

Окончание. Начало в № 12`2009

Современные решения термоэлектрического охлаждения для радиоэлектронной, медицинской, промышленной и бытовой техники

Петр ШОСТАКОВСКИЙ
info@kryotherm.ru

Первая часть статьи содержала краткий экскурс в историю термоэлектричества и описание основных физических процессов, протекающих в термоэлектрических модулях (ТЭМ). Рассматривая наиболее распространенные варианты их конструктивного исполнения, были представлены области, в которых имеются термоэлектрические охлаждение и нагрев имеют значительные, а в некоторых случаях — абсолютные преимущества.

Термоэлектрические системы охлаждения

Построение современных лазерных, оптических, радиоэлектронных систем немислимо без применения охлаждающих и термостатирующих систем на базе современных ТЭМ. Надежность и ожидаемый ресурс наработки на отказ электронного оборудования и приборов обратно пропорциональны температуре компонентов, входящих в состав системы. Уменьшение рабочей температуры компонентов оборудования и приборов соответствует экспоненциальному увеличению их надежности и времени наработки на отказ. Следует отметить, что увеличение теплового рассеяния в отдельных силовых электронных компонентах при одновременном уменьшении их конструктивных размеров неизбежно влечет за собой необходимость точного расчета охладительной системы, гарантирующей сохранение заданных поставщиком интервалов рабочих температур при самых неблагоприятных внешних температурных воздействиях.

Термопара (контакт двух разнородных металлов) в том виде, в каком она была использована в знаменитых опытах Пельтье, не имеет практического значения для энергетических применений: для эффективного охлаждения необходимо развернуть рабочую поверхность. Следует отметить, что конструкция термоэлектрического модуля, представленная ранее, будет работать в первый момент. Джоулево тепло равномерно выделяется в термоэлектрических элементах и равномерно прогревает систему. Это негативно сказывается на процессе охлаждения. Со всей очевидностью, ТЭМ не может быть применен без соответствующего устройства отвода

тепла. В идеальном случае необходимо стабилизировать температуру горячей стороны модуля со значением, близким к температуре окружающей среды. Таким образом, применение ТЭМ всегда связано с использованием того или иного радиатора, который позволяет сбросить не только тепло, перекачиваемое ТЭМ с холодной стороны, но и джоулево тепло, выделяемое в ТЭМ при протекании через него электрического тока.

Важнейшим преимуществом использования ТЭМ совместно с эффективной системой сброса тепла с горячей стороны модуля является возможность обеспечить охлаждение объекта до температуры ниже окружающей среды, при этом, в случае правильного расчета, обеспечивается не только компенсация обратного натекания тепла через тепловую изоляцию, но и отвод тепла, излучаемого объектом. Твердотельная, герметичная конструкция теплового насоса на основе ТЭМ позволяет отводить тепло из герметично закрытых объемов.

Исходные данные для расчета термоэлектрической системы охлаждения

Прежде чем приступить к конструированию термоэлектрической системы охлаждения, инженер должен быть готов ответить на следующие вопросы:

- При какой температуре окружающей среды охлаждаемый объект будет эксплуатироваться.
- Какое количество тепла должно быть отведено от охлаждаемого объекта.
- Насколько важна скорость выхода на режим при включении и скорость реакции на изменения температуры охлаждаемого объекта.

- Каков интервал рабочих температур и как быстро он может меняться во времени.
 - Каков уровень натекания тепла к охлаждаемому объекту за счет теплопроводности, конвекции и/или радиации.
 - Какая поверхность и объем доступны для ТЭМ и для радиатора.
 - Какая электрическая мощность доступна для работы ТЭМ.
 - С какой точностью необходимо поддерживать температуру охлаждаемого объекта.
 - Какова максимально допустимая температура радиатора во время работы.
- ТЭМ в аппаратуре может эксплуатироваться в различных режимах:
- Режим включения-выключения (для некоторых типов модулей также возможен режим смены полярности, позволяющий сократить время переходного цикла). Данный режим в простейшем случае реализуется с помощью термореле различных конструкций.
 - Режим постоянного включения (наиболее благоприятный с точки зрения надежности при правильном выборе типа ТЭМ и режимов его работы).
 - Режим высокоточного поддержания температуры, обеспечиваемый контроллером температуры и датчиком (термистором). Контроллеры поставляются многими российскими и зарубежными компаниями и имеют универсальное или специализированное для ТЭМ назначение. Российские заказчики очень часто самостоятельно разрабатывают схемные решения для высокоточного управления ТЭМ, при этом используются микроконтроллеры и специализированные микросхемы (например, компании Linear Technology LTC1923 или MAXIM MAX1978/MAX1979), предназначенные

для управления ТЭМ в режимах охлаждения и нагрева (биполярный режим).

Распределение температур внутри термоэлектрической системы охлаждения

Ранее было отмечено, что термоэлектрический эффект Пельтье является поверхностным, при этом при пропускании электрического тока определенной величины одна поверхность ТЭМ охлаждается, а другая нагревается. На рис. 1 изображен поперечный срез простейшей термоэлектрической системы охлаждения, состоящей из ТЭМ с термоэлектрическими элементами (1) и элементами их коммутации на керамических пластинах (2). Горячая и холодная стороны модуля снабжены радиаторами (5 и 4 соответственно), а также учтена теплопроводящая паста, обеспечивающая наилучший тепловой контакт поверхностей модуля с радиаторами. С рисунком совмещена эпюра распределения температур внутри системы. Эпюра показывает, что максимальная разность температур достигается на коммутационных спаях холодной и горячей стороны внутри модуля (T_{cj} и T_{hj}), на внешней поверхности модуля разность температур будет меньше на величину тепловых потерь в керамике (весьма малых, но имеющих значение при больших тепловых потоках).

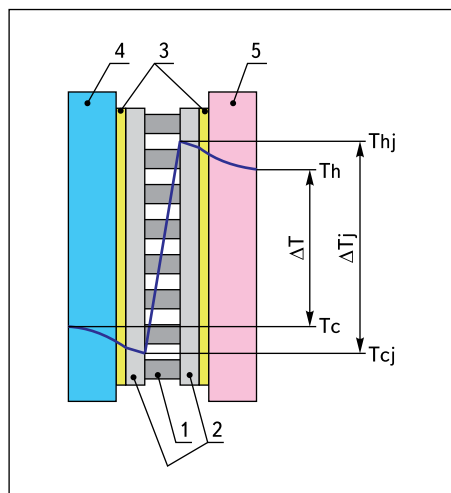


Рис. 1. Распределение температур внутри термоэлектрической системы охлаждения

Выбор способа отвода тепла

Как уже было сказано выше, для обеспечения эффективной и надежной эксплуатации термоэлектрического устройства необходимо обеспечить отвод тепла от горячей стороны ТЭМ в более холодную окружающую среду. Существует несколько способов сделать это. В зависимости от уровня отводимой мощности Q_{zop} возможны:

- $Q_{zop} < 15$ Вт — монтаж на металлический корпус;
- $15 \text{ Вт} < Q_{zop} < 35$ Вт — локальный радиатор;

- $35 \text{ Вт} < Q_{zop} < 80$ Вт — выносной радиатор + вентилятор;
- $80 \text{ Вт} < Q_{zop} < 300$ Вт — медный выносной радиатор + вентилятор;
- Q_{zop} свыше 300 Вт — водяное охлаждение.

Режим работы ТЭМ и термоэлектрической системы в целом определяют необходимую скорость «сброса» тепла с горячей стороны ТЭМ, при этом необходимая скорость сброса может быть в несколько раз выше скорости отвода тепла от холодной стороны. Это соотношение определяется рассмотренным в первой части статьи коэффициентом C_{op} — отношением холодильной мощности к электрической потребляемой мощности:

$$C_{op} = \frac{k \times I / T^2 \times R}{I^2 \times R + k \times I};$$

где k — коэффициент Пельтье.

Общие принципы выбора радиаторов и вентиляторов

Радиатор — это устройство, улучшающее передачу тепла от горячей поверхности ТЭМ в окружающую среду (как правило, в воздух или воду, но бывают и другие варианты).

Для правильного выбора радиатора необходимо изначально определить следующие параметры:

- Q_h — полная (максимальная в случае различных режимов работы) мощность, поступающая на горячую сторону модуля [Вт];
- $T_{h \max}$ — максимальная температура на горячей стороне ТЭМ, верхний предел которой определяется конструктивно-технологическим вариантом исполнения ТЭМ (см. таблицу 1 в первой части статьи), указывается в спецификации [°C];
- T_{amb} — температура окружающей среды [°C], для случая работы в заданном интервале температур — ее максимальное значение ($T_{amb \max}$).

Отношение разности температур $\Delta T = T_{h \max} - T_{amb}$ к необходимой величине теплового рассеяния Q_h определяет величину теплового сопротивления θ системы охлаждения, [°C/Вт]:

$$\theta = \Delta T / Q_h$$

Для охлаждения горячей стороны выбрать радиатор следует, исходя, как минимум, из двух характеристик: суммарной площади модулей и величины теплового сопротивления системы их охлаждения. По каталогам производителей подбираются радиаторы с площадью, равной или несколько большей площади имеющихся модулей, и из них выбираются те, которые имеют наиболее подходящую величину теплового сопротивления (она обычно указывается для определенного значения температуры окружающей среды).

Следует иметь в виду, что расхождение между расчётными данными и характеристиками реальной термоэлектрической системы

может доходить до 20–25%. Это обычная погрешность расчетов тепловых режимов многих систем. Она связана не только с приближенностью тепловой модели, но и с невозможностью учесть все конструктивные особенности системы охлаждения, с неточным определением теплофизических свойств и других параметров элементов конструкции.

Для того чтобы было понятно значение θ , рассмотрим пример: при тепловой нагрузке 20 Вт температура источника тепла возросла на 10 °C. Для этого радиатора тепловое сопротивление составит $10/20 = 0,5$ °C/Вт.

Другой пример: для температуры окружающей среды 25 °C температура радиатора увеличилась на 10 °C, а мощность, которая должна быть рассеяна, составляет 10 Вт. Тепловое сопротивление радиатора составит 1 °C/Вт.

На практике применяются три основных типа радиаторов: радиаторы с естественным (конвекционным) охлаждением, обдуваемые вентилятором и с жидкостным охлаждением, типовые значения тепловых сопротивлений θ для которых приведены в таблице 1.

Таблица 1. Типовые значения теплового сопротивления радиаторов различной конструкции

Способ отвода тепла с радиатора	Типовое значение теплового сопротивления θ [°C/Вт]	
	минимум	максимум
Конвекционный	0,5	5
Обдуваемый	0,02	0,5
Жидкостное охлаждение	0,005	0,15

Следует отметить, что большинство термоэлектрических систем строятся с применением обдуваемых вентилятором или охлаждаемых жидкостью радиаторов. Это обусловлено возможностью существенно уменьшить габариты устройства охлаждения при определенном значении холодильной мощности Q_c .

Существует однозначная зависимость между максимальным перегревом объекта без использования ТЭМ и максимальным выигрышем от применения ТЭМ, при этом оптимизация может быть осуществлена по температуре, холодильному коэффициенту, току и тепловой проводимости модуля. Применение ТЭМ для уменьшения температуры охлаждаемого объекта за счет интенсификации теплопередачи без увеличения размеров имеющегося радиатора целесообразно при условии, что максимальный перегрев объекта не превышает 55...60 °C.

Теплопроводность материала [Вт/м·К], из которого изготовлен радиатор, при прочих равных конструктивных решениях в значительной степени определяет тепловое сопротивление радиатора. Наибольшее распространение получил алюминий и сплавы на его основе. При теплопроводности 205 Вт/м·К он имеет малый вес, легко обрабатывается, может быть изготовлен методом экструзии.

Теплопроводность алюминия в 4 раза лучше теплопроводности стали. Теплопроводность меди почти в два раза лучше, чем алюминия (400 Вт/м·К), однако медь дорога, сложна в обработке и имеет больший удельный вес. Медные радиаторы применяются в особых случаях и гораздо реже алюминиевых.

Основными параметрами вентилятора, устанавливаемого на радиатор для охлаждения (рис. 2), являются обеспечиваемый поток воздуха (объем в единицу времени), скорость вращения оси, тип подшипника, максимальная рабочая температура и ресурс наработки на отказ (как правило, приводится только для относительно дорогих моделей). Следует отметить, что среди производителей нет единства в методах определения наиболее важного параметра — гарантированного потока воздуха. В этой связи вторым по важности параметром является рабочий ток (электрическая мощность) двигателя. Очень часто рабочее напряжение вентиляторов и напряжение питания ТЭМ взаимно определяют выбор рабочего напряжения системы охлаждения. Наиболее распространенные вентиляторы выпускаются с напряжением питания 12 и 24 В.

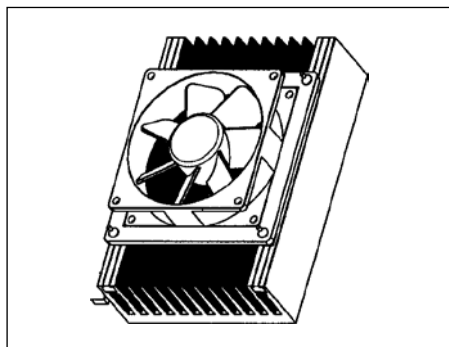


Рис. 2. Радиатор с установленным на него вентилятором

Пожалуй, наиболее важным для качества и надежности вентилятора является тип применяемых подшипников (скольжения и/или качения). Подшипники скольжения дешевы, благодаря чему цена вентилятора может быть в несколько раз снижена. Вентиляторы с шариковыми подшипниками отличаются в несколько раз более высокой надежностью. Помня, что вентиляторы являются наименее надежным узлом в термоэлектрической системе с воздушным обдувом радиаторов, следует не только руководствоваться специфицируемыми производителем основными параметрами, но и получать от изготовителя гарантию минимальной наработки на отказ.

Области применения ТЭМ

За последние годы компания «КРИОТЕРМ» провела целый ряд разработок и осуществила внедрение в серийное производство ТЭМ для различных областей применения. Практика разработки термоэлектрических

Таблица 2. Области применения термоэлектрического охлаждения

Холодильная мощность, Вт	Область применения	Назначение	Число каскадов	$T_{min}, ^\circ\text{C}$	$T_{max}, ^\circ\text{C}$
0,05	Э	Фотодетекторы (InAs)	4	-73	
0,05	Э	CCD видеокамеры (матрицы)	3	-45	
0,01	Э	Фотодетекторы (HgCdTe)	3	-50	
0,1	М	Физиотерапия	1	0	50
0,15	Э	Рентгеноспектрометры	4	-100	
0,2	Э	Фотодетекторы (Ge, PbS, PbSe и др.)	2	-30	
0,2	И	Микрофотокалориметр	1	-20	20
0,5	И	Датчик точки росы	2	-35	85
0,5	Э	Лазерные диоды для оптоволоконной связи	1	25	25
0,5	Э	Лазерные диоды для интерферометров	1	25	25
1,5	Б	ДНК-амплификатор	1	0	90
1,5	Э	Усилители с низким уровнем шумов	3	-45	
2,0	И	Приборы для определения точки замерзания	3	-60	
2,0	Б	Охлаждение проб в спектрофотометре	1	10	
3,0	И	Модель абсолютно черного тела	1	50	200
3,0	М	Охладители для микроскопов	1	20	60
3,0	П	Ловушки для вакуумных насосов	1	-30	
5,0	П	Охлаждение сверхъярких светодиодов	1	-5	0
5,0	И	Охлаждение корпуса фотоумножителя	1	-20	
5,0	И	Осушение проб газов	1	1	3
5,0	М	Минихолодильники для медицины	1	5	15
8,0	Э	Охлаждение процессоров	1	60	
10	И	Определитель тройной точки	1	-25	
10	Б	Программируемые термостаты	1	-20	100
10	Б	Минихолодильники для препаратов крови	1	4	
11	С	Охлаждение шлема пилота	1	26	
13	Д	Холодильники для пикников	1	5	60
15	П	Технологические изотермические ванны	1	10	70
15	И	Определитель точки помутнения нефти	1	-70	-10
25	Б	Осмометр	2	11	
50	П	Модули для воздушного кондиционера	1	5	70
70	П	Химическое осаждение	1	0	70
70	П	Температурный контроль циркуляторов жидкости	1	-10	70
100	П	Испытательное оборудование	1	-25	70
100	Д	Охладители воды	1	10	
100	Д	Персональный комфорт	1	24	
300	П	Замораживатели для крепления обрабатываемых деталей	1	-10	30
500	П	Охладители для производства полупроводниковых микросхем	1	-10	30
1000	М	Теплообменники для операций на открытом сердце	1	10	42
2000	П	Кондиционеры для помещений электронного производства	1	20	30
5000	П	Кондиционеры для ж/д вагонов	1	20	24

устройств выявляет множество интересных задач, решаемых с помощью термоэлектрического охлаждения. Возможные области применения ТЭМ в системах охлаждения и прямого преобразования тепловой энергии в электрическую отнюдь не ограничиваются приведенными ниже. В таблице 2 указаны лишь некоторые из применений термоэлектрического охлаждения в различных областях деятельности человека. Области применения размещены в порядке возрастания холодильной мощности ТЭМ с указанием числа каскадов в ТЭМ, типовых значений температур (T_{min} и T_{max}) по холодной стороне. Условно области применения разделены и обозначены буквами: Б — биологические приборы; Д — домашняя техника; И — измерительная техника; М — медицинская техника; П — промышленное применение; Э — электронные устройства.

Таблица 2 дает представление о некоторых системах, реализованных на основе термоэлектрического охлаждения. Рассмотрим более широкий круг применения ТЭМ.

В радиоэлектронике миниатюрные охладители используются для:

- входных каскадов высокочувствительных радиоприемников и усилителей;

- мощных генераторов и радиоэлементов;
- лазерных излучателей и систем;
- параметрических усилителей различного назначения;
- вакуумных и твердотельных фотоприемников и ПЗС;
- микропроцессоров и микросхем, электронных плат и блоков.

Для общего промышленного применения:

- кондиционеры для автомобильной техники;
- охлаждение и подогрев сидений автомобилей;
- устройства охлаждения и термостабилизации систем ночного видения и систем видения в сложных условиях (туман, задымленность);
- охлаждение элементов электронных схем встроенными микрохолодильниками;
- охлаждение входных каскадов высокочувствительных приемников и СВЧ-усилителей;
- термостабилизация параметрических усилителей;
- термостабилизация для фотоэлектронных умножителей;
- охладители для микропроцессоров в специальной вычислительной технике;

- контактное охлаждение и температурный контроль ИК-датчиков, ПЗС-матриц;
 - температурный контроль лазерных диодов для волоконной оптики с точностью до $+0,1\text{ K}$;
 - термостабилизация импортных электронных компонентов для обеспечения их надежной работы в расширенном интервале температур.
- Индустриальное оборудование:
- системы кондиционирования герметичных шкафов с оборудованием;
 - системы осушения в герметичном оборудовании;
 - датчики точки росы;
 - климатическое испытательное оборудование для электронных приборов;
 - интенсивное охлаждение процессоров;
 - устройства для быстрой полимеризации клея и пленок по заданной программе;
 - холодные лабораторные поверхности;
 - аппаратура для определения свойств нефтепродуктов;
 - система охлаждения телеметрических приборов в скважинах;
 - газовые анализаторы;
 - термокалибраторы.
- Медицинское и медико-биологическое оборудование:
- охлаждаемые термостатированные кюветы для клинических экспресс-исследований;
 - охлаждаемые мобильные контейнеры для хранения биологических тканей и жидкостей;
 - анестезиологическое и офтальмологическое оборудование;
 - приборы с температурным циклированием (например, для экспресс-анализа ДНК);
 - холодильники для перевозки крови и органов для трансплантации;
 - охлаждение лабораторной посуды;
 - термостабилизация микроскопов;
 - охлаждение диагностических датчиков;
 - термостабилизация тканей и микрокультур;
 - боксы для замораживания человеческих органов;
 - криопинцеты;
 - локальное обезболивание;
 - охлаждение точек акупунктуры;
 - локальное охлаждение для повышения работоспособности человека.
- Холодильное оборудование:
- мини-бары и мини-холодильники для гостиничных номеров;
 - автомобильные холодильники.

Примеры практического использования термоэлектрического охлаждения в оборудовании и приборах

Переходя от общего к конкретному, рассмотрим более подробно некоторые решения с применением ТЭМ, условно разделенные по видам оборудования.



Рис. 3. Автомобильный холодильник с применением ТЭМ



Рис. 4. Охладитель напитков, работающий от бортовой сети автомобиля

В автомобильной промышленности термоэлектрические модули широко используются в различных системах охлаждения. Это обусловлено тем, что напряжение питания термоэлектрических модулей совпадает с напряжением бортовой сети, а компрессорное охлаждение трудно применить в связи с механическими вибрациями и тряской.

Наиболее распространенным применением термоэлектрического охлаждения являются различные холодильники, подключаемые к бортовой сети автомобиля, и встроенные охладители для напитков (рис. 3 и 4).

Также широко применяются термоэлектрические модули для местного охлаждения или нагрева сидений в соответствии с индивидуальными предпочтениями водителя и пассажиров. Циркуляция воздуха по внутренним воздуховодам с контролируемой температурой внутри сиденья обеспечивает индивидуальные режимы для каждого пользователя. Данный вид климат-контроля внутри автомобиля не требует установки мощного кондиционера, поэтому данная технология является энергосберегающей.



Рис. 5. Прототип кондиционера для транспортных средств

Большие перспективы открывает термоэлектрическое охлаждение при создании отказоустойчивых, неприхотливых к изменениям напряжения питания кондиционеров для бронетехники, кабин тракторов, грузовой техники и купе железнодорожных вагонов (рис. 5).

В нефтяной промышленности глубокое термоэлектрическое охлаждение нашло применение в аппаратуре для определения температуры помутнения и начала кристаллизации светлых нефтепродуктов. Температура в области исследования — до $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ при наличии тепловой нагрузки.

С помощью термоэлектрических устройств можно осуществлять контроль за температурой любой части тела человека, нагревая и/или охлаждая ее. Это может быть особенно важно при работе в экстремальных условиях. Так, например, при перегреве снижается скорость реакции, что критично для пилота боевого самолета. Термоэлектрические устройства, работающие на охлаждение или нагрев, помогут обеспечить высокую боеспособность.

Модель абсолютно черного тела включает в себя высокоэффективные модули, позволяющие на калибровочной поверхности получить температуру, стабилизированную с высокой точностью для юстировки ИК-датчиков и измерителей температуры.

Система термического формирования изображения (Thermal Imaging Camera) позволяет получить контурное изображение объекта, имеющего отличную от окружающей среды температуру. Такие системы нашли широкое применение при проведении спасательных операций в условиях сильной задымленности, плотного тумана и др. Для снижения уровня собственных шумов инфракрасного датчика в такой системе применяют термоэлектрическое охлаждение, позволяющее повысить чувствительность и четкость изображения при эксплуатации в широком диапазоне температур.

В различном промышленном и авиационном оборудовании широко используются жидкокристаллические дисплеи с активной матрицей. Необходимость получения стабильного по уровню качества изображения (контрастность, яркость, цветовая гамма)

в широком интервале рабочих температур в ряде случаев определяет выбор термоэлектрического охлаждения/нагрева системы подсветки таких устройств.

Чувствительность инфракрасных детекторов, детекторов видимого спектра, а также ПЗС-устройств зависит от уровня собственных шумов.



Рис. 6. Микромодули для охлаждения ИК-датчиков

В этих приборах, а также в целом ряде радиоэлектронных устройств можно повысить чувствительность и улучшить соотношение сигнал/шум за счет применения термоэлектрического охлаждения (рис. 6). В зависимости от требований применяются различные термоэлектрические модули: от высокоэффективных однокаскадных до специальных четырехкаскадных с оптимизированными термоэлектрическими характеристиками каждого каскада. Такие модули позволяют получить разность температур до 140 К.

На одной из российских атомных станций установлена разработанная и изготовленная компанией «КРИОТЕРМ» термоэлектрическая система с суммарной мощностью охлаждения $Q_c = 20$ кВт, предназначенная для охлаждения радиоактивных газов от +55 до -20 °С, система содержит более 4000 модулей (рис. 7).

На российском сегменте международной космической станции в составе грузового ко-



Рис. 7. Общий вид конструкции термоэлектрической системы с холодильной мощностью 20 кВт



Рис. 8. Биологический термостат, разработанный и изготовленный компанией «КРИОТЕРМ». Фото с борта МКС

рабля «Прогресс» установлен биологический универсальный термостат для проведения биотехнологических экспериментов в рамках проекта международной программы по кристаллизации протеинов в условиях микрогравитации (рис. 8).

Одним из уникальных применений термоэлектрического охлаждения и нагрева являются устройства термоциклирования (термоциклеры), нашедшие широкое применение в приборах для исследований ДНК (амплификаторы), в которых для ускорения исследования осуществляется быстрый (за несколько секунд) нагрев и охлаждение (в диапазоне нескольких десятков градусов с точностью до долей градуса) исследуемой по специальной программе материи (рис. 9). Для решения такой задачи требуются термоэлектрические модули, изготовленные по специальной технологии, гарантирующей высокую надежность при быстрой и частой смене полярности.



Рис. 9. Внешний вид прибора для проведения ДНК-исследований



Рис. 10. Шкафчик с термоэлектрическим охлаждением для хранения косметики

Термоэлектрическое охлаждение широко применяется в косметологии, например, для обеспечения локального охлаждения участков кожи с целью обезбоживания и для проведения массажа, нанесения различных препаратов и хранения косметики (рис. 10).

В целом ряде медицинских, биологических и химикоаналитических приборов, предназначенных для проведения различных анализов, принципиально важно поддержание температуры исследуемого объекта с высокой точностью (рис. 11).



Рис. 11. Термостатированная кассета для размещения анализируемых проб

Для спектроскопического анализа газообразных веществ также необходимо поддержание заданного уровня влажности исследуемых проб. Высокая повторяемость и точность проводимых анализов в значительной степени обеспечивается термоэлектрической стабилизацией температуры (например, в изотермических ваннах) с точностью до сотых долей градуса и осушением газа с помощью термоэлектрического модуля.

Важной особенностью, определяющей широкое применение термоэлектрического охлаждения в физиотерапевтических и косметических приборах, является безопасное для человеческого организма напряжение питания ТЭМ. Это позволяет создавать большие поверхности с контролируемой температурой для ожоговой и других видов реабилитации и терапии.

Незаменимым становится термоэлектрическое охлаждение при необходимости транспортировки препаратов крови и органов для трансплантации. Специальные портативные холодильники, предназначенные для питания от автомобильной бортовой сети и имеющие собственные аккумуляторы, позволяют с гарантией соблюдения температурного режима доставлять указанные грузы на большие расстояния.

Известно, что не все 100% энергии, потребляемой при работе лазерных систем, превращаются в лазерную энергию. Если в процессе работы не отводить тепло от лазерного устройства, то лазер изменит длину волны, снизит эффективность и может выйти из строя. Для температурной стабилизации работы лазеров промышленного и медицинского назначений применяют термоэлектрическое охлаждение (рис. 12). Это позволяет получить лазерный луч стабильной мощности и длины волны, что принципиально необходимо с точки зрения безопасности для здоровья при воздействии лазером на человека.



Рис. 12. Полупроводниковый лазер, установленный на термоэлектрическую охлаждающую сборку

На рынке телекоммуникаций в ВОЛС широко используются термоэлектрические микромодули (рис. 13), встроенные в корпуса полупроводниковых передающих лазеров. Температурная стабилизация последних необходима для обеспечения передачи данных в заданном диапазоне частот без помех соседним диапазонам. Крайне важной характеристикой ТЭМ становится его надежность:

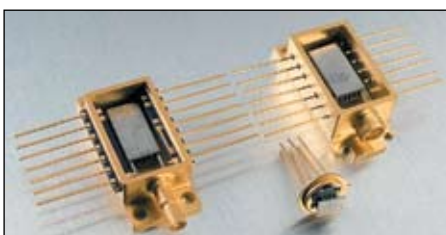


Рис. 13. Стандартные корпуса для микроэлектроники с установленными ТЭМ



Рис. 14. Шкаф с установленными термоэлектрическими сборками

телекоммуникационное оборудование предназначено для эксплуатации в течение 10 и даже 20 лет.

Также в отдельных узлах и компонентах телекоммуникационного оборудования ТЭМ используются для повышения чувствительности, стабильности и надежности работы всего оборудования в целом. Особое значение имеет термоэлектрическое охлаждение герметично закрываемой аппаратуры.

В связи с увеличением объемов передаваемой и обрабатываемой информации растет плотность размещения оборудования в шкафах и стойках, повышается и выделяемое внутриоборудования тепло. Для относительно небольших шкафов и стоек с рабочим объемом до 100 дм³ (например, часть стойки с особо чувствительным к перегреву оборудованием) применяется охлаждение с помощью термоэлектрическихборок (рис. 14).

При производстве полупроводниковых микросхем для обеспечения высокой точности нанесения топологии необходимо тщательно контролировать температуру подложки. Решение данной задачи также остро необходимо при разработке мощных лазеров и других электронных устройств. Во многих случаях для этого применяются так называемые «чилеры» (chiller) — устройства, имеющие в своем составе контур с жидкостью, температура которой с высокой точностью контролируется ТЭМ (рис. 15).

В климатических камерах небольшого объема (единицы дм³) с широким диапазоном температур (например, -50...+125 °С) применяются многокаскадные ТЭМ (рис. 16).

Применение холодных поверхностей позволяет создать уникальные по миниатюрности витрины для различных магазинов и выставок, что невозможно с помощью компрессорных агрегатов. Такие витрины нашли свое применение в небольших барах,



Рис. 15. Устройство прецизионного температурного контроля промышленного применения



Рис. 16. Малогабаритная климатическая камера

буфетах и кафе. В этом же ряду стоят минихолодильники, охладители пива и домашние винные погреба, использующие для охлаждения (а иногда и нагрева) термоэлектрические модули.

В первой части статьи уже были упомянуты термоэлектрические охлаждающие сборки — устройства, в состав которых входят несколько ТЭМ с установленными теплообменниками. Применение термоэлектрическихборок позволяет заказчикам создавать системы охлаждения без выполнения специальных инженерных расчетов.

К конструктивным и технологическим особенностям термоэлектрическихборок следует отнести применяемый вид теплообменников, которые подразделяют сами сборки на термоэлектрические типа «воздух-воздух» и термоэлектрические типа «жидкость-жидкость».

Основные области их применения:

- Сборки типа «воздух-воздух» (рис. 17, 18) широко применяются при изготовлении холодильников, воздушных кондиционеров, систем охлаждения электронной аппаратуры и т.п. Сборки оптимизированы под напряжение питания 12, 24 и 48 В, что позволяет подключать их к бортовой сети наземных, железнодорожных и водных транспортных средств.



Рис. 17. Термоэлектрическая сборка «воздух–воздух»



Рис. 18. Термоэлектрическая сборка «воздух–воздух» типа 380-24-AA

- Сборки типа «жидкость–жидкость» могут применяться в качестве активного теплообменника в разнообразных многоконтурных системах охлаждения для увеличения их эффективности и регулирования (нагрев/охлаждение) температуры жидкости во внутреннем контуре.

Термоэлектрические сборки имеют отверстия для монтажа и коммутационную плату для подключения электропитания. В качестве дополнительной опции возможна установка на сборку температурного датчика и контроллера температуры.

С использованием термоэлектрических сборок изготовление охлаждающего устройства, например, камеры для климатических испытаний электронных устройств, системы охлаждения, предотвращающей выход из строя из-за перегрева малогабаритного дорогостоящего оборудования, становится предельно простым. Достаточно в теплоизолированном корпусе вырезать отверстие и установить термоэлектрическую сборку.

Термоэлектрические сборки типа «воздух–воздух», кроме горячего и холодного радиаторов, включают в себя и вентиляторы.

Специальное подключение с отдельным электропитанием для ТЭМ и вентиляторов позволяет применять реверсивное включение ТЭМ и, в случае необходимости, использовать их в режиме высокоэффективного нагрева.

Использование радиаторов с развитой поверхностью позволяет с минимальными температурными потерями передавать тепло от охлаждаемого объекта на холодную сторону модуля и с горячей стороны модуля в окружающую среду. Обдув радиаторов при помощи вентиляторов делает этот процесс еще

Таблица 3. Основные параметры термоэлектрических сборок типа «воздух–воздух»

Наименование	Номинальный рабочий ток ($I_{\text{раб}}$), А	Номинальное рабочее напряжение ($U_{\text{раб}}$), В	Холодильная мощность ($Q_{\text{раб}}$), Вт	Размер			Вес, кг
				длина, мм	ширина, мм	высота, мм	
60-24-AA	2,8	24	55	240	150,2	155	2,8
60-12-AA	9	12	60	240	150,2	155	2,8
120-24-AA	5,3	24	90	320	150,2	155	3,7
120-12-AA	15,2	12	90	320	150,2	155	3,7
180-24-AA	5,8	24	110	480	150,2	155	5,7
380-24-AA	10,4	24	220	252	200	210	6,4

Примечание. Холодильная мощность указана для $T_{\text{окр. среды}} - T_{\text{хол. рад.}} = 0^\circ\text{C}$, при $T_{\text{окр. среды}} = 21^\circ\text{C}$.

Таблица 4. Основные параметры термоэлектрической сборки «жидкость–жидкость» типа 400LT

Наименование	$I_{\text{раб}}$, А	$U_{\text{раб}}$, В	$Q_{\text{раб}}$, Вт	Q_{max} , Вт	Размер			Вес, кг
					длина, мм	ширина, мм	высота, мм	
400LT	24,5	24	400	600	247	79	204	5

более эффективным. Теплоизоляция, установленная между радиаторами, препятствует обратному переносу тепла к охлаждаемому объекту. Основные параметры данного типа сборок приведены в таблице 3.

Термоэлектрическая сборка «жидкость–жидкость» (рис. 19) имеет алюминиевые жидкостные теплообменники и изготовлена с использованием мощных термоэлектрических модулей. Основные параметры одной из термоэлектрических сборок типа «жидкость–жидкость» приведены в таблице 4. Оригинальные технические решения, точность изготовления всех деталей и использование высокоэффективных термоэлектрических модулей обеспечивают высокие параметры выпускаемых сборок и их высокую надежность.



Рис. 19. Термоэлектрическая сборка «жидкость–жидкость» типа 400LT

систему в полном соответствии с требованиями заказчика и поставить не только приведенные типы сборок, но и другие с известными комбинациями, такими как: холодная поверхность – жидкость (или воздух), воздух–жидкость, жидкость–воздух. Заказчикам также предоставляется возможность воспользоваться, загрузив с сайта компании специально созданный для разработчиков программный продукт, открывающий широкие возможности, как для начинающего, так и для опытного инженера систем теплообмена (от принятия решения по выбору требуемого модуля для решения задачи охлаждения до подробного расчета конструкции термоэлектрической системы охлаждения). Программа позволяет получить ответы на наиболее важные вопросы, возникающие при разработке термоэлектрической системы:

- Каковы особенности режимов работы данного модуля?
- Сколько и каких модулей необходимо для решения имеющейся задачи охлаждения?
- Какие результаты будут достигнуты в случае применения в имеющейся охлаждающей системе данных модулей?

Литература

- Июффе А. Ф., Стильбанс Л. С., Иорданишвили Е. К., Ставицкая Т. С. Термоэлектрическое охлаждение. М.: АН СССР, 1956.
- Иорданишвили Е. К. Термоэлектрические источники питания. М.: Советское радио, 1968.
- Каганов М. А., Привин М. Р. Термоэлектрические насосы. Л.: Энергия, 1970.
- Булат Л. П., Ведерников М. В., Вялов А. П. и др. Термоэлектрическое охлаждение: текст лекций под общей ред. Л. П. Булата. СПб.: СПбГУНИИПТ, 2002.
- Тахистов Ф. Ю. Расчет параметров термоэлектрических модулей с учетом температурных зависимостей термоэлектрических свойств // Термоэлектрики и их применения. Доклады VIII Межгосударственного семинара. СПб.: ФТИ, 2002.

Заключение

Следует отметить, что приведенные выше примеры построения термоэлектрических систем охлаждения не в полной мере описывают области применения ТЭМ. Специалисты компании «КРИОТЕРМ» постоянно совершенствуют технические характеристики выпускаемой продукции, проводят совместные с заказчиками работы по расширению областей применения термоэлектрических устройств. Так, например, в случае необходимости специалисты компании готовы рассчитать и изготовить термоэлектрическую

6. Баукин В.Е., Вялов А.П., Гершберг И.А., Муранов Г.К., Соколов О.Г., Тахистов Ф.Ю. Оптимизация термоэлектрических генераторов большой мощности // Термоэлектрики и их применения. Доклады VIII Межгосударственного семинара. СПб: ФТИ. 2002.
7. Гершберг И.А., Тахистов Ф.Ю. Выбор оптимального ТЭМ в зависимости от условий внешнего теплообмена // Термоэлектрики и их применения. Доклады IX Межгосударственного семинара. СПб: ФТИ. 2004.
8. Кузнецов Е.П., Соловей А.С., Тахистов Ф.Ю., Вялов Д.А., Гершберг И.А. Термостат биотехнологический универсальный для Российского сегмента международной космической станции // Термоэлектрики и их применения. Доклады IX Межгосударственного семинара. СПб: ФТИ. 2004.
9. Тахистов Ф.Ю., Гершберг И.А. Оптимизация параметров термоэлектрического генераторного модуля с учетом эффективности теплообмена на сторонах модуля // Термоэлектрики и их применения. Доклады XI Межгосударственного семинара. СПб: ФТИ. 2008.
10. Seri Lee, пер. А. Савельева. Как выбрать охладитель // Силовая электроника. 2006. №3.
11. www.kryotherm.ru