

УДК 621.383.4/5

Матричные лавинные фотодиоды на основе гетероэпитаксиальных структур InGaAs/InAlAs/InP с разделенными областями поглощения и умножения

Н. И. Яковлева, К. О. Болтарь, Н. А. Иродов, Е. А. Климанов

Проанализированы особенности построения архитектур лавинных фотодиодов с разделенными областями поглощения (InGaAs) и умножения (InAlAs). Рассмотрены две архитектуры: $p^+-M-c-i-n^+$ и $p^+-i-c-M-n^+$ -типа, реализованные в гетероструктурах (ГЭС) InGaAs/InAlAs/InP. Обязательными для каждой архитектуры являлись три основных слоя: поглощающий (i), зарядовый (c) и умножающий (M). На основе данных ГЭС InGaAs/InAlAs/InP, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии (МОСГЭ), формировались матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ). Исследования вольт-амперных характеристик лавинных элементов в матрицах позволило рассчитать коэффициенты умножения фототока, которые в диапазоне обратных напряжений смещения $U = 8-14$ В изменялись от 1 до 18—25.

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

Ключевые слова: InGaAs, InP, коротковолновый инфракрасный спектральный диапазон, SWIR, гетероэпитаксиальные структуры InGaAs/InAlAs, ГЭС, лавинные структуры с разделенными слоями умножения и поглощения, матрицы лавинных фотодиодов, вольт-амперная характеристика.

Введение

В настоящее время в опто- и фотоэлектронике развивается ряд новых направлений, связанных с разработкой фотоприемных устройств (ФПУ) [1, 2], предназначенных для систем, работающих в активно-импульсном режиме. Основные требования, которые предъявляются к фотоприемным устройствам, работающим в активно-импульсном режиме

достаточно высоки, но они в полной мере реализуются с помощью матриц лавинных фотодиодов.

Конструкции лавинных фотодиодов весьма разнообразны [3—5], причем одним из перспективных материалов для их реализации являются гетероэпитаксиальные структуры на основе материалов A_3B_5 — InGaAs, фоточувствительные в коротковолновой области спектра.

Однако в полупроводниковых структурах на основе материалов группы A_3B_5 с поглощающим слоем InGaAs имеется существенный недостаток, который заключается в повышенной вероятности межзонного туннелирования. Разделение областей поглощения и умножения решает эту проблему, поскольку в таких структурах поглощение осуществляется в узкозонном материале, в то время как умножение происходит в более широкозонном материале с большей шириной запрещенной зоны, что позволяет реализовать режим лавинного усиления при сохранении невысокого уровня шумов.

Целью работы являлся анализ архитектуры лавинных фотодиодов в гетероэпитаксиальных структурах на основе арсенидов с фоточувствительным слоем InGaAs и исследование их характеристик.

Яковлева Наталья Ивановна, зам. начальника НИЦ¹.
Болтарь Константин Олегович, начальник НТК¹, профессор².
Иродов Никита Александрович, начальник участка¹.
Климанов Евгений Алексеевич, главный научный сотрудник¹, профессор³.

¹ АО «НПО «Орион».

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

Тел. 8 (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

² Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,

Институтский пер., 9.

³ Московский технологический университет (МИРЭА).

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

Статья поступила в редакцию 10 ноября 2016 г.

© Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Иродов Н. А.,
Климанов Е. А., 2016

Конструктивные особенности лавинных элементов

Достижение максимального коэффициента умножения при минимальном значении темновых токов и шумов достигается за счет выбора и конструирования оптимальной структуры матрицы фоточувствительных элементов с лавинным умножением. Наиболее перспективной на сегодняшний день считается структура с разделенными областями поглощения и умножения, которая формируется в едином процессе эпитаксиального выращивания. Разделение на отдельные лавинные элементы осуществляется мезатравлением [6]. Архитектуры МФЧЭ, реализуемые на основе гетероструктур InGaAs/InAlAs/InP с лавинным усилением, представлены на рис. 1.

Возможны два типа мезаструктур для построения элементов с лавинным умножением: структура $p^+-N-c-i-n^+$ -типа (рис. 1, а), в которой первичными носителями заряда в процессе лавинного умножения выступают дырки, и структура $p^+-i-c-P-n^+$ -типа (рис. 1, б), в которой первичными носителями заряда выступают электроны.

Как представлено на рис. 1, архитектура прибора с разделенными слоями поглощения и умножения InGaAs/InAlAs реализуется на основе структуры p^+-i-n^+ -фотодиода с поглощающим слоем i -типа проводимости, в которую добавляется либо широкозонный N -слой ($p^+-N-c-i-n^+$), либо широкозонный P -слой ($p^+-i-c-P-n^+$), умножающие носители заряда. Для области поглощения традиционно используется тройное соединение арсенида индия-галлия ($\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$), состав ар-

сенида индия $x = 0,53$ мол. доли. Для области лавинного умножения фотогенерированных носителей заряда используется тройное соединение арсенида индия-алюминия ($\text{In}_{0,52}\text{Al}_{0,48}\text{As}$), широкозонное изопериодичное с поглощающим слоем соединение, содержание арсенида индия в котором $x = 0,52$ мол. доли.

P - n -переход формируется между контактным и широкозонным слоями (p^+-N или $P-n^+$), при этом широкозонный слой обедняется, между ним и контактным высоколегированным слоем возникает электрическое поле, в области которого возможно лавинное умножение. Наиболее критичным технологическим параметром для лавинного фотодиода является напряженность встроенного электрического поля, так как умножение наступает при напряженности электрического поля более $(1,5-2,0) \times 10^5$ В см⁻¹, ибо только в этом случае ожидается процесс ударной ионизации носителей заряда при их взаимодействии с кристаллической решеткой.

Между умножающим и поглощающим слоями располагается специальный зарядовый слой (c), обычно довольно сильно легированный. Влияние зарядового слоя на зонную диаграмму лавинного элемента поясняется на рис. 2, а, б.

Как видно из рис. 2, роль зарядового слоя заключается в контроле электрического поля внутри лавинного фотодиода (ЛФД). Зарядовый слой должен предотвращать эффект пробоя и туннелирования в поглощающем слое, но в то же время он должен поддерживать достаточное поле в области поглощения для эффективного сбора фотоносителей заряда.

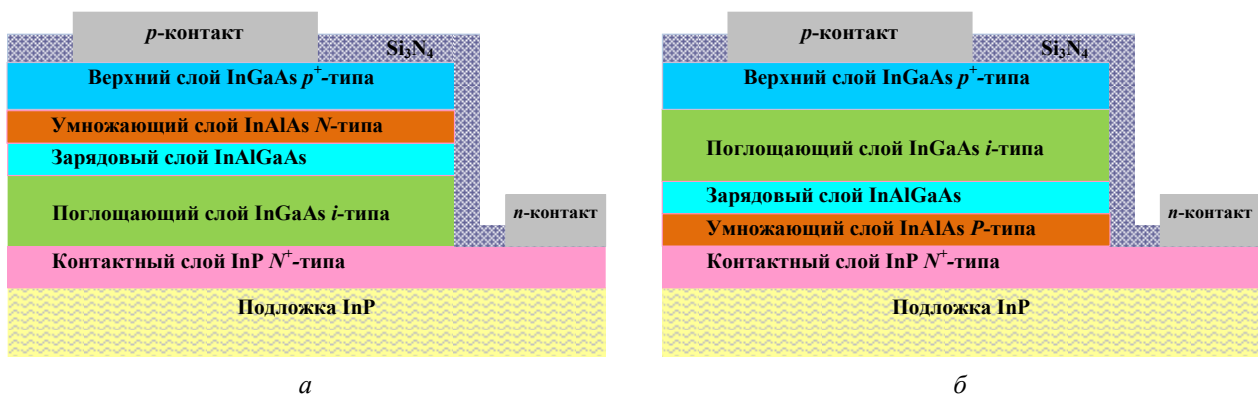


Рис. 1. Структура лавинного элемента: а) $p^+-N-c-i-n^+$ -типа; б) $p^+-i-c-P-n^+$ -типа.

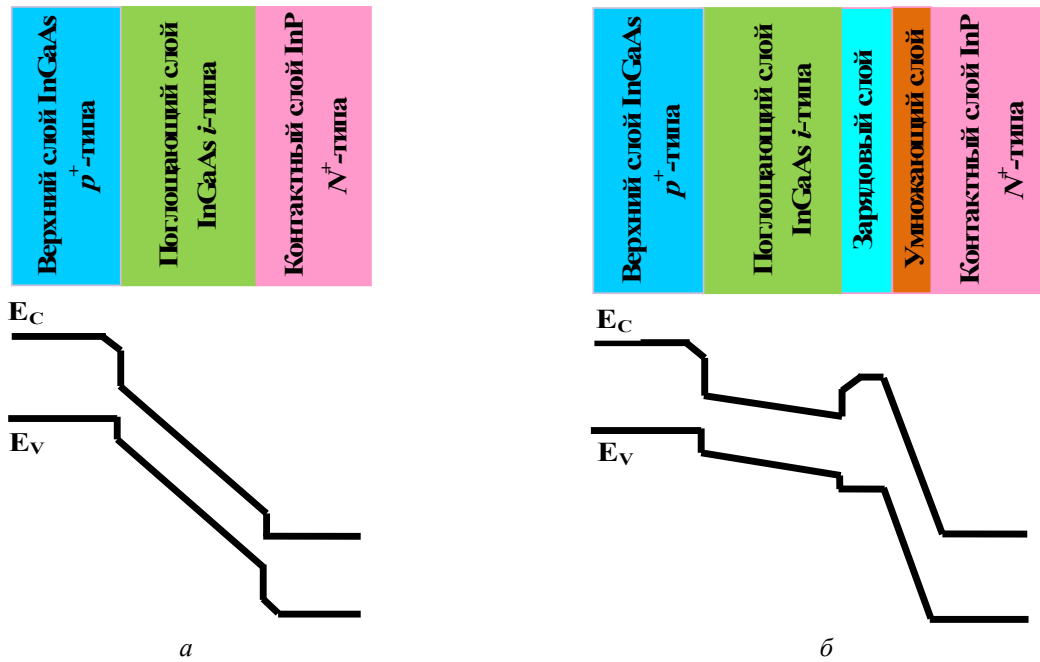


Рис. 2. Расположение слоев и схематичные зонные диаграммы для $p-i-n$ -структуры (а) и структуры с разделением областей поглощения и умножения $p^+-i-c-P-n^+$ -типа (б).

При повышении напряжения на структуре, поле возрастает в слое умножения и в обедненной части зарядового слоя в соответствии с формулой:

$$E_0 = \frac{U_0}{d_{\text{умн}} + (1/2) \times d_{\text{зар}}^*},$$

где U — напряжение смещения на структуре; U_0 — падение напряжения в области умножения и частично в зарядовом слое; $d_{\text{умн}}$ — толщина области умножения; $d_{\text{зар}}$ — толщина зарядового слоя. При дальнейшем повышении напряжения происходит полное обеднение зарядового слоя при напряжении U_0 , определяемом соотношением:

$$U_0 = \frac{qNd_{\text{зар}}}{\epsilon\epsilon_0} (d_{\text{умн}} + d_{\text{зар}}).$$

При дальнейшем росте напряженности поле распределяется в область поглощения

$$E_{\text{умн}} = \frac{U_0}{d_{\text{умн}} + 1/2 \cdot d_{\text{зар}}} + \frac{U - U_0}{d_{\text{умн}} + d_{\text{зар}} + d_{\text{пог}}},$$

при этом напряженность в области поглощения равна

$$E_{\text{пог}} = \frac{U - U_0}{d_{\text{умн}} + d_{\text{зар}} + d_{\text{пог}}}.$$

От параметров зарядового слоя зависит ожидаемое включение режима лавинного умножения, который должен наступать не ранее, чем область обеднения распространится на зарядовую область и область поглощения, так как при $U < U_0$ поле

распространяется только на область умножения, которая при значении $U = U_0$ полностью обедняется. При $U > U_0$ поле распространяется на область умножения, зарядовый слой и частично на область поглощения.

Дополнительное легирование зарядового слоя используется, чтобы поле при небольших напряжениях смещения не распространялось в узкозонный поглощающий слой, а экстремально высокое поле поддерживалось только в слое умножения, причем для эффективного контроля режима умножения зависимость поля в слое умножения от напряжения вблизи пробоя должна быть по возможности плавной.

Отдельные требования предъявляются также к слою умножения.

1. Слой умножения должен быть широкозонным, что позволяет при заданных напряжениях смещения устойчиво работать в режиме лавинного усиления, не переходя в режим теплового пробоя.

2. Концентрация легирующих примесей слоя умножения должна быть мала, чтобы обеспечить высокое сопротивление, а, следовательно, и достаточную для режима умножения напряженность электрического поля.

3. В режиме лавинного усиления температурная зависимость коэффициентов ионизации электронов и дырок должна быть незначительной.

4. Высокое качество кристаллической структуры материала слоя умножения, что позволяет уменьшить токи туннелирования.

5. Дополнительно слой умножения должен находиться в хорошем соответствии по кристаллической структуре с поглощающим слоем.

На рис. 3 представлены возможные структуры лавинного элемента, в которых получен эффект умножения.

Таким образом, конструкция лавинного элемента содержит три основных слоя: поглощающий, зарядовый и умножающий, правильный выбор которых является крайне важным. Изменяя параметры данных слоев можно настроить внутренние характеристики прибора, такие как квантовая эффективность, быстродействие, уровень шума, усиление, и др. С увеличением ширины области поглощения квантовая эффективность растет, при этом быстродействие падает. Экспериментальные исследования показывают, что длина области поглощения должна составлять 1—2 мкм, при этом толщина слоя умножения должна быть в ~10 раз меньше, что позволяет работать при относительно невысоких напряжениях обратного смещения.

Экспериментальные исследования лавинных элементов

На рис. 4, а—г представлены экспериментальные вольт-амперные характеристики (ВАХ) и

коэффициенты умножения, которые для структур (рис. 3, а и б) с умножением дырок и электронов изменяются от 1 до 18—25 единиц в диапазоне напряжений обратного смещения 8—14 В. В рабочем диапазоне напряжений смещения коэффициент умножения составляет порядка 10—20, при этом избыточный шум-фактор не превышает 4.

На ВАХ лавинного элемента отчетливо видны две области, причем первый прокол наступает в точке «runch-through», в которой обедняется область умножения. При напряжении обратного смещения, соответствующего данной точке, начинается обеднение зарядового слоя, и скорость увеличения поля в области умножения с ростом обратного напряжения смещения замедляется. Из рис. 4, а, б видно, что в некотором диапазоне напряжений смещения ток не умножается, а коэффициент лавинного усиления равен единице, на ВАХ наблюдается плато, т.е. в данной области напряжений смещения поле начинает возрастать не только в области умножения, но и в области поглощения. Если процесс лавинного усиления наступает раньше, чем ВАХ выйдет на плато, то возникают трудности с определением начальной точки процесса умножения. Второй прокол начинается, когда поле возрастает настолько, что обедняются не только области умножения и зарядового слоя, но и область поглощения.

$p^+ - \text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$	$3,5 \times 10^{19}$	0,05
$p^+ - \text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}:\text{Zn}$	$3,5 \times 10^{18}$	0,110
Умножающий слой $i - \text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}$	$< 1 \times 10^{15}$	0,110
$p - \text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}$	7×10^{17}	0,006
Переходный слой $n - \text{AlInGaAs}$	$< 1 \times 10^{15}$	0,060
$n - \text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$	7×10^{17}	0,006
Поглощающий слой $n - \text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$	$2,5 \times 10^{16}$	1,450
Буферный слой (InP) n -типа	5×10^{17}	0,35
Подложка из InP (100) n -типа, Ø 50,8 мм	2×10^{18}	350

а

$p^+ - \text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$	$2,3 \times 10^{19}$	0,200
$p - \text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}$	$1,5 \times 10^{18}$	0,340
Переходный слой $i - \text{AlInGaAs}$	$< 1 \times 10^{15}$	0,070
Поглощающий слой $n - \text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$	$2,5 \times 10^{16}$	1,620
Переходный слой $i - \text{AlInGaAs}$	$< 1 \times 10^{15}$	0,070
$p - \text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}$	$1,5 \times 10^{17}$	0,130
Умножающий слой $i - \text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}$	$< 1 \times 10^{15}$	0,150
$n - \text{Al}_{0,48}\text{In}_{0,52}\text{As}$	$2,8 \times 10^{18}$	0,150
Буферный слой (InP) n -типа	$2,8 \times 10^{18}$	0,200
Подложка из InP (100) n -типа, Ø 50,8 мм	2×10^{18}	350

б

Рис. 3. Структуры лавинных фотодиодов, в которых первичными носителями заряда в процессе умножения выступают дырки (а), электроны (б).

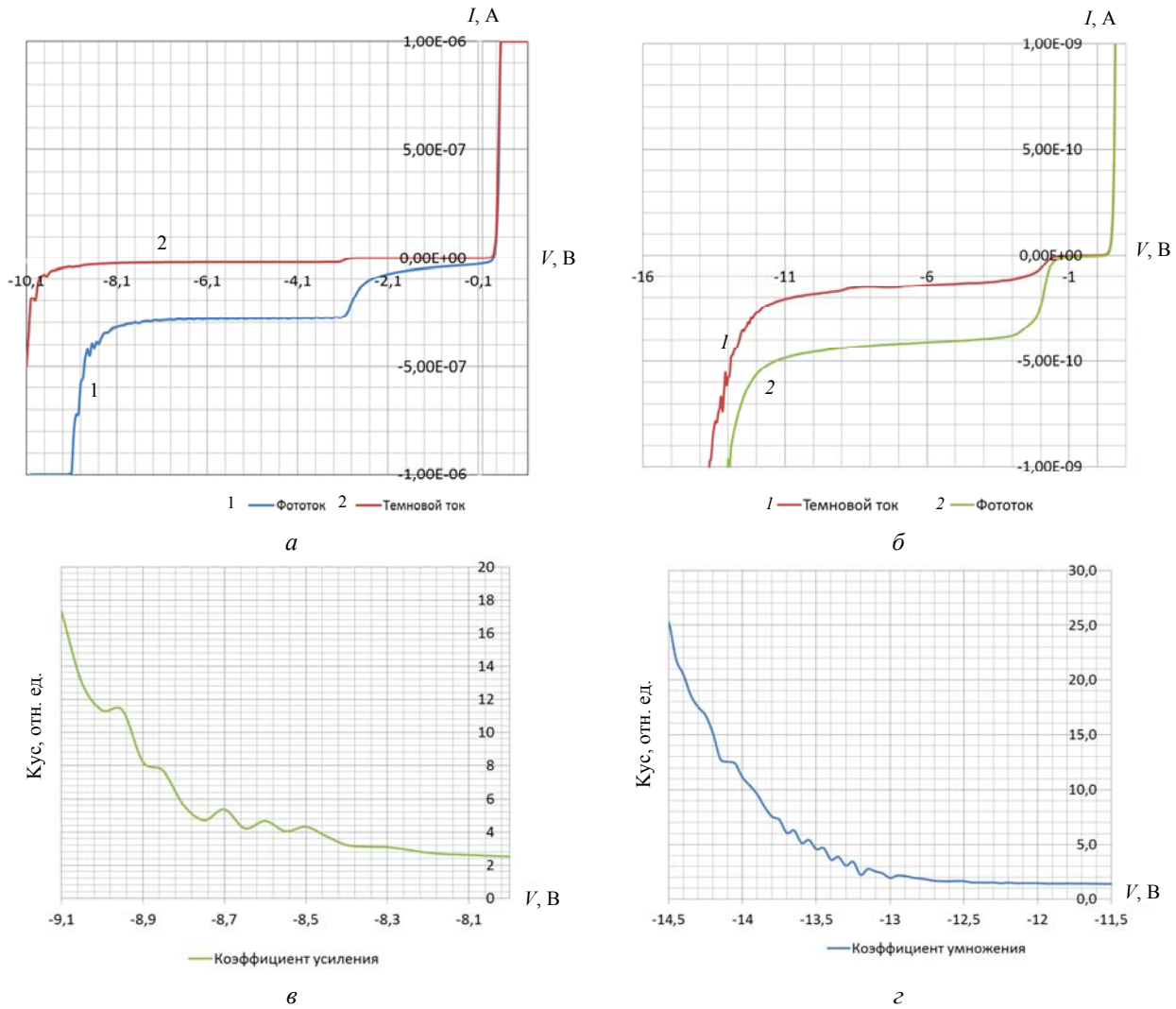


Рис. 4. Экспериментальные характеристики: ВАХ (а, б) и коэффициенты умножения (в, z) для структур, представленных соответственно на рис. 3.

Используя приведенные выше формулы можно оценить максимальное поле, при котором начинается процесс умножения. Для первой структуры имеем оценки:

$$E_{M1} = \frac{3}{0,11+0,03} + \frac{5}{0,11+0,06+1,45} \text{ В/мкм} = (2,1+0,3) \times 10^5 \text{ В/см} = 2,4 \times 10^5 \text{ В/см},$$

т.е. напряжённость электрического поля составила $\sim 2,4 \times 10^5$ В/см. Для второй структуры имеем также соответствующие оценки:

$$E_{M2} = \frac{1,6}{0,15+0,04} + \frac{11,4}{0,15+0,2+1,62} \text{ В/мкм} = (0,84+0,58) \times 10^5 \text{ В/см} = 1,42 \times 10^5 \text{ В/см}$$

т.е. напряжённость электрического поля составила $1,42 \times 10^5$ В/см.

Сравнив результаты ВАХ для двух различных структур лавинного элемента, можно сделать выводы, что с точки зрения меньшего обратного напряжения смещения предпочтительна первая структура (с умножением дырок), т.к. процесс умножения начинается при более низком напряжении обратного смещения, что важно для уменьшения потребляемой мощности. При этом в ней достигнуто большее значение квантовой эффективности. С точки зрения достижения меньших значений темнового тока, предпочтительнее вторая структура (с умножением электронов). Из расчетов следует, что во второй структуре поле в большей степени распространяется в область поглощения, чем в первой, вследствие чего возможно более резкое возрастание избыточного шум-фактора.

Таким образом, за счет разделения функций поглощения и умножения, а также выбора толщины области умножения на порядок меньшей, чем области поглощения, достигнуты высокие пара-

метры лавинных фотодиодов: высокая квантовая эффективность при приемлемом коэффициенте усиления (~ 20) и избыточном шум-факторе, не превышающем 4.

Из графиков видно, что для увеличения параметров лавинных ФПУ желательно уменьшать избыточные шумы лавинных элементов. Из литературы известно, что в тонких умножающих слоях возможно дополнительное уменьшение шум-фактора за счет эффекта «мертвой зоны» («dead-space» effect [7, 8]).

Заключение

Рассмотрены две архитектуры лавинных элементов с разделением функций поглощения и умножения: $p^+M-c-i-n^+$ и $p^+-i-c-M-n^+$ -типа, реализованные в гетероструктурах InGaAs/InAlAs/InP. Обязательными для каждой архитектуры являлись три основных слоя: поглощающий (i), зарядовый (c) и умножающий (M). В обеих архитектурах получен коэффициент усиления тока от 1 до 18—25 в рабочем диапазоне напряжений смещения 8—14 В. Изменяя параметры основных слоев структур, можно осуществить настройку внутренних характеристик приборов, например, таких как квантовая эффективность, быстродействие, уровень шума, усиление, и др.

Экспериментально получено, что толщина слоя умножения порядка 100—110 нм является хорошим компромиссом для получения приемлемого коэффициента умножения (~ 20) при значениях напряжении обратного смещения (8—14 В) и незначительном увеличении мультипликативных шумов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Тришенков М. А. Современное состояние и магистральные направления развития современной фотоэлектроники. — М.: Физматкнига, 2010.
2. Филачев А. М., Таубкин И. И., Тришенков М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. — М.: Физматкнига, 2011.
3. Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Седнев М. В., Патрашин А. И., Иродов Н. А. // Прикладная физика. 2014. № 2. С. 45.
4. Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Седнев М. В. // Успехи прикладной физики. 2014. Том 2. № 4. С. 374.
5. Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Седнев М. В., Лопухин А. А., Коротаев Е. Д. // Прикладная физика. 2015. № 1. С. 87.
6. Седнев М. В., Болтарь К. О., Шаронов Ю. П., Лопухин А. А. // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 51.
7. Ma F., Wang S., Li X., Anselm K. A., Zheng X. G., Holmes A. L., Jr., and Campbell J. C. // Journal of Applied Physics. 2002. Vol. 92. No. 8. P. 4791.
8. Saleh M. A., Hayat M. M., Sotirelis P. P., Holmes A. L., Jr., Campbell J. C., Saleh B. E. A., and Teich M. C. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2001. Vol. 48. No. 12. P. 2722.

An avalanche photodiode array based on the InGaAs heterostructures with separated absorption and multiplication layers

N. I. Iakovleva¹, K. O. Boltar^{1,2}, N. A. Irodov¹, and E. A. Klimanov^{1,3}

¹ Orion R&P Association
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

² Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutsky al., Dolgoprudny, Moscow region, 141700, Russia

³ Moscow Technological University (MIREA)
78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia

Received November 10, 2016

The features of a heterostructure and operating conditions for avalanche photodiode arrays (APAs) with an absorption region and a multiplication region separated by a charge layer (SACM structures) have been reported. The spatial separation of the absorption and multiplication functions allows maintaining a low electric field in the narrower bandgap absorber while creating a sufficiently high electric field in the multiplication region. The doped «charge» layer between the absorption and multiplication regions allows for more flexible tailoring of the internal electric field profile, along with the associated avalanche process. Two main structures $p^+-N-c-i-n^+$ - and $p^+-i-c-P-n^+$ -

types with multiplication processes have been considered, and both of InGaAs/InAlAs heterostructures were formed by Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (MOVPE) on n^+ -type InP substrates. The current-voltage characteristics of SACM avalanche photodiodes have been measured to estimate the multiplication factors under reverse bias which changed from 1 to 25 within the range of reverse bias 8—14 V.

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

Keywords: InGaAs, InP, Short Wavelength Infrared Region, SWIR, InGaAs/InAlAs heterostructures, SACM, structure avalanche photodiode, APD, avalanche photodiode arrays, APAs, current-voltage characteristics.

REFERENCES

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, M. A. Trishenkov, *The Current Status and Main-Line Trackage for Development of Photoelectronics* (Fizmatkniga, Moscow, 2010) [in Russian].
2. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, M. A. Trishenkov *Solid state Photoelectronics. Photodiodes* (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
3. N. I. Iakovleva, K. O. Boltar, M. V. Sednev, I. A. Patrashin, and N. A. Irodov, *Prikl. Fiz.* No. 2, 45 (2014).
4. N. I. Iakovleva, K. O. Boltar, M. V. Sednev, *Usp. Prikl. Fiz.*, **2**, 374 (2014).
5. N. I. Iakovleva, K. O. Boltar, M. V. Sednev, A. A. Lopuhin, and E. D. Korotaev, *Prikl. Fiz.*, No. 1, 87 (2015).
6. M. V. Sednev, K. O. Boltar, Y. P. Sharonov and A. A. Lopukhin, *Prikl. Fiz.*, No. 4, 51 (2014).
7. F. Ma, S. Wang, X. Li, K. A. Anselm, X. G. Zheng, A. L. Holmes, Jr., and J. C. Campbell, *Appl. Phys.*, **92**, 4791 (2002).
8. M. A. Saleh, M. M. Hayat, P. P. Sotirelis, A. L. Holmes, Jr., J. C. Campbell, B. E. A. Saleh, and M. C. Teich, *IEEE Transactions on Electron Devices*, **48**, 2722 (2001).