

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.383.4, 621.383.5

ТРЁХСПЕКТРАЛЬНОЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНОЕ
ФОТОПРИЁМНОЕ УСТРОЙСТВО

И. Г. Неизвестный, В. Н. Шумский

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: shumsky@isp.nsc.ru*

Описаны конструкция и характеристики трёхспектрального многоэлементного фотоприёмного устройства с диапазоном чувствительности 0,6–12,0 мкм, состоящего из трёх линеек фотоприёмников с чувствительностью в областях 0,6–0,9, 3–5 и 8–12 мкм. Приведены методы изготовления линеек, фотоприёмного устройства в целом и его фотоэлектрические характеристики.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия, гетеропереход, *p-n*-переход, чувствительный элемент, линейка фотоприёмников, многоэлементное фотоприёмное устройство.

DOI: 10.15372/AUT20160506

Введение. В 1980-е годы требования к дальности обнаружения и надёжности распознавания объекта излучения на фоне активных и пассивных помех существенно повысились, что повлекло за собой принципиально новые требования к фотоприёмному устройству (ФПУ) — одному из главных компонентов системы. Возможным вариантом развития в этом направлении является создание многоэлементного фотоприёмного устройства (МФПУ), основанного на использовании нескольких линеек фотоприёмников (ЛФП), каждая из которых чувствительна в определённой области спектра. Применение такого МФПУ позволяет с помощью дальнейшей обработки сигнала осуществлять селекцию нужного объекта излучения по его геометрическим, скоростным и оптическим характеристикам. Разработанные нами ЛФП первого диапазона ($\lambda = 0,6\text{--}0,9$ мкм) на основе гетероперехода Ge—GaAs, ЛФП второго диапазона ($\lambda = 3\text{--}5$ мкм) на основе InSb и третьего диапазона ($\lambda = 8\text{--}12$ мкм) на основе твёрдого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ (СОТ) послужили базой для трёхспектрального МФПУ. Результаты по его созданию ранее не публиковались, и представляется, что они будут интересны не только с точки зрения описания одного из прототипов подобных устройств, но и из-за полученных величин фотоэлектрических характеристик отдельных ЛФП, которые и в настоящее время, по крайней мере для ЛФП-1, близки к лучшим мировым значениям. Такие МФПУ предназначались для функционирования в специализированных оптико-электронных системах (ОЭС), поэтому их пороговые характеристики и конструкция определялись разработчиками, которые также проводили испытания системы в целом, однако эти результаты в данную работу не вошли.

Экспериментальные результаты. *Линейки фотоприёмников на основе гетеропереходов Ge—GaAs.* Гетеропереходы *p-Ge—n-GaAs* были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) германия на арсениде галлия [1]. Для подложек использовался арсенид галлия с концентрацией электронов $n = (1\text{--}10) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью $\mu_n = 5000 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. На пластины GaAs с ориентацией (100), подвергнутые химико-

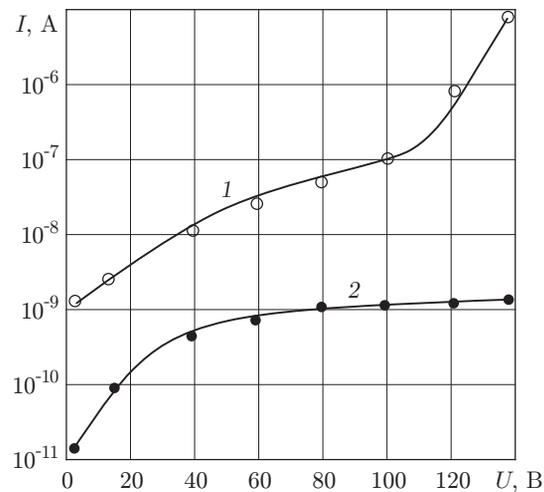


Рис. 1

механической полировке и химической обработке в вакууме, наносился защитный слой диэлектрика SiO. В SiO вскрывались окна и методом МЛЭ выращивался слой Ge, после чего в окнах образовывались гетерофотодиоды. Часть германия удалялась, и конструкция чувствительного элемента (ЧЭ) позволяла излучению попадать как на Ge, так и на GaAs. Затем наносился второй слой диэлектрика, служивший основой для последующей металлизации. Для образования контактных площадок, разводящих дорожек и области, препятствующей попаданию излучения между ЧЭ, вакуумным осаждением наносился слой алюминия толщиной 1–1,5 мкм и проводилась соответствующая фотолитография.

Площадь элементов, из которых были изготовлены восьмиэлементные ЛФП, составляла 80×80 и 50×50 мкм. На рис. 1 показаны обратные ветви вольт-амперных характеристик одного из элементов ЛФП ($p\text{-Ge}-n\text{-GaAs}$) площадью 80×80 мкм без освещения (кривая 2) и при освещении $7,5 \cdot 10^{-8}$ Вт от источника излучения типа «А» (кривая 1).

В темноте зависимость тока от напряжения можно приблизительно записать как $i \approx U^{0,5}$, что свидетельствует о преобладании генерационно-рекомбинационного тока в арсениде галлия. При освещении ток до напряжений $U \sim 80\text{--}100$ В повышается сравнительно медленно, а затем наблюдается его быстрый рост до значений 0,1–0,2 мкА. Наиболее вероятно, что резкое увеличение фототока связано с лавинным размножением носителей заряда. Подробно свойства гетеропереходов описаны в работах [2–4]. Поскольку световое пятно от источника типа «А» попадает на все элементы, не исключена возможность того, что при больших напряжениях наступает инверсия проводимости GaAs под диэлектриком SiO и рост фототока определяется увеличением эффективной площади собирания фотоносителей и большой величиной коэффициента оптической связи между элементами линейки. Такая связь была установлена следующим способом. Один из элементов освещался зондом диаметром менее 80 мкм, измерялся сигнал от него и от последующих элементов ЛФП. Напряжение, приложенное к элементу, составляло около 60 В (фототок ~ 10 нА).

В таблице представлены результаты измерений при сканировании пятна излучения вдоль ЛФП. В каждой строке таблицы освещаемый элемент отмечен числом 100, а другие значения в строках отражают отношение фототока на данном элементе ЛФП к освещаемому. Из таблицы видно, что оптическая связь между освещаемым и соседними элементами не превышает 2–3 %, что соответствует оптической развязке 30–35 дБ. Проведённые расчёты показали, что оптическая связь между элементами за счёт диффузии практически отсутствует и может быть обусловлена паразитными ёмкостями между контактами корпуса ЛФП.

Оптическая связь между элементами в ЛФП-1

100	3,4	1,2	0,5	0,4	0,28	0,2	0,1
3,4	100	3,5	1,5	0,9	0,7	0,45	0,3
1,5	3	100	3	1	0,5	0,3	0,2
0,4	0,6	2,2	100	2	0,6	0,4	0,2
0,32	0,3	0,9	2,5	100	7	2,8	1,8
0,15	0,18	0,2	0,4	2	100	2	0,5
0,09	0,12	0,15	0,25	0,5	2	100	2
0,07	0,08	0,09	0,1	0,18	0,35	2	100

Линейки фотоприёмников на основе InSb и PbSnTe. В качестве ЛФП-2 использовались приборы с зарядовой инжекцией на основе МДП-структур на InSb. Подложкой служил антимонид индия марки ИСЭ-1 с концентрацией носителей заряда $n = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и подвижностью не менее $\mu_n \geq 5 \cdot 10^5 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ при температуре 77 К. На пластины, прошедшие химико-механическую полировку и химическую обработку, методом низкотемпературного пиролитического осаждения при $T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ наносился слой SiO_2 толщиной ~ 100 нм. Для стабилизации параметров МДП-структур на слой SiO_2 напылялся в вакууме при температуре $100 \text{ }^\circ\text{C}$ второй слой диэлектрика Al_2O_3 . Для формирования ЧЭ применялся полупрозрачный проводящий контакт $\text{In}_2\text{O}_3 + \text{Sn}_2\text{O}_3$, полученный распылением мишени в атмосфере аргона. Прозрачность слоя равна 80–90 % при толщине 100 нм, а поверхностное сопротивление — примерно 1 кОм/□. Методом фотолитографии прозрачный электрод был оставлен лишь на ЧЭ. Затем вновь пиролитическим методом осаждался слой SiO_2 толщиной ~ 400 нм, служивший основой для последующей металлизации, которая осуществлялась алюминием. Полученные кристаллы проходили предварительную разбраковку: тестирование на отсутствие пробитых элементов и измерение релаксационных характеристик неравновесной ёмкости в режиме постоянного напряжения при $T = 77 \text{ К}$. Характерные значения времени релаксации составляли 2–4 мс при рабочем напряжении на электроде 10–15 В и импульсе инжекции 4 В.

Линейка фотоприёмников третьего диапазона изготавливалась с помощью гетероэпитаксиального наращивания твёрдого раствора $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ на подложках BaF_2 [5] с последующим формированием p - n -переходов в СОТ. Монокристаллы BaF_2 резались на пластины с ориентацией (100), которые после механической полировки помещались в сверхвысоковакуумную камеру установки МЛЭ, где при отжиге $T = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ происходило улучшение структуры поверхности BaF_2 , контролируемое с помощью дифракции быстрых электронов на отражение. На отожжённой поверхности осуществлялся рост гетероэпитаксиального монокристаллического слоя $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ толщиной в несколько микрометров. После окончания роста плёнки температура подложки снижалась, и в той же камере проводилось напыление плёнки ZnS толщиной около 200 нм, а затем плёнки SiO толщиной около 150 нм. Полученный двухслойный диэлектрик обеспечивал пробивную напряжённость электрического поля не ниже 10^5 В/см . Чувствительные элементы ЛФП создавались путём напыления индия и его последующей диффузии для образования p - n -переходов [6, 7]. Дифференциальное сопротивление перехода составляло около 200 кОм.

Конструкция многоэлементного фотоприёмного устройства. На основе разработанных ЛФП была создана конструкция трёхцветного МФПУ, решающая проблему сборки трёх различных кристаллов с ЛФП. При этом габариты корпуса и ход лучей после оптической системы задавались и ограничивались размерами, приведёнными на рис. 2, где показаны схема конструкции МФПУ (рис. 2, а) и его внешний вид (рис. 2, б).

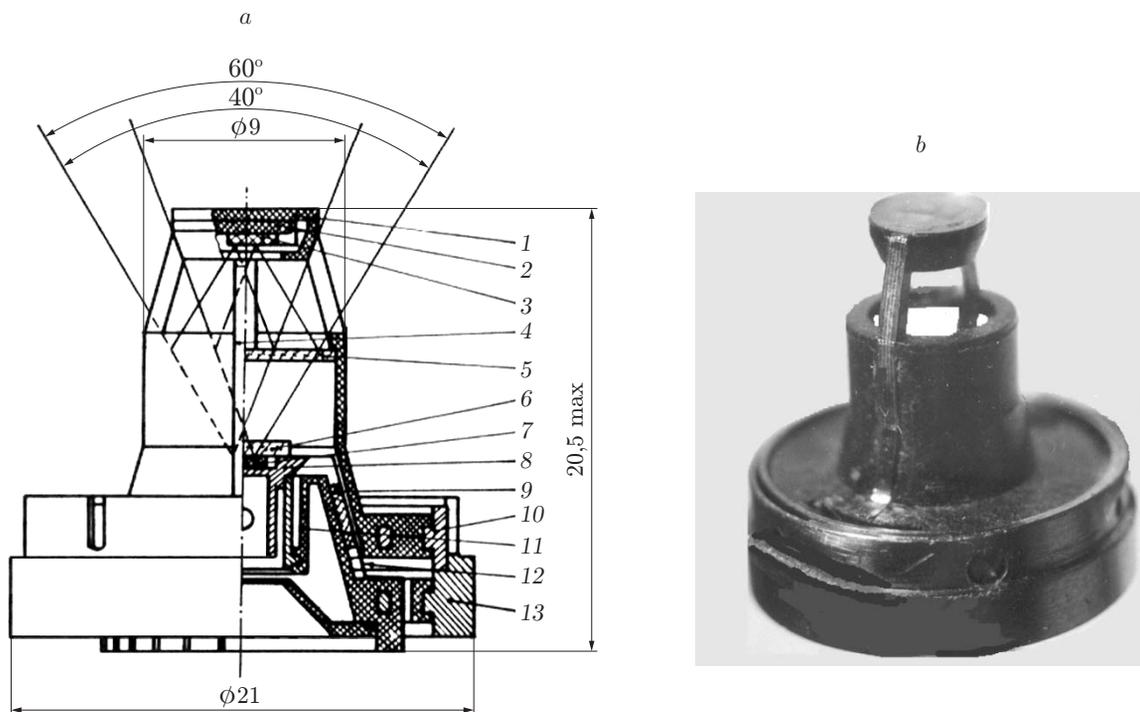


Рис. 2

Корпус МФПУ состоит из двух частей: неохлаждаемой 10 и охлаждаемой 13 в соответствии с рабочими температурами ЛФП-1 и ЛФП-2, ЛФП-3. В неохлаждаемой части корпуса располагаются подложка из ситалла 1, ЛФП-1 3, устройство предварительной обработки (УПО) 2, к выходным контактам которого приваривается шлейф из полиимидной плёнки 4, осуществляющий электрическое соединение УПО и внешних устройств обработки сигнала. Кроме того, устанавливается светоделитель 5, который отражает излучение в области чувствительности ЛФП-1 и пропускает ИК-излучение на ЛФП-2 и ЛФП-3.

В охлаждаемой части расположены ЛФП-2 7 и ЛФП-3 6, а также УПО-2 9 для ЛФП-2. Собранные на одном шлейфе 12 ЛФП-2, ЛФП-3 и УПО-2 устанавливаются на специальную подложку 8, обеспечивающую быстрое охлаждение ЛФП при подаче хладагента в полость для автономной работы МФПУ. При этом для предотвращения смещения плоскостей ЛФП подложка крепится через компенсатор 11.

Сборка ЛФП и коммутаторов показана на рис. 3. Обе части корпуса изготовлены в виде отдельных деталей из полиалканимида с соответствующим наполнителем литьём под давлением. Для придания деталям необходимой механической прочности и сохранения точности их размеров части корпуса армированы фланцем специальной конфигурации, выполненным из легированной стали. Применение литья под давлением позволяет производить многократное тиражирование с высокой степенью воспроизводимости заданных размеров при довольно сложной конфигурации деталей. Юстировка МФПУ осуществляется с помощью микроскопа со специальным приспособлением и поворотным столиком. Совмещение элементов ЛФП-2 и ЛФП-3 достигается при их сборке планарными плоскостями друг к другу через полиимидный шлейф. Погрешность при стыковке не превосходит 10 мкм. Первые элементы всех ЛФП располагаются на расстоянии 50 мкм от оси МФПУ, а светоделитель — перпендикулярно этой оси.

Электронная часть МФПУ состоит из УПО-1 и УПО-2 — двух бескорпусных микросхем, изготовленных по стандартной p -канальной МДП-технологии на кремнии с примене-

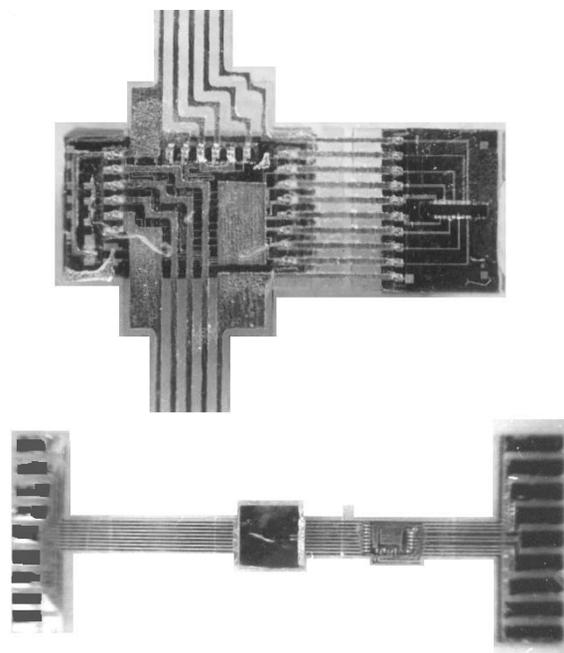


Рис. 3

нием ионного легирования с самосогласованными поликремниевыми затворами, и содержит более 50 транзисторов. Измеренная величина спектральной плотности шума на выходе при отключённых ЛФП составила $S_U \approx 3 \cdot 10^{-7} \text{ В} \cdot \text{Гц}^{-0,5}$, что соответствует пороговой чувствительности $S_i \approx 10^{-11} \text{ А} \cdot \text{Гц}^{-0,5}$ при времени накопления 100 мс. Блок-схема устройства обработки сигнала содержит формирователь входных напряжений, преобразователь выходных сигналов и выпрямитель, от которого питаются эти два устройства. Каждый из выходных сигналов ФПУ-1 и ФПУ-2 представляет собой комбинацию фотосигналов, шумов и стационарных внутренних помех. Для выделения сигнала используются двойная коррелированная выборка, мультиплексирование и демультиплексирование с вычитанием результата демультиплексирования из результата двойной коррелированной выборки.

Для обработки сигнала с ЛФП-3 был создан преобразователь тока в напряжение с входным сопротивлением меньше 100 Ом, рабочей полосой частот до десятков кГц, коэффициентом преобразования около 10^6 В/А и собственным шумовым током $2 \cdot 10^{-9} \text{ А}$.

Обсуждение результатов. Рассмотрим соответствие обнаружительных способностей чувствительных элементов ЛФП теоретически возможным значениям. На рис. 4 представлены спектральные зависимости обнаружительной способности ЛФП-1 (кривая 1), ЛФП-2 (кривая 2), ЛФП-3 (кривая 3) и коэффициента пропускания светоделителя (кривая 4). Видно, что в области выше 10 мкм пропускание светоделителя менее 0,6 и не превышает значения 0,8 в области до 1 мкм. Расчёты показали, что обнаружительная способность чувствительного элемента ЛФП-1 на основе гетероперехода $p\text{-Ge}-n\text{-GaAs}$ должна составлять $D_{\lambda \max} \cong 4,5 \cdot 10^{12} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{0,5}/\text{Вт}$. Учитывая, что освещённая площадь арсенида галлия равна $\sim 60\%$ от общей площади чувствительного элемента, значение обнаружительной способности уменьшается до величины $D_{\lambda \max} \cong 3,0 \cdot 10^{12} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{0,5}/\text{Вт}$, и это согласуется с экспериментом.

На момент окончания данной разработки в нашей стране не существовало ОЭС подобного класса. Конечной задачей ОЭС, в которую МФПУ входило в качестве основного компонента, являлось распознавание образов, т. е. селективное обнаружение объекта на фоне помех и ложных целей. Оптико-электронная система позволяла проводить геометрическую селек-

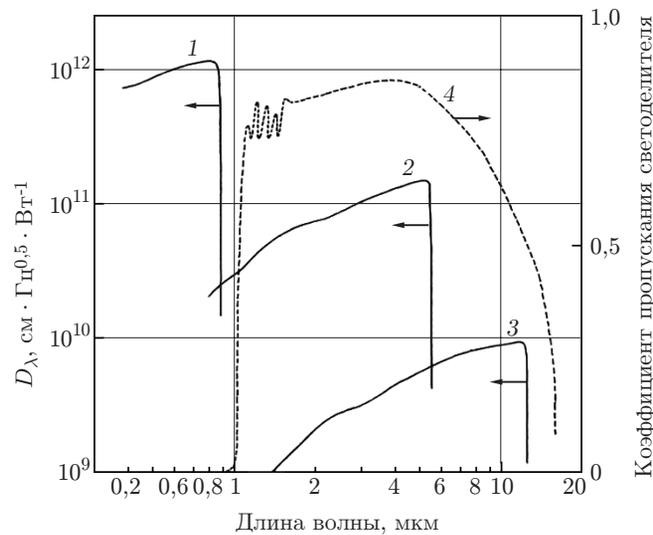


Рис. 4

цию объектов наблюдения: можно было выделять движущиеся и неподвижные объекты, объекты больших и малых размеров с определённой скоростью движения.

Трёхспектральность МФПУ даёт возможность производить дополнительную дешифровку объектов. Если в определённом месте пространства имеется объект, то излучение от него попадает на фотоприёмник с одинаковым номером элемента во всех трёх ЛФП. Так как объекты в каждом из трёх спектральных диапазонов излучают по-разному, сигналы от трёх фотоприёмников будут различными. Сравнительный анализ сигналов позволяет определить их соответствие тому или иному объекту.

Заключение. Разработанные многоэлементные фотоприёмные устройства были испытаны в составе оптико-электронных устройств, предназначенных для отслеживания и распознавания объектов. Следует отметить, что ОЭС при использовании описанных МФПУ слабо подвержены действию активных и пассивных помех. Натурные испытания показали, что в условиях постановки помех, вызывающих сбои в работе ОЭС с одноэлементными фотоприёмниками, оптико-электронные устройства с МФПУ работали без сбоев. Такие ОЭС продолжали отслеживать объект после того, как он скрывался за помехой размером, превышающим в десятки раз размеры объекта, и выходил из-за неё. При появлении в поле зрения двух объектов не происходило перезахвата объекта.

Авторы выражают благодарность за участие в выполнении исследований по данной тематике сотрудникам Института физики полупроводников СО РАН Ю. Н. Погорелову, В. А. Болдыреву, С. П. Супруну, П. Г. Сарафанову, О. И. Васину и А. Э. Климову.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aseev A. L., Pogorelov Yu. N., Stenin S. I., Shumsky V. N. Influence of the method of preparation on the structure and properties of Ge—GaAs heterojunctions // *Thin Solid Films*. 1976. **32**, Is. 2. P. 351–354.
2. Неизвестный И. Г., Пусеп Ю. А., Синюков М. П., Шумский В. Н. Спектральная обнаружительная способность фотоприемников на основе германия в области фундаментальной полосы поглощения // *Физ. и техн. полупроводников*. 1980. **14**, вып. 9. С. 1826–1828.
3. Ламин М. А., Неизвестный И. Г., Палкин А. М. и др. Эпитаксия из молекулярных пучков и свойства гетеропереходов Ge/GaAs и Ge/Si // *Микроэлектроника*. 1989. **18**, № 1. С. 3–8.

4. Белоусова Т. В., Неизвестный И. Г., Садофьев Ю. Г. и др. Надбарьерный фототок в гетеропереходах Ge—GaAs // Физ. и техн. полупроводников. 1989. **23**, вып. 11. С. 1955–1960.
5. Васин О. И., Климов А. Э., Неизвестный И. Г., Шумский В. Н. Молекулярная эпитаксия пленок $Pb_{1-x}Sn_xTe$ на подложках Ge, Si, GaAs, InSb, BaF_2 // Поверхность. Физика, химия, механика. 1985. № 7. С. 66–72.
6. Васин О. И., Климов А. Э., Неизвестный И. Г. и др. Получение чистой поверхности подложек BaF_2 для эпитаксиального роста соединений $A^{IV}B^{VI}$ методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Поверхность. Физика, химия, механика. 1988. № 12. С. 55–60.
7. Белый В. И., Расторгуев А. А., Вицина Н. Р. и др. Электрофизические свойства мезодиодов на основе халькогенидов свинца и олова, пассивированных теллуром и сульфидом свинца // Электронная техника. 1990. Сер. 6: Материалы. С. 44–48.

Поступила в редакцию 30 марта 2016 г.
