

**Новые механизмы охлаждения в криогенном
гальванотермомагнитном холодильнике***В. Г. Охрем*

Рассмотрены новые модели криогенных гальванотермомагнитных холодильников, которые ранее не обсуждались, но которые приводят к глубокому охлаждению в области криогенных температур. Такие холодильники можно было бы использовать для охлаждения разного рода низкотемпературных микроэлектронных датчиков. В статье приведены расчетные зависимости температуры охлаждения от плотности электрического тока, из которых следует, что предложенные холодильники обладают потенциально высокой эффективностью использования. Поэтому их можно рекомендовать для практического использования. Сделан анализ полученных результатов, описан механизм охлаждения, даны практические рекомендации.

Ключевые слова: эффект инверсии, криогенный инверсионный холодильник, глубина охлаждения.

Введение

В работе [1] указано на возможность создания продольного гальванотермомагнитного холодильника (ГТМХ) с учетом зависимости термоЭДС от инверсии индукции поперечного магнитного поля. Этот эффект в физической литературе принято называть *umkehr*-эффектом [2] (а также эффектом инверсии магнитного поля [3] и коммутационным эффектом [4]). Механизм его возникновения в области азотных температур детально исследован на монокристаллах висмута и сплавов висмут-сурьма.

В [1] дана теория термопарного ГТМХ с учетом зависимости термоЭДС от инверсии индукции магнитного поля. В качестве материала ветвей выбран висмут, для которого подробно изучен эффект инверсии и для которого он проявляет себя наиболее отчетливо [2–4]. Рассмотрена стандартная схема, которая обычно применяется для расчета рабочих характеристик термопарного холодильника: имеются две ветви *p*- и *n*-проводимостей, расположенные параллельно. Пара торцов с одной стороны скоммутирована металлической (медной) перемычкой, а с другой подсоединена к термостатированным металлическим токоподводам. Роль

металлической перемычки обычно сводится к тому, чтобы обеспечить надежную электрическую коммутацию ветвей и выравнивание температур торцов. При этом она должна обладать только высокими тепло- и электропроводностями.

В [1] считалось, что перемычка не влияет на физические процессы протекающие в ветвях (так считали и Иоффе А. Ф. с сотрудниками при исследовании термоэлектрических холодильников [5, 6], и другие исследователи [7–11]). Эффект охлаждения ГТМХ основывается на эффекте Томсона, поскольку в полученных выражениях фигурируют коэффициенты Томсона. Эффект Томсона обусловлен зависимостью термоЭДС от инверсии индукции магнитного поля. Это обстоятельство вносит существенные изменения в физические процессы, протекающие в холодильнике.

Задачей настоящего исследования является, **во-первых**, выяснение влияния перемычки на эффект охлаждения. Конечно, если для расчетов использовать стандартную схему, то они сильно усложнятся, поскольку нужно учитывать факт двухмерности температуры и плотности электрического тока. Исходя из этого, для расчетов использована более простая модель, когда ветви и перемычка расположены в линию (см. рис. 1). В этой модели можно считать, что температура и ток одномерны. **Во-вторых**, необходимо выяснить, что произойдет, если инверсионный термоэлектрик (или другое вещество, обладающее эффектом инверсии) разместить в области 3, а 1 и 2 представить металлическими блоками. Рассмотрение этих двух моделей привело к результатам, которые до этого, видимо, были неизвестны.

Охрем Василий Георгиевич, доцент.

Национальный технический университет «ХПИ»,
Черновицкий факультет.

Украина, 58018, г. Черновцы, ул. Главная, 203-а.

E-mail: okhrem@ukr.net

Статья поступила в редакцию 16 февраля 2017 г.

© Охрем В. Г., 2017

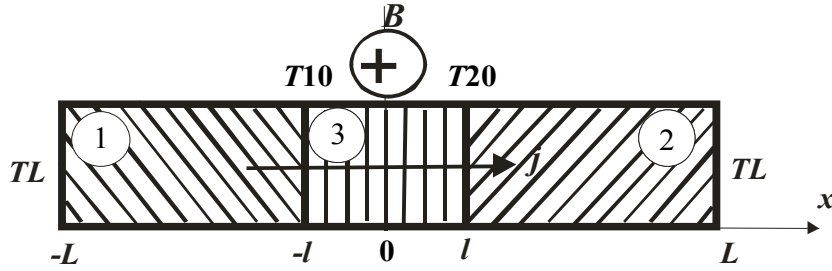


Рис. 1. Схема, примененная для расчета эффекта охлаждения холодильника (температуры $T10$ и $T20$). В первом случае 1 и 2 – ветви n - и p -проводимостей, 3 – металлическая перемычка; во втором случае 1 и 2 – металлические блоки, 3 – инверсионный термоэлектрик n - или p -проводимостей; TL – температура термостатированных токоподводов, $T10$ и $T20$ – температуры границ 1-3 и 2-3, l и L – размеры соответствующих структурных элементов, B – магнитная индукция.

Постановка задачи и ее решение

I. Рассмотрим вначале случай, когда 1 и 2 – ветви n - и p -проводимостей (рис. 1). Задача будет состоять в том, чтобы определить температуры $T10$ и $T20$. Для этого положим, что материальные константы ветвей и перемычки не зависят от температуры. Положим также, что ветви изготовлены из висмута и вся система помещена в магнитное поле с индукцией B . Тогда обобщенные уравнения теплопроводности для областей 1, 2 и 3 будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 T1(x)}{dx^2} - a1 \frac{dT1(x)}{dx} + b1 &= 0, \\ T1(-l) &= T10, T1(-L) = TL, \\ \frac{d^2 T2(x)}{dx^2} - a2 \frac{dT2(x)}{dx} + b2 &= 0, \\ T2(l) &= T20, T2(L) = TL, \\ \frac{d^2 T3(x)}{dx^2} + b3 &= 0, \\ T3(-l) &= T10, T3(l) = T20, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} a1 &= (\alpha1(-B) - \alpha1(B))j / \kappa1, \\ a2 &= (\alpha2(-B) - \alpha2(B))j / \kappa2, \quad b1 = \rho1(B)j^2 / \kappa1, \\ b2 &= \rho2(B)j^2 / \kappa2, \quad b3 = \rho3(B)j^2 / \kappa3, \\ \kappa1, \kappa2, \kappa3 & - \text{удельные теплопроводности,} \\ \rho1, \rho2, \rho3 & - \text{удельные сопротивления,} \\ j & - \text{плотность электрического тока.} \end{aligned}$$

В соответствии с уравнениями (1), распределения температур в областях 1, 2 и 3 имеют такой вид:

$$\begin{aligned} T1(x) &= -\frac{e^{a1x}(b1(L-l) + a1(TL - T10))}{a1(e^{a1l} - e^{a1L})} + \frac{b1x}{a1} + \\ &+ \frac{b1Le^{-a1l} + e^{-a1l}TL}{a1(e^{a1l} - e^{a1L})} - \frac{a1 - e^{-a1L}T10}{a1 - e^{-a1L}} - \frac{b1l}{a1}, \\ T2(x) &= \frac{e^{a2x}(b2(L-l) - a2(TL - T20))}{a2(e^{a2l} - e^{a2L})} + \frac{b2x}{a2} - \\ &- \frac{b2Le^{a2l} - e^{a2l}TL}{a1(e^{a2l} - e^{a2L})} - \frac{a2 + e^{a2L}T20}{a2 - e^{a2L}} - \frac{b2l}{a1}, \\ T(x) &= -\frac{1}{2}b3(x^2 - l^2) - \frac{T10 - T20}{l}x + \frac{1}{2}(T10 + T20). \end{aligned}$$

Применив условия сшивания по тепловому потоку в точках l и $-l$, получим уравнения, из которых находятся выражения для температур $T10$ и $T20$. Эти выражения занимают около двух страниц формата А4. Поэтому выписывать их нет смысла. Тем более, что их трудно проанализировать аналитически. Поэтому зададим материальные и размерные константы в числовом виде и проведем анализ с помощью пакета программ MAPLE, который дает возможность это сделать.

Перед тем, как выполнить эти вычисления, опишем более детально устройство рассматриваемого холодильника. Он состоит из двух ветвей 1 и 2 и медной перемычки 3. Каждая из ветвей изготовлена из монокристаллического висмута, который в области азотных температур проявляет эффект инверсии, заключающийся в том, что для каждой из ветвей $\alpha(-B) - \alpha(B) \neq 0$. Более того, инверсия магнитной индукции в некоторых случаях приводит к изменению знака термоЭДС (см., например, [2]).

Для расчетов нами выбран случай, когда ветви имеют одну и ту же кристаллографическую ориентации, но одна ветвь повернута относительно другой (вокруг оси x) на угол 180° . Причем для

ветви 1 имеем $\alpha_1(B) < 0$, а $\alpha_1(-B) > 0$, для ветви 2 справедливо $\alpha_2(B) > 0$, а $\alpha_2(-B) < 0$. В работе Вольфа и Смита [2] представлены экспериментальные результаты по исследованию эффекта инверсии в области азотных температур, которые использованы нами ниже.

Для оценок температур T_{10} и T_{20} взяты такие материальные константы:

$\alpha_1(B) = \alpha_2(-B) = 50$ мкВ/К, $\alpha_2(B) = \alpha_1(-B) = -50$ мкВ/К, $\rho_1(B) = \rho(B) = 10^{-2}$ Ом см, $\kappa_1(B) = \kappa_2(B) = 2 \times 10^{-2}$ Вт/(см К), $\alpha_3 = 10^{-5}$ В/К, $\rho_3 = 10^{-5}$ Ом см, $\kappa_3 = 0,4$ Вт/(см К). В расчетах использованы также размерные константы l и L , величины которые указаны на рисунках, при этом $TL = 80$ К. Магнитная индукция, которой соответ-

ствуют термоЭДС и удельное сопротивления монокристаллического висмута, составляла 10 кГс. Материальные константы меди взяты для меди без магнитного поля.

Из графиков, представленных на рис. 2, видно, что температуры T_{10} и T_{20} очень чувствительны к изменению размерных констант. Видно, что глубина охлаждения существенно зависит от этих констант. Причем, как видно из графиков, кривые T_{10} и T_{20} разнятся, т. е. между концами медной перемычки при наличии тока устанавливается небольшой перепад температуры. Следует заметить, что при этом имеются минимумы этих температур, глубина которых также зависит от размерных констант.

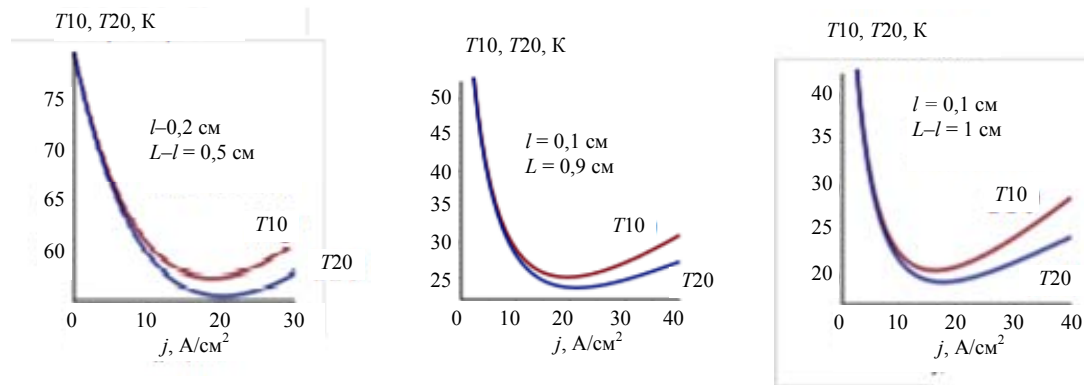


Рис. 2. Зависимость температур стыков от плотности электрического тока при разных размерных константах.

Механизм охлаждения торцов медной прослойки можно понять так. Слева имеется контакт термоэлектрика n -типа с металлом, справа – термоэлектрика p -типа с металлом, т. е. справа и слева образуются потенциальные барьеры. При подключении внешнего источника (как на рис. 1) в металле генерируются пары электрон–дырка и через левый контакт потекут электроны, а через правый – дырки. При этом на контактах будет поглощаться тепло Пельтье. Вследствие этого металлическая прослойка будет охлаждаться. Поверхность этой прослойки можно использовать для охлаждения разного рода микроэлектронных устройств

II. Рассмотрим второй случай, когда часть 3 устройства (рис. 1) является инверсионным термоэлектриком, а области 1 и 2 выполнены из металла (меди). В этом случае решение задачи по схеме, использованной выше, легко находится. Также легко находятся интересующие нас температуры T_{10} и T_{20} , один из графиков зависимости которых от плотности тока представлены на рис. 3.

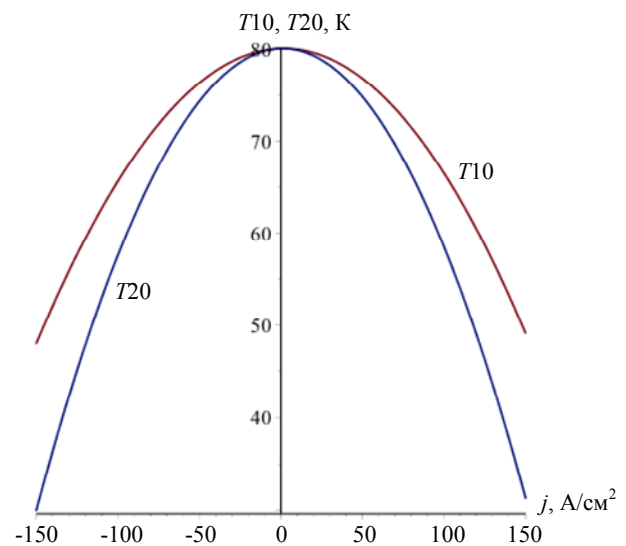


Рис. 3. Зависимость температур стыков T_{10} и T_{20} от плотности тока при значениях размерных констант $L = 0,36$ см и $l = 0,04$ см.

При расчетах зависимостей, изображенных на рис. 3, использованы те же материальные константы,

что и выше, а размеры здесь взяты $L = 0,36$ см и $l = 0,04$ см. Как видно из графиков, температуры $T10$ и $T20$ не зависят от направления тока, и это является особенностью рассматриваемого холодильника. Такой результат можно понять, если рассмотреть распределение потенциала в рассматриваемом устройстве. Это распределение легко получается из обобщенного закона Ома, а именно:

$$j = \frac{1}{\rho_3} \left(-\frac{1}{e} \frac{d\mu_3(x)}{dx} + \alpha_3(B) \frac{dT_3(x)}{dx} \right),$$

где e – заряд электрона, μ_3 – электрохимический потенциал. Остальные обозначения указаны выше. Из этого выражения легко находим

$$\mu_3(x) = -jer_3x + eT_3(x)\alpha_3(B) + \mu_3(0) - eT_3(0)\alpha_3(B),$$

где $\mu_3(0)$ – электрохимический потенциал в точке $x = 0$, $T_3(0)$ – температура в этой же точке. Отсюда легко оценить потенциал в точке $x = -l$. В последнем выражении (при $x \neq 0$) в правой части второй и четвертый члены малы по сравнению с первым и третьим, т. е. определяющими будет первый и третий члены. Ими же будет определяться значение химпотенциала на границе $x = -l$. Этот потенциал будет определять и высоту потенциального барьера. Как видно, знак высоты барьера определяется направлением тока. Высота барьера при изменении направления тока остается прежней. Поэтому температура в этой точке при изменении направления тока остается неизменной. Эти же рассуждения применимы и к температуре $T20$ – при изменении направления тока она не меняет свою величину.

Заключение

В статье изложен новый подход к пониманию термоэлектрических процессов, происходящих в

криогенном гальванотермоманитном холодильнике. Показано, что металлическая прослойка между ветвями активно влияет на величину снижения температуры, а глубина охлаждения холодильника существенно зависит от материала и размеров этой прослойки.

В случае с металлической прослойкой (холодильник с двумя ветвями) обе ветви холодильника изготовлены из одного и того же материала. Описан возможный механизм охлаждения. При использовании в качестве прослойки между двумя медными блоками «инверсионного» термоэлектрика, наблюдается также эффект охлаждения, который можно использовать для практических нужд. Такой холодильник мог бы быть использован для охлаждения разного рода низкотемпературных сенсорных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Охрем В. Г. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 3. С. 310.
2. Wolfe R, Smith G. E, J. Phys. Soc. Japan. 1969. Vol. 12. P. 651.
3. Охрем В. Г. Исследования влияния инверсии магнитного поля на термоЭДС. Автореф. канд. диссертации (Черновцы, 1972).
4. Bivol V. G., Bodiul P. P., Fedorko A. S., Gitsu D. V. // Phys. Stat. Sol. 1970. Vol. 37. P. 545.
5. Иоффе А. Ф., Стильбанс Л. С., Йорданишвили Е. К., Ставицкая Т. С. Термоэлектрическое охлаждение. – Издательство Академии наук СССР, 1956.
6. Иоффе А. Ф. Полупроводниковые термоэлементы. – М.-Л.: Из-во АН СССР, 1960.
7. Буриштейн А. Н. Физические основы расчета полупроводниковых термоэлектрических устройств. – Москва, 1962.
8. Коленко Е. Л. Термоэлектрические охлаждающие приборы. – Наука, Ленинград, 1967.
9. Осипов Э. В. Твердотельная криогеника. – К.: Наукова думка, 1977.
10. Harman T. C., Honig J. M. Thermoelectric and thermomagnetic effects and applications. – New-York: Mc Graw-Hill book Company, 1967.
11. Анатычук Л. И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник – К.: Наук.думка, 1979.

New cooling mechanisms in cryogenic galvanothermomagnetic the fridge

V. G. Okhrem

National Technical University «KhPI», Chernovtsy Branch
203-a Golovnya str., Chernovtsy, 58018, Ukraine
E-mail: okhrem@ukr.net

Received February 16, 2017

Considered kovy model galvanothermomagnetic cryogenic refrigerators that were not previously considered and which lead to deep cooling to cryogenic temperatures obasti. Such coolers can be used for various kinds of low-temperature cooling of microelectronic sensors. The article shows the calculated depending on the cooling temperature of the electric current density, from which it follows that the proposed refrigerators are highly efficient use and, therefore, because you can be recommended for use in cryogenic temperatures. The analysis of the results, the cooling mechanism is described, practical recommendations.

Keywords: inversion effect, inversion cryogenic refrigerator, cooling depth.

REFERENCES

1. V. G. Okhrem, Usp. Prikl. Fiz. **3** (3), 310 (2015).
2. R. Wolfe, G.E. Smith, J. Phys. Soc. Japan, **21**, 651 (1969).
3. V. G. Okhrem, Abstract of a Thesis (Chernovtsy, 1972) [in Russian].
4. V. G. Bivol, P. P. Bodiul, A. S. Fedorko, D. V. Gitsu, Phys. Stat. Sol. **37**, 545 (1970).
5. A. F. Ioffe, L. S. Stilbans, et al., *Thermoelectric Cooling* (Academy of the USSR, 1956) [in Russian].
6. A. F. Ioffe, *Semiconductor Thermoelements* (Academy of the USSR, 1960) [in Russian].
7. A. N. Burshtein, *Physical Foundations of Semiconductor Thermoelectric Devices*. (Moscow, 1962) [in Russian].
8. E. L. Kolenko, *Thermoelectric Cooling Devices* (Nauka, Leningrad, 1967) [in Russian].
9. E. V. Osipov, *Solid State Cryogenics*. (Kiev, Naukova Dumka, 1977) [in Russian].
10. T. C. Harman and J. M. Honig, *Thermoelectric and thermomagnetic effects and applications* (New-York: Mc Graw-Hill book Company, 1967).
11. L. I. Anatyshuk, *Thermoelements and Thermoelectric Devices* (Kiev, Naukova Dumka, 1979) [in Russian].