

УДК 537.9

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР НА КРИСТАЛЛЕ CeB_6 : ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК

С.Р. АРУТЮНЯН^{1,2}

¹Институт физических исследований НАН Армении, Аштарак, Армения

²Российско–Армянский университет, Ереван, Армения

e-mail: sergeyhar56@gmail.com

(Поступила в редакцию 30 мая 2018 г.)

Представлены экспериментальные результаты, демонстрирующие выработку электроэнергии с помощью термоэлектрического генератора на кристалле CeB_6 при температурах ниже 10 К. Исследованы зависимости выходной мощности, тока и эффективности генератора при различных мощностях внешнего нагрева, нагрузках и температуры окружающей среды. Обсуждаются особенности полученных вольт-амперных характеристик сверхпроводника, питаемого током термоэлектрического генератора.

1. Введение

Твердотельный термоэлектрический генератор (ТЭГ) является тепловым двигателем, использующим электроны в термоэлектрическом элементе в качестве рабочей жидкости [1–3]. Помимо высокой термоэдс S для эффективного преобразования энергии используемый термоэлектрический материал должен иметь высокую электрическую проводимость σ и низкую теплопроводность k . Основным параметром материала для оценки эффективности термоэлектрического преобразования энергии является параметр добротности $ZT = S^2\sigma T/k$ [1–3].

В работе [4] сообщалось о создании эффективного ТЭГ на кристалле CeB_6 , работающего при температурах ниже 10 К (рис.1). Устройство способно преобразовать энергию внешнего лазерного луча (или другого источника тепловой энергии) в полезную электрическую энергию, поставляемую в электрическую цепь (это может быть сверхпроводящее устройство). Все параметры, необходимые для определения термоэлектрической добротности ZT , измерены и представлены в работе [5]. Было также показано, что кристаллы CeB_6 (Кондометалл) имеют потенциал для создания эффективных термоэлектрических устройств, работающих при температурах ниже 10 К. В работе [4] был продемонстрирован прототип ТЭГ на кристалле CeB_6 .

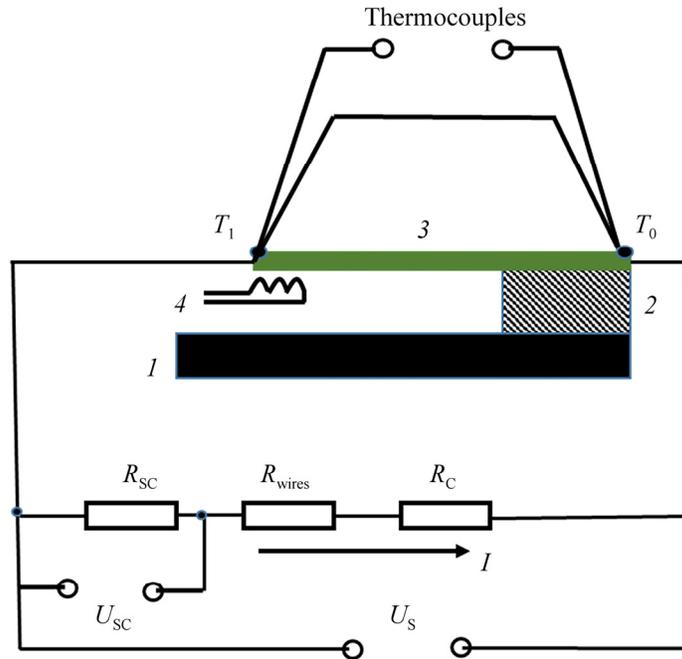


Рис.1. Схематичное представление ТЭГ на кристалле CeB_6 : 1 – медное основание, 2 – кварцевый держатель, 3 – кристалл CeB_6 и 4 – нагреватель.

В настоящей работе рассматриваются некоторые особенности производительности ТЭГ на основе кристалла CeB_6 при криогенных температурах, в частности, когда в качестве нагрузки служит фольга из сверхпроводящего материала Nb_3Sn .

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Принцип работы ТЭГ заключается в следующем: между концами термоэлектрического материала (в данном случае кристалла CeB_6) поддерживается перепад температуры $\Delta T = T_1 - T_0$, что вызывает из-за эффекта Зеебека электрический ток в замкнутой на термоэлектрический материал внешней цепи.

Величина электрического тока ТЭГ определяется выражением $I = S\Delta T / (R + r)$, где S – коэффициент Зеебека данного материала, R – внешняя нагрузка цепи и r – внутреннее сопротивление источника тока (в данном случае сопротивление кристалла). Тепловая мощность генератора обеспечивается поглощением энергии от внешнего нагревателя и может быть записана как

$$W = SIT_1 + k(T_1 - T_0) - I^2 r / 2,$$

где $Q_1 = SIT_1$ является теплом Пельтье, $Q_k = k(T_1 - T_0)$ – тепло, передаваемое

теплопроводностью кристалла и $Q_3 = I^2 r/2$ – джоулево тепло, выделяемое в кристалле текущим электрическим током. С другой стороны известно, что мощность, поставляемая во внешнюю цепь генератора, зависит от сопротивления нагрузки и достигает максимального значения, когда сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению генератора ($R = r$). Эти два условия определяют свойства ТЭГ и его функциональные возможности.

Первоначально увеличение $\Delta T = (T_1 - T_0)$ приводит к увеличению тока I . При малых значениях тока, производимых ТЭГ, величина $I^2 r/2$ мала и не имеет существенного влияния на увеличение мощности ТЭГ и, следовательно, на ток, протекающий через нагрузку. Однако с повышением тока вклад $I^2 r/2$ увеличивается по причине его квадратичной зависимости от I . Поэтому при определенных значениях тока, когда $I^2 r/2$ становится сравнимым с величиной SIT_1 , может происходить перегрев кристалла, что приводит к снижению эффективности ТЭГ.

Увеличение интенсивности внешнего нагрева одновременно с увеличением ΔT приводит к повышению средней температуры кристалла, что также приводит к сокращению выходной мощности на нагрузке и уменьшению величины генерируемого тока. Интенсификация выделения джоулева тепла и одновременное повышение средней температуры кристалла приводит к выходу ТЭГ из температурной области эффективной эксплуатации, обусловленной зависимостью оптимальной (максимальной) величины Z от температуры.

Надо отметить, что величина Z кристалла CeV_6 имеет максимум при ~ 4.5 К. Кроме того, поскольку W_R зависит от величины R , абсолютные значения токов и мощности, выделяемой на нагрузке, будут различаться для различных значений нагрузок $R = R_{\text{wire}} + R_C + R_{\text{SC}}$, где R_{wire} – сопротивление медного провода, который вместе с сверхпроводящей (СП) фольгой Nb_3Sn образует внешнюю цепь, R_{SC} – сопротивление СП фольги в нормальном состоянии, R_C – суммарное контактное сопротивление цепи. Таким образом, возможности ТЭГ зависят от величины T_0 , ΔT и R . Напряжение на кристалле CeV_6 (источник) $U_S = S\Delta T - Ir$ вызвано эффектом Зеебека $S\Delta T$ и падением напряжения на внутреннем сопротивлении r . Напряжение на нагрузке $U_S = I(R) = I(R_{\text{wire}} + R_C + R_{\text{SC}}) = S\Delta T - Ir$, а на СП фольге, составляющей часть внешней цепи генератора, $U_{\text{SC}} = IR_{\text{SC}}$ вызвано текущим по цепи электрическим током. На рис.2 показано поведение напряжения U_S в зависимости от мощности внешнего нагрева W_h для различных по величине нагрузок и при температуре $T_0 = 3.5$ К.

Чем выше величина ΔT и сопротивление внешней цепи тем больше величина U_S . Когда мощность W_h (или ΔT) увеличивается, ток, протекающий через цепь, также растет, что приводит к появлению $R_{\text{SC}} > 0$ при определенной величине критического тока СП фольги и при соответствующей температуре. Таким образом, сопротивление цепи начинает увеличиваться. Значения U_S для нагрузки

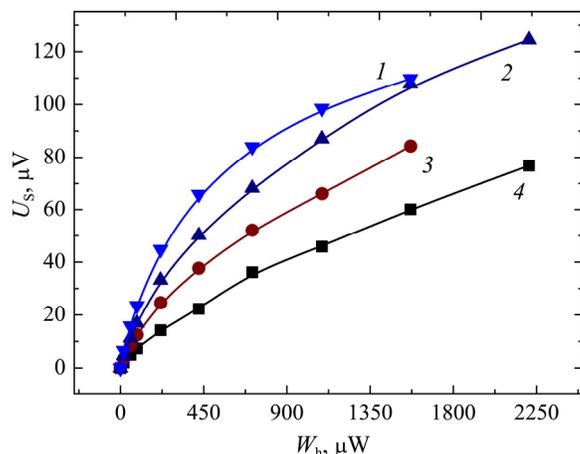


Рис.2. Напряжение, выдаваемое генератором на нагрузке, в зависимости от мощности нагревателя для различных значений нагрузки при температуре 3.5 К: 1 – 9 мОм, 2 – 3.5 мОм, 3 – 2.5 мОм и 4 – 1 мОм.

в 9 мОм при определенных величинах W_h ниже, чем значения U_s для других нагрузок, которые обусловлены более высокими значениями тока для этих нагрузок. Ток в цепи при нагрузке 9 мОм настолько мал, что не может вывести СП фольгу из сверхпроводящего состояния.

Полученные кривые $I(W_h)$ показывают, что ток увеличивается с увеличением мощности внешнего нагрева W_h или ΔT и достигает максимального значения, равного 43.6 мА для нагрузки в 1 мОм при $T_0 = 3.5$ К. Чем меньше сопротивление нагрузки, тем выше значения тока. Два процесса происходят при более высоких значениях W_h , которые приводят к уменьшению тенденции роста тока. Во-первых, имеет место перегрев кристалла, и ТЭГ покидает область оптимальной производительности. Во-вторых, при высоких значениях генерированных токов СП фольга становится несверхпроводящей, т. е. переходит в нормальное состояние и получает некоторое сопротивление, увеличивая сопротивление нагрузки цепи.

На рис.3а,б представлены вольт-амперные кривые СП фольги, полученные с помощью ТЭГ, для различных нагрузок и температур. Эти кривые подтверждают, что созданный ТЭГ является реальным рабочим устройством, которое может питать сверхпроводящее устройство и управлять им. Вольт-амперные характеристики СП фольги, полученные с помощью ТЭГ отличаются от общей тенденции существенного роста напряжения при слабом увеличении значения тока (рис.3б). Это связано с перегревом СП фольги (при больших мощностях внешнего нагрева и высоких температурах), что уменьшает значение критического тока (которое само зависит от температуры сверхпроводника, т.е. чем выше

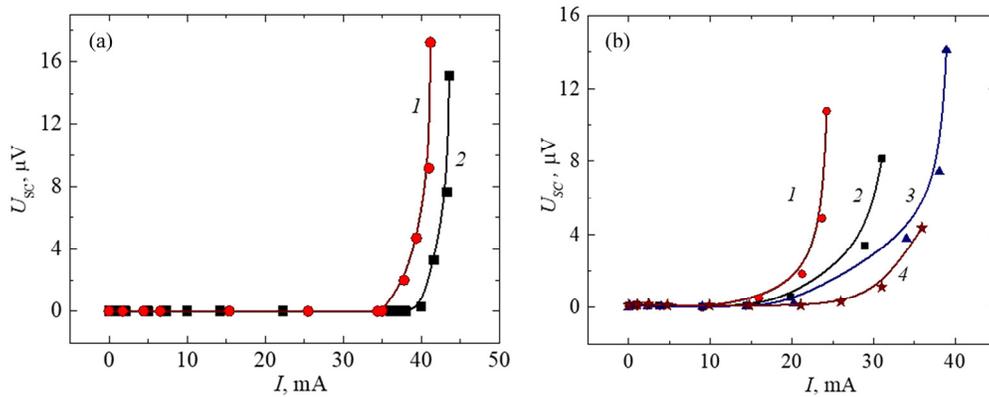


Рис.3. Вольт-амперные характеристики СП фольги при различных значениях температуры: (а) сопротивление нагрузки 1 мОм, 1 – 4.5 К и 2 – 3.5 К; (б) сопротивление нагрузки 2.5 мОм, 1 – 6.5 К, 2 – 5.5 К, 3 – 4.5 К и 4 – 3.5 К.

температура тем меньше величина критического тока данного сверхпроводника [4]). Наибольшее значение выходной мощности для данной конструкции получается для нагрузки в 2.5 мОм при температуре 3.5 К и равно 4.1 мкВт.

Эффективность (кпд) была рассчитана как $\eta = (W_R/W_h) \times 100 \%$, где W_R – выходная мощность ТЭГ, рассеиваемая на нагрузке R . Наибольшее значение эффективности η ТЭГ было получено на нагрузке в 3.5 мОм при температуре 3.5 К и равно 0.22%. Максимальные значения эффективности ТЭГ в зависимости от температуры для различных сопротивлений нагрузки показаны на рис.4, который ясно отражает оптимальные условия производительности данного ТЭГ.

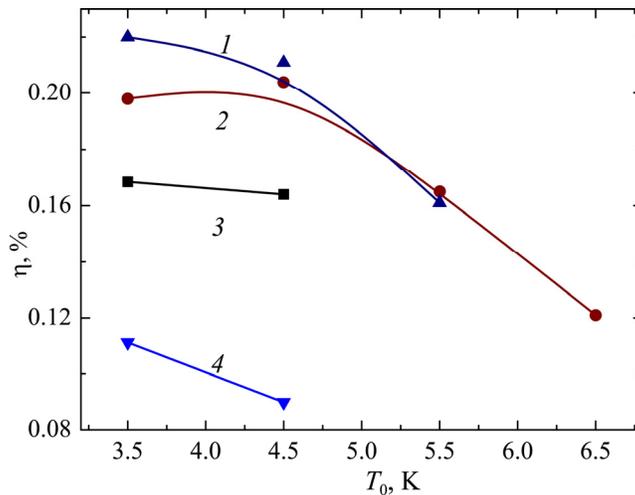


Рис.4. Эффективность ТЭГ на кристалле СеВ₆ в зависимости от температуры при различных величинах сопротивления нагрузки: 1 – 3.5 мОм, 2 – 2.5 мОм, 3 – 1 мОм и 4 – 9 мОм.

3. Заключение

Приведены экспериментальные результаты, демонстрирующие выработку электроэнергии с помощью ТЭГ, работающего при криогенных температурах. ТЭГ был создан на основе монокристалла гексаборида церия CeB_6 . Полученные вольт-амперные характеристики СП фольги, питаемой ТЭГ демонстрируют возможности ТЭГ как реально работающего устройства. Вычисленная эффективность в зависимости от температуры при различных величинах сопротивления нагрузки позволяют судить об оптимальных условиях производительности данного ТЭГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **D.M. Rowe.** CRC Handbook of Thermoelectrics. CRC Press, Boca Raton, FL, 1995.
2. **D. Champier.** Energy Conversion and Management, **140**, 167 (2017).
3. **D. Patel, S.B. Mehta, P. Shah.** J. Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR), **2**, 847 (2015).
4. **S.R. Harutyunyan, V.H. Vardanyan, A.S. Kuzanyan, V.R. Nikoghosyan, S. Kunii, K. Winzer, K.S. Wood, A.M. Gulian.** Appl. Phys. Lett., **87**, 194114 (2005).
5. **S.R. Harutyunyan, V.H. Vardanyan, A. Kuzanyan, V. Nikoghosyan, S. Kunii, A. Gulian.** Appl. Phys. Lett., **83**, 2142 (2003).
6. **J.A. Mydosh, H. Meissner.** Phys. Rev. A, **140**, 1568 (1965).

THERMOELECTRIC GENERATOR ON CeB_6 CRYSTAL: INVESTIGATION OF ITS CHARACTERISTICS

S.R. HARUTYUNYAN

Experimental results demonstrating generation of electric power by means of thermoelectric generator on CeB_6 crystal operating below 10 K are presented. The dependencies of the output power, current, efficiency of the generator for various power of external heating, different loads and ambient temperatures are investigated. The features of obtained current-voltage characteristics of superconductor that is supplied by the generator are discussed.