

Оптимизация способа подбора ветвей термоэлементов по максимальной термодинамической эффективности термопары

Д-р техн. наук Т.А. ИСМАЙЛОВ, д-р техн. наук М.Г. ВЕРДИЕВ, канд. техн. наук О.В. ЕВДУЛОВ
Дагестанский государственный технический университет

The problems of optimum selection of arms of a thermal element in a thermocouple are considered. A new method of measurement of the relationship $\Delta T = f(I)$ is proposed. According to the taken relationships under the conditions of the maximum refrigerating capacity, the optimum values of the currents for the given geometrical dimensions of the arms of thermal elements are determined. The optimum selection of arms of types P and N for the thermal elements is carried out by the maximum of the relationships $\Delta T = f(I)$ for both types of the arms, with similar current volumes and with their similar geometrical dimensions, or by means of the corresponding change of geometrical dimensions of the arms of types P or N to ensure equal values of currents in both arms (with real maximum temperature drops).

Для достижения максимальной термодинамической эффективности термопары при расчете и проектировании термоэлектрических охлаждающих устройств и генераторов электрической энергии необходимо подбирать полупроводниковые ветви p и n типов для единичных термоэлементов с наиболее оптимальными физическими и геометрическими характеристиками.

В практике термоэлектрического приборостроения используется способ подбора ветвей p и n типов по обеспечиваемому ими максимальному перепаду температур. Изготавливают ветви p и n типов, составляют термопары путем последовательного сочетания каждой ветви, например p типа со всеми ветвями n типа при их одинаковых геометрических размерах, затем снимают зависимости перепада температур ΔT от тока питания I и определяют максимальный перепад температур ΔT_{\max} и оптимальное значение тока $I_{\text{опт}}$ [2]. Известный способ получения зависимости $\Delta T = f(I)$ состоит в следующем [1]. Термоэлемент, изготовленный из произвольно взятых ветвей p и n типов, устанавливают на термостатируемой подложке. На горячий и холодный спаи термоэлемента помещают термопары и все устройство размещают в вакуумируемом объеме. Температура горячего спаи термоэлемента стабилизируется на определенном уровне. Затем снимают зависимость перепада температур от величины тока питания $\Delta T = f(I)$ всех термоэлементов.

При этом считается, что на холодном спае термоэлемента теплопритоки равны нулю, что соответствует режиму максимальной холодопроизводительности термоэлемента. Из всех термоэлементов оптимальным считается тот, который обеспечивает максимальный ΔT .

Известная технология изготовления термоэлементов и соответственно термоэлектрических батарей не позволяет реализовать максимум термодинамической эффективности отдельного термоэлемента и термопары. На практике из вещества с термоэлектрической добротностью Z , равной $(3...4) \cdot 10^{-3}$ 1/К, в термоэлементах в лучшем случае реализуется $Z = (1,5...2) \cdot 10^{-3}$ 1/К, а в термопареях и того меньше. Это обусловлено тем, что конструкция известного П-образного классического термоэлемента и подбор ветвей в термоэлементе не являются оптимальными. Они могут обеспечить только компромиссный вариант максимума ΔT для обеих ветвей при их последовательном соединении при одних и тех же их геометрических размерах и равных значениях токов. Это основная причина снижения термоэлектрической добротности для термоэлемента и термопары по сравнению с ее значением в веществах, из которых они изготовлены. При существующей методике определения зависимости $\Delta T = f(I)$ максимум добротности вещества в термоэлементе может быть реализован только случайно, если у ветвей из этих веществ значе-

ния оптимальных токов будут одинаковыми при их одинаковых геометрических размерах.

Еще большее снижение добротности термоэлемента и соответственно термобатареи по сравнению с добротностью веществ, из которых изготовлены ветви, обусловлено следующим.

Эффект Пельтье — по сути это поверхностный эффект, который возникает на границе контакта двух разнородных материалов на глубине нескольких единиц длины свободного пробега носителей с каждой стороны контакта. Суммарное количество теплоты, поглощаемое или выделяемое на поверхности контакта, есть функция с экстремумом, то есть эффект охлаждения (нагрева) достигает максимума при определенном оптимальном значении тока. Точнее, эффекты охлаждения или нагрева, возникающие на поверхности контакта и обусловленные одновременным действием всех термоэлектрических явлений и механизма теплопроводности, достигают экстремума при оптимальном значении плотности тока на поверхности контакта.

В классической конструкции термоэлемента (рис. 1, а) линии тока нормальны к поверхности контакта только в локальной его области и их плотность варьируется по сечению контакта, поэтому суммарный эффект достигает экстремума при компромиссном значении плотности тока на всей поверхности контакта. Этот фактор, снижающий добротность термоэлемента, может быть устранен при нормальном расположении поверхности контакта ко всем линиям тока, т. е. при равномерном их распределении по сечению и оптимальном количестве

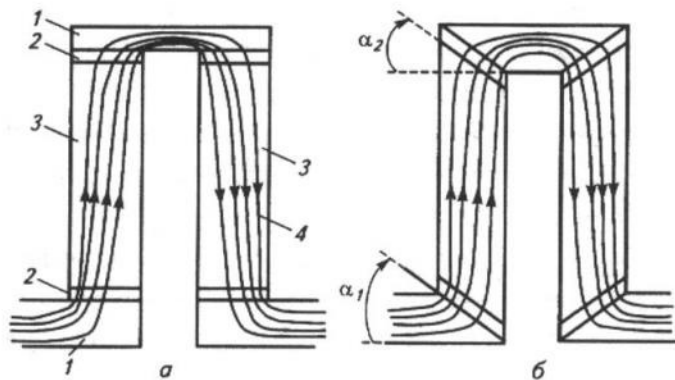


Рис. 1. Конструкция термоэлемента:

а — традиционная: 1 — коммутационные пластины;
2 — контактные припои; 3 — ветви термоэлемента;
4 — линии тока

б — увеличивающая добротность термоэлемента:
 α_1 и α_2 — углы среза ветвей термоэлемента

(рис. 1, б). В зависимости от соотношений теплофизических параметров веществ ветвей термоэлемента, его коммутационных пластин и контактных припоев углы среза α_1 и α_2 ветвей термоэлемента будут различными. Причем разница между α_1 и α_2 будет тем больше, чем сильнее зависимость теплофизических свойств материалов конструкции от температуры.

Следующим фактором, снижающим термоэлектрическую добротность термоэлемента, является сопротивление контактного припоя. Поэтому слой контактного припоя должен иметь минимальную толщину. Однако при классической форме термоэлемента (см. рис. 1) возникает технологическая проблема обеспечения равномерной и минимальной толщины слоев припоя на всех контактах термобатареи, состоящей из десятков и сотен термоэлементов, так как все погрешности изготовления ветвей и коммутационных пластин суммируются и компенсируются варьированием толщины коммутационного припоя.

Кроме того, термоэлектрическая добротность термоэлемента (и всей термоэлектрической батареи) снижается также за счет возникающих в нем механических напряжений, обусловленных биметаллическим эффектом, вызванным разностью температур на спаях термобатареи.

Вклад отмеченных явлений в снижение термоэлектрической добротности термоэлемента для ветвей p и n типов вещества различен, поэтому его практически невозможно учесть при разработке классической конструкции термобатареи.

Таким образом, подбор ветвей термоэлементов в термопару производить известным традиционным способом нерационально, так как это значительно снижает термоэлектрическую добротность термобатареи по сравнению с ее значением для веществ ветвей.

В настоящей работе предлагается новый способ определения зависимости $\Delta T = f(I)$ для ветви термоэлемента, в котором указанные недостатки устранены [3].

Схема экспериментальной установки для определения ΔT приведена на рис. 2.

Термостатируемая коммутационная пластина 1 контактирует с нижней торцевой поверхностью исследуемой ветви 2. Гибкая высокотеплопровод-

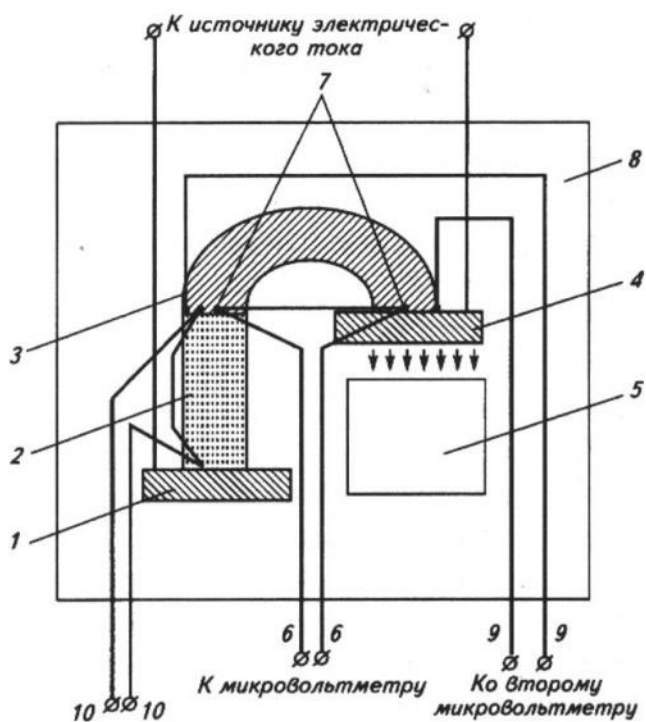


Рис. 2. Установка для снятия зависимости $\Delta T = f(I)$ в ветви термозлемента: 1 — коммутационная термостатируемая пластина; 2 — исследуемая ветвь термозлемента; 3 — гибкая медная шина; 4 — коммутационная пластина; 5 — холодильник; 6 — дифференциальная термопара; 7 — измерительные слои термопары 6; 8 — вакуумируемый объем; 9 — контактные провода, ведущие к вольтметру; 10 — дифференциальная термопара, спаи которой установлены на контактных поверхностях ветви 2

ная медная коммутационная шина 3 одним концом контактирует с верхней торцевой поверхностью исследуемой ветви 2, а вторым — с коммутационной пластиной 4, охлаждаемой холодильником 5 с регулируемой холодопроизводительностью. Измерительные спаи 7 дифференциальной термопары 6 установлены в местах контакта медной шины 3 с ветвью термозлемента 2 и коммутационной пластиной 4, и сигнал с них подается на компенсационный микровольтметр (на схеме не показан). Контактные провода 9 подключены ко второму микровольтметру (на схеме не показан). Все устройство помещено в вакуумируемый объем 8. Коммутационные пластины 1 и 4 соединены с регулируемым источником постоянного электрического тока через амперметр таким образом, чтобы на пластине 1 происходило тепловыделение, а на пластине 4 — теплопоглощение.

Снятие зависимости $\Delta T = f(I)$ проводится при пропускании электрического тока через систему

электрически последовательно соединенных коммутационной пластины 1, исследуемой ветви 2, коммутационной шины 3 и коммутационной пластины 4. С дифференциальной термопары 6 снимается сигнал, выставляется на нуль изменением температуры второй коммутационной пластины 4 (путем регулирования холодопроизводительности холодильника 5). При равенстве сигнала нулю с помощью дифференциальной термопары 10, спаи которой установлены в местах контакта исследуемой ветви, регистрируется перепад температуры по высоте ветви. По полученным данным строят зависимость $\Delta T = f(I)$.

Однако в данном случае ΔT не достигают своих максимумов из-за того, что в гибкой коммутационной шине имеет место выделение Джоулевой теплоты, определяемой соотношением

$$Q_{дж} = IU,$$

где I и U — значения силы тока и падения напряжения на гибкой шине 3, измеряемые амперметром и вторым микровольтметром, подключенным к контактным проводам 9, соединенным с концами гибкой шины.

На концах гибкой шины поддерживаются одинаковые температуры за счет холода, производимого в исследуемой ветви 2 и холодильнике 5. Считая теплофизические свойства материала гибкой шины постоянными по ее длине, полагаем, что Джоулева теплота, выделяющаяся в ней, поровну распределяется между ветвью термозлемента и холодильником при равенстве нулю перепада температур на концах шины. Об этом свидетельствует равенство нулю сигнала на выходе дифференциальной термопары. Следовательно, в этом случае холодопроизводительность Q_0 ветви термозлемента будет определяться из соотношения:

$$Q_0 = Q_{дж}/2 = IU/2.$$

Для снятия зависимостей $\Delta T = f(I)$ при нулевой холодопроизводительности исследуемой ветви 2 между ней и гибкой шиной 3 помещают коммутационную трехслойную пластину 7 (рис. 3), выполненную из меди-константана-меди, выполняющую роль дифференциальной термопары. Медные пластины коммутационной пластины 7 с помощью проводов из этого же материала подключают к компенсационному микровольтметру.

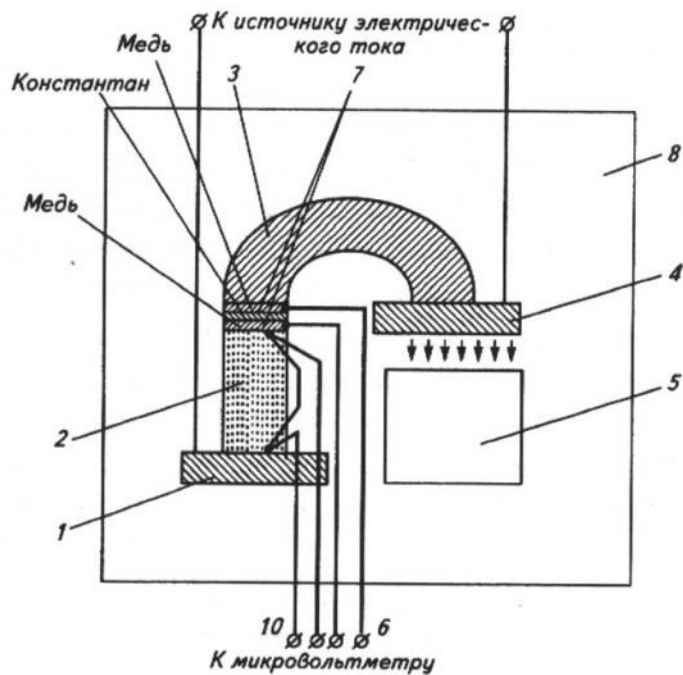


Рис. 3. Установка для снятия зависимости $\Delta T = f(I)$ при нулевой холодопроизводительности исследуемой ветви: 1, 4 – коммутационные пластины; 2 – исследуемая ветвь термоэлемента; 3 – гибкая шина; 5 – холодильник; 6, 10 – дифференциальные термопары; 7 – трехслойная коммутационная пластина

В этом случае выделяющаяся в гибкой шине теплота полностью отводится холодильником, так как при равенстве нулю сигнала с дифференциальной термопары, выполненной в виде трехслойной коммутационной пластины 7, перепад температур на константановой пластине, заключенной между медными, будет равен нулю. Следовательно, равна нулю тепловая нагрузка на исследуемую ветвь:

$$Q_0 = \lambda_k \Delta T_k / d_k = 0 \text{ при } \Delta T_k = 0.$$

Здесь λ_k , ΔT_k , d_k – соответственно коэффициент теплопроводности, перепад температур и толщина константановой пластины.

По снятым зависимостям $\Delta T = f(I)$ в режиме максимальной холодопроизводительности определяют оптимальные значения токов для заданных геометрических размеров ветвей термоэлементов. Затем оптимальный подбор ветвей p и n типов в термоэлемент осуществляют по максимумам зависимостей $\Delta T = f(I)$ для ветвей обоих типов при одинаковых значениях токов и одинаковых их геометрических размерах или путем соответствующего изменения геометрических размеров ветвей p или n типов для обеспечения равных значений токов обеих ветвей (при реальных максимальных перепадах температур). Использование холодильника 5 с регулируе-

мой холодопроизводительностью, приведенного в тепловой контакт с коммутационной пластиной 4, а также дифференциальной термопары, соединенной с микровольтметром, позволяет устранить ошибку в измерениях, связанную с наличием неконтролируемых теплопритоков в ветвь термоэлемента. А снятие зависимости $\Delta T = f(I)$ для каждой ветви термоэлемента в отдельности позволяет повысить термодинамическую эффективность термопары, а следовательно, и термобатареи в целом благодаря повышению точности подбора ветвей по току путем соответствующих изменений их геометрических размеров. Это в конечном итоге приводит к росту термоэлектрической добротности термоэлемента и всей термобатареи, приближая ее к значению добротности для веществ ветвей термоэлемента.

Проведенные по описанному способу испытания показали следующее. Из семи партий вещества p и семи партий вещества n типов подбирали в термоэлементы ветви путем исследования ΔT_{\max} . Это потребовало 27 ч на испытание 14 ветвей, составленных из 14 партий веществ p и n типов.

При традиционном способе подбора необходимо измерить ΔT_{\max} термоэлементов, составленных из 14 партий веществ по 2. Это составляет 49 термоэлементов, на исследование которых затрачивается более 90 ч.

Эффективность термоэлементов, ветви для которых подбирали с использованием нового способа снятия зависимости $\Delta T = f(I)$, оказалась в 1,2 – 1,25 раза выше, чем эффективность термоэлементов, ветви для которых подбирались по традиционному способу.

Другие факторы, способствующие снижению термоэлектрической добротности термобатареи по сравнению с ее значением для веществ, могут быть устранены путем изменения конструкции классического термоэлемента. Результатам исследования такой конструкции термоэлемента и термобатареи будет посвящена отдельная публикация.

Список литературы

1. Булат Л.П., Ведерников М.В., Валов А.П. и др. Термоэлектрическое охлаждение. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2002.
2. Покорный Е.Г., Щербина А.Г. Расчет полупроводниковых охлаждающих устройств. – Л.: Наука, 1969.
3. Патент РФ № 2280922. Способ снятия зависимости $\Delta T = f(I)$ для ветви термоэлемента / Исмаилов Т.А., Вердиев М.Г., Евдулов О.В.