

05

Моделирование нагрузочных характеристик низкотемпературных термоэлектрических модулей

© О.И. Марков

Орловский государственный университет
E-mail: Markov@e-mail.ru

Поступило в Редакцию 9 января 2004 г.

Проведено компьютерное моделирование нагрузочных характеристик низкотемпературных термоэлектрических охладителей. Использовано дифференциальное уравнение стационарной теплопроводности с зависящими от температуры кинетическими коэффициентами. Сравниваются характеристики термоэлементов с ветвями из теллурида висмута и сверхпроводника.

В настоящее время растет интерес к созданию термоэлектрических охлаждающих устройств для получения низких температур (ниже 120 К). Основное препятствие к созданию высокоэффективных низкотемпературных охлаждающих модулей состоит в том, что термоэлектрическая эффективность большинства термоэлектриков с понижением температуры падает. Так, термоэлектрическая добротность на базе соединений теллуридов висмута резко уменьшается с уменьшением температуры (до $0.8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ при температуре кипения азота). Существует только один высокоэффективный термоэлектрический материал для низких температур — твердый раствор висмут-сурьмы [1] в полупроводниковой области. Однако высокой эффективностью обладает только *n*-ветвь. Для *p*-ветви до сих пор не удается достичь достойных значений. Авторами работы [2] было проведено исследование предельных возможностей термоэлектрического охлаждения при температуре жидкого азота с использованием висмутового сверхпроводника в качестве пассивной ветви. К сожалению, они ограничились исследованием только одного режима работы термоэлемента — режима максимального перепада температуры. С практической точки зрения значительный интерес представляет режим максимальной холодопроизводительности. Цель настоящей работы состоит в численном моделировании нагрузочных характеристик низкотемпературных охладителей, работающих

в режиме максимальной холодопроизводительности и сравнении их возможностей.

Согласно общепринятому подходу [3], для характеристики эффективности термоэлемента используется понятие термоэлектрической добротности

$$Z = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{[\sqrt{\chi_p \rho_p} + \sqrt{\chi_n \rho_n}]^2}, \quad (1)$$

где α_i , χ_i , ρ_i — термоэдс, теплопроводность и удельное сопротивление материала n - и p -ветвей. Однако следует отметить, что введение этого параметра справедливо только в довольно грубом нулевом приближении. При низких температурах, когда достигаемые максимальные снижения температуры снижаются резко уменьшаются, особенно важно оптимизировать параметры термоэлектрического модуля с учетом температурной зависимости термоэлектрических параметров, в том числе и эффекта Томсона. Кроме того, в случае сверхпроводника формула (1) не характеризует добротность термоэлемента, так как при $\alpha = \rho = 0$ получается добротность одной ветви. Хотя совершенно ясно, что теплопроводность сверхпроводника также внесет свой вклад в величину параметра термоэлектрической добротности термоэлемента в целом.

Для более точного описания тепловых процессов в ветви термоэлемента следует пользоваться последовательным подходом, основанным на решении граничной задачи [4]. При решении задачи не учитывались тепловые потери и эффект Джоуля в перемычке и контактных сопротивлениях. Температурное поле одномерной адиабатически изолированной ветви термоэлемента в установившемся режиме с учетом эффекта Томсона описывается стационарным уравнением теплопроводности

$$\frac{d}{dx} \left(\chi_i(T) \cdot S_i \cdot \frac{dT}{dx} \right) + \frac{J^2 \cdot \rho_i(T)}{S_i} - J \cdot T \cdot \frac{d\alpha_i(T)}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} = 0 \quad (2)$$

с граничными условиями

$$\chi_i(T_0) \cdot S_i \cdot \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = \alpha_i(T_0) \cdot J \cdot T_0 - Q_{0i}, \quad T \Big|_{x=l_i} = T_{hot}, \quad (3)$$

где $\alpha_i(T)$, $\rho_i(T)$, $\chi_i(T)$ — термоэдс, удельное сопротивление и теплопроводность как функции температуры, J — сила тока, S_i — сечение ветви, l_i — длина ветви, T_0 и T_{hot} — температура холодного и горячего

конца ветви соответственно, Q_{0i} — холодопроизводительность ветви. Экспериментальные зависимости термоэдс, удельного сопротивления и теплопроводности для сплава $\text{Bi}_{85}\text{Sb}_{15}$ в направлении тригональной оси аппроксимировались степенными многочленами. Геометрия ветви была выбрана такой же, как в работе [2].

Обычно ветвь называют пассивной вследствие малости ее термоэлектрической эффективности. Но холодопроизводительность ветви может быть отрицательной и при достаточно высокой ее эффективности, если эффективность второй ветви в термоэлементе еще выше. Тогда можно говорить о пассивной работе ветви. Такая ситуация чаще всего и реализуется в термоэлементе, работающем в условиях режима максимального перепада температуры. Вследствие неравноценности ветвей одна ветвь термоэлемента, работающего в режиме максимального перепада температуры, преимущественно работает в активном режиме, а другая в пассивном. Распределения температур ветвей в этих режимах существенно различаются. Как показывают расчеты, проведенные в данной работе, в активном режиме ветвь имеет максимум распределения температуры, расположенный вблизи горячего конца ветви, а в пассивном — максимума температуры в пределах ветви не достигается. Для термоэлемента, работающего в режиме максимальной холодопроизводительности, при достаточной величине нагрузки обе ветви становятся активными.

В качестве пассивной p -ветви в работе [2] использовался сверхпроводник $\text{BiSrCaCu}_2\text{O}_x$. В этой ветви отсутствует эффект Джоуля, а теплотой Томсона можно пренебречь и тогда граничная задача для нее будет выглядеть так:

$$\frac{d}{dx} \left(\chi_s(T) \cdot S_s \cdot \frac{dT}{dx} \right) = 0, \quad (4)$$

$$\chi_s(T_0) \cdot S_s \cdot \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = -Q_{0s}, \quad T \Big|_{x=l_s} = T_{hot}, \quad (5)$$

где χ_s — удельная теплопроводность сверхпроводника, S_s — сечение сверхпроводника, l_s — длина сверхпроводника, Q_{0s} — теплота, подводимая к холодному спаю сверхпроводника ($Q_{0s} < 0$). Геометрия пассивной ветви, принятая в работе [2], была сохранена в расчете. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности сверхпроводника данного типа, приведенная в работе [5], также была аппроксимирована степенным многочленом. Холодопроизводительность термоэлемента определялась как сумма

$$Q_0 = Q_{0n} + Q_{0p}. \quad (6)$$

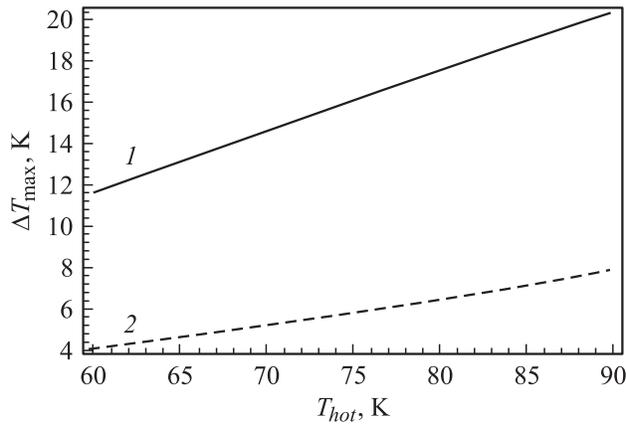


Рис. 1. Зависимость максимального перепада температуры ΔT_{max} на термоэлементе от температуры горячего спая для модуля с ветвью из сверхпроводника (1) и ветвью на базе теллурида висмута (2 — пунктирная кривая).

Термоэлемент рассчитывался в режиме максимального температурного перепада и максимальной холодопроизводительности. Оптимизация термоэлемента проводилась по величине тока. Для сравнения проведен расчет для термоэлемента, имеющего в качестве p -ветви соединение теллурида висмута. На рис. 1 приведены кривые зависимости максимального перепада температуры термоэлемента с ветвью из сверхпроводника (кривая 1) и теллурида висмута (кривая 2). Нагрузочные характеристики термоэлемента представлены на рис. 2. Как видно из графика, холодопроизводительность термоэлемента с ветвью на основе теллурида висмута при перепаде 5 К практически везде в рассматриваемом интервале температур меньше, чем холодопроизводительность термоэлемента с пассивной ветвью при перепаде температуры 10 К. Однако при нулевом перепаде холодопроизводительность термоэлемента с ветвью из теллурида висмута резко возрастает.

Очевидно, что холодопроизводительность ветви из сверхпроводника отрицательна во всех режимах работы термоэлемента. Для ветви из теллурида висмута холодопроизводительность становится положительной при больших нагрузках и при малых перепадах температуры (менее 5 К). Как видно, для получения больших перепадов температур лучше использовать в качестве p -ветви сверхпроводник, а для тепло-

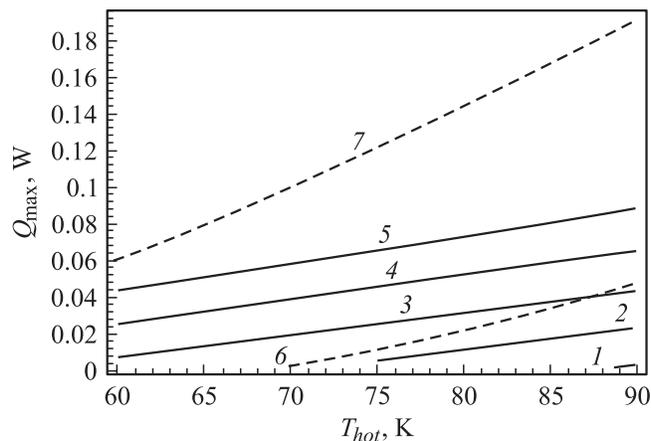


Рис. 2. Зависимость максимальной мощности термоэлемента Q_{\max} от температуры горячего спая модуля с ветвью из сверхпроводника (сплошные кривые) и ветвью на базе теллурида висмута (пунктирные кривые) для перепадов температуры: $\Delta T = 20$ К (1), 15 (2), 10 (3), 5 (4), 0 (5), 5 (6), 0 К (7).

вых насосов с малыми перепадами — ветвь из теллурида висмута, холодопроизводительность которой становится положительной. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании модулей различного целевого назначения.

По мере уменьшения температуры горячего конца ветви уменьшается и оптимальный ток, поэтому сечение сверхпроводящей ветви в этом случае могло быть уменьшено, что позволит получить дополнительное, к сожалению, небольшое падение температуры.

Список литературы

- [1] Smith G.E., Wolf R. // J. Appl. Phys. 1962. V. 33. N 3. P. 841–846.
- [2] Кузнецов В.Л., Ведерников М.В., Яндль П., Бирхгольц У. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 18. С. 75–80.
- [3] Иоффе А.Ф. Полупроводниковые термоэлементы. М.-Л., 1960. 188 с.
- [4] Марков О.И. // ИФЖ. 2003. Т. 76. № 6. С. 185–187.
- [5] Кириченко Ю.А., Русанов К.В., Тюрина Е.Г. // Сверхпровод. физ. хим. тех. 1990. Т. 3. № 7. С. 1385–1409.