

УДК 535.247.049.7: 621.383.52

Многомодульное линейчатое фотоприемное устройство $4 \times (2 \times 192)$ на основе InAs МДП-структур для систем тепlopеленгации

В. М. Базовкин, Н. А. Валишева, А. А. Гузев, В. М. Ефимов, А. П. Ковчавцев, Г. Л. Курьшев, И. И. Ли, В. Г. Половинкин, А. С. Строганов, Л. А. Мирзоева, Г. А. Маковцов, Е. В. Пролыгин

Представлены конструкция и параметры фотоприемного устройства (ФПУ) спектрального диапазона 1,1—3 мкм на основе линейки InAs конденсаторов формата 2×192 . Фотоприемное устройство может работать как с системой охлаждения микрокриогенной машины МСМГ-3В-1/80, так и в обычном заливном азотном криостате. Конструкция гибридного модуля обеспечивает стыкуемость 4 модулей без оптических зазоров в направлении сканирования.

PACS: 85.60.Gz, 85.60.Bt

Ключевые слова: ИК-фотоприемное устройство, гибридный модуль, InAs, ПЗИ, фотодиод.

Введение

Цель данной работы — создание на основе МДП-конденсаторов универсального ИК-ФПУ линейчатого типа форматом 2×192 элемента. Основной задачей разработки является повышение быстродействия, обеспечение работы в низкофоновых условиях и возможности создания многомодульных гибридных ИК-ФПУ на их основе без оптических зазоров. Ключевой проблемой является разработка и создание на базе отечественной технологии кремниевого мультиплексора.

Принципиальная схема кремниевого мультиплексора

Минимальное время считывания ранее разработанного авторами линейчатого ИК-ФПУ формата 2×192 ограничивается организацией кремниевого мультиплексора и определяется суммарным временем считывания информации со строки ПЗИ-элементов и выводом этой информации на общую шину считывания [1—3].

Устройство считывания, принципиальная схема которого приведена на рис. 1, *а*, лишено этого недостатка. Каждый из двух мультиплексоров ("прямой" и "зеркальный") состоит из линейки 194 прямоинжекционных входных устройств, линейки зарядочувствительных предусилителей с устройствами двойной коррелированной выборки и сдвигового регистра, обеспечивающего последовательное считывание фотосигналов на общий выход. Так как крайние элементы (1 и 194) имеют отличную от внутренних элементов вольт-ваттную чувствительность, введение двух дополнительных ячеек в мультиплексор позволило для всех 192 информационных фотоприемных каналов получить одинаковую вольт-ваттную чувствительность. По сравнению со схемой кремниевого мультиплексора из работы [1] в каждую ячейку устройства считывания введены зарядно-связанные затворы 2 и 3, формирующие аналоговые ячейки хранения, МДП-транзисторы Т1 и Т2. Работа устройства считывания поясняется временными диаграммами управляющих напряжений, приведенными на рис. 1, *б*.

При подаче импульсного управляющего напряжения $\Phi_{ст}$ заряды, находящиеся под первыми затворами накопления (затвор 2 см. рис. 1, *а*) и

Базовкин Владимир Михайлович, научный сотрудник.

Валишева Наталья Александровна, старший научный сотрудник.

Гузев Александр Александрович, ведущий научный сотрудник.

Ефимов Валерий Михайлович, старший научный сотрудник.

Ковчавцев Анатолий Петрович, ведущий научный сотрудник.

Курьшев Георгий Леонидович, зав. лабораторией.

Ли Ирлам Игнатьевич, старший научный сотрудник.

Половинкин Владимир Григорьевич, старший научный сотрудник.

Строганов Александр Сергеевич, ведущий инженер.

Институт физики полупроводников СО РАН им. А. В. Ржанова.

Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13.

Тел. (383) 333-35-06. E-mail: kur. @isp.nsc.ru

Мирзоева Лариса Александровна, главный конструктор.

Маковцов Геннадий Анатольевич, зам. главного конструктора.

Пролыгин Евгений Владимирович, начальник лаборатории.

ФГУП «НПК "ГОИ им. С. И. Вавилова"».

Россия, 199034, Санкт-Петербург, Биржевая линия, 12.

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2010 г.

© Базовкин В. М., Валишева Н. А., Гузев А. А., Ефимов В. М., Ковчавцев А. П., Курьшев Г. Л., Ли И. И., Половинкин В. Г., Строганов А. С., Мирзоева Л. А., Маковцов Г. А., Пролыгин Е. В., 2011

несущие информацию о фотосигналах с предыдущего цикла считывания, одновременно передаются под вторые затворы накопления (затвор 4 см. рис. 1, *a*). При считывании информации с ПЗИ-элементов в следующем цикле считывания информация записывается под первым затвором накопления. Таким образом, введенные в устройства считывания дополнительные элементы дают возможность совместить во времени операцию считывания сигналов с фотоприемных ПЗИ-элементов и последовательный вывод сигналов на общую шину считывания. Время, необходимое для считывания информации с ПЗИ-элементов, определяется суммарной длительностью управляющих импульсных напряжений $\Phi_{пр}$ и $\Phi_{тр}$. Экспериментально определено, что для устройств считывания с прямой инжекцией заряда минимальная длительность этих импульсов $\sim 10\text{—}15$ мкс и тем самым на это время уменьшается время считывания информации со строки. Максимальная тактовая частота считывания сигналов на шину считывания ("Вых" см. рис. 1, *a*) ограничивается временем переноса информационных зарядов из под второго затвора накопления на затвор повторителя (затвор 4 и транзистор Т3 см. рис. 1, *a*). Геометрический размер второго затвора накопления в направлении переноса 38 мкм и позволяет считывать сигналы с частотой 6—8 МГц и, таким образом, минимальное время считывания 192 элементов составляет 30—40 мкс.

Уровень собственных шумов мультиплексора с прямой инжекцией заряда во многом определяется величиной емкости входного узла фотоприемного канала ИК-ФПУ (узел 1 см. рис. 1). За счет оптимизации топологии фотоприемных ячеек, топологии кремниевого мультиплексора и конструкции гибридного модуля ИК-ФПУ в целом входная емкость ФПУ уменьшена с 1,8 до 0,65 пФ для ПЗИ-фотоприемника с размерами 38×38 мкм. Для снижения величины емкости входного узла было необходимо минимизировать емкости соединительных шин от МДП-фотоиода (уменьшить длину и ширину соединительных шин), площади контактных площадок и индиевых микростолбов. Для уменьшения фотоэлектрической связи области между фоточувствительными элементами защищены металлическим экраном (T_i) (размер фоточувствительной области 44×44 мкм). Незащищенные области контактных площадок фотоприемников защищены от попадания ИК-излучения непрозрачными слоями на планарной стороне кремниевого мультиплексора. Технология изготовления InAs-ПЗИ достаточно подробно описана в наших работах [3, 4]. Здесь отметим, что титановые соединительные шины к фотоприемникам размещаются на дополнительном защитном слое из SiO_2 . Пороговое напряжение под соединительными шинами на 5—6 В превышает пороговое напряжение над полевым ПЗИ-затвором, и поэтому эти области нечувствительны к ИК-излучению.

Конструктивные особенности гибридного модуля

Фотоприемные элементы и кремниевый мультиплексор соединены между собой индиевыми микростолбами высотой 5—7 мкм по технологии холодной сварки индиевых микростолбов (технология flip-chip). Уменьшение длин соединительных шин и геометрических размеров соединительных индиевых микростолбов не позволяет разделять кремниевые мультиплексоры на два отдельных кристалла. Для данной топологии фотоприемных элементов единственным конструктивным вариантом гибридных модулей на основе InAs ПЗИ-элементов, выполненных на гомоэпитаксиальной подложке, является вариант с засветкой фотоприемников через непланарную сторону подложки Si-мультиплексора, как это показано на рис. 2.

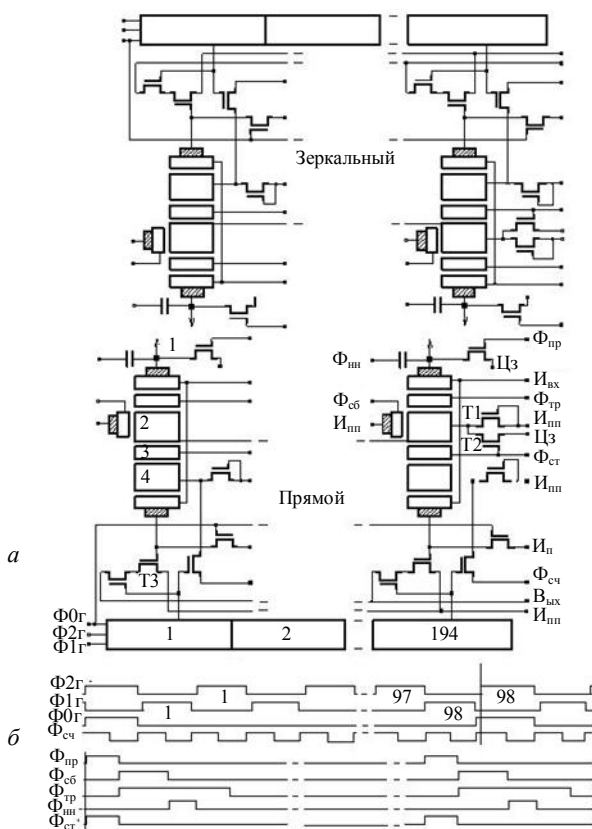


Рис. 1. Кремниевый мультиплексор Ф408СЭ:

a — принципиальная схема; *б* — временные диаграммы управляющих напряжений

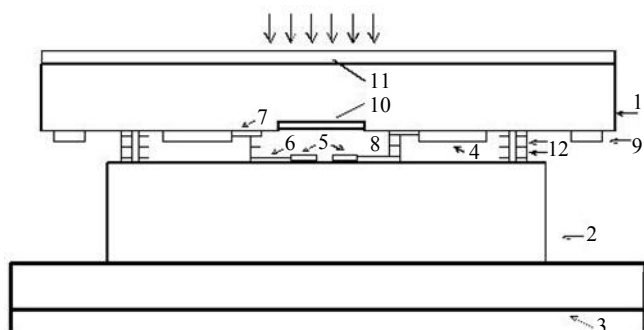


Рис. 2. Конструкция модуля ФПУ с засветкой через непланарную сторону кремниевого мультиплексора:

1 — кремниевый мультиплексор; 2 — кристалл InAs с фотоприемной линейкой 2×194 элементов; 3 — пьедестал хладопровода; 4 — входные ячейки мультиплексора; 5 — фотоприемные элементы; 6, 7 — соединительные шины; 8 — индиевые микростолбы; 9 — выходные контакты мультиплексора для приварки контактов полиамидного металлизированного шлейфа; 10, 11 — области просветления планарной и непланарной стороны кремниевого мультиплексора; 12 — крепежные индиевые микростолбы

Конструкция гибридного модуля позволяет реализовать многомодульные системы. По торцам кристаллов кремниевых мультиплексоров и кристаллов фоточувствительных элементов размещены специальные "юстировочные" метки, обеспечивающие стыковку без оптических зазоров ИК-ФПУ в многомодульном исполнении.

На рис. 3 показано геометрическое расположение 4 модулей на охлаждаемой платформе криостата.

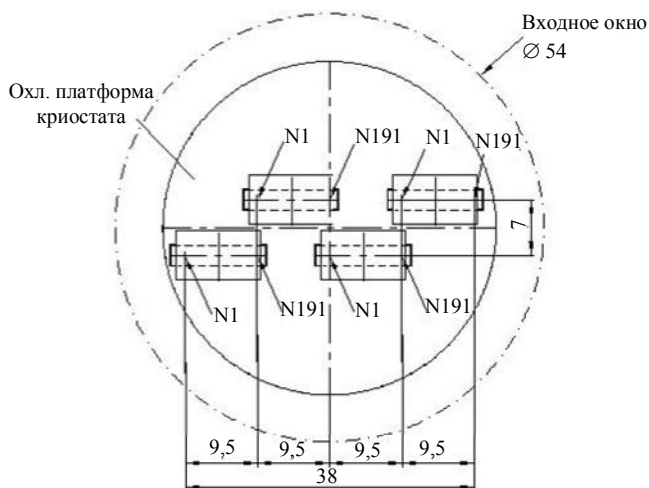


Рис. 3. Геометрическое расположение модулей ИК-ФПУ на охлаждаемой платформе криостата

Модули располагаются в шахматном порядке с разнесением в перпендикулярном направлении по оси фотоприемной линейки на 7 мм. Гибридные модули могут размещаться как в вакуумном криостате, охлаждаемом микрокриогенной машиной МСМГ-3В-1/80, так и в криостате, охлаждаемом жидким азотом. Для 4-модульного варианта ИК-ФПУ в криостате, охлаждаемом микро-

криогенной машиной МСМГ-3В-1/80, теплоприток не более 0,6 Вт, а время выхода на рабочий режим не превышает 20 мин. Для ИК-ФПУ в заливном криостате, охлаждаемом жидким азотом, время непрерывной работы при одной заправке (0,2 л) не менее 12 ч, а время выхода на рабочий режим — не более 15 мин.

Оптимизация спектральных характеристик ФПУ

При температуре фонового излучения, близкого к комнатной температуре, и временах накопления ~50 мкс обеспечить чувствительность в режиме ограничения флуктуациями фонового излучения (режим ОФ) не представляется возможным. В этих условиях чувствительность гибридного модуля пропорциональна квантовой эффективности всего оптического тракта ИК-ФПУ в целом, включая объектив и входное окно криостата, и поэтому проблема повышения квантовой эффективности в данном случае является приоритетной.

Оптическая схема гибридного модуля показана на рис. 4. Регистрируемое излучение падает на непланарную сторону кремниевого кристалла (2), просветленного слоями (1) и (3). Далее расположены воздушный (или вакуумный) зазор между кристаллами и слои на кристалле фоточувствительной линейки. Критерий оптимальности задается исходя из требований потребителя, например, в виде обеспечения максимальной квантовой эффективности на определенной длине волны или в определенном спектральном диапазоне, скажем в диапазоне 2—3 мкм. В ряде применений желательно иметь максимальную вольт-ваттную чувствительность. В случае оптимизации на фиксированной длине волны эти параметры эквивалентны. Различие наблюдается только при оптимизации в диапазоне длин волн.



(1) Al ₂ O ₃	$n = 1,9;$	$d = 0,323 \mu$
(2) Si	$n = 3,8;$	$d = 400 \mu$
(3) Si ₃ N ₄	$n = 1,85;$	$d = 0,334 \mu$
(4) Воздушный зазор	$n = 1,00;$	$d = 5-7 \mu$
(5) SiO ₂	$n = 1,45;$	$d = 0 \mu$
(6) In ₂ O ₃	$n = 2,05;$	$d = 0,120 \mu$
(7) SiO ₂	$n = 1,45;$	$d = 0,15 \mu$
(8) InAs	$n = 3,5-0,1j;$	$d = \infty$

Рис. 4. Оптическая схема ФПУ:

1—3 — слои на кремниевом кристалле; 5—8 — слои на кристалле фоточувствительной линейки. Приведены использованные в расчетах значения показателей преломления и рекомендованные значения толщин

Толщина подзатворного диэлектрика (d_{SiO_2}) фиксирована и равна 0,15 мкм, диапазоны изменения толщины МДП-затвора ($d_{In_2O_3} = 0,15-0,25$ мкм).

Расчет оптических свойств (пропускание, отражение) многослойной системы плоскопараллельных слоев не представляет принципиальной сложности. Техническая проблема возникает при наличии в системе "толстого" (0,4 мм) слоя подложки кремния. В этом случае точный расчет дает быстро осциллирующие зависимости оптических свойств от длины волны и других параметров системы. Во многих практических случаях интерес представляет не эта тонкая структура спектров, а средние значения оптических свойств. Поэтому в точных выражениях для пропускания и отражения были выделены функциональные зависимости этих величин от толщины такого слоя и проведено аналитическое усреднение по периоду осцилляции.

При оптимизации на фиксированной длине параметры просветляющих покрытий на кремнии определяются длиной волны ($2nd = \lambda$), поэтому оптимизировались только два параметра, а именно, толщины защитного SiO_2 и полевого электрода In_2O_3 при фиксированных значениях всех остальных параметров. При расчете оптических потерь для конструктивного варианта, приведенного на рис. 4, необходимо учитывать интерференцию в зазоре между планарными сторонами кремниевого кристалла и кристалла InAs с МДП-фотоприемниками. Воздушный зазор между кремнием и InAs при оптимизации полагался равным среднему значению 7 мкм. На рис. 5 показаны спектры отражения структур, состоящих из "толстого" кремния со слоями просветления с двух сторон и отстоящими

от него на расстояние d_a МДП-фотоприемниками, оптимизированных (с учетом интерференции в зазоре) на спектральные диапазоны 2,7 и 1,5 мкм.

При оптимизации в спектральном диапазоне варьировались толщины просветляющих покрытий на кремнии ($d_{\text{Al}_2\text{O}_3}$, d_{SiN_4}) и толщины защитного SiO_2 и полевого электрода In_2O_3 . Для ускорения расчетов мы использовали оценку интегральной квантовой эффективности в виде среднего значения величины $(1-R)$ для 20 длин волн в диапазоне 2—3 мкм. При оптимизации по вольт-ваттной чувствительности в полосе частот использовалось аналогичное среднее значение величины $(1-R)\lambda$, что соответствует отклику приемника на излучение с равномерным распределением мощности излучения по длинам волн.

Итоговые значения варьируемых параметров структуры приведены в таблице. Для каждой из длин волн были получены по два набора параметров. Основное отличие этих наборов — различие на период ($\lambda/2n$) толщины защитного SiO_2 , варианты "а" и "б".

Наборы параметров при оптимизации на длину волны 2,5 мкм и оптимальные для квантовой эффективности и вольт-ваттной чувствительности в полосе 2—3 мкм имеют близкие параметры и, соответственно, близкие спектральные характеристики спектров пропускания. Однако оптимизация спектра пропускания на длину волны 2,2 мкм приведет к значительному (до уровня 0,6—0,7) снижению квантовой эффективности ИК-ФПУ в спектральном диапазоне 2,7—3 мкм.

Показатели	$d_{\text{Al}_2\text{O}_3}$	$d_{\text{Si}_3\text{N}_4}$	d_{SiO_2}	$d_{\text{In}_2\text{O}_3}$	Вариант	
Длина волны, мкм:	2,2	0,289	0,297	0	0,113	а
		0,289	0,297	0,746	0,118	б
	2,5	0,329	0,338	0,032	0,148	а
		0,329	0,338	0,894	0,148	б
	2,7	0,355	0,365	0	0,173	а
		0,355	0,365	0,912	0,169	б
Критерий:	квант, эф. в полосе 2—3 мкм	0,32	0,33	0,05	0,122	а
		0,32	0,331	0,758	0,16	б
	вольт-ваттная чувствительность в полосе 2—3 мкм	0,326	0,337	0,076	0,119	а
		0,33	0,35	1,039	0,123	б

Экспериментальные результаты

На рис. 5 приведена гистограмма обнаружительной способности гибридного модуля 1×384, оптимизированного на длину волны 2,5 мкм.

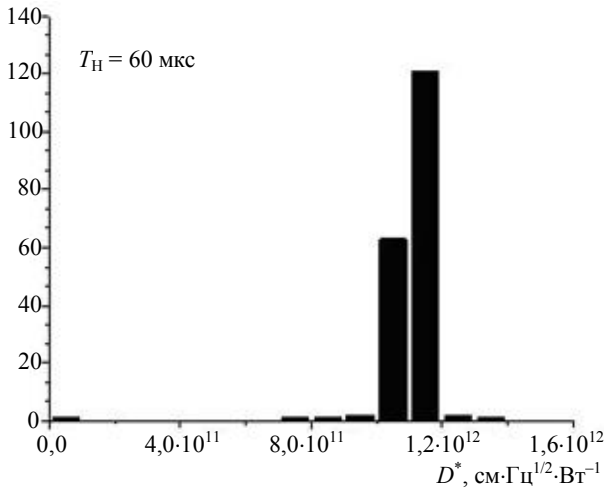


Рис. 5. Гистограмма обнаружительной способности ФПУ элементов линейки 2×192.

Время накопления — 60 мкс, температура АЧТ = 300 °С, уровень фонового излучения — $6,4 \cdot 10^{-7}$ Вт/см²

На основе этого гибридного модуля, установленного в заливном криостате, реализована тепловизионная система, предназначенная для регистрации быстропротекающих процессов в температурном диапазоне от 20 до 200 °С. Отметим, что при изменении температуры сцены от 300 до 480 К уровень фонового излучения изменяется в диапазоне от $6,8 \cdot 10^{-7}$ до $5,6 \cdot 10^{-4}$ Вт·см⁻², т. е. почти на три порядка величины (при времени накопления 128 мкс на фотоприемники попадает от $1,1 \cdot 10^4$ до $7 \cdot 10^6$ фотонов). Это привело к необходимости разработать методику калибровки, обеспечивающую измерение температуры сцены во всем температурном диапазоне.

Теоретическая зависимость потока фотонов от температуры и граничной длины волны описывается известным интегралом:

$$Nph(T, \lambda_g) = 2\pi c \int_0^{\lambda_g} \frac{\lambda^{-4} d\lambda}{\exp\left(\frac{hc}{k_B T \lambda}\right) - 1} = 2\pi c \left(\frac{k_B T}{hc}\right)^3 \int_{\delta_g}^{\infty} \frac{\exp(-x)x^2 dx}{1 - \exp(-\delta)}$$

здесь $x_g = hc/k_B T \lambda_g$. Для InAs $\lambda_g \approx 3,0$ мкм и для температур 300—500 К значение x_g изменяется, примерно, от 16 до 10. Численные расчеты показывают, что с точностью не хуже 3 % зависимость потока фотонов от температуры описывается выражением $Nph = An \exp(B/T)$, где An и B — чис-

ленные коэффициенты. Аппроксимация обратной зависимости $T(Nph) = B/\ln(Nph/A)$ имеет погрешность не более 1 °С.

Предполагая, что сигнал ФПУ зависит от Nph линейно, получим $S = A_s Nph + C_s = A_s An \exp \times (B/T) + C_s$, где A_s и C_s — коэффициенты линейной зависимости. Проведя измерения зависимости сигнала ФПУ от температуры АЧТ в требуемом диапазоне, мы аппроксимировали зависимость температуры от сигнала функцией $T_{амн} = B_{mn} / (\ln(S_{mn} - C_{mn}) - A_{mn}) - T_K$, где $T_K = 273,16$ К, а индекс mn нумерует элементы ФПУ. Погрешность такой аппроксимации показана на рис. 6 (кривая 1). Видно, что ее максимальное значение достигает 3 °С. Для уменьшения погрешности была проведена дополнительная аппроксимация зависимости истинной температуры $T_{сцены}$ от T_a полиномом 3-й степени. Результирующая погрешность такой двухступенчатой аппроксимации показана на рис. 6 (кривая 3). Видно, что максимальное отклонение не превышает 0,5°.

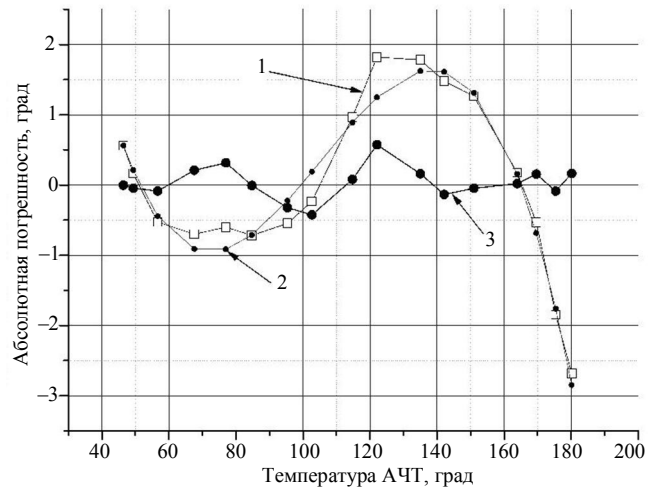


Рис. 6. Зависимость абсолютной погрешности от температуры:

1 — линейное приближение; 2 — квадратичное приближение; 3 — аппроксимация полиномом 3-й степени

Основные параметры тепловизионной системы

Объектив.....	(D/F=1/1,8; F = 20,5 мм)
Фоточувствительный элемент, мкм.....	38×38
Формат.....	1×384
Спектральный диапазон чувствительности, мкм.....	1,1—3,05
Динамический диапазон (при $t_{нак} = 128$ мкс), дБ.....	80
Температурный диапазон*, °С.....	40—180
Абсолютная точность измерения температуры, при температуре прибора, 22 ± 2 , °С.....	$\pm 0,5$
Питание от USB2.0 порта компьютера, потребляемая мощность, Вт, не более.....	1,1
Хладагент.....	жидкий азот
Объем жидкого азота на одну заправку, л.....	0,2

Время непрерывной работы при одной заправке жидким азотом, ч, не менее	12
Габариты, мм:	
диаметр	110
длина	240
Масса камеры, кг	3,5

* По желанию пользователя при использовании калиброванных серых фильтров температурный диапазон тепловизионной системы может быть расширен в область более высоких температур.

Заключение

На основе МДП ПЗИ-структур на арсениде индия разработано многомодульное универсальное ФПУ с быстродействием 60 мкс на строку с обнаружительной способностью более $\sim 10^{12}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹. Тепловизионная система на основе одномодульного ИК-ФПУ на основе InAs ПЗИ-структур позволяет проводить измерение температуры в диапазоне 40—180 °С с точностью не хуже 0,5 °С. На основе данного модуля с InSb ПЗИ-элементами ведется разработка тепловизионного микроскопа [3]. В 4-модульном варианте конструкция гибридного модуля обеспечивает стыкуемость модулей в линейку формата 1×1536 элементов без оптических зазоров (в направле-

нии сканирования) с охлаждением микрокриогенной машиной МСМГ-3В-1/80.

Литература

1. Базовкин В. М., Валишева Н. А., Гузев А. А., Ефимов В. М., Ковчавцев А. П., Курьшев Г. Л., Ли И. И., Строганов А. С. Гибридное фотоприемное устройство на основе линейки 1×384 InAs МДП-структур для спектрометрических применений // Прикладная физика. 2003. № 6. С. 85.
2. Ли И. И., Базовкин В. М., Валишева Н. А., Гузев А. А., Ефимов В. М., Ковчавцев А. П., Курьшев Г. Л., Половинкин В. Г., Строганов А. С., Царенко А. В. Многоэлементные гибридные ИК-фотоприемные устройства на основе приборов с инжекцией заряда. Часть 1. Принципы считывания сигналов с ПЗИ фотоприемников // Автометрия. 2007. № 4. С. 25.
3. Ли И. И., Базовкин В. М., Валишева Н. А., Гузев А. А., Ефимов В. М., Ковчавцев А. П., Курьшев Г. Л., Половинкин В. Г., Строганов А. С., Царенко А. В. Многоэлементные гибридные ИК-фотоприемные устройства на основе приборов с инжекцией заряда. Часть 2. Тепловизионные системы с элементами на InAs // Там же. С. 36.
4. Ковчавцев А. П., Курьшев Г. Л., Базовкин В. М., Валишева Н. А., Гузев А. А., Ли И. И., Ковалевская Т. Е., Панова З. В., Ефимов В. М. Монографии "Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона". Глава 1. Фотоприемники зарядовой инжекции на арсениде индия. — г. Новосибирск: Наука, 2001.
5. Курьшев Г. Л., Ли И. И., Базовкин В. М., Валишева Н. А., Гузев А. А., Ефимов В. М., Ковчавцев А. П., Половинкин В. Г., Строганов А. С. Предельные параметры многоэлементных гибридных МДП ИК-ФПУ на InAs и приборов на их основе // Прикладная физика. 2009. № 2. С. 79.

Multimodule linear 4×(2×192) FPA for thermo location systems based on InAs MIS structures

V. M. Bazovkin, N. A. Valisheva, A. A. Guzev, V. M. Efimov, A. P. Kovchavtsev,
G. L. Kuryshev, I. I. Lee, V. G. Polovinkin, A. S. Stroganov

Institute of Semiconductor Physics, SB RAS, 13 Acad. Lavrent'ev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

L. A. Mirzoeva, G. A. Makovtsov, E. V. Prolygin

Federal State Unitary Enterprise «Scientific Production Association S. I. Vavilov "State Optical Institute"»,

12 Birzhevaya Liniya, St. Petersburg, 199034, Russia

E-mail: kur@isp.nsc.ru

In this paper, we report on the design and performance characteristics of IR focal-plane arrays (IR FPAs) developed around a standard 2×192 InAs MIS hybrid linear module. IR FPA comprising up to four 2×192 hybrid modules interfaced without optical gap has been designed. In the IR FPA, improved sensitivity, and improved time and spatial resolution, were achieved.

PACS: 85.60.Gz, 85.60.Bt

Keywords: infrared, hybrid, MIS structure, Si multiplexer, detectivity.

Bibliography — 5 references.

Received November 22, 2010