неустойчивое поведение пикселей, и выработать критерий обнаружения элементов с чувствительностью, превышающей некоторое пороговое значение.

Рассмотрим некоторые моменты.

1. Выработка критерия обнаружения дефектных по чувствительности элементов (ЧДЭ).
2. Чувствительность пикселей при каждом новом включении прибора, т. е. при прохождении полного цикла заморозки ФПУ от 293 до 77 К.
3. Чувствительность пикселей при текущем включении прибора.
4. Поведение обнаруженных по критерию п. 3 ЧДЭ элементов для условий по п. 1 и 2.

### Условия эксперимента

Измерения показателей чувствительности проводились для приемников производства Sofradir 320×256, ИФП СО РАН 320×256 и ФГУП «НПО "Орион"» 384×288. Далее в тексте приемник производства Sofradir будем называть приемник "А", а производства ИФП СО РАН и ФГУП «НПО "Орион"» — "В" и "С", соответственно.

Рабочий диапазон длин волн исследуемых приемников соответствует дальней инфракрасной (ИК) области 8—14 мкм и колеблется в пределах 7,7—10,5 мкм. Все измерения проводились для температур 10; 20; 30; 40; 50 °С. Входной поток заданной температуры формировался АЧТ с точностью ±0,01 К. (Точность контролировалась по показаниям информационной панели АЧТ.) Для выяснения поведения чувствительности элементов при новых циклах заморозки ФПУ все измерения, указанные выше, проводили ежедневно (в течение 15 дней).

Время накопления и напряжение смещения фотоэлементов ФПУ были установлены в соответствии с рекомендациями производителей. Для охлаждения матриц до требуемой температуры использовались газокриогенные машины.

### Алгоритм обнаружения ЧДЭ

Предварительный анализ массивов данных с выбранных ФПУ показал, что характер дефектных элементов (ДЭ) и характеристики фоточувствительных элементов (ФЧЭ) нестабильны. Анализ ДЭ позволил разделить их на три группы:

- 1 — шумящие элементы;
- 2 — элементы с постоянным уровнем сигнала;
- 3 — элементы с чувствительностью, выходящей за пределы установленных порогов неравномерности чувствительности по всей матрице.

В работах [3, 4] приведена классификация ДЭ ФПУ, где элементы групп 2 и 3 выделены в категорию элементов с очень высокой или нелинейной чувствительностью. Обнаружение происходит по максимальному значению чувствительности пикселя и ограничению максимально допустимого значения разностного отклика. В первом случае обнаруживаются сверхчувствительные элементы, во втором — элементы, крутизна чувствительности которых не может быть правильно вычислена [4], причем для обнаружения указанных элементов используются два различных алгоритма.

Для обнаружения дефектных по чувствительности элементов (группы 2 и 3) использовались коэффициенты коррекции неравномерности чувствительности элементов ФПУ, определяемые как разность между соответствующими пикселями горячего и холодного кадров. Анализ гистограммы коэффициентов позволяет однозначно определить характер чувствительности элемента ФПУ (2-я или 3-я группа) и, следовательно, использовать для обнаружения ДЭ групп 2 и 3 единый алгоритм.

Для примера рассмотрим гистограмму (рис. 1) разности температурных кадров для 30 и 20 °С приемника размерностью 320×256. Здесь по оси абсцисс откладываются значение коэффициента, а по оси ординат — число элементов, имеющих соответствующее значение коэффициента. Визуально можно обнаружить, что все нормально чувствительные элементы приближенно имеют нормальное распределение плотности вероятности разности температур. Рассчитав математическое ожидание (МО) и среднеквадратическое отклонение (СКО) для данного массива (для приведенной гистограммы массива МО = 190, СКО = 17), можно предположить, что все элементы гистограммы, код которых не попадает в диапазон "А"—"В", где число элементов превышает порог, равный 20 % от числа элементов со значением, равным МО (значение 100 %), являются ДЭ. Кроме того, можно предположить, что если значение кода сигнала элементов изображения не попадает в диапазон от МО—СКО до МО+СКО, то такие элементы также являются дефектными.

Таблица ДЭ рассчитывается для каждого диапазона температур: 10—20; 20—30; 30—40; 40—50 °С. Обозначим диапазоны, соответственно, номерами № 1, 2, 3 и 4.

Итак, для обнаружения элементов 2-й и 3-й групп вычисляются коэффициенты коррекции неравномерности приемника для каждой температурной пары температурного диапазона. Соответственно, коэффициенты коррекции для температурных диапазонов будут вычисляться следующим образом:  $k_{21} = t_{20^{\circ}\text{C}} - t_{10^{\circ}\text{C}}$ ,  $k_{32} = t_{30^{\circ}\text{C}} - t_{20^{\circ}\text{C}}$ ,  $k_{43} = t_{40^{\circ}\text{C}} - t_{30^{\circ}\text{C}}$ ,  $k_{54} = t_{50^{\circ}\text{C}} - t_{40^{\circ}\text{C}}$ .

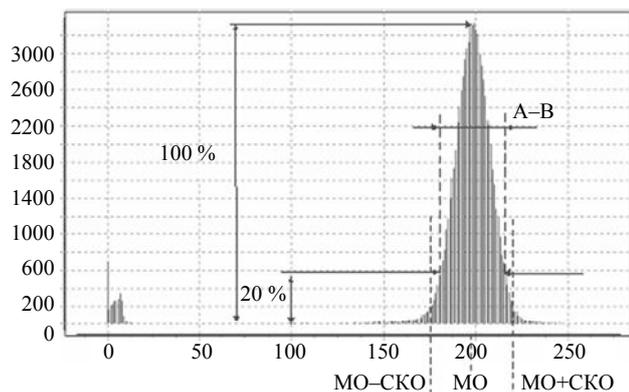


Рис. 1. Гистограмма разности температурных кадров

Далее для каждого массива коэффициентов рассчитываются СКО и МО коэффициентов коррекции неравномерности чувствительности элементов ФПУ. Обнаружение дефектных элементов 2-й и 3-й групп происходит по критерию:  $k < \text{МО-СКО}$  или  $k < \text{МО+СКО}$ , где  $k$  — значение коэффициента.

Полученные массивы коэффициентов корректируются с учетом вышеприведенного критерия: если  $k < \text{МО-СКО}$  или  $k < \text{МО+СКО}$ , то элемент является ДЭ, и  $k = \text{МО}$ . Все полученные скорректированные коэффициенты используются в приборе при наблюдении объектов в соответствующих диапазонах температур. Все таблицы ДЭ логически суммируются для получения окончательной таблицы ДЭ приемника.

На основе полученного значения СКО и предварительно заданного порогового значения количества ДЭ происходит текущая корректировка порога отбраковки элементов. При этом коррекция параметров алгоритма для каждого используемого ФПУ минимальна и позволяет автоматизировать данный процесс, что в свою очередь сокращает время настройки прибора, исключая время, необходимое для сбора и обработки данных с ФПУ оператором.

### Результаты эксперимента

Проведенные исследования показали, что значения чувствительности некоторых элементов фотоприемников при каждом цикле охлаждения ФПУ (от 293 до 77 К) существенно изменяют свое значение. Визуально в виде темных или светлых точек указанные элементы становятся заметны при изменениях чувствительности больше, чем значение СКО шума ФПУ в аналогичном температурном режиме.

Для оценки критических изменений чувствительности элементов и полноты исследований были найдены шумящие дефектные элементы (ШДЭ) [5] и рассчитаны таблицы ШДЭ для всех температур. Все таблицы были сложены логически по

"ИЛИ" и инвертированы. В результате в итоговую таблицу попали элементы, не проявляющие себя как ШДЭ во всем диапазоне температур. Для них было рассчитано СКО шума. Из массива значений СКО найдено среднее для каждой температуры АЧТ и построены графики (рис. 2), которые отражают температурную зависимость СКО шума полноценных элементов фотоприемников. Здесь значениям температур 10, 20, 30, 40, 50 °С соответствуют значения по оси абсцисс 1—5, значения по оси ординат соответствуют среднему СКО шума ФПУ.

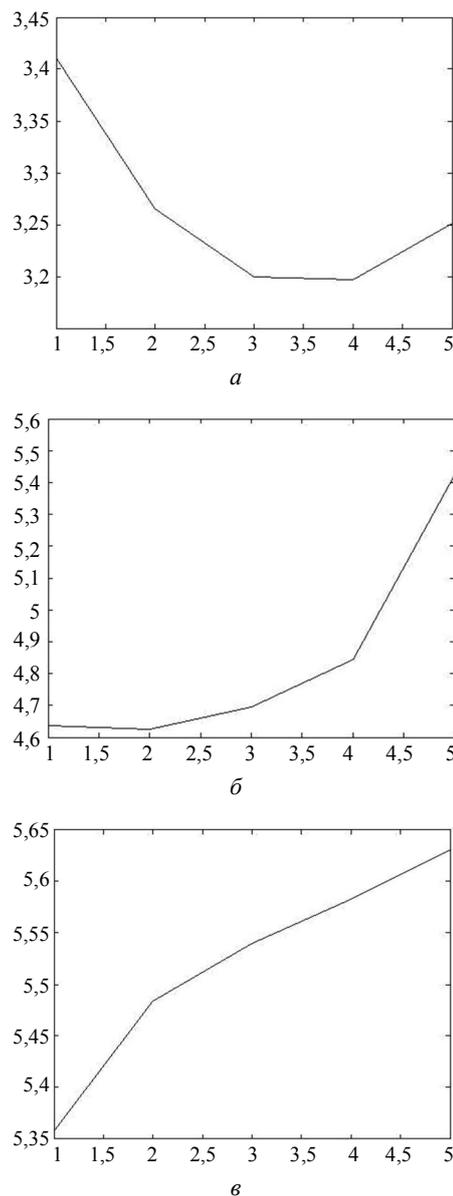


Рис. 2. Средний шум за 15 дней при изменении температуры АЧТ:  
а — приемник "А"; б — "В"; в — "С"

Из приведенных графиков видно, что наименьшим шумом обладает фотоприемник "А", и, следовательно, изменения чувствительности элементов для него будут самыми критичными. Зна-

чение изменения чувствительности для указанного приемника при температуре АЧТ 30 °С соответствует значению СКО, равному 3,2. Следовательно, все элементы ФПУ, чувствительность которых изменяется более чем на 3,2, будут визуально заметны на изображении. Указанный критерий также может быть использован для определения порога критерия поиска ЧДЭ, описанного выше. Аналогично, заметное на изображении изменение чувствительности элементов для приемников "В" и "С" при 30 °С АЧТ составляет 4,7 и 5,55, соответственно.

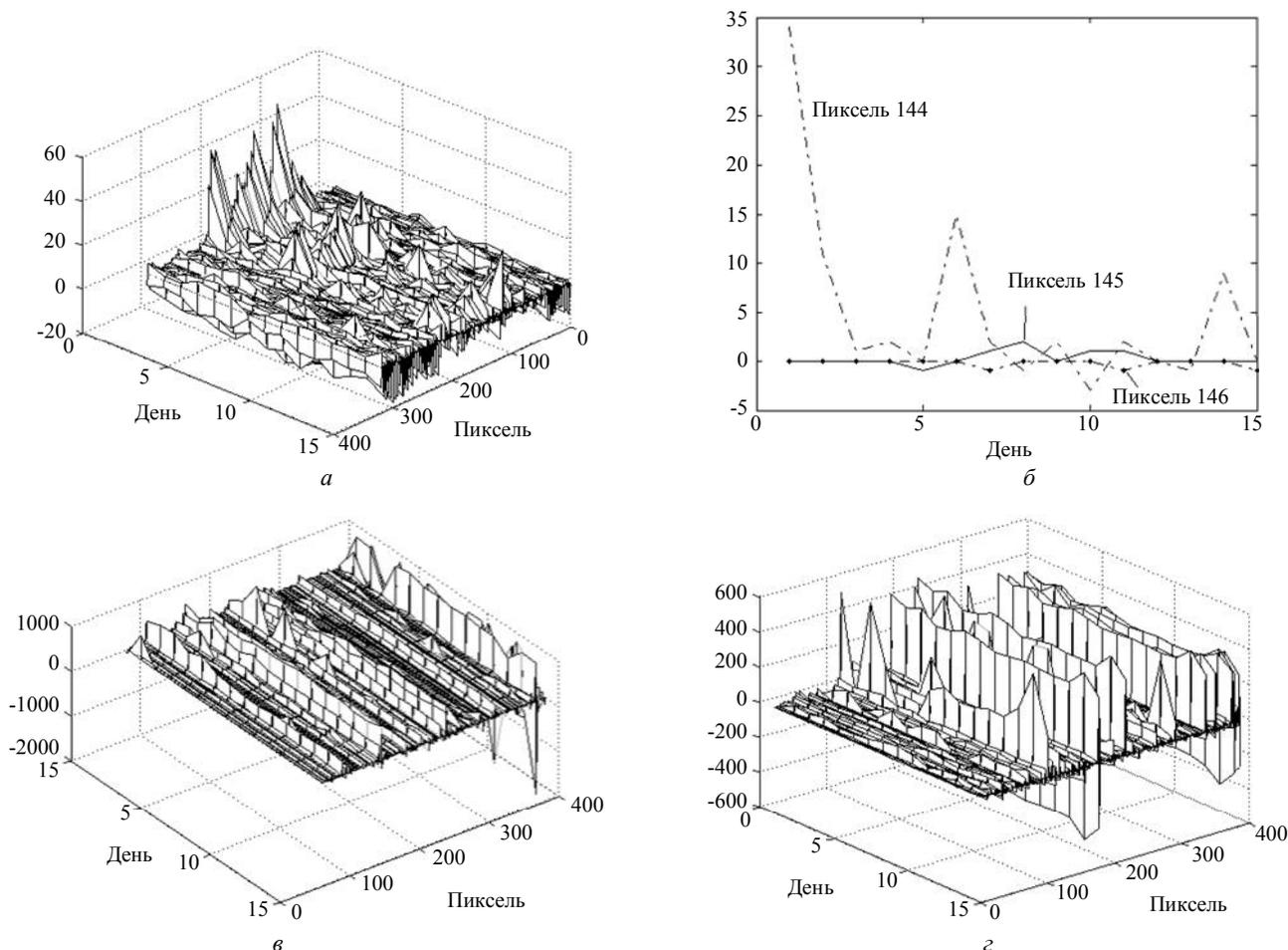
На рис. 3, *a—г* показано изменение значения чувствительности пикселей строки 20 приемников "А"—"С" в течение 15 дней. Четко наблюдается нестабильность поведения некоторых элементов. Для большей наглядности на рис. 3, *б* показаны изменения значения чувствительности в течение 15 дней по элементам 144, 145 и 146 строки 20 для ФПУ "А". Здесь элемент 144 в отличие от 145 и 146 проявляет значительное изменение чувствительности через несколько циклов заморозки ФПУ.

Элементы 145 и 146 имеют более равномерное изменение чувствительности в течение всего времени наблюдения, а элемент 144 имеет четыре резких изменения чувствительности в дни 1, 6, 10 и 14. Причем указанные изменения составляют более чем 3,2. Это позволяет заявить о проявлении на изображении темных или светлых точек на месте элемента 144 строки 20 ФПУ. Рис. 3, *а* показывает, что похожая картина наблюдается и для других пикселей.

На рис. 4 показано изменение количества ДЭ для всех испытуемых ФПУ за 15 дней при разных температурах АЧТ. Из графиков видно, что значения колебаний количества ДЭ различаются в течение 15 дней и при всех температурах.

Для приемников "А" количество обнаруженных ДЭ возрастает с увеличением температуры, а приемника "В", наоборот, уменьшается.

Для приемников "А" и "В" изменение составляет 50—60 %, причем для диапазона 1—3 приемника "В" изменение количества ДЭ выражено более равномерно и составляет 4—6 %. Резкое изменение количества ЧДЭ наблюдается для диапазона 3—4 и составляет, соответственно, 45—55 %.



**Рис. 3. Изменение чувствительности за 15 дней:**

*a* — строка 20, 320 элементов, приемник "А"; *б* — строка 20, пиксели 144, 145, 146, приемник "А";  
*в* — строка 20, 320 элементов, приемник "В"; *г* — строка 31, 384 элемента, приемник "С"

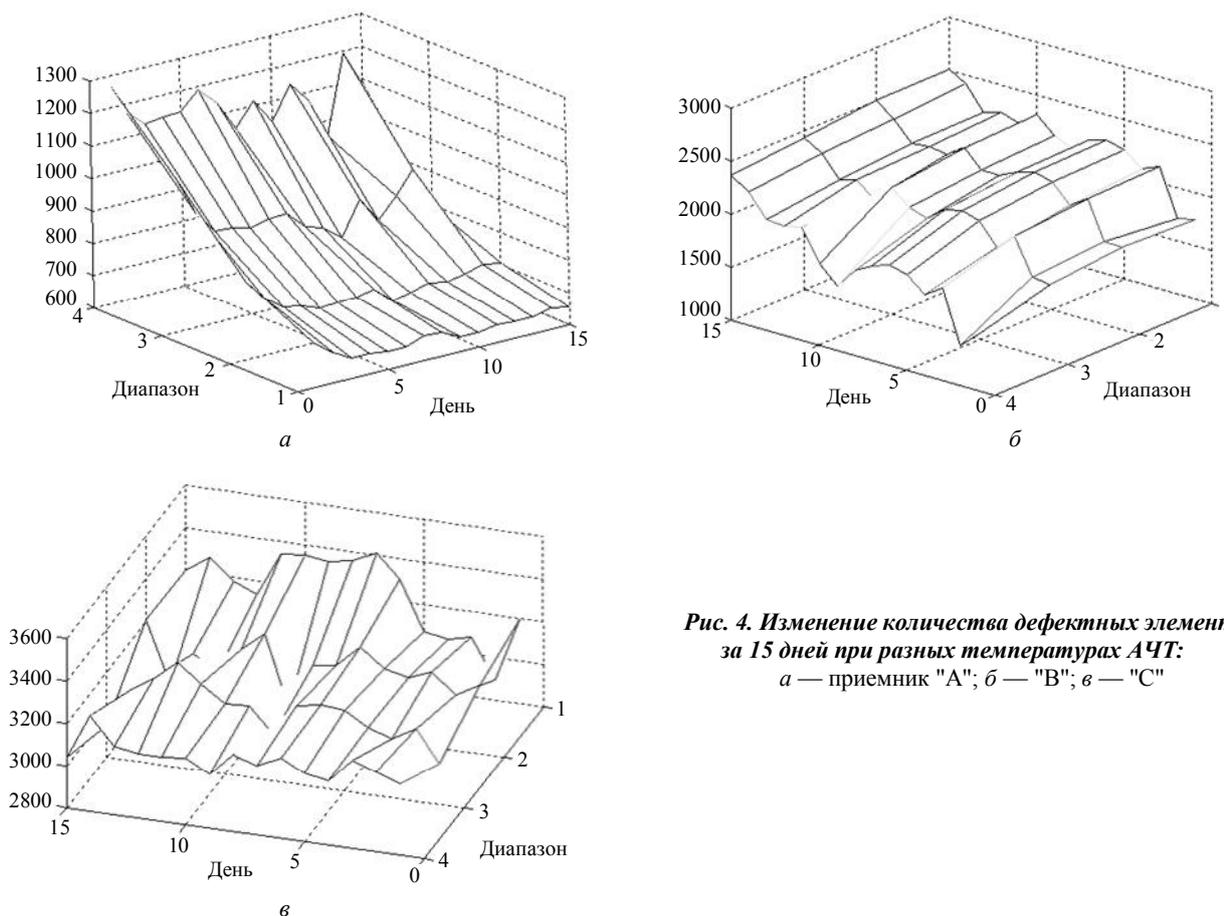


Рис. 4. Изменение количества дефектных элементов за 15 дней при разных температурах АЧТ: а — приемник "А"; б — "В"; в — "С"

Для приемника "С" поведение количества ЧДЭ неоднозначно. Видим изменение количества ДЭ как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Отмеченная нестабильность температуры видна как при изменении температуры, так и при новых циклах охлаждения ФПУ. Следовательно, технология изготовления приемника "С" существенно отличается от технологии изготовления приемников "А" и "В" в направлении, касающемся зависимости ЧДЭ от температуры фоновой заставки и циклов заморозки ФПУ.

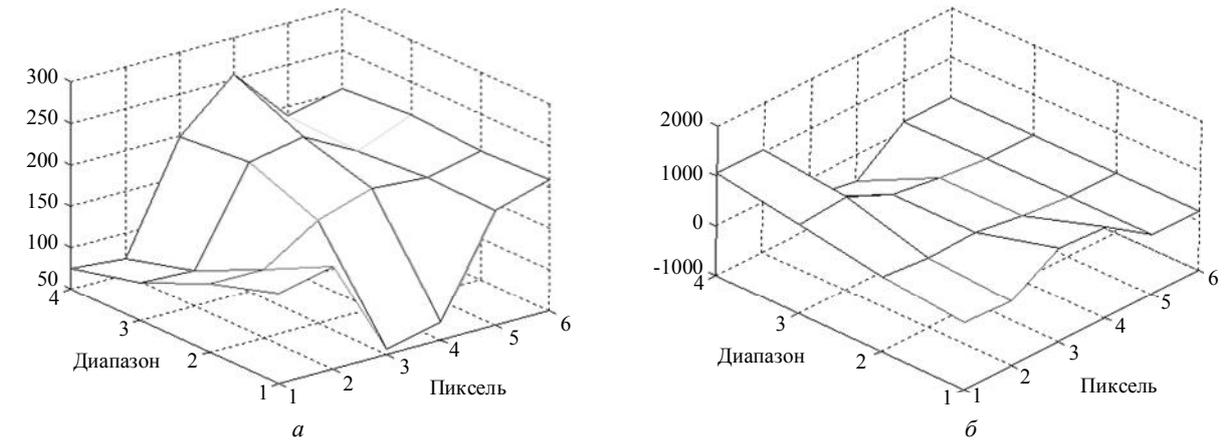
На рис. 5 показаны изменения сигналов на шести пикселях ФПУ "А"—"С" при разных температурных полях. Пиксели № 1—4 являются ДЭ и определены при расчетах, описанных выше. Пиксели № 5 и 6 не являются ЧДЭ, так как при анализе изображения таблиц ДЭ, полученных при температурах АЧТ от 10, 20, 30, 40, 50 °С, они как дефектные себя не проявили, их чувствительность от температуры существенно не изменялась.

Пиксели № 1—4 проявлялись на всем диапазоне температуры АЧТ. Указанные пиксели ФПУ приемника "А" (изменения чувствительности составляют 100—200 для приемника "А") проявляют себя во всем диапазоне АЧТ. В то же время изменения чувствительности пикселей происходит как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. При подробном рассмотрении всех найден-

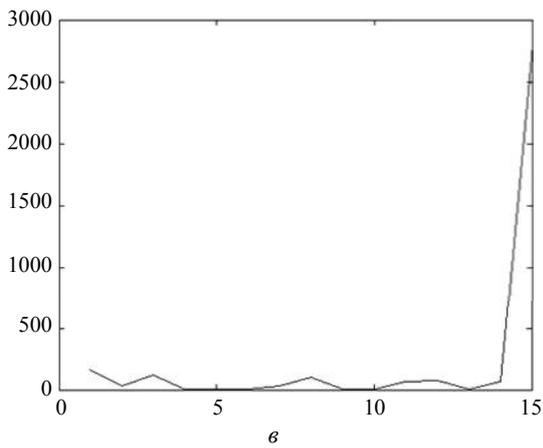
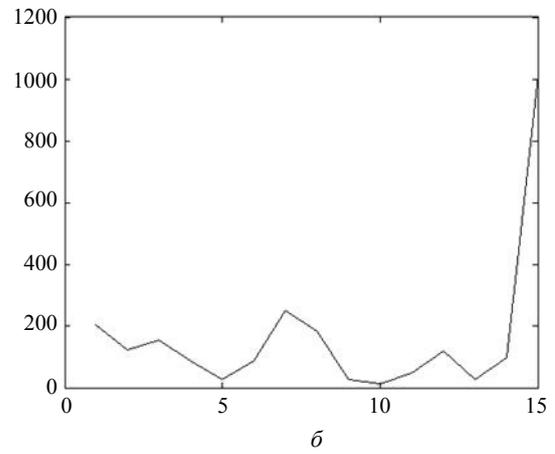
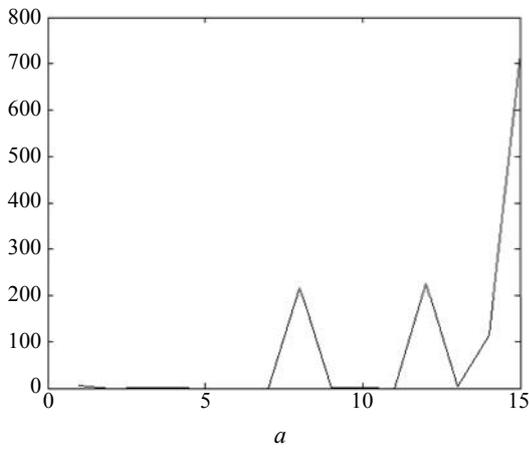
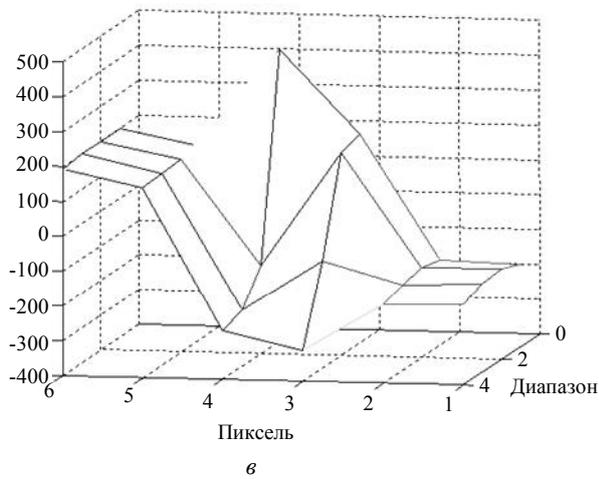
ных ЧДЭ обнаруживаются элементы, чувствительность которых может изменяться не монотонно во всем диапазоне температур, а резко и на ограниченных участках диапазона. Так, на рис. 5, б пиксели № 3 и 4 на участке 2—3 могут не обнаружиться как ДЭ, на остальных участках диапазона изменение чувствительности может составлять более 500.

Для анализа зависимости поведения ЧДЭ от температуры АЧТ были рассчитаны и построены зависимости, представленные на рис. 6. Здесь по оси абсцисс отмечены 15 комбинаций — возможных вариантов изменения чувствительности ДЭ для участков 4, 3, 2, 1 представленных в десятичном коде. Например, ДЭ обнаружился только в диапазоне 1 — соответствующий двоичный код 0001, ДЭ — только в диапазоне 3 — код 0100, ДЭ в диапазонах 1 и 4 — код 1001. По оси ординат отмечено соответствующее количество элементов с тем или иным кодом, встречающихся в найденной таблице ДЭ ФПУ.

Из рис. 6, а—в видно, что для всех приемников максимальное количество ДЭ соответствует коду 1111, т. е. коду, при котором ДЭ проявляет себя на всех четырех температурных диапазонах. Наиболее стабильно проявляет себя приемник "А", для которого существенное количество ДЭ приходится на коды 8, 12 и 14, что соответствует двоичным кодам 1000, 1100 и 1110.



**Рис. 5. Чувствительность пикселей при изменении температуры АЧТ в течение дня:**  
*a* — приемник "А"; *б* — "В"; *в* — "С"



**Рис. 6. Распределение количества вариантов чувствительности дефектных пикселей:**  
*a* — приемник "А"; *б* — "В"; *в* — "С"

Для приемника "С" существуют все варианты ДЭ, кроме вариантов ДЭ с кодами 4, 5, 6, 9, 10, 13, что соответствует двоичным кодам 0100; 0101; 0110; 1001; 1010; 1101.

Наибольшей нестабильностью отличаются ДЭ приемника "В". Здесь присутствуют все комбинации поведения ДЭ, исключая код 15, наибольшее количество здесь имеют элементы кода 7 — 0111 в двоичном коде, т. е. элементы, проявляющиеся как дефектные в диапазонах 1—3.

Для оценки частоты появлений ЧДЭ при разных температурах АЧТ и многократных циклах заморозки ФПУ введем понятие ранга ДЭ, под которым будем понимать количество дней, когда элемент ФПУ обнаружился как дефектный. На рис. 7, а—в отображено распределение рангов ДЭ в зависимости от температуры в течение 15 дней наблюдения.

Для приемника "А" наблюдается уменьшение числа элементов по всем рангам при уменьшении температуры. Особенно большие изменения наблюдаются для рангов № 1 и 15.

При уменьшении температуры АЧТ:

1. Число элементов ранга № 15 уменьшается до 40 %.
2. Число элементов ранга № 1 изменяется на 30—40 % при максимуме количества элементов при 30 °С.
3. Число элементов для рангов № 2—14 уменьшается и колеблется в пределах 50—100 %.

Для приемника "В" изменения по рангам выражены более характерно, чем для "А" и "С". Так, строгой зависимости количества ранжированных ДЭ от температуры не наблюдается. Каждый ранг имеет свой индивидуальный характер зависимости от температуры. Самое большое количество ДЭ

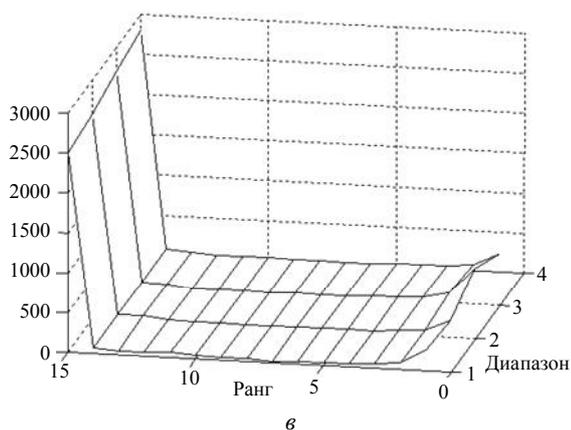
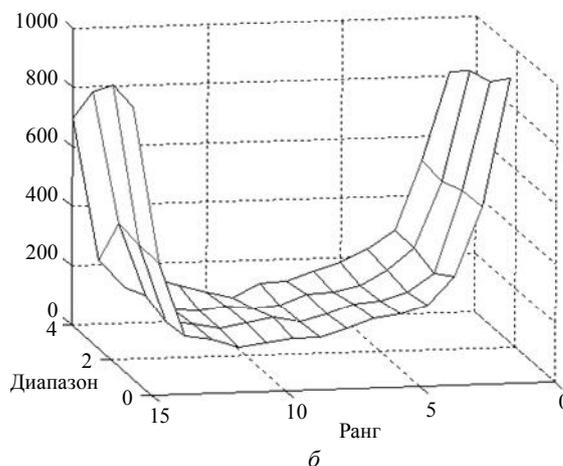
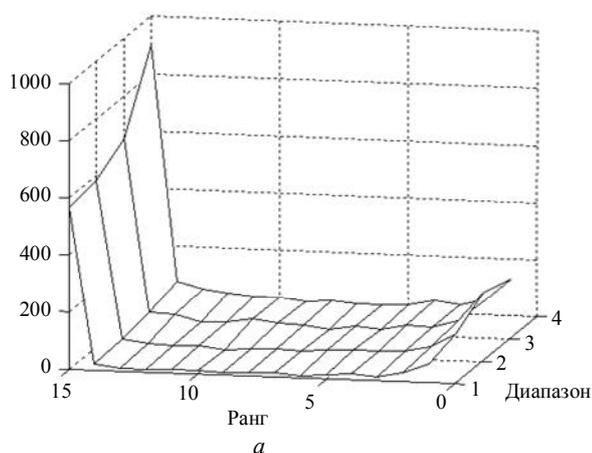


Рис. 7. Распределение рангов ДЭ за 15 дней:  
а — приемник "А"; б — "В"; в — "С"

Здесь:

- ранг № 1 — имеют ДЭ, которые проявляют себя достаточно редко. Их количество составляет значительное число от общего числа ЧДЭ;
- ранг № 15 — имеют ДЭ, которые проявляют себя всегда. Данные элементы являются постоянными и не зависят от циклов заморозки ФПУ;
- ранги № 2—14 — имеют ДЭ, количество которых незначительно, но в сумме они могут составлять около половины всех обнаруженных ЧДЭ.

имеют элементы рангов № 14, 15, 1, 2, 3, около 50 % всех ДЭ имеют ранги № 4—13.

Для приемника "С" наблюдается уменьшение числа элементов по всем рангам при уменьшении температуры. Относительно приемников "А" и "В" изменения по рангам выражены более равномерно. Например, число элементов ранга № 15 уменьшается до 20 %, ранга № 1 изменяется на 50—80 % при максимуме количества для 30 °С, для

рангов № 2—14 число элементов уменьшается и колеблется в пределах 20—40 %.

### Заключение

Исследования показали наличие элементов ФПУ, чувствительность которых при текущем включении прибора соответствует общему фону чувствительности большинства элементов ФПУ, но при новом цикле заморозки их чувствительность может значительно увеличиться или уменьшиться. Количество ЧДЭ также изменяется при каждом новом цикле заморозки ФПУ, поэтому для получения качественного изображения предлагается при каждом включении прибора выполнять новый цикл обнаружения ЧДЭ.

Существуют ЧДЭ, которые не изменяют своих параметров при новых циклах заморозки. Их количество от общего числа ЧДЭ для ФПУ составляет: "А" — 86, "В" — 25 и "С" — 83 % (показатель в 25 % отмечает существенную нестабильность элементов ФПУ относительно показателей 86 и 83 %). Однако хранить таблицу ЧДЭ в ПЗУ прибора нецелесообразно, так как характер и количество значительной части ДЭ зависят от циклов заморозки ФПУ.

Обнаружение ЧДЭ для приемников следует проводить для всего температурного диапазона ввиду зависимости от него чувствительности элементов (см. рис. 6). При работе с ФПУ нового типа следует предварительно оценить зависимость ЧДЭ от температуры АЧТ и циклов заморозки. Однако для обеспечения качественного обнаружения ЧДЭ при работе унифицированного модуля [1] обработки сигналов в составе тепловизионного прибора целесообразно обеспечить в последнем автономный цикл исследования приемника для различных температурных режимов.

Характер зависимости количества ранжированных ЧДЭ от температуры АЧТ для приемников "А" и "С" существенно не отличается. Значительное количество составляют элементы, редко проявляющиеся как дефектные — один раз за 15 дней. Также резко выделяются ДЭ, которые проявляются ежедневно. Указанные элементы по рис. 7, а—в составляют резкий контраст с элементами, проявляющимися 4—13 раз за 15 дней. Для приемника "В" количество элементов рангов № 4—13 значительно выше, чем для "А" и "С", что показывает наихудшую среди исследуемых приемников стабильность элементов и, следовательно, наихудшее их качество.

### Литература

1. *Кремис И. И., Однолько Ю. Ф.* Унифицированная система обработки сигналов многоэлементного фотоприемного устройства ИК-диапазона на основе микросхемы программируемой логики типа FPGA// Прикладная физика. 2007. № 4. С. 133—140.
2. *Овсяк В. Н., Курьшиев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др.* Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. — Новосибирск: Наука, 2001. — 376 с.
3. *Болтарь К. О., Грачев Р. В., Полунеев В. В.* Определение дефектных элементов матричных тепловизионных приемников в процедуре двухточечной коррекции// Прикладная физика. 2009. № 109(1). С. 42—45.
4. *Грачев Р. В.* Калибровка параметров тепловизионной матрицы для двухточечной коррекции в блоке электронной обработки на базе микроконтроллера МС-24// Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ. 2008. Вып. 3. С. 148—156.
5. *Кремис И. И., Однолько Ю. Ф.* Способы и принципы построения алгоритмов ЦОС многоэлементного фотоприемного устройства ИК-диапазона на основе микросхемы программируемой логики// Прикладная физика. 2008. № 3. С. 101—111.
6. *Болтарь К. О., Бовина Л. А., Саганов Л. Д., Стафеев В. И.* Тепловизор на основе "смотрящей" матрицы из CdHgTe формата 128×128// Там же. 1999. № 2. С. 50—54.

## Results of the study to sensitivity photocell matrix HgCdTe photodetector in different warm-up mode

*I. I. Kremis*

Novosibirsk Branch of the Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, "Technological Design Institute of Applied Microelectronics",  
2/1, Academician Lavrentev av., Novosibirsk, 630090, Russia  
E-mail: igor21738@ngs.ru

*The presented results of the study to sensitivity photocell matrix photodetector device production Sofradir, Institute of Semiconductor Physics and Orion Research-And-Production Association at passing photodetector new cycles frost from 293 K before 77 K. Is considered dependencies to sensitivity element from the temperature absolutely black body. Estimation of the frequency of the appearances fault is given on sensitivity element at miscellaneous temperature absolutely black body and frequentative cycles frost photodetector. The offered algorithm of the finding fault on receiver*

*element sensitivity. The operating range of the lengths of the waves under investigation receiver corresponds to distant infrared area 8—14 mkm.*

PACS: 85.60.Bt

*Keywords:* elements fault, non-sensitive.

Bibliography — 6 references.

*Received 5 December 2009*