

# Фотоэлектроника

УДК 621.383

## ЛФД на основе гетероструктур InGaAs/InP (обзор)

А. К. Будтолаева, П. Е. Хакуашев, И. В. Чинарева

*В статье предложен обзор литературных данных в области создания лавинных фотодиодов на основе гетероэпитаксиальных структур InGaAs/InP. Рассмотрены типы эпитаксиальных структур, причем уделено особое внимание описанию изготовления планарных лавинных фотодиодов. На основе анализа литературных данных определены основные задачи, решение которых обеспечит разработку отечественных методов изготовления коммерческих лавинных фотодиодов в диапазоне длин волн 0,9—1,7 мкм.*

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

*Ключевые слова:* InGaAs/InP, лавинный фотодиод, охранное кольцо, диффузия, ионная имплантация.

### Введение

Разработка методов изготовления лавинных фотодиодов (ЛФД) на основе InGaAs/InP продиктована потребностями нынешнего времени и отсутствием отечественных коммерческих ЛФД на основе гетероэпитаксиальных структур InGaAs/InP в диапазоне от 0,9 до 1,7 мкм. В последнее время вопрос создания промышленных методов изготовления ЛФД на основе InGaAs/InP стоит особенно остро в связи с задачей импортозамещения.

ЛФД на основе гетероструктур InGaAs/InP нашли свое применение во многих технических областях, например, в линиях волоконно-оптической связи, лазерных радарах и дальнометрах, в системах регистрации слабых оптических импульсов и т. п.

Целью данной работы является обзор литературных данных, прежде всего зарубежных, в области создания лавинных фотодиодов на основе гетероэпитаксиальных структур InGaAs/InP в интересах обеспечения разработки отечественных методов изготовления коммерческих лавинных фотодиодов в диапазоне длин волн 0,9—1,7 мкм.

### Типы эпитаксиальных структур для ЛФД на диапазон длин волн от 0,9 до 1,7 мкм

Первые попытки реализовать ЛФД на основе InGaAs/InP начинаются примерно с конца 70-х — начала 80-х годов. В статье [1] дано знакомство с историей первых разработок ЛФД с подобной гетероструктурой.

Понимание физики ЛФД помогает правильному выбору материалов. Физические явления, влияющие на работу ЛФД, подробно описаны в литературе [2, 3].

Типы эпитаксиальных структур для ЛФД на диапазон длин волн от 0,9 до 1,7 мкм представлены на рис. 1.

Бесспорно, что основным материалом для реализации поглощения в указанном диапазоне длин волн является тройное соединение  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , причем с 53 % InAs его часто называют «стандартный InGaAs». Это тройное соединение (даже без указания величин « $x$ » и « $1-x$ ») является согласованным по постоянной решётки с подложками из InP, имеет ширину запрещённой зоны 0,74 эВ и покрывает диапазон длин волн от 0,9 до 1,7 мкм. Толщина слоя около 2 мкм обеспечивает высокую квантовую эффективность, конкретно, около 90 %.

Первые разработки начинались с попыток реализовать ЛФД с гомоструктурой InGaAs, основываясь на структуре кремниевых и германиевых ЛФД. Однако для такой структуры темновой ток в области пробивного напряжения имеет степенную зависимость, в связи с чем усиление также падает. Удалось установить, что причина возникновения большого темнового тока связана с малой шириной запрещенной зоны  $E_g = 0,75$  эВ. В связи с тем, что для InGaAs характерен прямой переход, при приложении большого электрического поля протекает большой межзонный туннельный ток [4].

Будтолаева Анна Константиновна, инженер.  
Хакуашев Павел Евгеньевич, заместитель начальника  
ПТК по производству.  
Чинарева Инна Викторовна, ведущий инженер-технолог.  
АО «НПО «Орион».  
Россия, 111538, Москва, ул. Коссинская, 9.  
Тел. (495) 672-20-31. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 28 июня 2015 г.

© Будтолаева А. К., Хакуашев П. Е., Чинарева И. В., 2015

$n^-$ -InP	$\approx 1 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$	$\approx 2 \text{ мкм}$
$n$ -InP — область умножения	$\approx 5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$	$\approx 0,5 \text{ мкм}$
$n$ -InGaAs — слой поглощения	$\approx 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$	$\approx 3 \text{ мкм}$
$n$ -InP — буфер		
$n^+$ -InP — подложка		

*a*

$n^-$ -InP	$\approx 2 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$	$\approx 2,0\text{—}2,2 \text{ мкм}$
$n$ -InP	$\approx 1,0\text{—}1,3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$	$\approx 1,8\text{—}2,0 \text{ мкм}$
$n$ -InGaAs	$\approx 0,1 \text{ мкм}$	$\approx 8 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$
$n^-$ -InGaAs	$\approx 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$	$\approx 4 \text{ мкм}$
$n$ -InP — буфер		
$n^+$ -InP — подложка		

*б*

$i$	2	InP — область умножения
$n$	3	InP — область заряда $\approx 0,2 \text{ мкм}$ $\approx 2,2\text{—}3,5 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$
$i$	4	InGaAsP — буферные слои $\approx 25\text{—}50 \text{ нм}^*$
	5	InGaAsP — буферные слои $\approx 25\text{—}50 \text{ нм}^*$
	6	InGaAsP — буферные слои $\approx 25\text{—}50 \text{ нм}^*$
	7	$\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,73}\text{As}$ — поглощающий слой $0,8\text{—}1,5 \text{ мкм}$ $\approx \leq 10^{15} \text{ см}^{-3}$
$n^+$	8	InP — буфер $\approx 1,0 \text{ мкм}$ $\approx 1\text{—}5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$
	9	InP — подложка

*в*

$p^+$	1	Контактный слой $p^+$ -InGaAs $0,02 \text{ мкм}$
	2	База $p^+$ -InP $0,5 \text{ мкм}$
$i$	3	Переходная обл. нелегир. InGaAlAs $0,1 \text{ мкм}$
	4	Область поглощения излучения нелегиров. InGaAs $2,5 \text{ мкм}$
	5	Переходная обл. нелегир. InGaAlAs $0,1 \text{ мкм}$
$p$	6	Область градиента поля $P$ -AlInAs $0,1 \text{ мкм}$
$i$	7	Область умножения нелегиров. AlInAs $0,2 \text{ мкм}$
$n^+$	8	Область градиента поля $n$ -AlInAs $0,2 \text{ мкм}$
	9	Буфер $n^+$ -InP $0,5 \text{ мкм}$
	10	подложка $n^+$ -InP (100)

*г*

Рис. 1. Типы эпитаксиальных структур для ЛФД: *a* — гетероструктура InGaAs/InP с отдельными областями поглощения и умножения; *б* — гетероструктура InGaAs/InP с буферным слоем InGaAsP и дополнительным слоем InP для предотвращения поверхностного пробоя; *в* — гетероструктура с несколькими буферными слоями InGaAsP и встроенной областью заряда InP; *г* — эпитаксиальная структура на основе гетеропереходов InGaAs/InAlAs/InP с областью умножения в InAlAs

Для его подавления была разработана структура, показанная на рис. 1, *a*, в которой поглощение происходит в слое InGaAs с малой шириной запрещенной зоны, а область, в которой происходит усиление при приложении большого электрического поля, создана в широкозонном фосфиде индия ( $E_g = 1,35 \text{ эВ}$ ) [5]. Это т. н. ЛФД с разделенными областями поглощения и умножения (SAM). Свет поглощается в InGaAs, и дырки, имеющие более высокий коэффициент ударной ионизации, чем электроны, выносятся в InP-переход, где происходит лавинное умножение. Считается, что в ЛФД на гетероструктуре InP/InGaAs с  $p$ - $n$ -перехо-

дом, расположенным в слое InP, можно получить уменьшенный ток междузонного туннелирования и, как следствие, меньшую величину темнового тока. Благодаря такой структуре, достигается снижение темнового тока и повышение усиления.

Однако в работе подобных ЛФД существует потенциальная проблема. На разрыве валентной зоны ( $0,36 \text{ эВ}$ ), на гетеропереходе InGaAs/InP могут накапливаться дырки, тем самым увеличивая время отклика [6—8]. Чтобы этого избежать, между InGaAs и InP добавляют слой InGaAsP с промежуточной шириной запрещенной зоны или комбинацию слоев разного состава (см. рис. 1, *б*).

Многие фирмы-производители изготавливают ЛФД основе InGaAs/InP-структуры с разделенными областями умножения и поглощения даже не вида  $p-n-i-n$ , а более сложную  $p-(i)-n-i-n$ -структуру (SAGCM), показанную на рис. 1, в. Другими словами, дополнительная узкая лавинная область высокой напряженности электрического поля формируется между  $p$ - и  $n$ -областями также, как  $p$ - и  $n$ -области — это соединение InP. Эта область называется областью заряда. Заряд ионизированных доноров в этой области обуславливает перепад напряженности электрического поля между областью умножения в InP и областью поглощения в InGaAs.

Тройные соединения InGaAs и четверные InGaAsP могут быть выращены на подложке из InP практически всеми известными эпитаксиальными методами: жидкофазной эпитаксией, гидридной газофазной и газофазной эпитаксией из металлоорганических соединений, молекулярно-лучевой эпитаксией. Для создания ЛФД приходится налагать жесткие ограничения не только на толщину слоев, но и на концентрацию в каждом слое. Однако жидкофазная эпитаксия уступает газофазной и молекулярно-лучевой по возможности выращивания тонких слоев, высокочистых слоев и слоев с высокой точностью поддержания концентрации примеси, однородности слоев по площади пластин большого диаметра (более двух дюймов). Кроме того, эффект «обратного оплавления» препятствует выращиванию InP непосредственно на InGaAs. Указанные методы позволяют контролировать малую остаточную концентрацию доноров (обычно  $n \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$  для InP и  $n \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$  для  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ ). Первые результаты были получены для лавинных фотодиодов при использовании металлоорганических соединений [9] и при использовании гидридов [10], что указало на перспективность этого вида эпитаксии для создания фотодиодов на гетеропереходах. То же самое можно сказать и о выращивании методом молекулярной эпитаксии.

Так как лавинное умножение является случайным процессом, то этот лавинный процесс приводит к возникновению в усиленном токе дополнительного шума, называемого шумом лавинного умножения. Обычно этот шум характеризуется т. н. шум-фактором. Многие годы предпринимаются различные попытки для создания ЛФД с рабочими характеристиками и малыми шумами умножения. Основным направлением стало упорядочение процесса лавинного умножения при использовании односторонней лавины и многокаскадных структур.

В многокаскадных структурах с зарядовой связью между каскадами обеспечивается преимуще-

ственное умножение носителей заряда одного типа (если  $\alpha \gg \beta$ , то электронов). При этом дырки отстраняются от участия в размножении. Лавинное умножение электронов ограничивается несколькими узкими (порядка длины их свободного пробега) слоями, примыкающими к гетеропереходам. Последовательно дрейфуя через каскады, электрон в каждом каскаде в идеале совершает один акт ударной ионизации, в результате которой рождаются новые электрон и дырка. Ионизация становится детерминированной, существенно уменьшается число возможных вариантов развития лавины, соответственно, сужается распределение коэффициентов умножения, и уменьшается шум-фактор.

Разнообразные идеи создания многокаскадных ЛФД обсуждаются уже не один десяток лет. В последнее время, а именно, после создания современного эпитаксиального оборудования и отработки методик выращивания совершенных гетеропереходов, стало возможным получение многокаскадных ЛФД с конкурентно-способными параметрами.

Еще одним перспективным направлением является ЛФД на основе гетероструктур InGaAs/InAlAs/InP (см. рис. 1, з). В InGaAs/InP ЛФД область размножения располагается в InP, из области поглощения в нее поступают дырки, а в этом материале коэффициент ионизации дырок  $\beta$  незначительно превосходит коэффициент ионизации электронов  $\alpha$  ( $\beta/\alpha \sim 2,3$ ). Это приводит к заметному шум-фактору. В ЛФД InGaAs/InAlAs/InP первичными умножаемыми носителями являются не дырки, а электроны, и их размножение происходит не в слое InP, а в слое InAlAs. Соотношение коэффициентов ударной ионизации возрастает ( $\beta/\alpha \sim 3,7$ ), так что шум-фактор лавины снижается [11].

В ЛФД на InGaAs/InAlAs/InP может достигаться средний коэффициент умножения, равный 20, при небольших коэффициентах избыточного шума, значения которых находятся в диапазоне от 4 до 7 в зависимости от толщины слоя умножения [12].

Однако в более поздней публикации [13] приведен подробный сравнительный анализ характеристик ЛФД InGaAs/InP и InGaAs/InAlAs/InP, который демонстрирует, что явного преимущества ЛФД InGaAs/InAlAs/InP пока не наблюдается.

В статье [14] сообщается, что низкий коэффициент шума можно получить благодаря структуре с пространственной модуляцией распределения вероятности ударной ионизации.

Таким образом, для реализации ЛФД необходимо обладать совершенным методом выращивания многослойных эпитаксиальных структур с же-

сткими требованиями к концентрации носителей и толщине каждого слоя, обеспечивающими высокую однородность слоев по площади пластины и высокую воспроизводимость процесса выращивания.

### Сравнение планарного и мезаспособа изготовления ЛФД

ЛФД на основе гетероструктуры InGaAs/InP изготавливаются как по меза-, так и по планарному варианту.

В мезаструктурах  $p$ - $n$ -переход формируется путем легирования слоя умножения при его эпитаксиальном выращивании или постростовой диффузией (цинк, кадмий). В планарных фотодиодах  $p$ - $n$ -переход создается в уже выращенном эпитаксиальном слое диффузией или ионной имплантацией через отверстия в диэлектрической маске

из нитрида кремния. Эта маска впоследствии может быть использована и в качестве пассивирующего покрытия.

Большое количество работ посвящено вопросам оптимизации структур [15, 16]: последовательности, составу и свойствам эпитаксиальных слоев и исследованию параметров ЛФД, изготовленных на таких структурах с помощью выделения активной области путем травления мезы. Когда же речь заходит о серийном производстве ЛФД с высокой стабильностью и воспроизводимостью параметров, то фирмы-изготовители (Hamamatsu, Laser Component, Goodrich Corporation, Princeton Lightwave и др.) переходят к планарному варианту, который широко используется из-за его простоты и воспроизводимости технологических операций, а также высокой надёжности и низкой стоимости [17]. Параметры некоторых серийно выпускаемых ЛФД представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры некоторых серийно выпускаемых ЛФД

Параметр	Ед. Изм.	Laser Component									Excelitas Technologies			Hamamatsu			Voxtel		
		IAG 080X			IAG200X			IAG350X			C306 EH			G8931-04			VF11-DAZA		
		min	typ	max	min	typ	max	min	typ	max	min	typ	max	min	typ	max	min	typ	max
Спектральный диапазон	нм	от 1000 до 1630									от 1100 до 1700			от 950 до 1700			от 800 до 1750		
Пиковая длина волны	нм	1550									1550			1550			1064—1550		
Диаметр активной области	мкм	78	80	82	200	205	210	350	352	355	50	80	200	400			250		
Чувствительность, при $M=1$ , 1550 нм	А/Вт	0,85	0,90	1,00	0,85	0,90	0,95	0,90	0,94	1,05	0,93	0,93	0,93	0,8	0,9	—	7,2 (при $M=10$ )		
Темновой ток, при $M=10$	нА	—	1	15	—	8	25	—	190	250	25	35	70	—	40	65	2,2		
Рабочее напряжение, при $M=10$	В	—	55	70	43	55	75	30	45	60									
Напряжение пробоя min/max	В	40	65	80	50	63	83	35	55	70	40 / 90	40 / 90	40 / 90	40		60	30	37	40
Емкость	пФ	0,32	0,35	0,4	—	1,5	2,0	—	4,1	4,6	0,6	1,25	2,5		0,35	0,45		0,23	
Температурный коэффициент напряжения пробоя	В/°С	0,05	0,06	0,07	—	0,075	—	—	0,075	—	0,14	0,14	0,14	—	0,11	0,16			
Полоса пропускания, при $M=10$	Гц	2,0	2,5	3,0	1	1,5	1,5	—	0,6	—	—	—	—	3,0	4,0	—	3,4		
Эквивалентная мощность шума, при $M=10$	пВт/Гц <sup>1/2</sup>	—	0,01	0,04	—	0,032	0,10	—	0,12	—	—	—	—				0,15		

### Планарный способ изготовления ЛФД

Возвращаясь к описанию изготовления, стоит еще раз отметить, что для создания ЛФД очень важна структура исходной гетероэпитаксиальной пластины. Это необходимо для уменьшения темнового тока и повышения быстродействия. Еще большое значение для повышения коэффициентов лавинного умножения является требование к конструкции охранной зоны.

Наличие защитного кольца в виде глубоко диффундированной  $p$ -области на краю  $n^+p$ -перехода является особенностью ЛФД. Защитное кольцо уменьшает ток утечки вблизи краёв перехода и предотвращает низковольтный пробой, а это необходимо для получения надежного ЛФД с высокой однородностью распределения чувствительности по fotocувствительной площадке.

В системе InP/InGaAsP с согласованными решетками толщина верхнего слоя InP обычно ограничена величиной примерно 3 мкм, поскольку в эпитаксиальных слоях InP большой толщины образуются дислокации рассогласования. С учетом дозы, необходимой для возникновения лавины, глубина  $p-n$ -перехода должна быть не более 2 мкм с резким профилем легирования. Такой переход характеризуется малой величиной пробивного напряжения в месте выхода  $p-n$ -перехода на поверхность с меньшей, чем в плоской части  $p-n$ -перехода, из-за малого радиуса кривизны. Для предотвращения раннего пробоя на поверхности в этом тонком слое InP надо создать условия для предотвращения этого явления

Топологические способы предотвращения раннего пробоя:

- использование глубокого плавного перехода перекрывающего область резкого мелкого перехода (охранное кольцо или система колец с перекрытием резкого перехода);
- использования дополнительного слоя InP с уменьшенной концентрацией примеси для расширения области пространственного заряда в месте выхода  $p-n$ -перехода на поверхность;
- использование мелкого охранного кольца, перекрывающего активную область;
- использование мелких плавающих охранных колец или системы колец;

Методы, обеспечивающие предотвращение раннего пробоя:

- имплантация с последующим высокотемпературным отжигом;
- длительная низкотемпературная диффузия в область охранного кольца;

- двухстадийная диффузия: мелкая в охранное кольцо и глубокая в активную область;
- профилирование поверхности для создания заглубленной активной области с последующей одностадийной диффузией;
- сочетание стандартной диффузии в активную область с диффузией через пленку SiO<sub>2</sub> в область мелкого охранного кольца.

Глубокое защитное кольцо обычно образуется плавным линейным  $p-n$ -переходом, чтобы обеспечить в нем более высокое значение напряжения пробоя, чем в активной области, в которой формируется резкий  $p-n$ -переход. Резкие переходы могут быть получены, как уже говорилось ранее, диффузией кадмия или цинка, обычно применяемой для формирования  $p^+$ -области в  $n$ -InP. Диффузия цинка проводится в следующих условиях:

- в ампуле из Zn<sub>3</sub>P<sub>2</sub>;
- в установке МОС-гидридной эпитаксии из диметилла цинка;
- из Zn<sub>3</sub>P<sub>2</sub> распыленного на поверхность пластины методом резистивного испарения в вакууме с последующим быстрым термическим отжигом под пленкой SiO<sub>2</sub> или фосфоросиликатного стекла.

Для формирования плавных линейных  $p-n$ -переходов перспективным методом является ионная имплантация бериллия, поскольку плотность легирования и глубина перехода могут в ней устанавливаться подбором величины дозы облучения и энергии ионов [18].

Поперечное сечение ЛФД с рассматриваемой охранной системой представлено на рис. 2, а. Авторами статьи сообщается, что для проверки этой защитной структуры были проведены испытания, которые демонстрируют эффективность защитного кольца [18].

Начиная еще с конца 70-х годов, изучалась возможность использовать для ионной имплантации бериллия [19–21]. Например, структура охранного кольца с предпочтительным боковым расширением (PLEG) разработана, как сообщается авторами статьи [22], с целью улучшения характеристик охранного кольца в планарных ЛФД с высоким-низким профилем распределения легирующей примеси (см. рис. 2, б). Мелкое охранное кольцо служит для устранения краевого пробоя глубокого охранного кольца за счет уменьшения его кривизны в области обеднения.

Структура охранного кольца выполнялась ионной имплантацией бериллия в двух различных режимах и последующим отжигом.

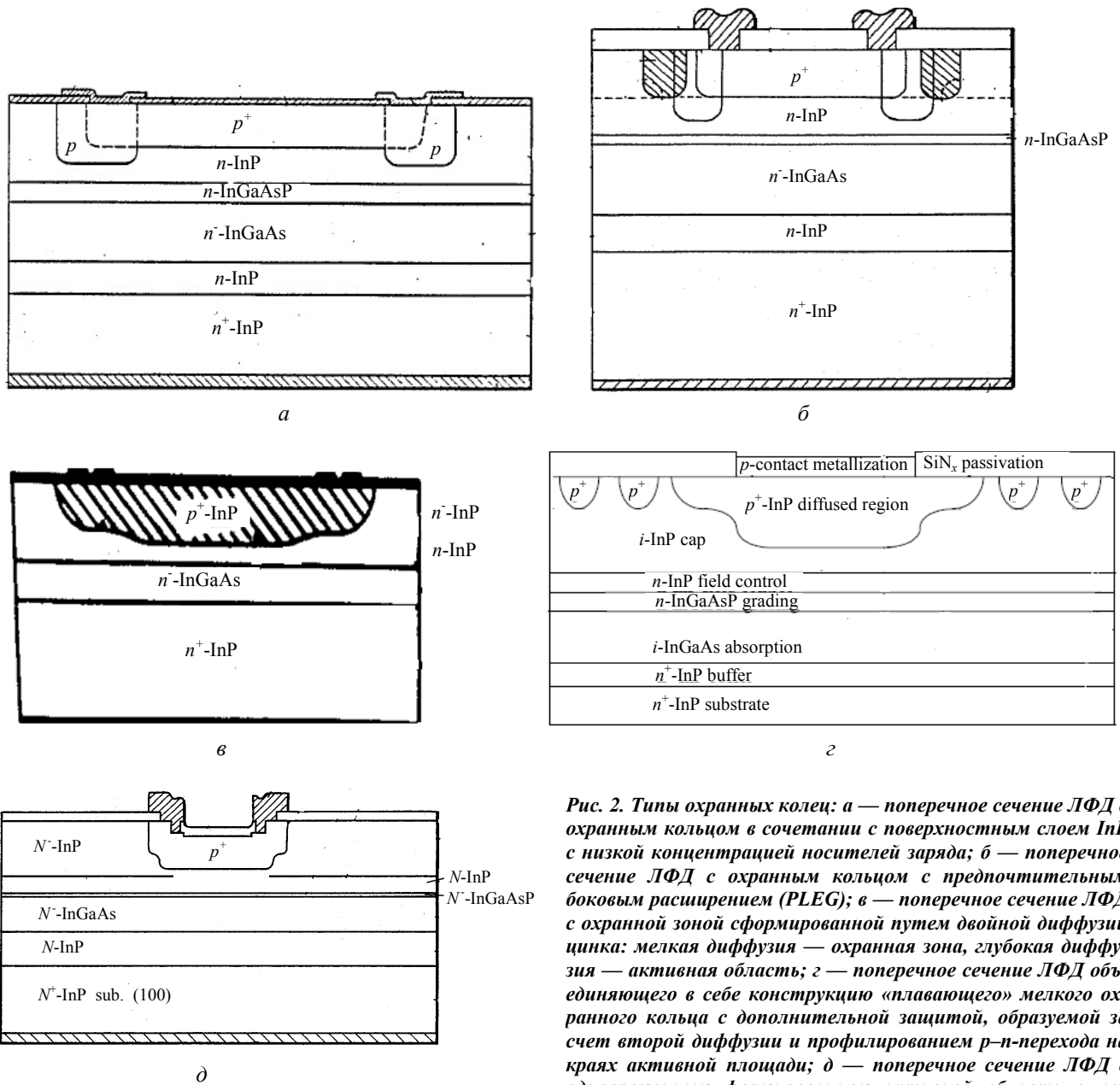


Рис. 2. Типы охранных колец: а — поперечное сечение ЛФД с охранным кольцом в сочетании с поверхностным слоем InP с низкой концентрацией носителей заряда; б — поперечное сечение ЛФД с охранным кольцом с предпочтительным боковым расширением (PLEG); в — поперечное сечение ЛФД с охранной зоной сформированной путем двойной диффузии цинка: мелкая диффузия — охранная зона, глубокая диффузия — активная область; г — поперечное сечение ЛФД объединяющего в себе конструкцию «плавающего» мелкого охрannого кольца с дополнительной защитой, образуемой за счет второй диффузии и профилированием р-п-перехода на краях активной площади; д — поперечное сечение ЛФД с одновременным формированием активной области и активного кольца одностадийной диффузией, за счет углубления центральной части

Авторами статьи проведен сравнительный анализ трех типов колец, а именно: глубокого кольца, мелкого кольца и кольца типа PLEG. И продемонстрированы преимущества охрannого кольца типа PLEG.

Аналогичную структуру с имплантированным охранным кольцом — планарную конфигурацию — использует, например, фирма NEC для своего диода, с тем чтобы уменьшить утечку тока по периферии. Это достигается при помощи широкого охрannого кольца, формируемого в результате двух операций по имплантации бериллия с последующим отжигом при температуре 700 °С. Меньшие концентрация примесей и глубина наружной части охрannого кольца сводят к минимуму напряженность поля по периферии устройства. При

этом р<sup>+</sup>-область лавинного слоя формируется диффузией цинка.

В реальных приборах переход может изготавливаться р<sup>+</sup>-типом для слоя умножения — диффузией цинка в InP, а для охрannого кольца в верхний слой InP — диффузией или имплантацией кадмия через защитную маску SiO<sub>2</sub>.

Использование низкотемпературной диффузии цинка и кадмия для формирования охрannого кольца описано и в более ранних статьях [24, 25].

Существуют и другие модификации охрannых колец, которые применяются в производстве ЛФД.

Интересное решение по созданию охрannой зоны предложено авторами статьи [26]: формирование охрannой зоны путем двойной диффузии

цинка: первая при 520 °С в течение часа, вторая — при 480 °С в течение часа (см. рис. 2, в).

Структура с двойной диффузией, которая эффективно подавляет краевое усиление, представлена на рис. 2, г. Это структура, объединяющая конструкцию «плавающего» охранного кольца с дополнительной защитой, образуемой за счет двойной диффузией. Формирование происходит путем длительной 300-часовой низкотемпературной диффузии кадмия с последующей более глубокой диффузией цинка. Получаемый плавный переход вместе с «плавающими» охранными кольцами образует надёжную конструкцию с однородными коэффициентами умножения до 85, причем при темновом токе 100 нА [17].

В более поздней статье [27] авторы проводят теоретические и экспериментальные исследования двойной диффузии для создания «плавающего» охранного кольца (FGR). И демонстрируют положительный эффект от использования данной конструкции.

Особенностью конструкции «плавающего» кольца является то, что они не вносят заметного увеличения в ёмкость прибора, так как они соединены последовательно с активным слоем. «Плавающие» кольца имеют каплевидную форму для минимизации дополнительной ёмкости, вносимую

контактной площадкой. Однако большие временные затраты, связанные с этим способом изготовления, накладывают свои ограничения на его использование.

В нескольких работах сообщается об одно-временном получении *p-n*-перехода на разной глубине путем одностадийной диффузии или имплантации. Это происходит либо за счет использования тормозной способности пленки SiO<sub>2</sub> [28], либо за счет травления небольшого углубления величиной 0,3—0,5 мкм верхнем эпитаксиальном слое InP [29]. Таким образом добиваются конфигурации *p-n*-перехода аналогичной двухстадийной диффузии. Альтернативой двойной диффузии является одностадийная диффузия в InP с заглубленной центральной областью (см. рис. 2, д). Таким образом, одновременно формируется резкий глубокий *p-n*-переход в активной области и мелкое охранный. Глубина травления 3000 Å, осуществляемая методом реактивного ионного травления (RIE).

Режимы формирования охранных колец различны, некоторые из них описаны в статьях [22, 25, 27, 28, 30—36] и представлены в табл. 2. В статьях, как правило, публикуется только частичная информация по последовательности операций и режимам при формировании охранных колец.

Таблица 2

Режимы формирования охранного кольца

№	Процесс		Отжиг	Литература	
Имплантация Ве					
	<i>E</i> , keV	<i>Q</i> , см <sup>-2</sup>			
1	60	3×10 <sup>13</sup>	700 °С в ампуле в присутствии красного фосфора	[30]	
2	110	5×10 <sup>13</sup>			
3	120	5×10 <sup>13</sup>	—	[31]	
4	140	5×10 <sup>13</sup>	650 °С 20' в ампуле в присутствии красного фосфора	[32]	
5	150	5×10 <sup>13</sup>	750 °С 20' в ампуле в присутствии красного фосфора	[22]	
6	1-ое кольцо 100—140 2-ое кольцо 70—100	3—5×10 <sup>15</sup> 1—3×10 <sup>13</sup>	700 °С 20' под слоем фосфоро-силикатного стекла (PSG), толщиной около 100 нм	[33]	
7	100—140	5×10 <sup>13</sup>	700 °С 20' под слоем фосфоро-силикатного стекла (PSG), толщиной около 100 нм	[34]	
8	Через SiO <sub>2</sub> или с травлением InP		450—500 °С или 600 °С, источник — ZnAs <sub>2</sub>	[35]	
Диффузия					
№	Источник	Температура	Время	Примечание	Литература
9	Cd <sub>3</sub> P <sub>2</sub>	670 °С	40 мин	Диффузия через пленку SiO <sub>2</sub> 500 Å (ВЧ-распыление) в ампуле	[28]
10	Cd <sub>3</sub> P <sub>2</sub>	430 °С	300 часов	Диффузия в ампуле	[36]
11	Cd <sub>3</sub> P <sub>2</sub>	435 °С	140 часов	—	[25]
12	Zn <sub>3</sub> P <sub>2</sub>	520 °С	1 час	—	[26]

### Пассивация поверхности

Еще одним важным моментом в планарном способе изготовления ЛФД является пассивация поверхности. Решение этой проблемы позволяет улучшить рабочие характеристики прибора (темновой ток и надежность), повысить процент выхода годных изделий. Пассивирование поверхности в значительной степени зависит от химического состава поверхностного слоя: это легче выполнимо для двойных и четверных соединений, чем для  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ . Обнадеживающие результаты в этом направлении получены при использовании низкотемпературного (250—350 °С) плазменного химического осаждения из паровой фазы на основе нитрида кремния ( $\text{SiN}_x$ ) в качестве маскирующего слоя для диффузии для примесей цинка и кадмия, причем как в случае  $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ , так и в случае  $\text{InP}$ . Во всех вариантах следует избегать загрязнения поверхности водяным паром и кислородом перед осаждением  $\text{SiN}_x$  [37].

### Заключение

После проведенного в работе анализа литературных данных по ЛФД становится очевидным тот факт, что основная часть всей представленной литературы (а это преимущественно зарубежная литература) посвящена особенностям, связанным с самой структурой ЛФД, требованию к материалам и расчетам. В то же время информация по последовательности операций, методам их проведения и режимам создания ЛФД на основе  $\text{InGaAs/InP}$  очень обрывочная и достаточно поверхностная. Эти обрывочные сведения чаще встречаются в ранних статьях, в начальный период развития этого направления.

Разработка промышленного способа изготовления коммерческих лавинных фотодиодов в диапазоне длин волн 0,9—1,7 мкм сводится к решению следующих основных задач:

- разработка способа эпитаксиального выращивания многослойных гетероэпитаксиальных структур на основе  $\text{InGaAs/InP}$  с требуемыми параметрами слоев;

- разработка метода низкотемпературного плазмохимического осаждения пассивирующего и маскирующего диэлектрического слоя  $\text{SiN}_x$  с требуемыми параметрами границы раздела, обеспечивающей минимальные токи утечки;

- разработка метода планарной диффузии в эпитаксиальный слой  $\text{InP}$  для формирования активной области;

- разработка топологии и способа формирования охранных колец в эпитаксиальном слое  $\text{InP}$ , предотвращающих ранний краевой пробой.

Таким образом, именно первоочередное решение указанных задач позволит обеспечить разработку отечественных методов изготовления коммерческих лавинных фотодиодов в диапазоне длин волн 0,9—1,7 мкм

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Matsushima Y.* // J. Appl. Phys. 1986.
2. *Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А.* Твердотельная фотоэлектроника. — М.: Физматкнига, 2011.
3. *Kanacco Ф., Пирсолл Т., Поллак М. и др.* Техника оптической связи: Фотоприемники. — М.: Мир, 1988.
4. *Takanashi Y., Kawashima M., Horikoshi Y.* // J. Appl. Phys. 1980. No. 19. P. 693.
5. *Nishida K., Taguchi K., Matsumoto Y.* // J. Appl. Phys. 1979. No. 35. P. 251.
6. *Matsumoto Y., Akida S., Sakai S., et al.* // Electron. Lett. 1982. No. 18. P. 945.
7. *Yasuda K., Shirai T., Mikawa T., et al.* // Electron. Lett. 1983. No. 19. P. 662.
8. *Yasuda K., Shirai T., Mikawa T., et al.* // Electron. Lett. 1984.
9. *Poulain P. et al.* // Electron. Lett. 1985. V. 21. P. 442.
10. *Ando H. et al.* // IEEE Jnl. Quant Electron, 1984. V. 20. P. 256.
11. *Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Седнев М. В. и др.* // Прикладная физика. 2015. № 1. С. 87.
12. *Campbell J. C., Demiguel S., Ma F., et al.* // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2004. V. 10 (4). P. 777.
13. *Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А.* Современное состояние и магистральные направления развития твердотельной фотоэлектроники. — М.: Физматкнига, 2010.
14. *Stéphane Demiguel* // Proc. SPIE. 2009. P. 7298.
15. *Бурлаков И. Д., Гринченко Л. Я., Дирочка А. И. и др.* // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 131.
16. *Холоднов В. А., Бурлаков И. Д., Другова А. А.* // Прикладная физика. 2014. № 5. С. 38.
17. *Olsen G.H., Ackley D.A., Hladky J., et al.* // Proceedings of SPIE. 1991. V. 1419. P. 24.
18. *Tatsunori S., Takashi M. and Takao K.* // Fujitsu Sci. Tech. J. 1984. P. 303.
19. *Donnelly J. P. and Hurwitz C. E.* // Appl. Phys. Lett., 1977. V. 31. P. 418.
20. *Law H. D., Tomasetta L. R., and Nakano K.* // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 33. P. 920.
21. *Feng M., Oberstar J. D., Windhorn T. H., et al.* // Appl. Phys. Lett. 1979. V. 34. P. 591.
22. *Mikawa T. et al.* // J. Optical Devices&Fibers. 1984. V. 11. P. 68.
23. *Gyuro I. et al.* in Compound Semiconductor Industry Directory. — Elsevier Science. Ltd., 1996. P. 58—68.
24. *Ando H., Susa N., and Kanbe H.* // Appl. Phys. 1981. V. 20. P. 197.
25. *Ando H., Susa N., and Kanbe H.* // Appl. Phys. 1982. V. 29. No. 9.
26. *Ando H., Ymauchi Y., and Susa N.* // IEEE Jnl. Quant Electron. 1984. V. 20. P. 3.
27. *Taguchi K. and Nishida K.* // Appl. Phys. 1981. 1p-H-6.
28. *Ikeda M., Wakita K., Hata S., et al.* // Electronics Lett. 1986. V. 19. No. 2. P. 61.
29. *Kyung-Sook Hyum, Youngmi Paek, Yong-Hwan Kwon, et al.* // Proceeding of SPIE. 2003. V. 4999. P. 130.
30. *Taguchi K. et al.* // IEEE Electron Device Letters. 1986. V. EDL-7. No. 4. P. 257.
31. *Sigimoto Y. et al.* // Electronics Lett. 1984. V. 20. No. 16. P. 653.



32. Shirai T. et al. // Fujitsu Sci. Tech. J. 1984. V. 20. No. 3. P. 303.  
 33. NEC Corporation, United States Patent US4651187, 1985.  
 34. NEC Corporation, United States Patent US5057891, 1991.  
 35. Patent GB 2107118A, 1982.  
 36. Matsushima Y., Noda Y., Kushiro Y., et al. // Electronics Lett. 1984. V. 20. No. 6. P. 235.  
 37. Benoit J., Boulou M., Vergnaud R. // SPIE Optical Fiber Sources and Detectors, 1985. V. 587.

## Avalanche photodiodes based on the InGaAs/InP heterostructures (review)

A. K. Budtolaeva, P. E. Khakuashev, and I. V. Chinareva

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

Received June 28, 2015

**Consideration is given to fabrication of avalanche photodiodes on the base of the InGaAs/InP heterostructures. A review shows a situation in the 0.9—1.7  $\mu\text{m}$  range and main tasks in this development.**

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

**Keywords:** InGaAs/InP, avalanche photodiode, channel stopper, diffusion, ion implantation.

### REFERENCES

1. Y. Matsushima, J. Appl. Phys. (1986).
2. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photodiodes*. (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
3. F. Kapasso, T. Pirsoll, M. Pollak, et al., *Technique of Optical Communications. Photoreceivers* (Mir, Moscow, 1988) [in Russian].
4. Y. Takanashi, M. Kawashima, and Y. Horikoshi, J. Appl. Phys., No. 19, 693 (1980).
5. K. Nishida, K. Taguchi, and Y. Matsumoto, J. Appl. Phys., No. 35, 251 (1979).
6. Y. Matsumoto, S. Akida, S. Sakai, et al., Electron. Lett., No. 18, 945 (1982).
7. K. Yasuda, T. Shirai, T. Mikawa, et al., Electron. Lett., No. 19, 662 (1983).
8. K. Yasuda, T. Shirai, T. Mikawa, et al., Electron. Lett. (1984).
9. P. Poulain et al., Electron. Lett. **21**, 442 (1985).
10. H. Ando et al., IEEE Jnl. Quant Electron, **20**, 256 (1984).
11. N. I. Iakovleva, L. O. Boltar, M. V. Sednev, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 87 (2015).
12. J. C. Campbell, S. Demiguel, F. Ma, et al., IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. **10** (4), 777 (2004).
13. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *The Current Status and Main-Line Trackage for Development of Photoelectronics* (Fizmatkniga, Moscow, 2010) [in Russian].
14. Stéphane Demiguel, Proc. SPIE 7298 (2009).
15. I. D. Burlakov, L. Ya. Grinchenko, A. I. Dirochka, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **2** (2) (2014).
16. V. A. Kholodnov, I. D. Burlakov, and A. A. Drugova, *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 38 (2014).
17. G. H. Olsen, D. A. Ackley, J. Hladky, et al., Proceedings of SPIE **1419**, 24 (1991).
18. S. Tatsunori, M. Takashi, and K. Takao, Fujitsu Sci. Tech. J. 303 (1984).
19. J. P. Donnelly and C. E. Hurwitz, Appl. Phys. Lett. **31**, 418 (1977).
20. H. D. Law, L. R. Tomasetta, and K. Nakano, Appl. Phys. Lett. **33**, 92 (1978).
21. M. Feng, J. D. Oberstar, T. H. Windhorn, et al., Appl. Phys. Lett. **34**, 591 (1979).
22. T. Mikawa et al., J. Optical Devices&Fibers **11**, 68 (1984).
23. I. Gyuro et al. in *Compound Semiconductor Industry Directory* (Elsevier Science. Ltd., 1996), pp. 58—68.
24. H. Ando, N. Susa, and H. Kanbe, Appl. Phys. **20**, 197 (1981).
25. H. Ando, N. Susa, and H. Kanbe, Appl. Phys. **29**, No. 9, (1982).
26. H. Ando, Y. Ymauchi, and N. Susa, IEEE Jnl. Quant Electron. **20**, 3 (1984).
27. K. Taguchi and K. Nishida, Appl. Phys. 1p-H-6 (1981).
28. M. Ikeda, K. Wakita, S. Hata, et al., Electronics Lett. **19** (2), 61 (1986).
29. Kyung-Sook Hyum, Youngmi Paek, Yong-Hwan Kwon, et al., Proceeding of SPIE **4999**, 130 (2003).
30. K. Taguchi et al., IEEE Electron Device Letters **EDL-7**, 257 (1987).
31. Y. Sigimoto et al., Electronics Lett. **20**, 653 (1984).
32. T. Shirai et al., Fujitsu Sci.Tech.J. **20**, 303 (1984).
33. NEC Corporation, United States Patent US4651187, 1985.
34. NEC Corporation, United States Patent US5057891, 1991.
35. Patent GB 2107118A, 1982.
36. Y. Matsushima, Y. Noda, Y. Kushiro, et al., Electronics Lett. **20**, 235 (1984).
37. J. Benoit, M. Boulou, and R. Vergnaud, SPIE Optical Fiber Sources and Detectors **587**, (1985).