

Д. т. н. А. А. АЩЕУЛОВ, к. ф.-м. н. В. Г. ОХРЕМ,  
к. ф.-м. н. Е. А. ОХРЕМ

Украина, г. Черновцы, Черновицкий национальный университет  
им. Ю. Фельковича, Институт термоэлектричества  
E-mail: oe-dpt@chnu.cv.ua, anatychuk@ite.cv.ua

Дата поступления в редакцию  
12.03 2004 г.  
Оппонент д. ф.-м. н. З. Д. КОВАЛЮК  
(ЧФ ИПМ НАНУ, г. Черновцы)

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

*Разработана и испытана конструкция гальванотермомагнитного холодильника, работающего в области температуры кипения жидкого азота и ниже.*

Гальванотермомагнитный (ГТМ) метод охлаждения отличается зависимостью рабочих характеристик холодильных элементов (ХЭ) от величины и направления индукции магнитного поля (umkehr-эффект), что дает возможность ими управлять.

Теория ГТМ-охлаждения с учетом umkehr-эффекта приведена в работе [1], в которой исследовано его влияние на холодильный коэффициент, холодопроизводительность и максимальное снижение температуры при слабых токах. Эти исследования привели к созданию инверсионного ГТМ ХЭ, ветви которого изготовлены из одного и того же материала (из висмута), но различным образом ориентированы относительно направления индукции магнитного поля. В случае слабых токов термомагнитная добротность определяется термо-эдс при отрицательном направлении индукции магнитного поля, а ток направлен тоже против этой же термо-эдс. Были проведены экспериментальные исследования, которые также описаны в [1]. В случае сильных токов исследованы холодопроизводительность и максимальное снижение температуры. Получены оригинальные результаты и показано, что в этом случае umkehr-эффект приводит к значительному усилению эффекта охлаждения.

Ввиду важности полученных результатов приведем здесь краткое изложение теории ГТМ-охлаждения с помощью продольных ХЭ с учетом umkehr-эффекта. Принципиальная схема продольного ГТМ ХЭ представлена на рис. 1. Ветви  $p$ - и  $n$ -проводимости 1 и 2 изготовлены из одного и того же монокристаллического висмута так, что их длинные

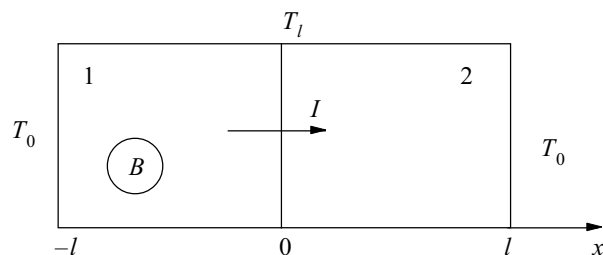


Рис. 1. Принципиальная схема инверсионного гальванотермомагнитного холодильного элемента

оси совпадают с выбранным кристаллографическим направлением, но одна из ветвей повернута относительно другой вокруг этой оси на такой угол, чтобы тип ее проводимости при этом изменился. В висмуте и в сплавах "висмут—сурьма" существует множество таких ориентаций, и всегда можно подобрать приемлемую.

Считая, что коммутационные элементы (на рис. 1 не показаны) не влияют на термоэлектрические процессы, происходящие в ГТМ ХЭ, рассчитаем распределение температуры в отдельной ветви (рис. 2). Если кинетические коэффициенты не зависят от температуры и координат (это предположение выполняется при условии, что рабочий интервал температуры не очень широк), то уравнение теплопроводности будет иметь вид

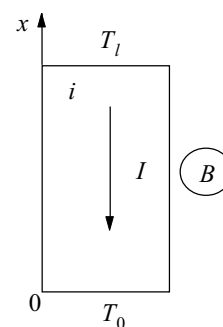


Рис. 2. Схема ветви, примененная для расчета распределения температуры

$$\chi_i(B) \frac{d^2 T_i}{dx^2} - (\alpha_i(-B) - \alpha_i(B)) j_i \frac{dT_i}{dx} + \rho_i(B) j_i^2 = 0, \quad (1)$$

где  $\chi_i(B)$ ,  $\rho_i(B)$  — удельные теплопроводность и электрическое сопротивление материала  $i$ -й ветви вдоль оси  $x$ . Плотность тока  $j_i$  и градиент температуры  $T_i$  направлены также вдоль оси  $x$ , магнитная индукция  $B$  — перпендикулярно оси  $x$ .  $\alpha_i(B)$ ,  $\alpha_i(-B)$  — термоэдс материала ветви вдоль  $x$  при прямом и обратном направлениях индукции поперечного магнитного поля, соответственно. Смысл членов, входящих в (1), таков: первый — это тепло, выделяющееся в единице объема за счет теплопроводности, третий — тепло Джоуля, а второй — это тепло, выделяющееся в единице объема за счет эффекта Томсона,  $\alpha_i(B) - \alpha_i(-B)$  имеет смысл коэффициента Томсона и, одновременно, является характеристикой umkehr-эффекта.

Уравнение (1) с граничными условиями

$$T_i(0) = T_0, \quad T_i(l) = T_l, \quad (2)$$

означающими термостатирование торцов ветви (рис. 2) при температурах  $T_0$  и  $T_l$ , имеет решение

$$T_i(x) = T_0 + \frac{b_l}{a_i} x - \left( \Delta T + \frac{b_l}{a_i} l \right) \frac{e^{a_i x} - 1}{e^{a_i l} - 1}, \quad (3)$$

где  $\Delta T = T_0 - T_l > 0$ ,  $a_i = [\alpha_i(-B) - \alpha_i(B)] j_i / \chi_i(B)$ ,

$b_i = \rho_i(B) j_i^2 / \chi_i(B)$ ,  $i = n$  или  $p$ .

Холодопроизводительность, по определению,

$$Q_l = -\chi_p \frac{dT_p}{dx} \Big|_{x=l} S_p + \alpha_p(-B) T_l j_p S_p - \chi_n \frac{dT_n}{dx} \Big|_{x=l} S_n +$$

$+ \alpha_n(-B) T_l j_n S_n$ ,

где  $\chi_p, \chi_n$  — удельные теплопроводности;

$S_p, S_n$  — поперечные сечения ветвей;

$\alpha_p(-B), \alpha_n(-B)$  — термо-эдс при отрицательном направлении магнитной индукции;

$j_p = -\frac{I}{S_p}$ ;  $j_n = -\frac{I}{S_n}$ ;  $I$  — сила тока.

Подставив вместо  $T_p$  и  $T_n$  их значения по (3), получим:

$$Q_l = -\chi_p \left( \frac{b_p}{a_p} + \left( \Delta T + \frac{b_p}{a_p} l \right) \frac{a_p e^{a_p l}}{1 - e^{a_p l}} \right) S_p -$$

$$-\chi_n \left( \frac{b_n}{a_n} + \left( \Delta T + \frac{b_n}{a_n} l \right) \frac{a_n e^{a_n l}}{1 - e^{a_n l}} \right) S_n + (\alpha_p(-B) - \alpha_n(-B)) T_l I.$$

При выполнении условий  $\exp[\alpha_i(-B) - \alpha_i(B)] j_i / \chi_i \gg 1$  выражение для холодопроизводительности ГТМ ХЭ примет вид

$$Q_l = \left( \frac{\rho_p \chi_p}{\Delta \alpha_p} - \frac{\rho_n \chi_n}{\Delta \alpha_n} \right) I - (\Delta \alpha_p - \Delta \alpha_n) \Delta T I +$$

$+ I^2 R - (\alpha_p(-B) - \alpha_n(-B)) T_l I$ ,

где  $\Delta \alpha_i = \alpha_i(-B) - \alpha_i(B)$ ;

$I$  — сила тока в элементе;

$R$  — сопротивление ХЭ —  $R = (\rho_p / S_p + \rho_n / S_n) l$ .

Члены, входящие в выражение для  $Q_l$ , имеют следующий смысл: второй член — это стекающее в объем ТЭ тепло Томсона, которое уменьшает тепло Джоуля (третий член), четвертый член — это поглощающееся (если  $(\alpha_p(-B) - \alpha_n(-B)) > 0$ ) на холодных торцах ХЭ тепло Пельтье. Что касается первого члена, то он не имеет аналога в обычном выражении для холодопроизводительности стандартного ХЭ Пельтье, а обусловлен совокупностью действующих в ГТМ ХЭ эффектов. Кроме того, в этом выражении нет члена, который описывает теплопроводность, — это тоже связано с umkehr-эффектом.

Видно, что холодопроизводительность  $Q_l$  не имеет максимума по  $I$ . Вместе с тем видно, что она с ростом  $I$  растет.

Используя условия  $e^{a_p l} \gg 1$ ,  $e^{a_n l} \gg 1$ , выражения для  $a_p$ ,  $a_n$ ,  $b_p$ ,  $b_n$  и равенство  $Q_l = 0$ , получим следующее выражение для перепада температуры:

$$\Delta T = \frac{(\alpha_p(-B) - \alpha_n(-B)) T_0 - R I - \chi_p \rho_p / \Delta \alpha_p + \chi_n \rho_n / \Delta \alpha_n}{\alpha_p(B) - \alpha_n(B)}.$$

Пусть  $\alpha_p(-B) = \alpha_n(B)$ ,  $\alpha_n(-B) = \alpha_p(B)$ ,  $\rho_p(B) = \rho_n(B) = \rho$ ,  $\chi_p(B) = \chi_n(B)$  — эти соотношения могут выполняться, например, для висмута. Тогда для перепада температуры получим выражение

$$\Delta T = -T_0 - \frac{R}{\delta \alpha} I + \frac{2}{Z},$$

где  $\delta \alpha = \alpha_p(B) - \alpha_n(B)$ ;

= термомагнитная добротность —  $Z = (\delta \alpha)^2 / (\chi \rho)$ .

Область изменения силы тока находится из условий, что  $\Delta T$  должен быть положительным и не большим  $T_0$  (когда  $T_l = 0$ ), которые приводят к выражению

$$\left( \frac{2}{Z} - 2T_0 \right) \frac{\delta \alpha}{R} \leq I \leq \left( \frac{2}{Z} - T_0 \right) \frac{\delta \alpha}{R}.$$

Возьмем для примера  $\delta \alpha = 5 \cdot 10^{-4}$  В/К,  $\rho = 10^{-3}$  Ом·см,  $\chi = 0,1$  Вт/(см·К),  $l/S \approx 10$  см<sup>-1</sup>,  $T_0 = 80$  К. Для этих параметров будем иметь  $Z = 2,5 \cdot 10^{-3}$  К<sup>-1</sup>,  $R = 2 \cdot 10^{-2}$  Ом и, соответственно,  $16 \text{ A} \leq I \leq 18 \text{ A}$ . Пусть, например,  $I = 17 \text{ A}$ . Тогда  $(\Delta T)_{\max} = 40 \text{ K}$ . При  $I = 2(1/Z - T_0) \delta \alpha / R$ ,  $T_l = 0$ , т. е. составляет абсолютный нуль. Значительное усиление эффекта охлаждения обусловлено umkehr-эффектом. Umkehr-эффект и эффект Пельтье сильно ослабляют эффекты теплопроводности и Джоуля, что и приводит к указанному увеличению перепада температуры.

Полученные результаты нельзя понимать буквально, поскольку, как отмечалось выше, использованное приближение справедливо в достаточно узком температурном интервале — это может быть, в лучшем случае, два-три десятка градусов от азотной температуры. Кроме того, umkehr-эффект сам сильно зависит от температуры, что не учтено. Следует отметить, что в области низких температур возможны и другие эффекты, которые нами также не учтены. Таким образом, полученные формулы справедливы только для той области температур, для которой кинетические коэффициенты постоянны. Отметим, однако, что полученные результаты в целом отображают реальное состояние, указывая путь, по которому нужно идти для достижения более глубокого охлаждения.

На рис. 3 дана принципиальная схема конструкции устройства гальванотермомангнитного охладителя, работающего в магнитном поле при температуре кипения жидкого азота и ниже. Предлагаемый охладитель содержит ветви 7 и 8, которые исполнены в виде прямоугольных параллелепипедов

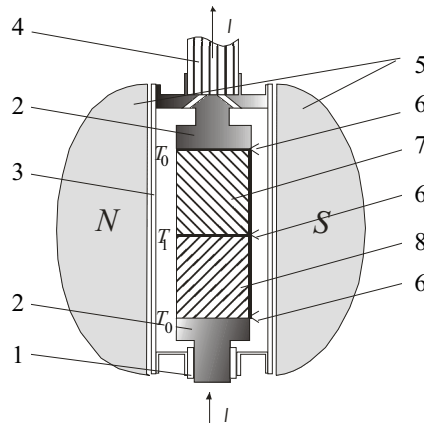


Рис. 3. Принципиальная схема ГТМ-устройства для охлаждения элементов микроэлектронной техники:

1 — диэлектрическая втулка; 2 — электродподводы; 3 — корпус устройства; 4 — трубка для вывода проводов термопар и создания вакуума; 5 — постоянный магнит; 6 — термопары; 7, 8 — ветви ГТМ ХЭ

длиной  $a$  и размерами  $b \times c$  в поперечном сечении из одного и того же монокристаллического висмута. Направление длин ветвей совпадает с направлением, которое ориентировано под углами  $10^\circ$  к бинарной и  $80^\circ$  к бисекторной осям в бинар-бисекторной плоскости, — это направление соответствует максимуму разности  $\alpha(-B) - \alpha(B)$ . Ветвь 8 повернута вокруг своей длины на угол  $180^\circ$  и электрически соединена с ветвью 7 торцевыми гранями.

Противоположные торцевые грани ветвей 7 и 8 присоединены к термостатированным при температуре кипения жидкого азота  $T_0$  электропроводам 2, через которые пропускается рабочий ток. Верхний электропровод вместе с трубкой 4 прикреплен к корпусу устройства 3, а нижний проходит через диэлектрическую втулку 1, которая электроизолирует его от корпуса 3 и, одновременно, дает возможность демпфировать температурные изменения геометрических размеров ветвей 7, 8 и электропроводов 2. Корпус 3 вместе с ветвями 7, 8 и электропроводами 2 расположен между полюсами постоянного магнита 5. Трубка 4 служит для вывода проводов термопар и, одновременно, создания вакуума во внутренней полости устройства для создания адиабатической изоляции ГТМ ХЭ. Все устройство погружается в сосуд Дьюара с жидким азотом. Контроль температур  $T_1, T_0$  осуществляется с помощью термопар 6.

При  $B=1$  Тл для висмутовых ветвей указанной выше ориентации и токе 16,5 А экспериментально

было получено снижение температуры от  $T=80$  К примерно на 30 К, т. е. можно говорить о неплохом согласии теории и эксперимента. Таким образом, описанное устройство можно рекомендовать для охлаждения элементов микроэлектроники, а также ИК-техники.

Рассмотренные ГТМ ХЭ особенно эффективны в случае высокой термомагнитной добротности материала ветвей. Они пригодны в качестве охладителей для различного рода микросенсоров, приемников ИК-излучения [2], что приводит к значительному понижению уровня их шумов.

\*\*\*

При токах больших, чем обычно используемые в гальванотермомагнитных холодильных элементах, umkehr-эффект приводит к эффекту Томсона, который сильно влияет на перепад температуры, существенно увеличивая его, что привело к возможности создания устройства для охлаждения элементов микроэлектронной аппаратуры.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ащеулов А. А., Охрем В. Г., Охрем Е. А. Продольные гальванотермомагнитные холодильники // Термоэлектричество.— 2002.— № 4.— С. 28—37.
2. Формозов Б. Н. Проблемы создания системы глобального дистанционного зондирования Земли в ИК-диапазоне // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2004.— № 1.— С. 3—6.

## ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

## Девятая международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники» ПЭМ-2004

# ПЭМ-2004

12—17 сентября 2004 г.  
г. Таганрог

## Тематика секций:

- материалы электронной техники;
- технология микроэлектроники;
- микросхемотехника;
- проектирование приборов и микросхем;
- твердотельная электроника СВЧ;
- оптоэлектроника;
- микросистемная техника;
- нанoeлектроника;
- планирование, менеджмент и экономика в электронике.

## Адрес оргкомитета:

347928, Россия, Ростовская обл., г. Таганрог,  
ГСП-17А, пер. Некрасовский, 44, ТРТУ,  
кафедра РТЭ

Тел.: (86344) 37-16-29  
E-mail: pem@fep.tsure.ru  
<http://www.fep.tsure.ru/win/conferenc/index.html>