

УДК 621.383.315.5  
EDN: WLZWZGPACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz,  
07.57.Kp, 85.60.Dw

## Структурный массив фотодиодов с изменяемой площадью для определения качества пассивации в МФПУ на основе InSb

А. А. Лопухин, Е. В. Пермикина, Е. В. Таубес, С. Е. Шишигин,  
А. Е. Мирофьянченко, Е. В. Мирофьянченко

*Предложены тестовые матричные структуры с изменяемой площадью  $p$ - $n$ -переходов и топологией, идентичной топологии рабочих фотодиодных матриц формата  $640 \times 512$  с шагом 15 мкм, сформированные методами фотолитографии групп объединенных элементов на периферии рабочих пластин. Проанализированы возможности тестовых матричных структур для определения качества пассивации в МФПУ на основе InSb посредством измерения зависимостей темнового тока от отношения периметра к площади фотодиодов. Показано, что предложенные тестовые структуры позволяют определить источники темнового тока и существенно ускорить разработку новых пассивирующих покрытий в широкоформатных матричных фотоприемниках с малым шагом.*

**Ключевые слова:** матричные фотоприемные устройства (МФПУ); матричный фоточувствительный элемент (МФЧЭ); антимонид индия; темновой ток; VADA (variable-area diode array – массив диодов с изменяемой площадью); тестовая матричная структура.

DOI: 10.51368/2307-4469-2025-13-1-21-29

### Введение

В современных МФПУ среднего ИК спектрального диапазона с высокой разрешающей способностью широко используются фотодиодные матрицы из InSb, изготовленные по меза-технологии [1, 2]. Одним из наиболее

важных условий стабильной работы матричных фотоприемных устройств является высококачественная пассивация значительной части  $p$ - $n$ -перехода матричных фоточувствительных элементов, выходящего на поверхность. Величина периферийного тока непосредственно определяется плотностью поверхностных состояний на границах раздела полупроводник – пассивирующее покрытие, поэтому эффективность пассивации можно оценить посредством измерения зависимостей темнового тока от отношения периметра к площади в тестовых диодах с изменяемой площадью. Измерение темновых токов в зависимости от отношения периметра к площади дает критически важную информацию для разделения поверхностных и объемных эффектов и, таким образом, позволяет оценить качество поверхностной пассивации.

В мире предпринимались попытки проанализировать зависимости между полученным импедансом и отношением периметра к площади массива фотодиодов с изменяемой

---

Лопухин Алексей Алексеевич, нач. участка, к.т.н.

E-mail: alexmatr0@mail.ru

Пермикина Елена Вячеславовна, вед. инженер.

Таубес Евгений Владимирович, инженер.

Шишигин Сергей Евгеньевич, инженер.

Мирофьянченко Андрей Евгеньевич, зам. главного технолога, к.т.н.

Мирофьянченко Екатерина Васильевна, вед. инженер, к.т.н.

АО «НПО «Орион».

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

Статья поступила в редакцию 12.12.2024

После доработки 28.12.2024

Принята к публикации 14.01.2025

Шифр научной специальности: 1.3.11

© Лопухин А. А., Пермикина Е. В., Таубес Е. В.,

Шишигин С. Е., Мирофьянченко А. Е.,

Мирофьянченко Е. В., 2025

площадь при обратном нулевом смещении для оценки качества пассивации в технологии МФЧЭ из теллурида кадмия-ртути (CdHgTe) [3, 4], где для исследования темновых токов использовался общеизвестный метод VADA (variable-area diode array). В работах [5–11] широкоформатные матрицы фотоприемников с малым шагом изготавливались по гибридной схеме с использованием In микроконтактов на основе фотодиодов из InSb или HgCdTe, сверхрешеток InAs/(GaIn)Sb, сверхрешеток II типа InAs/GaSb и исследовались методом VADA наборы от 4 до 10 тестовых дискретных элементов размерами от 20 до 800 мкм. Однако, локализованные и неоднородные объемные дефекты, такие как дислокации и преципитаты, могут приводить к тому, что маленькие (по площади) диоды будут иметь меньшую плотность дефектов или отсутствие дефектов, что понижает достоверность разделения поверхностных и объемных эффектов, и требуются большие массивы статистических данных, тем самым повышается трудоемкость метода. Кроме этого, большие трудности вызывает измерение темновых токов у охлаждаемых дискретных элементов малых размеров (менее 20 мкм), что особенно актуально для современных широкоформатных матриц с малым шагом, описанных, например, в статьях [12, 13]. Также, присутствие боковых токов, увеличивающих оптическую площадь диода, становится критически важным, когда диффузионная длина неосновных носителей заряда соизмерима с размерами диода.

В патенте [14] представлен метод измерения темновых токов матричных фоточувствительных элементов на тестовых отличающихся по площади дискретных диодах в заливном криостате с глухой охлаждаемой диафрагмой. Методика оценки объемного тока исходит из отношения объемного тока пропорционально площади тестового диода, в то время как поверхностный ток определяется исходя из пропорциональности периметру тестового диода.

В современных МФПУ необходимо измерять темновые токи на фоточувствительных элементах заданной топологии и малой площади, соизмеримой с шагом МФЧЭ, что затруднительно осуществить в обычных дискретных тестовых структурах. В связи с этим мы предложили использовать тестовые структуры МФЧЭ с изменяемой топологией

(рис. 1а), идентичной топологии рабочих фотодиодных матриц, изготавливаемые на периферии рабочих пластин методами фотолитографии и представляющие собой группы объединенных элементов с одинаковым шагом и форматом, гибридные с существующими БИС-считывания различных форматов и шагов, для получения зависимостей темнового тока от отношения периметра к площади массива фотодиодов с изменяемой площадью. Тип входных ячеек БИС-считывания (в частности, с прямой инжекцией), применяемой для измерений, имеет достаточно малую величину разброса входных сопротивлений для объединенных фоточувствительных элементов, что позволяет использовать БИС-считывания в качестве измерителя темнового тока.

### Структурный массив фотодиодов с изменяемой площадью

Структурный массив фотодиодов с изменяемой площадью (тестовая структура) формируется на периферии рабочей пластины методами фотолитографии и представляет собой группы объединенных исходных элементов с одинаковым шагом и форматом, совпадающим с широкоформатным матричным фотоприемником с малым шагом.

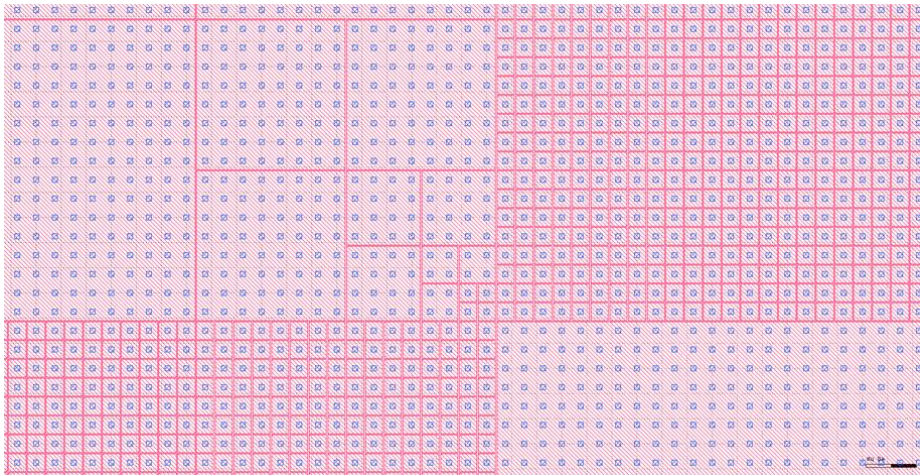
Топология тестовых элементов, расположенных на периферии рабочей пластины, идентична топологии рабочих фотодиодных матриц, размещенных в центре той же пластины (рис. 1а). Тестовая структура, образованная в шахматном порядке, с одной стороны группами объединенных элементов в квадраты с площадью, изменяемой по направлению диагонали как  $(2^n p - d)^2$ , где  $p$  – шаг матричных элементов,  $d$  – зазор между элементами,  $n = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ , а, с другой стороны, стандартными матричными элементами ( $n = 0$ ), заполняет полный формат матричного фотоприемника (рис. 1б и рис. 5а).

Максимальная площадь объединенного массива элементов, равная для данной фигуры  $32 \times 32 = 1024$  элементов, ограничена плотностью утечек типичного МФПУ на основе InSb из-за дислокаций и других дефектов. Утечки могут на порядок и более превышать средний уровень тока объединенного массива элемен-

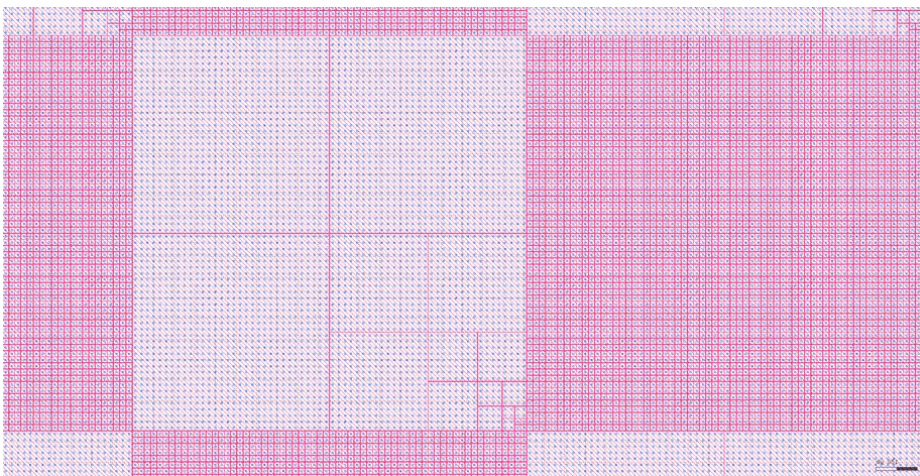
тов и тем самым исказить значения темнового тока в этих областях. Исходные матричные элементы, расположенные группами в шахматном порядке, позволяют оценить распределение дефектов вблизи объединенных массивов элементов и, тем самым, повысить достоверность результатов измерений.

Получение достоверных данных по методу VADA обеспечивается топологией тестовых элементов, идентичной топологии рабочих фотодиодных матриц и статистической обработкой полученных результатов для получения зависимостей темнового тока от отношения периметра к площади фоточувствительных элементов.

Сначала вычисляется темновой ток групп объединенных элементов как арифметическое среднее (рис. 2а – до рис. 2б – после усреднения) для компенсации разброса входных сопротивлений в ячейках БИС-считывания, затем, на основе полученных данных строятся интегральные распределения для каждой площади по полному формату тестовой структуры, из которых (площадей) темновой ток определяется как медианное среднее (рис. 5а уровень – 50%). Таким образом исключается влияние на результаты измерений крупных дефектов тестового МФПУ.



а)



б)

**Рис. 1. Изображения топологии матричных структур формата 640×512 с шагом 15 мкм:**

**а) – фрагмент изображения топологии двух тестовых фотошаблонов («по мезе» – красного и «окна» – синего цветов) с рядом областей размером 4×1; 2×2; 4×4; 8×8; 16×16 и 32×32 ячеек, расположенных по направлению диагонали от правого нижнего до левого верхнего угла;**

**б) – фрагмент изображения топологии фотошаблонов тестовых структур в окружении рабочих фотодиодных матриц в уменьшенном масштабе**

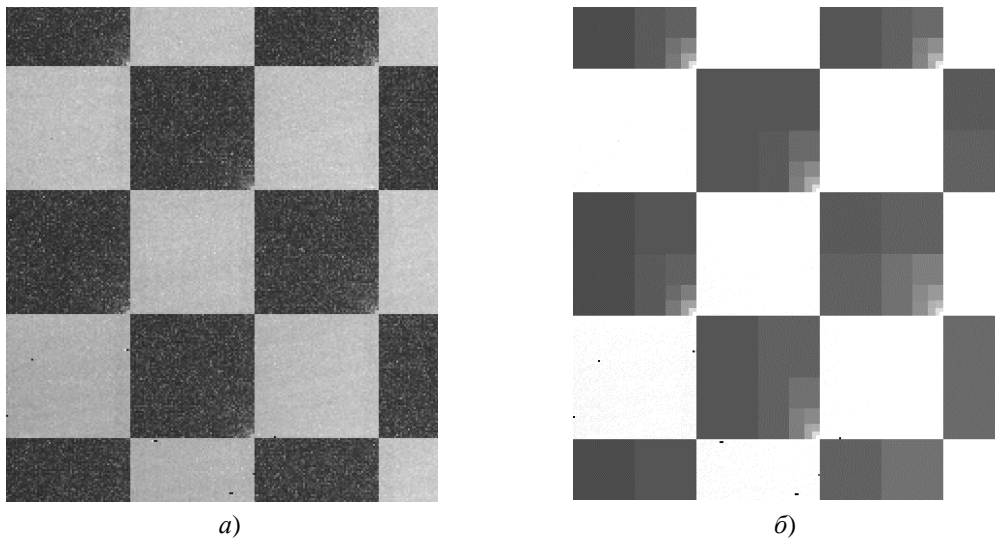


Рис. 2. Фрагменты изображений темновых токов после гибридизации с БИС-считывания МФЧЭ с типичной пассивацией при максимально возможном обратном смещении на ФД (более 2 В):

а) – без усреднения;

б) – с усреднением в пределах объединенных областей р-п-переходов

### Метод VADA для измерения темнового тока

С целью повышения оперативности и уменьшения трудоемкости измерений тестовых структур МФЧЭ с изменяемой топологией применяется открытая зондовая установка ускоренного тестирования МФПУ при температуре жидкого азота [15]. Измерения темновых токов осуществляется при помощи кремниевой пластинки, которая стороной с напыленным металлическим отражающим слоем устанавливается на тыльную сторону матрицы, гибридизированную с БИС-считывания для обеспечения уровня фонового излучения жидкого азота.

Во входной ячейке БИС-считывания (рис. 3) используется схема с прямой инъекцией, поэтому подаваемое извне смещение на затворе делится на сумму напряжений на фотодиоде и затворе-истоке входного транзистора. При этом темновой ток измеряется в области обратных смещений (рис. 4), где дифференциальное сопротивление фотодиода превышает дифференциальное сопротивление затвор-исток входного транзистора по разряду емкости накопления с устанавливаемым смещением на затворе при различных временах накопления в соответствии с формулой:

$$I_{\text{темн}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}} \times C_{\text{н}}}{\Delta T_{\text{н}} \times K_{\text{пер}}},$$

где  $C_{\text{н}}$  – емкость накопления,  $\Delta T_{\text{н}}$  – изменение времени накопления,  $\Delta U_{\text{вых}}$  – изменение напряжения на выходе БИС-считывания,  $K_{\text{пер}}$  – внутренний коэффициент передачи с емкости накопления на выход БИС-считывания.

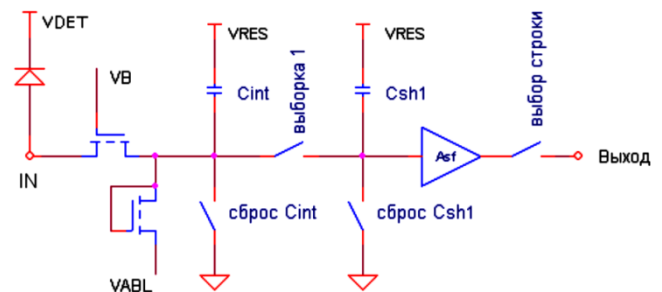


Рис. 3. Схема ячейки считывания МФПУ InSb  $640 \times 512 \times 15$  мкм с ФД на входе согласующего транзистора

Также, могут использоваться и другие типы входных ячеек, в которых величина разброса входных сопротивлений для объединенных фоточувствительных элементов достаточно мала для компенсации её регулировкой времени накопления при достаточно большом динамическом диапазоне, что позволяет использовать БИС-считывания в качестве измерителя темнового тока.

Темновые вольтамперные характеристики (ВАХ) типичного образца МФПУ на основе InSb с расщеплением VADA при смещении

dVb менее -2 В показаны на рисунке 4. Соответствующее этому большому смещению изображение темновых токов показано на рисунке 2а и после вычисления арифметического среднего на рисунке 2б, а интегральные распределения объединенных фотодиодов 32×32 и матричных элементов 1×1 показаны на рисунке 5а. Видна неоднородность темновых токов, обусловленная конкуренцией

входных усилителей с различными входными сопротивлениями, подключенными к объединенному фотодиоду большой площади. Однако, арифметический средний ток в пределах объединенных областей p–n-переходов, как показано на рисунке 2б, показывает достоверную величину, так как суммарный темновой ток течет только через входные транзисторы.

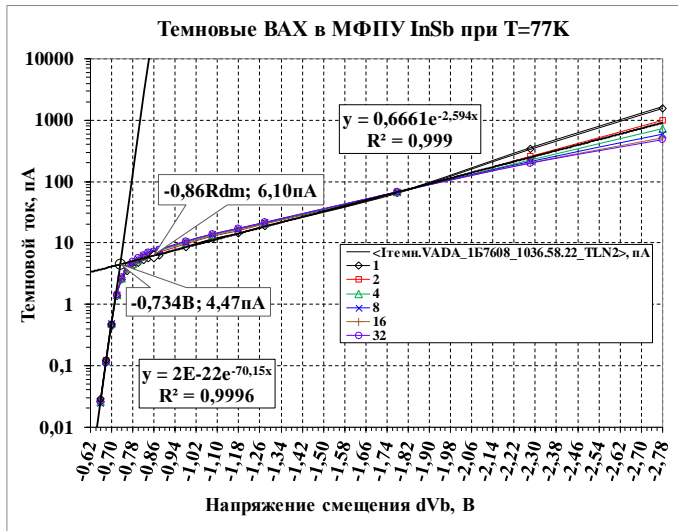
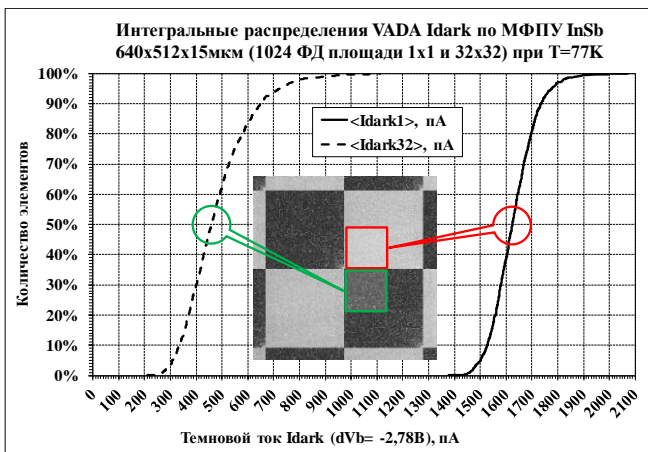
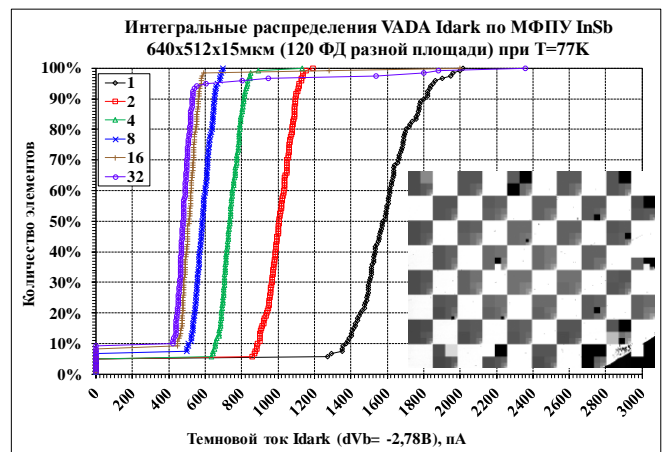


Рис. 4. Темновые ВАХ типичного образца МФПУ на основе InSb с расщеплением VADA при смещении dVb менее -2 В



а)



б)

Рис. 5. Интегральные распределения VADA темновых токов по МФПУ InSb 640×512×15 мкм при T = 77 К: а) – объединенных фотодиодов 32×32 и матричных элементов 1×1 одинаковой выборки из 1024 значений; б) – для статистики из 120 = 5×8×3 ФД разной площади в пределах одного МФПУ

Результатом измерения темнового тока на тестовых структурах с изменяемым отношением периметра к площади фоточувствительных элементов различного спектрального диапазона, являются зависимости VADA проводимостей от отношения периметра к площади, показывающие качество пассивации.

### Результаты экспериментальных исследований

Изготовлены шесть образцов МФП формата 640×512 с шагом 15 мкм на основе матрицы фотодиодов из антимонида индия, гибридной с БИС-считывания индие-

выми микроконтактами высотой 5 мкм, отличающихся типом пассивации (три образца с стандартной пассивацией АОП + SiO<sub>2</sub>, где один образец ориентации InSb (111), остальные с

ориентацией (100); два образца с пассивацией ZnS и один образец с пассивацией Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) и концентрацией основных носителей заряда, параметры которых приведены в таблице.

Таблица

Параметры измеренных образцов МФП на основе InSb 640×512×15 мкм

Номер образца	Пассивация	Концентрация основных носителей, см <sup>-3</sup>	Дифференциальное сопротивление Rd <sub>max</sub> , ГОм	Темновой ток в Rd <sub>max</sub> , пА	Темновой ток при смещении ФД ~ 0 В, пА
8532_1062.49.22	ZnS	6,78×10 <sup>14</sup>	44,9	14,07	6,55
8024_1022.45.22	АОП+SiO	1,90×10 <sup>15</sup>	104,5	3,59	3,26
7608_1036.58.22	АОП+SiO	2,14×10 <sup>15</sup>	68,7	6,10	4,47
8533_1043.56.22	ZnS	2,20×10 <sup>15</sup>	33,6	4,81	5,22
9858_854.18.24	АОП+SiO(111)	6,89×10 <sup>14</sup>	66,2	8,20	6,26
9857_1072.36.22	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	4,86×10 <sup>14</sup>	14,2	8,25	3,70

Измерение темновых токов проводилось на открытой зондовой установке ускоренного тестирования МФПУ при температуре жидкого азота. На рисунке 6 приведены средние темновые ВАХ шести измеренных образцов МФПУ на основе InSb формата 640×512×15 мкм с указанием отметок, соответствующих напряжению смещения dV<sub>b</sub> и максимальному дифференциальному сопротивлению.

По измеренным ВАХ получены интегральные распределения VADA темновых токов шести образцов МФПУ InSb 640×512×15 мкм при температуре жидкого азота по ряду областей размерами 1×1; 2×2; 4×4; 8×8; 16×16 и 32×32 ячеек, расположенных по направлению диагонали от правого нижнего до левого верхнего угла для статистики из 120 = (5×8×3) ФД разной площади в пределах одного МФПУ, как это видно на рисунках 1 и 5.

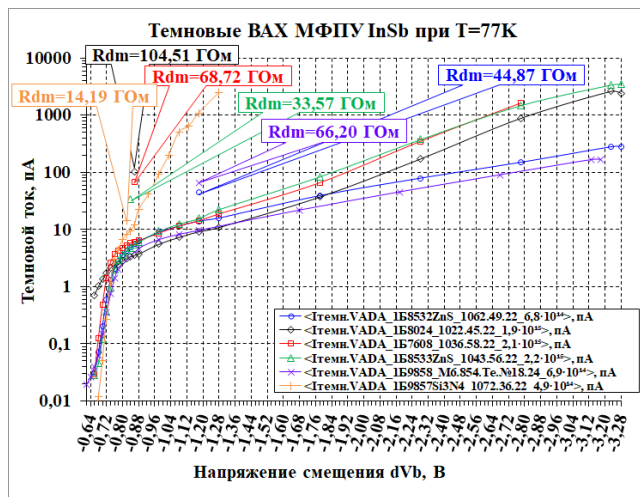
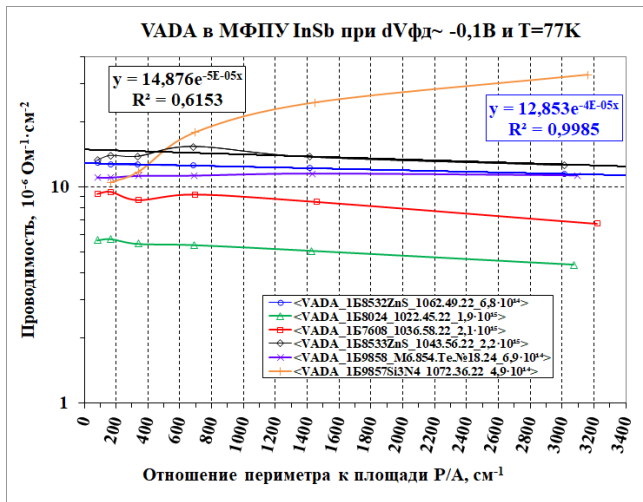
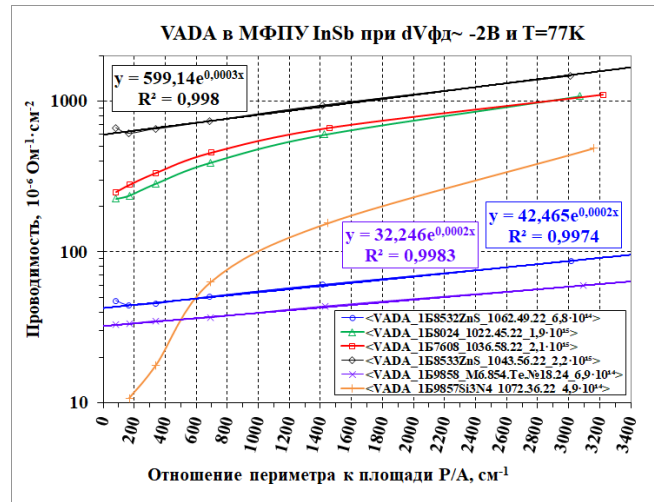


Рис. 6. Средние темновые ВАХ образцов МФПУ на основе InSb формата 640×512 с шагом 15 мкм и указанием отметок, соответствующих напряжению смещения dV<sub>b</sub> и максимальному дифференциальному сопротивлению

На рисунке 7 показаны зависимости полученных VADA проводимостей шести образцов от отношения периметра к площади ФД для МФПУ InSb 640×512×15 мкм при температуре жидкого азота. Из рисунка 7 видно, что при близком к оптимальному смещению ФД (dV<sub>фд</sub> ~ -0,1 В) (рис. 7а) для большинства пассиваций зависимость VADA отсутствует, что показывает незначительное влияние периферии на темновые токи, за исключением экспериментального образца с пассивацией Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, который отличается малым пробивным обратным напряжением. Зависимости VADA при максимально возможном смещении ФД (dV<sub>фд</sub> ≤ -2 В) (рис. 7б), наоборот, наблюдаются для всех видов пассивации, что свидетельствует о высокой плотности поверхностных состояний на границах раздела полупроводник – пассивирующее покрытие.



а)



б)

Рис. 7. Зависимости VADA проводимостей от отношения периметра к площади ФД для МФП InSb  $640 \times 512 \times 15$  мкм при  $T = 77$  К: а) при близком к оптимальному смещению ФД ( $dVb \sim -0,1$  В); б) при максимально возможном смещении ФД ( $dVb \leq -2$  В)

Таким образом, при оптимальных смещениях на ФД ( $\sim -0,1$  В) влияние периферии на величину темновых токов незначительное, а при максимальном смещении на ФД основной вклад в темновой ток вносит поверхностная составляющая.

## Выводы

1. Предложен метод измерения темнового тока на тестовых матричных структурах с изменяемой топологией для определения эффективности пассивации широкоформатных матричных фотоприемников с малым шагом ( $\leq 20$  мкм).

2. Изготовлены тестовые структуры с изменяемой топологией, идентичной топологии рабочих фотодиодных матриц, на периферии рабочих пластин методами фотолитографии групп объединенных элементов с одинаковым шагом и форматом, совпадающим с форматом широкоформатного матричного фотоприемника с шагом 15 мкм на основе большой интегральной схемы считывания. При этом каждая тестовая структура сформирована в шахматном порядке, с одной стороны, группами объединенных элементов, а, с другой стороны, стандартными матричными элементами и заполняет полный формат матричного фотоприемника.

3. Показано, что в качестве измерителя темнового тока можно использовать БИС-счи-

тывания с достаточно малой величиной разброса входных сопротивлений для объединенных фоточувствительных элементов.

4. Получены достоверные данные по методу VADA благодаря топологии тестовых элементов, идентичной топологии рабочих фотодиодных матриц, и статистической обработке результатов измерений темновых токов в следующей последовательности: 1) вычисление темнового тока групп объединенных элементов как арифметического среднего для компенсации разброса входных сопротивлений в ячейках БИС-считывания; 2) построение интегрального распределения для каждой площади по полному формату тестовой структуры, из которых (площадей) темновой ток определяется как медианное среднее для исключения влияния крупных дефектов тестового МФПУ.

Предложенный нами метод измерения темнового тока на тестовых матричных структурах с изменяемой площадью дает критически важную информацию для разделения поверхностных и объемных эффектов в матрицах фотодиодных элементов, позволяя оценить качество пассивации, и, таким образом, способствует существенному ускорению разработки новых пассивирующих покрытий для широкоформатных матричных фотоприемников с малым шагом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Gershon G., Albo A., Eylon M., Cohen O., Calahorra Z., Brumer M., Nitzani M., Avnon E., Aghion Y., Kogan I., Pan E., Tuito A., Ben Ezra M., Shkedy L. Large Format InSb Infrared Detector with 10  $\mu\text{m}$  Pixels / Semiconductor Devices (SCD), Israel, OPTRO-2014-2931891.
2. Балиев Д. Л., Болтарь К. О., Киселева Л. В., Ложников В. Е., Лопухин А. А., Мансветов Н. Г., Полушев В. В., Рудневский В. С., Савостин А. В. / Прикладная физика. 2014. № 2. С. 41–44.
3. Gopal V. / Semiconductor science and technology. 1996. Vol. 11. P. 1070.
4. McLevige W. V., Williams G. M., DeWames R. E., Bajaj J., Gergis I. S., Vanderwyck A. H., Blazejewski E. R. / Semicond. Sci. Technol. 1993. Vol. 8. P. 946–952.
5. Ashokan R., Dhar N. K., Yang B., Akhiyat A., Lee T. S., Rujirawat S., Yousuf S., Sivananthan S. / Journal of Electronic Materials. 2000. Vol. 29. № 6.
6. Yi Deng, Chun Lin, Xiaoning Hu / Proc. of SPIE. 2009. Vol. 7383. P. 73834D-1–73834D-7.
7. Srivastav Vanya, Pal R., Sareen L., Venkataraman V. / Infrared Physics & Technology. 2012. Vol. 55. P. 270–274.
8. Sehun Park / Chapter 5. ZnS surface passivation of InSb photodiodes and its device performances. – Department of Materials and Science and Engineering College of Engineering Seoul National University. 2016. P. 148.
9. Bürkle L., Fuchs F., Kiefer R., Pletschen W., Sah R. E., Schmitz J. / Materials Research Society Symp. Proc. 2000. Vol. 607.
10. DeCuir Jr Eric. A., Littlea John. W., Barill Neil / Proc. of SPIE. 2011. Vol. 8155. P. 815508-1–815508-8.
11. Копытко М., Gomólka E., Michalczewski K., Martyniuk P., Rutkowski J., Rogalski A. / Semiconductor Science and Technology. 2018. Vol. 33. P. 125010 (9 p).
12. Shkedy L., Armon E., Avnon E., Ben Ari N., Brumer M., Jakobson C., Klipstein P. C., Lury Y., Magen O., Milgrom B., Rosenstock T., Shiloah N., Shtrichman I. / Infrared Technology and Applications XLVII, Proc. of SPIE. 2021. Vol. 11741. P. 117410W-1–117410W-12.
13. Gravrand O., Lobre C., Santailier J. L., Baier N., Rabaud W. / Infrared Technology and Applications XLVIII, Proc. of SPIE. 2022. Vol. 12107. P. 121070U-1–121070U-8.
14. Patent CN116972987 A Infrared detector test analysis method. 2023.
15. Болтарь К. О., Чишко В. Ф., Лопухин А. А., Власов П. В., Акимов В. М., Ефимов И. В., Ерошенков В. В., Киселева Л. В., Савостин А. В. Открытая зондовая установка тестирования матричных фотоприёмников и способ ускоренного тестирования матричных фотоприёмников. Патент № RU 2624623 C1 от 04.07.2017. Бюл. № 19.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

## Structural array of photodiodes with variable area for determining the passivation quality in InSb FPA's

A. A. Lopukhin, E. V. Permikina, E. V. Taubes, S. E. Shishigin, A. E. Mirofyanchenko and E. V. Mirofyanchenko

Orion R&P Association, JSC  
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

Received 12.12.2024; revised 28.12.2024; accepted 14.01.2025

*Test array structures with a variable area of p–n junctions are proposed to determine the quality of passivation in 640×512 InSb FPA with a pitch of 15  $\mu\text{m}$  by measuring the dependences of the dark current on the ratio of the perimeter to the area of the photodiodes. The capabilities of the manufactured test array structures are analyzed. It is shown that the proposed structures make it possible to determine the sources of dark current, as well as to significantly accelerate the development of new passivating coatings in InSb FPA.*

**Keywords:** Focal Plane Array (FPA); photosensitive array detector; indium antimonide; dark current; VADA (variable area diode array); test array structure.



## REFERENCES

1. Gershon G., Albo A., Eylon M., Cohen O., Calahorra Z., Brumer M., Nitzani M., Avnon E., Aghion Y., Kogan I., Ilan E., Tuito A., Ben Ezra M., Shkedy L. Large Format InSb Infrared Detector with 10  $\mu\text{m}$  Pixels / Semiconductor Devices (SCD), Israel, OPTRO-2014-2931891.
2. Belyaev D. L., Boltar K. O., Kiseleva L. V., Lozhnikov V. E., Lopukhin A. A., Mansvetov N. G., Poluneev V. V., Rudnevsky V. S. and Savostin A. V., Applied Physics, № 2, 41–44 (2014) [in Russian].
3. Gopal V., Semiconductor science and technology **11**, 1070 (1996).
4. McLevige W. V., Williams G. M., DeWames R. E., Bajaj J., Gergis I. S., Vanderwyck A. H. and Blazejewski E. R., Semicond. Sci. Technol. **8**, 946–952 (1993).
5. Ashokan R., Dhar N. K., Yang B., Akhiyat A., Lee T. S., Rujirawat S., Yousuf S. and Sivananthan S., Journal of Electronic Materials **29** (6), (2000).
6. Yi Deng, Chun Lin and Xiaoning Hu, Proc. of SPIE **7383**, 73834D-1–73834D-7 (2009).
7. Srivastav Vanya, Pal R., Sareen L. and Venkataraman V., Infrared Physics & Technology **55**, 270–274 (2012).
8. Sehun Park. Chapter 5. ZnS surface passivation of InSb photodiodes and its device performances. – Department of Materials and Science and Engineering College of Engineering Seoul National University. 2016. P. 148.
9. Bürkle L., Fuchs F., Kiefer R., Pletschen W., Sah R. E. and Schmitz J., Materials Research Society Symp. Proc. 607 (2000).
10. DeCuir Jr Eric. A., Little John. W. and Barilb Neil, Proc. of SPIE **8155**, 815508-1–815508-8 (2011).
11. Kopytko M., Gomólka E., Michalczewski K., Martyniuk P., Rutkowski J. and Rogalski A., Semiconductor Science and Technology **33**, 125010 (9 p) (2018).
12. Shkedy L., Armon E., Avnon E., Ben Ari N., Brumer M., Jakobson C., Klipstein P. C., Lury Y., Magen O., Milgrom B., Rosenstock T., Shiloah N. and Shtrichman I., Infrared Technology and Applications XLVII, Proc. of SPIE **11741**, 117410W-1–117410W-12 (2021).
13. Gravrand O., Lobre C., Santailier J. L., Baier N. and Rabaud W., Infrared Technology and Applications XLVIII, Proc. of SPIE **12107**, 121070U-1–121070U-8 (2022).
14. Patent CN116972987 A Infrared detector test analysis method. 2023.
15. Boltar K. O., Chishko V. F., Lopukhin A. A., Vlasov P. V., Akimov V. M., Efimov I. V., Eroshenkov V. V., Kiseleva L. V. and Savostin A. V. Open probe testing facility for matrix photodetectors and a method for accelerated testing of matrix photodetectors. Patent № RU 2624623 C1 dated 04.07.2017. Byul. № 19.