

Автореферат
С 60

проф. Алексееву В. И.
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

СОЛОМЯНИКОВ Анатолий Дмитриевич

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ
КАСКАДНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКРООХЛАДИТЕЛЕЙ

Специальность 05.04.03. – Гидравлические машины, машины
и аппараты холодильной и криогенной техники

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

БР 08501 Подп. к печати 14.II.78 г. Формат 60 x 84 I/I6
Объем I п.л. Заказ № 4379. Тираж 150 экз.
Гортинография Одесского облполиграфиздата, цех № 3.
Ленина, 49

xv 1006
ИНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
бібліотека

Одесса – 1978

Работа выполнена в Одесском технологическом институте холодильной промышленности.

Научный руководитель - лауреат Государственной премии СССР, доктор технических наук, профессор НАЕР В.А.

Официальные оппоненты: кандидат физико-математических наук, доктор технических наук, старший научный сотрудник ИОРДАНИШВИЛИ Е.К., кандидат технических наук, доцент ГАРАЧУК В.К.

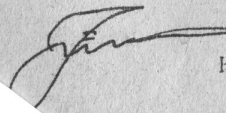
Ведущее предприятие - ГСКБ теплофизического приборостроения, г. Ленинград.

Защита диссертации состоится " 18 " сентября 1978 г. в 15⁰⁰ часов на заседании специализированного Совета К-539/1 Одесского технологического института холодильной промышленности: 270000, Одесса, ГСП, ул. Петра Великого, 1/3, ОТИП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Авторат разослан " 16 " сентября 1978 г.

Секретарь
Совета,
финансово-
материальное ис-
полнение
фондов с ка-
питалом
капитала.


НИКУЛЬШИН Р.К.

Актуальность проблемы. Применение термоэлектрического охлаждения открывает возможности создания малогабаритных устройств, обеспечивающих низкотемпературную термостабилизацию элементов и узлов в радиоэлектронике, приборостроении, инфракрасной технике, медицине и других областях науки и техники.

Многие термоэлектрические системы охлаждения работают в нестационарных условиях. Примером могут служить охладители приемников излучения, зеркал конденсационных гигрометров или устройств для замораживания биологических тканей, когда требуемое время выхода на заданный температурный уровень измеряется секундами. Особенно следует выделить группу охлаждающих устройств, применяемых в радиоэлектронике и приборостроении, у которых тепло, выделяющееся на горячих спаях термобатарей, отводится на массу. Такие системы большую часть времени работают в нестационарных условиях.

Имеющиеся данные по теоретическому и экспериментальному исследованию нестационарного термоэлектрического охлаждения не раскрыли все его потенциальные возможности. Существующие рекомендации по выбору высоты термоэлементов основаны на изучении стационарных режимов работы и поэтому требуют уточнения с позиций достижения максимальных скоростей охлаждения и современной технологии коммутации.

До настоящего времени почти отсутствуют работы по теоретическому исследованию и только в отдельных работах приводятся результаты экспериментального исследования нестационарных режимов работы каскадных термобатарей, что затрудняет проектирование и внедрение быстродействующих охлаждающих систем.

Цель и задачи исследования. Целью настоящей работы является разработка и исследование быстродействующих микроохладителей, обеспечивающих максимальные скорости охлаждения. Поставленная цель достигается путем решения следующих задач.

1. Теоретическое исследование нестационарного термоэлектрического охлаждения, направленное на разработку инженерных методов расчета переходных процессов, происходящих в каскадных термоэлектрических микроохладителях.

2. Экспериментальное исследование динамических характеристик термоэлементов и определение влияния различных факторов на скорость охлаждения.

3. Разработка и экспериментальное исследование каскадных быстродействующих микроохладителей. Обоснование рекомендаций по их проектированию и эксплуатации.

Основные положения, научная новизна которых защищается в работе.

1. В настоящее время быстродействующие полупроводниковые охладители целесообразно разрабатывать на основе применения термоэлементов малой высоты, подключаемых к источнику постоянной э.д.с. Такие охладители обеспечивают лучшие динамические и габаритно-массовые характеристики по сравнению с устройствами, использующими высокие термоэлементы и токи специальной формы, с эффектом временного переохлаждения холодных спаев.

2. Использование дифференциальных уравнений тепловых балансов спаев термоэлементов с учетом температурных зависимостей свойств полупроводниковых материалов позволяет разработать метод расчета динамических характеристик быстродействующих каскадных охладителей, обеспечивающий удовлетворительную для инженерной практики точность.

Основные научные результаты, полученные в работе.

1. Предложен приближенный метод расчета нестационарных режимов работы каскадных термобатарей, позволяющий рассчитывать динамические характеристики микроохладителей с достаточной для инженерной практики точностью.

2. Получены обобщенные динамические и нагрузочные характеристики термоэлементов, позволяющие определять динамические характеристики однокаскадных охладителей в широком интервале геометрических размеров термоэлементов и теплоемкостей охлаждаемых объектов.

3. Экспериментально определены предельные скорости охлаждения каскадных термоэлектрических микроохладителей, а также их энергетические температурные, электрические и габаритно-массовые характеристики.

4. Выяснено влияние многократных термических ударов на температурные характеристики быстродействующих каскадных охладителей.

Практическая ценность. Разработан метод расчета нестационарных режимов работы каскадных термобатарей, обоснованы рекомендации по увеличению быстродействия одно- и многокаскадных микроохладителей, а также получены экспериментальные данные, использование которых позволит осуществить более точное проектирование быстродействующих полупроводниковых микроохладителей.

Апробация работ. Основные материалы диссертации доложены на Второй Всесоюзной научно-технической конференции молодых специалистов по холодильной технике и технологии в г. Москве (1975 г.), в школе по термоэлектричеству г. Яремча (1976 г.) и на ежегодных научно-технических конференциях ОТИХП (1973...1977 г. г.). По теме

опубликовано 6 статей.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, выводов и библиографии, изложена на 146 страницах машинописного текста, содержит 33 рисунка и 2 таблицы.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Нестационарное термоэлектрическое охлаждение весьма своеобразно и связано со специфическими явлениями, происходящими в термоэлементах. Его исследованию посвящены работы Стильбанса Л.С., Паррота, Наера В.А., Альфонсо, Щербины А.Г., Иорданишвили Е.К., Ривкина А.С. и др. В настоящее время известно, что нестационарность работы термоэлементов определяется как внутренними, так и внешними факторами. К внешним факторам относятся теплоемкость охлаждаемой массы, тепловые источники и стоки, условия теплообмена на горячих и холодных спаях. К внутренним факторам, кроме контактных электрических сопротивлений в спаях, теплоемкости полупроводниковых материалов, коммутационных пластин и теплопереходов, следует также отнести и свойственный только термоэлектрическим системам охлаждения эффект временного относительно быстропротекающего переохлаждения холодных спаев.

Известно, что нестационарный процесс в термоэлементе описывается уравнением теплопроводности с внутренними источниками тепла. Это уравнение при условии, что ветви термоэлемента имеют постоянное сечение, адиабатически изолированы по боковым поверхностям, а также обладают одинаковыми термоэлектрическими и теплофизическими свойствами, не зависящими от температуры, имеет вид

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{I^2 R}{\lambda} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (I)$$

Решая уравнение (I), при соответствующих граничных и начальных условиях, можно получить динамические, температурные и энергетические характеристики однокаскадных охладителей и, более того, рассчитать закон изменения тока, необходимый для воспроизведения заданного временного хода температуры холодных спаев.

Многие авторы решали уравнение вида (I) различными методами, учитывая реальные условия работы термоэлементов. Как показал проведенный в диссертации анализ решений выражения, описывающие изменение температуры холодных спаев во времени, получаются громоздкими, что затрудняет их анализ и применение при проектировании быстродействующих систем охлаждения.

Более простые выражения получены из дифференциальных уравнений тепловых балансов спаев термоэлементов. В этом случае изменение температуры описывается простым экспоненциальным законом. При решении исходных дифференциальных уравнений численным методом можно учесть температурные зависимости свойств полупроводниковых материалов.

Если при анализе нестационарных режимов работы каскадных термобатарей исходить из уравнения теплопроводности, то это приведет к необходимости решения системы дифференциальных уравнений второго порядка, в то же время использование приближенного метода, основанного на решении дифференциальных уравнений тепловых балансов спаев, позволяет значительно упростить решение задачи.

Рассмотрим работу термобатареи, состоящей из n каскадов. Предположим, что при нестационарных режимах в течение бесконечно малого промежутка времени $d\tau$ будут выполняться условия стационарности. Тогда переходные процессы, происходящие в такой термобатареи, будут описываться системой, состоящей из $n+1$ дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} Q_n d\tau + \sum (mc)_n dT_{on} = Q_{on} d\tau \\ Q_l d\tau + \sum (mc)_{l-1} dT_{\alpha(l-1)} = Q_{\alpha(l-1)} d\tau \\ Q_1 d\tau - \sum (mc) dT_1 = Q_c d\tau \end{cases} \quad (2)$$

Впервые такой метод анализа нестационарных режимов работы каскадных термобатарей был предложен Наером В. А.

Для двухкаскадного охладителя, работающего при переменной температуре горячих спаев, система (2) приводится к виду

$$\begin{cases} \frac{dT_{o2}}{d\tau} = aT_{o2} + bT_{o1} + c \\ \frac{dT_{o1}}{d\tau} = \partial T_{o1} + eT_{o2} + fT_1 + g \\ \frac{dT_1}{d\tau} = hT_1 + kT_{o1} + l \end{cases} \quad (3)$$

Все коэффициенты системы являются функциями температуры, т. к. в них входят свойства полупроводниковых материалов, которые могут быть учтены при решении численным методом.

Следует подчеркнуть, что при решении системы уравнений возникают трудности, связанные с определением приведенных масс полупроводниковых материалов, величины которых в общем случае являются функциями температуры и времени. Вопросу определения этих масс в диссертации уделено значительное внимание.

Аналитическое решение системы уравнений легко получить, если

пренебречь температурными зависимостями свойств материалов и коэффициенты системы (3) считать постоянными. В этом случае изменение температур спаев (при начальных условиях $\tau=0, T_{o2}=T_{o1}=T_1=T_c$) описывается уравнением вида

$$T(\tau) = \sum_{k=1}^m \frac{v(P_k)}{v'(P_k)} \exp(P_k \tau), \quad (4)$$

где $m=n+1$ - степень полинома $v(P_k)$.

Для двухкаскадного охладителя, работающего при постоянной температуре горячих спаев, получается система двух дифференциальных уравнений, решение которой имеет вид (4), где $m=n$, т. е. изменение температур спаев описывается суммой экспонент, число которых определяется числом переменных температурных уровней.

Результаты расчетов динамических характеристик двухкаскадных микроохладителей и их сравнение с экспериментальными данными приведены ниже.

Следует отметить, что с помощью предложенного метода можно рассматривать нестационарные режимы работы, вызванные не только первичным включением тока, но и другими возмущениями. Для этого необходимо задать соответствующие начальные условия. При решении системы уравнений численными методами с помощью ЭВМ можно рассчитывать изменение температур спаев, когда возмущающая величина меняется не скачком, а плавно и более того, возможно провести машинный эксперимент по определению формы тока, обеспечивающей заданный ход температуры.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ

Для экспериментального исследования динамических характеристик термоэлектрических микроохладителей была разработана установка, позволяющая проводить испытания как в вакууме, так и в среде спокойного воздуха с записью температур спаев.

Установка состоит из вакуумной системы, камеры для испытаний в среде спокойного воздуха, температура которого поддерживается на определенном уровне, и блока записи э.д.с. измерительных термопар, включающего трехканальный усилитель ТОПАЗ-2 и светолучевой осциллограф Н-700.

Стационарное значение температуры измерялось хромель-копелевыми термопарами в комплекте с полуавтоматическим потенциометром Р 2/1 с точностью 0,1 К. Предельные относительные погрешности определения стационарных значений тока не превышали 1%, падения напря-

жения - 0,1%, потребляемой мощности - 1,1%.

Известно, что увеличение скорости охлаждения может быть достигнуто не только путем уменьшения теплоемкости охлаждаемого объекта, но и снижением высоты термоэлементов и толщины коммутационных пластин. Однако, снижение высоты термоэлементов ограничено возрастающим влиянием контактных электрических сопротивлений в спаях. Поэтому в работе уделено особое внимание технологии коммутации.

Исходные слитки полупроводникового вещества разрезались на заготовки необходимой высоты электроискровым методом с последующим удалением эрозированного слоя травителем.

Залуживание осуществлялось с помощью ультразвуковых колебаний в ванне расплавленного припоя под слоем стеариновой кислоты. Для этого был изготовлен ультразвуковой генератор с магнитострикционным излучателем.

Испытания термоэлементов, залуженных простым паяльником и в ванне с применением ультразвуковых колебаний, показали, что во втором случае величина ΔT_{max} заметно выше, особенно на высоте 0,5 мм, что также отмечалось другими авторами. Кроме того, такой способ залуживания может быть автоматизирован.

Уменьшение толщины коммутационных пластин приводит к увеличению плотности тока и джоулевых потерь в них. Для определения влияния толщины пластины на величину ΔT_{max} испытывался термоэлемент с коммутационными пластинами, толщина которых снижалась от 1 до 0,05 мм. Результаты испытаний показали, что при расстоянии между ветвями 0,1...0,2 мм в коммутационных пластинах можно допускать плотность тока до 80...90 А/мм². При этом заметного уменьшения величины ΔT_{max} не наблюдается. Поэтому толщина коммутационных пластин испытываемых термоэлементов была принята равной 0,05 мм.

В диссертации проведен подробный анализ влияния высоты термоэлементов на их температурные и динамические характеристики. Для этого испытывались термоэлементы высотой 0,3; 0,5; 1; 1,5; 2 и 3 мм. В результате установлено, что при выбранной технологии коммутации термоэлементы высотой 2 мм и более развивают практически одинаковую разность температур, а снижение высоты до 0,5 мм приводит к уменьшению ΔT_{max} на 10%. При дальнейшем уменьшении высоты возрастает влияние контактных электрических и термических сопротивлений спаев, что приводит к значительному снижению величины ΔT_{max} . Так для термоэлемента высотой 0,3 мм это снижение составило 23%.

Таким образом, для быстродействующих микроохладителей целесообразно выбирать высоту термоэлементов в диапазоне 0,5...2 мм.

Ряд авторов рекомендуют для увеличения скорости охлаждения подводить к термоэлементу ток, значительно превышающий оптимальный. Исследования динамических характеристик термоэлементов, результаты которых приведены на рис. 1, показывают, что увеличение тока выше оптимального для термоэлементов высотой 0,5...2 мм приводит к незначительному росту скорости охлаждения лишь в первый очень короткий промежуток времени, но при этом существенно уменьшается разность температур, развиваемая термоэлементом в стационарном состоянии.

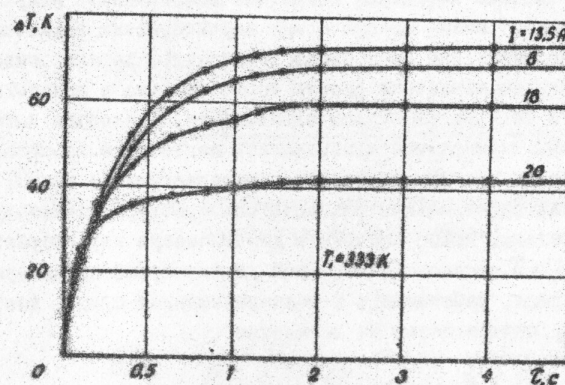


Рис. 1. Динамические характеристики термоэлемента высотой 0,5 мм, работающего в вакууме.

Результаты экспериментального исследования нестационарных режимов работы термоэлементов различной высоты представлены на рис. 2 в виде обобщенной динамической характеристики, построенной по экспериментальным данным, полученным как в вакууме, так и в среде спокойного воздуха. Отклонения могут быть объяснены не только погрешностью эксперимента, но и выбором координат безразмерного времени, в которое входит постоянная времени. Значение постоянной времени определено для экспоненциальной зависимости, а в действительности динамические характеристики термоэлементов описываются суммой бесконечного ряда экспонент.

Очевидно, что наличие охлаждаемого объекта приведет к значительному изменению скорости охлаждения. Влияние теплоемкости нагрузки

исследовалось на тех же термоэлементах, а объект имитировался медными пластинами массой 0,025; 0,05; 0,075 и 0,1 г. На рис.3 представлены результаты экспериментального исследования в вакууме также в виде обобщенных нагрузочных характеристик.

Как видно из графиков, для исследованного интервала нагрузок снижение высоты термоэлементов ниже 0,5 мм является не целесообразным с точки зрения увеличения быстродействия, т.к. теплоемкость части вещества, охлаждаемого до температуры холодного спаев, становится малой по сравнению с теплоемкостью охлаждаемого объекта.

Выбранная система координат позволяет использовать полученные результаты для построения динамических характеристик различных охладителей, работающих при постоянной температуре горячих спаев. Для этого необходимо по известным высоте термоэлемента и отношению массы охлаждаемого объекта (в медном эквиваленте) к площади поперечного сечения ветви термоэлемента определить постоянную времени τ_0 охладителя, воспользовавшись графиками, приведенными на рис.3. После этого, рассчитав максимальную разность температур, развиваемую в стационарном режиме, можно построить динамическую характеристику в координатах $\tau - \Delta T$ согласно обобщенной динамической характеристике.

Для охладителя, работающего в газонаполненной среде, постоянная времени $\bar{\tau}_0$ определяется из выражения

$$\bar{\tau}_0 = \frac{\tau_0}{1 + [\tau_0 \alpha F_0 / \sum (mc)]}$$

Значение τ_0 находится по графикам рис.3.

В реальных охлаждаемых объектах во время их работы выделяется значительное количество тепла, влияющего на работу охладителя. Проведенные испытания термоэлементов с различной активной тепловой нагрузкой показали, что ее величина не влияет на характер зависимости ΔT от времени, но снижает максимальную разность температур, развиваемую в стационарном состоянии.

Следовательно, для построения динамических характеристик микроохладителей, работающих с охлаждаемым объектом, имеющим внутренние источники тепла, можно пользоваться графиками, приведенными на рис.2 и 3, но при расчетах максимальной разности температур, развиваемой в стационарном состоянии, необходимо учитывать мощность тепловыделений.

При расчетах нестационарных режимов работы термоэлектрических охладителей с использованием приближенных методов необходимо учитывать теплоемкость охлаждаемой части полупроводникового вещества. По

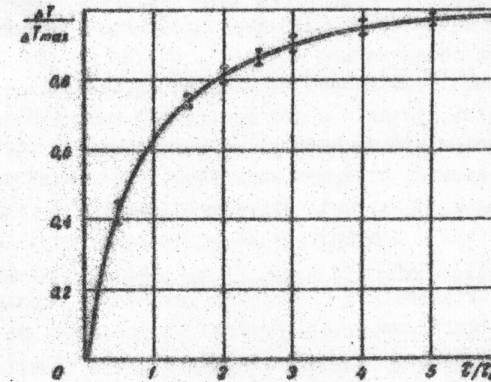


Рис. 2. Обобщенная динамическая характеристика термоэлементов.

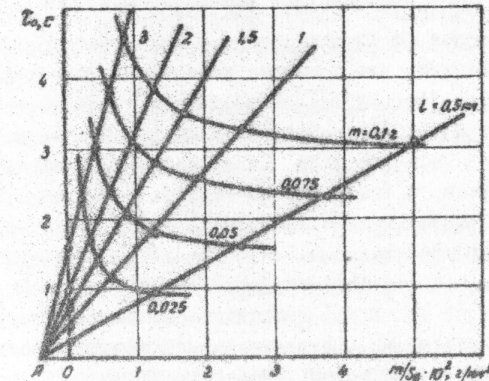


Рис. 3. Нагрузочные характеристики термоэлементов.

рекомендациям Щербини А.Г. эта часть должна составлять половину теплоемкости вещества термоэлемента ($\varphi=0,5$). Такой результат получен из рассмотрения стационарного температурного поля термоэлемента. В диссертации показано, что действительное значение коэффициента φ переменнo во времени.

Температурное поле ветвей термоэлемента, работающего в условиях адиабатической изоляции и при постоянной температуре горячего спаия, определяется действием двух источников тепла: Джоуля и Пельтье. Решение задачи с внутренними источниками тепла, согласно принципу суперпозиции, может быть получено путем суммирования решений двух задач: первой - без внутренних источников, но с данными начальными и граничными условиями и второй - с внутренними источниками, но с нулевыми начальными и граничными условиями. Используя известные из теории теплопроводности решения составляющих задач, получено выражение, описывающее нестационарное температурное поле ветви термоэлемента в безразмерном виде

$$\theta = 1 - \frac{\eta^2}{2} + 8 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+1} \frac{1}{\mu_k^2} \left[\sin\left(\mu_k \frac{\eta}{2}\right) - \frac{2}{\mu_k^2} \cos\left(\mu_k \frac{1-\eta}{2}\right) \right] \exp\left(-\mu_k^2 \frac{Fo}{4}\right),$$

где $\theta = \frac{T_1 - T}{2\Delta T_{max}}$ - безразмерная температура, $\eta = \frac{x}{l}$ - безразмерная координата, $Fo = \frac{\alpha \tau}{l^2}$ - безразмерное время, $\mu_k = (2k-1)\pi$.

Анализ решения, представленного в виде графиков, подтверждает известное положение, что в первые моменты времени после включения тока охлаждается лишь небольшая часть полупроводникового вещества и только по мере выхода на стационарный режим зона охлаждения распространяется к горячему спаю. Таким образом, коэффициент φ переменный во времени, а его значение меняется от 0 до 0,5. Такой же вывод можно сделать из анализа нестационарного температурного поля, полученного экспериментально.

Выражение, определяющее изменение коэффициента φ во времени, можно получить из уравнения нестационарного температурного поля ветви термоэлемента, но для этого необходимо его проинтегрировать, что в общем виде не представляется возможным.

С другой стороны, исходя из экспериментальных данных (рис.3), можно установить связь между значением коэффициента φ , временем и высотой термоэлемента. Отметим, что линии постоянной высоты пересекаются в одной точке, лежащей на отрицательной части оси абсцисс. Это объясняется тем, что за начало координат принята точка, в кото-

рой масса охлаждаемого объекта равна нулю. В этом случае отрезок OA определяет относительную массу охлаждаемого узла термоэлемента.

Следовательно, вычитая из массы охлаждаемого узла массы коммутационной пластины, измерительной термопары и припоев, можно определить значение коэффициента φ , которое справедливо только для момента времени, соответствующего величине постоянной времени термоэлемента, работающего без охлаждаемого объекта.

Проведя соответствующие расчеты и учитывая предельные значения, получаем выражение, описывающее изменение коэффициента φ в зависимости от времени и высоты термоэлемента.

$$\varphi = 0,5 \exp(-0,48 t \tau_0 / \tau).$$

Здесь τ_0 - постоянная времени термоэлемента, работающего без нагрузки.

Учет изменения коэффициента φ позволяет существенно повысить точность приближенных методов расчета переходных процессов, происходящих в термоэлектрических микроохладителях.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КАСКАДНЫХ МИКРООХЛАДИТЕЛЕЙ

Одним из основных факторов, влияющих на динамические характеристики каскадных охладителей, является теплоемкость охлаждаемых масс каскадов. Поэтому при разработке быстродействующих систем охлаждения необходимо выбирать схему каскадирования, обеспечивающую минимальную массу охлаждаемых узлов, в которую существенный вклад вносят массы теплопереходов.

Из всех известных схем соединения каскадов только две позволяют исключить теплопереходы. К ним относятся схема с разветвлением токов и так называемый модифицированный термоэлемент. В работе подробно исследованы обе эти схемы.

Физический смысл возможности повышения энергетической эффективности модифицированного термоэлемента по сравнению с обычным заключается в том, что ток, проходящий через переключку, связан с эффектом Пельтье, частично компенсирующим теплоты Джоуля и Фурье не на самом низком, а на промежуточном температурном уровне.

По расчетам авторов модифицированный термоэлемент позволяет достичь максимальную разность температур, близкую к той, которую обеспечивает двухкаскадная схема. Однако, полученные экспериментальные данные были далеки от предсказываемых. Рассмотрение расчетной схемы и расчетных соотношений показало, что авторы исключили полностью джоулевы потери в переключке, и это привело к значительным расхожде-

ниям между предсказываемыми и действительно полученными результатами.

В диссертации проведен анализ работы модифицированного термоэлемента с отводом тепла Джоуля, выделяющегося в перемычке, и учетом теплопритоков по проводникам, соединявшим перемычку с термоэлементом. Исходя из полученных соотношений, проведен расчет температурных характеристик и сопоставление с экспериментальными данными, построенными для различных значений сопротивлений перемычки. Сравнение дает удовлетворительное совпадение. Так величина ΔT_{max} в эксперименте равна 83 К, а в расчете - 85,4 К. Такие результаты весьма далеки от температурных возможностей обычных двухкаскадных микроохладителей ($\Delta T_{max} = 110...115$ К), в то время как по сложности конструкции модифицированный термоэлемент приближается к ним. Кроме того, такой термоэлемент плохо поддается миниатюризации. Следовательно, такую схему не целесообразно применять для быстродействующих охлаждающих систем.

Учитывая перспективность применения схем с разветвлением токов, был разработан и исследован ряд двух- и трехкаскадных микроохладителей с такой схемой электропитания каскадов, отличавшихся не только потребляемой мощностью, но и отношением геометрических размеров

$$\frac{l_2/s_2}{l_1/s_1}$$

Для исследования влияния холодопроизводительности второго каскада на динамические и температурные характеристики термобатарей при неизменном первом каскаде испытывался ряд двухкаскадных микроохладителей с высотой термоэлементов 0,5 мм. В этих охладителях первый каскад состоял из двух термоэлементов сечением 0,9 x 4 мм, а второй - из одного термоэлемента сечением 0,9 x 4 мм, 0,5 x 3,1 мм, 0,5 x 2 мм и 0,5 x 1,1 мм, что соответствовало отношению площадей по каскадам $s_1/s_2 = 2; 4,6; 7$ и 13. Толщина коммутационных пластин всех термоэлементов равнялась 0,05 мм.

В стационарном состоянии такие микроохладители развивали в вакууме $\Delta T_{max} = 92,5$ К, 105 К, 110 К и 114 К при температуре горячих спаев 333 К.

Полученные динамические характеристики были построены в координатах $\tau - \Delta T/\Delta T_{max}$. Результаты обработки показали, что экспериментальные точки удовлетворительно ложатся на усредненную кривую, т.е. переходные процессы, происходящие в микроохладителях, работающих без нагрузки, практически не зависят ни от температуры горячих спаев, ни от отношения s_1/s_2 . Скорость изменения температуры холодно-

го спая определяется в основном теплоемкостью полупроводниковых материалов, коммутационных пластин и измерительной термопары, поэтому все двухкаскадные микроохладители, изготовленные из термоэлементов высотой 0,5 мм, будут иметь аналогичные динамические характеристики.

Исследования нестационарных режимов работы двухкаскадных микроохладителей показали, что с их помощью можно получить снижение температуры почти на 100 К за 1,5 секунды при работе в вакууме с температурой горячих спаев 333 К и отношением $s_1/s_2 = 7$.

Для определения влияния теплоемкости охлаждаемого объекта на скорость снижения температуры испытывался двухкаскадный микроохладитель, имеющий отношение $s_1/s_2 = 4,6$, с нагрузкой, которая имитировалась медными пластинами различной массы. Такой микроохладитель развивает в вакууме максимальную разность температур 91 К и 82 К в среде спокойного воздуха при температуре горячих спаев 303 К и потребляемой мощности 5 Вт. Ток питания, соответствующий режиму ΔT_{max} , составляет 23,5 А.

На рис. 4 приведены нагрузочные характеристики в координатах $m - \Delta T/\Delta T_{max}$, где m - масса охлаждаемого объекта без учета масс, относящихся к самому микроохладителю (коммутационных пластин, полупроводниковых материалов и т.д.). Представленные графики получены путем расчета на ЭВМ, а точки соответствуют экспериментальным данным. Расчеты проводились с учетом контактных электрических сопротивлений и зависимости свойств полупроводниковых материалов от температуры. Для этого система дифференциальных уравнений вида (3) решалась методом Рунге-Кутты. В результате расчетов величина ΔT_{max} составила 93 К при токе 23,6 А, что с хорошей точностью совпадает с экспериментом.

Как видно из графиков, теория качественно правильно описывает переходные процессы, происходящие в двухкаскадных микроохладителях при хорошем количественном совпадении с экспериментом. Следует отметить, что существует ряд величин, точное определение которых затруднено, а их влияние на переходные процессы оказывается значительным. К ним следует отнести теплоемкости коммутационных припоев, термопар и припоя для их крепления. Неточности, связанные с их определением, приводят к дополнительным погрешностям расчетов и результатов обработки экспериментальных данных.

Расчеты динамических характеристик микроохладителя проводились также по выражениям, полученным из аналитического решения системы дифференциальных уравнений вида (4). При этом расхождения между характеристиками, рассчитанными двумя методами, составляют не более

10% для момента времени 0,5 секунды и снижаются по мере выхода на стационарный режим.

Таким образом, предложенный метод позволяет рассчитывать переходные процессы, происходящие в каскадных термобатареях, с достаточной для инженерной практики точностью.

Кроме того, проводились расчеты динамических характеристик двухкаскадных микроохладителей с различными высотами термоэлементов по каскадам. Согласно расчетам, увеличение высоты термоэлементов первого каскада до 1 мм мало сказывается на скорости охлаждения даже при работе без нагрузки, а увеличение высоты термоэлементов второго каскада приводит к значительному снижению скорости охлаждения. Поэтому целесообразно в первом каскаде ставить термоэлементы большей высоты (до 2 мм), чем во втором, при этом увеличивается разность температур в стационарном состоянии, вследствие уменьшения влияния контактных электрических сопротивлений.

Многие термоэлектрические микроохладители работают в условиях, когда тепло, выделяющееся на горячих спаев, отводится с помощью теплоотсеивающего радиатора, имеющего малую площадь и теплоемкость. В этом случае температура горячих спаев меняется в широких пределах, что приводит к значительным изменениям динамических характеристик.

Для исследования нестационарных режимов работы таких микроохладителей была изготовлена термобатарея, у которой термоэлементы первого каскада имели высоту 1 мм и сечение 1,1 x 3 мм, а второго - высоту 0,5 мм и сечение 0,5 x 1,3 мм. В этом случае отношение $\frac{l_1/s_1}{l_2/s_2} \approx 5$. Толщины коммутационных пластин термоэлементов обоих каскадов равнялись 0,05 мм. В качестве теплоотсеивающего радиатора использовался медный цилиндр массой 20 г. Величина тока, соответствующего ΔT_{max} в стационарном состоянии при постоянной температуре горячих спаев, равна 13 А при потребляемой мощности 2,4 Вт. Режим работы микроохладителя осуществлялся таким образом, что после достижения минимального температурного уровня ток уменьшался до 8 А. Это обеспечивало минимальную температуру холодного спаев в стационарном режиме с учетом перегрева радиатора. Момент переключения определялся равенством температуры горячих спаев для токов 13 А и 8 А.

Микроохладитель испытывался при температуре окружающей среды 293 К с охлаждаемыми объектами массой 0,025 г, 0,05 г и 0,075 г (рис. 5). Без объекта он обеспечивает снижение температуры до 214 К через 4 секунды, но по мере нагревания теплоотсеивающей массы тем

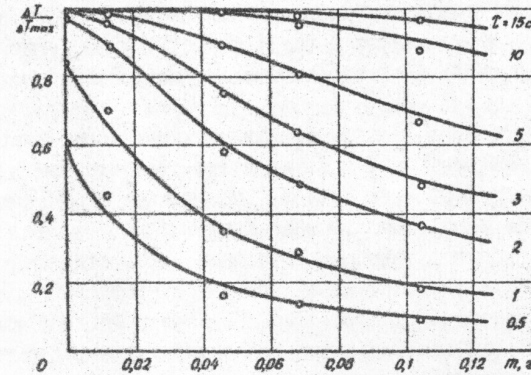


Рис. 4. Нагрузочные характеристики двухкаскадного микроохладителя.

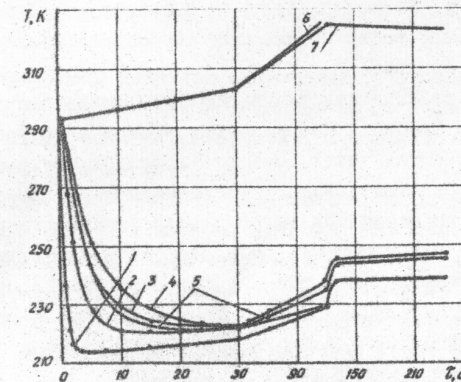


Рис. 5. Динамические характеристики двухкаскадного микроохладителя с отводом тепла на массу для различных масс охлаждаемого объекта, г: 1-0; 2-0,025; 3-0,05; 4-0,075; 5-0,05, рассчитанная по системе уравнений (3); изменение температуры теплоотсеивающей массы: 6-рассчитанное по (3), 7-экспериментальное.

пература повышается. Через 2 минуты ток уменьшался до 8 А и температура спая резко возрастала и устанавливалась на уровне 239 К. Если ток не уменьшался, то уже через 5 минут температура холодного спая превышала 239 К, а через 10 минут повышалась до 255 К и продолжала расти.

На рис.5 представлены экспериментальные динамические характеристики, а также характеристика микроохладителя, работающего с охлаждаемым объектом массой 0,05 г (кривая 5), полученная в результате решения системы дифференциальных уравнений (3).

Как видно из графиков, экспериментальная и расчетная характеристики качественно совпадают, но наблюдаются количественные расхождения, которые увеличиваются со временем. По нашему мнению, это связано с неопределенностью коэффициентов теплоотдачи при учете теплообмена охлаждаемого объекта, термоэлементов и теплорассеивающего радиатора с воздухом. Особенно следует выделить влияние на коэффициент теплоотдачи инея, толщина и свойства которого меняются во времени.

Несмотря на некоторые расхождения между расчетной и экспериментальной зависимостями, точность описания в первые, наиболее существенные моменты времени, когда происходит наибольшее изменение температуры, удовлетворительна.

Очевидно, что с увеличением числа каскадов можно получить более глубокое охлаждение. Однако применение схемы питания с разветвлением токов накладывает ограничения на число каскадов и уже пятикаскадные охладители не дают существенного увеличения разности температур. При использовании термоэлементов малой высоты увеличение числа каскадов больше трех не целесообразно, т.к. контактные электрические сопротивления спаев значительно снижают разность температур. Поэтому исследования нестационарных режимов работы каскадных термобатарей были ограничены испытаниями трехкаскадных микроохладителей с различной высотой термоэлементов.

Первый и второй каскады состояли из трех и двух термоэлементов высотой 1 мм, а третий - из одного термоэлемента высотой 0,5 мм и сечением 0,5 x 1,6 мм. Размеры термоэлементов соответствовали отношению площадей по каскадам $s_1/s_2 \approx 5,4$ и $\frac{1/s_1}{1/s_2} \approx 4,4$. Такой микроохладитель при токе 42 А и температуре горячих спаев 293 К, 303 К и 333 К обеспечивает в вакууме разности температур III, 1 К, II, 7,7 К и I, 35 К. В среде спокойного воздуха эти разности составляли соответственно 94 К, 100,7 К и 120,6 К.

Динамические характеристики исследовались при различных темпера-

турах горячих спаев, с различной массой охлаждаемого объекта, как в вакууме, так и в среде спокойного воздуха. Исследования показали, что такой микроохладитель позволяет в вакууме без нагрузки и при температуре горячих спаев 333 К снизить температуру холодного спая на 120 К в течение 2,5 секунды. В среде спокойного воздуха разность температур 120 К достигается через 5,3 секунды. Увеличение тока выше оптимального, как и для двухкаскадных микроохладителей, не позволяет получить оптимального возрастания скорости охлаждения.

Влияние массы охлаждаемого объекта на скорость охлаждения показано на рис.6, где приведены обобщенные нагрузочные характеристики микроохладителя. Полученные характеристики могут быть использованы для построения динамических характеристик трехкаскадных микроохладителей, имеющих указанные выше высоты термоэлементов, толщины коммутационных пластин и соотношения площадей по каскадам.

Такой же микроохладитель испытывался с теплорассеивающим радиатором в виде медного цилиндра массой 100 г. Условия и методика испытаний были такими же, как и для двухкаскадного. Ток уменьшался с 42 А до 17 А через 125 секунд. Без нагрузки микроохладитель снижает температуру на 95 К через 5 секунд, в то время как с объектом массой 0,1 г наибольшее снижение температуры на 83 К достигается через 30 секунд.

Температурный диапазон применения быстродействующих микроохладителей с различным числом каскадов может быть определен из сравнения их динамических характеристик, которые приведены на рис.7 для температуры горячих спаев 333 К.

Как видно из графиков, наибольшей скоростью охлаждения в первые 0,5 секунды обладает микроохладитель, изготовленный из термоэлементов высотой 0,5 мм. Если необходимо снизить температуру объекта на 60...65 К, то следует применять однокаскадные микроохладители, т.к. увеличение числа каскадов не приводит к возрастанию скорости охлаждения при значительном увеличении тока и потребляемой мощности. Диапазон разностей температур 65...100 К может быть перекрыт двухкаскадными микроохладителями с различными соотношениями площадей поперечного сечения термоэлементов по каскадам. С помощью трехкаскадных микроохладителей можно расширить диапазон температур на 20...25 К, но с увеличением разности температур скорость охлаждения заметно снижается, что связано с увеличением массы полупроводниковых материалов по мере роста числа каскадов.

При работе термоэлектрических охлаждающих устройств в термоэле-

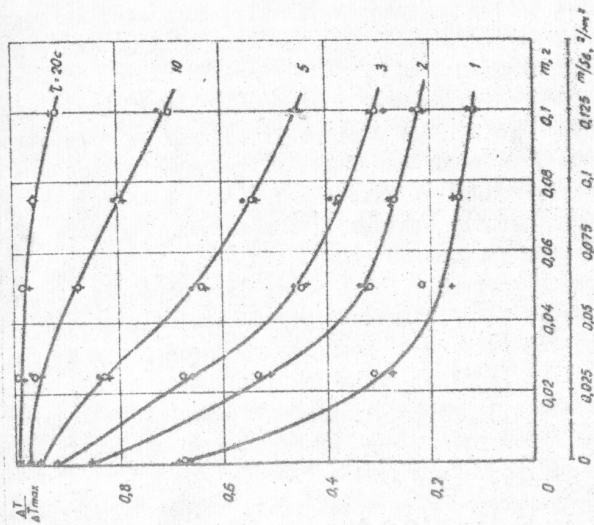


Рис. 6. Нагрузочные характеристики трехкаскадного микроохладителя для температуры горячих спаев, К: 0-333, +293, +203.

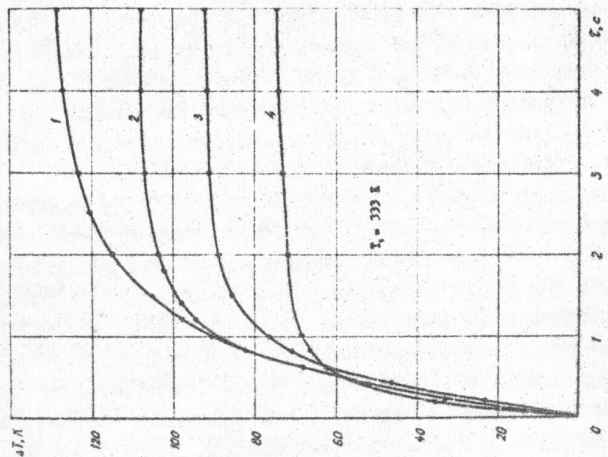


Рис. 7. Динамические характеристики микроохладителей: 1-трехкаскадного, 2-двухкаскадного $s_1/s_2=13$, 3-двухкаскадного $s_1/s_2=2$, 4-одиночного термоэлемента.

ментах возникают механические напряжения вследствие изменения температуры спаев. В нестационарных режимах они могут меняться не только по величине, но и по знаку, что усложняет условия работы и снижает надежность устройства. В связи с этим представляют значительный интерес ресурсные испытания, на основании которых можно оценить возможные сроки эксплуатации быстродействующих микроохладителей, предназначенных для многократных включений.

Для испытаний использовался трехкаскадный микроохладитель, описанный выше. Испытания проводились в вакууме при постоянной температуре горячих спаев и без охлаждаемого объекта. Время, в течение которого был включен ток, и длительность пауз выбирались таким образом, чтобы за время работы микроохладитель развивал разность температур, близкую к максимальной, а за время паузы прогревался до температуры горячих спаев. Время работы и пауз, удовлетворяющее этим условиям, составляло 10 секунд. Через определенное число циклов проводились контрольные измерения температурных характеристик.

Результаты испытаний показали, что в течение первой тысячи циклов происходит снижение разности температур, развиваемой микроохладителем, от 117,7 К до 113,5 К. До 100 тысяч циклов разность температур стабилизируется на уровне $\Delta T = 110$ К. Начиная со 100 тысяч циклов, происходит постепенное снижение разности температур, переходящее в резкое падение после 250 тысяч включений до значения, развиваемого вторым каскадом в самом начале испытаний.

Следует отметить, что всего было изготовлено и испытано в различных условиях и режимах более десяти двухкаскадных быстродействующих микроохладителей, которые в процессе исследований подвергались многократным включениям (до 200 и более), и при этом не наблюдалось существенных изменений температурных характеристик и, тем более, разрушения термоэлементов.

Таким образом, снижение высоты термоэлементов и толщины коммутационных пластин позволяет не только получить большие скорости охлаждения, но и повысить надежность и долговечность термоэлектрических систем охлаждения.

ВЫВОДЫ

1. Существующая сложная теория нестационарных режимов работы термоэлементов мало пригодна для анализа каскадных термоэлектрических систем охлаждения.

2. Предложенный приближенный метод расчета нестационарных режи-

мов работы n - каскадных микроохладителей, основанный на решении системы $n+1$ дифференциальных уравнений, описывающих тепловые балансы на спае и учитывающих температурные зависимости свойств полупроводниковых материалов, позволяет рассчитывать динамические характеристики с удовлетворительной для инженерной практики точностью.

3. Проведенные экспериментальные исследования показали, что для существующей технологии коммутации изготовление быстродействующих микроохладителей следует производить из термоэлементов высотой 2 ... 0,5 мм. Влияние теплоемкости полупроводниковых материалов, а также электрических и термических сопротивлений спаев вне этого диапазона высот приводит к ухудшению либо динамических, либо температурных характеристик.

4. В коммутационных пластинах быстродействующих термоэлементов можно допускать плотность тока до 80...90 А/мм², что позволяет значительно снизить теплоемкость охлаждаемых узлов.

5. При питании микроохладителей током в виде одиночного прямоугольного импульса увеличение тока выше оптимального не целесообразно как для однокаскадных, так и для многокаскадных микроохладителей, т.к. не приводит к ощутимому увеличению скорости охлаждения, но существенно уменьшает разность температур.

6. Экспериментально получена зависимость, позволяющая учесть вклад полупроводниковых материалов в теплоемкость охлаждаемых холодными спаеми узлов, что дает возможность существенно уточнить приближенный метод расчета.

7. Получены обобщенные нагрузочные характеристики термоэлементов, позволяющие определять динамические характеристики любых однокаскадных микроохладителей, работающих при постоянной температуре горячих спаев в диапазоне температур 293...333 К.

8. Скорость охлаждения, получаемая с помощью каскадных микроохладителей с разветвленной схемой электропитания, определяется, в основном, динамическими характеристиками холодного каскада, поэтому целесообразно стремиться к увеличению его мощности. При этом в высокотемпературных каскадах можно применять термоэлементы большей высоты.

9. С помощью однокаскадных термоэлектрических охладителей возможно получить средние скорости снижения температуры холодного спае до 60...70 К/с, а с помощью двухкаскадных - до 80...90 К/с. Дальнейшее увеличение числа каскадов не приводит к возрастанию скорости охлаждения.

10. Для сочетания высокой скорости охлаждения с последующей длительной работой в стационарном режиме при ограниченной поверхности теплорассеивающего радиатора целесообразно применять ступенчатый режим электропитания микроохладителей.

11. Ресурсные испытания трехкаскадного микроохладителя показали, что быстродействующие микроохладители, изготовленные из термоэлементов высотой 0,5...1 мм, сохраняют удовлетворительную работоспособность при многократном включении до 200...250 тысяч раз.

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛУ, ИЗЛОЖЕННОМУ В ДИССЕРТАЦИИ

1. Наер В.А., Соломяников А.Д. Быстродействующие термоэлектрические микроохладители. - Холодильная техника, 1975, №9, с. 17 - 19, ИСН.

2. Соломяников А.Д. Быстродействующие термоэлектрические микроохладители. - Тезисы докладов на Второй Всесоюзной конференции молодых специалистов по холодильной технике и технологии. М., 1975, с. 26 - 27.

3. Наер В.А., Соломяников А.Д. Исследование модифицированного термоэлемента. - В сб.: Холодильная техника и технология. Киев: Техника, 1976, вып. 22, с. 30 - 34, ИСН.

4. Наер В.А., Соломяников А.Д. Быстродействующий микрохолодильник. - Приборы и техника эксперимента, 1977, №1, с. 286, ИСН.

5. Наер В.А., Соломяников А.Д. Расчет нестационарных режимов работы каскадных термобатарей. - ВИНТИ; деп. №2108-77; М., 1977.

6. Наер В.А., Белозорова Л.А., Соломяников А.Д. Температурное поле термоэлемента. - Известия АН СССР - Энергетика и транспорт, 1977, №5, с. 170 - 172, ИСН.

Обозначения: T , T_{0i} , T_i , T_c - температура, температура холодного спае i - го каскада, горячего спае, окружающей среды; x - координата; τ , τ_0 - время, постоянная времени; λ , α , ρ - коэффициент теплопроводности и температуропроводности, удельное электрическое сопротивление полупроводниковых материалов; j - плотность тока; Q_i , Q_{0i} , Q_n , Q_c - теплопроизводительность и холодопроизводительность i - го каскада, теплопритоки к холодному спае, тепло, отводимое от горячих спаев в окружающую среду; $\Sigma(mc)$, $\Sigma(mc)_i$ - суммарная приведенная теплоемкость горячих спаев и охлаждаемых узлов i - го каскада; α - коэффициент теплоотдачи; F_0 - площадь холодного спае; l , S - высота и площадь поперечного сечения термоэлемента.