

$$A_{XYZ} = \{q(X_i; Y_i; Z_i) | G_{XYZ}\}. \quad (4)$$

Проекция векторного поля A_{XYZ} на график цветности (сечение m) создает скалярное поле \hat{A}_m , которое характеризуется множеством точек Ω с координатами цветности $q_k(x_m; y_m)$:

$$\hat{A}_m = \Omega(x_m; y_m) = \{q_k(x_m; y_m) | A_{XYZ}\}. \quad (5)$$

Множество Ω представляет собой область охвата результата определения цвета на плоскости графика цветности:

$$\Omega = \int_{\bar{x}-U_x}^{\bar{x}+U_x} \int_{\bar{y}-U_y}^{\bar{y}+U_y} q(x, y) dx dy. \quad (6)$$

где U_x, U_y – расширенные неопределенности величины по координате x и y соответственно.

В дискретном виде:

$$\Omega = \{q(x_m; y_m) | \hat{A}_m\}. \quad (7)$$

Таким образом, скалярное поле \hat{A}_m характеризуется некоторым конечным множеством точек Ω на плоскости графика цветности. Наилучшей оценкой величины является центр тяжести $q(\bar{x}, \bar{y})$ совокупности точек множества Ω .

Литература

1. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины / пер. с англ. и фр. – 2-е изд., испр. – СПб.: НПО «Профессионал», 2010. – 82 с.
2. Руководство Еврахим/СИТАК «Оценка эффективности и неопределенности в качественном химическом анализе». – 1-е изд. – 2021. – 64 с.

УДК 681.382

ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ *p-i-n*-ФОТОДИОДОВ С ГЕТТЕРАМИ, СОЗДАНЫМИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИЕЙ СУРЬМЫ

Оджаев В. Б.¹, Петлицкий А. Н.², Просолович В. С.¹, Шестовский Д. В.², Явид В. Ю.¹, Янковский Ю. Н.¹, Исмаилов Б. К.³, Кенжаев З. Т.³, Черный В. В.⁴

¹Белорусский государственный университет

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» - управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Беларусь

³Ташкентский государственный технический университет им. И.Каримова
Ташкент, Узбекистан

⁴Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Аннотация. Исследованы вольтамперные характеристики *p-i-n*-фотодиодов, содержащих геттеры, сформированные имплантацией ионов сурьмы, на обратной стороне кремниевой пластины. Параллельно исследовались контрольные образцы, прошедшие все этапы технологического процесса изготовления приборов за исключением имплантации примесей в непланарную сторону пластины. Показано, что после формирования геттера электрофизические параметры приборов существенно зависят как от вида внедренных ионов, так и режимов последующих преципитирующего и диффузионного отжига. Наличие на вольтамперных характеристиках *p-i-n*-фотодиодов, содержащих геттерирующие центры, созданные имплантацией ионов сурьмы, ступенчатых участков свидетельствует о термической генерации носителей заряда с глубоких энергетических уровней неоднородно распределенных структурных дефектов и технологических примесей в области пространственного заряда *p-i-n*-фотодиодов.

Ключевые слова: *p-i-n*-фотодиод; геттерирующие примеси; ионная имплантация; термообработка.

VOLTAGE-CURRENT CHARACTERISTICS OF *p-i-n* PHOTODIODES WITH GETTERS CREATED BY ION IMPLANTATION OF ANTIMONY

Odzhaev V. B.¹, Pyatlitski A. N.², Prosolovich V. S.¹, Shestovsky D. V.², Yavid V. Yu.¹, Yankovski Yu. N.¹, Ismaylov B. K.³, Kenzhaev Z. T.³, Chornyi V. V.⁴

¹Belarusian State University, Minsk, Belarus

²“INTEGRAL” Joint Stock Company, Minsk, Belarus

³Tashkent State Technical University named after I. Karimov, Tashkent, Uzbekistan

⁴Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

Abstract. Volt-ampere characteristics of *p-i-n* photodiodes containing getters phosted by implantation of antimony ions on the back of a silicon wafer were investigated. In parallel, control samples were studied that went through all stages of the instrument manufacturing process, with the exception of implantation of impurities in the non-planar side of the plate. It has been shown that after the formation of the getter, the electrophysical parameters of the devices significantly depend on both the type of embedded ions and the modes of subsequent precipitation and diffusion annealing. Presence of stepped sections on current-voltage characteristics of *p-i-n* photodiodes, which contain gettering centres created by implantation of antimony ions, testifies to thermal generation of charge carriers from deep energy levels of in homogeneously distributed structural defects and technological impurities in the space charge region of *p-i-n* photodiodes.

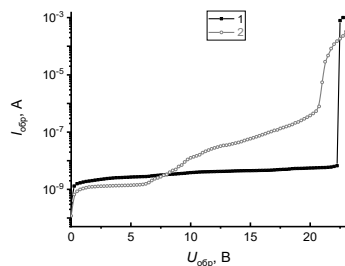
Keywords: *p-i-n* photodiode; getter impurities; ion implantation; heat treatment.

Адрес для переписки: Просолович В. С., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: prosolovich@bsu.by

Введение. Эффективность работы p - i - n -фотодиодов в значительной степени определяется величиной темнового тока при обратном смещении, который зависит от времени жизни неосновных носителей заряда. Для повышения времени жизни носителей заряда (τ) применяются различные методы геттерирования, позволяющие создать в рабочей области кремниевой подложки «чистую» зону. Целью работы являлось исследование воздействия геттерирующих центров, созданных ионной имплантацией (ИИ) Sb^+ в нерабочую сторону Si пластины, на электрофизические параметры p - i - n -фотодиодов.

Методика эксперимента. p - i - n -фотодиоды с профилированным p - i - n -переходом [1] изготавливались на пластинах p - Si ориентации (100) с удельным сопротивлением $1000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, выращенного методом бестигельной зонной плавки (БЗП). Области p^+ анода (изотипный переход) и n^+ катода создавались ИИ соответственно V^+ и P^+ в планарную сторону пластины. Формирование геттера производилось посредством ИИ Sb^+ с энергией 60 кэВ дозами $1,2 \cdot 10^{15}$ – $4,8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в непланарную сторону пластины с последующими преципитирующим отжигом при 850°C , 1000°C или 1050°C ($T_{\text{по}}$) длительностью ($t_{\text{по}}$) 30 или 60 мин. Диффузионная разгонка внедренной примеси осуществлялась при 1150°C или 1200°C ($T_{\text{до}}$) в течение 240 мин. Параллельно исследовались контрольные образцы приборов, подвергавшиеся тем же технологическим операциям за исключением ИИ примесей в непланарную сторону пластины для формирования геттера. Темновые вольтамперные характеристики (ВАХ) p - i - n -фотодиодов регистрировались в диапазоне обратных смещений $0 \dots 30 \text{ В}$ с шагом $0,25 \text{ В}$ и темпом $0,3 \text{ мс/В}$ при 20°C .

Экспериментальные результаты и их обсуждение. На рисунке 1 приведены ВАХ контрольных образцов.

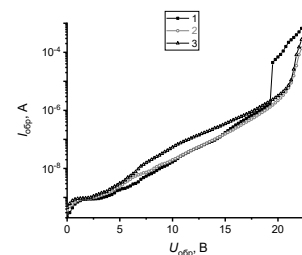


1 – 1150°C ; 2 – 1200°C

Рисунок 1 – ВАХ контрольных образцов p - i - n -фотодиодов. $T_{\text{до}}, ^\circ\text{C}$

Видно, что повышение температуры, имитирующей диффузионную обработку, приводит к формированию ступенчатой формы ВАХ. Это свидетельствует о существенном вкладе в величину обратного тока ($I_{\text{обр}}$)

генерационных процессов, связанных с глубокими энергетическими уровнями (ГЭУ), расположенными в области обеднения. При увеличении температуры отжига увеличиваются коэффициенты диффузии технологических примесей (Fe , Cu , Au и др.), проникающих в материал из технологической оснастки при высоких температурах и создающих глубокие генерационно-рекомбинационные уровни в запрещенной зоне. Это приводит к существенному снижению τ и, как следствие, увеличению значения $I_{\text{обр}}$ p - i - n -фотодиодов. Во-вторых, при выращивании Si по методу БЗП формируются скопления микродефектов, в состав которых входят технологические примеси O и C . При 1200°C происходит трансформация микродефектов с выделением из них большого количества примесных атомов O и C , которые формируют генерационно-активные центры, приводящие к возрастанию $I_{\text{обр}}$ в достаточно широкой предпробойной области.



1 – $1,2 \cdot 10^{15}$; 2,3 – $2,4 \cdot 10^{15}$. $T_{\text{по}}, ^\circ\text{C}$: 1 – 850 ; 2,3 – 1000 .
 $T_{\text{до}}, ^\circ\text{C}$: 1,3 – 1200 ; 2 – 1150

Рисунок 2 – ВАХ p - i - n -фотодиодов с геттером, созданным ИИ Sb^+ $E=60 \text{ кэВ}$. Дозы ИИ, см^{-2}

На рисунке 2 приведены ВАХ p - i - n -фотодиодов, в которых формирование геттера производилось посредством ИИ Sb^+ . Формирование геттера на обратной стороне кремниевой пластины в данном случае приводит к небольшому увеличению напряжения пробоя (на $0,5$ – $0,7 \text{ В}$), однако при увеличении обратного смещения свыше $2,5 \text{ В}$ наблюдается монотонное ступенчатое увеличение $I_{\text{обр}}$. Наличие ступенчатых участков ВАХ свидетельствует о термической генерации носителей заряда с ГЭУ неоднородно распределенных в области пространственного заряда p - i - n -фотодиодов структурных дефектов и технологических примесей.

При увеличении дозы ИИ Sb^+ до $4,8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ВАХ существенно изменяются: происходит снижение величины начала предпробойного участка, а также возрастание $I_{\text{обр}}$. При этом происходит и снижение напряжения пробоя до $\sim 13,5 \text{ В}$. Это обусловлено образованием неоднородностей потенциального рельефа вследствие формирования при ИИ и последующих термообработках крупномасштабных нарушений кристаллической струк-

туры, содержащих электрически заряженные центры. Уменьшение величины напряжения пробоя, а также снижение предпробойного напряжения может быть связано с уменьшением значения электрического поля, необходимого для формирования лавинного пробоя, вследствие формирования при ИИ и последующих термообработках крупномасштабных нарушений кристаллической структуры.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ, договор № Ф25УЗБ-067 от 05.03.2025.

Литература

1. Фотодиод: пат. 7483 U Респ. Беларусь / В. И. Блынский, Е. С. Голуб, А. М. Лемешевская, В. С. Цымбал; заявл. опубл. 25.04.2011 // Афіцыйны бюлетэнь. – 2011. – № 4. – С. 225.

УДК 621.384.3

АЛГОРИТМЫ КОРРЕКЦИИ СИГНАЛА МИКРОБОЛОМЕТРИЧЕСКИХ МАТРИЦ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Свибович И. В.¹, Шкадаревич А. П.¹, Сафонов В. В.¹, Радченко И. М.¹, Кисель В. Э.²

¹Унитарное предприятие «НТИ «ЛЭМТ» БелОМО»

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Аннотация. Рассматриваются методы решения ряда ключевых проблем неохлаждаемых микроболометрических матриц: фиксированного пространственного шума, неоднородности откликов, температурных дрейфов и дефектных пикселей. Представлены алгоритмы двухточечной калибровки, статистического детектирования дефектных пикселей с интерполяционным замещением, адаптивной фильтрации и температурной компенсации. Результаты показывают снижение пространственного шума в 2,9 раза, остаточную неоднородность 0,12 %, улучшение сигнал/шум в 2,7 раза и достижение доли исправленных пикселей матрицы в количестве более 98,5 %. Эффективность подтверждена сравнением изображений до и после обработки.

Ключевые слова: микроболометр, коррекция неоднородности, фиксированный пространственный шум, тепловизионная обработка, дефектные пиксели.

MICROBOLOMETRIC ARRAY SIGNAL CORRECTION ALGORITHMS FOR THERMAL IMAGE QUALITY ENHANCEMENT

Svibovich I. V.¹, Shkadarevich A. P.¹, Safonau U. V.¹, Radchenko I. M.¹, Kisel V. E.²

¹Unitary Enterprise «STC «LEMT» BelOMO»

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. Methods for solving key problems of uncooled microbolometric arrays are examined: fixed pattern noise, response non-uniformity, temperature drifts, and defective pixels. Algorithms for two-point calibration, statistical defective pixel detection with interpolation replacement, adaptive filtering, and temperature compensation are presented. Results demonstrate $2.9 \times$ spatial noise reduction, 0.12 % residual non-uniformity, $2.7 \times$ signal-to-noise improvement, and matrix operability exceeding 98.5 %. Effectiveness is confirmed by comparing images before and after processing.

Keywords: microbolometer, non-uniformity correction, fixed pattern noise, thermal imaging processing, defective pixels.

Адрес для переписки: Свибович И. В., ул. Макаенка, д. 23, корп. 1, г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: svibovich@lemt.by

Неохлаждаемые микроболометрические матрицы, несмотря на свои преимущества, характеризуются рядом проблем, снижающих качество тепловизионных изображений.

Основной проблемой является фиксированный пространственный шум (Fixed Pattern Noise, FPN), возникающий из-за неоднородности откликов отдельных пикселей матрицы. FPN представляет собой временно устойчивый шум, обусловленный неоднородностью характеристик сенсора, что особенно критично для инфракрасных датчиков из-за их температурной зависимости.

Вторая критическая проблема – неоднородность отклика детекторов. Различия в чувстви-

тельности между пикселями и смещения индуцируют пространственный шум в изображении, требующий снижения на порядок величины ниже временного шума пикселей для достижения высокого температурного разрешения.

Третья проблема – температурные дрейфы характеристик. Характеристики микроболометров сильно зависят от температуры, что требует дополнительной компенсации из-за временного дрейфа детекторных характеристик и влияния изменений температуры корпуса на отклик матрицы.

Четвертая проблема – наличие дефектных пикселей с аномальными характеристиками, включающих «горячие» пиксели с чрезмерно