

УДК 621.383

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-5-421-432

EDN: TJWARY

PACS: 07.07.Df, 07.57.-c,

81.05.Ea, 81.65.Rv



Матрицы ФПУ с улучшенной однородностью

А. А. Лопухин, Е. В. Пермикина, К. О. Болтарь, А. Н. Гришина

Рассмотрены два возможных способа получения ФПУ на основе фотодиодных матриц из антимонида индия с улучшенной однородностью: использование структур, выращенных методом МЛЭ, и применение ионной обработки при изготовлении ФЧЭ из объемного материала. Представлены результаты исследований чувствительности в фотодиодных матрицах из InSb при воздействии оптического излучения ИК, видимого и УФ-диапазонов. Установлено, что метод ионной обработки стороны засветки МФЧЭ перед просветлением позволяет существенным образом подавить рекомбинацию фотоносителей на поверхности, а также улучшить адгезию наносимого антиотражающего покрытия (АОП). В результате ионной обработки уменьшается разброс чувствительности (токовой или вольтовой) по площади МФЧЭ в несколько раз.

Ключевые слова: фотоприемные устройства (ФПУ), матричные фотоприемники (МФП), матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ), фотодиодные матрицы, антимонид индия, рекомбинация.

Введение

В современных матричных фотоприемниках (МФП) для среднего инфракрасного спектрального диапазона, применяемых в тепловизионных и теплопеленгационных системах, широко используются фотодиодные матрицы из антимонида индия (InSb). Стабильность работы систем для распознавания объектов и

формирования тепловизионного изображения обеспечивается однородностью свойств матричных фоточувствительных элементов (МФЧЭ). Особенностью современных фотодиодных матриц ИК-диапазона является разброс характеристик по площади из-за геометрической неоднородности элементов, возникающей в процессе технологии изготовления МФЧЭ. Улучшение однородности чувствительности по площади матриц ФЧЭ за счет применения современных методов получения полупроводниковых структур при их изготовлении и технологических приемов обработки поверхности позволяет получать более однородные картины изображения с высоким пространственным разрешением, тем самым обеспечивая оптимальное функционирование матричных ФП.

При освещении МФП со стороны базовой области толщина базы матрицы фоточувствительных элементов и скорость поверхностной рекомбинации являются главными составляющими, определяющими величину квантовой эффективности и фотоэлектрическую взаимосвязь между соседними пикселями. Опти-

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

Пермикина Елена Вячеславовна¹, вед. инженер.

E-mail: elenapermikina3@gmail.com

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

Гришина Анна Николаевна¹, вед. инженер-технолог.

¹ АО «НПО «Орион».

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

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 8.09.2023

© Лопухин А. А., Пермикина Е. В., Болтарь К. О.,
Гришина А. Н., 2023

ческое излучение, падающее со стороны просветленной поверхности базы МФЧЭ, генерирует фототок в объеме фотодиодной матрицы. При этом часть фотоносителей может собираться на длине диффузии на границе раздела база-просветляющее покрытие и рекомбинировать вследствие высокой плотности поверхностных состояний. Для улучшения однородности фотоэлектрических характеристик по площади фотодиодных матриц, достижения максимальной чувствительности матричных ФПУ необходимо снизить скорость поверхностной рекомбинации на границах раздела МФЧЭ. В работе рассмотрены два возможных способа получения МФПУ с улучшенной однородностью на основе InSb.

В первом случае – изготовление МФЧЭ на основе структур InSb, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) [1]. Данный метод низкотемпературного выращивания многослойных эпитаксиальных структур на подложках из одного и того же полупроводникового материала позволяет получать структуры с хорошим согласованием параметров кристаллических решеток, благодаря чему сокращается дефектность, и понижается скорость рекомбинации как на границах раздела, так и в объеме МФЧЭ.

Во втором случае – применение ионной обработки базы МФЧЭ из объемного антимонида индия со стороны падения ИК-излучения перед просветлением [2]. Поверхностная рекомбинация носителей у матриц из объемного материала обусловлена не только фундаментальными механизмами, но и нефундаментальными причинами вследствие появления неоднородных окисных пленок и дефектов, связанных с технологической обработкой поверхности. Метод ионной обработки поверхности позволяет изменить величину поверхностного заряда. Изгиб энергетических зон, составляющий не более ширины запрещенной зоны, препятствует стеканию подвижных фотоносителей в приповерхностную область и дальнейшей их рекомбинации.

МФПУ на основе антимонида индия

В АО НПО «Орион» серийно выпускаются матричные ФПУ на основе матриц ФЧЭ форматов 320×256 элементов с шагом 30 мкм

и 640×512 элементов с шагом 15 мкм из объемного InSb *n*-типа проводимости.

МФП из InSb представляет собой матрицу фоточувствительных элементов (МФЧЭ), изготовленную по мезотехнологии и гибридованную с большой интегральной схемой (БИС) считывания индиевыми микроконтактами методом холодной сварки [3–7]. Принимаемый фоточувствительными элементами фотоэлектрический сигнал преобразуется и считывается БИС обработки электрического сигнала. Гибридованная сборка с наклеенной диафрагмой и отрезающим оптическим фильтром устанавливается в охлаждаемый до 77 К вакуумный корпус. Оптическое излучение, принимаемое МФП, генерирует фототок, попадая через входное германиевое окно и отрезающий фильтр на базовую сторону МФЧЭ. База матрицы ФЧЭ имеет *n*-тип проводимости. Для улучшения квантового выхода на базовую сторону МФЧЭ наносится просветляющее покрытие. Толщина базы фотодиодных матриц определяется балансом между достижением оптимального квантового выхода и взаимосвязью, обусловленной боковой диффузией неосновных носителей заряда.

В настоящее время апробирована и внедряется технология изготовления МФЧЭ на основе структур InSb, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Преимущества МЛЭ описаны в работе [1]. На рис. 1 представлены изображения, полученные матричными фотоприемными устройствами на основе матриц ФЧЭ, изготовленных из структур InSb методом МЛЭ (*a*) из объемного InSb (*б*). Как видно, более однородные изображения с высоким пространственным разрешением получены матричными ФП на основе МФЧЭ МЛЭ.

Высоколегированная подложка *n*-типа гомоэпитаксиальных структур из InSb МЛЭ при утоньшении до 12 мкм позволяет обеспечить работу МФП в окне прозрачности атмосферы для средневолнового инфракрасного спектрального диапазона. Выращивание гомоэпитаксиальных слоев методом МЛЭ и нанесение просветляющего покрытия на тыльную сторону *оптически прозрачной подложки* способствует минимизации напряжений на границах раздела, тем самым уменьшая вероятность образования дефектов. Оптимальное согласо-

ние параметров кристаллических решеток подложки и эпитаксиального слоя минимизирует плотность состояний в запрещенной зоне, через которые возможна рекомбинация. В данном случае, в большей степени, имеют место фундаментальные рекомбинационные

механизмы, поэтому обеспечивается высокий квантовый выход МФП, даже при тонкой базе (толщина базового слоя матриц ФЧЭ, полученных на структурах InSb МЛЭ составляет 5 мкм) и более высокая однородность чувствительности по площади МФЧЭ [1].



а)



б)

Рис. 1. Изображения МФП на основе матриц ФЧЭ из антимонида индия форматов 320×256 элементов с шагом 30 мкм, изготовленных (а) из гомоэпитаксиальной структуры антимонида индия методом МЛЭ, (б) из объемного InSb

Для МФЧЭ из объемного материала, где просветление наносится непосредственно на утоньшенную базовую сторону, а не на оптически прозрачную подложку, как в случае фотодиодных матриц МЛЭ, наибольший вклад в рекомбинацию носителей заряда вносят нефундаментальные механизмы, связанные с электронными состояниями на границе раздела InSb-антиотражающее покрытие. Плотность состояний в этом случае, может возрастать вследствие неоднородных по толщине и составу окисных пленок на поверхности

антимонида индия, дислокаций, возникающих из-за роста механических напряжений, и других дефектов (к примеру, царапин), образующихся при технологической обработке.

Результаты исследований и обсуждение

Рассчитана зависимость квантового выхода фотодиодов (ФД) InSb в базовой области от скорости поверхностной рекомбинации по выражению Ван де Виле в приближении резкого $p-n$ -перехода [8]:

$$\eta = \frac{\alpha L_p^2}{1 - \alpha^2 L_p^2} \times \left\{ \alpha e^{-\alpha d} - \frac{1}{L_p} \times \frac{L_p (s + \alpha D_p) - e^{-\alpha d} \times \left[s L_p Ch\left(\frac{d}{L_p}\right) + D_p Sh\left(\frac{d}{L_p}\right) \right]}{s L_p Sh\left(\frac{d}{L_p}\right) + D_p Ch\left(\frac{d}{L_p}\right)} \right\}$$

где α – коэффициент поглощения; L_p – диффузионная длина дырок в n -области; D_p – коэффициент диффузии дырок в n -области; s – скорость поверхностной рекомбинации; d – толщина квазинейтральной n -области InSb.

На рис. 2 представлены расчетные зависимости квантового выхода ФД InSb от скорости поверхностной рекомбинации для трех длин волн оптического ИК-излучения λ (1,03 мкм; 3,49 мкм; 5,03 мкм) при толщине

базовой области МФЧЭ равной 10 мкм и диффузионной длине дырок равной 50 мкм. В случае поверхностной рекомбинации $s \leq 10^3$ см/с квантовый выход η превышает 90 %, и с ростом поверхностной рекомбинации уменьшается. Заметно, что для коротковолнового излучения ниспадающая кривая имеет более крутой спад. Это связано с более высоким коэффициентом поглощения в коротковолновой ИК спектральной области. Оказалось, что для средневолнового ИК-излучения при скорости рекомбинации $s \geq 10^6$ см/с по сравнению с $s \leq 10^3$ см/с квантовый выход уменьшается в три раза $\lambda = 5,03$ мкм и для $\lambda = 3,49$ мкм – в девять раз; в то время как для коротковолнового ($\lambda = 1,03$ мкм) – η снижается в пятьдесят раз.

Исследование чувствительности при воздействии оптического излучения ИК-, видимого и УФ-диапазонов на поверхность базовой области МФЧЭ из объемного InSb проводили непосредственно после утоньшения базы до толщины 10 мкм без ионной обработки и просветления.

На рис. 3 представлено изображение распределения чувствительности по площади МФЧЭ с тыльной стороны. Темные пятна – области рекомбинации. Заметим, что при облучении матрицы ФЧЭ длинноволновым ис-

точником сигнала (АЧТ 33 °С) изображение получается размытым вследствие поглощения фотонов на сравнительно большей глубине матрицы (рис. 3а). А более четкое изображение мы имеем в случае засветки коротковолновым источником излучения (светодиодом видимого диапазона белого свечения, рис. 3б), так как при воздействии фотонов более высоких энергий процесс генерации носителей заряда происходит непосредственно на поверхности с дальнейшей их рекомбинацией. Следовательно, при исследовании поверхностных явлений необходимо использовать коротковолновые источники излучения.

При сравнении чувствительности четырёх МФЧЭ (в квадратах 32×32), изготовленных из одного слитка с различными концентрациями основных носителей заряда ($2,8 \times 10^{14}$; $4,4 \times 10^{14}$; $6,0 \times 10^{14}$ и $1,1 \times 10^{15}$) см⁻³, измеренных сразу после утоньшения до толщины 10 мкм при засветке источниками сигнала различных спектров излучения: АЧТ 33 °С ($\lambda_{\text{max}} \sim 5$ мкм, рис. 4) и СД белого цвета ($\lambda \sim 0,5$ мкм, рис. 5), оказалось, что более однородную чувствительность имеют образцы с *большой концентрацией* примеси, при этом разброс чувствительности увеличивается с уменьшением длины волны падающего излучения и для длин волн менее 1 мкм достигает десяти раз.

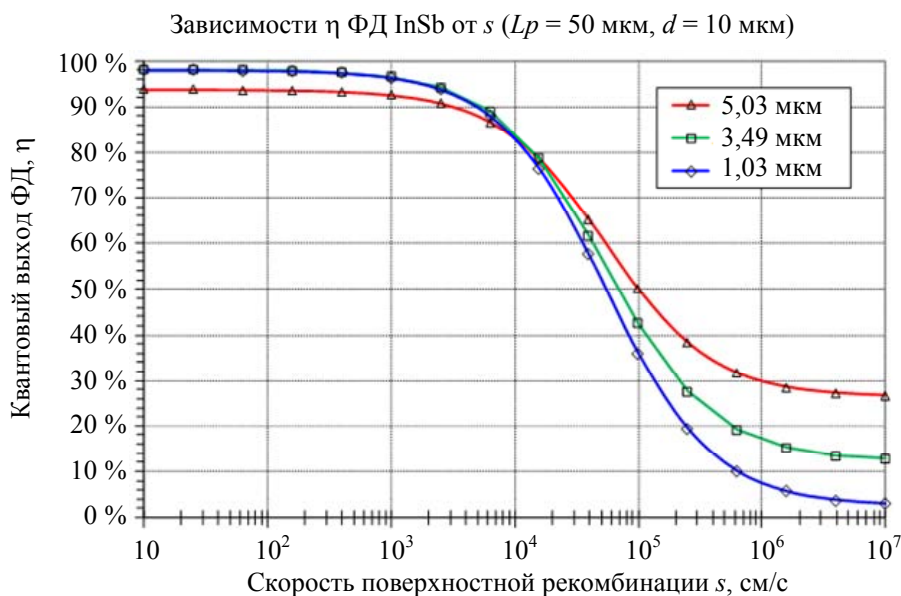


Рис. 2. Зависимости квантового выхода ФД на основе InSb от скорости поверхностной рекомбинации для трёх длин волн падающего излучения (1,03 мкм, 3,49 мкм, 5,03 мкм) при толщине базовой области равной 10 мкм и диффузионной длине дырок равной 50 мкм

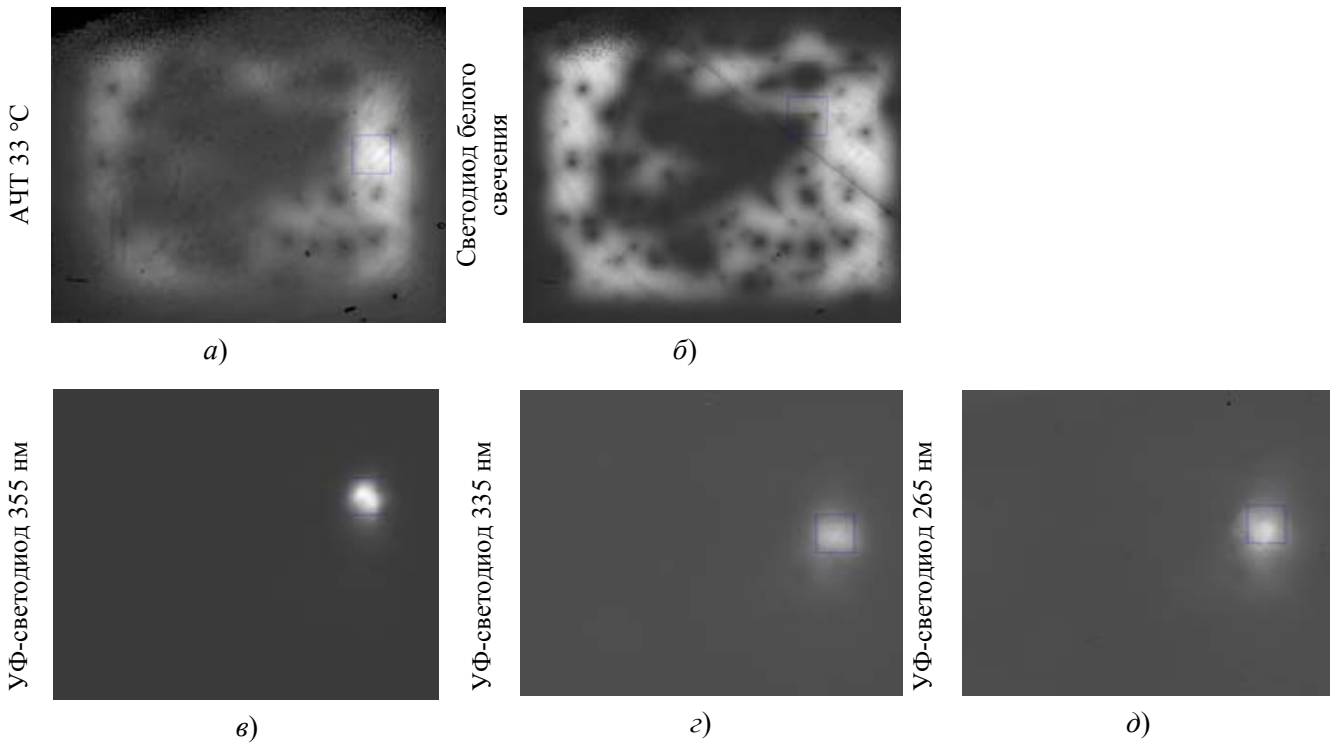


Рис. 3. Изображения распределения чувствительности с тыльной стороны МФЧЭ, полученные после утоньшения матрицы фоточувствительного модуля 1B4172.1 до толщины 10 мкм без ионной обработки и просветления на различных источниках сигнала при времени накопления: а) – $T_n = 356$ мкс; б) – $T_n = 194$ мкс; в) – $T_n = 162$ мкс; г), д) – $T_n = 518$ мкс

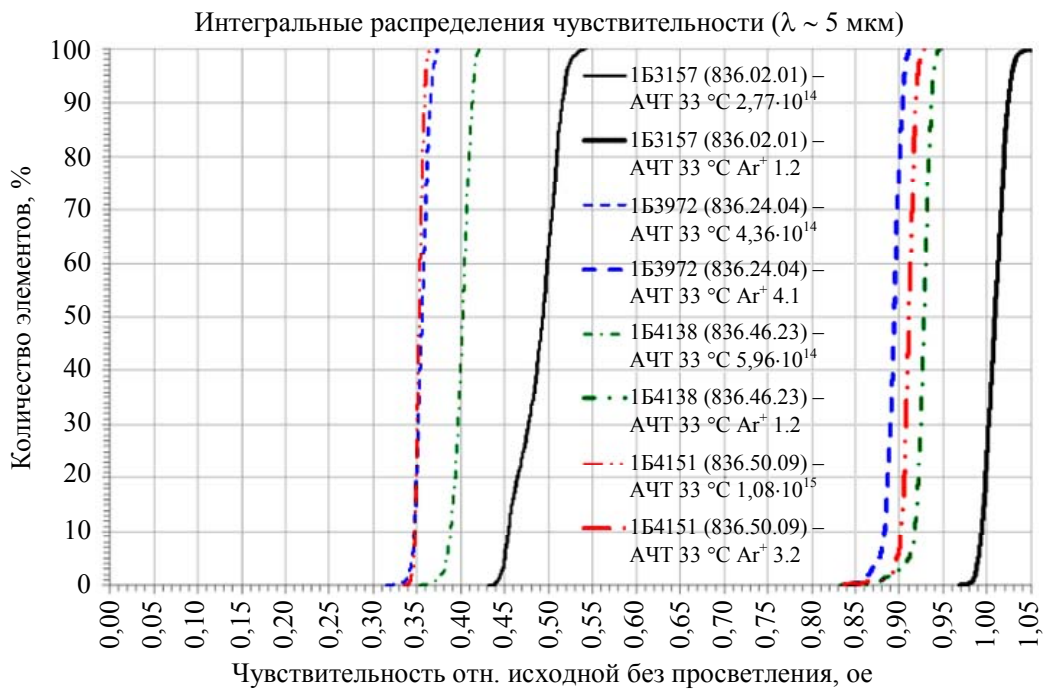


Рис. 4. Интегральные функции распределения чувствительности МФЧЭ из слитка № 836 в квадратах 32×32, засвеченных излучением АЧТ 33 °С ($\lambda_{max} \sim 5$ мкм) без и с обработкой ионами Ar^+

При обработке тыльной стороны МФЧЭ ионами Ar^+ наблюдалось повышение чувствительности во всех случаях: в 2÷3 раза при засветке $\lambda_{max} \sim 5$ мкм (рис. 4) и до 7 раз при из-

лучении $\lambda \sim 0,5$ мкм (рис. 5), к тому же уменьшался разброс чувствительности по площади. Оказалось, что подавление поверхностной рекомбинации наступает уже после

одного стандартного цикла обработки ионами Ag, а для получения высокой однородности чувствительности достаточно *двух циклов*. При этом стандартный цикл обработки обес-

печивает заданный температурный режим процесса, необходимый для МФЧЭ из объемного InSb при удалении материала толщиной 400÷500 Å.

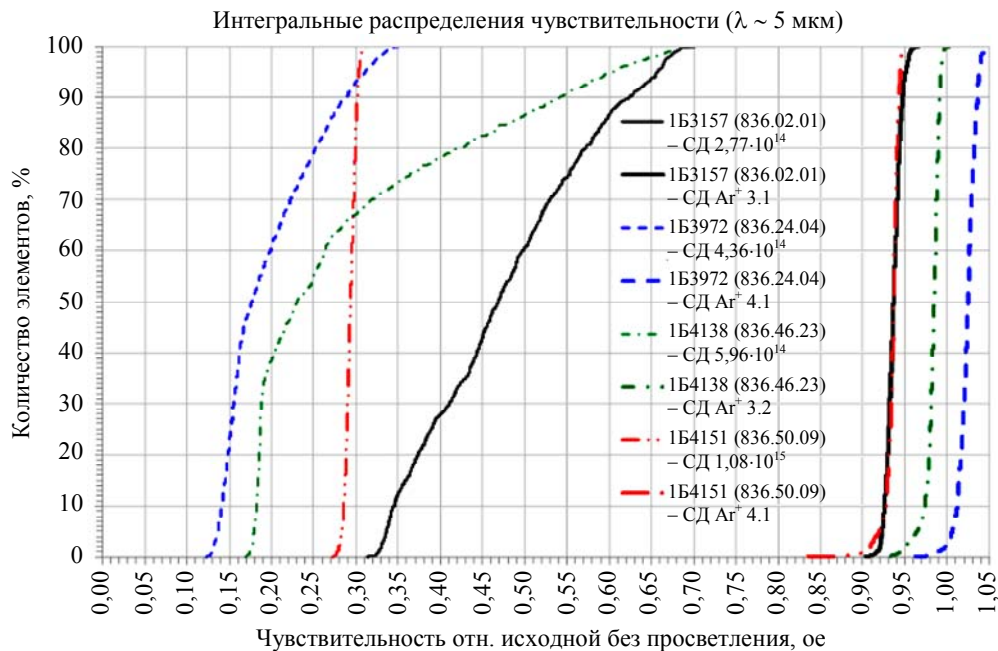


Рис. 5. Интегральные функции распределения чувствительности МФЧЭ из слитка № 836 в квадратах 32×32, засвеченных излучением СД белого цвета ($\lambda \sim 0,5$ мкм) без и с обработкой ионами Ag⁺

В связи с тем, что процесс обработки ионами Ag⁺ происходит в плазме над поверхностью, наблюдался *полирующий эффект*, благодаря которому улучшалась чувствительность и однородность на образцах с царапинами, образование которых возможно вследствие технологических причин (например, при отрыве и скольжении микрочастиц материала по поверхности во время центрифугирования и др.). На поверхности МФЧЭ чаще наблюдались царапины глубиной 300–1000 Å и шириной от 0,3 до 1,0 мкм.

Механически поврежденные и пластически деформированные (напряженный и дефектный) нарушенные слои царапин [9] являются дополнительными источниками рекомбинации вследствие внесения новых уровней энергий в запрещенную зону полупроводникового антимонида индия. Обработка ионами аргона позволяет удалить механически поврежденный, а также частично или полностью (в зависимости от числа ионных обработок) нарушенный слой материала и сократить плотность поверхностных состояний в локальных областях царапин. Как показано на

рисунке 6, вначале царапины проявлялись при стандартном цикле обработки через вертикальную маску (1), далее следовала обработка через горизонтальную маску (2) и двойная обработка через вертикальную маску по центру (3×2). Интегральные функции распределения чувствительности в царапинах, засвеченных излучением СД белого цвета ($\lambda \sim 0,5$ мкм), показали относительное улучшение чувствительности с увеличением количества стандартных обработок ионами Ag⁺. Как показано на рисунке 6 понижение чувствительности уменьшается от 17 % до уровня погрешности измерения 1÷3 % после стандартных 4-х кратной. При этом геометрические параметры царапин транслируются без искажений. Изменение глубины и толщины царапин при 8-ми кратной ионной обработке варьируется в пределах ± 40 %, и в среднем составляет 1–4 % (рис. 7), также наблюдаются сильные флуктуации изменений геометрических параметров от образца к образцу. Полученное нами близкое к линейному распределение изменений измеренных величин показывает его равномерный и случайный характер (рис. 7). Незна-

чительное изменение угла царапин, не превышающее по средней величине 3,5 %, и равномерный съем материала в царапинах глубиной 300–1000 Å и шириной от 0,3 до 1,0 мкм,

показывают, что процесс 8-кратной ионной обработки с малыми скоростями травления не искажает исходной геометрии царапин, сохраняя трансляцию их размеров.

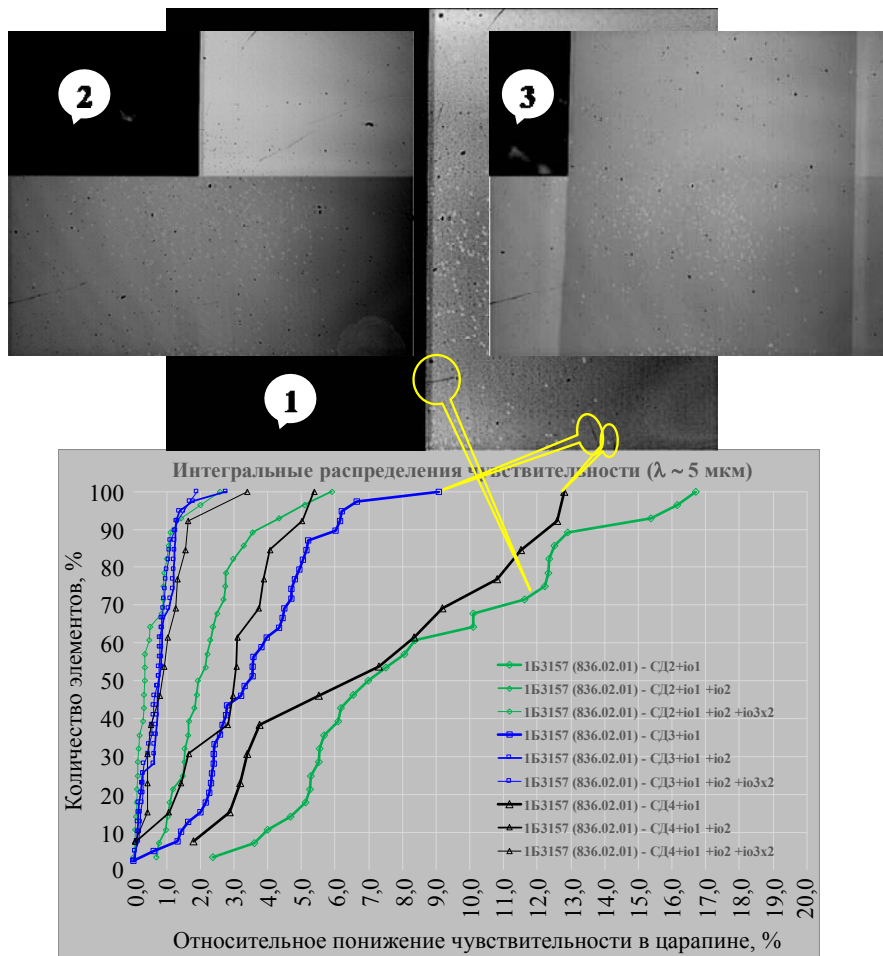


Рис. 6. Интегральные функции распределения чувствительности в царапинах, засвеченных излучением СД белого цвета ($\lambda \sim 0,5$ мкм) при различных количествах стандартных обработок ионами Ar^+ через маски 1 (1/2 по вертикали), 2 (1/2 по горизонтали), 3×2 (1/2 по вертикали по центру)

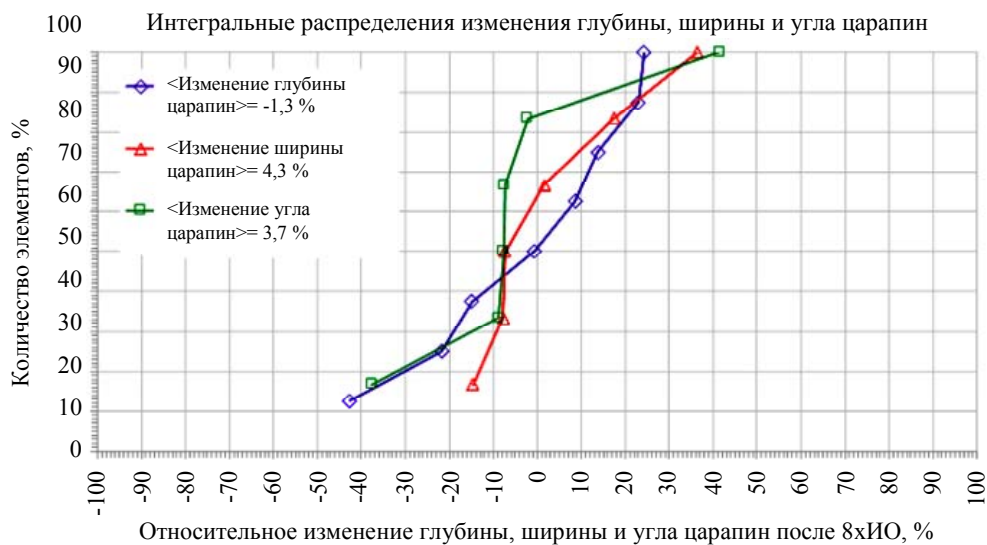


Рис. 7. Интегральные распределения изменения геометрических параметров царапин после 8-ми кратной ионной обработки

Основной эффект улучшения чувствительности в царапинах после обработки поверхности МФЧЭ ионами Ag^+ непосредственно связан с удалением пластически деформированного нарушенного слоя. Заметим, что пластически деформированный нарушенный слой царапины может превышать глубину механически поврежденного в 3,5–5 раз, так царапи-

на глубиной 500 Å становится фотоэлектрически незаметной после девяти ионных обработок, а для того, чтобы получить однородное распределение чувствительности царапины глубиной 1000 Å необходимо от одиннадцати до тринадцати ИО (рис. 8, 9). (При удалении слоя в процессе однократной ионной обработки толщиной около 600 Å).

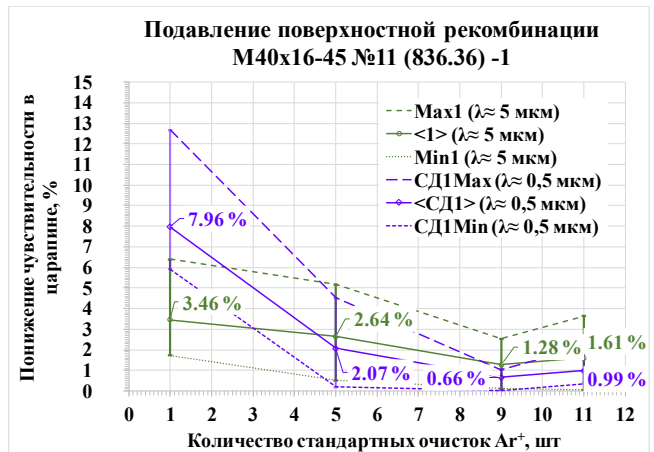
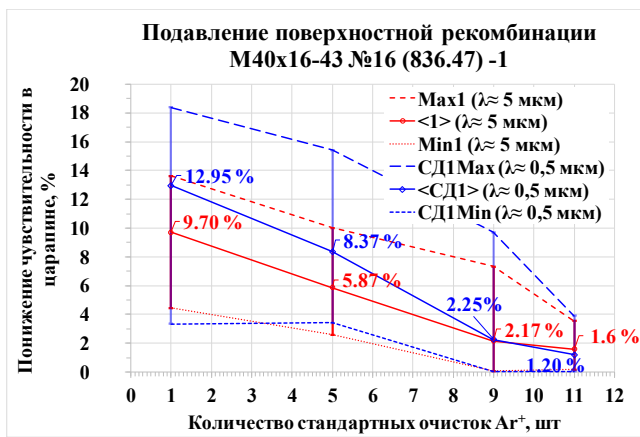


Рис. 8. Улучшение чувствительности в царапине глубиной до 500 Å (слева) и глубиной 1000 Å (справа)

Из графиков (рис. 8) видно, что после обработки тыльной стороны всех образцов ионами Ag^+ (от 1 до 11 ионных обработок) в царапинах наблюдается монотонное понижение поверхностной рекомбинации. При этом засветка тыльной стороны коротковолновым излучением светодиода СД ($\lambda \sim 0,5$ мкм) – синие линии графика на рисунке 9 – позволяет наблюдать резкий спад понижения чувствительности в случае одной-пяти стандартных ионных обработок и более плавное ее убывание при переходе от пяти- к девяти-одиннадцати кратной ионной обработке. Заметно, что стабилизация чувствительности (т. е. выход на «плато» с некоторой погрешностью) наступает только после девяти стандартных ИО. Резкое понижение скорости поверхностной рекомбинации при взаимодействии коротковолнового излучения с поверхностью показывает, что сначала (от одной до пяти ИО) в царапине удаляются механически поврежденные слои, вносящие наибольший вклад в плотность поверхностных состояний, а затем (от пяти до одиннадцати ИО) уменьшаются размеры пластически деформированных нарушенных слоев (дефектного и напряженного), в которых

плотность энергетических состояний относительно ниже [9]. При облучении тыльной стороны модуля излучением с длиной волны 5 мкм (красные линии графика на рис. 8) наблюдается плавное улучшение чувствительности в случае, как от одной до пяти, так и от пяти до девяти ионных обработок, что связано с взаимодействием длинноволнового излучения с более глубокими слоями антимонида индия, где скорость рекомбинации носителей заряда относительно ниже поверхностной.

В глубоких участках царапин (около 1000 Å) сильнее выражено понижение чувствительности. На рисунке 9 показано, что для четырех пикселей, соответствующих глубоким участкам царапины характерна относительно большая рекомбинация и соответственно более пониженная чувствительность по сравнению с менее глубокими ее фрагментами. Чем глубже царапина, тем выше плотность состояний, по которым идет рекомбинация. У царапин небольших размеров плотность состояний значительно ниже, и чувствительность меньше падает. Следовательно, чтобы понизить падение чувствительности в более глубокой царапине необходимо снять больший слой мате-

риала. Число ионных обработок, необходимых для подавления рекомбинации в царапине и восстановления однородной чувствительности по всей площади МФП определяется соотношением глубины поврежденного и нарушенного слоев. Глубина механически поврежденных слоев определялась методом атомно-силовой микроскопии. Нарушенные слои оценивались по стадийному стравливанию тыльной стороны ионами аргона с последующим контролем рекомбинации по фотоэлектрическим характеристикам.

Итак, удаление механически поврежденных и пластически деформированных слоев материала в царапинах привело к подавлению рекомбинации и позволило получить однородную чувствительность по всей площади МФЧЭ. К тому же, предварительная обработка поверхности МФЧЭ ионами Ag^+ позволила повысить в среднем до $5 \div 7\%$ чувствительность при нанесении различных просветляющих покрытий (однослойного ZnS ; пятислойного $Si-SiO_2$; трёхслойного $Si-YF_3-Si$).

При исследовании пассивирующего и просветляющего покрытия с базовой стороны

утоненного МФЧЭ из $InSb$ были получены C-V характеристики МДП структуры $CrNi-ZnS+Ag^+-InSb$ для двух толщин диэлектрического и пассивирующего покрытия ZnS .

Аналогичные C-V характеристики для структуры $Me-SiO_2-InSb$ в области сильного обогащения можно найти в [10].

Из рис. 10 видно, что на границе раздела формируется большая положительная плотность встроенного заряда с тенденцией к уменьшению при увеличении толщины покрытия от 1084 \AA ($7,2 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$) до 2145 \AA ($9,8 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$). Учитывая то, что для просветления используемая толщина покрытия составляет $\sim 0,5 \text{ мкм}$, соответствующая минимуму отражения на длине волны $\sim 4,5 \text{ мкм}$, величина плотности встроенного заряда не должна превышать $\sim 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (которая является критичной для протекания туннельного тока на лицевой стороне МФЧЭ [11, 12]), что обеспечивает изгиб зон менее ширины запрещенной зоны $InSb$ (см. рис. 11б), и это предотвращает нестабильный процесс протекания межзонного туннельного тока j_{st} .

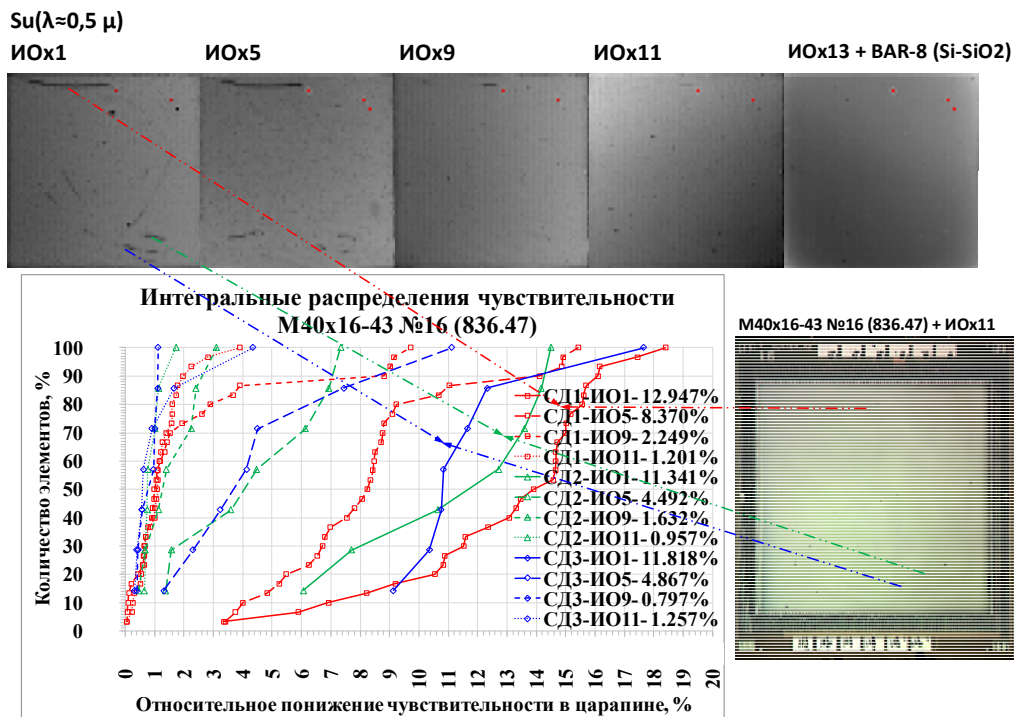


Рис. 9. Фотоэлектрические изображения распределения чувствительности по площади поверхности МФЧЭ после одной, пяти, девяти обработок ионами аргона (сверху). Оптическое изображение поверхности МФЧЭ (справа) после утоньшения до 10 мкм и гибридизации с БИС. Интегральное распределение чувствительности в царапинах глубиной около 1000 Å (красная кривая) и глубиной около 400–500 Å (зеленая и синяя кривые) в результате одной, пяти, девяти и одиннадцати ионных обработок (с продолжительностью одной ИО – пять минут)

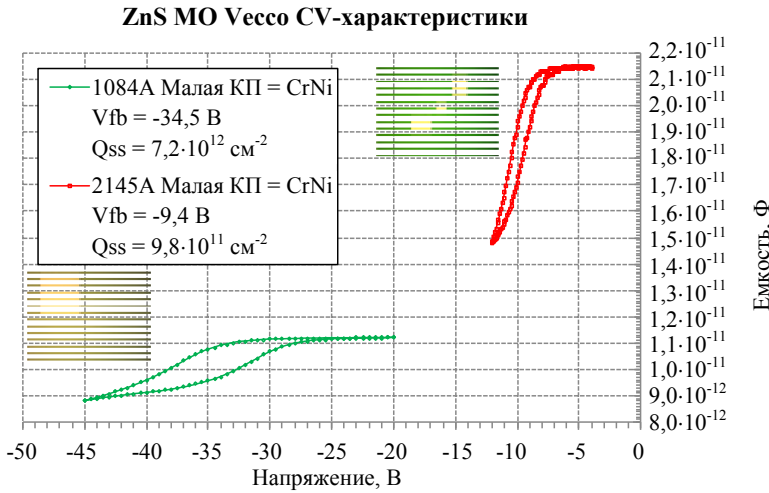


Рис. 10. C-V характеристики МДП структуры CrNi-ZnS+Ar⁺-InSb для исследования пассивирующего и просветляющего покрытия с тыльной стороны утоньшенной матрицы ФЧЭ на основе InSb

На рис. 11а показана расчётная энергетическая диаграмма ФД на основе InSb, освещаемого со стороны базовой области при большом положительном встроенном заряде на границе раздела со стороны падающего излучения, из которой видно формирование на поверхности отталкивающего поля для неосновных носителей заряда (дырок), обусловленного величиной поверхностного потенциала ϕ_s . Согласно [13] поверхностная рекомбинация через один основной уровень вблизи середины запрещенной зоны экспоненциально

зависит от высоты барьера $q\phi_s$ и быстро уменьшается с увеличением высоты барьера, как показано на расчётных кривых на рис. 11б. Из графика видно, что даже при величине скорости поверхностной рекомбинации плоских зон s равной 10^6 см/с уже при высоте барьера $q\phi_s$ равной 10 кТ (что соответствует изгибу зон менее половины ширины запрещенной зоны) скорость поверхностной рекомбинации уменьшается до приемлемой величины $s \leq 10^3 \text{ см/с}$, где квантовый выход η превышает 90 %.

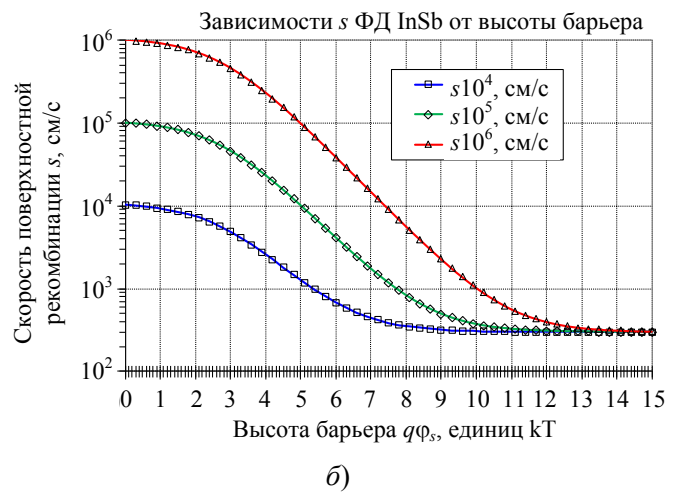
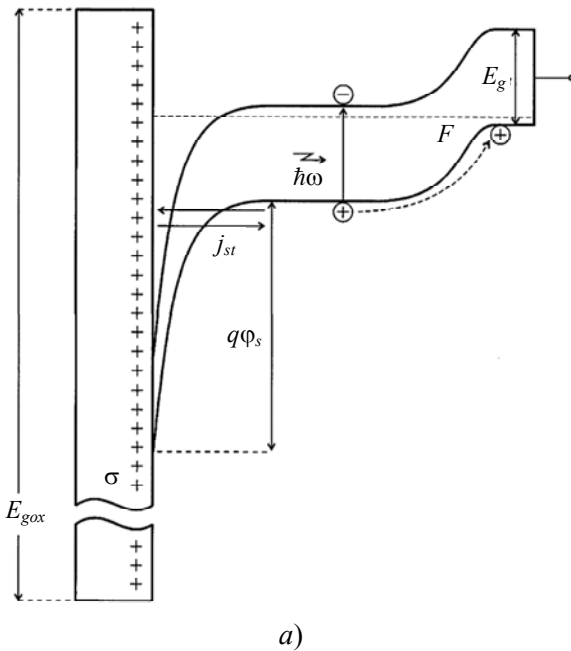


Рис. 11. а) – энергетическая диаграмма ФД на основе InSb, освещаемого со стороны базовой области при большом положительном встроенном заряде на границе раздела со стороны падающего излучения; б) – экспоненциальные зависимости скорости поверхностной рекомбинации от высоты барьера на поверхности $q\phi_s$ при различных величинах максимальной скорости поверхностной рекомбинации в условиях плоских зон

Выводы

1. С целью получения низкой скорости поверхностной рекомбинации, обеспечивающей максимальную чувствительность МФЧЭ и ее однородность по площади, можно применить следующие способы:

– Изготовление фотодиодных матриц на основе гомоэпитаксиальных структур InSb, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

– При изготовлении МФЧЭ из объемного InSb пассивировать тыльную утоньшенную сторону с применением ионной обработки так, чтобы получить положительный поверхностный встроенный заряд и величину изгиба зон, не менее половины и не более ширины запрещенной зоны.

2. При исследовании поверхностной рекомбинации желательнее использовать коротковолновые источники излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Власов П. В., Лопухин А. А., Торопов А. И., Журавлев К. С., Фадеев В. В. / Прикладная физика. 2016. № 3. С. 58–64.
2. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Седнев М. В. / Прикладная физика. 2007. № 5. С. 59–62.

3. Бурлаков И. Д., Голубков А. В., Дирочка А. И., Касаткин И. Л., Лопухин А. А., Пасеков В. Ф., Пономаренко В. П., Чишко В. Ф. / Прикладная физика. 2005. № 2. С. 16–20.

4. Болтарь К. О., Власов П. В., Лопухин А. А., Полунеев В. В., Рябова А. А. / Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 6. С. 733–738.

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. Болтарь К. О., Власов П. В., Ерошенков В. В., Лопухин А. А. / Прикладная физика. 2014. № 4. С. 45–50.

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

8. Van de Wiele F. Quantum efficiency of photodiode. Solid State Imaging. – Noordhoff, Leyden, 1976. P. 41–76, 47–90.

9. Визер Л. Н. Технология элементов и структур микроэлектроники. – Ставрополь, 2017. С. 16.

10. Plan Bloom, Yael Nemirovsky / IEEE Transactions on Electron Devices. 1993. Vol. 40. № 2. P. 309–314.

11. Кернер Б. С., Осипов В. В., Смолин О. В., Суханов А. Н., Таубкин И. И. / Физика и техника полупроводников. 1986. Т. 20. Вып. 9. С. 1739.

12. 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.

13. Пикус Г. Е. Основы теории полупроводниковых приборов. – М.: Наука, 1965. С. 138.

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

Sensitivity uniformity improvement in InSb FPA

A. A. Lopukhin¹, E. V. Permikina¹, K. O. Boltar^{1,2} and A. N. Grishina¹

¹Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia
E-mail: elenapermikina3@gmail.com

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

Received 24.08.2023; accepted 8.09.2023

Two possible methods for obtaining InSb FPA with improved uniformity are considered: the use of MBE-grown structures and the use of ionic milling in the manufacture of FPA's from a bulk material. The results of studies of sensitivity in photodiode arrays of InSb under the incident of optical radiation in the IR, visible, and UV ranges are presented. It has been established that the method of the ionic milling backside of the FPA before anti-reflective coating can significantly suppress the recombination of photo carriers, as well as improve

the adhesion of the applied anti-reflective coating. Decreases as a result of ion treatment spread of sensitivity (current or volt) over the array area in several times.

Keywords: Focal Plane Array (FPA), pixels, photodiode arrays, indium antimonide, recombination, uniformity.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-5-421-432

REFERENCES

1. Burlakov I. D., Boltar K. O., Vlasov P. V., Lopukhin A. A., Toropov A. I., Juravlev K. S. and Fadeev V. V., Applied Physics, № 3, 58–64 (2016) [in Russian].
2. Burlakov I. D., Boltar K. O. and Sednev M. V., Applied Physics, № 5, 59–62 (2007) [in Russian].
3. Burlakov I. D., Golibkov A. V., Dirochka A. I., Kasatkin I. L., Lopukhin A. A., Pasekov V. F., Ponomarenko V. P. and Chishko V. F., Applied Physics, № 2, 16–20 (2005) [in Russian].
4. Boltar K. O., Vlasov P. V., Lopukhin A. A., Poluneev V. V. and Ryabova A. A., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **1** (6), 733–738 (2013) [in Russian].
5. Baliev D. L., Boltar K. O., Vlasov P. V., Kiseleva L. V., Lopukhin A. A., Mansvetov N. G., Poluneev V. V., Rudnevsky V. V. and Savostin A. V., Applied Physics, № 2, 41–44 (2014) [in Russian].
6. Boltar K. O., Vlasov P. V., Eroshenkov V. V. and Lopukhin A. A., Applied Physics, № 4, 45–50 (2014) [in Russian].
7. Boltar K. O., Kiseleva L. V., Lopukhin A. A. and Savostin A. V. Sposob izgotovleniya matrichnogo fotopriemnika (varianty). Patent № 2460174 (RF). 2012.
8. Van de Wiele F. Quantum efficiency of photodiode. Solid State Imaging. Noordhoff, Leyden, 1976, pp. 41–76, 47–90.
9. Vizer L. N. Tekhnologiya elementov i struktur mikroelektroniki. Stavropol, 2017, pp. 16.
10. Ilan Bloom and Yael Nemirovsky, IEEE Transactions on Electron Devices **40** (2), 309–314 (1993).
11. Kerner B. S., Osipov V. V., Smolin O. V., Sukhanov A. N. and Taubkin I. I., Fizika i tekhnika poluprovodnikov **20** (9), 1739 (1986).
12. Astakhov V. P., Dudkin V. F., Kerner B. S., Osipov V. V., Smolin O. V. and Taubkin I. I. Mikroelektroniks **18** (5), 455 (1989).
13. Pikus G. E., Osnovy teorii poluprovodnikovyykh priborov, Moscow, Nauka, 1965, pp. 138.