

иглой. Глубина взятия менялась в пределах 0.5—0.75 от высоты и не влияла на результат. Величина пробы была мала ( $\sim 0.05 \text{ см}^3$ ), чтобы не вызывать смещения концентрации в цилиндре. Анализ концентрационного изменения пробы производился с помощью измерения на рефрактометре *RL2*. Точность такого измерения составляла  $\sim 0.5 \%$ . Были проведены две серии экспериментов с концентрациями 10 : 90 и 20 : 80 смеси спирт—вода.

В обоих случаях наблюдалось обогащение спиртом в осевой части цилиндра. При этом в первом случае среднее значение концентрации было  $10.7 \pm 1.1 \%$ , а во втором  $22.5 \pm 2.2 \%$ . Данный эффект, на наш взгляд, представляет собой термодиффузию в эффективном «температурном» поле, созданном периодическими изменениями  $T$ . Были также проведены сравнительные эксперименты с фиксированной средней температурой. При этом эффект разделения не был обнаружен.

### Литература

- [1] Гелмуханов Ф. Х., Шалагин А. И. Письма в ЖЭТФ, 1979, т. 29, № 12, с. 773—776.
- [2] Дыхне А. М., Старостин А. Н. ЖЭТФ, 1980, т. 79, № 4, с. 1211—1228.
- [3] Дыхне А. М., Паль А. Ф., Письменный В. Д. и др. ДАН СССР, 1982, т. 262, № 2, с. 331—335.
- [4] Дыхне А. М., Паль А. Ф., Письменный В. Д. и др. ЖЭТФ, 1985, т. 88, № 6, с. 1976—1983.
- [5] Бункин Ф. В., Ляхов Г. А., Шипилов К. Ф., Шмаонов Т. А. Письма в ЖЭТФ, 1982, т. 35, № 6, с. 251—253.
- [6] Бункин Ф. В., Ляхов Г. А., Шуман О. Б. Письма ЖТФ, 1982, т. 8, № 17, с. 1048—1051.
- [7] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 795 с.
- [8] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика. М.: Наука, 1973. 207 с.

Поступило в Редакцию  
11 мая 1987 г.

Журнал технической физики, т. 58, в. 9, 1988

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА ТЕРМОЭЛЕМЕНТЕ БОЛЬШОЙ ДЛИНЫ

*В. П. Бабин, Е. К. Иорданишвили, М. Б. Набиев, Х. О. Олимов*

Известно [1], что метод нестационарного термоэлектрического охлаждения (НТО) применяется для охлаждения малоинерционных объектов пленочного типа, как например, приемники инфракрасного излучения, ПЗС матрицы и др. Суть метода заключается в запаздывании поступления на холодный спай избытка джоулева тепла из массы термоэлемента (ТЭ) при токах, существенно больших оптимального [2].

Эффективность НТО определяется двумя основными параметрами: глубиной охлаждения  $\Delta T$  и временем поддержания низкой температуры  $\Delta \tau$ . В последние годы появились работы, дающие возможность повышения обеих характеристик НТО ( $\Delta T$  и  $\Delta \tau$ ). Это введение металлических вставок в объем ветвей ТЭ [3], конструирование ТЭ в виде конуса [4, 5], введение в объем ветвей плавких вставок [6].

Существенным тормозом повышения  $\Delta T$  во всех режимах НТО является контактное сопротивление холодного спая  $r_k$  [7, 8].

В [9] исследовался режим экстремального тока, являющийся наиболее эффективным с точки зрения получения максимальных  $\Delta T$ . Основным тормозом для получения рекордных  $\Delta T$  являлось вышеупомянутое  $r_k$ .

При этом аналитически было показано [9], что тормозящее влияние  $r_k$  уменьшается при увеличении продолжительности процесса НТО в рамках модели полупространства [9, 10]. Вместе с тем известно, что инерционность ТЭ (т. е. время выхода его в режим) пропорциональна квадрату длины его ветвей. Поэтому переход к большой продолжительности процесса НТО и, следовательно, эксперименты на «длинных» ТЭ с ветвями существенно большими, чем в предыдущих исследованиях, должны дать значительный выигрыш в  $\Delta T$ . Дело в том, что при больших длинах ТЭ процессы протекают медленнее и относительная роль джоулевых тепловыделений в приконтактном слое меньше.

Для исследования были изготовлены ТЭ с ветвями длиной  $l=102$  мм полуцилиндрической формы. В качестве материала ветвей использовались зонно-плавленные кристаллы  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{—Sb}_2\text{Te}_3$  ( $P$ -тип) и  $\text{Bi}_2\text{Te}_3\text{—Bi}_2\text{Se}_3$  ( $n$ -тип).

Средние значения физических параметров ТЭ при комнатной температуре: коэффициент термоэдс  $\alpha=210 \cdot 10^{-6}$  В/К, удельная электропроводность  $\sigma=950$  (Ом·см) $^{-1}$ , удельная теплопроводность  $\kappa=1.45 \cdot 10^{-2}$  Вт/см·К. При этом термоэлектрическая добротность  $Z=\alpha^2/\kappa=2.9 \cdot 10^{-3}$  К $^{-1}$ . Для коммутации использовался припой (96 % Bi—4 % Sb) с температурой плавления 290 °С и припой (58 % Bi—42 % Sn) с температурой плавления 139 °С. Для снижения теплопритока на боковые поверхности ТЭ использовался экран, и эксперимент проводился в вакууме со степенью разрежения  $5 \cdot 10^{-4}$  Торр.

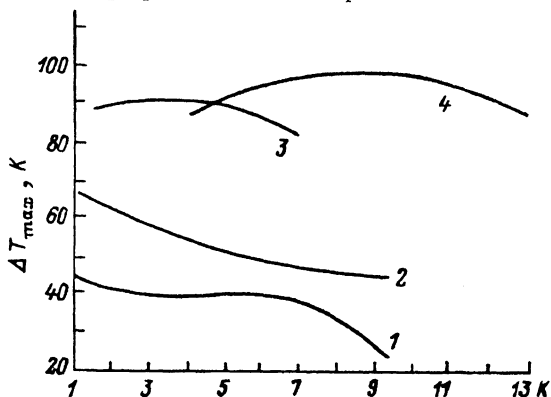


Рис. 1. Зависимость максимального перепада температур  $\Delta T_{\max}$  от величины кратности тока  $K$ .

Температура измерялась хромель-копелевыми термопарами с диаметром проволоки 0.2 мм. Измерительный блок включал в себя трехканальный усилитель ТОПАЗ-2 и световой лучевой осциллограф Н-700.

Расчетно-экспериментальным путем была подобрана температура экрана  $t_3=-2$  °С, имитирующая адиабатическую изоляцию боковых поверхностей ТЭ в диапазоне температур 300—230 К. Учитывая практическое отсутствие натеканий тепла за счет теплопроводности в вакуумированной среде, ее выбрали близкой к средней температуре термоэлемента.

Эталоном для сравнения являлся ТЭ длиной 15 мм, обладавший той же термоэлектрической добротностью  $Z$ . У двух исследуемых ТЭ, основного ( $l=102$  мм) и эталонного ( $l=15$  мм), коммутационные слои с пластинами были одинаковы, одинаково также было их контактное сопротивление ( $r_k=5 \cdot 10^{-5}$  Ом·см $^2$ ).

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

1. Режим прямоугольного импульса. На рис. 1 представлены зависимости  $\Delta T_{\max}$  от кратности ( $K$ ) импульсного тока  $I$  по отношению к оптимальному току  $I_{\text{опт}}$ . Без защитного экрана с ростом амплитуды тока (величины  $K$ ) на основном ТЭ  $\Delta T$  падает, не согласуясь с теорией НТО для адиабатического ТЭ (кривая 1). При наличии экрана с имитирующей температурой  $t_3=-2$  °С зависимость  $\Delta T$  от  $K$  выравнивается в соответствии с теорией [10] для адиабатического ТЭ (кривая 2).

2. Комбинированный режим (оптимальный ток+прямоугольный токовой импульс). Для сравнения эффективности основного образца ( $l=102$  мм) с эталонным ( $l=15$  мм) в комбинированном режиме [2, 10] на рис. 1 приведены кривые 3, 4. Видно, что у основного ТЭ  $\Delta T_{\max}$  существенно выше, чем у эталонного. При этом у основного ТЭ оптимальная кратность ( $K \approx 10$ ) значительно выше, чем у эталонного ТЭ ( $K \approx 3$ ), так как с увеличением длины  $l$  уменьшается отрицательное влияние  $r_k$ .

3. Комбинированный режим со ступенчатым импульсом тока. Эффективность режима ступенчатого изменения тока основана на принципе суперпозиции [10].

В эксперименте соотношение «амплитуда  $\Delta T_i$ —продолжительность импульса тока  $\Delta \tau_i$ » подбиралось экспериментально, а именно: при достижении максимума  $\Delta T$  предыдущего импульса добавлялся следующий токовый импульс и т. д.

Вначале основной ТЭ выводился в стационарный режим. Время выхода в стационарный режим при  $l=102$  мм составляло 260—290 мин (около 5 ч). На рис. 2 изображена синхронная зависимость  $\Delta T_{\max}$  при ступенчатом изменении тока. Как видно, целесообразным оказалось проведение всего четырех импульсов тока, поскольку четвертый (последний) импульс давал

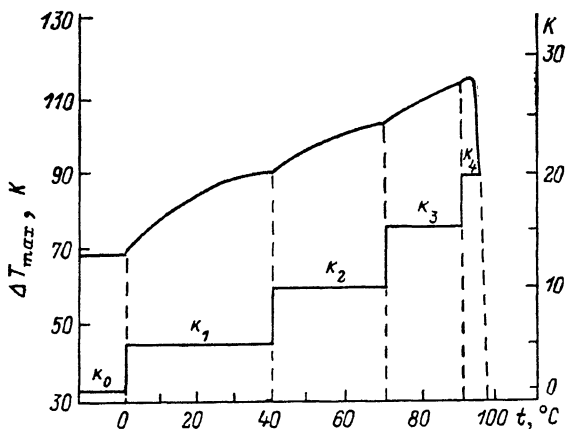


Рис. 2. Зависимость общего перепада температур  $\Delta T_{\max}$  от времени в режиме многоступенчатого изменения тока  $K=J/J_{\text{опт}}$ ,  $t$  — текущее время.

приращение  $\Delta T$  всего в 2 °С. Общая разность температур, добавленная в результате наложения на оптимальный ток четырех импульсов, составила 45 К.

Суммарная разность температур четырехступенчатого охлаждения в комбинированном режиме  $\Delta T_{\max} = 114$  °С. Указанный результат, по-видимому, можно считать на сегодняшний день предельным для однокаскадного термоэлемента с современным уровнем термоэлектрической эффективности  $Z$ .

#### Литература

- [1] Field R. L., Blum H. A. Energy Conv., 1979, v. 19, N 3, p. 159—165.
- [2] Сильбанс Л. С., Федорович Н. А. ЖТФ, 1958, т. 28, № 3, с. 489—492.
- [3] Бабин В. П., Иорданишвили Е. К., Кодиров А. А. Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО, 1985, т. 51, № 1, с. 106—112.
- [4] Бабин В. П., Иорданишвили Е. К., Грязнов О. С. и др. В кн.: Физика полупроводниковых первичных преобразователей, их применение для теплофизических измерений. Ташкент, 1984, с. 94—103.
- [5] Грязнов О. С., Иорданишвили Е. К., Кодиров А. А. ИФЖ, 1984, т. 47, № 6, с. 1018—1019.
- [6] Бабин В. П., Иорданишвили Е. К., Кайданов А. И. и др. Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО, 1985, т. 52, № 2, с. 60—68.
- [7] Бабин В. П., Иорданишвили Е. К. ЖТФ, 1972, т. 12, № 1, с. 227—228.
- [8] Иорданишвили Е. К., Малкович Б. Е.-Ш., Хазанович И. И. ИФЖ, 1971, т. 21, № 4, с. 632—638.
- [9] Иорданишвили Е. К., Малкович Б. Е.-Ш., Вейц Н. Н. ИФЖ, 1972, т. 22, № 2, с. 220—226.
- [10] Иорданишвили Е. К., Малкович Б. Е.-Ш. ИФЖ, 1972, т. 23, № 3, с. 498—505.

Всесоюзный научно-исследовательский институт источников тока  
Отделение в г. Ленинграде

Поступило в Редакцию  
22 мая 1987 г.  
В окончательной редакции  
28 марта 1988 г.

#### ВКР ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ХеСІ ЛАЗЕРА В ПАРАХ СВИНЦА

И. М. Исаков, В. И. Немержуцкий

Лазеры на моногалогенидах инертных газов являются в настоящее время самыми мощными и эффективными источниками когерентного излучения в ультрафиолетовом диапазоне. Вместе с тем область их приложений может быть значительно расширена, если использовать