

УДК 621.383:621.315.5

Исследование фотоэлектрической взаимосвязи элементов матричных ФП на основе гетероэпитаксиальных структур InGaAs

М. В. Седнев, К. О. Болтарь, Н. А. Иродов, С. С. Демидов

Представлены результаты исследований фотоэлектрической взаимосвязи элементов в матрицах ФЧЭ на основе различных гетероэпитаксиальных структур с поглощающим слоем InGaAs. Матрицы ФЧЭ изготовлены по разным технологиям: а — планарная, б — мезатехнология, в — мезапланарная на $nB(Al_{0,48}In_{0,52}As)p$ -структурах. Показано, что в матрицах, изготовленных по мезапланарной технологии на $nB(Al_{0,48}In_{0,52}As)p$ -структурах успешно сочетаются малые темновой ток и фотоэлектрическая взаимосвязь.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw, 42.25.Gy, 78.20.Ci

Ключевые слова: фотоэлектрическая взаимосвязь, матричные фотоприемные устройства (МФПУ), InGaAs, гетероэпитаксиальные структуры.

Введение

В последнее время обозначилась тенденция расширения использования гетероэпитаксиальных структур на основе соединений элементов III и V групп для решения задач микрофотоэлектроники. Актуальной задачей является создание матричных фотоприемных устройств (МФПУ) ближнего инфракрасного диапазонов спектра на эпитаксиальных слоях $In_xGa_{1-x}As/InP$ мегапиксельного формата [1, 2].

Традиционно в МФПУ используются матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ), изготовленные по планарной технологии и освещаемые со стороны подложки (рис. 1, а).

МФЧЭ на основе мезатехнологии привлекательны малой фотоэлектрической взаимосвязью соседних пикселей, поскольку объемы, генерирующие фототок при освещении, разделены (рис. 1, б). Это достоинство приборов на основе фотодиодных мезаструктур особенно привлекательно при использовании технологии перевернутого кристалла (освещение со стороны подложки), так как отражение принимаемого излучения от поверхности V-образных канавок, формирующих фоточув-

ствительные элементы, может улучшать пороговые характеристики МФПУ. В то же время широкие канавки могут уменьшить фоточувствительную площадь отдельного фотодиода.

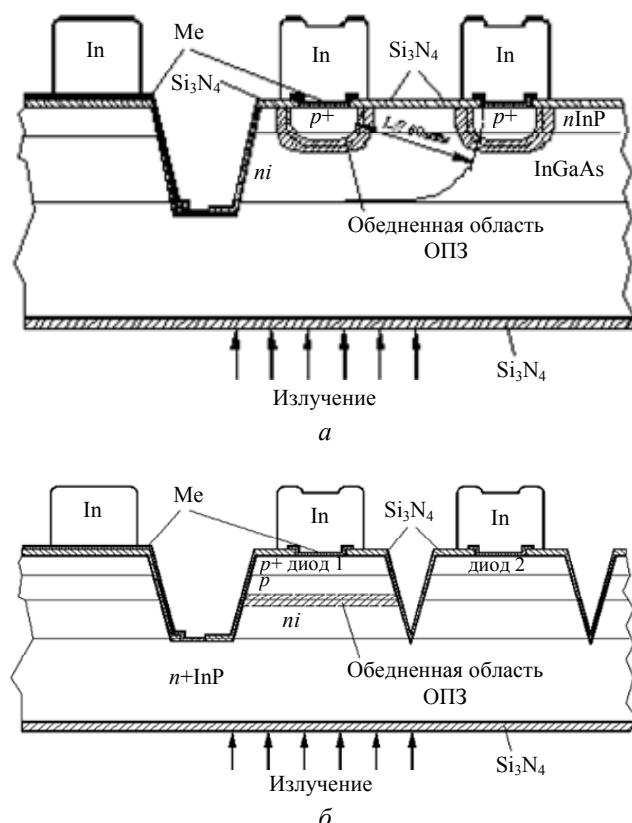


Рис. 1. Схематическое изображение фрагментов матрицы, изготовленных по планарной (а) и меза (б) технологиям

Разработку мезатехнологии сдерживает ряд проблем, одной из которых является разработка технологии пассивации боковой поверхности мезаструктуры, особенно в области выхода $p-n$

Седнев Михаил Васильевич, начальник участка¹.
 Болтарь Константин Олегович, начальник НТК¹, профессор².
 Иродов Никита Александрович, инженер 2 кат.
 Демидов Станислав Стефанович, вед. научный сотрудник.
¹АО «НПО «Орион».
 Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
 Тел. 8 (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru
²Московский физико-технический институт.
 Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,
 Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 18 мая 2015 г.

© Седнев М. В., Болтарь К. О., Иродов Н. А., Демидов С. С., 2015

перехода на поверхность, другой — получение разделяющих канавок необходимой глубины с минимальной шириной [3—5, 11].

Целью данной работы является исследование фотоэлектрической взаимосвязи элементов в матрицах ФЧЭ на основе различных гетероэпитаксиальных структур с поглощающим слоем InGaAs.

Техника эксперимента

Исследование фотоэлектрической взаимосвязи элементов матриц $p-i-n$ -фотодиодов формата 320×256 с шагом 30 мкм и 640×512 с шагом 15 мкм на основе nB - и nVp -гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) с поглощающим слоем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ проводили в матрицах ФЧЭ, изготовленных по разным технологиям: 1 — планарная, 2 — меза, 3 — мезапланарная.

Взаимосвязь определялась по зависимости фототока элемента матрицы от положения светового зонда на соседних элементах при освещении со стороны контактов к p -области $p-i-n$ -диодов (см. рис. 2). Измерения вольтамперных характеристик фотодиодов и фотоэлектрической взаимосвязи проводились на зондовой установке, разработанной для измерений параметров полупроводниковых структур, обеспечивающей измерение тока до 10^{-14} А.

Источником для формирования светового зонда служила лампа накаливания. Световое пятно размером 20—25 мкм получали на поверхности контактов к p^+ -областям фотодиодов в фокусе объектива микроскопа. Непрозрачная площадь металлической части контакта составляла ≈ 10 и 50 % при шаге 30 и 15 мкм соответственно. Измерения фототока выполняли при постоянном значении освещенности фотодиода, которая определялась током лампы накаливания и фокусным расстоянием объектива при температуре 20—25 °С.

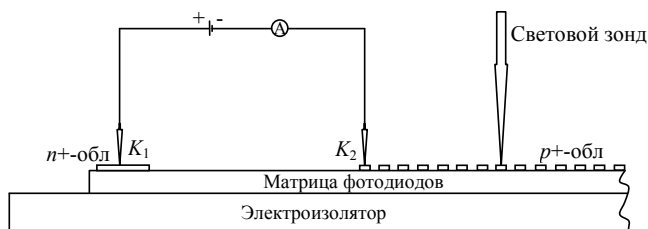


Рис. 2. Схема измерения вольтамперных характеристик и фотоэлектрической взаимосвязи. А — микроамперметр, n^+ -обл — In контакт к n^+ -области, p^+ -обл — In контакт к p^+ -области, K_1 — контактный зонд к n^+ , K_2 — контактный зонд к p^+

Изготовление образцов

Для изготовления матриц фотодиодов в работе были использованы различные гетероперехо-

ды $n\text{-InGaAs}/i\text{-InP}$, $n\text{-InGaAs}/p\text{-InP}/p^{++}\text{-InGaAs}$ и nBp -структуры, выращенные на подложке $n^+\text{-InP}$ методом МОС-гидридной эпитаксии с поглощающим слоем $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ [3], оптимальная толщина которого составляла 2,5—3 мкм для достижения максимального значения токовой чувствительности в спектральном диапазоне 1—1,65 мкм.

В традиционной планарной технологии $p-i-n$ -фотодиодов на основе $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ на сильнолегированной подложке InP функциональными слоями подложки являются следующие элементы: буферный слой n -типа проводимости, фоточувствительный слой $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ n -типа проводимости и широкозонный нелегированный слой InP, в котором методом диффузии цинка Zn или кадмия Cd формировали p^+ -области 20×20 мкм. Размеры контактных площадок каждого элемента 16×16 мкм. Поверхность чувствительных элементов защищали диэлектрическим покрытием из нитрида кремния, полученным низкотемпературным плазмохимическим осаждением.

Для фотодиодов, изготавливаемых по меза-технологии, использовались гетеропереходы $\text{InGaAs}/p\text{-InP}/p^{++}\text{-InGaAs}$, имеющие следующую конфигурацию: высоколегированная оптически прозрачная подложка InP с концентрацией доноров $(5\text{—}20) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$; высоколегированный буферный слой InP n^+ -типа проводимости; активный поглощающий слой $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ с низким уровнем концентрации доноров $n = (0,5\text{—}20,0) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; широкозонный слой InP, толщина которого составляла 0,2—0,5 мкм с концентрацией акцепторов $p = (1\text{—}3) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; контактный высоколегированный слой $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ толщиной 0,2—0,5 мкм с концентрацией акцепторов $p^+ = (3\text{—}5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Разделение элементов матрицы осуществлялось травлением ионами аргона через маску фоторезиста до буферного n^+ -слоя и финишным жидкостным травлением [5, 11].

В нашей работе также были использованы nBp -структуры с барьерным и пассивирующим слоем $\text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}$. Параметры слоев схематично представлены в табл. 1.

Таблица 1

nBp -ГЭС-структура с $\text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}$

Состав слоя	Толщина слоя, нм
$p^{++}\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}:\text{Zn}$	50
$p^+\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}:\text{Zn}$	100
Нелегир.-Al о.48InAs	100
$p\text{-AlIn о.53GaAs}$	5
$n\text{-AlIn о.53GaAs}$	54
Плавный переход -Al-Ga	
$n^+\text{-In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$	5
$n\text{-In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$	2100
$n^+\text{-InP}$	340
Подложка $n^+\text{-InP}$ (100) диаметр 50,8 мм	

Экспериментальные результаты

На рис. 3 представлены зависимости тока крайнего в матрице элемента от положения светового зонда на матрицах с шагом 30 мкм, изготовленных по традиционной планарной технологии с пассивирующим и антиотражающим покрытием Si₃N₄ (рис. 3, а) и мезатехнологии (рис. 3, б) — глубокая меза (3—4 мкм). Положительные значения положения зонда соответствуют расположению в массиве МФЧЭ, а отрицательные в поле гетероструктуры за пределами матрицы фотодиодов.

скорее всего, отражением света от боковых поверхностей освещаемого мезаэлемента, а также характером распределения плотности излучения в световом зонде (можно предположить, что фоток тестируемого элемента мезаматрицы позволяет оценить интенсивность плотности потока излучения в сечении зонда). К сожалению, в настоящее время в технологии мезафотодиодов не удается получить достаточно низкие темновые токи. Проведенные исследования показали, что темновой ток мезадиодов определяется утечками по периметру *p-n*-перехода [11, 13].

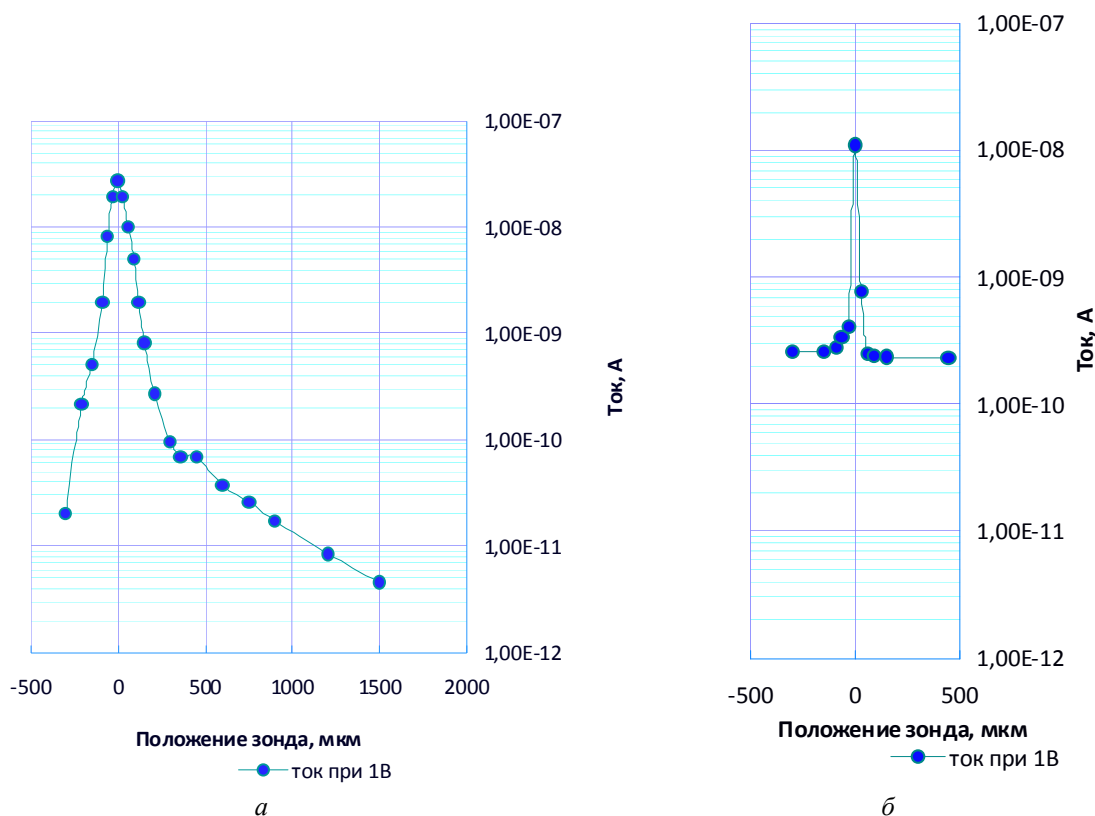


Рис. 3. Ток элемента в зависимости от положения светового зонда на матрицах с шагом 30 мкм: а — планар, б — глубокая меза (3—4 мкм)

Фототок освещаемого элемента планарных матриц более чем в два раза превышает значение этого параметра у мезаматриц. Это различие, в определенной степени, можно объяснить отсутствием антиотражающего покрытия в элементах, изготовленных по мезатехнологии, а также меньшей на величину разделительной канавки площадью мезафотодиода. Смещение светового зонда на 30 мкм приводит к уменьшению фототока в 1,5 раза для планарных и более чем на порядок у мезафотодиодов. Характерной особенностью реакции тестируемого элемента мезаматриц является малое (6 %) значение фотоэлектрической взаимосвязи с соседними элементами (рис. 4, б), поскольку области генерации носителей тока разделены. Наблюдаемое значение взаимосвязи обусловлено,

Пассивация поверхности открытых после травления участков мезы является приоритетной задачей, решение которой позволит в полной мере реализовать достоинства мезаматриц [11].

Ослабить влияние поверхности на темновой ток возможно, в частности, уменьшая открытую после травления мезы поверхность, площадь которой возрастает пропорционально глубине травления. Изменение чувствительности в матрице фотодиодов по мере травления мезы на глубину функциональных слоев ГЭС-структуры представлено на рис. 4. После селективного травления сильнолегированного контактного *p*⁺⁺-InGaAs-слоя до *p*⁺-InP-слоя фототок тестируемого элемента матрицы при перемещении светового зонда быстро уменьшается при удалении влево и медленно

спадают при движении по элементам матрицы (см. рис. 4, а). Разделение элементов матрицы по p^+ -InP-слою селективным травлением до поглощающего слоя InGaAs незначительно уменьшает взаимосвязь (рис. 4, б). Только после травления поглощающего слоя на глубину 0,5 мкм от металлургической границы с p^+ -InP было обнаружено уменьшение темнового тока до значений 0,4 пА при обратном смещении 0,5 В. Изменение фототока тестируемого элемента при перемещении светового зонда представлено на рис. 4, в. Взаимосвязь соседних элементов составляет менее 10 %.

областей генерации неосновных носителей соседних элементов.

Перспективным развитием применения nBp -структур для разработки технологии фотодиодов с фотоактивным слоем $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ является использование в качестве широкозонного материала слоев $Al_{0,48}In_{0,52}As$ с согласованным периодом решетки. Нелегированный AlInAs-барьерный и пассивирующий слой позволяет изолировать фотодиоды друг от друга, не открывая поверхность InGaAs и одновременно уменьшая ток диффузии электронов (см. рис. 5) [6].

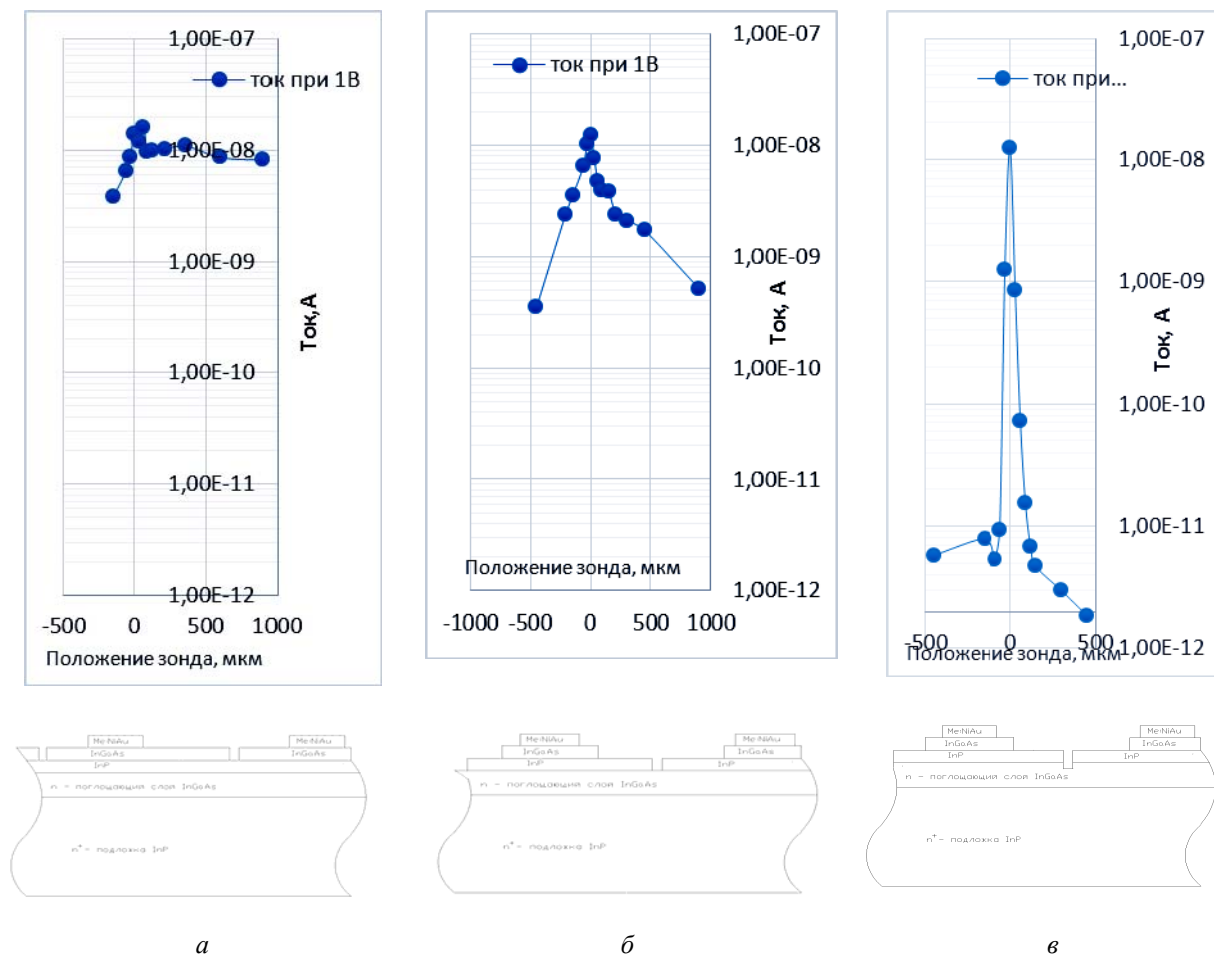


Рис. 4. Ток крайнего в мезаматрице элемента в зависимости от положения светового зонда, шаг 30 мкм после травления: а — 0,4 мкм InGaAs, б — 0,4 мкм InGaAs+0,4 мкм InP, в — 0,4 мкм InGaAs+0,4 мкм InP+0,5 мкм от InP

Очевидным результатом проведенного исследования (травление мелкой мезы) является то, что граница p -области находится в n -InGaAs, причем ниже поверхности, разделяющей эпитаксиальные слои p^+ -InP и n -InGaAs, но не глубже травления разделительной канавки на глубину 0,5 мкм в n -InGaAs. Это свидетельствует о размывании гетероэпитаксиальной границы между InP и InGaAs.

Однако в таких матрицах (при необходимой толщине слоя поглощения 2—2,5 мкм, использованных в работе структур) нет полного разделения

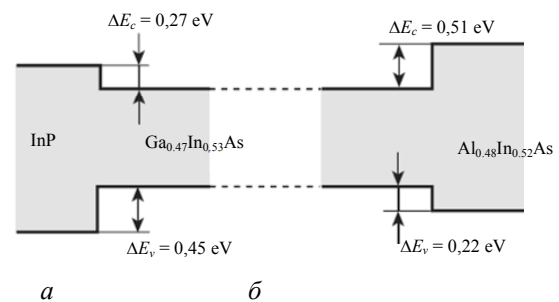


Рис. 5. Схематичная зонная диаграмма для $In_{0,53}Ga_{0,47}As / InP$ (а) и $In_{0,53}Ga_{0,47}As / Al_{0,48}In_{0,52}As$ (б) гетероструктур. Величины ΔE_c и ΔE_v получены усреднением литературных данных [7]

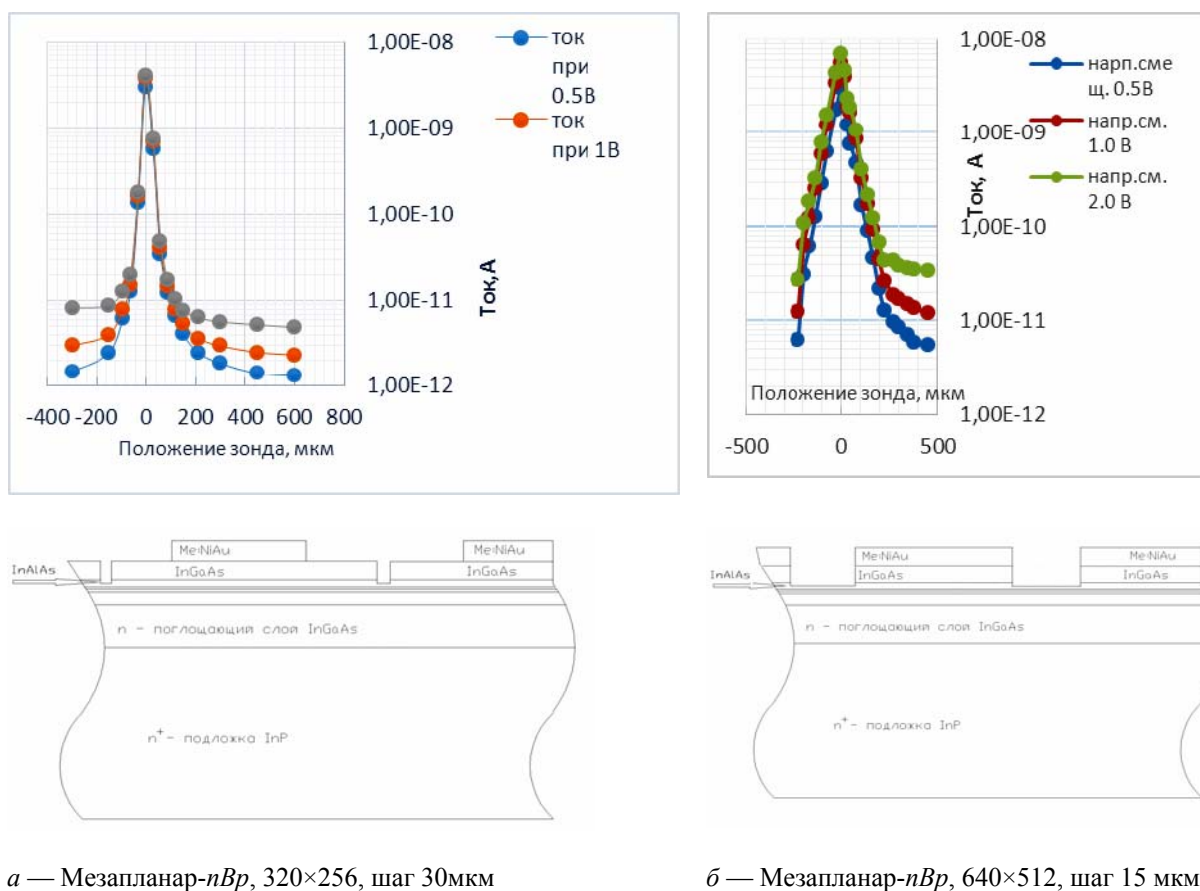
Распределение фотоотклика тестируемого элемента в зависимости от положения светового зонда в мезапланарных матрицах фотодиодов с шагом 30 и 15 мкм, изготовленных из *nVp*-ГЭ-структур с $Al_{0,48}In_{0,52}As$, представлено на рис. 6. Из рисунка видно, что фототок освещаемого элемента в 5 раз меньше, чем у планарных фотодиодов. Ширина распределения чувствительности значительно шире у матрицы с шагом 15 мкм. Спад фототока на два порядка при перемещении светового пятна, представленного в полулогарифмическом масштабе, можно аппроксимировать прямой линией.

Обсуждение

Из представленных в полулогарифмическом масштабе экспериментальных результатов измерения фототока крайнего в матрицах фотодиода (рис. 3—6) видно, что при удалении светового зонда ток уменьшается обратно пропорционально расстоянию, что характерно для функций с экспоненциальным убыванием. Это уменьшение можно аппроксимировать суммой двух (быстрой и медленной) экспоненциально убывающих компонент фототока при перемещении светового зонда вправо и влево от крайнего фотодиода.

В табл. 2 представлены экспериментальные длины спадов, на которых фототок уменьшается в «е» раз, для матриц фотодиодов, изготовленных по разным технологиям на основе перечисленных выше ГЭС.

Длина спада фотоотклика тестируемого элемента при удалении светового зонда характеризует фотоэлектрическую взаимосвязь соседних элементов матрицы. Механизмами, осуществляющими ее, могут быть диффузия и дрейф неравновесных фоторожденных неосновных носителей тока. Конструкция исследованных в работе ГЭС обеспечивает поглощение основной доли излучения, концентрируемого в световом зонде, в слаболегированном слое $InGaAs$ *n*-типа проводимости. Диффузионную длину дырок (неосновных носителей) $L_p = (D_p \cdot t_p)^{0,5}$; можно определить с помощью соотношения Эйнштейна $D_p = kT/e \cdot m_p$, $L_p (T = 300 \text{ K}) = 1,58 \cdot 10^{-2} (m_p \cdot t_p)^{0,5}$. Рассчитанные значения длины диффузии при разных значениях эффективного времени жизни дырок t_p и подвижности $m_p = 300 \text{ В} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ представлены в табл. 3 и могут иметь значения от 15 до 47 мкм для эффективного времени жизни в диапазоне 0,3—3,0 мкс.



а — Мезапланар-*nVp*, 320×256, шаг 30мкм

б — Мезапланар-*nVp*, 640×512, шаг 15 мкм

Рис. 6. Ток крайнего элемента в меза-планарной матрице из *nVp*-ГЭ-структур с $Al_{0,48}In_{0,52}As$ в зависимости от положения светового зонда: а — шаг 30 мкм, б — шаг 15 мкм

Таблица 2

Тип матрицы	Длина быстрого спада слева, мкм	Длина быстрого спада справа, мкм	Длина медленного спада, мкм	Темновой ток, pA	Концентрация доноров в поглощающем слое, см ⁻³
Планар, шаг 30	№ 1	43	326	20	1,6*10 ¹⁶
	№ 2	90	260	100	6*10 ¹⁴
Меза, шаг 30	№ 1			200	6*10 ¹⁴
	№ 2			10	3*10 ¹⁶
Меза по InP 29*29, шаг 30	60	50—60	110/391		
Меза-мелкая, шаг 30	9	13—15	391	0.4	2*10 ¹⁶
Мезапланар шаг 30	10	13		0.3	0,9*10 ¹⁶
Мезапланар шаг 15	43	39	391—400	0.3	0,9*10 ¹⁶

Таблица 3

Время жизни дырок, мкс	0,3	1,0	2,0	3,0
Расчетное значение длины диффузии дырок в слое поглощения, мкм, $T = 300$ К, $mp = 300$ В*см ² с ⁻¹	14,8	27	38	47

Исследованные тестируемые элементы матриц фотодиодов смещены внешним источником напряжения в обратном направлении. Величина смещения находилась в пределах 0,5—2,0 В. Изменение напряжения смещения увеличивает ширину W области пространственного заряда (ОПЗ) по закону $W \approx \text{const} \cdot (V+V_b)^{0,5}$ и, соответственно, коэффициент собирания фоторожденных носителей. Оценка показывает, что при обратном напряжении смещения V около 0,5 В, ширина ОПЗ $W \approx 0,7$ мкм и сравнима с толщиной слоя поглощения, но много меньше длины диффузии неосновных носителей. Электрическое поле в поглощающем слое InGaAs по направлению движения светового зонда меньше kT/q . При отсутствии поля или слабом электрическом поле основной вклад в фототок дают носители, собираемые диффузией генерируемых электронно-дырочных пар из освещаемого объема: $I_\phi = I_o \cdot \exp(-x/Lp)$ [12].

Поэтому слева от тестируемого фотодиода спад фототока определяется длиной диффузии дырок в поглощающем слое (см. табл. 2). С увеличением концентрации доноров длина диффузии дырок уменьшается, что приводит уменьшению длины спада.

Длина спада фототока тестируемого элемента больше при движении светового зонда в направлении центра матрицы, чем в направлении от нее (слева). В большей степени это проявляется у матриц, изготовленных по планарной технологии, у которых толщина широкозонного слоя InP толще (1÷3 мкм).

Обратное наблюдается у матриц с изолирующим широкозонным слоем Al_{0,48}In_{0,52}As. У матрицы с шагом 30 мкм длина спада меньше, чем у матрицы с шагом 15 мкм, несмотря на то, что они изготовлены из одной ГЭС пластины. Но отношение площади металлического контакта к площади фотодиода при шаге 30 мкм в 4 раза меньше.

Можно предположить, что такое поведение спада обусловлено генерационно-рекомбинационными процессами на гетероэпитаксиальной границе широкозонного и узкозонного полупроводников при поглощении коротковолновой части спектра излучения лампы накаливания, что может приводить к увеличению или уменьшению эффективного времени жизни носителей на поле матрицы фотодиодов. Для объяснения такого поведения длины спада в матрицах необходимо дополнительное исследование.

Вклад второй медленной составляющей спада фототока тестируемого элемента незначителен (менее 1 %) и обусловлен, по-видимому, неоднородностью распределения плотности излучения в световом зонде.

Заключение

Основной вклад в фотоэлектрическую взаимосвязь между элементами матриц фотодиодов на основе гетероструктур с поглощающим слоем n -InGaAs определяет диффузия неосновных носителей из объема, прилегающего к металлургической границе p^+ - n -перехода.

Наибольшей взаимосвязью отличаются планарные матрицы фотодиодов, полученных диффузией Zn на гетероэпитаксиальных структурах n -InGaAs/ i -InP.

Наименьшая фотоэлектрическая взаимосвязь получена на матрицах с разделением области поглощения глубокой мезой. Пассивация поверхности открытых после травления участков мезы является важной задачей, решение которой позволит в полной мере реализовать достоинства мезаматриц [11].

Сочетание малой фотоэлектрической взаимосвязи и низких темновых токов в матрицах на основе nVp -гетероэпитаксиальных структур с широкозонным слоем Al_{0,48}In_{0,52}As заслуживает повышенного внимания к этому направлению техноло-

гии крупноформатных фотоприемников ближнего ИК-диапазона.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787.2014.9

ЛИТЕРАТУРА

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Тришенков М. А. Современное состояние и магистральные направления развития твердотельной фотоэлектроники. — М.: Физматкнига, 2011.
2. Дирочка А. И., Курбатов Л. Н. Фотоэлектроника. Базовые лекции по электронике. Т. 2. Твердотельная электроника. — М.: Техносфера, 2009.
3. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Седнев М. В. // Прикладная физика. 2007. № 5. С. 58.
4. Gloersen Per G. // J. Vac. Sci. Technol. 1975. V. 12. Jan./Feb. P. 28.

5. Седнев М. В., Болтарь К. О., Шаронов Ю. П. и др. // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 51.
6. Kim J. K., Cich M. J., Keeler G. A., et al. // Applied Physics Letters. 2009. V. 95. P. 031112.
7. Sadao Adachi. Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors — John Wiley & Sons, Ltd., 2009.
8. Ивановский Г. Ф., Петров В. И. Ионно-плазменная обработка материалов. — М.: Радио и связь, 1986.
9. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Седнев М. В. Патент РФ № 2308788 от 20.01.06.
10. Седнев М. В., Зубкова Е. Н., Шаронов Ю. П. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 350.
11. Болтарь К. О., Седнев М. В., Савостин А. В. и др. Заявка № 2013118764 от 24.04.13.
12. Шалимова К. В. Физика полупроводников. — М.: Энергия. 1976.
13. Sheela D. and DasGupta Nandita // Semiconductor Science and Technology 2008. V. 23. P. 035018.

Research of photoelectric interrelation of elements in a photodiode matrix on the basis of InGaAs heteroepitaxy structures

M. V. Sednev¹, K. O. Boltar^{1,2}, N. A. Irodov¹, and Demidov¹

¹Orion R&P Association, Inc.
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology (State University)
9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

Received May 18, 2015

Consideration is given to photoelectric interrelation of elements in photodiode matrixes on the basis of various heteroepitaxy structures with InGaAs absorbing layer. Photodiode matrixes are made on different technologies: planar, mezatechnology, mezaplanar on nB (Al_{0.48}In_{0.52}As) p-structures. It is shown that the small dark current and photoelectric interrelation are successfully combined in matrixes made on mezaplanar technology on nB (Al_{0.48}In_{0.52}As) p-structures.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw, 42.25.Gy, 78.20.Ci

Keywords: photoelectric interrelation, FPA, InGaAs, heteroepitaxy structures.

REFERENCES

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *The Current Status and Main-Line Trackage for Development of Photoelectronics* (Fizmatkniга, Moscow, 2010) [in Russian].
2. A. I. Dirochka and L. N. Kurbatov, *Photoelectronics. Vol. 2. Solid-State Electronics* (Tekhnosfera, Moscow, 2009) [in Russian].
3. I. D. Burlakov, K. O. Boltar, and M. V. Sednev, *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 58 (2007).
4. Per G. Gloersen, *J. Vac. Sci. Technol.* **12** (Jan./Feb.), 28 (1975).
5. M. V. Sednev, K. O. Boltar, and Yu. P. Sharonov, *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 51 (2014).
6. J. K. Kim, M. J. Cich, G. A. Keeler, et al., *Applied Physics Letters* **95**, 031112 (2009).
7. Sadao Adachi, *Properties of Semiconductor Alloys: Group-IV, III-V and II-VI Semiconductors* (John Wiley & Sons, Ltd., 2009).
8. G. F. Ivanovsky and V. I. Petrov, *Ion-Plasma Treatment of Materials* (Radio Svyaz'. Moscow, 1986) [in Russian].
9. I. D. Burlakov, K. O. Boltar, and M. V. Sednev, RF Patent No. 2308788, January 20, 2006.
10. M. V. Sednev, E. N. Zubkova, and Yu. P. Sharonov, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 350 (2013).
11. K. O. Boltar, M. V. Sednev, A. V. Savostin, et al., RF Patent Application No. 2013118764, April 24, 2013.
12. K. V. Shalimova, *Semiconductor Physics* (Energia, Moscow, 1976) [in Russian].
13. D. Sheela and Nandita DasGupta, *Semiconductor Science and Technology* **23**, 035018 (2008).

* * *