

Микрокриогенная система Стирлинга со ступенью охлаждения на основе магнитокалорического эффекта

А. В. Самвелов, Е. Л. Чепурнов, Д. В. Минаев, О. В. Пахомов

Разработана микрокриогенная система (МКС) Стирлинга для криостатирования матричного фотоприёмного устройства (МФПУ) с классическим термодинамическим регенеративным циклом Стирлинга в первой ступени и дополнительным магнитокалорическим охлаждением во второй ступени. Микрокриогенная система предназначена для охлаждения «высокотемпературных» фотодетекторов на основе теллуридов кадмия-ртути, сверхрешёток 2-го типа, ХВп-структур, работающих в температурном диапазоне 110–150 К. Микрокриогенная система разработана для повышения эффективности процесса охлаждения при пониженных массе и габаритах.

Ключевые слова: микрокриогенная система, магнитокалорический эффект, фотоприёмное устройство.

Введение

Одним из существующих методов охлаждения тел является охлаждение на основе магнитокалорического эффекта. Магнитокалорическим эффектом (МКЭ) называют изменение температуры магнетика в результате обратимого выделения или поглощения тепла при воздействии магнитного поля на вещество в адиабатических условиях. В настоящее время получено большое количество соединений и твёрдых растворов, в которых наблюдается высокий магнитокалорический эффект. Это находит применение и в микрокриогенной технике [1–13].

Существует элемент, обладающий относительно высоким магнитокалорическим эффектом, а именно, нанокристаллический диспрозий (Dy) [13], который имеет широкий интервал между температурами Кюри и Нееля, перекрывающий диапазон рабочих температур большинства «высокотемпературных» детекторов. При адиабатном размагничивании диспрозия в интервале темпера-

тур Кюри и Нееля ($T_C = 85$ К, $T_N = 178$ К) наблюдается достаточно высокий магнитокалорический эффект. Эффект проявляется и при изотермических условиях, когда рабочий элемент из диспрозия намагничивается в электромагнитном поле, при этом он нагревается, тепло сбрасывается в окружающую среду, а затем (при отключении магнитного поля) материал размагничивается и его температура понижается (на разупорядочивание структуры образца диспрозия тратится внутренняя энергия вещества).

Разработанная нами микрокриогенная система (МКС) предназначена для криостатирования матричного фотоприёмного устройства с охлаждением в первой ступени за счёт термодинамического регенеративного цикла Стирлинга. Во второй, низкотемпературной ступени МКС, установлен дополнительный охладитель на основе магнитокалорического эффекта, который включает в себя магнитокалорический рабочий элемент из диспрозия, электрообмотку для подачи электрического тока с целью получения магнитного поля и электровыводы.

Данная МКС специально разработана для охлаждения наиболее перспективных на сегодняшний день фотоприёмных устройств: «высокотемпературных» фотодетекторов на основе теллуридов кадмия-ртути, сверхрешёток 2-го типа, ХВп-структур и др., работающих в температурном диапазоне 110–150 К. МКС обеспечивает повышение эффективности процесса охлаждения при пониженных значениях массы и габаритов всей системы.

Самвелов Андрей Витальевич¹, начальник отдела, к.т.н.

Чепурнов Евгений Леонидович¹, ген. директор.

Минаев Денис Викторович¹, инженер 2 кат.

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

¹АО 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 18 мая 2018 г.

Цель исследований

Целью данных исследований является расширение температурного диапазона криостатирования микрокриогенной системы Стирлинга и повышение термодинамического КПД при пониженных массе и габаритах в диапазоне температур криостатирования 110–150 К.

Описание системы

На рисунке представлен охладитель разрабатываемой МКС с магнитокалорической ступенью.

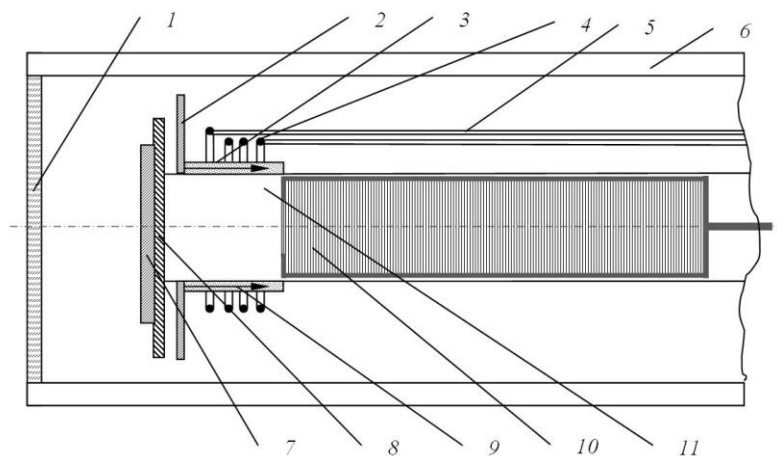


Рис. Охладитель МКС Стирлинга с магнитокалорической ступенью охлаждения. 1 – оптическое окно; 2 – защитный антимагнитный экран; 3 – магнитокалорический рабочий элемент из диспрозия (ступень дополнительного охлаждения); 4 – обмотка; 5 – электровыводы; 6 – вакуумный теплоизолирующий корпус; 7 – охлаждаемый объект; 8 – держатель охлаждаемого объекта; 9 – направление магнитного поля; 10 – детандер со встроенным регенеративным теплообменником (основная ступень охлаждения); 11 – полость расширения.

Работа ступени дополнительного охлаждения осуществляется следующим образом. Детандер со встроенным регенеративным теплообменником (поз. 10), реализуя цикл Стирлинга, выполняет расширение предварительно изотермически сжатого газа-криоагента в полости расширения (поз. 11), перемещаясь вправо, в результате чего рабочий газ охлаждается. Когда детандер со встроенным регенеративным теплообменником (поз. 10) находится в крайнем левом положении, на обмотку (поз. 4) магнитокалорической ступени охлаждения подаётся напряжение, индуцирующее внутри кольцевого сегнетоэлектрика магнитное поле с напряжённостью $H = 60$ кЭ. В процессе перемещения детандера со встроенным регенеративным теплообменником (поз. 10) вправо его диспрозиевая область выходит из действия магнитного поля, таким образом, магнитное поле сбрасывается с магнитокалорического рабочего элемента (поз. 3), и происходит адиабатическое размагничивание диспрозия. Таким образом, происходит адиабатическое размагничивание диспрозия, и, вследствие этого, реализуется дополнительное охлаждение криоагента в полости расширения (поз. 11).

Основная ступень охлаждения в представленной микрокриогенной системе работает по замкнутому обратному регенеративному циклу Стирлинга с внутренней регенерацией тепла при постоянном количестве рабочего вещества (криоагента), в качестве которого используется газообразный гелий. Ступень дополнительного охлаждения представляет собой магнитокалорический охладитель, включающий в себя кольцеобразный рабочий элемент из диспрозия (поз. 3) и обмотку (поз. 4).

Теоретическое описание процесса

Процесс адиабатического размагничивания при магнитокалорическом эффекте описывается выражением:

$$\Delta T_H = \int_{H_1}^{H_2} \left(\frac{\partial T}{\partial H} \right)_S \Delta H,$$

где H – напряжённость электромагнитного поля, Э; T – температура, К; S – энтропия, Дж/кг.

Обе ступени криостатирования работают согласовано во времени. При выходе микрокриогенной системы на режим криостатирования частота перемещений детандера со встроенным регенеративным теплообменником (поз. 10) снижается, что даёт возможность корректной реализации магнитокалорического эффекта, поскольку при повышенных частотах из-за наличия магнитного гистерезиса эффекта можно не получить. Вторая ступень позволит дополнительно понизить температуру криостатирования на 5–6 К.

Разработанная микрокриогенная система Стирлинга с магнитокалорической ступенью криостатирования позволит обеспечить дополни-

тельное понижение температуры криостатирования на 5–6 К, значительно понизить массогабаритные показатели (на 30–35 %) и энергопотребление микрокриогенной системы (на 20–35 %). МКС может найти применение для криостатирования «высокотемпературных» фотодетекторов, работающих в диапазоне температур криостатирования 110–150 К, причем при достаточно высокой эффективности системы.

Результаты исследований

Результатом исследований является разработка микрокриогенной системы, работающей по обратному циклу Стирлинга с повышенной эффективностью цикла за счёт дополнительного охлаждения во второй ступени и уменьшением массогабаритных характеристик по сравнению с традиционными системами.

В результате достигается снижение массы на 20–25 %, общих габаритных размеров до 30 % и повышение КПД на 25–30 % при работе в температурном диапазоне 110–150 К.

Заключение

Разработана двухступенчатая микрокриогенная система для криостатирования «высокотемпературного» класса фотодетекторов на основе газовой криогенной машины Стирлинга с магнитокалорическим эффектом охлаждения во второй ступени на основе диспрозия (Dy). В первой ступени реализуется изотермическое расширения рабочего тела (газообразного гелия) с подводом тепла от объекта охлаждения. Во второй ступени предварительно охлаждённый в первой ступени

гелий окончательно охлаждается при адиабатическом размагничивании диспрозия, заполняющего «холодную» область регенеративного теплообменника МКС. Это позволяет снизить температуру криостатирования на 5–6 К, повысить эффективность охлаждения, а также уменьшить массу и габариты системы в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Варламов Р. Г. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования. – М.: Сов. радио, 1980.
2. Фастовский В. Г., Петровский Ю. В., Ровинский А. Е. Криогенная техника. – М.: Энергия, 1974.
3. Архаров А. М. Низкотемпературные газовые машины. – М.: Машиностроение, 1969.
4. Новотельнов В. Н., Суслов А. Д., Полтораус В. Б. Криогенные машины. – С.-П.: Политехника, 1991.
5. Трошкин Ю. С., Чапкевич А. Л., Горбунов Е. К., Посевин О. П., Самвелов А. В. // Прикладная физика. 1999. № 3. С. 60.
6. Суслов А. Д. Криогенные газовые машины. – М.: Машиностроение, 1982.
7. Еремчук А. И., Самвелов А. В., Сысоев Д. А., Широков Д. А., Оганесян Н. Н. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 2. С. 224.
8. Нефедьев С. П., Дёма Р. Р., Молочкова О. С. Материаловедение. – Магнитогорск, 2014.
9. Карагусов В. И., Карагусова Н. В. Установки и системы микрокриогенной техники. Учебное пособие. – Омск: ОмГТУ. 2010.
10. Ханник Р., Хилл А. Наноструктурные материалы. – М.: Техносфера, 2009.
11. Рамбиди Н.Г., Берёзкин А.В. Физические и химические основы нанотехнологий. – М.: Физматлит. 2009.
12. Буй М. Т., Баранов И. В., Пахомов О. В. и др. // Вестник МАХ. 2016. № 4. С. 63.
13. Панкратов Н. Ю., Звонов А. И., Карпенков Д. Ю., Смаржевская А. И., Карпенков А. Ю., Никитин С. А. // Известия РАН. Серия физическая. 2013. Т. 77. № 10. С. 1472.

PACS: 85.60.Gz

Microcryogenic Stirling system with a cooling stage based on the magnetocaloric effect

A. V. Samvelov¹, E. L. Chepurnov¹, D. V. Minaev¹, and O. V. Pakhomov²

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

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

Received May 18, 2018

A microcryogenic system (STS) for cryostatting a matrix photodetector device (MFP) with a classical

thermodynamic regenerative Stirling cycle in the first stage and an additional Dy magnetocaloric cooling in the second stage has been developed. The microcryogenic system is designed to cool the "high-temperature" photodetectors based on cadmium mercury tellurides, type II superlattices, X_{Bn} structures operating in the temperature range of 110–150 K. The microcryogenic system is designed to improve the efficiency of the cooling process with reduced mass and dimensions.

Keywords: electrocaloric system, magnetocaloric effect, photodetector device.

REFERENCES

1. R. G. Varlamov, *Handbook of Constructor of Electronics* (Sov. Radio, Moscow, 1980) [in Russian].
2. V. G. Fastovskii, Yu. V. Petrovskii, and A. E. Rovinskii, *Cryogenic Technology* (Energia, Moscow, 1974) [in Russian].
3. A. M. Arkharov, *Low Temperature Gas Devices* (Mashinostr., Moscow, 1969) [in Russian].
4. V. N. Novotelnov, A. D. Suslov, and V. B. Poltoraus, *Cryogenic Machines* (Politekhnik, 1991) [in Russian].
5. Yu. S. Troshkin, A. L. Chapkevich, E. K. Gorbunov, O. P. Posevin, and A. V. Samvelov, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 60 (1999).
6. A. D. Suslov, *Cryogenic Gas Machines* (Mashinostr., Moscow, 1982) [in Russian].
7. A. I. Eremchuk, A. V. Samvelov, D. A. Sysoev, et al., *Usp. Prikl. Fiz.* **1** (2), 224 (2013).
8. S. P. Nefed'ev, R. R. Dema, and O. S. Molochkova, *Material Science* (Magnitogorsk, 2014) [in Russian].
9. B. I. Karagusov and N. V. Karagusova, *Devices and Systems of Microcryogenic Engineering* (Omsk, 2010) [in Russian].
10. R. Khannik and A. Hill, *Nanostructure Materials* (Moscow, Tekhnosfera, 2009) [in Russian].
11. N. G. Rambidi and A. V. Berezkin, *Physical and Chemical Foundations of Nanotechnologies* (Moscow, Fizmatlit, 2009) [in Russian].
12. M. T. Bui, I. V. Baranov, O. V. Pakhomov, et al., *Vestnik MAKh*, No. 4, 63 (2016).
13. N. Yu. Pankratov, A. I. Zvonov, D. Yu. Karpenkov, et al., *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **77**, 1472 (2013).