

Фотоэлектроника: элементная база и технология

УДК 621.383

256-канальные фотоприемные устройства на основе фоточувствительных структур халькогенидов свинца

Г. А. Аракелов, В. Д. Бочков, Б. Н. Дrajнников, Ю. А. Казарова, П. А. Кузнецов
ФГУП «НПО "Орион" — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

Сообщено о разработке нового поколения 256-канальных фотоприемных устройств, предназначенных для использования в оптикоэлектронной аппаратуре различного применения, работающей в областях спектра ИК-излучения 1—3 и 3—5 мкм.

PACS: 85.60.-q

Введение

Основные применения фотоприемных устройств (ФПУ): переносные тепловизионные приборы, спектрометры, охранные устройства, приборы промышленной автоматики и т. д.

ФПУ разработаны в двух модификациях в зависимости от материала фоточувствительных элементов: PbSe (ФПУ1) или PbS (ФПУ2) [1]. Высокие фотоэлектрические параметры достигнуты в вакуумируемой конструкции с четырехкаскадным термоэлектрическим охладителем (ТЭО) с улучшенными характеристиками, позволяющими получить температуру фоточувствительных элементов (ФЧЭ) $T_{FE} = 190—200$ К. Приведены методика и результаты расчетов и измерений фотоэлектрических параметров.

Конструкция ФПУ

Конструкция ФПУ со снятой крышкой с входным окном представлена на рис. 1. Фоточувствительный 256-площадочный элемент смонтирован с применением клеевой технологии [2] на теплопоглощающей поверхности четырехкаскадного ТЭО, снабженной термодатчиком, который своей тепловыделяющей поверхностью припаян к цоколю со стеклометаллическими гермовыводами.



Рис. 1. Конструкция ФПУ (вид со снятой крышкой)

Фоточувствительный элемент (ФЧЭ) с помощью двух плоских микрокабелей, представляющих собой нанесенные на полиимидную подложку металлизированные дорожки, электрически соединен с двумя мультиплексорами фотоэлектрических сигналов. Мультиплексоры расположены на специальных площадках теплового экрана-моста, имеющего хороший тепловой контакт (пайку) с нижним базовым каскадом термоэлектрической батареи (ТЭБ).

Тепловой экран-мост выполняет несколько функций [3].

Во-первых, он отводит на базовый каскад ТЭБ активные тепловыделения мультиплексоров и пассивные теплопритоки по электровыводам, соединяющим выходы мультиплексоров с гермовыводами.

Во-вторых, тепловой экран-мост, охватывая по периметру наиболее низкотемпературные каскады ТЭБ, экранирует их боковые поверхности от радиационных теплопритоков от внешнего корпуса ФПУ.

В-третьих, этот конструктивный элемент ТЭО имеет специальные посадочные поверхности для монтажа на нем апертурной охлаждаемой диафрагмы, которая снижает радиационные теплопритоки на теплопоглощающую поверхность ТЭБ и непосредственно обеспечивает более высокие фотоэлектрические параметры ФПУ.

Электрический монтаж одноименных выходов мультиплексоров между собой, а также на внешние гермовыводы осуществляется с помощью промежуточной кольцевой коммутационной платы, изготовленной из материала с низкой теплопроводностью (ситалл). На плате с помощью тонкопленочной технологии нанесена сеть токоведущих дорожек, к входным контактным площадкам которых привариваются проволоочные выводы от мульт-

типлекторов и термодатчика (ТД), а к выходным — проволочные выводы, идущие к гермовыводам.

Термоэлектрическая батарея и газопоглотитель своими электрическими выводами также монтируются на внешние гермовыводы.

С помощью газопоглотителя (геттера) имеется возможность однократно или периодически восстанавливать качество вакуума внутри ФПУ.

На экране-мосте кроме мультиплекторов размещена охлаждаемая диафрагма с щелевидной прорезью, определяющей апертурный угол фотоприемника.

Конструкция ФПУ защищена патентом 41699 РФ.

Внешний вид ФПУ1 и ФПУ2 представлен на рис. 2.

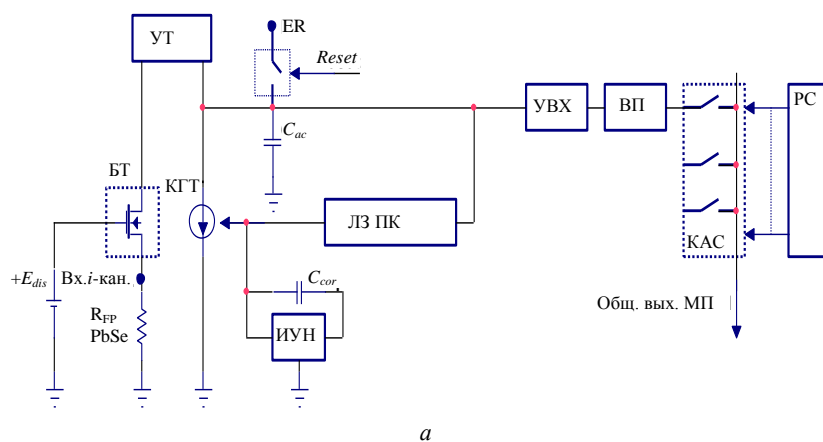
Мультиплексоры для ФПУ

При разработке мультиплекторов (МП) для многоэлементных фоторезисторов (МФР) на основе халькогенидов свинца были выбраны два схемотехнических способа обработки фотоэлектрических сигналов [4—6].

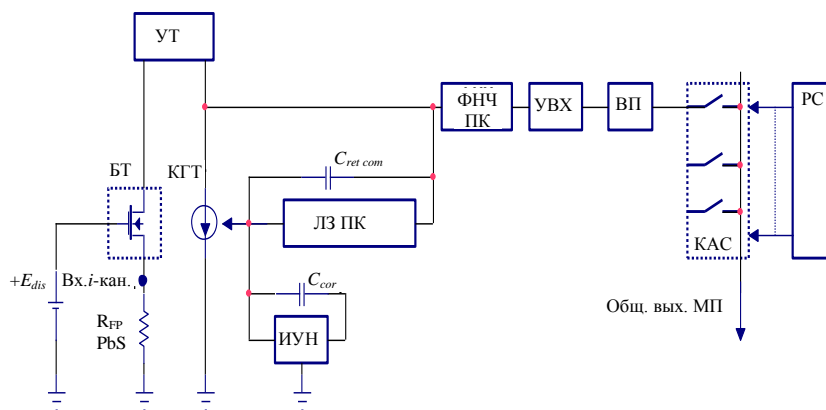
Входные каскады МП-1, разработанного для сопряжения с МФР на основе PbSe, построены по принципу (рис. 3, а), который заключается в вводе фотоэлектрического сигнала от фоторезисторов в исток полевого *n*-канального транзистора (буфера тока БТ), усилении сигнала услителем тока УТ и интегрировании фототока с периодическим сбросом накопленного заряда (*Reset*) с накопительной емкости C_{ac} на уровень ER .



Рис. 2. Внешний вид двух типов ФПУ



а



б

Рис. 3. Функциональная схема мультиплектора:
а — МП-1; б — МП-2

Характеристики ФПУ

Материал фотоприемника.....	PbSe	PbS
Спектральный диапазон, мкм.....	ФУР139Л	ФУР138Л
Размер фоточувствительного элемента, мкм.....	3,0—5,0	0,5—3,0
Число элементов (формат).....	40×40	40×40
Обнаружительная способность $D_{\lambda_{\max}}^*$, Вт ⁻¹ ·см·Гц ^{1/2}	2×128	2×128
Вольтовая чувствительность, В/Вт, не менее.....	$(3—5) \cdot 10^{10}$	$(2—4) \cdot 10^{11}$
Доля работоспособных площадок, %.....	$(F_0 = 1200 \text{ Гц})$	$(F_0 = 70 \text{ Гц})$
Период опроса линейки, мс.....	$1 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^8$
Потребляемая мощность, Вт:		
ТЭО.....	0,125	0,5—1,0
мультиплексорами.....	6,0	6,0
Габаритные размеры (диаметр×высота), мм.....	0,05	0,05
Масса, г, не более.....	Ø50×35	Ø50×35
	150	150

Мультиплексоры обеспечивают:

автоматическое выполнение условия теоремы дискретизации (теорема Котельникова), т. е. формирование верхней граничной частоты F_h по формуле $F_h = 1/2T_{ac}$, где T_{ac} — период накопления сигнала;

возможность регулирования усиления сигнала (коэффициента передачи) за счет изменения фазы накопления.

Входные каскады МП-2, разработанного для сопряжения с МФР на основе PbS, построены по аналогичной схематехнике (см. рис. 3, б) с вводом фототока в исток n -канального МДП-транзистора (буфера тока БТ) и усиления усилителем тока УТ.

В отличие от МП-1 в МП-2 отсутствует устройство накопления. Здесь интегрирование сигналов обеспечивается самим фоторезистором, имеющим значительную величину постоянной времени $\tau = (2—5 \text{ мс})$.

После входных каскадов происходит частотное разделение усиленного сигнала на две составляющие: переменную и постоянную. В обоих типах МП усиливается только переменная составляющая и компенсируется постоянная с помощью компенсирующего генератора тока (КГТ). Управление последним осуществляется через дискретно-аналоговую линию задержки на переключаемых конденсаторах (ЛЗПК), выполняющую функцию высокоомного резистора обратной связи ($R_{ret} = 2 \cdot 10^{10} \text{ Ом}$). Этот эквивалентный резистор совместно с емкостями C_{ret} и C_{cor} формирует нижнюю граничную частоту усилительного тракта.

В МП-2 усиление происходит за счет крутизны КГТ по управляющему входу S_{cgc} , а также за счет параметров цепи обратной связи C_{cor} , C_{ret} , в результате чего имеем:

$$U_{out} = I_{mid} K_{man} (1/S_{cgc}) [(C_{cor} K_{ef}/C_{ret}) + 1],$$

где K_{ef} — коэффициент усиления по напряжению инвертирующего усилителя (УИН), играющего вспомогательную роль.

Применение УИН позволяет повысить коэффициент преобразования по току $K_d = U_{out}/I_{f}$ в K_{ef} раз без увеличения емкости C_{cor} , что очень существенно при реализации МП по интегральной технологии. Этот же прием позволяет в МП-1 снизить нижнюю граничную частоту в K_{ef} раз без увеличения номинала емкости C_{cor} .

После усиления сигнала и дополнительного формирования верхней граничной частоты фильтром нижних частот на переключаемых конденсаторах (ФНЧ ПК) производится дискретизация сигнала устройством выборки и хранения (УВХ). Период дискретизации выбирается равным периоду опроса сигнала МП после выходного повторителя (ВП).

Опрос каналов осуществляется коммутатором аналоговых сигналов (КАС), управляемым регистром сдвига (РС), позволяющим производить опрос в прямом и реверсивном режимах.

Основные фотоэлектрические параметры ФПУ

Анализ показал, что технология изготовления многоэлементных фоторезистивных фотоприемников из халькогенидов свинца позволяет изготовить 256-элементный ФЧЭ с требуемыми геометрическими размерами и высокими фотоэлектрическими параметрами. Однако характеристики ФПУ, изготовленных на базе этих ФЧЭ, зависят еще от параметров мультиплексоров, холодопроизводительности ТЭО, обеспечивающего температуру охлаждения ФЧЭ (T_{FE}) и параметры спектральной характеристики чувствительности, приведенной на рис. 4.

Опыт изготовления фотоприемников показывает, что имеющаяся в ФГУП «НПО "Орион"» технология позволяет создавать ФЧЭ из PbS с $D_{\lambda_{\max}}^* \geq 3 \cdot 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ при $T_{FE} = 193 \text{ К}$ и из PbSe с $D_{\lambda_{\max}}^* \geq 3 \cdot 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ при $T_{FE} = 193 \text{ К}$.

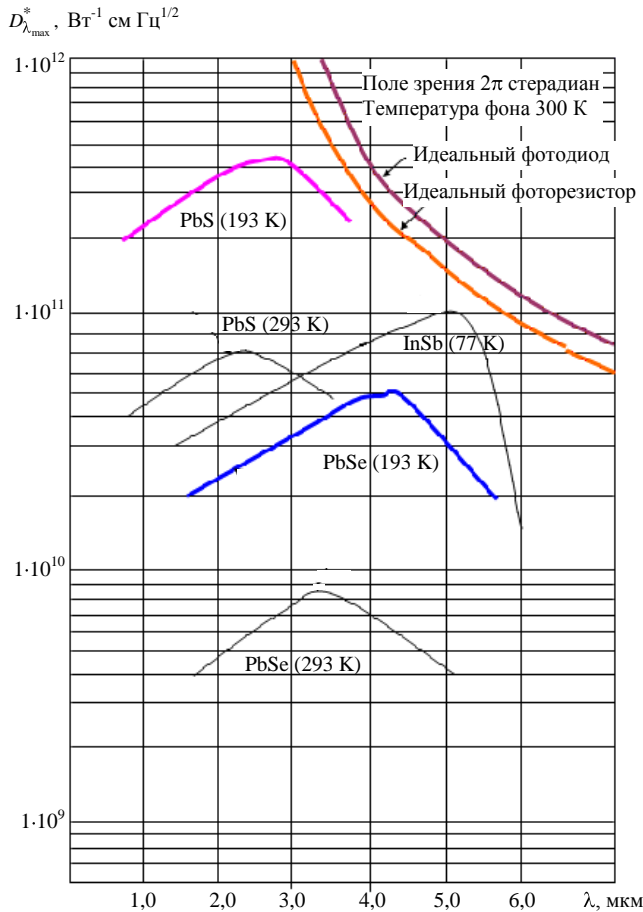


Рис. 4. Типовые характеристики спектральной чувствительности ФПУ (PbSe, PbS и InSb)

Повышение температуры охлаждения ФЧЭ до 200 К приводит к снижению $D^*_{\lambda_{max}}$ и $S_{u\lambda_{max}} \sim$ на 10 %.

На основании данных по фоторезисторам, а также с учетом возможных параметров мультиплексоров, сопрягающихся с ФЧЭ из халькогенидов свинца, можно провести оценку фотоэлектрических параметров ФПУ [1, 5], которыми являются:

обнаружительная способность ФПУ $(D^*_{\lambda_{max}})_{FPA}$;

вольтовая чувствительность $(S_{u\lambda_{max}})_{FPA}$;

динамический диапазон ДД;

$(D^*_{\lambda_{max}})_{FPA}$, $(S_{u\lambda_{max}})_{FPA}$ нормируются на частотах $F_{01} = 70$ Гц для ФПУ1 и $F_{02} = 1200$ Гц — для ФПУ2.

Для оценки достижимого значения обнаружительной способности ФПУ с встроенными мультиплексорами и ТЭО воспользуемся следующим выражением:

$$(D^*_{\lambda_{max}})_{FPA} = \frac{(D^*_{\lambda_{max}})_{FE}}{\left(1 + \frac{\bar{e}_{mm}^2}{4 \cdot \bar{e}_{nFE}^2}\right)^{1/2}} \cdot K_c, \quad (1)$$

где $(\sqrt{\bar{e}_n^2})_m$ — спектральная плотность шума мультиплексора, приведенная к его входу;

$(\sqrt{\bar{e}_n^2})_{FE}$ — спектральная плотность шума фоточувствительного приемника (ФЧП), полученная при измерении параметров ФЧП в согласованном режиме, когда сопротивление фоторезистора в темновом режиме равно сопротивлению нагрузки $R_{low} = R_d$;

K_c — коэффициент, связанный с температурой охлаждения ФЧЭ.

Выражение (1) справедливо, когда на входах мультиплексоров стоят трансимпедансные усилители (ТИУ).

Выражение, связывающее $(\sqrt{\bar{e}_n^2})_{FE}$ с $(D^*_{\lambda_{max}})_{FE}$ и $(S_{u\lambda_{max}})_{FE}$, имеет вид

$$(\sqrt{\bar{e}_n^2})_{FE} = \frac{(S_{u\lambda_{max}})_{FE}}{(D^*_{\lambda_{max}})_{FE}} \cdot \sqrt{A_{FE}}, \quad (2)$$

где A_{FE} — площадь ФЧП.

Подставляя (2) в (1), получаем следующее выражение для $(D^*_{\lambda_{max}})_{FPA}$:

$$D^*_{\lambda_{max}} = \frac{(D^*_{\lambda_{max}})_{FE}}{\sqrt{1 + \frac{(\bar{e}_n^2)_m \cdot (D^*_{\lambda_{max}})_{FE}^2}{4 \cdot (S_{u\lambda_{max}})^2 \cdot A_{FE}}}} \cdot K_c \quad (3)$$

где $(S_{u\lambda_{max}})_{FE}$ — вольтовая чувствительность ФЧП, измеренная при $R_{low} = R_d$.

Выражение для $(S_{u\lambda_{max}})_{FPA}$, связывающее ее с $(S_{u\lambda_{max}})_{FE}$ и параметрами мультиплексоров, имеет вид

$$(S_{u\lambda_{max}})_{FPA} = 2(S_{u\lambda_{max}})_{FE} \frac{K_d}{R_d} \cdot K_c, \quad (4)$$

где K_d — коэффициент преобразования мультиплексора;

R_d — темновое сопротивление ФЧП.

Динамический диапазон (ДД) определяется

$$ДД = 20 \cdot \lg(U_{max} / \left(\sqrt{U_{n_{out}}^2}\right)), \quad (5)$$

где U_{max} — максимальная амплитуда неискаженного переменного сигнала на выходе мультиплексора;

$\sqrt{U_{n_{out}}^2}$ — среднееквадратическое значение шума в i -м канале на выходе мультиплексора (МП-1, МП-2).

Величина $\sqrt{U_{n_{out}}^2}$ рассчитывается следующим образом:

$$\sqrt{U_{n_{out}}^2} = \sqrt{4 \cdot \bar{e}_{nFE}^2 + \bar{e}_{nm}^2} \cdot \sqrt{\Delta f_{nd}} \cdot (K_d / R_d), \quad (6)$$

где Δf_{nd} — шумовая полоса пропускания электронного тракта ФЭМ.

В расчетах можно принять, что Δf_{nd} равна верхней граничной частоте пропускания АЧХ, используемого в мультиплексоре (F_h).

В таблице приведены рассчитанные по (1)—(6) значения $(D^*_{\lambda_{max}})_{FPA}$, $(S_{i\lambda_{max}})_{FPA}$ и ДД для ФПУ1 и ФПУ2 при использовании в них МП, разрабатываемых в ФГУП «НПО "Орион"», и ТЭО, обеспечивающего охлаждение ФЧЭ до 200 К.

Для расчета использовались следующие параметры ФЧЭ и мультиплексоров, $(S_{i\lambda_{max}})_{FPA}$ и $(D^*_{\lambda_{max}})_{FPA}$:

- $(S_{i\lambda_{max}})_{FPA} = 1,5 \cdot 10^8$ В/Вт; $(D^*_{\lambda_{max}})_{FPA} = 4,5 \times 10^{11}$ Вт⁻¹·см·Гц^{1/2}; $K_d = 30$ В/мкА, $K_c = 0,9$;
- $\sqrt{\bar{e}_n^2} = 1,0$ мкВ/Гц^{1/2}; $F_h = 300$ Гц; $A_{FE} = 4 \times 10^{-3}$ см; $U_{max} = 3$ В — для ФПУ 1-го типа;
- $(S_{i\lambda_{max}})_{FE} = 1,5 \cdot 10^7$ В/Вт; $(D^*_{\lambda_{max}})_{FE} = 4 \times 10^{10}$ Вт⁻¹·см·Гц^{1/2}; $K_d = 50$ В/мкА; $K_c = 0,9$;
- $\sqrt{\bar{e}_n^2} = 1,0$ мкВ/Гц^{1/2}; $F_h = 5$ кГц, $A_{FE} = 4 \times 10^{-3}$ см; $U_{max} = 3$ В — для ФПУ 2-го типа.

Результаты измерений и экспериментальных исследований показали хорошее совпадение с расчетными оценками, что наглядно отражено в таблице.

Фотоэлектрические параметры ФПУ из халькогенидов свинца

Параметра	ФПУ на основе PbSe			ФПУ на основе PbS		
	расчет	норма	результаты измерения	расчет	норма	результаты измерения
Среднее значение вольтовой чувствительности $(S_{i\lambda_{max}})_{mid}$, В/Вт	$2,3 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^8$	$2,6 \cdot 10^{10}$	$8,1 \cdot 10^9$	$3,0 \cdot 10^9$	$1,2 \cdot 10^{10}$
Среднее значение обнаружительной способности $(D^*_{\lambda_{max}})_{mid}$, Вт ⁻¹ ·см·Гц ^{1/2}	$3,4 \cdot 10^{10}$	$3,0 \cdot 10^{10}$	$3,8 \cdot 10^{10}$	$4 \cdot 10^{11}$	$3 \cdot 10^{11}$	$3,7 \cdot 10^{11}$
Динамический диапазон, дБ	62	60	58	65	60	57
Разброс $\delta S_{i\lambda_{max}}$, %	—	20	13	—	20	17
Относительное число работоспособных каналов δ_n , %	—	98	96	—	98	97
Граничные частоты АЧХ МП, F_{low} , F_h , Гц	10	≤5	12	23,3	≤40	25

Заключение

Представлена разработка фотоприемных устройств ИК-диапазона спектра, предназначенных для широкого применения в оптико-электронной аппаратуре.

Рассмотрены конструктивные, схемотехнические принципы построения ФПУ.

Приведена методика, результаты расчетов и измерений фотоэлектрических параметров ФПУ с учетом особенностей сопряжения фотоприемников с мультиплексорами.

Литература

1. Буткевич В. Г., Бочков В. Д., Глобус Е. Р. Фотоприемники и фотоприемные устройства на основе поликристаллических и эпитаксиальных пленок халькогенидов свинца// Прикладная физика. 2001. № 6. С. 66—112.

2. Аракелов Г. А., Бочков В. Д., Дразников Б. Н., Храпунов М. Л., Кузнецов П. А. Новое поколение многоэлементных фотоприемных устройств на основе фоточувствительных структур халькогенидов свинца: XIX Междунар. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения: Тез. докладов.— М., Россия, 2006. С. 21.

3. Антипова М. А., Дразников Б. Н., Казарова Ю. А., Яснова К. И. Конструкционные полимерные клеи повышенной технологичности для сборки тепловизионных фотоприемных модулей// Прикладная физика. 2007. № 3. С. 82—84.

4. Патент 41699 РФ, 2005.

5. Бочков В. Д., Воробаев И. И., Храпунов М. Л. Схемотехника МФПУ на основе халькогенидов свинца// Прикладная физика. 1999. № 2. С. 114—118.

6. Заславский А. В., Кузнецов П. А., Климанов Е. А. Сравнительный анализ схемотехнических принципов построения КМОП-мультиплексоров для многоэлементных фоторезисторов на основе PbS, PbSe// Там же. 2007. № 5. С. 83—85.

Статья поступила в редакцию 13 марта 2008 г.

256-channel photodetector arrays on the lead chalcogenides base

G. A. Arakelov, V. D. Bochkov, B. N. Drajnikov, J. A. Kazarova, P. A. Kuznetsov
Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

It have been designed, manufactured and tested 256-channel photodetector arrays (PA) intended for use in optical equipment for various application operating in the spectrum range 1—3 and 3—5 μm . The main applications-portable thermovision devices, spectrometers, security devices, instruments industrial automatics etc. PA designed in two modifications depending on applied photosensitive material PbSe (PA1) or PbS (PA2).

PACS: 85.60.-q

УДК 621.383

ИК-изображения флип-чип-диодов на основе InAsSbP в спектральной области 3 мкм

A. Л. Закгейм, Н. В. Зотова, Н. Д. Ильинская, С. А. Карандашев, Б. А. Матвеев,
М. А. Ременный, Н. М. Стусь, А. А. Усикова, А. Е. Черняков
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

Проведен анализ инфракрасных "собственных" и в отраженных лучах ($\lambda = 2,9$ мкм) изображений флип-чип-светодиодов на основе $p\text{-InAsSbP}/n\text{---InAsSbP}/n^+\text{---InAs}$, включая изображения, получаемые при прямом и обратном смещениях $p\text{-}n\text{-}$ перехода. Дана оценка коэффициентов отражения от омических контактов и сделаны предположения о соотношении величин контактного и объемного сопротивлений.

PACS: 85.60.-q

Введение

Светодиоды, излучающие в средней инфракрасной (ИК) области спектра (3—5 мкм), используются в оптических датчиках химического состава среды [1] и в качестве тестовых объектов в оптической пирометрии. Применительно к последнему в работе [2] с помощью ИК-камеры с рабочим диапазоном 3—5 мкм анализировались изображения и "эффективные температуры" фотонных излучателей на основе гетероструктур III—V. При этом согласно [2] наибольший интерес для практики представляли светодиоды флип-чип-конструкции, описанные в работах [3, 4] и обеспечивающие большие яркость и эффективность по сравнению с традиционными светодиодами, имеющими точечный контакт. Вместе с тем в [2] приведены неоптимальные для получения высокой мощности светодиоды, а именно, светодиоды, в которых контакт покрывает не более 25 % площади рабочей области приборов, следствием чего является невысокая эффективность из-за сгущения линий тока вблизи контакта [4—6]. ИК- (или "тепловые") изображения светодиодов приведены с недостаточно высоким разрешением, поэтому ряд

деталей этих изображений, важных для практики и характерных для флип-чип-конструкций с отражающими контактами, опущены. Кроме того, конструкции диодных структур представлены в работе [2] упрощенно, что может являться источником ошибок в интерпретации получаемых результатов. В ряде работ [7—9] приведены ИК-изображения светодиодов с высоким разрешением, однако в них отсутствуют исходные (при нулевом токе) изображения со стороны излучающей поверхности, содержащие дополнительную информацию, позволяющую судить, например, об отражающих свойствах контактов.

В данной работе приводятся и анализируются инфракрасные "собственные" и в отраженных лучах ($\lambda = 2,9$ мкм) изображения высокого разрешения флип-чип-светодиодов на основе $p\text{-InAsSbP}/n\text{---InAsSbP}/n^+\text{---InAs}$, излучающих с длиной волны в максимуме спектрального распределения 2,9 мкм (300 К).

Образцы и методика эксперимента

Исследовались образцы, аналогичные описанным ранее в работе [10] и изготовленные из согла-