

## **СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

РЭА — радиоэлектронная аппаратура  
ТТН — термоэлектрический тепловой насос  
ТХМ — термоэлектрическая холодильная машина  
ТЭ — термоэлемент  
ТЭБ — термоэлектрическая батарея  
ТЭГ — термоэлектрический генератор  
ТЭИТ — термоэлектрический интенсификатор теплопередачи  
ТЭМ — термоэлектрический модуль  
ТЭП — термоэлектрический преобразователь  
ТЭУ — термоэлектрическое устройство

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Исследование и разработка специальных средств для обеспечения интенсивного отвода теплоты от источников с высокими удельными тепловыми нагрузками, создание новых типов интенсификаторов теплопередачи и систем термостатирования, отвечающих специфическим требованиям, является важной народнохозяйственной задачей.

Функционирование, надежность и управление ряда приборов и устройств существенно зависит от систем обеспечения требуемых температурных режимов их работы. Как правило, работа таких приборов и устройств связана с необходимостью отвода значительных плотностей потоков (микроэлектроника, радиоэлектроника, лазерная техника, оптика и др.).

Существующие в настоящее время устройства и системы для отвода теплоты и термостатирования не всегда отвечают указанным требованиям и не для всех объектов могут быть использованы. Актуальность проблемы определяется необходимостью разработки и всестороннего исследования полупроводниковых термоэлектрических интенсификаторов теплопередачи (ТЭИТ), применение которых в различных областях науки и техники позволит решить задачу температурной стабилизации и управления режимами приборов и устройств с высокими тепловыми нагрузками.

В настоящее время у нас в стране и за рубежом уделяется большое внимание вопросу возможности использования полупроводниковых термоэлектрических устройств (ТЭУ) в промышленности. Решение указанной выше задачи возможно и целесообразно путем применения полупроводниковых термоэлектрических преобразователей (ТЭП).

Возможность определяется тем, что полупроводниковые ТЭУ могут быть использованы не только как термоэлектрические холодильные машины (ТХМ) или термоэлектрические тепловые насосы (ТТН), но и как ТЭИТ.

Целесообразность применения полупроводниковых ТЭУ обусловлена рядом преимуществ. К числу этих преимуществ следует отнести:

- возможность получения искусственного холода на основе использования эффекта Пельтье при отсутствии движущихся частей и холодильного агента;
- универсальность, т. е. возможность перевода ТЭУ из режима охлаждения в режим нагревания путем реверса постоянного тока;
- возможность работы при любой ориентации и при отсутствии сил гравитации;
- сочетание в едином устройстве таких традиционно отдельных элементов, как источник холода или тепла и теплообменный аппарат;
- простота устройства, компактность, взаимозаменяемость и возможность использования практически любой компоновочной схемы;
- высокая надежность;
- практически неограниченный срок службы;
- возможность форсировки по холодо- и теплопроизводительности;
- простота и широкий диапазон регулирования холодо- и теплопроизводительности.

Использование ТЭУ следует признать весьма перспективным в качестве ТЭИТ, которые, как показывает опыт использования, могут обеспечить интенсивный процесс переноса теплоты от нагреваемого объекта в окружающую среду по сравнению с другими традиционными способами.

Накопленный опыт по эксплуатации, надежности, работоспособности в специфических условиях, моторесурсу и другим технико-экономическим показателям подтверждает возможность широкого применения ТХМ и ТТН для различных объектов [2, 3, 6].

В монографии дана обоснованная классификация ТЭУ, учитывающая влияние таких факторов, как направление потока электрической энергии и температурного уровня объекта теплового воздействия относительно среды.

Размещение термоэлектрической батареи (ТЭБ) в потоке теплоты естественного направления определяет ее функционирование либо в режиме генератора с отводом электроэнергии потребителю, либо в режиме интенсификатора теплопередачи при отводе электроэнергии к ТЭБ от внешнего источника.

Изменение направления вектора потока теплоты в устройстве на противоположное направление естественной теплопередачи вследствие подвода электроэнергии необходимой полярности определяет ее функционирование либо в режиме теплового насоса с нагревом объекта до температуры большей, чем температура среды, либо в режиме холодильной машины с охлаждением объекта до температуры меньшей, чем температура среды.

Таким образом, отличительной особенностью полупроводниковых ТЭИТ является, во-первых, совпадение направления реализуемого в них потока теплоты с направлением потока естественной теплопередачи; во-вторых, потребление электроэнергии от внешнего источника, чем и обеспечивается собственно интенсификация теплопередачи. В зависимости от соотношения температур среды и объекта теплового воздействия последний либо охлаждается, либо нагревается.

Анализ возможного применения ТЭИТ в различных объектах позволяет классифицировать их на две основные группы: ТЭИТ контактного и проточного типа, при этом ТЭИТ контактного типа разделяются на два класса, когда объектом теплового воздействия является элемент или объем.

Для ТЭИТ проточного типа рассмотрена модель с сосредоточенными ТЭБ, а также предложена и всесторонне проанализирована тепловая схема ТЭИТ с рассредоточенными термоэлектрическими модулями (ТЭМ) и тепловыми мостиками. Для указанных вариантов ТЭИТ приведены математические модели и проведен анализ их эффективности с использованием численных методов решения.

# ГЛАВА 1. КРАТКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ ПРИБОРОСТРОЕНИЮ

## 1.1. Термоэлектрические явления и развитие техники

Термоэлектрические явления были обнаружены и исследованы более ста лет тому назад Зеебеком, Пельтье и Томсоном [149]. Исследуя возможность практического применения термоэлектрических эффектов, Альтенкирх в 1911 г. получил приближенные соотношения для тепловых насосов и генераторов [200]. Оценив эффективность этих устройств при использовании в них термоэлектрических элементов (ТЭ) из металлов (единственно известных в то время проводников), Альтенкирх указал на нецелесообразность использования металлов в качестве ветвей ТЭ из-за высокой теплопроводности и малых значений коэффициентов термоэлектродвижущей силы.

Однако к тому времени эффект Зеебека уже нашел применение для измерения высоких температур термопарами. Термопара из пластины с платинородием была предложена для этой цели Ле Шателье в 1886 г. [220]. Одиночные опытные образцы термоэлектрических генераторов (ТЭГ), построенных в тот период, находили только лабораторное применение, так как стоимость вырабатываемой ими электроэнергии намного превосходила стоимость электроэнергии, вырабатываемой оборудованием того времени.

Практическое использование полупроводниковых охлаждающих и нагревающих ТЭУ в промышленности и народном хозяйстве берет свое начало с разработки академиком А. Ф. Иоффе теории энергетических применений полупроводниковых ТЭ в начале 1950-х годов. Дальнейшее развитие теория энергетического применения термоэлектричества получила в трудах Л. С. Стильбанса, Е. К. Иорданишвили, В. С. Мартыновского, В. А. Наера, А. И. Бурштейна, Н. С. Лидоренко, Л. И. Анатычука, Н. В. Коломойца, Е. С. Курьлева, Е. А. Коленко, М. А. Каганова, Ю. Н. Цветкова, М. Р. Привина, А. Л. Вайнера, Т. А. Исмаилова, В. С. Семенюка и многих других, а также в работах зарубежных ученых Г. Голдсмита, Т. Хармана, П. Грея, Д. Макдональда, Е. Юсти и др.

В последнее время в России и за рубежом уделяется большое внимание вопросу создания ТЭУ различного назначения. Указанный интерес обусловлен существенными преимуществами ТЭУ.

К настоящему времени по термоэлектричеству накоплен большой теоретический и экспериментальный материал, разработано и внедрено огромное количество разнообразных аппаратов, устройств и приборов, основанных на применении эффекта Пельтье. По ряду направлений сведения систематизированы и опубликованы в монографиях [113, 117, 128, 129, 138, 149, 150, 175, 208, 213, 214, 222, 226, 231].

Достаточно полно разработаны методики расчета ТЭУ с постоянной и меняющейся вдоль ТЭБ температурой спаев [128, 133, 213, 224, 230], предложены графоаналитические способы расчета [222], а также численные методы с применением компьютеров [145, 146, 175].

Проанализированы режимы работы термоэлектрических охладителей и подогревателей — минимальной температуры холодных спаев, максимальной холодопроизводительности, максимальной энергетической эффективности, минимального тока при ограничении числа ТЭ и др. [121, 128, 143, 150].

Ряд исследований посвящен изучению характеристик ТЭБ при использовании их в качестве ТЭИТ и теплоизоляторов [151]. Исследованы вопросы влияния на работу и показатели ТЭУ пульсаций тока [144, 148], контактных электрических и тепловых сопротивлений [117], изоляционных прослоев [127, 219] и других факторов.

Широкие исследования проведены в области влияния теплообмена на энергетические и другие показатели охладителей [110, 120, 140, 157], интенсификации теплоотдачи [55, 156, 161, 162–167, 172, 227], разработки различных теплообменных систем [5, 141, 144, 225], в том числе с промежуточным теплоотводом [175]. Достаточно много работ посвящено оптимизации параметров ТЭУ [204, 210, 216, 229], повышению эффективности их использования [115, 124, 131, 160, 170, 181, 202, 228], рациональному выбору полупроводниковых материалов [115, 116, 149, 177, 223], оптимизации конструкции ТЭБ [115, 139, 169, 174].

Большой цикл исследований проведен по изучению динамических характеристик и переходных процессов в ТЭУ и нестационарных режимов работы ТЭ [119, 120, 140, 143, 207, 220], а также измерению теплофизических характеристик полупроводниковых материалов и ТЭБ [18, 19, 27, 42, 113]. Перспективы развития, рациональные области применения, новые направления в использовании термоэлектричества нашли отражение в работах [167, 168, 170, 171, 175, 176, 213]. Теоретические разработки подкреплены экспериментальными исследованиями [1–109], подтверждающими правильность сделанных выводов и аналитических решений. Широкое практическое применение ТЭУ в самых различных областях народного хозяйства [170, 171, 175, 213] потребовало проведения исследований по надежности [113], а серийное производство ТЭУ и ТЭБ — модулей для изучения закономерностей разброса термоэлектрических свойств полупроводниковых материалов и обоснования классов допусков на геометрические размеры ТЭ для учета в инженерных методах расчета [132, 199]. Для контроля качества выпускаемой продукции разработаны методы экспресс-контроля [207].

Однако дальнейшее развитие электронных компонентов требует появления новых типов охлаждающих приборов и устройств. Помимо охлаждающего эффекта Пельтье, а также повышения эффективности работы термоэлектрического устройства за счет изменения схемы питания, перспективным является безынерционный метод отвода тепла в виде излучения. Однако для отвода реальных количеств тепловой энергии требуется настолько высокая температура излучающей поверхности (энергия излучения прямо пропорциональна четвертой степени от температуры в соответствии с законом Стефана-Больцмана), что, безусловно, наступит тепловой пробой.

С появлением светоизлучающих полупроводниковых приборов наступила новая эра не только в оптоэлектронике, но и в термоэлектричестве. В светодиодах излучение возникает не за счет нагрева кристаллической решетки, а за счет рекомбинации электронов и дырок и излучения за счет разницы в энергии сво-

бодного электрона и электрона в составе атома после рекомбинации. В этом случае тепло не выделяется. Наоборот, появляется возможность дополнить известный эффект Пельтье в термоэлектрическом устройстве для получения эффективного охлаждения.

На основе светоизлучающего термоэлектрического эффекта можно создать широкий спектр полупроводниковых приборов: светодиоды, светотранзисторы, светотиристоры и т. д. При этом в этих приборах будет не только увеличена мощность за счет повышения степени охлаждения, но и увеличены проводимость и коэффициент усиления за счет вторичной фотонной проводимости.

Перспективным направлением развития ТЭУ является использование микро- и нанотехнологий, позволяющих реализовать тонкопленочные структуры с минимальными значениями потерь, обусловленных Джоулевыми тепловыделениями.

Кроме того, применение многослойных металлических электродов из различных материалов с разнесением в пространстве  $p$  и  $n$  компонентов позволяют повысить эффективность термоэлектрических устройств.

Применение оптических явлений, конструкционных и технологических решений при изготовлении термоэлектрических устройств позволяют создать не только новый тип охлаждающих термоэлектрических устройств, но и реализовать электронные схемы по энергосберегающим технологиям с малым уровнем тепловых потерь и высоким КПД, причем появляется возможность создания криогенных систем вплоть до возникновения сверхпроводящих эффектов при достижении абсолютного нуля по Кельвину.

Краткий обзор работ по термоэлектрической технике показывает, что накоплен достаточно большой теоретический и экспериментальный материал, позволяющий в настоящее время с достаточно высокой степенью точности проводить расчеты и проектирования ТЭУ различного назначения [44, 47, 80, 112–122, 152, 153, 209–231].

### **1.1.1. Конструкции термоэлектрических батарей и их применение в устройствах различного назначения**

Термоэлектричество за последние годы находит все большее применение в промышленности. При этом разработка различных устройств все чаще ведется на основе освоенных и выпускаемых промышленностью стандартных модулей. Имеется значительное число публикаций [112, 114, 115, 116, 130, 142, 154, 155, 179, 205], в которых содержатся сведения о параметрах ТЭМ. Данные, приведенные в работах [113, 122, 125, 152], характеризуют ранние тенденции в развитии термоэлектричества — упор на создание относительно мощных холодильников для массового потребителя. Холодопроизводительность этих модулей относительно велика и колеблется в пределах 1,2–4,0 Вт, модули высокоточные, размеры спаев —  $4 \times 4$ – $9 \times 9$  мм<sup>2</sup>, высота элементов — 3–5 мм. Главными причинами, определяющими столь значительные размеры термоэлементов и высокие значения токов питания, являлись технологические трудности, с которыми сталкивались разработчики при создании ТЭ относительно малых размеров.

Широкое применение в зарубежной практике получили ТЭМ, называемые фригисторами [225]. Ведущие зарубежные фирмы освоили и наладили серийное производство ТЭМ [224], которые оформлены как законченные конструктивные элементы, помещенные в защитные оправки и снабженные собственными токовыми выводами.

В работе [129] описана технология сборки ТЭМ, производимых в США. Отличительной чертой применяемой технологии является то, что используемые ветви одного типа проводимости располагаются в одном ряду, а их последовательное соединение осуществляется с помощью медных коммутационных пластин, ориентированных относительно ветвей ТЭ.

Французские фирмы осуществляют сборку ТЭМ из отдельных ветвей ТЭ с припаиванием к их торцам металлических пластин и последующей фрезеровкой или пропиловкой по схеме, обеспечивающей последовательное соединение ветвей.

Для ТЭБ, изготавливаемых у нас в стране, разрабатывается индивидуальная технология применительно к каждому прибору. В большинстве случаев отдельные ветви ТЭ соединяются друг с другом коммутационными пластинами с помощью ручного электропаяльника. Этот способ сборки сложен, трудоемок, требует высокой квалификации и может быть оправдан при изготовлении единичных экземпляров уникальных приборов.

В Государственном специализированном конструкторском бюро теплотехнического приборостроения (ГСКБ ТФП) разработана технология по созданию ряда серийных унифицированных ТЭМ типа «Селен» [113]. Параметры этих ТЭМ приведены в таблице 1.1.1.1. Разработанные модули типа ТЭМО предназначены для локального охлаждения и стабилизации температуры малогабаритных элементов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), основные характеристики которых приведены в таблице 1.1.1.2.

Таблица 1.1.1.1

**Характеристики ТЭМ типа «Селен»**

Модуль	Площадь горячих и холодных спаев модуля, мм <sup>2</sup>	Рабочее напряжение, В	Оптимальный ток, А	Холодопроизводительность, Вт	Число термоэлементов	Токовое сечение ветвей, мм <sup>2</sup>	Толщина модуля, мм	Масса, г
С1-16	56,2×67,0	1,65	86±9,0	16	15	10×10	7	116
С1-7	39,5×39,5	2,0	31±3,0	6,6	18	6×6	7	52
С3-4	32,0×27,5	2,3	14±1,5	4,0	21	4×4	7	27
С4-2	23,0×19,0	1,1	14±1,5	2,0	10	4×4	7	13
С5-1	19,0×14,5	0,65	14±1,5	1,0	6	4×4	7	8

Таблица 1.1.1.2

**Характеристики микромодулей типа ТЭМО**

Микро-модуль	Минимальная температура холодных спаев, °С	Максимальный ток, А	Максимальное напряжение, В	Максимальная холодопроизводительность, Вт	Площадь холодных спаев, мм <sup>2</sup>	Толщина модуля, мм
ТЭМО-2	-35	15	4	30	40×40	13
ТЭМО-3	-35	3,5	2,6	4,5	15×20	10

Продолжение табл. 1.1.1.2

Микро-модуль	Минимальная температура холодных спаев, °С	Максимальный ток, А	Максимальное напряжение, В	Максимальная холодопроизводительность, Вт	Площадь холодных спаев, мм <sup>2</sup>	Толщина модуля, мм
ТЭМО-4	–35	9	5,5	20	30×40	10
ТЭМО-5	–35	7,5	2,8	9	15×20	5,6
ТЭМО-6	–35	7,5	3,5	16	10×30	58

Решение прикладных задач, связанных с применением термоэлектрического охлаждения в научных исследованиях, технике, биологии, медицине и других отраслях народного хозяйства, в настоящее время требует создания миниатюрных и сверхминиатюрных ТЭМ.

Американской фирмой «NSJ» разработаны и выпускаются микромодули, характеристики которых приведены в таблице 1.1.1.3 [229].

Таблица 1.1.1.3

**Характеристики микромодулей, выпускаемых фирмой «NSJ»**

Микромодуль	Оптимальный ток, А	Максимальный перепад температур, К	Падение напряжения, В	Отводимая мощность от горячих спаев, Вт	Площадь холодных спаев, мм <sup>2</sup>	Толщина модуля, мм
1AB	1,0	60	1,0	2,5	4,75×6	4,5
1A	2,0	60	1,0	3,5	4×4	3,25
5AB	5,0	60	0,9	8,0	4×4	2,5
5A	5,0	60	1,1	10	7,75×10,7	4,5
5H	5,0	60	5,0	40	18,75×18,75	4,5
8H	7,0	60	5,5	65	17,9×19,25	3,0

В нашей стране разработана перспективная малооперационная технология изготовления микромодулей для охлаждения и термостабилизации элементов РЭА [120].

Микромодули содержат большое число ТЭ с размерами спаев 0,47–0,7 мм<sup>2</sup> и высотой 1,2–2,3 мм.

Ветви микромодулей изготовлены из прессованного или экструзированного полупроводникового вещества с добротностью  $Z = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ .

В таблице 1.1.1.4 и 1.1.1.5 приведены данные разработанных микромодулей.

Таблица 1.1.1.4

**Характеристики термоэлектрических микромодулей**

Микромодуль	Количество ветвей в микромодуле	Оптимальный ток, J, А	Рабочее напряжение, U, В	Холодопроизводительность, Q, Вт	Токовое сечение ветвей, мм <sup>2</sup>	Толщина микромодуля, δ, мм	Максимальный перепад, ΔT, К
I	64	2	3,88	7,76	0,84×0,84	1,2	61,6
II	64	1	3,62	3,64	0,84×0,84	2,2	61
III	16	0,5	0,708	0,354	0,69×0,69	2,2	56,2



Таблица 1.1.1.5

**Конструктивные параметры микроохладителей для элементов полупроводниковой квантовой электроники**

Тип микро-охладителя	Размеры микроохладителя, мм			Масса, г	Количество микро-элементов	Размеры термо-элемента	
	Теплопоглощающая поверхность	Тепловыделяющая поверхность	Высота			сечение	высота
МДС20-0,7-0,06	0,8×3,1	0,8×4	1,8	0,020	20	0,2×0,3	0,72
МДС20-0,6-0,06	0,8×3,1	0,8×4	1,7	0,019	20	0,2×0,3	0,63
МДС20-0,5-0,06	0,8×3,1	0,8×4	1,6	0,018	20	0,2×0,3	0,52
МДС20-0,4-0,06	0,8×3,1	0,8×4	1,5	0,017	20	0,2×0,3	0,43
МДС20-0,3-0,06	0,8×3,1	0,8×4	1,3	0,016	20	0,2×0,3	0,33
МДС20-0,2-0,06	0,8×3,1	0,8×4	1,2	0,015	20	0,2×0,3	0,22
МДС20-0,1-0,06	0,8×3,1	0,8×4	1,1	0,014	20	0,2×0,3	0,11

В ГСКБ ТФП также разработан прогрессивный технологический процесс, который позволил решить вопрос микроминиатюризации ТЭМ [114]. Созданный ряд микромодулей предназначен для обеспечения заданных температурных режимов радиоэлектронных схем, элементов ЭВМ, объектов медико-биологического исследования в тех случаях, когда мощность тепловыделения объектов невелика и по условиям работы необходим малый рабочий ток для питания ТЭУ. Характеристика ТЭМ, разработанных и серийно выпускаемых ГСКБ ТФП, приведена в таблице 1.1.1.6.

Таблица 1.1.1.6

**Характеристики микромодулей, разработанных в ГСКБ ТФП**

Микро-модуль	Количество термоэлементов	Габаритные размеры, мм	Сопротивление, Ом	Коэффициент преобразования, В/Вт	Масса, г
ТМО	8	5,1×5,1×1,4	0,7	0,045	0,8
ТБО	18	7,7×7,7×2,4	1,4	0,200	1,0
МТС-11	32	5,0×5,0×2,0	8,5±1,5	0,8	0,3

В таблицах с 1.1.1.7 по 1.1.1.15 приведены данные о модулях, выпускаемых отдельными организациями в России и за рубежом.

В качестве материала для ветвей термоэлементов в микромодулях в основном применяют многокомпонентные твердые растворы, удельная теплопроводность которых значительно ниже удельной теплопроводности составляющих их простых соединений при практически той же величине подвижности носителей, что приводит к повышению критерия эффективности. Системы

твердых растворов  $\text{Bi}_2\text{Fe}_3 - \text{Bi}_2\text{Se}_3$  и  $\text{Bi}_2\text{Fe}_3 - \text{Sb}_2\text{Fe}_3$  [104] используются соответственно в качестве отрицательной и положительной ветвей ТЭ. Указанные растворы впервые были синтезированы и исследованы в России. Наибольшей эффективностью в области умеренных температур обладает система, содержащая 80 мол.%  $\text{Bi}_2\text{Fe}_3$  и 20 мол.%  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  (*n*-тип) и 26 мол.%  $\text{Bi}_2\text{Fe}_3$  и 74 мол.%  $\text{Sb}_2\text{Fe}_3$  с добавкой 3% теллура (*p*-тип).

Таблица 1.1.1.7

**Характеристики термоэлектрических модулей типа ТЭМО**

Типоразмер микрохолодильника	Падение напряжения, $U$ , В	Потребляемая мощность $W$ , Вт	Максимальный перепад температуры, $\Delta T_{\text{max}}$ , К не менее		Максимальная холодопроизводительность (при температуре теплоотвода 300К) $Q_0$ Вт, не менее
			при температуре теплоотвода $T = 300 \text{ К}$	при температуре теплоотвода $T = 313 \text{ К}$	
ТЭМО-4-10	18,0±1,8	54,0±11,0	110	130	0,8
ТЭМО-3-10	3,0±0,3	9,0±1,8	90	110	0,8
ТЭМО-3-24	18,0±1,8	54,0±11,0	90	110	3,2
ТЭМО-2-10	1,0±0,1	3,0±0,6	75	90	0,8
ТЭМО-2П-10	3,6±0,4	3,0±0,6	75	90	0,8
ТЭМО-2-24	18,0±1,8	10,8±2,1	75	90	3,5
ТЭМО-2-49	0,9±0,1	54,0±11,0	75	90	11,5
ТЭМО-2-24	0,9±0,1	2,7±0,5	55	65	2,3
ТЭМО-1П-24	1,0±1,0	2,7±0,5	55	65	2,3
ТЭМО-1-49	3,9±0,3	10,0±2,0	55	65	10,0
ТЭМО-1-95	13,0±1,3	39,0±0,8	55	65	27,0

Таблица 1.1.1.8

**Параметры ТЭМ типа КР**

Количество термоэлементов	Модуль			
	КР-1	КР-1а	КР-16	КР-2
	63	63	63	128
Сечение ветвей, мм	13×8	13×8	13×8	6×10
Длина ветвей, мм	3,8	3,8	3,8	3,8
Габаритные размеры, мм	240×105×111	240×105×111	240×105×111	100×285×98
Масса, кг	3,4	3,0	3,4	3,8
Вид коммутации	Последовательная	Последовательная	Последовательная	Параллельно-последовательная
Тип радиатора	Паяный	Паяный	Литой	Паяный
Размеры радиатора, мм, высота × ширина × длина	50×14,5×17,5	50×14,5×17,5	50×14,5×17,5	—
Толщина ребер	0,5	0,5	1,0	—
Зазор между ребрами	1,0	1,0	0,9	—
Холодопроизводительность, Вт	110	110	120	130

Продолжение табл. 1.1.1.8

Количество термоэлементов	Модуль			
	КР-1	КР-1а	КР-16	КР-2
	63	63	63	128
Температура воздуха, подаваемого на спай:				
горячие	50	50	50	50
холодные	36	36	36	40
Холодильный коэффициент	0,55	0,55	0,66	0,7
Интенсивность отказов	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$

Таблица 1.1.1.9

## Параметры ТЭМ, выпускаемых фирмой «NSI» (США)

Модуль	$T_0$ , К	$I_{\text{онт}}$ , А	$\Delta T_{\text{max}}$ , К	$Q$ , Вт	$S_x$ , мм <sup>2</sup>	$S_T$ , мм <sup>2</sup>	$L_m$ , мм
1AB	300	1,0	60	2,5	4,75×6,0	—	4,5
2A	300	2,0	60	3,5	4×4	—	3,25
5A	300	5,0	60	8,0	4×4	—	2,5
5AB	300	5,0	60	10,0	8,75×10,7	—	4,5
5H	300	5,0	60	40,0	18,75×18,75	—	4,5
8H	300	7,5	60	65,0	17,5×19,25	—	3,0
5AB8	300	4,0	90	5,0	4,5×6,5	8,75×10,7	8,75
5H2	300	4,0	87	13,0	8,75×10,7	18,75×18,75	8,75
2H 89087	300	1,5	116	12,0	12,5×19	12,5×19	13,5
EK89828A	300	2,0	120	15,0	13,25×18,75	13,25×18,75	9,75
4H0259	300	4,0	120	25,0	17,0×19,0	17,0×19,0	12,75
5H28	300	4,0	113	15,9	4,5×6,5	18,75×18,75	13,5

Таблица 1.1.1.10

## Параметры ТЭМ, выпускаемых французскими фирмами

Модуль	$T_0$ , К	$I_{\text{онт}}$ , А	$\Delta T_{\text{max}}$ , К	$Q_{0\text{max}}$ , Вт	$R \cdot 10^3$ , Ом	$N_{TЭ}$	$S_0$ , мм <sup>2</sup>	$L_0$ , мм
PTI8/4	300	7	45	6,5	180	18	3×3	4
PTI8/9	300	18	50	20	75	18	4×4	4
PT60/21	300	12	50	42	320	60	35×35	4
8–2	373	3	100	1,8	230	—	—	—
8–2	298	3	75	1,35	—	—	—	—
при 40°C								
8–4	373	10	100	5,6	8	—	—	—
8–4	298	10	75	4,2	—	—	—	—
при 40°C								
31	298	9	75	19	—	—	—	—
8–17	373	60	100	32	12	—	—	—
8–17	298	60	75	24	—	—	—	—
при 40°C								
P8	373	3	80	20	—	—	—	—
P8	300	3	60	15	—	—	—	—

Таблица 1.1.1.11

## Параметры ТЭМ, выпускаемых фирмами Германии

Модуль	$T_0$ , К	$I_{\text{онт}}$ , А	$U_{\text{онт}}$ , В	$\Delta T_{\text{max}}$ , К	$Q_{\text{max}}$ , Вт	$g_{0\text{max}}$ , Вт/см	$Q_0$ , Вт/см
PT48/1	293	5,5	4,8	48	13,5	—	0,24
PT47/5	293	5,5	4,7	51	16,0	—	—

Продолжение табл. 1.1.1.11

Модуль	$T_0$ , К	$I_{\text{опт}}$ , А	$U_{\text{опт}}$ , В	$\Delta T_{\text{max}}$ , К	$Q_{\text{max}}$ , Вт	$g_{0\text{max}}$ , Вт/см	$Q_0$ , Вт/см
PT11/20	293	22	1,1	51	16,0	—	0,37
PT20/20	293	20	2,0	45	23,0	—	0,32
PT60/10	293	10	6,1	45	30,0	—	0,47
PT72/10	293	10	7,4	45	35,0	—	0,49
PKEI8 024	313	20	—	43	16,0	1,8	1,0
PKEI8 025	313	20	—	50	12,0	2,2	1,2
PKE36E026	313	9	3,5	63	23,0	—	1,6
PKEI8T026	313	18	1,8	63	23,0	2,5	1,4
Модуль	К <sup>-1</sup>	$R10^3$ , Ом	$N_{\text{ГЭ}}$	$S$ , мм <sup>2</sup>	$L$ , мм	$S_x$ , мм <sup>2</sup>	$L_m$ , мм
PT48/6	1,63	—	48	—	—	70×80	14
PT47/5	1,75	—	47	—	—	—	—
PT11/20	1,75	45	11	—	—	75×75	30
PT20/20	1,46	80	20	—	—	60×120	15
PT60/10	1,46	—	60	—	—	80×80	11
PT72/10	1,46	—	72	—	—	90×80	11
PKEI8 0240	1,2	90	18	5×5	5	40×40	8
PKEI8 0250	1,5	90	18	5×5	5	40×40	8
PKE36E0260	2,0	370	36	—	—	27,5×53	6,5
PKEI8T0260	2,0	90	18	5×5	5	40×40	7,5

Таблица 1.1.1.12

## Параметры ТЭМ фирмы «М.С.Р» (Англия)

Модуль	$T_0$ , К	$I_{\text{опт}}$ , А	$U_{\text{опт}}$ , В	$\Delta T_{\text{max}}$ , К	$Q_{0\text{max}}$ , Вт	$Z10^{-3}$ , К <sup>-1</sup>
TO404	373	3,2	16	55–80	1,2–1,7	1,0–1,9
TO606	373	3,1	36	55–80	3,0–3,8	1,0–1,9
TO818	373	2,0	36	55–80	7–10	1,0–1,9

Таблица 1.1.1.13

## Параметры ТЭМ фирмы «Frigistors Ltd» (Канада)

Модуль	$T_0$ , К	$I_{\text{опт}}$ , А	$U_{\text{опт}}$ , В	$\Delta T_{\text{max}}$ , К	$Q_0$ , Вт/см <sup>2</sup>	$Z10^{-3}$ , К <sup>-1</sup>	$N_{\text{ГЭ}}$	$S_x$ , мм <sup>2</sup>	$L_m$ , мм
I B-04-015-EI	300	15	0,36	63	1,8/2,0	2,2	4	9,5×19,1	6,3
I B-06-015-EI	300	15	0,56	63	1,7/2,1	2,2	6	9,5×28,6	6,3
I B-08-015-EI	300	15	0,75	63	1,0/2,1	2,2	8	19,1×29,1	6,3
I B-12-015-EI (12-15)	300	15	1,13	63	1,8/2,1	2,2	12	19,1×28,6	6,3
I B-32-015-EI (32-15)	300	15	3,0	63	1,7/2,0	2,2	32	38,1×38,1	6,3
I B-04-030-EI	300	30	0,36	63	0,81/1,0	2,2	4	19,1×38,1	7,9
I B-06-030-EI	300	30	0,56	63	0,88/1,0	2,2	6	19,1×57	7,9
I B-08-030-EI	300	30	0,75	63	0,88/1,0	2,2	8	38,1×38,1	7,9
I B-12-030-EI (12-30)	300	30	1,30	63	0,88/1,0	2,2	12	38,1×57,1	7,9
I B-04-060-EI	300	60	0,36	63	0,91/1,1	2,2	4	26,2×53,2	6,3
I B-06-060-EI	300	60	0,56	63	0,97/1,1	2,2	6	26,2×80,2	6,3

Продолжение табл. 1.1.1.13

Модуль	$T_0$ , К	$I_{\text{опт}}$ , А	$U_{\text{опт}}$ , В	$\Delta T_{\text{max}}$ , К	$Q_0$ , Вт/см <sup>2</sup>	$Z \cdot 10^{-3}$ , К <sup>-1</sup>	$N_{\text{ТЭ}}$	$S_x$ , мм <sup>2</sup>	$L_m$ , мм
I B-08-060-EI	300	60	0,75	63	0,91/1,0	2,2	8	53,2×53,2	6,3
I B-12-060-EI	300	60	1,13	63	0,91/1,0	2,2	12	53,2×80,2	6,3

Таблица 1.1.1.14

**Параметры ТЭМ предприятия «DKK Scharfenstein» (Германия)**

Мо- дуль	$T_0$ , К	$I_{\text{опт}}$ , А	$U_{\text{опт}}$ , В	$\Delta T_{\text{опт}}$ , К	$Q_0$ , Вт/см <sup>2</sup>	$Z \cdot 10^{-3}$ , К <sup>-1</sup>	$N_{\text{ТЭ}}$	$R \cdot 10^{-3}$ , Ом	$S_x$ , мм <sup>2</sup>	$L_m$ , мм
P22	—	—	—	—	—	—	—	20,5	—	—
P23	—	—	—	—	—	—	—	26,0	—	—
P24	343/313	35	1,1	70/80	0,53	2,0	8	30,0	50×60	8
P32	—	—	—	—	—	—	—	20,5	—	—
P33	—	—	—	—	—	—	—	26,0	—	—
P34	343	35	1,1	67	—	1,8	8	30,0	—	—
PE52	313	—	—	52	—	1,5	—	—	—	—
PE62	313	36	—	62	—	2,0	—	—	—	—
PE67	313	42	—	67	—	2,2	—	—	—	—

Таблица 1.1.1.15

**Параметры ТЭМ, выпускаемых в Чехии НИИ порошковой металлургии**

Мо- дуль	$T_0$ , К	$I_{\text{опт}}$ , А	$U_{\text{опт}}$ , В	$\Delta T_{\text{max}}$ , К	$Q_{0\text{max}}$ , Вт	$Z \cdot 10^{-3}$ , К <sup>-1</sup>	$N_{\text{ТЭ}}$	$S_x, S_r$ , мм <sup>2</sup>	$L_m$ , мм
T4-20	300	20–25	0,40	50–55	5,0	1,6–1,8	4	27×13	6
T8-20	300	20–25	0,80	50–55	10,0	1,6–1,8	4	27×27	6
T12-20	300	20–25	1,20	50–55	15,0	1,6–1,8	12	27×41	6

Отечественная промышленность освоила серийное производство термовещества различных марок *n*-типа и *p*-типа. Основные параметры и стоимость серийно выпускаемого термовещества приведены в таблице 1.1.1.16.

Таблица 1.1.1.16

**Технико-экономические показатели производимого в России термовещества**

Марка	Основные термоэлектрические параметры		
	Удельная теплопроводность, Ом <sup>-1</sup> см <sup>-1</sup>	Коэффициент термо-ЭДС, мкВ/град	Эффективность, град <sup>-1</sup>
ПВДХ-1	700–900	–175	1,8
ПВДХ-1	700–900	+205	2,8
ПВЭП-1	800–900	–180	2,0
ПВДП-1	800–900	–215	3,0
ТВЭХ	800–1200	–180	2,7
ТВДХ	800–900	+220	3,2

Полупроводниковое вещество, применяемое, например, для сборки микромодулей, указанных в таблицах 1.1.1.4 и 1.1.1.5, имеет разброс параметров до 10–12% по величине коэффициента термо-ЭДС и 8–14% по величине электропроводности. Указанный разброс параметров может в значительной степени снижать эффективность полупроводниковых ТЭБ.

Для микромодульных ТЭБ специального назначения весьма важным является вопрос повышения их эффективности. Применяемые в настоящее время методы [114] не всегда могут обеспечить решение этого важного вопроса.

В настоящее время для изготовления полупроводниковых ветвей используются следующие методы: метод порошковой металлургии, экструзии, литье с направленной кристаллизацией и вытягивание из расплава. В большинстве случаев пользуются методом порошковой металлургии с холодной или горячей прессовкой образцов.

Применение ТЭМ можно оценить на примере некоторых отраслей техники. В радиоэлектронной и приборостроительной промышленности термоэлектрическое охлаждение нашло широкое применение благодаря возможности создания миниатюрных охлаждающих устройств, согласующихся с охлаждаемыми объектами как по габаритным размерам, так и по номиналам тока питания. В радиоаппаратостроении, например, это позволяет увеличить мощность электронной аппаратуры и повысить плотность монтажа [76]. В [134, 135, 147, 184] приведены характеристики модулей для статирования температуры диодов и охладителей транзисторов.

Лабораторные микрохолодильники, испытательные камеры и термостаты на ТЭБ перспективны при транспортировке и исследованиях различных объектов в полевых условиях [170], а также в космосе [209] благодаря их надежности и простоте управления.

В медицине термоэлектрическое охлаждение используется в криотерапии и криохирургии [111, 201, 206], а также при физиологических исследованиях [57], благодаря быстрдействию и возможности реверсирования теплового воздействия простым изменением полярности питающего тока.

В судостроении, на автомобильном и железнодорожном транспорте термоэлектрическое охлаждение завоевывает все новые позиции, особенно в системах кондиционирования воздуха в связи с высокой надежностью, хорошими массогабаритными показателями и отсутствием токсичных хладагентов, что имеет важное значение в условиях автономности и ограниченности рабочих объемов [53, 69].

Создание бытовых холодильников являлось одним из ранних направлений практического применения термоэлектрического охлаждения, хотя сейчас они не имеют широкого распространения из-за высокой стоимости и малой экономичности. Из термоэлектрических охлаждающих приборов бытового и торгового назначения можно отметить, например, многочисленные конструкции льдогенераторов, использующих для оттаивания льда кратковременное включение тока обратной полярности [49, 52].

Важной особенностью термоэлектрических охладителей является их конструктивная пластичность. Требуемую холодопроизводительность можно обеспечить одной или несколькими ТЭБ, которые устанавливаются вместе или рассредоточиваются в соответствии с конструкцией и формой объекта.

В связи со все возрастающим спросом на ТЭБ во многих странах налажено их промышленное изготовление, причем градация ТЭБ направлена на обес-

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)