

УДК 621.383

Гетеродинные фотоприемные устройства с микрокриогенными системами охлаждения

К. О. Болтарь, И. Д. Бурлаков, С. В. Головин, В. Е. Ложников, Н. Г. Мансветов,
Т. М. Мансветова, Т. Ф. Терехович

ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

Разработаны, изготовлены и исследованы одноэлементные и матричные гетеродинные фотоприемные устройства (ГФПУ) на основе КРТ-фотодиодов. Фоточувствительные элементы (ФЧЭ) размещены в холодной зоне вакуумного криостатируемого корпуса, сопряженного с микрокриогенной системой охлаждения (МКС), работающей по циклу Стирлинга. ГФПУ обладают большим быстродействием и высокой чувствительностью и могут широко применяться в ИК-аппаратуре для измерения скорости объектов, в системах ориентации и управления, лазерной локации, дальнометрии, оптических средствах связи.

При гетеродинном способе приема фотосигналов сигнальное оптическое излучение смешивается с оптическим полем гетеродина (СО₂-лазера) на фоточувствительной площадке ФПУ. Использование дополнительного оптического поля гетеродина позволяет увеличить дробовой шум гетеродинного ФПУ до уровня, при котором как тепловые, так и дробовые шумы, вызываемые любыми источниками шума, кроме гетеродина, становятся пренебрежимо малыми, что позволяет добиться максимального отношения сигнал/шум и, следовательно, максимальных пороговых характеристик чувствительности.

Ранее авторами были разработаны и исследованы одно- и десятиэлементные фотоприемники и фотоприемные устройства на основе КРТ-фотодиодов для гетеродинного приема излучения на длине волны 10,6 мкм [1, 2]. Пороговая чувствительность в гетеродинном режиме для обоих типов ГФПУ не превышала $1 \cdot 10^{-19}$ Вт/Гц. Охлаждение ФЧЭ до рабочей температуры достигалось заливкой жидкого азота, что существенно снижало возможности их применения в аппаратуре.

В данной работе представлены результаты разработки и исследований одноэлементных и матричных гетеродинных ФПУ, состыкованных с микрокриогенными системами охлаждения.

Матричное гетеродинное фотоприемное устройство

Матричные ГФПУ с числом элементов 5×5, охлаждаемые с помощью МКС, разработаны в целях комплектации измерительной аппаратуры лидарного комплекса для дистанционного контроля за-

грязнения атмосферы. При работе лидарного комплекса излучение СО₂-лазера разделяется на два луча. Один луч направляется в атмосферу, отражается от нее, возвращается в приемный тракт лидара, модулируется в диапазоне частот 20—30 МГц и фокусируется на фоточувствительный элемент ГФПУ. Другой луч, являющийся местным гетеродином, направляется непосредственно на фоточувствительный элемент ГФПУ. Оба оптических сигнала смешиваются на фоточувствительной поверхности, при этом за счет биения на выходе ГФПУ возникает сигнал промежуточной частоты 20—30 МГц.

Поскольку увеличение площади фотоприемника приводит к росту чувствительности комплекса, то для данной задачи можно было бы использовать одноэлементное ФПУ с большой фоточувствительной площадью, например диаметром 2 мм, как это предложено в работе [3]. Из-за турбулентности атмосферы отраженный волновой фронт имеет неоднородную фазовую структуру по плоскости фотоприемного элемента, поэтому увеличение площади ФЧЭ неэффективно, так как величина сигнала после гетеродинирования резко уменьшается. Кроме того, увеличение размера фоточувствительной площадки приводит к уменьшению быстродействия фотоприемника из-за увеличения емкости ФЧЭ и сопротивления растеканию тока по подложке КРТ.

В разработанном ГФПУ большая фоточувствительная площадь разбита на матрицу элементов меньшего размера. Матричное ГФПУ на длину волны 10,6 мкм имеет 25 ФЧЭ, ортогонально расположенных в виде матрицы 5×5 элементов.

Для работы с таким ГФПУ параметры оптической системы лидара рассчитывают таким обра-

зом, чтобы каждый фоточувствительный элемент ГФПУ принимал однородный по фазе фрагмент волнового фронта. После гетеродинирования сигналов фоточувствительными элементами и математической обработки скалярные амплитудные составляющие сигнала каждого элемента складываются, и определяется суммарный потенциал принимаемого излучения. Такой метод регистрации увеличивает отношение сигнал/шум, повышает чувствительность лидарного комплекса и обеспечивает дальность контроля до 15 км.

Исходным материалом для изготовления ФЧЭ служил объемный монокристалл КРТ *p*-типа проводимости состава $x \cong 0,21$. Электронно-дырочные переходы фотодиодов формировали ионной бомбардировкой в аргоновой плазме. Контакты к n^+ -областям формировали напылением слоя индия толщиной в несколько микрон с последующими фотолитографией и химическим травлением. В качестве защитного пассивирующего диэлектрика применяли покрытие теллурида кадмия, полученное методом "горячей стенки" толщиной около 5 мкм, что позволило проводить распайку золотой проволокой с расположенных на диэлектрике индиевых контактных площадок без риска внесения дефектов. Матрица 5×5 фотодиодных элементов с эффективной чувствительной площадкой каждого элемента 200×200 мкм расположена на чипе размером 3,5×3,5 мм, причем большую его часть занимала контактная разводка. Кристалл чипа с матрицей ФЧЭ приклеивали в центре сапфирового растра диаметром 20 мм и толщиной 1 мм с золотыми токоведущими дорожками и 25 охлаждаемыми сопротивлениями нагрузки и фильтрующим конденсатором.

Общий контакт к *p*-области осуществлялся припайкой к торцу чипа. Величину сопротивлений нагрузки выбирали исходя из верхней границы полосы частот ГФПУ с учетом известной емкости фотодиода при рабочем напряжении смещения ~20 пФ, она составляла ~300 Ом. Охлаждаемый узел представлен на рис. 1.

Охлаждаемый фотоприемный узел расположен в фокальной плоскости вакуумного криостатируемого корпуса, стыкованного с микрокриогенной системой МСМГ-3А-0,6/80, охлаждающей матрицу ФЧЭ до 80 К. Входное окно криостата изготовлено из германия, просветленного на длину волны 10,6 мкм. Время выхода на режим не превышало 8 мин. Вакуумный криостат с матрицей ФЧЭ и электронные блоки МГФПУ собраны в единую металлическую конструкцию для обеспечения высокой помехозащищенности от электромагнитных наводок.

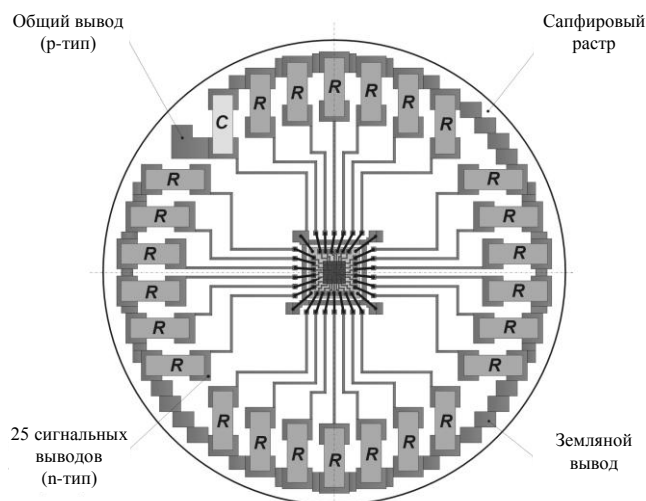


Рис. 1. Охлаждаемый узел матричного ГФПУ: C — фильтрующий конденсатор; R — сопротивление нагрузки

Внешний электронный блок предварительных усилителей матричного ГФПУ состоит из 25 высокочастотных предусилителей со схемой смещения и 25 низкочастотных предусилителей для контроля мощности гетеродинного излучения. Блок также содержит стабилизаторы питания операционных усилителей, схемы смещения рабочей точки фотодиодов и стабилизатор тока термодатчика со схемой его развязки от цепей управления микрокриогенной системой охлаждения. Уровень напряжения дробового шума фотодиодов, вызванного током при воздействии оптического сигнала лазерного гетеродина, преобладает над уровнями теплового шума сопротивления нагрузки и шума усилительного тракта. При этом обеспечивается заданная полоса частот 30 МГц.

Высокочастотные усилители блока предварительных усилителей выполнены на операционных усилителях (ОУ) с граничной частотой не менее 600 МГц. Заданная полоса частот МГФПУ при выбранном коэффициенте усиления ~50, определяемом требуемым значением вольт-ваттной чувствительности ГФПУ не менее 10⁴ В/Вт, реализуется при использовании ОУ AD 8002.

Низкочастотные усилители блока предварительных усилителей выполнены на низкочастотных, малошумящих ОУ OP270 и используются для измерения мощности излучения лазерного гетеродина, падающего на каждый фотодиод матрицы. Коэффициент усиления усилителей рассчитывается исходя из токовой чувствительности фотодиодов и диапазона уровней мощности излучения лазерного гетеродина.

Для стабилизации температуры матрицы фотодиодов, охлаждаемой микрокриогенной системой, используется датчик температуры на основе крем-

ниевго диода, установленный рядом с матрицей в холодной зоне криостата. Датчик температуры включается в цепь обратной связи блока управления МКС. Для защиты матрицы фотодиодов и цепей усилителей от наводок, создаваемых микрокриогенной системой охлаждения, в блоке предварительных усилителей предусмотрены стабилизатор тока термодатчика и развязывающий операционный усилитель.

Одноэлементное гетеродинное фотоприемное устройство

Предназначено для работы в составе лазерного измерителя параметров ветра. Поскольку требования, предъявляемые к одноэлементному и матричному ГФПУ, по основным фотоэлектрическим параметрам близки, то при создании охлаждаемого одноэлементного фотоприемного узла ГФПУ были использованы технологические, технические и схемотехнические решения, аналогичные разработанным для матричного ГФПУ и описанные выше.

Фотоприемный узел расположен на холодном пальце интегральной микрокриогенной системы охлаждения, выполнявшим роль держателя вакуумного криостатируемого корпуса. Вакуумный колпак корпуса имеет входное окно из просветленного германия.

Фотография одноэлементного ГФПУ, интегрированного с микрокриогенной системой охлаждения типа К508, приведена на рис. 2.

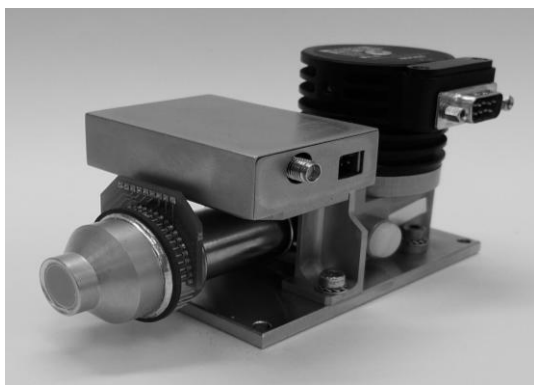


Рис. 2. Одноэлементный ГФПУ с микрокриогенной системой охлаждения

Исследования параметров ГФПУ в режиме оптического гетеродинирования проводились модуляционным методом, описанным в работе [2]. На рис. 3 представлена типичная частотная характеристика фотосигнала одного из каналов матричного ГФПУ, измеренная в полосе частот 1—100 МГц. Мощность гетеродина составляла 0,5 мВт. Верхняя граничная частота фотосигнала, определяемая

по уровню 3 дБ, превышает 30 МГц. Пороговая чувствительность ГФПУ в этом диапазоне частот не более $2 \cdot 10^{-19}$ Вт/Гц.

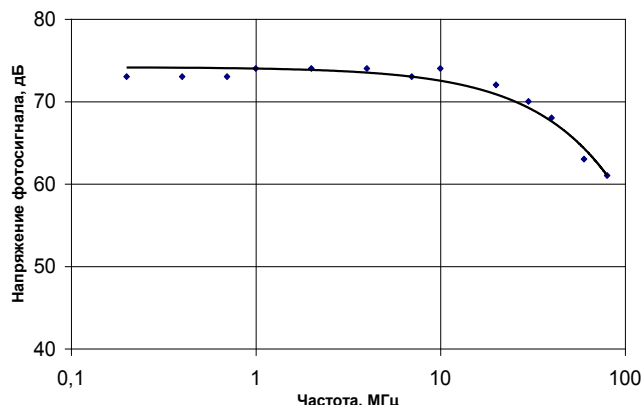


Рис. 3. Частотные характеристики фотосигнала матричного ГФПУ

Для разработчиков систем большой интерес представляет изменение пороговой чувствительности в зависимости от мощности гетеродина, падающей на чувствительный элемент ГФПУ. На рис. 4 приведена подобная зависимость для одного из элементов ГФПУ. На рис. 5 изображена зависимость напряжения фотосигнала от мощности гетеродина (энергетическая характеристика), измерения проводили на частоте 10 МГц.

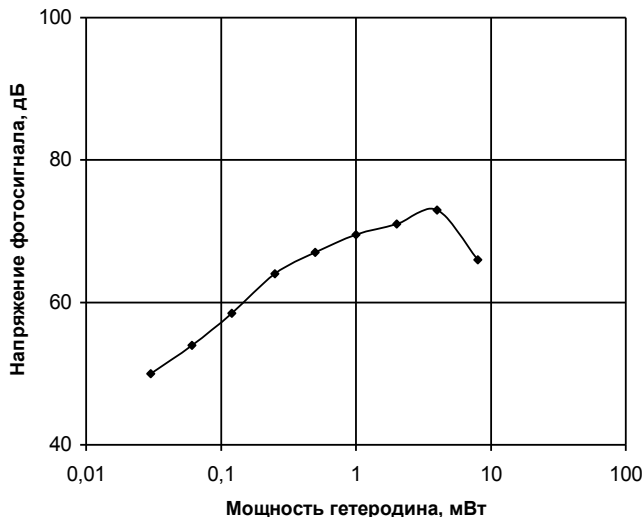


Рис. 4. Зависимость пороговой чувствительности от мощности гетеродина матричного ГФПУ ($f = 10$ МГц)

Зависимость пороговой чувствительности от мощности гетеродина (см. рис. 4) имеет минимум при $P_{het} = 0,5$ мВт. Напряжение фотосигнала (см. рис. 5) практически линейно увеличивается до этого же значения мощности гетеродина. При дальнейшем увеличении оптической мощности начинается отклонение энергетической характеристики от линейного закона, однако до значения

$P_{het} \approx 5$ мВт величина отклонения не превышает 20 %. Пороговая чувствительность (см. рис. 4) в этом интервале оптической мощности начинает увеличиваться в соответствии с уменьшением фотосигнала, и при $P_{het} \approx 5$ мВт составляет $3 \cdot 10^{-19}$ Вт/Гц.

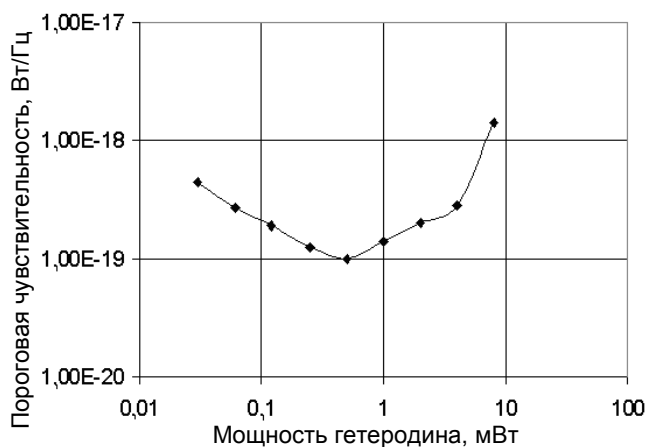


Рис. 5. Энергетическая характеристика матричного ГФПУ ($f = 10$ МГц)

По мере увеличения мощности гетеродина до $\sim 0,5$ мВт пороговая чувствительность уменьшается за счет увеличения как сигнала, так и дробового шума, наведенного гетеродином. Режим работы ГФПУ приближается к режиму ограничения шумов ГФПУ квантовым шумом. Дальнейшее увели-

чение мощности гетеродина приводит к уменьшению фотосигнала за счет явления насыщения фотодиода, когда при большом уровне засветки концентрация фотоиндуцированных носителей заряда в освещаемой n -области становится сравнимой с концентрацией равновесных носителей в p - n -переходе. Наступает насыщение фототока, и квантовая эффективность начинает уменьшаться.

Для одноэлементного ГФПУ достигнута пороговая мощность $8 \cdot 10^{-20}$ Вт/Гц в диапазоне частот 2—60 МГц. Зависимости пороговой чувствительности и напряжения фотосигнала качественно носят аналогичный характер.

Основные параметры разработанных гетеродинных фотоприемных устройств на основе КРТ-фотодиодов, состыкованных с микрокриогенными системами охлаждения, приведены в таблице.

Заключение

Разработаны, изготовлены и исследованы одноэлементные и матричные ГФПУ с применением микрокриогенных систем охлаждения как сплит-типа, так и интегрального. Достигнуты высокие значения пороговой чувствительности, не уступающие характеристикам ГФПУ с охлаждением заливкой жидким азотом.

Параметры	МГФПУ	ГФПУ
Число элементов	5×5	1
Размер ФЧЭ, мкм	200	200
Зазор между соседними ФЧЭ, мкм	20	–
Коэффициент взаимосвязи между соседними ФЧЭ, %, не более	5	–
Вольтовая чувствительность в максимуме спектральной характеристики, В/Вт	$1,4 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^3$
Пороговая чувствительность на длине волны 10,6 мкм в рабочей полосе частот, Вт/Гц	$2 \cdot 10^{-19}$	$8 \cdot 10^{-20}$
Оптимальная мощность гетеродина, мВт	0,5	0,5
Динамический диапазон, дБ, не менее	60	70
Верхняя граничная частота, МГц	30	60
Нижняя граничная частота, кГц	1,5	2000
Неравномерность частотной характеристики в пределах рабочей полосы частот, дБ, не более	3	3
Тип МКС	Сплит-система МСМГ-3А-0,6/80	Интегральная система К508

Л и т е р а т у р а

1. Filachev A. M., Ponomarenko V. P., Taubkin I. I., Lojnikov V. E. and etc.//Proceedings of SPIE 2003. V. 5126. P. 206—214.
2. Lojnikov V. E., Boltar K. O., Burlakov I. D., Golovin S. V., Mansvetov N. G.//Ibid. 2000. V. 4340. P. 81—84.

3. Clinton B. Carlisle, Jan E. van der Laan, Lewis W. Carr, Philippe Adam, Jean-Pierre Chiaroni//Appl. Opt. 1995. V. 34. № 27. P. 6187—6199.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

Heterodyne photodetector devices with microcryogenic systems of cooling

*K. O. Boltar, I. D. Burlakov, S. V. Golovin, V. E. Lozhnikov, N. G. Mansvetov,
T. M. Mansvetova, T. F. Terekhovich*
Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

The singl-element and array heterodyne photodetective assemblies are developed, made and investigated on the basis of CdHgTe photodiodes. These devices can widely be applied in the IR equipment to measurement of speed of objects, systems of orientation and management, laser location, range finding, optical communication facility.

* * *