

**Исследование микрокриогенной системы Стирлинга
в расширенном диапазоне температур криостатирования***А. В. Самвелов, Д. В. Минаев, П. А. Кошелев, И. В. Баранов,
А. Ю. Баранов, О. В. Пахомов*

Проведены исследования работы микрокриогенной системы (МКС) Стирлинга с различными добавочными тепловыми нагрузками для возможности расширения диапазона области применения МКС данного типа, например, для организации теплоотвода от термоэлектрического охладителя (ТЭО) и иных применений. Результаты исследований показали, что максимальной холодопроизводительности при стабилизации температуры охлаждения на уровне 200 К для интегральной МКС Стирлинга данного типа можно добиться давлением криоагента не менее 4,5 МПа. При этом система развивает холодопроизводительность около 3 Вт, что даёт возможность организовать теплоотвод от «тёплой» зоны термоэлектрического охладителя с потребляемой мощностью 7–10 Вт.

Ключевые слова: микрокриогенная система, матричное фотоприёмное устройство, криоагент, холодопроизводительность.

Введение

Разрабатываемые в АО «НПО «Орион» микрокриогенные системы Стирлинга интегрального исполнения с расчётной полезной холодопроизводительностью 500 мВт для поддержания рабочей температуры криостатирования 80 К предназначены, главным образом, для криостатирования матричных фотоприёмных устройств (МФПУ) второго поколения. Однако существуют задачи, требующие фиксации повышенных температур криостатирования, применительно для т. н. *hot detectors*. Такими устройствами охлаждения могут быть многокаскадные термоэлектрические охладители (ТЭО), предназначенные для работы с твердотельными тепловизионными фотоэлектрическими преобразователями (ТТФЭП) на основе PbS или KPT или с приборами с зарядовой связью (ПЗС), обес-

печивающие их криостатирование. Многие ТЭО, работающие на уровне 150–180 К, требуют, в свою очередь, теплоотвод на уровне 7–10 Вт со стороны «тёплой» зоны при поддержании температуры 300–350 К [1–7].

Целью данной работы являлось исследование энергетических возможностей образца МКС при поддержании температуры стабилизации на уровне 200 К при холодопроизводительности не менее 3-х Вт.

Постановка задачи

К основным полупроводниковым материалам, на основе которых строятся приёмники ИК-изображения, относятся твёрдые растворы теллуридов кадмия-ртути (КРТ) и сульфида свинца (PbS).

Структура КРТ при определённом составе кадмия и ртути обладает высокой чувствительностью в диапазоне длин волн от 3 до 5 мкм при охлаждении до 170 К. Также для изготовления матричных ТТФЭП, работающих в диапазоне 3–5 мкм, применяется PbS. Принцип построения схемотехники ТТФЭП на основе PbS подобен технологии на КРТ, однако квантовая эффективность ТТФЭП на PbS вблизи 3 мкм может достигать 25–30 %, что в значительной степени повышает обнаружительную способность. Но главным достоинством ТТФЭП на основе КРТ и PbS является возможность работы при $T = 170$ К. Это легко обеспечивается пассивными радиационными системами либо термоэлектрическими охладителями (ТЭО) [8–10].

Самвелов Андрей Витальевич¹, начальник отдела.

Минаев Денис Викторович¹, инженер.

Кошелев Павел Александрович¹, инженер.

Баранов Игорь Владимирович², декан, д.т.н.

Баранов Александр Юрьевич², зав. кафедрой, д.т.н.

Пахомов Олег Всеволодович², доцент. к.т.н.

¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: samv-andrej@yandex.ru

² Университет ИТМО.

Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский просп., 49.

Статья поступила в редакцию 28 июня 2017 г.

Разработанную ранее интегральную микрокриогенную систему Стирлинга с холодопроизводительностью 500 мВт на уровне 80 К в нашей работе требовалось исследовать в нерасчётном режиме при повышенной холодопроизводительности в интересах обеспечения стабилизированной температуры охлаждения около 200 К для использования её в качестве теплоотвода от ТЭО.

Проведение эксперимента

В качестве объекта охлаждения была использована аттестованная тепловая модель (ТМ) МФПУ с собственными теплопритоками 200 мВт. На первом этапе эксперимента определялись энергетические возможности образца МКС при поддержании температуры охлаждения тепловой модели на уровне 200 К.

На нагревательный элемент ТМ пошагово подавалась дополнительная электрическая мощность, составлявшая в сумме с собственными теплопритоками к ТМ соответственно значения $q_{\text{тн}} = 0,5$ Вт; 1 Вт; 1,5 Вт; 2 Вт и более. При суммарной тепловой нагрузке на ТМ, равной 2 Вт, температура криостатирования охлаждаемой зоны ТМ стабилизировалась на уровне требуемой величины 200 К. График зависимости $T = (f)q_{\text{тн}}$ представлен на рис. 1.

Поскольку для нашей задачи уровень холодопроизводительности оказался недостаточным, то далее была выполнена серия экспериментов при различных давлениях заправки МКС криоагентом для получения требуемой холодопроизводительности образца на уровне охлаждения 200 К с построением соответствующих зависимостей, что отражено на рис. 2.

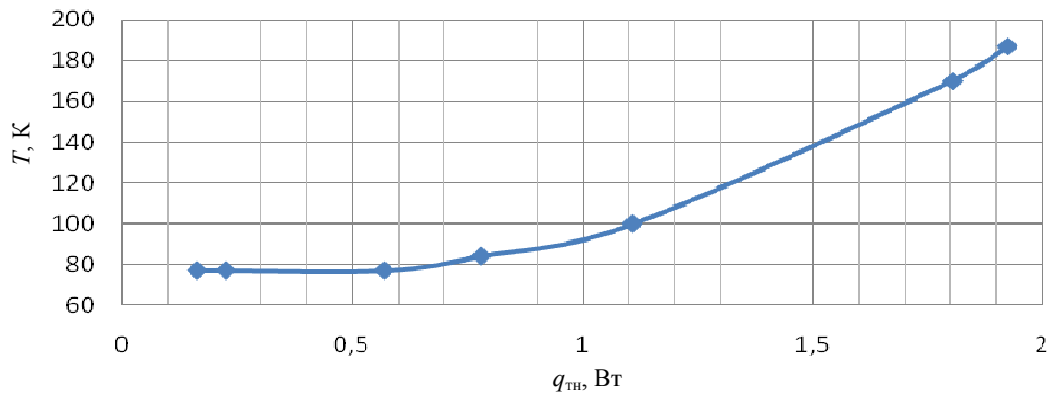


Рис. 1. Зависимость температуры криостатирования МКС от суммарной тепловой $q_{\text{тн}}$ нагрузки на ТМ.

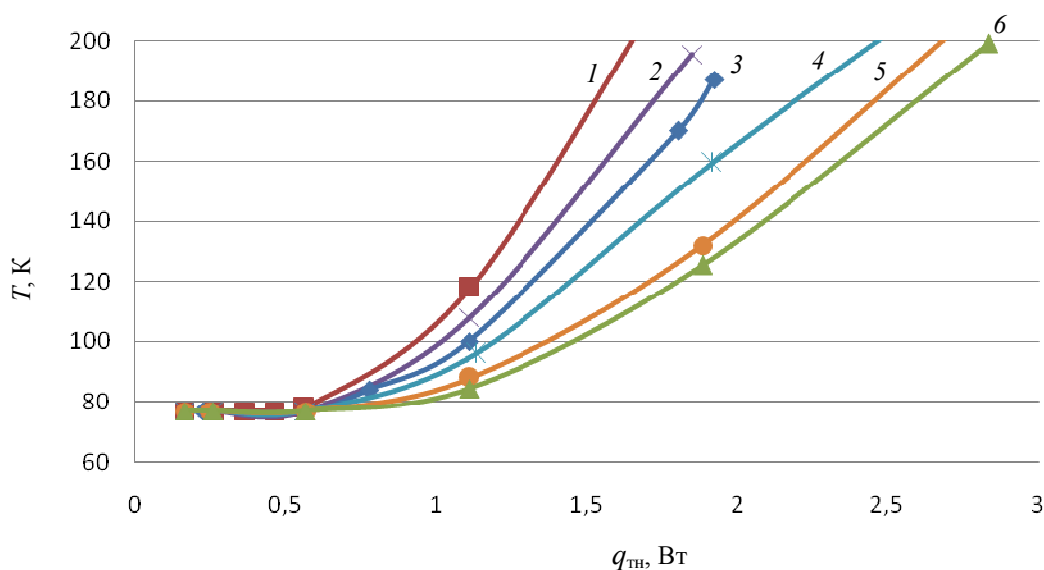


Рис. 2. Зависимости температуры криостатирования T от суммарных тепловых нагрузок $q_{\text{тн}}$ при различных величинах давлений P заправки образца. Кривая 1 – $P = 2$ МПа, 2 – 2,5 МПа, 3 – 3 МПа, 4 – 3,5 МПа, 5 – 4 МПа, 6 – 4,5 МПа

Далее строилась обобщённая зависимость тепловой нагрузки на тепловую модель от различных величин давления криоагента образца МКС для обеспечения температуры криостатирования на уровне 200 К, что показано на рис. 3.

На графике рис. 4 построена зависимость рассчитанных значений термодинамического КПД образца η (при различных суммарных теплопритоках в «холодную» зону) от величины давления заправки образца. По полученной зависимости мож-

но видеть, что термодинамическая эффективность исследуемой микрокриогенной системы на уровне температур охлаждения вблизи 200 К имеет максимум при давлении заправки 3,5 МПа и слабо меняется при дальнейшем повышении давления. Данная область давлений заправки является термодинамически оптимальной, так как основные потери холодопроизводительности при таких давлениях растут слабо, а эффективность регенерации растёт значительно быстрее.

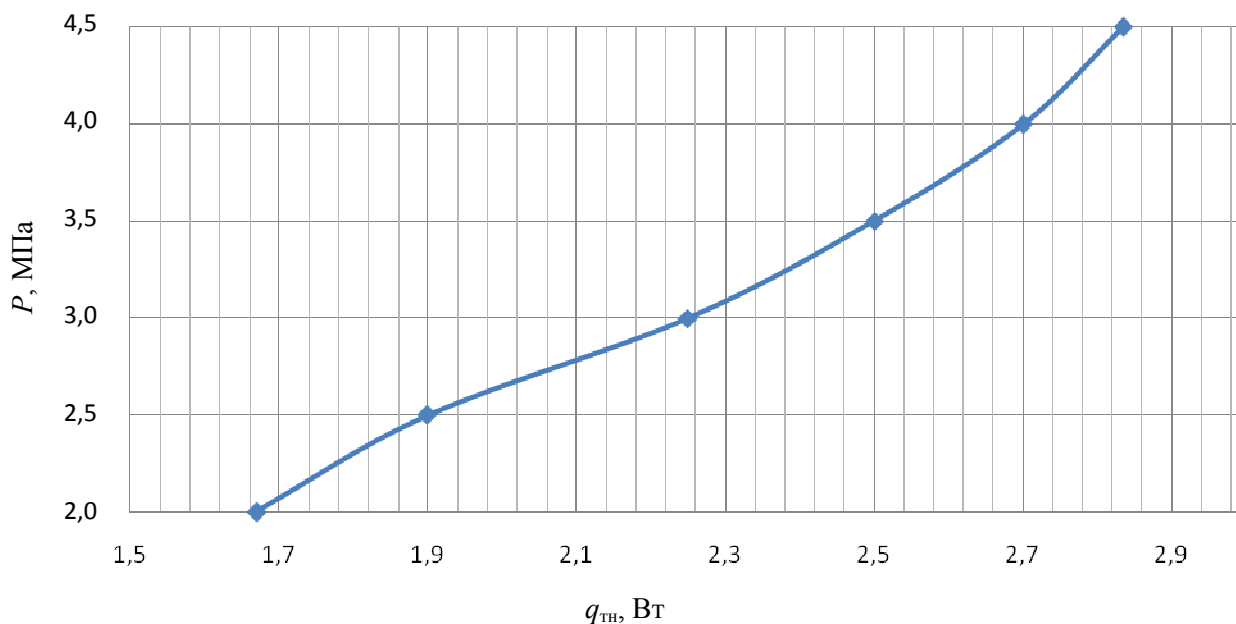


Рис. 2. График зависимости тепловой нагрузки на ТМ от давления криоагента P при поддержании температуры криостатирования 200 К.

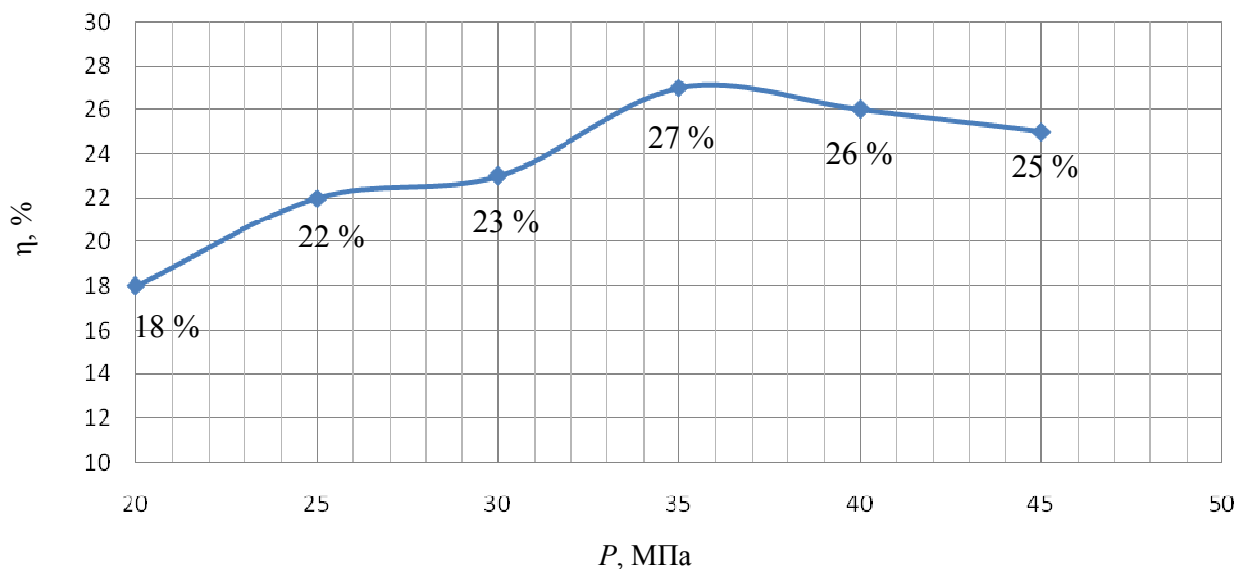


Рис. 3. График зависимости термодинамического КПД образца МКС η от давления криоагента P при поддержании температуры криостатирования на уровне 200 К.

Обсуждение результатов

Результаты исследований показали, что максимальной холодопроизводительности при стабилизации температуры охлаждения на уровне 200 К для интегральной микрокриогенной системы Стирлинга данного типа можно добиться при обеспечении давления криоагента не менее 4,5 МПа [3]. При этом обеспечивается холодопроизводительность МКС около 3 Вт. Полезной мощностью такой величины на уровне фиксации температуры 200 К возможно организовать теплоотвод от «теплой» зоны термоэлектрического охладителя с потребляемой мощностью 7–10 Вт, используемого для криостатирования фотоприёмников ТТФЭП- и ПЗС-типов. Заправка подобных микрокриогенных систем большими величинами давлений будет уже негативно сказываться на характеристиках из-за роста при высоких давлениях суммарных внутренних термодинамических потерь цикла. Это приведёт к падению полезной холодопроизводительности и, как следствие, к росту температуры криостатирования [2]. Максимальная термодинамическая эффективность таких МКС находится вблизи давлений заправки 33–38 МПа.

Заключение

Представленные результаты исследований работы микрокриогенной системы Стирлинга в нерасчётных режимах с различными добавочными тепловыми нагрузками демонстрируют возможность расширения диапазона области применения МКС данного типа, и, в частности, позволяют использовать их для поддержания «тёплого» участка

ТЭО на уровне температур 300–350 К с мощностью теплоотвода около 3-х Вт при криостатировании фотоприёмных устройств ТТФЭП, ПЗС и других типов.

Исследования проводились при частичной поддержке проекта по госзаданию, шифр 11.49422017/6.7.

ЛИТЕРАТУРА

1. Араkelов Г. А., Самвелов А. В. // Прикладная физика. 2002. № 6. С. 78.
2. Еремчук А. И., Самвелов А. В., Сысов Д. А., Широков Д. А., Оганесян Н. Н. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 2. С. 224.
3. Колесников А. М., Самвелов А. В., Словеснов К. В. // Прикладная физика. 2010. № 2. С. 80.
4. Трошкин Ю. С., Чапкевич А. Л., Горбунов Е. К., Посевин О. П., Самвелов А. В. // Прикладная физика. 1999. № 3. С. 60.
5. Формозов Б. Н. Аэрокосмические фотоприёмные устройства в видимом и инфракрасном диапазонах. – Санкт-Петербург: СПбГУАП, 2002..
6. Сулов А. Д. Криогенные газовые машины. – М.: Машиностроение. 1982.
7. Пономаренко В. П., Филачев А. М. Инфракрасная техника и электронная оптика. Становление научных направлений (1946-2006). – М.: Физматкнига. 2006. .
8. Бородин Д. В., Осипов О. В., Скрялев А. С., Васильев В. В. // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 2009. № 222. С. 93.
9. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. – М.: Физматкнига. 2007.
10. Тарасов В. В., Якушенко Ю. Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: «Логос». 2004.

PACS: 85.60.Gz

Investigation of the microcryogenic Stirling system in the extended cryostat temperature range

*A. V. Samvelov¹, D. V. Minaev¹, P. A. Koshelev¹, I. V. Baranov²,
A. J. Baranov², and O. V. Pahomov²*

¹ Orion R&P Association
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: samv-andrej@yandex.ru

² National Research University ITMO
49 Kronverksky av., St.-Petersburg, 197101, Russia

Received June 28, 2017

Consideration is given to investigations of the operation of the micro-cryogenics Stirling system in non-calculating regimes under various additional thermal loads and pressures of the cryoagent. It was nec-

essary to obtain additional output characteristics for the purpose of expanding the field of application. The results of the researches have been presented.

Keywords: microcryogenic system, matrix photodetector, cryoagent, cooling down.

REFERENCES

1. G. A. Arakelov and A. V. Samvelov, *Prikl. Fiz.*, No. 6, 78 (2002).
2. A. I. Eremchuk, A. V. Samvelov, D. A. Sysoev, D. A. Shirokov, and N. N. Oganesyan, *Usp. Prikl. Fiz.* **1** (2), 224 (2013).
3. A. M. Kolesnikov, A. V. Samvelov, and K. V. Slovesnov, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 80 (2010).
4. Yu. S. Troshkin, A. L. Chapkevich, E. K. Gorbunov, O. P. Posevin, and A. V. Samvelov, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 60 (1999).
5. B. N. Formozov, *Aerospace Photodetector Devices* (St.-Petersburg, SPbGUAP, 2002) [in Russian].
6. A. D. Suslov, *Cryogenic Gas Machinery* (Moscow, Mashinostroenie, 1982) [in Russian].
7. V. P. Ponomarenko and A. M. Filachev, *Infrared Equipment and Electron Optics* (Fizmatkniga, Moscow, 2006) [in Russian].
8. D. V. Borodin, O. V. Osipov, A. S. Skrylev, and V. V. Vasil'ev, *Elektron. Tekhnika. Poluprov. Pribory*. No. 222, 93 (2009).
9. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid State Photoelectronics. Physical Bases* (Fizmatkniga, Moscow, 2007) [in Russian].
10. V. V. Tarasov and Yu. G. Yakushenkov, *Infrared Systems* (logos, Moscow, 2004) [in Russian].