

УДК 621.37/39-181.4

МИКРОКРИОГЕННАЯ СИСТЕМА С ГАЗОВОЙ КРИОГЕННОЙ МАШИНОЙ СТИРЛИНГА ИНТЕГРАЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Ю. С. Трошкин, А. Л. Чапкевич

Государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение «Орион»»,
Москва, Россия

Е. К. Горбунов, О. П. Посевин, А. В. Самвелов

Международный центр фотомикроэлектроники и ночного видения «Орэкс», Москва, Россия

Приведены описание микрокриогенной системы (МКС) с газовой криогенной машиной (ГКМ) Стирлинга интегрального типа и ее технические характеристики, а также особенности стыковки ГКМ с различными типами фотоприемников (ФП) с анализом получаемых теплотехнических характеристик. Показаны габаритные размеры МКС, ГКМ и электронного блока управления (БУ). Представлены результаты испытаний ФП, интегрированного на гильзе ГКМ, при охлаждении его фоточувствительных элементов (ФЧЭ) МКС с ГКМ Стирлинга интегрального типа.

Современный уровень развития тепловизионной аппаратуры ИК-диапазона предполагает использование миниатюрных глубокоохлаждаемых ФП с линейчатым и матричным расположением чувствительных элементов в комплекте с высокоэффективными криостатирующими системами.

Именно многоэлементный ИК-детектор с криогенным охладителем играет критическую роль в ИК-системах переднего обзора (forward looking infrared—FLIR) и в малогабаритных переносных тепловизионных камерах. Так для некоторых систем переднего обзора с фокальными матрицами, используемыми в головках наведения ракет, необходимо обеспечить малое время выхода на рабочий режим, которое не должно превышать нескольких секунд, а для переносных тепловизионных камер, работающих от аккумуляторов, мощность потребления не должна превышать 10 Вт. Габаритные размеры и масса таких камер будут в основном зависеть от конструкций фотоприемника и сопрягаемой с ним микрокриогенной системы.

При этом многократно возрастают требования к традиционным для микрокриогенной техники ограничениям по массогабаритным, энергетическим, вибрационным, акустическим и ресурсным характеристикам, а также предъявляются повышенные требования к удобству монтажа в составе тепловизионной аппаратуры и уровню воздействия электромагнитных наводок от работающей МКС на криостатируемый объект.

Наиболее полно всем эти повышенным требованиям удовлетворяют микрокриогенные системы на базе газовых криогенных машин Стирлинга интегрального типа, сопрягаемых с криостатируемым фотоприемником в единую конструкцию. В такой конструкции гильза охладителя (холодный палец ГКМ) одновременно является держателем ФП. Образуется конструкция ФП, интегрированная на гильзе ГКМ. В зарубежной литературе такой тип конструкции охлаждающей системы, совмещенной со сборкой сосуда Дьюара ФП, получил название ICDA — integrated coller dewar assemblies и по имеющимся сведениям широко используется во многих типах тепловизионной аппаратуры наземного, воздушного и космического применения.

Традиционная схема стыковки ФП с ГКМ подразумевает независимые изготовление и испытания в отдельных самостоятельных конструкциях как ФП, так и ГКМ и последующую сборку этих изделий путем размещения гильзы ГКМ в колодце держателя ФП до касания их торцевых поверхностей. Для компенсации температурных деформаций стыковочных элементов и сохранения надежного теплового контакта при изменении в процессе захолаживания размеров гильзы ГКМ и держателя ФП между их торцами устанавливается демпфирующее теплосоединяющее устройство (УДТ).

Для исключения подсоса влажного наружного воздуха в полость стыковки ФП и ГКМ и его вымерзания на холодильных поверхностях она уплотняется в тепловой зоне. При этом отделение ФП от ГКМ происходит без потери вакуума в сосуде Дьюара или гелия в охладителе ГКМ.

Стыковка ФП и ГКМ по традиционной схеме представлена на рис. 1, конструкция гильзы ГКМ с интегрированной на ней конструкцией ФП на рис. 2.

Тонкостенный палец ГКМ интегрального типа из низкотеплопроводного материала является в то же время держателем ФП. На торце пальца методом приклейки или пайки устанавливается блок ФЧЭ нужной конфигурации линейчатого или матричного типа. Фланец гильзы приспособлен для приварки к нему методом электронно-лучевой или лазерной сварки корпусных деталей конструкции ФП с узлами гермовыводов и входным окном — прозрачным в нужном диапазоне пропускания длин волн ИК-излучения. Токовыводная система от ФЧЭ на дорожки металлокерамического герморазъема представляет собой гибкий полиимидный кабель с токопроводящими дорожками, выполненными методом фотолитографии [1, 2].

Схема интеграции ФП непосредственно на гильзе ГКМ позволяет резко повысить теплотехнические параметры фотоэлектронного глубоко охлаждаемого

прибора и тем самым значительно уменьшить массогабаритные характеристики и энергопотребление криостатирующей его МКС.

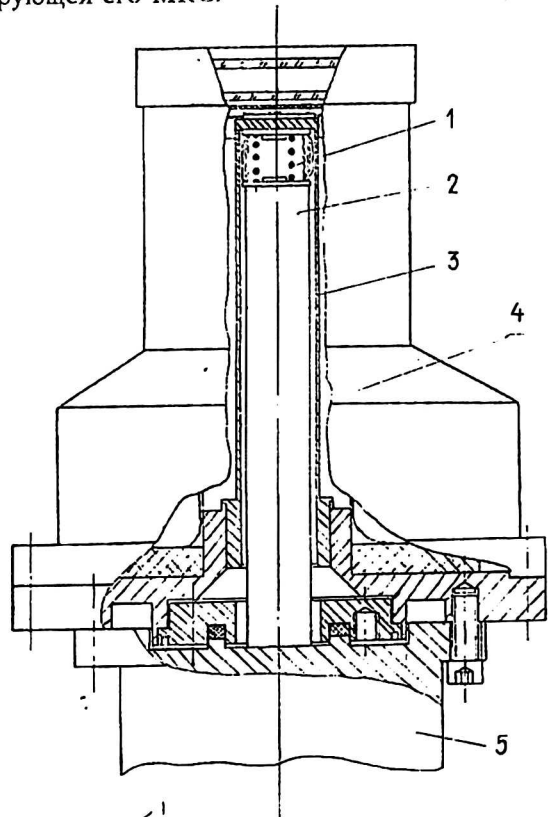


Рис. 1. Стыковка ФП с ГKM по традиционной схеме при индивидуальных конструкциях ФП и ГKM:
1 — УДТ; 2 — гильза ГKM;
3 — колодец держателя;
4 — ФП; 5 — ГKM

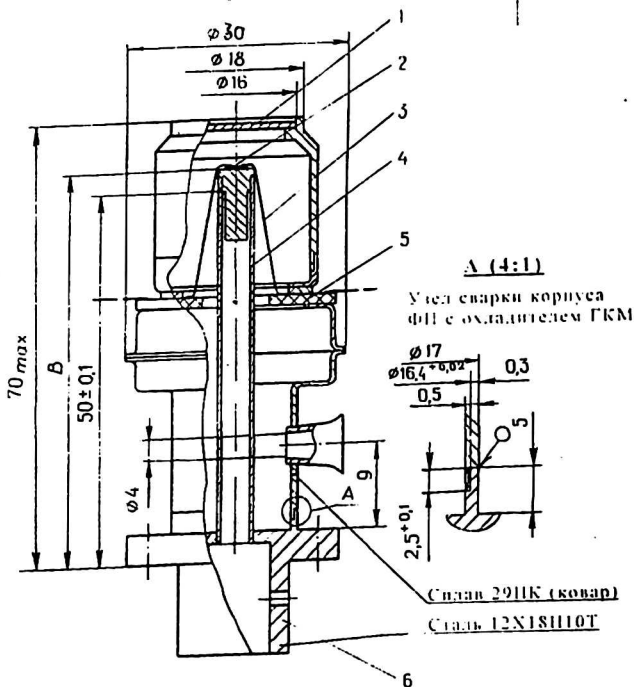


Рис. 2. Конструкция гильзы ГKM, интегрированной с конструкцией ФП:
1 — входное окно; 2 — ФЧЭ; 3 — кабель; 4 — гильза охладителя ГKM-держателем ФП;
5 — герморазъем; 6 — фланец охладителя ГKM

При таком способе интеграции ФП и ГKM значительно снижается величина суммарной охлаждаемой массы за счет исключения из конструкции УДТ и держателя ФП, вследствие чего уменьшается время выхода на рабочий режим аппаратуры в целом. Кроме того, теплоперепад между торцем гильзы охладителя ГKM и фоточувствительным элементом ФП будет меньше, чем при традиционной схеме стыковки. При том, что для реализации фотоэлектрических параметров необходимо обеспечивать температуру криостатирования ФЧЭ, обычно на уровне 77 К, то охладитель ГKM должен иметь температуру ниже, чтобы компенсировать температурный перепад между торцом охладителя ГKM и ФЧЭ ФП. При уменьшении же температуры охлаждения снижается холодопроизводительность ГKM в пропорции 20—30 мВт на 1 К и возрастает мощность, потребляемая МКС.

В ГУП «НПО «Орион»» совместно с Международным центром фотомикроэлектроники и ночного видения «Орэк» разработана МКС с ГKM Стирлинга для интеграции с конструкцией ФП со следующими характеристиками:

| | |
|--|---|
| рабочая холодопроизводительность, Вт..... | 0,15 |
| максимальная холодопроизводительность, Вт..... | 0,25 |
| температура криостатирования, К..... | 80 |
| время выхода на режим криостатирования, мин..... | 5 (при охлаждаемой массе 1 г в медном эквиваленте и комнатной температуре окружающей среды) |
| потребляемая мощность при максимальной | |
| холодопроизводительности, Вт..... | 15 |
| напряжение питания, В..... | 24 |
| масса МКС, кг..... | 0,65 |
| в том числе ГKM, кг..... | 0,60 |
| ориентировочный ресурс, ч..... | 1500 |

Микрогенная система состоит из газовой криогенной машины и блока управления с кабелем для подключения блока к электроразъему электродвигателя ГKM. Габаритные размеры МКС представлены на рис. 3.

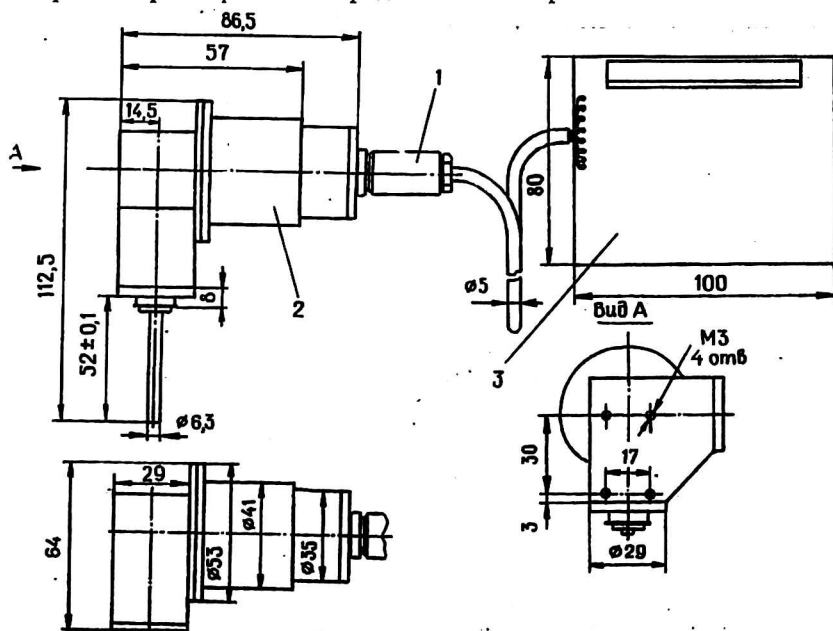


Рис. 3. Микрокриогенная система с газовой криогенной машиной интегрального типа:

- 1 — розетка РС 10ТВ с кожухом; 2 — машина газовая криогенная интегральная;
- 3 — блок управления электронный

Конструкция ГКМ имеет регулируемый по числу оборотов бесконтактный бесщеточный привод постоянного тока. Ротор вращательного электропривода включает ряд постоянных магнитов. На статоре электропривода установлены полупроводниковые датчики положения ротора, принцип работы которых основан на эффекте Холла.

Электронный блок управления обеспечивает работу МКС на заданном температурном уровне криостатирования, поддерживая необходимую частоту вращения привода, обеспечивающего в свою очередь холодопроизводительность ГКМ, в точности соответствующую суммарной тепловой нагрузке от фотоприемника.

Тепловой расчет конструкции интегрированного ФП показывает, что суммарная тепловая нагрузка на МКС от ФП составит не более $Q = 0,15$ Вт, а охлаждаемая масса, приведенная к температуре криостатирования, в эквиваленте меди не превысит величину 1 г.

Электронный блок выполнен в бескорпусной сборке. Все элементы блока собраны на общей плате размером 80x100 мм. Плата имеет четыре отверстия $\varnothing 3,5$ мм для установки блока в аппаратуре тепловизионной системы. На плате установлены штырьки для присоединения проводов питания и выводов цепей термодатчика, устанавливаемого на растре ФП в зоне криостатирования ФЧЭ. Блок управления ГКМ спроектирован так, что в цепи обратной связи в качестве термодатчика должен использоваться кремниевый диод, на котором при токе в $I = 100$ мкА на температурном уровне 77 К реализуется напряжение в пределах 1,02—1,04 В при температурном коэффициенте наклона кривой около 2 мВ/град.

Соединительный 10-жильный кабель нужной длины имеет разъем для подключения электронного блока управления к разъему, установленному на корпусе компрессора ГКМ.

В рамках проведения разработки изготовлено несколько макетных образцов МКС, на которых проведены испытания по определению основных параметров.

Значения основных параметров определялись по известным в криогенной технике методикам, на специально разработанном и собранном вакуумном стенде. В ходе испытаний образцов МКС подтверждено соответствие реальных значений основных параметров значениям, заложенным при проектировании.

Для интеграции с ГКМ была разработана конструкция унифицированного корпуса ФП, в которой можно устанавливать различные типы фоточувствительных элементов с общим числом выводов электрических каналов до 36.

В унифицированной конструкции корпуса были собраны макеты матричных ФП с форматом 128x128 с фоточувствительным элементом из антимонида индия и линейчатые ФП с числом элементов до 32 с фоточувствительными элементами из КРТ [3, 4].

Проведены испытания образцов обоих типов ФП при криостатировании их ФЧЭ ГКМ. При испытаниях получены высокие теплотехнические и фотоэлектрические параметры. Так, время выхода на режим криостатирования $T_e = 80$ К для МФП не превышало 6 мин, для ФП — 4 мин. Потребляемая мощность на рабочем режиме составляла менее 10 Вт. Значения фотоэлектрических параметров 24-элементного ФП интегрированного на гильзе ГКМ Стирлинга представлены в протоколе испытаний (таблица). Полученные результаты испытаний образцов ФП предполагают возможность их использования в перспективных разработках ИК-аппаратуры различного назначения.

| № элемента | D^* ($\lambda_{\text{макс}}, 20 \text{ кГЦ, l}$), $\text{Вт}^{-1} \text{ГЦ}^{0,5} \text{см}$ | $Sv\lambda_{\text{макс}}, \text{В/Вт}$ | D^* ($\lambda_{\text{макс}}, 20 \text{ кГЦ, l}$), $\text{Вт}^{-1} \text{ГЦ}^{0,5} \text{см}$ |
|------------------|---|---|---|
| | | $T_{\text{охл}} = 77 \text{ К (ж. N}_2\text{)}$ | $T_{\text{охл}} = 65 \text{ К (ГКМ)}$ |
| 1 | 5,8 E + 10 | 56100 | 7,1 E + 10 |
| 2 | 5,0 E + 10 | 59600 | 6,4 E + 10 |
| 3 | 7,1 E + 10 | 55500 | 8,8 E + 10 |
| 4 | 5,7 E + 10 | 58000 | 6,9 E + 10 |
| 5 | 6,4 E + 10 | 62500 | 8,0 E + 10 |
| 6 | 5,6 E + 10 | 61800 | 6,9 E + 10 |
| 7 | 5,6 E + 10 | 56700 | 6,8 E + 10 |
| 8 | 5,9 E + 10 | 54200 | 6,8 E + 10 |
| 9 | 4,8 E + 10 | 55500 | 5,8 E + 10 |
| 10 | 5,6 E + 10 | 51600 | 6,5 E + 10 |
| 11 | 5,4 E + 10 | 51600 | 6,2 E + 10 |
| 12 | 5,7 E + 10 | 52900 | 6,6 E + 10 |
| 13 | 6,9 E + 10 | 51000 | 8,7 E + 10 |
| 14 | 7,7 E + 10 | 54800 | 1,0 E + 10 |
| 15 | 7,0 E + 10 | 54800 | 8,7 E + 10 |
| 16 | 6,8 E + 10 | 52900 | 8,4 E + 10 |
| 17 | 7,1 E + 10 | 52900 | 9,1 E + 10 |
| 18 | 9,7 E + 10 | 56100 | 1,1 E + 10 |
| 19 | 6,0 E + 10 | 53600 | 7,1 E + 10 |
| 20 | 7,0 E + 10 | 54800 | 8,7 E + 10 |
| 21 | 5,2 E + 10 | 52900 | 6,9 E + 10 |
| 22 | 6,6 E + 10 | 52300 | 9,5 E + 10 |
| 23 | 6,2 E + 10 | 52900 | 9,5 E + 10 |
| 24 | 6,0 E + 10 | 54800 | 8,7 E + 10 |
| Средние значения | 6,3 E + 10 | 5,5 E + 10 | 7,9 E + 10 |

Литература

1. Грезин А. К., Зиновьев В. С. Микрокриогенная техника. — М.: Машиностроение, 1977. — 232 с.
2. Суслов А. К. и др. Криогенные газовые машины. — М.: Машиностроение, 1982. — 213 с.
3. Автономные криорефрижераторы малой мощности./Под. ред. В. М. Бродянского. — М.: Энергоиздат, 1984. — 208 с.
4. Берри Р. Л., Уалли У. Дж. Создание миниатюрных охладителей фирмой "Хьюз Эйкрафт": Рекламный материал, США.

MICROCRYOGENIC SYSTEM WITH INTEGRATED STIRLING GAS CRYOGENIC MACHINE FOR COOLING OF PHOTSENSITIVE ELEMENTS

Yu. S. Troshkin, A. L. Chapkevitch

The State Unitary Enterprise «RD&P Centre "Orion"», Moscow, Russia

E. K. Gorbunov, O. P. Posevin, A. V. Samvelov

International Centre of Photomicroelectronics and Night-Vision "Orex", Moscow, Russia

Main technical characteristics of microcryogenic system (MCS) with an integrated Stirling gas cryogenic machine (GCM) are described as well as peculiarities of joining GCM with photodetectors (PD) of different types. The analysis of achieved is given thermotechnical characteristics is given. Overall dimensions of MCS, GCM and an electronic control unit (CU) are shown. Results of testing integrated on GCM sleeve photodetector at cooling photosensitive elements (PSE) by MCS with an integrated Stirling GCM are given.