

УДК 621.383

PACS: 07.07.Df, 07.57.-c, 81.05.Ea, 81.65.Rv

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-5-68-74

EDN: IOVTWG



Низкочастотные шумы в МФПУ формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм на основе антимионида индия

К. О. Болтарь, П. В. Власов, А. А. Лопухин, Е. В. Пермикина

Рассмотрены закономерности низкочастотного шума в крупноформатных матричных фотоприемных устройствах среднего инфракрасного диапазона на основе антимионида индия и его влияние на качество тепловизионного изображения после проведения коррекции неоднородности. Установлено, что низкочастотный шум меньше при изготовлении фотоприемников из слитков антимионида индия с увеличенной концентрацией примеси.

Ключевые слова: фотоприемное устройство, низкочастотный шум, матрица фотодиодов, антимионид индия.

Введение

Шумы фотоприемного устройства ограничивают его температурное разрешение [1]. Пространственный шум является следствием неоднородности характеристик отдельных элементов фоточувствительной матрицы (чувствительность, темновой ток и т. д.), и может быть уменьшен двухточечной коррекцией неоднородностей. С течением времени происходят процессы, приводящие к раскалибровке тепловизионного изображения [2–4].

В МФПУ формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм на основе антимионида индия [5–7] обнаружен низкочастотный шум, проявляющийся в том, что через определенное время после включения МФПУ в отдельных пикселях происходит понижение сигнала. Через некоторое время после двухточечной коррекции неоднородности на однородном фоне проявляются отдельные более темные пиксели. На рис. 1 представлено тепловизионное изображение спустя пять минут работы МФПУ после проведения двухточечной коррекции неоднородности, испещренное «темными точками».

Болтарь Константин Олегович^{1,2}, нач. НТК, д.ф.-м.н., профессор.

Власов Павел Валентинович¹, вед. инженер.

Лопухин Алексей Алексеевич¹, нач. участка измерений, к.т.н.

Пермикина Елена Вячеславовна¹, вед. инженер.

¹ АО «НПО «Орион».

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

E-mail: orion@orion-ir.ru

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 24.08.2023

Принята к публикации 5.09.2023

© Болтарь К. О., Власов П. В., Лопухин А. А., Пермикина Е. В., 2023

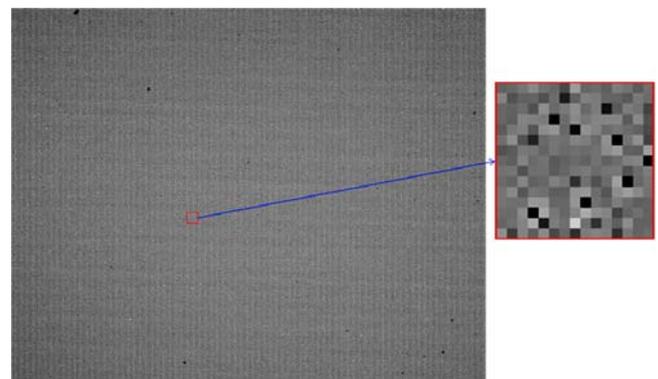


Рис. 1. Тепловизионное изображение спустя пять минут работы МФПУ после проведения двухточечной коррекции неоднородности

Основные закономерности

В работе установлены основные закономерности низкочастотного шума такого типа.

Первая закономерность состоит в том, что при появлении «темной точки» происходит уменьшение уровня выходного сигнала в пикселе на величину от 12 до 60 ед. АЦП, что составляет примерно от 3 до 15 СКО (средне-квадратичное отклонение) шума матрицы. На рис. 2 показана область матрицы формата 5×5 пикселей с двумя «темными точками», а также таблицы со значениями разницы выходного сигнала в пикселях данной области между двумя кадрами – кадра после и до появления «темной точки».

На примере пикселя № 7 видно, что понижение сигнала в нем составило 31 ед. АЦП, что соответствует примерно 8 СКО шума. Зачастую одновременно с уменьшением выходного сигнала в одном пикселе, наблюдается увеличение сигнала в соседних пикселях, в том числе соседних по диагонали.

Во-вторых, проявление низкочастотного шума в элементе происходит спонтанно и резко. На рис. 3 представлено распределение выходного сигнала во времени, из которого видно, что сигнал в одном из пикселей (красная кривая) имел два разных тренда до и после понижения сигнала. Даже при получении данных на высокой кадровой частоте 2,5 кГц появление «темной точки» происходит в пределах одного кадра.

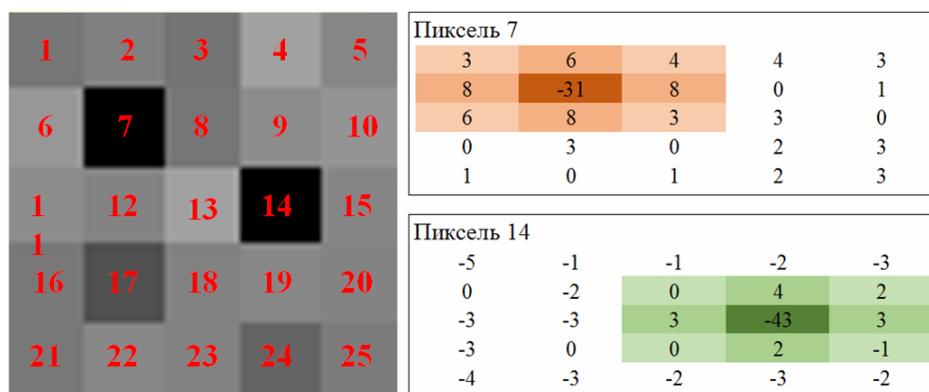


Рис. 2. Область матрицы формата 5×5 и таблицы со значениями разницы выходного сигнала

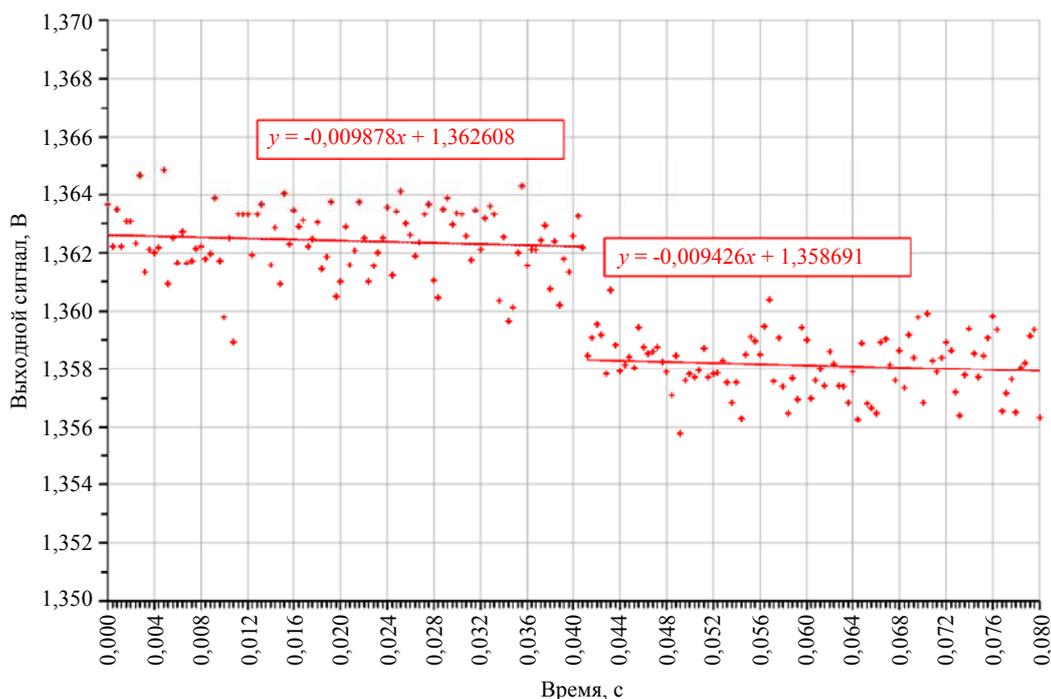


Рис. 3. Распределение выходного сигнала одного пикселя во времени

В-третьих, низкочастотные шумы не имеют строгой пространственной локализации – при многократном включении МФПУ расположение «темных точек» по площади матрицы изменяется от включения к включению и соответствует различным пикселям изображения. Можно заключить, что причина эффекта не обусловлена характеристиками конкретных элементов матрицы, и даже, вероятно, любой элемент матрицы потенциально является «темной точкой».

В-четвертых, эффект возникновения низкочастотных шумов является фоновозависимым. На рис. 4 представлено интегральное распределение количества пикселей с «темными точками» по величине падения сигнала в этих пикселях. Графики зависимостей, полученные при разных температурах фона (температурах имитатора абсолютно черного тела АЧТ) в пределах одной матрицы, показывают, что с увеличением температуры количество пикселей с большой величиной падения сигнала возрастает интенсивнее, чем при более низких температурах АЧТ и практически совпадают для различных матриц, изме-

ренных при одной и той же температуре фона.

Кроме того, установлено, что низкочастотный шум не связан с темновыми токами (практически не зависит от температуры криостатирования), слабо зависит от обратного напряжения смещения на фотодиодах, не обусловлен внешними процессами в охлаждаемой зоне МФПУ (не изменился после длительной переоткачки в течение 280 часов) и не выявлен у матриц с большим шагом между элементами – 30 и 40 мкм.

Процесс появления «темных точек» носит долговременной и при этом затухающий характер. Получены зависимости количества появляющихся «темных точек» от момента времени их появления (рис. 5) в течение длительного временного интервала – 3 часа 25 минут (зеленая кривая). Зеленая кривая аппроксимируется логарифмом и, даже, через 3,5 часа для данной матрицы кривая не выходит на насыщение. Процент «темных точек» на графике определен при пороге 20 ед. АЦП, что в 5 раз больше среднего значения временного (высокочастотного) шума по матрице.

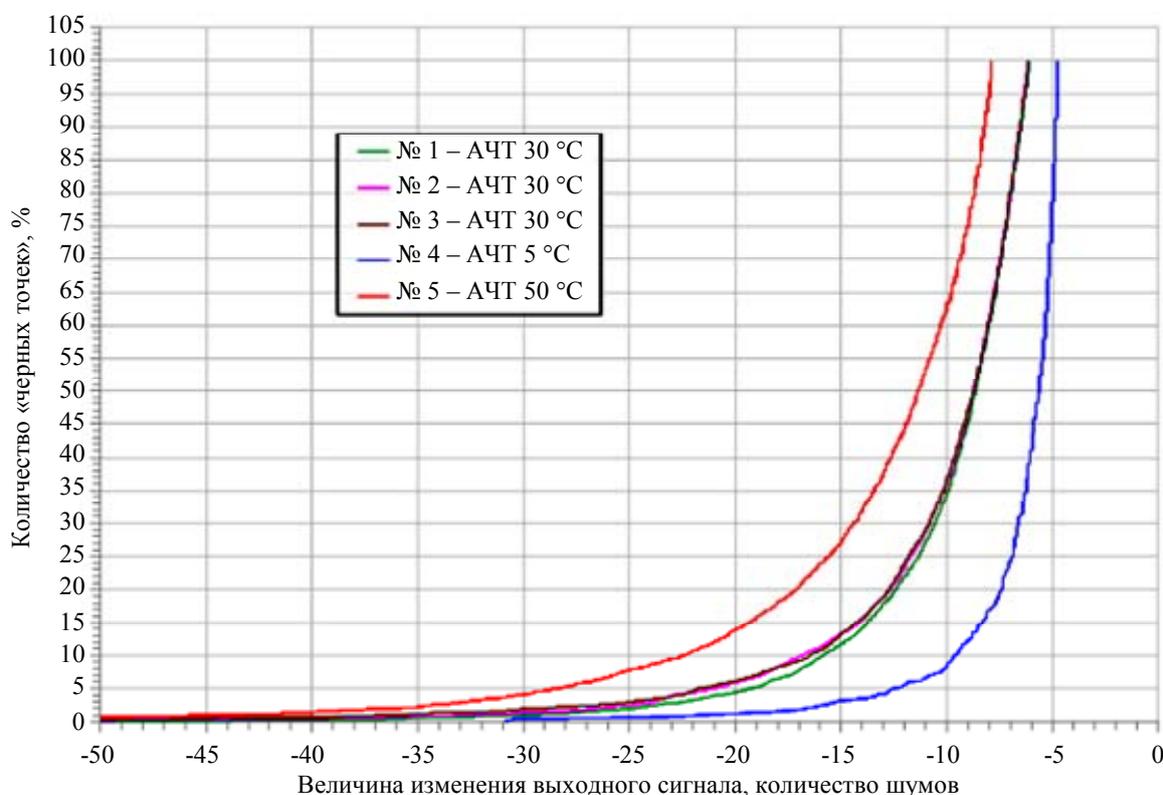


Рис. 4. Интегральные распределения количества пикселей с «темными точками» по величине падения сигнала в пикселях при различных температурах фона (АЧТ)

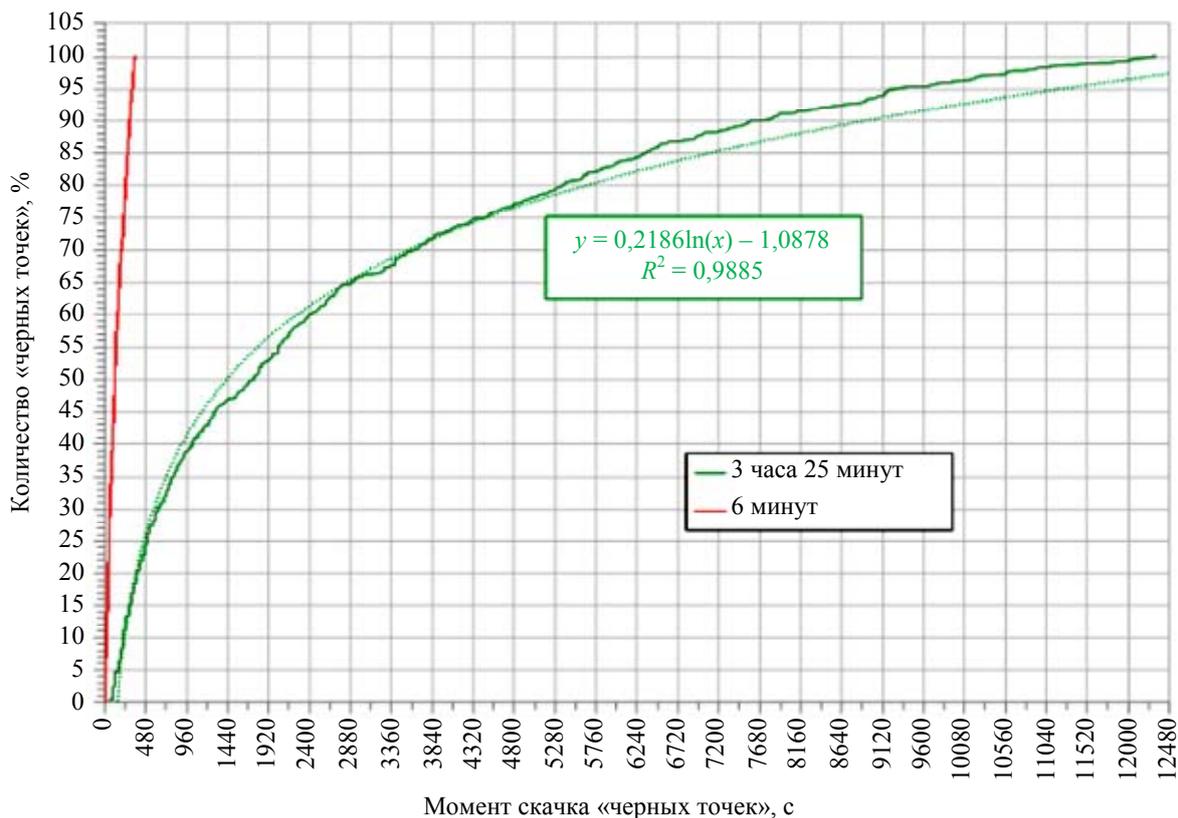


Рис. 5. Зависимости количества появляющихся «темных точек» от времени их возникновения

Анализ параметров большого числа фотодиодных матриц (МФЧЭ) на основе антимионида индия показал, что возникновение и величина низкочастотного шума напрямую коррелируют с концентрацией примеси в слитках InSb, из пластин которых изготавливаются МФЧЭ. Можно выделить слитки InSb, из которых получают матрицы с малой величиной низкочастотного шума; слитки антимионида индия, матрицы которых отличаются большой величиной шума данного вида; и слитки с большим разбросом величины низ-

кочастотного шума по диаметру пластин. В таблице представлены параметры слитков антимионида индия, а на рис. 6 – зависимость количественной оценки «темных точек» (5 – мало «темных точек», 1 – много) от концентрации примеси в пластинах (красная кривая). Видна корреляция величины низкочастотного шума с концентрацией примеси в пластинах слитков. Одновременно с этим количество дефектных элементов («грубых» дефектов) [8] с увеличением концентрации примеси возрастает (коричневая кривая).

Таблица

Параметры слитков InSb

№ слитка	Концентрация при 77 К, см ⁻³		Плотность дислокации, см ⁻²		Подвижность при 77 К, см ⁻³		Средняя оценка по «черным точкам»
	Начало	Конец	Начало	Конец	Начало	Конец	
768	3,1×10 ¹⁴	2,5×10 ¹⁵	65	76	5,1×10 ⁵	2,2×10 ⁵	5
821	3×10 ¹⁴	2,1×10 ¹⁵	24	32	4,5×10 ⁵	2×10 ⁵	4,4
772	2×10 ¹⁴	1,8×10 ¹⁵	75	79	5,4×10 ⁵	2,6×10 ⁵	4
797	2,5×10 ¹⁴	2×10 ¹⁵	71	42	5,5×10 ⁵	2,5×10 ⁵	3,4
822	2,5×10 ¹⁴	1,1×10 ¹⁵	8	16	5×10 ⁵	2,5×10 ⁵	3,4
811	2×10 ¹⁴	5,7×10 ¹⁴	10	47	5,5×10 ⁵	3,7×10 ⁵	1,9
836	2,7×10 ¹⁴	6×10 ¹⁴	–	–	4×10 ⁵	5,1×10 ⁵	1,9

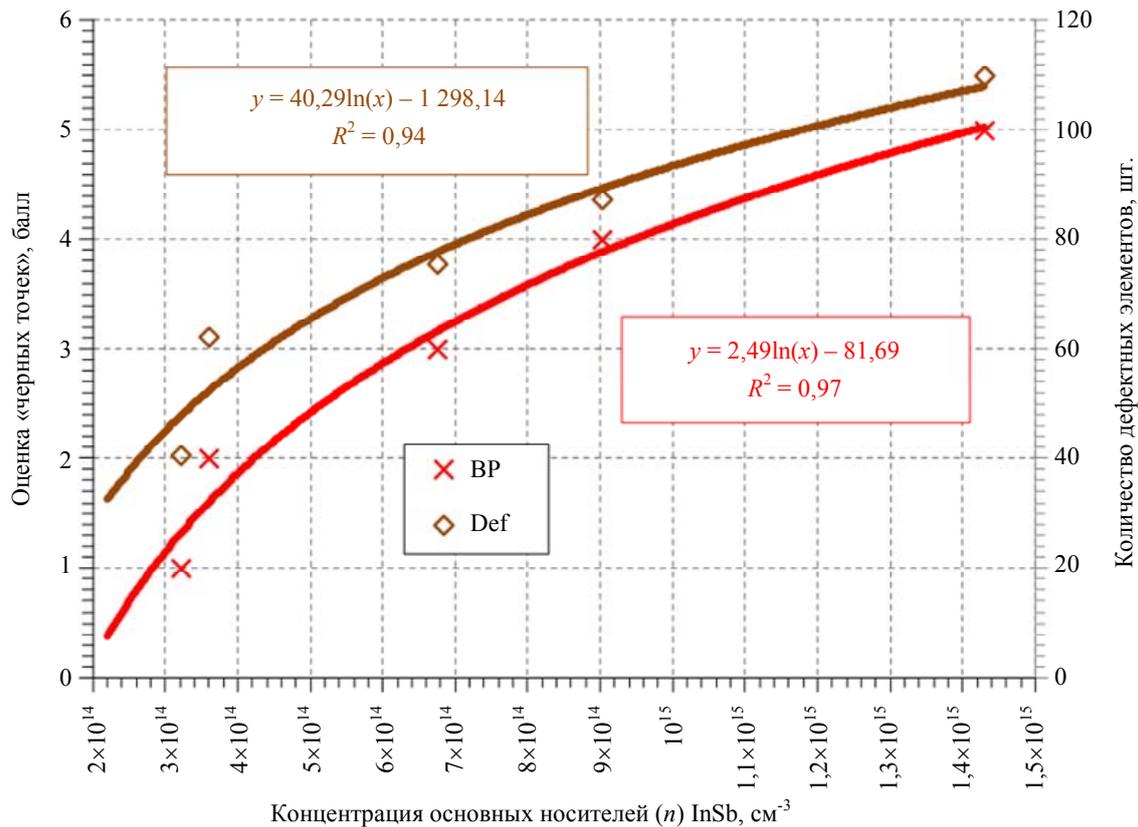


Рис. 6. Зависимости количественной оценки «темных точек» и количества дефектных элементов от концентрации примеси в пластинах антимионида индия

В матрицах на основе антимионида индия при температурах вблизи 80 К темновой ток преимущественно определяется генерацией/рекомбинацией в области пространственного заряда и обратно пропорционален квадратному корню концентрации легирующей примеси. Увеличение концентрации в слитках позволяет уменьшить темновой ток и, одновременно, подавить низкочастотный шум, что существенно улучшает параметры и стабильность тепловизионного изображения.

Обсуждение результатов

Спонтанное и резкое изменение тока отдельных фотодиодов не имеющего строгой пространственной локализации по матрице ФЧЭ в условиях теплового фона можно объяснить наличием вблизи границы $p-n$ -перехода множества микрообластей в области пассивированной поверхности полупроводника [9]. Граница $p-n$ -перехода становится изрезанной и имеются узкие перешейки, связывающие микрообласть с областью $p-n$ -пере-

хода, по которым неосновные носители, сгенерированные в объеме полупроводника фоновым излучением, и захватываемые микрообластями переходят в $p-n$ -переход и дают вклад в фототок. Незначительное изменение заряда в прилегающем к поверхностной области полупроводника слое диэлектрика вплоть до одного электрона в тонком перешейке к микрообласть может привести к отсечению этой области от $p-n$ -перехода и резкому уменьшению фототока диода на величину, пропорциональную площади микрообласть и плотности фототока.

Процессы зарядки поверхностных глубоких уровней при криогенной температуре имеют большие времена релаксации, наблюдавшиеся нами.

Уменьшенная часть фототока диода распределяется между соседними фоточувствительными элементами и частично рекомбинирует в отсеченной микрообласть, причем эта доля рекомбинированных носителей уменьшается с уменьшением скорости поверхностной рекомбинации, определяемой качеством пассивации поверхности антимионида индия.

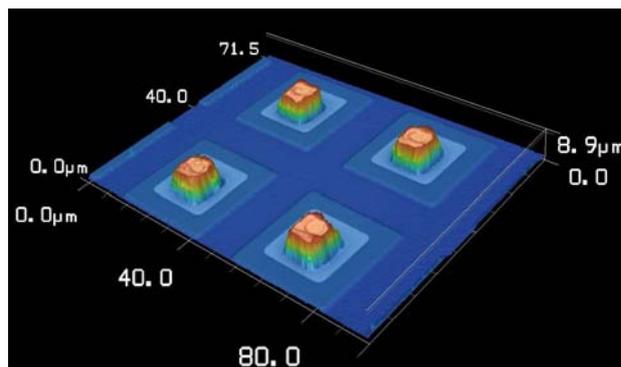
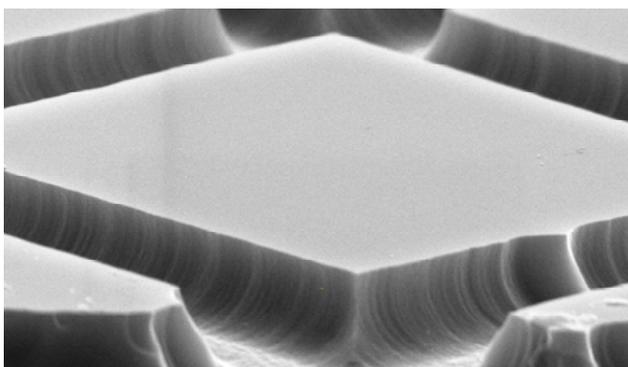


Рис. 7. Фото меза-структуры с шагом 15 мкм, высотой 0,7 мкм и неровностями границы и профилограмма меза-структуры с индиевыми микроконтактами 6×6×5 мкм

Оценим характерные размеры обедненных областей и изменения плотности зарядов. При фоновом токе ФЧЭ 100 пА для шага меза-структур 15 мкм и относительном размере охлаждаемой диафрагмы 1:4 плотность фототока составляет $0,44 \times 10^{-4}$ А/см². Характерное резкое изменение напряжения 1 мВ, что при времени накопления 10 мс и емкости в ячейке 0,4 пФ соответствует броску тока 4×10^{-14} А, что обеспечивается отключением от фотодиода площади сбора фототока порядка 9×10^{-10} см² с характерным размером области 0,3 мкм. Захват на уровень одного электрона в такой области соответствует изменению поверхностной плотности заряда более 10^{-9} см⁻², что и приводит к существенному изменению механизма протекания тока.

С увеличением концентрации легирующей примеси в антимониде индия эффект уменьшается, так как обедненные области уменьшаются в размерах и возможность их отсечения за счет влияния заряда одного электрона также уменьшается.

Указанные эффекты характерны для пассивации поверхности полупроводника с неоднородной по плоскости поверхности концентрацией зарядов и плотности глубоких уровней, несовершенства диэлектрика по периметру фоточувствительного элемента, пористостью поверхности. Эффект становится заметным в матрицах ФЧЭ с малым шагом фотодиодных элементов вследствие уменьшения площади *p-n*-перехода и увеличения отношения площади обедненных микрообластей к площади *p-n*-перехода.

При выключении и отогреве МФПУ время релаксации заряда резко уменьшается и происходит перезарядка уровней в прилегаю-

щем к поверхностной области полупроводника слое диэлектрика. С включением и повторным захлаживанием МФПУ релаксация уровней в прилегающем к поверхностной области полупроводника слое диэлектрика возобновляется и происходит возникновение «темных точек» в новых пикселях тепловизионного изображения с той же амплитудой и частотой появления.

При работе аппаратуры применения в реальных условиях данный низкочастотный шум не приводит к значительному ухудшению изображения вследствие малого уменьшения сигнала в пикселях с учетом параметров яркости/контраста изображения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rogalski A. Progress in Quantum Electronics / 2012. Vol. 36. P. 342–473.
2. Власов П. В. / Прикладная физика. 2016. № 5. С. 38–42.
3. Gross W., Hierl Th., Schulz M., Haigh J. / Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XXIV. 1998. Vol. 3436. <https://doi.org/10.1117/12.328016>
4. Vera E., Torres S. / Jour. On Appl. Signal Processing. 2005. Vol. 13. P. 1994–2004.
5. Балиев Д. Л., Болтарь К. О., Власов П. В., Киселева Л. В., Ложников В. Е., Лопухин А. А., Мансвентов Н. Г., Полунеев В. В., Рудневский В. С., Савостин А. В. / Прикладная физика. 2014. № 2. С. 41–44.
6. Власов П. В., Ерошенков В. В., Киселева Л. В., Кожаринова Е. А., Лопухин А. А., Савостин А. В., Умникова Е. В. Способ изготовления матричного фотоприемника. Патент на изобретение № 2573714, 20.10.2014.
7. Кузнецов П. А., Хромов С. С. / Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 321.
8. Болтарь К. О., Власов П. В., Ерошенков В. В., Лопухин А. А. / Прикладная физика. 2014. № 4. С. 48–50.
9. Астахов В. П., Дудкин В. Ф., Кернер Б. С., Осипов В. В., Смолин О. В., Таубкин И. И. / Микроэлектроника. 1989. Т. 18. Вып. 5. С. 455–463.

Low-frequency noise in focal plane array 640×512 InSb detectors

K. O. Boltar^{1,2}, P. V. Vlasov¹, A. A. Lopukhin¹ and E. V. Permikina¹

¹Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

²Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

Received 24.08.2023; accepted 5.09.2023

The paper considers the regularities of low-frequency noise in large-format InSb FPA of the mid-infrared range and its influence on the quality of thermal imaging after inhomogeneity correction. It is found that low-frequency noise is less in the manufacture of photodetectors from indium antimonide ingots with increased impurity concentration.

Keywords: Focal Plane Array (FPA), low-frequency noise, photodiode matrix, indium antimonide.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-5-68-74

REFERENCES

1. Rogalski A., Progress in Quantum Electronics **36**, 342–473 (2012).
2. Vlasov P. V., Applied Physics, № 5, 38–42 (2016) [in Russian].
3. Gross W., Hierl Th., Schulz M. and Haigh J., Proc. SPIE. Infrared Technology and Applications XXIV **3436** (1998). <https://doi.org/10.1117/12.328016>
4. Vera E. and Torres S., Jour. On Appl. Signal Processing **13**, 1994–2004 (2005).
5. Baliev D. L., Boltar' K. O., Vlasov P. V., Kiseleva L. V., Lozhnikov V. E., Lopukhin A. A., Mansvetov N. G., Poluneev V. V., Rudnevskii V. S. and Savostin A. V., Applied Physics, № 2, 41–44 (2014) [in Russian].
6. Vlasov P. V., Eroshenkov V. V., Kiseleva L. V., Kozharinova E. A., Lopukhin A. A., Savostin A. V. and Umnikova E. V. Sposob izgotovleniya matrichnogo fotopriemnika. Patent na izobretenie № 2573714 (RF). 2014.
7. Kuznetsov P. A. and Khromov S. S., Usp. Prikl. Fiz. 1 (3), 321 (2013) [in Russian].
8. Boltar K. O., Vlasov P. V., Eroshenkov V. V. and Lopuhin A. A., Applied Physics, № 4, 48–50 (2014) [in Russian].
9. Astakhov V. P., Dudkin V. F., Kerner B. S., Osipov V. V., Smolin O. V. and Taubkin I. I., Mikroelektronika **18** (5), 455–463 (1989).