Фотоэлектроника

УДК 621.383

Характеристики серийных матричных фотоприемных устройств на основе антимонида индия формата 320×256

К.О. Болтарь, П.В. Власов, А.А. Лопухин, В.В. Полунеев, А.А. Рябова

Исследованы основные характеристики серийных матричных фотоприемных устройств (МФПУ) из антимонида индия на область спектра 3÷5 мкм формата 320×256 элементов. Фотоприемные устройства состоят из смотрящих матриц, состыкованных на индиевых микроконтактах с БИС считывания и микрокриогенных систем типа интегральный Стирлинг. Благодаря разработке нового малошумящего блока сопряжения с полностью дифференциальной схемой 8-ми канального подключения по всему тракту прохождения выходных сигналов удалось получить низкий шум. При оптимальном времени накопления фотоэлектронов ~0,55 мс при относительном отверстии охлаждаемой диафрагмы 1:0,94, обеспечивающем 70% разряд емкости накопления БИС считывания, дополнительный шум за счет шумов БИС считывания, блока сопряжения и системы аналого-цифрового преобразования выходного сигнала не выше 6% фундаментального шума фонового излучения.

PACS: 07.07.Df, 07.57.— c, 81.05.Ea, 81.65.Rv
Ключевые слова: МФПУ, матрицы фотодиодов, антимонид индия.

Введение

В настоящее время лучшие матричные ИК-фотоприемники спектрального диапазона 3—5 мкм изготавливаются на основе антимонида индия [1—4].

Целью настоящей работы являлись исследование и систематизация основных характеристик серийных матричных фотоприемных устройств (МФПУ) из антимонида индия на область спектра 3÷5 мкм формата 320×256 элементов

Характеристики серийных МФПУ

В работе представлены характеристики серийных МФПУ на основе антимонида индия формата 320×256 элементов с охладителем типа интегральный Стирлинг и блоком предварительной электронной обработки сигналов (рис. 1). Одним из фундаментальных параметров, определяющих работу МФПУ на основе *n*-InSb является диффузионная длина неосновных носителей заряда при рабочей температуре ~80 К. Однако в литературе можно найти значительно отличающиеся данные по объемной диффузионной длине для *n*-InSb. Например, у I. Bloom и др. [5] она оказалась ~35 мкм, M. Davis и др. [6] использовали ее эффективное значение ~10 мкм для анализа пространственного разрешения в МФПУ на основе *n*-InSb, C. Boliang и др. [7] получили ее значение различными методами в диапазоне 32—38 мкм, Itay Shtrichman и др. [8] применили ее значение 50 мкм для анализа пространственного разрешения в МФПУ на основе *n*-InSb. В статье представлены результаты прямого измерения объемной диффузионной длины и влияния ее разброса на фотоэлектрические характеристики серийных МФПУ на основе *n*-InSb.

Еще более важным параметром МФПУ является шум считывания, который определяет величину превышения фундаментального шума фонового излучения. В данной статье излагаются результаты разработки нового малошумящего блока сопряжения, позволившего существенно улучшить основные фотоэлектрические характеристики серийных МФПУ в широком диапазоне времени накопления.

Болтарь Константин Олегович, начальник НТК[1], профессор[2]
Власов Павел Валентинович, ведущий инженер[1]
Лопухин Алексей Алексеевич, ведущий научный сотрудник[1]
Полунеев Владимир Васильевич, главный специалист[1]
Рябова Анна Алексеевна, ведущий инженер[1]
[1]ОАО «НПО «Орион»».
Россия, 111396, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2
Тел.: (499) 374–81–30. E-mail: orion@orion-ir.ru
[2]Московский физико-технический институт.
Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в в редакцию 10 ноября 2013 г.

© Болтарь О.К., Власов П.В., Лопухин А.А., Полунеев В.В., Рябова А.А., 2013

Конструкция МФПУ

Исследовано два варианта изготовления матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) на основе объемного антимонида индия: с приклейкой МФЧЭ на подложку (КП, рис. 2, а) и с утоньшением после гибридизации (ТБ, рис.2, б). В МФПУ использована КМОП БИС считывания формата 320×256 элементов с шагом пикселей 30 мкм, работающая в 8-канальном режиме с накоплением в режиме Snapshot ITR и накопительным конденсатором в ячейках емкостью 0,88 пФ. Фоточувствительная сборка, состоящая из состыкованных на индиевых микростолбиках БИС считывания и МФП приклеивалась на сапфировый растр, который в свою очередь приклеивался на вакуумный криогенный держатель. На сапфировом растре монтировалась «холодная» диафрагма с апертурным углом 2θ = 60º и два термодатчика для управления работой МКС.

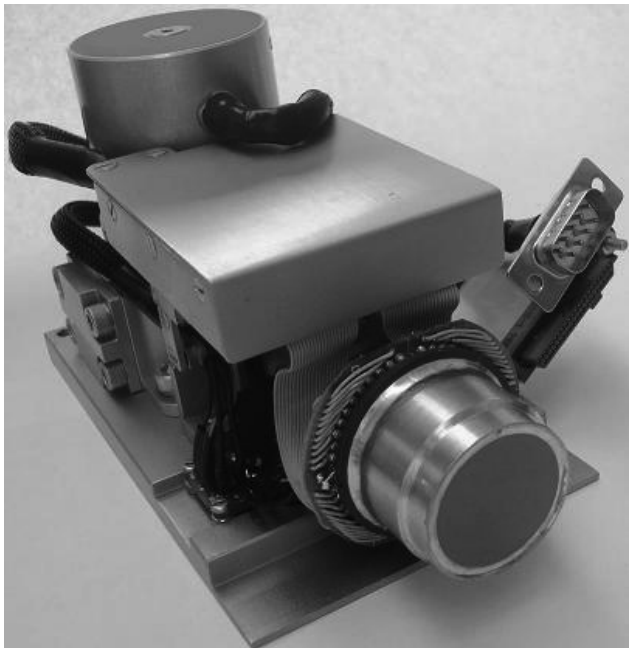

Рис. 1. Общий вид МФПУ, состыкованного с МКС

Ранее разработанная конструкция ФЧЭ [9] (рис. 2, а) содержит несущую кремниевую подложку с просветленными на область 3─5 мкм поверхностями, на которой при помощи криогенного клея закреплен матричный фотодиодный приемник с тонкой базовой областью *n*-типа.

Наиболее существенным недостатком данной конструкции является наличие клеевого соединения на пути прохождения падающего излучения, в результате чего увеличивается потеря излучения на поглощение в клеевом слое, а также увеличивается разброс спектральных характеристик по площади МФП из-за интерференции в неоднородном по толщине клеевом слое (рис. 3). Как следствие, увеличивается неоднородность выходного сигнала даже после двухточечной коррекции, а также увеличивается разброс спектральных характеристик серийных МФПУ.

Вышеуказанного недостатка лишена конструкция МФП (рис. 2, б), в которой реализовано утоньчение после гибридизации с последующим нанесением просветляющего покрытия [10]. В результате, в усовершенствованной конструкции существенно выше квантовый выход и меньше разброс спектральных характеристик серийных МФПУ (рис. 4).

Длина диффузии

Для измерения объемной диффузионной длины неосновных носителей заряда в *n*-InSb при температуре ~80 К был использован прямой метод измерения, при котором измерялись зависимости чувствительности и времени жизни неосновных носителей заряда (с засветкой тыльной стороны излучением АЧТ) от толщины фоточувствительного слоя. Этот слой утоньшался методами хими-

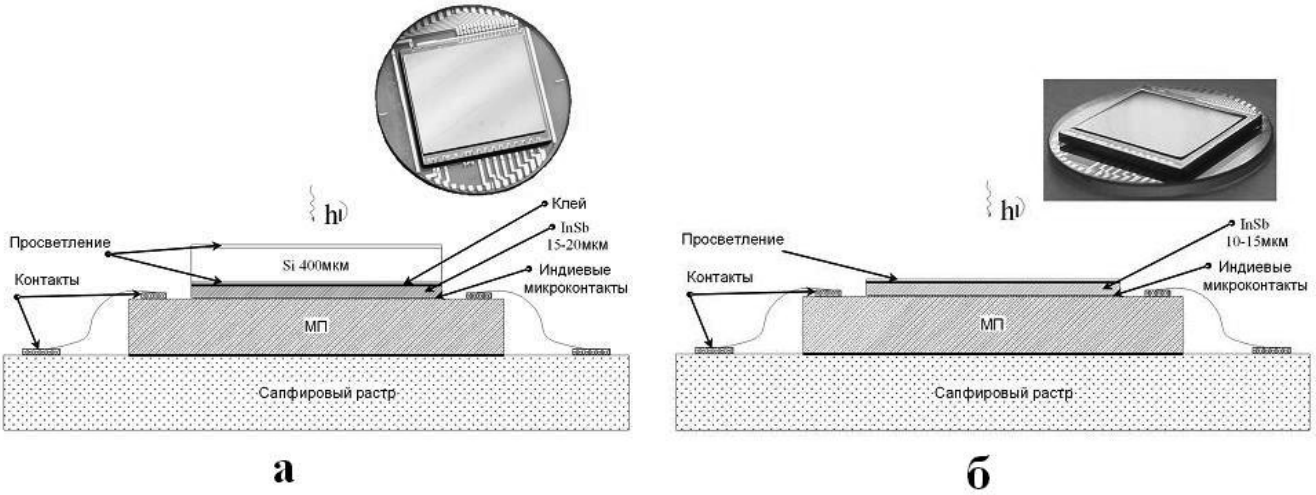

Рис. 2. Конструкция матричного чувствительного элемента: а) с приклейкой на подложке (КП), б) с утоньшением после гибридизации (ТБ)

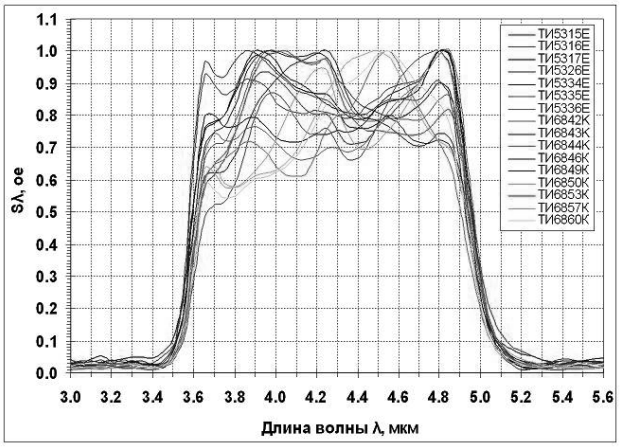

Рис. 3. Спектральные характеристики серийных МФПУ с приклейкой (КП)

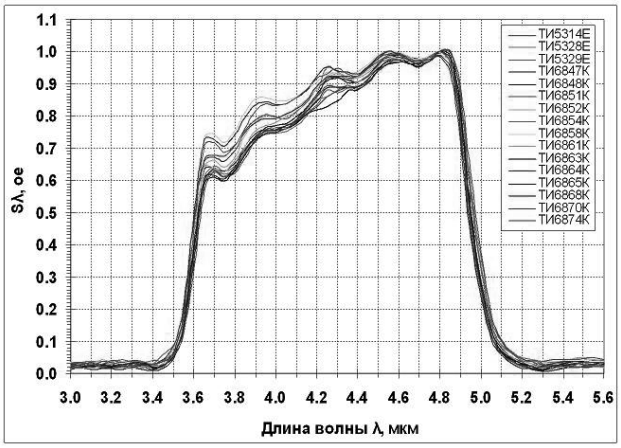

Рис. 4. Спектральные характеристики серийных МФПУ с утоньшением после гибридизации (ТБ)

ко-механической (ХМП) и химико-динамической полировки (ХДП) после гибридизации. Используя выражение для квантового выхода фотодиода на основе *n*-InSb в приближении резкого *p*—*n*-перехода [11], можно показать, что при толщине базовой области ~500 мкм квантовый выход становится прямо пропорционален объемной диффузионной длине. После измерения чувствительности серийных МФП с базовой областью ~500 мкм были выбраны две матричные структуры (№ 360, № 421), наиболее сильно отличающиеся по чувствительности. Далее матричные структуры травились методами ХМП и ХДП с определенным шагом по толщине и проводились измерения чувствительности и времени жизни. У структуры № 360 (рис. 5) существенный рост чувствительности начинается с толщины базовой области 300 мкм, а у структуры № 421 — с 200 мкм. Эффективное время жизни в образце № 360 начинает падать с 200 мкм, в то время как время жизни № 421 падает с 100 мкм. Примечательно, что при конечной толщине фоточувствительного элемента 13 мкм время жизни и чувствительность обеих структур выравнивается. Заметим также, что в структуре № 360 чувствительность достигает максимума при толщине 53 мкм. При больших толщинах базовой области 300—400 мкм картина чувствительности почти не меняется. Это связано с тем, что вклад в чувствительность при такой толщине дает поглощение в объеме, и чувстви-

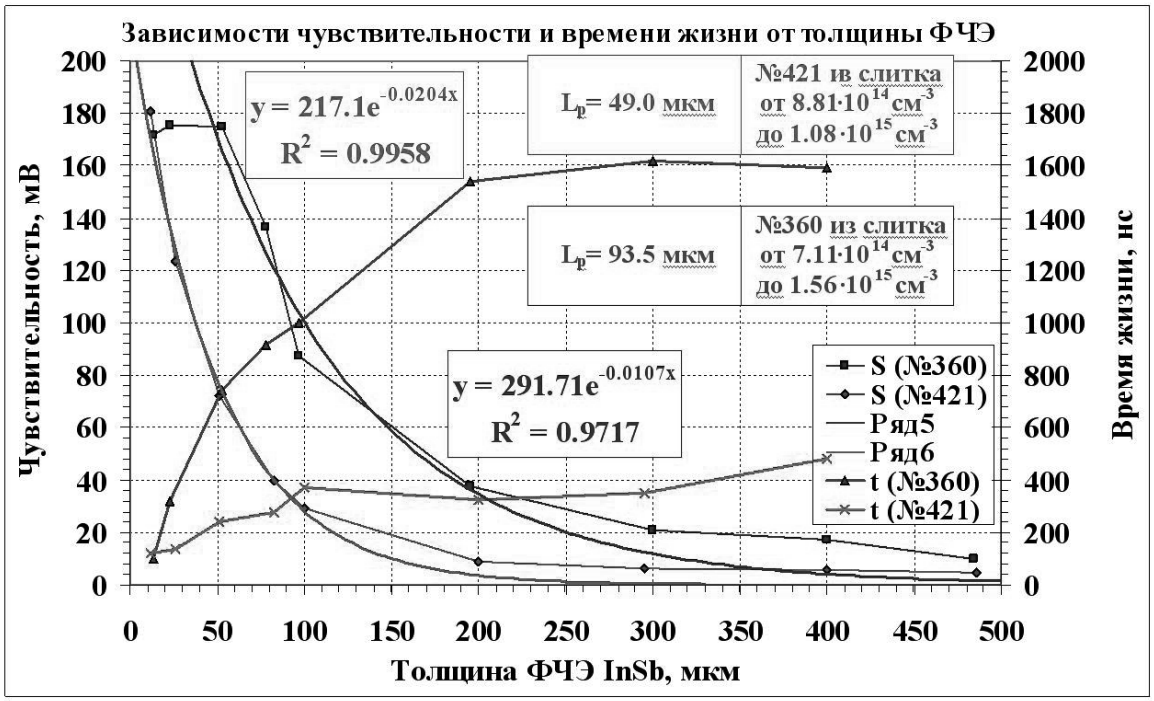

Рис. 5. Зависимости чувствительности и времени жизни двух образцов матричных фотоприемников от толщины фоточувствительного слоя

С приклейкой на кремниевую подложку (КП)

Кластеры	320x256	160x128	64x64	Дефекты
1	37	4		37
2	1			39
4	1			43
ТИ5326Е	320x256	160x128	64x64	8x8
	0.05%	0.02%	0.00%	0.00%
	N=43	N=4	N=0	N=0

Кластеры	320x256	160x128	64x64	Дефекты
1	34	9	2	34
2	3	2	1	40
3	1			43
6	1			49
ТИ5317Е	320x256	160x128	64x64	8x8
	0.06%	0.06%	0.07%	0.00%
	N=49	N=13	N=3	N=0

С утоньшением после гибридизации (ТБ)

Кластеры	320x256	160x128	64x64	Дефекты
1	28	8	2	28
2	11	1		50
4	3	1		62
ТИ6869К	320x256	160x128	64x64	8x8
	0.08%	0.07%	0.05%	0.00%
	N=62	N=14	N=2	N=0

Кластеры	320x256	160x128	64x64	Дефекты
1	27	5	2	27
2	6	1		39
3	2			45
4	1	1	1	49
ТИ6871К	320x256	160x128	64x64	8x8
	0.06%	0.05%	0.15%	0.00%
	N=49	N=11	N=6	N=0

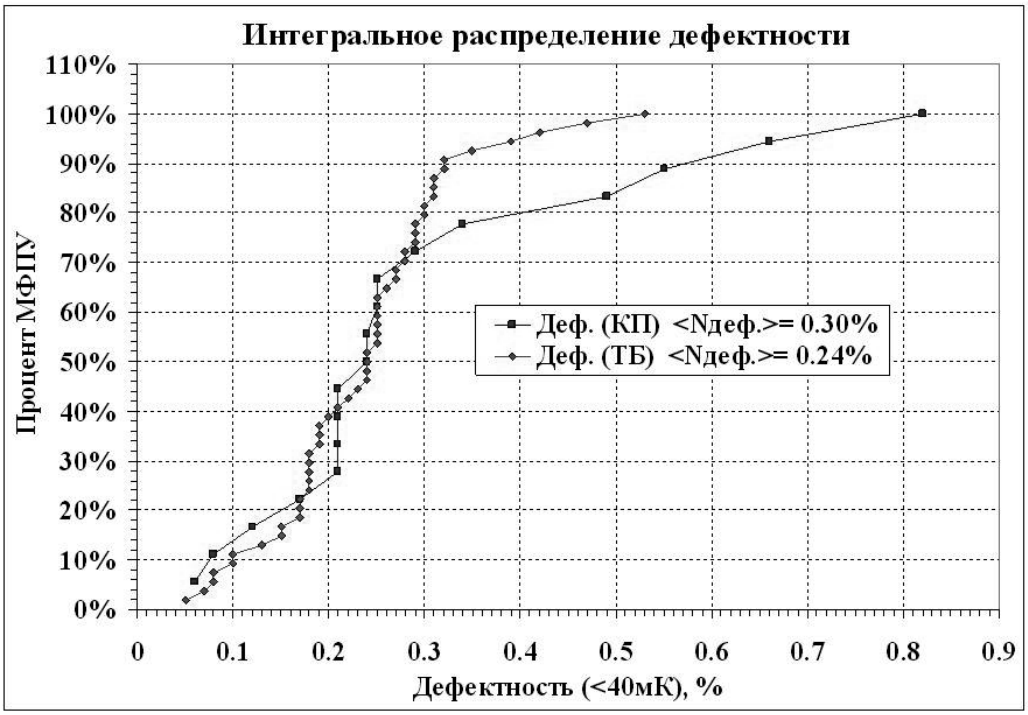

Рис. 6. Интегральные распределения дефектности серийных МФПУ с приклейкой (КП) и с утоньшением после гибридизации (ТБ)

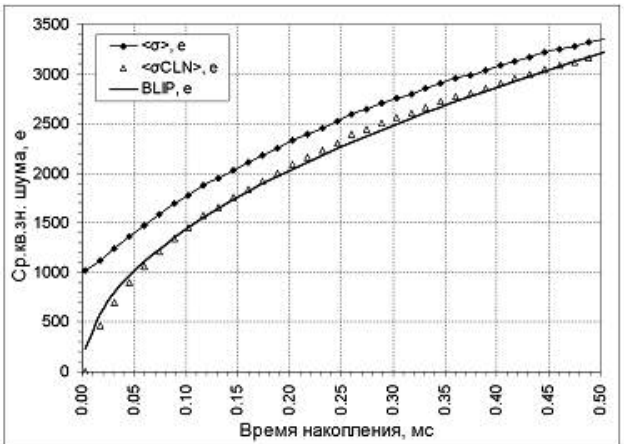

Рис. 7. Зависимости напряжения шума серийных МФПУ формата 320x256 на основе антимонида индия от времени накопления: 1 — измеренное при оптимальном смещении на ФД $DV_{сот}$, 2 — вычисленное из выражения $V_{шCLN} = (V_ш (T_н)^2 - V_ш (T_н=0)^2)^{1/2}$, 3 — вычисленное из соотношения $V_{шBLIP} = (qIфT_н)^{1/2} \times (Сн)^{-1} \times K$

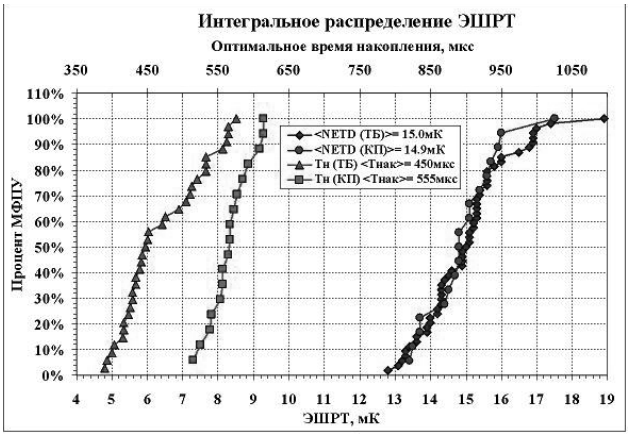

Рис. 8. Интегральные распределения эквивалентной шуму разницы температур и оптимального времени накопления для технологии изготовления серийных МФПУ с приклейкой (КП) и с утоньшением после гибридизации (ТБ)

тельность отражает неоднородности в объеме. В то время как после 100 мкм картины сильно меняются при каждом травлении. При такой толщине основной вклад в чувствительность дают дырки, генерированные в приповерхностной области, и мы видим неоднородности рекомбинации на поверхности. В структуре № 360 неоднородность поверхностной рекомбинации начинает проявляться уже на толщине 200 мкм, в отличие от структуры № 421. Вероятнее всего, такая разница в структурах связана с разностью диффузионных длин. Объемную диффузионную длину можно оценить из зависимости чувствительности от толщины стравленного слоя. Для образца № 360 она составляет 93,5 мкм, а для № 421 — 49 мкм. Влияние объемных свойств материала, таких как диффузионная длина и концентрация доноров, на эффективное время жизни в матричных структурах практически исчезает при утоньчении фоточувствительного слоя до 10÷15 мкм.

Дефектность МФПУ

На рис. 6 представлены интегральные распределения по количеству и размерам кластеров дефектных элементов для технологии изготовления МФПУ с приклейкой (КП) и с утоньшением после гибридизации (ТБ).

Видно, что средняя дефектность для обеих технологий составляет 0,24—0,30%. Полученные результаты свидетельствуют о независимости дефектности от вида используемой технологии изготовления МФПУ и, скорее всего, дефектность связана с исходным материалом и с обработкой лицевой поверхности InSb-пластин. Этот вывод также подтверждается разбросом до 2,5 раз средней дефектности МФПУ, полученных из различных слитков.

Шумовые характеристики

Значительного улучшения фотоэлектрических характеристик МФПУ удалось добиться за счет разработки нового, малошумящего блока сопряжения. Благодаря реализации полностью дифференциальной схемы 8-канального подключения по всему тракту прохождения выходных сигналов удалось получить функционирование МФПУ в режиме шума, ограниченного флуктуациями фонового излучения (BLIP-режим) в широком диапазоне уровня разряда накопительных конденсаторов ячеек МФПУ (рис. 7).

Из рисунка видно, что шум электроники при времени накопления равном нулю составляет ~ 1000 электронов на накопительном конденсаторе в ячейке. При вычитании по квадратам из шума МФПУ шума электроники, что справедливо в случае некоррелированности этих шумов, видно хорошее совпадение вычтенного шума с теоретическим шумом, ограниченным флуктуациями фонового излучения/ «то свидетельствует об отсутствии избыточных собственных шумов InSb-фотодиодов. Из графика на рис. 7 следует, что при оптимальном времени накопления фотоэлектронов ~0,55 мс при относительном отверстии охлаждаемой диафрагмы 1:0,94, обеспечивающим 70% разряд емкости накопления БИС считывания, дополнительный шум за счет шумов БИС считывания, блока сопряжения и системы аналого-цифрового преобразования выходного сигнала не превышает фундаментального 6%- шума фонового излучения.

Фотоэлектрические характеристики

На рис. 8. представлено распределение эквивалентной шуму разницы температур (ЭШРТ) при оптимальном времени накопления серийных МФПУ. Среднее значение ЭШРТ оказалось одинаковым для технологии изготовления серийных МФПУ с приклейкой (КП) и с утоньшением после гибридизации (ТБ), в то время как среднее значение оптимального времени накопления для технологии ТБ оказалось на 20% меньше, чем для технологии КП. Такая разница обусловлена более низким квантовым выходом для технологии с использованием клеевого соединения на пути прохождения падающего излучения, в котором происходят потери излучения из-за поглощения и неконтролируемой интерференции.

Как видно из представленных результатов, при апертурном угле $2\theta = 60°$ оптимальное время накопления, при котором достигаются наилучшее значение эквивалентной шуму разности температур ~15 мК? составляет величину $T_н$ ~ 0,5 мс, что при считывании сигнала на восемь выходов с тактовой частотой 8 МГц позволяет обеспечить кадровую частоту МФПУ до 500 Гц.

Заключение

Проведенные исследования показали, что, несмотря на значительный разброс объемной диффузионной длины неосновных носителей заряда для различных слитков антимонида индия, разброс квантового выхода и величину взаимосвязи можно значительно уменьшить за счет утоньшения фоточувствительного слоя *n*-InSb до толщины 8—10 мкм.

Разработка полностью дифференциальной схемы 8-канального подключения по всему тракту прохождения выходных сигналов позволила получить функционирование МФПУ в режиме шума, ограниченного флуктуациями фонового

излучения (BLIP-режим) в широком диапазоне уровня разряда накопительных конденсаторов ячеек МФПУ.

МФПУ с утоньшением после гибридизации (ТБ) имеет существенно меньший разброс фотоэлектрических характеристик серийных МФПУ на основе *n*-InSb. При этом эквивалентная шуму разность температур близка к теоретическому пределу, а дефектность для обоих типов конструкций фоточувствительного слоя практически одинакова, что свидетельствует об основном влиянии на дефектность качества исходного материала.

Литература

1. *Rogalski A.* // Progress in Quantum Electronics. 2012. V. 36. P. 342-

2. *www.scd.co.il* SCD Semiconductor Devices, Israel

3. *www.sbfp.com* Lockheed Martin Corporation Santa Barbara Focalplane, USA

4. *http://orion-ir.ru* ОАО «НПО «Орион», ГНЦ РФ, Россия

5. *Bloom I. and Nemirovsky Y. //* IEEE Trans. Electron Devices. 1992. V. 39. No. 4. P. 809

6. *Davis M., Greiner M., Sanders J., Wimmers J.* // Proceedings.of SPIE. 1998. V.. 3379. P. 288

7. *Boliang C. et al.* // Proceedings of SPIE. 2001. V. 4369. P. 436

8. *Itay Shtrichman et al.* // Proceedings of SPIE. 2007. V. 6542. P. 288

9. *Хитрова Л. М., Киселева Л. В., Касаткин И. Л.* Способ изготовления матричного фотоприемника. Патент № 2343590. 2007

10. *Болтарь К.О., Киселева Л.В., Лопухин А.А., Савостин А.В.* Способ изготовления матричного фотоприемника (варианты). Патент № 2460174. 2012

11. *Уайт М. Г.* Полупроводниковые формирователи сигналов изображения,— М.: Мир, 1979.

320×256 InSb serial focal plane arrays performance

K.O. Boltar[1,2], *P.V. Vlasov*[1], *A.A. Lopuhin*[1], *V.V. Poluneev*[1], *and A.A. Ryabova*[1]

[1]Orion R&P Association
46/2 Enthuziastov sh., Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru
[2]Moscow Institute of Physics and Technology,
9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

Indium antimonide 320*256 MWIR Focal-Plane Arrays (FPAs) produced in serial at «RD&P Center «Orion» have been investigated. FPA consists of staring photodetectors bonded by indium bumps with ROIC and Integral Stirling coolers. Thanks to develop of new low noise the mating block with implementation completely a differential circuit on all section of transiting of output signals managed to achieve at optimum time of accumulation of photoelectrons (~0,55ms at a cold shield relative aperture 1:0,94), providing 70% the discharge accumulative capacitor a readout circuit, additional noise at the expense of noise the readout circuit, the block of interface, system of analogue-digital transformation of a output signal does not exceed 6% of fundamental noise of background radiation.

PACS: 07.07.Df, 07.57.— c, 81.05.Ea, 81.65.Rv
Keywords: focal plane array, indium antimonide photodiodes.

Bibliography ─ 11 references *Received November 10, 2013*