

**Заключение**

Выдержка при высоких температурах приводит к частичному отжигу дефектов и, соответственно, к улучшению параметров фотодиодов *p-n*-GaP: увеличению дифференциального сопротивления

диода при нулевом смещении и уменьшению коэффициента неидеальности.

Статья поступила в редакцию 26 июня 2008 г.

## GaP *p-n*-junction investigation at temperatures up to plus 500 °C

V. S. Rudnevsky, V. I. Stafeev

Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

*Photodiodes based on gallium phosphide with p-n-junction have been investigated. Photosensitivity characteristics within temperature range from minus 183 up to plus 500 °C are represented. The sensitivity peak shifts from 430 to 510 nm with temperature change from minus 183 up to plus 500 °C. From 0.044 up to 0.13 A/W current sensitivity increase is explained by absorption in gallium phosphide at heightened temperatures. The recombination via impurity levels predominates in GaP photodiodes at temperature below 200 °C. The diffusion current appears at temperature more than 200 °C.*

PACS: 85.60.Dw

УДК 621.383

## Определение дефектных элементов матричных тепловизионных фотоприемников в процедуре двухточечной коррекции

К. О. Болтарь, Р. В. Грачев, В. В. Полунеев

ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

*Рассмотрен метод обнаружения дефектных элементов матричных фотоприемных устройств (МФПУ) в процессе калибровок. Обнаружение дефектных элементов осуществляется по порогам показателя дрейфа, оценок временного шума и постоянной составляющей. После горячей калибровки определяют коэффициенты чувствительности, по которым также происходит обнаружение дефектов. Приведены распределения по элементам МФПУ и гистограммы значений дрейфа и частотных зависимостей шума, измеренные с помощью формирователя тепловизионного изображения на основе МФПУ формата 256×256, спектрального диапазона 8—12 мкм на фотодиодах из полупроводникового соединения кадмий—ртуть—теллур (КРТ).*

PACS: 85.60.Bt

**Введение**

Первичная обработка тепловизионных изображений связана с неоднородностью характеристик ИК-детекторов МФПУ, порождающей геометрический шум в изображении. Для исправления неоднородности чувствительности и постоянной составляющей фотоотклика, как правило, используется известная формула двухточечной коррекции

$$P_{ij} = \frac{S_{ij} - b_{ij}}{k_{ij}}, \quad (1)$$

где  $S_{ij}$  — исходный сигнал, считанный с детектора;  
 $b_{ij}$  — постоянная составляющая детектора;  
 $k_{ij}$  — коэффициент чувствительности детектора;  
 $P_{ij}$  — выровненный отклик.

Метод двухточечной коррекции (1) требует выполнения двух контрольных измерений (калибро-

вок) для измерения параметров  $b_{ij}$  и  $k_{ij}$ . Данные измерения осуществляют посредством вычисления "холодного" и "горячего" кадров с использованием абсолютно черного тела (АЧТ), нагретого, соответственно, сначала до температуры, принятой за "холодную", затем — до температуры, принятой за "горячую".

Как правило, "холодный" и "горячий" кадры вычисляются путем накопления и усреднения некоторого числа кадров, считанных при заданной температуре АЧТ [1].

Однако помимо неоднородности параметров детекторов, в МФПУ встречаются дефектные элементы, отклик которых неадекватен изображению сцены. Появление дефектных элементов может быть обусловлено электрическими или механическими дефектами при изготовлении МФПУ, влиянием шума  $1/f$  и т. д. [1]. Для обеспечения качественного выходного изображения необходимо нейтрализовать отклики дефектных элементов, заменив их тем или иным образом на более адекватные сцене значения.

### Поиск дефектных элементов

Для обнаружения дефектных элементов предлагается использовать данные, полученные в результате процедур калибровок, т. е. "холодный" и "горячий" кадры. Однако применяемые для измерения этих кадров процедуры обычного усреднения не учитывают известное явление дрейфа аддитивной составляющей  $b_{ij}$ . Дрейф может быть вызван изменениями температуры чувствительного элемента, электронных компонентов блока обработки изображения, объектива и т. д. Одновременный дрейф постоянных составляющих всех фоточувствительных элементов на одинаковую величину обычно компенсируется в блоке цифровой обработки изображения и на качество изображения и распознавание объектов не влияет. Однако этот дрейф сильно зависит от внешних условий проведения процедуры калибровки и может быть ошибочно включен в оценку временного шума. Для адекватного измерения шума с учетом дрейфа метод измерения "холодного кадра" модифицируются следующим образом.

Сначала происходит накопление некоторого количества  $N_{cold}$  "холодных кадров" с некоторой задержкой  $t_d$ . Затем по накопленным значениям для каждого элемента строится наилучшая прямая с помощью метода наименьших квадратов.

$$y_{ij} = d_{ij}x + b_{ij}, \quad (2)$$

где  $b_{ij}$  — постоянная составляющая элемента МФПУ, используемая для осуществления двухточечной коррекции;

$d_{ij}$  — показатель (коэффициент) дрейфа.

Коэффициенты в выражении (2) определяются следующим образом:

$$d_{ij} = \frac{\sum_{k=0}^{N_{cold}-1} \left(k - \frac{N_{cold}}{2}\right) S_{ij}^{(cold)}[k]}{\sum_{k=0}^{N_{cold}-1} \left(k - \frac{N_{cold}}{2}\right)^2};$$

$$b_{ij} = \overline{S_{ij}^{(cold)}} - d_{ij} \frac{N_{cold}}{2},$$

где  $k$  — номер измерения в пределах от 0 до  $N_{cold} - 1$ ;

$S_{ij}^{(cold)}[k]$  —  $k$ -е измерение отклика элемента  $(i, j)$ ;

$\overline{S_{ij}^{(cold)}}$  — средний отклик элемента  $(i, j)$ .

Среднеквадратическое отклонение (СКО) измеренных значений от построенной прямой дает оценку временного шума на частоте, определяемой задержкой  $t_d$  между накапливаемыми кадрами:

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{N_{cold}-1} \left(S_{ij}^{(cold)}[k] - (d_{ij}k + b_{ij})\right)^2}{N_{cold}}}.$$

Горячая калибровка осуществляется усреднением  $N_{heat}$  накопленных кадров и вычислением коэффициентов  $k_{ij}$  по известной формуле

$$\overline{S_{ij}^{(heat)}} = \frac{1}{N_{heat}} \sum_{k=0}^{N-1} S_{ij}^{(heat)}[k];$$

$$k_{ij} = \frac{\overline{S_{ij}^{(heat)}} - \overline{S_{ij}^{(cold)}}}{\overline{S}^{(heat)} - \overline{S}^{(cold)}},$$

где  $\overline{S}^{(heat)}$  и  $\overline{S}^{(cold)}$  — средние значения "холодного" и "горячего" кадров.

После осуществления процедур калибровки для элементов МФПУ формируются следующие наборы данных:

$B = \{b_{ij}\}$  — матрица постоянных составляющих;

$D = \{d_{ij}\}$  — матрица показателей дрейфа постоянных составляющих;

$\Sigma = \{\sigma_{ij}\}$  — матрица среднеквадратических оценок временного шума;

$K = \{k_{ij}\}$  — матрица коэффициентов чувствительности;

$S^{(heat)} = \{S_{ij}^{(heat)}\}$  — "горячий" кадр.

Данные матрицы предлагается использовать для обнаружения (отбраковки) дефектных элементов по следующим показателям:

- отбраковка по значениям постоянных составляющих посредством введения порога  $Ts_b$ , т. е. максимально допустимого значения  $b_{ij}$ . При

задании значения порога  $T_{S_b}$  необходимо помнить, что среднее по матрице значение  $\bar{b}$  прямо пропорционально установленному времени накопления фототока в детекторах МФПУ;

- отбраковка по среднеквадратической оценке временного шума  $\sigma_{ij}$  путем введения порога  $\sigma_{\max}$ , т. е. максимально допустимого значения шума;

- отбраковка по показателям дрейфа путем введения порога  $d_{\max}$ , означающего максимально допустимый модуль отклонения значения  $d_{ij}$  от среднего дрейфа по кадру;

- использование матрицы  $S^{(heat)}$ , полученной в процедуре "горячей" калибровки. Отбраковка происходит установкой порогов  $TH$  и  $TL$ , ограничивающих значения  $S_{ij}^{(heat)}$  сверху и снизу;

- использование порогов  $T_{S_h}$  и  $T_{S_l}$  для ограничения разностных значений  $S_{ij}^{(heat)} - S_{ij}^{(cold)}$  сверху и снизу. Это ограничение необходимо, так как элемент может иметь удовлетворительные значения "горячего" и "холодного" кадров, но низкую чувствительность (например, из-за экранировки излучения для этого элемента) или слишком высокую чувствительность (обычно из-за добавления сигнала от других элементов вследствие дефектов большой интегральной схемы (БИС) считывания МФПУ).

### Экспериментальные результаты

Эффективность модифицированной процедуры холодной калибровки исследована на примере формирователя тепловизионного изображения на основе МФПУ формата  $256 \times 256$ , спектрального диапазона 8—12 мкм на основе фотодиодов КРТ [2].

На рис. 1 приведено распределение выходного сигнала (постоянных составляющих  $b_{ij}$ ) по строке МФПУ, на рис. 2 — гистограмма распределения значений  $b_{ij}$  всех элементов МФПУ, на рис. 3 и 4 — распределение шума элементов по строке и гистограмма временного шума на частоте 6,25 Гц при кадровой частоте 50 Гц (анализировались отсчеты каждого восьмого кадра), на рис. 5 — полученные экспериментально зависимости среднего значения шума элементов МФПУ от частоты (кривая 1) и СКО шума элементов МФПУ от частоты (кривая 2).

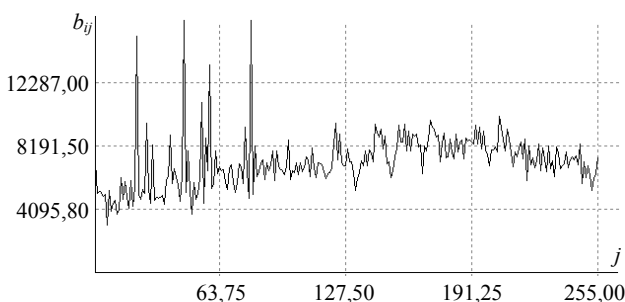


Рис. 1. Распределение выходного сигнала по строке МФПУ

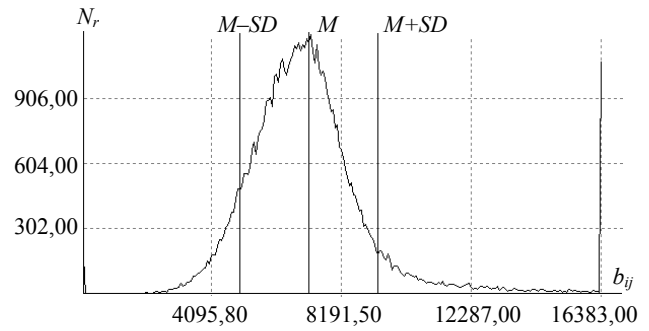


Рис. 2. Гистограмма значений постоянных составляющих  $B$ :  $N_r$  — число реализаций;  $M$  — мат. ожидание;  $SD$  — стандартное отклонение

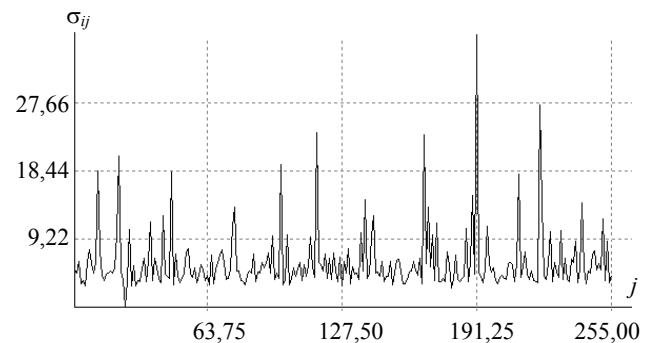


Рис. 3. Распределение временного шума элементов по строке МФПУ

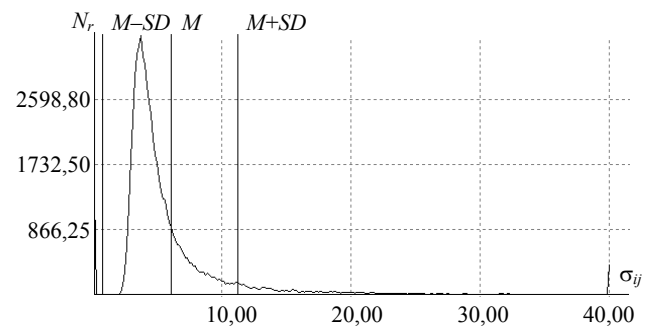


Рис. 4. Гистограмма временного шума элементов МФПУ на частоте 6,25 Гц

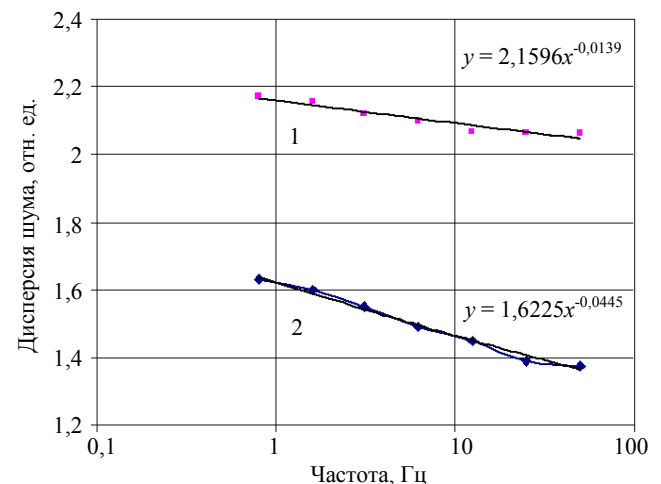


Рис. 5. Зависимость среднего значения шума (1) и СКО шума (2) элементов МФПУ от частоты

Частота определялась по формуле  $f = \frac{1}{t_d}$ , где  $t_d$  — задержка между накапливаемыми кадрами. При уменьшении частоты от 50 до 0,8 Гц среднее значение шума увеличилось на 5 %, а СКО шума — на 30 %. На низкой частоте шумящие элементы проявляются более резко, поэтому браковать их следует по избыточному шуму на низкой частоте. Шумящие на низкой частоте элементы проявляются на ИК-изображении в виде медленно мерцающих точек. На рис. 6 показано распределение значений показателя дрейфа по строке МФПУ, на рис. 7 — гистограмма значений показателя дрейфа элементов МФПУ. Элементы, имеющие большое отклонение значения показателя дрейфа  $d_{ij}$  от среднего по МФПУ, проявляются на ИК-изображении однородного фона в виде светлых или темных точек (так называемый "геометрический шум"), который растет с течением времени после калибровки. Такие элементы необходимо браковать.

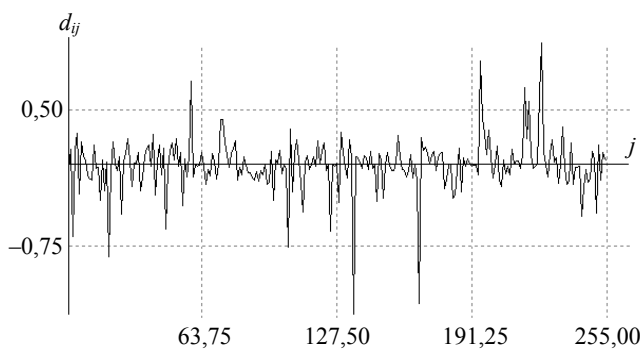


Рис. 6. Распределение значений показателя дрейфа по строке МФПУ

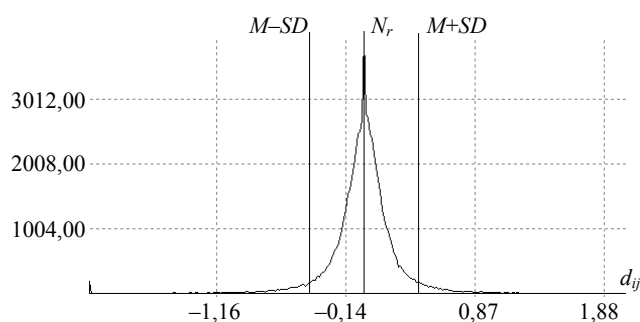


Рис. 7. Гистограмма значений показателя дрейфа элементов МФПУ

### Исправление дефектных элементов

Для исправления дефектов применяется блок электронной обработки на базе цифрового сигнального процессора 1892ВМ2Я серии "Мультикор", разработанного ГУП НПЦ "Элвис" [3] и функционирующего в блоке обработки на частоте 80 МГц. При этом все обнаруженные дефекты

МФПУ исправляются в реальном времени при кадровой частоте 50 Гц [4]. Методы, используемые для исправления, приведены на рис. 8. На рис. 8, а изображены методы замены дефектного элемента (в центре) усреднением двух соседних недефектных элементов, на рис. 8, б дефектный элемент заменяется на ближайший к нему недефектный.

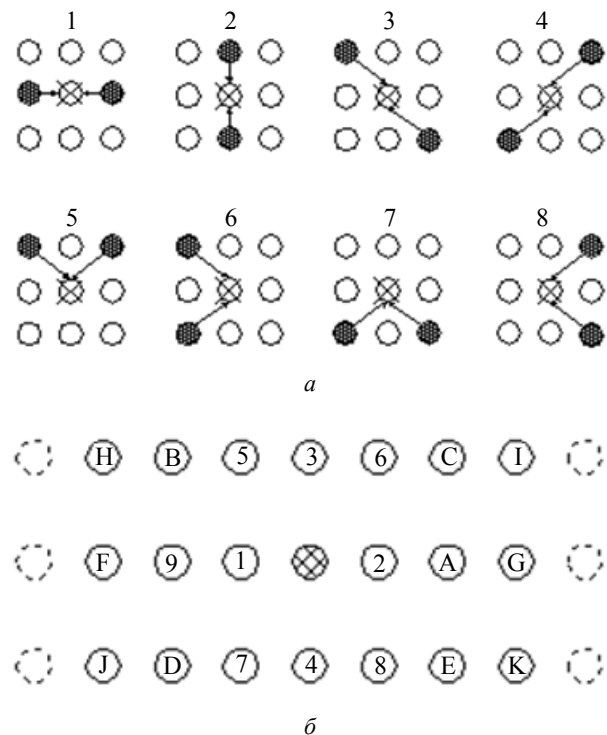


Рис. 8. Методы исправления дефектных элементов (а, б)

Для исправления каждого пикселя изображения выбирается первый из методов, задействованные элементы в котором не являются дефектными (в порядке от метода 1 до метода 8, см. рис. 8, а, а затем от метода 1 до метода К, см. рис. 8, б).

### Заключение

Рассмотренные способы обнаружения дефектов по данным, полученным в процедурах холодной и горячей калибровки, позволяют обнаружить практически все дефектные элементы МФПУ. Предложенный метод их исправления дает возможность значительно улучшить качество результирующего изображения. Метод проверен на практике в рамках блока электронной обработки на основе цифрового сигнального процессора серии "Мультикор". Дальнейшая работа по улучшению способов обнаружения дефектов может продвигаться в сторону усовершенствования методов определения шумящих элементов, а именно — мерцающих элементов, имеющих случайные "выбросы" яркости, связанные с шумом типа  $1/f$ .

## Л и т е р а т у р а

1. Грачёв 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.

2. Стафеев В. И., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Акимов Е. А. и др. Матричные фотоприемные устройства среднего и дальнего инфракрасных диапазонов спектра на основе фотодиодов из  $Cd_xHg_{1-x}Te$ // Физика и техника полупроводников. 2005. Т. 39. Вып. 10. С. 1257—1265.

3. Солохина Т. В., Петричкович Я. Я. и др. Микросхемы базовых серий "Мультикор". Сигнальный микроконтроллер 1892ВМ2Т (МС-24)// CHIP NEWS (Инженерная микроэлектроника). 2005. № 2 (95). С. 20—31; № 3 (96). С. 20—26.

4. Александров Ю. Н., Глушков А. В., Грачёв Р. В., Солохина Т. В. Оценка возможностей сигнальных контроллеров серии "Мультикор" по обработке тепловизионных видеопотоков в реальном времени// Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ. 2006. Вып. 2. С. 40—48.

Статья поступила в редакцию 1 июля 2008 г.

## Defective pixels detection during IR FPA two-point correction

K. O. Boltar, R. V. Grachev, V. V. Poluneev  
Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

*Detection of defective IR FPA pixels technique based on cold and hot calibrations process is presented. For cold calibration  $N$  consequent frames are accumulated. Applying the least mean square method to  $N$  accumulated values of every pixel, the best linear approximation is built, defining offset for this pixel and offset drift index. Root-mean-square deviation of measured values from the approximation line evaluates the temporal noise at frequency defined by delay between consequent frames. Defective pixels detection is accomplished by using thresholds for drift indexes, temporal noise and offset values. Sensitivity coefficients of every pixel calculated during hot calibration are also used for defective pixels detection. A set of defective pixel correction methods is presented. Methods are implemented using Multicore series digital signal processor which performs real-time processing of IR FPA frames. Spatial and statistical distributions of drift indexes and noise versus frequency dependence are presented for infrared camera based on LWIR HgCdTe 256×256 pixels IR FPA.*

PACS: 85.60.Bt

\* \* \*