

Автореферат
Я-47

проф. Гушаку М.В.

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи
Для служебного пользования

Экз. № _____

000028

ЯКОВЛЕВ Юрий Александрович

УДК 621.565.83

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРООХЛАДИТЕЛЕЙ
ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКООМНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Специальность 05.04.03 - машины и аппараты холодильной
и криогенной техники и систем кондиционирования

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

xv 1031

Институт холода
ОНАХТ
бібліотека

Одесса - 1987

Работа выполнена в Одесском технологическом институте
холодильной промышленности

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор НАЕР В.А.

Официальные оппоненты: - доктор технических наук,
профессор Спокойный Д.Е.;
- кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Кирпач Н.С.

Ведущая организация: НИИ "Сатурн", г.Киев

Защита состоится 23 февраля 1987г. в 11⁰⁰ часов
на заседании специализированного совета К.068.27.01 при Одесском
технологическом институте холодильной промышленности по адресу:
270057, г.Одесса, ул. Петра Великого, 1/3, ОТХП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

г.

Икульшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В последние годы термоэлектрическое охлаждение (ТЭО) выросло в самостоятельное направление холодильной техники. Широкое использование термоэлектрических устройств в радиоэлектронике, измерительной технике, приборостроении, медицине, биологии и других отраслях народного хозяйства заставляет с еще большей настойчивостью искать пути улучшения их энергетической эффективности, электрических, динамических и габаритно-массовых характеристик. Улучшение основных характеристик ТЭО в значительной мере связано с использованием полупроводниковых материалов, обладающих не только максимально возможным добротностью Z , но и различным соотношением между коэффициентами термоэдс, удельной электропроводности и теплопроводности. Путем варьирования этими коэффициентами возможно расширить температурный диапазон применения ТЭО, снизить токи электропитания, повысить энергетические характеристики некоторых каскадных схем, улучшить габаритно-массовые и динамические характеристики ТЭО. Решение всех этих вопросов актуально и своевременно.

В связи с вышеотмеченным сформулированы задачи настоящего исследования:

1. Разработать технологию изготовления полупроводниковых термоэлектрических материалов с повышенными значениями коэффициента термоэдс и удельного электрического сопротивления.
2. Исследовать температурные зависимости термоэлектрических свойств разработанных материалов.
3. Определить влияние термоэлектрических свойств полупроводниковых материалов в пределах ограниченного значения добротности на энергетические, температурные и габаритно-массовые характеристики термоэлектрических охладителей.
4. Разработать, исследовать и внедрить на базе разработанных материалов опытные образцы термоэлектрических охладителей.

Научные положения.

1. Возможно существенное улучшение энергетических, электрических, габаритно-массовых и динамических характеристик термоэлектрических охлаждающих устройств путем изменения электрофизических свойств полупроводниковых материалов в пределах постоянной или слабо меняющейся термоэлектрической добротности.

2. Использование комплексов $1/\alpha$, α^2/ρ и $1/(\alpha^2\rho)$ позволяет значительно упростить оценочные расчеты электрических и габаритно-

массовых характеристик термобатарей для термоэлектрических охладителей.

Основные научные результаты:

1. Предложены методы изготовления полупроводниковых материалов n -типа и p -типа с повышенными значениями коэффициента термоэдс и удельного электрического сопротивления.

2. Исследование температурных зависимостей термоэлектрических свойств разработанных материалов показало, что при температурах ниже 220К их эффективность выше и в области температур 100...120К превышает на 20% величину Z известных материалов.

3. Показана перспективность использования разработанных материалов в низкотемпературных каскадах особенно для микроохладителей с разветвленной схемой электропитания каскадов.

4. Разработанная новая методика, использующая комплексы $1/\alpha$, α^2/ρ и $1/\alpha^2\rho$, позволяет производить предварительную оценку габаритно-массовых и электрических характеристик охладителей без подробного расчета охладителя.

Практическая ценность. Разработана технология получения высокоомных материалов и на их основе изготовлены и внедрены опытные образцы термоэлектрических микроохладителей для светодиодов и других элементов оптико-электронной аппаратуры, позволяющие в 1,5...2,0 раза сократить затраты полупроводниковых материалов и, соответственно, габаритные размеры термобатарей.

Внедрение результатов исследования. Результаты проведенных исследований используются на предприятиях п/я Г-4015 (г. Глухов), п/я Р-6028 (г. Киев), п/я Х-5827 (г. Киев).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на III Всесоюзной конференции по холодильному машиностроению (г. Одесса, 1982г.), Республиканской конференции по лазерной технике (г. Киев, 1985г.), ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава и сотрудников ОТИХП (г. Одесса, 1976-1985гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 7 печатных работ, научно-технический отчет и получено авторское свидетельство.

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 134 страницах машинописного текста, включает 33 рисунка, 18 таблиц и состоит из введения, трех глав, выводов, списка использованной литературы, включающего 69 наименований и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Проведенный анализ литературных данных по исследованию материалов для термоэлектрических охлаждающих устройств и способов их получения определил необходимость разработки технологии получения модифицированных полупроводниковых материалов с повышенными значениями коэффициента термоэдс и удельного электрического сопротивления, а также определил перспективность использования этих материалов в термоэлектрических охладителях.

Для получения модифицированных полупроводниковых термоэлектрических материалов с повышенными значениями коэффициента термоэдс и удельного электрического сопротивления в качестве основы были выбраны сплавы на основе соединений $Bi-Te-Se-Sb$.

Проведенные экспериментальные исследования позволили выбрать для получения n -ветви высокоомного термоэлемента метод Бриджмена, с помощью которого были получены материалы n -типа проводимости со следующими параметрами при $T=300K$: $\alpha=250$ мкВ/К, $\sigma=450...600$ Ом⁻¹см⁻¹. Материалы p -типа с аналогичными параметрами методом Бриджмена получить не удалось.

Для получения p -ветви высокоомного термоэлемента был предложен комбинированный метод, содержащий операции направленной кристаллизации с последующим прессованием и отжигом. В качестве заготовки использовались поликристаллические образцы p -типа, полученные методом Бриджмена. Образец помещался в прессформу и прессовался при $T=300K$ перпендикулярно направлению кристаллизации. Последующий отжиг осуществлялся в вакууме 0,013 Па. В таблице I приведены термоэлектрические характеристики образцов p -типа состава $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3$ легированных 4 вес.% Te и 1 вес.% Se на различных стадиях обработки.

Анализ данных таблицы I показывает, что величина Z образцов p -типа после механической и термической обработки на 15...18% ниже, чем кристаллических, что частично компенсирует увеличение удельного электрического сопротивления и обеспечивает относительно высокую величину добротности Z .

Для выработки рекомендаций по воспроизводимому получению полупроводниковых термоэлектрических материалов с повышенными значениями коэффициента термоэдс и удельного электрического сопротивления было проведено экспериментальное исследование влияния условий изготовления и технологических режимов на свойства материалов. При получении материалов n -типа в качестве основы были взяты составы

Таблица 1

Изменение термоэлектрических параметров материала р-типа на различных стадиях обработки

№ образца	После выращивания методом направленной кристаллизации				После прессования		После отжига				Время отжига, ч
	α , мкВ/К	σ , Ом ⁻¹ см ⁻¹	λ , Вт/(мК)	$Z \cdot 10^3$, I/К	α , мкВ/К	σ , Ом ⁻¹ см ⁻¹	α , мкВ/К	σ , Ом ⁻¹ см ⁻¹	λ , Вт/(мК)	$Z \cdot 10^3$, I/К	
1	205	1080	-	-	208	870	252	490	-	-	90
2	207	1040	-	-	211	780	254	480	-	-	90
3	220	930	-	-	-	-	249	530	-	-	60
4	210	920	-	-	-	-	243	660	-	-	140
5	208	1000	1,5	2,88	-	-	240	550	1,25	2,55	160
6	205	980	1,6	2,58	213	840	236	660	1,30	2,85	140

Таблица 2

Изменение концентрации и подвижности электрических зарядов на различных стадиях обработки полупроводниковых материалов

№ образца	Состав основы и легирующие добавки	После выращивания		После прессования		После отжига	
		$n \cdot 10^{19}$, см ⁻³	μ , см ² /(В·с)	$n \cdot 10^{19}$, см ⁻³	μ , см ² /(В·с)	$n \cdot 10^{19}$, см ⁻³	μ , см ² /(В·с)
1	$Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3 + 4 \text{ вec.}\% Te +$	0,96	580	0,82	490	0,794	387
2	$+ 1 \text{ вec.}\% Se$	0,94	580	0,80	510	0,766	401
3	$Bi_{1,8}Sb_{0,2}Te_{2,85}Se_{0,15} +$	0,77	427	-	-	-	-
4	$+ 0,06 \text{ вec.}\% SbI_3$	0,748	460	-	-	-	-

$Bi_{1,2}Sb_{0,2}Te_{2,15}Se_{0,15}$ и $Bi_{1,9}Sb_{2,94}Se_{0,06}$, для легирования которых выбраны SbI_3 и Hg_2Cl_2 .

Приведенные на рис. 1 и 2 экспериментальные данные позволяют установить характер изменения термоэлектрических параметров в зависимости от концентрации легирующих добавок и показывают, что концентрации 0,06...0,07 вес.% SbI_3 и 0,09...0,11 вес.% Hg_2Cl_2 обеспечивают значения $\alpha = 255...275$ мкВ/К и $\sigma = 450...600$ Ом⁻¹см⁻¹. При этом трихлористая сурьма является более эффективной легирующей добавкой ($\alpha^2\sigma = (37...42) \cdot 10^{-6}$ Вт/(К²см)), чем каломель ($\alpha^2\sigma = (31,5...37) \cdot 10^{-6}$ Вт/(К²см)).

Исследование на однородность выращенных поликристаллов *n*-типа показало, что при легировании основы трихлористой сурьмой относительная неравномерность распределения свойств по длине слитка меньше, а выход полупроводниковых материалов с параметрами $\alpha \geq 240$ мкВ/К и $\sigma = 450...600$ Ом⁻¹см⁻¹ на 50...60% больше, чем при легировании однохлористой ртутью.

Таким образом, наиболее предпочтительной донорной добавкой для получения высокоомных материалов *n*-типа является SbI_3 .

Одновременно была получена зависимость свойств полупроводниковых материалов от условий выращивания и геометрии слитка, которая показала, что *n*-ветвь с повышенными значениями коэффициента термоэдс и удельного электрического сопротивления получается при диаметре слитка, равном 0,6...0,8 см и скорости выращивания 0,4...0,6 см/ч при градиенте температур у фронта кристаллизации 20...25К.

Для определения оптимальных технологических режимов получения высокоомных материалов *p*-типа было проведено экспериментальное исследование влияния давления прессования, длительности выдержки под давлением, продолжительности и температуры отжига на термоэлектрические свойства материала *p*-типа. Одновременно изучалось влияние состава и содержания легирующих добавок на параметры материала при оптимальных технологических режимах.

Первоначально исследовались образцы *p*-типа состава $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3$, легированного 4 вес.% Те и 1 вес.% Се. Было установлено, что время выдержки под прессом более 30 секунд не оказывало существенного влияния на термоэлектрические характеристики подпрессованных и отожженных образцов. Поэтому во всех дальнейших исследованиях продолжительность выдержки под прессом составляла 30 секунд.

Исследование влияния давления прессования на термоэлектрические параметры образцов *p*-типа показало, что оптимальный диапазон давлений лежит в пределах 500...750 МПа. При таких давлениях удель-

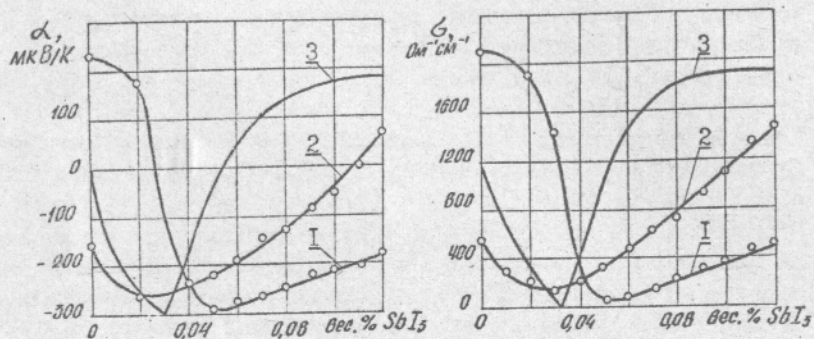


Рис.1. Влияние концентрации SbI_3 на термоэлектрические параметры сплавов: а) $Bi_{1,8}Sb_{0,2}Te_{2,05}Se_{0,15}$; б) $Bi_{1,9}Sb_{0,1}Te_{2,94}Se_{0,06}$. 1-д; 2-б; 3-д'б.

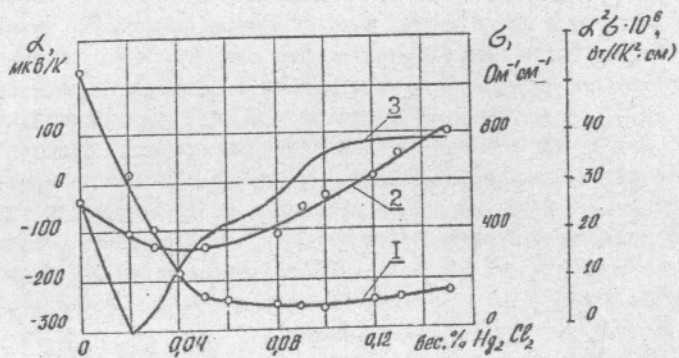


Рис.2. Влияние концентрации Hg_2Cl_2 на термоэлектрические параметры сплава $Bi_{1,9}Sb_{0,1}Te_{2,94}Se_{0,06}$. 1-д; 2-б; 3-д'б.

ная электропроводность ветви при $T=300K$ составляет $480...550 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$, что значительно ниже исходной ($840 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$), а термоэлектрическая добротность еще достаточно высока ($2,5...2,44$) $\cdot 10^3 K$.

Влияние длительности отжига при температурах 600, 630 и 660K на термоэлектрические свойства материала p -типа показано на рис.3. Для облегчения сопоставления измерения проводились на одних и тех же образцах, допрессованных при давлении 650 МПа, через определенные промежутки времени.

Из графиков, приведенных на рис.3 следует, что длительность отжига для давления прессования 650 МПа и температуры отжига 660K должна составлять не менее 10 часов. Этого времени достаточно для стабилизации термоэлектрических параметров p -ветви.

Для объяснения механизма изменения термоэлектрических параметров под воздействием прессования и отжига, наряду с измерениями коэффициента термоэдс, электропроводности и теплопроводности, было проведено измерение эффекта Холла при $T=300K$ на различных стадиях обработки образцов p -типа. По величине коэффициента Холла определяли концентрацию n и подвижность u носителей электрических зарядов (табл.2). Наиболее вероятно, что подвижность носителей снижается за счет рассеяния на структурных дефектах, образующихся при прессовании, а концентрация дырок уменьшается из-за растворения теллура второй фазы. Это подтверждается тем, что изменение коэффициента термоэдс и электропроводности после прессования и отжига у нелегированных сплавов p -типа менее выражено, чем у исследуемого легированного сплава, в котором по границам зерен присутствует эвтектика, богатая теллуром (вторая фаза). Для сравнения в таблице 2 приведены значения n и u для высокоомных образцов n -типа. Полученные данные показывают, что у термоэлектрических материалов с повышенными значениями коэффициента термоэдс и удельного электрического сопротивления, как и у большинства полупроводников, подвижность электронов больше, чем подвижность дырок. Исследование влияния состава основы и содержания легирующих добавок на термоэлектрические свойства высокоомных материалов p -типа показало, что наибольшая величина добротности ($2,61 \cdot 10^3 K^{-1}$) была получена у образцов состава $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3$, легированных 4 вес.% Te и 1 вес.% Se . При этом оптимальные технологические режимы получения полупроводниковых материалов p -типа со значениями коэффициента термоэдс $240...255 \text{ мкВ/К}$ и удельной электропроводности $450...600 \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ следующие: давление прессования $500...750 \text{ МПа}$, длительность выдержки под давлением не менее 30 секунд, температура отжига не менее 10 часов.

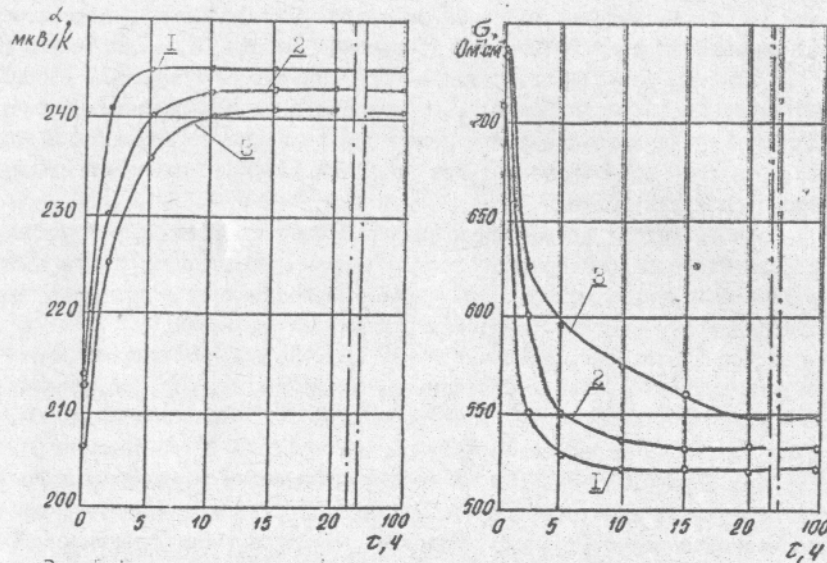


Рис. 5. Зависимость термоэлектрических параметров материала р-типа от времени отжига.
1 - $T=660$ К; 2 - $T=650$ К; 3 - $T=600$ К.

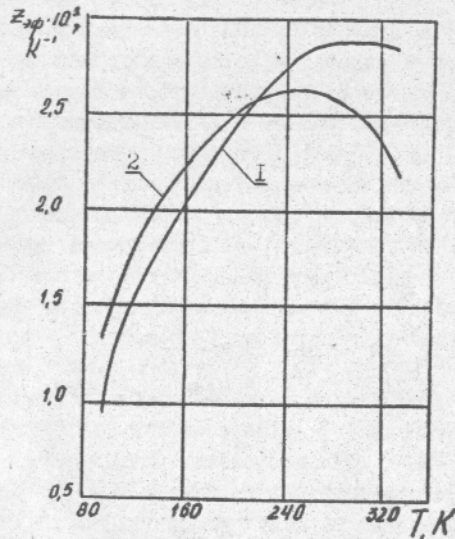


Рис. 4. Температурная зависимость эффективной добротности низкоомного (1) и высокоомного (2) термоэлементов.

Нижний температурный уровень, при котором могут работать современные каскадные термоэлектрические охладители (в том числе и в комбинированных системах охлаждения), может достигать 90...100К, а верхний - 350К. В соответствии с этим и был выбран температурный интервал исследования термоэлектрических свойств разработанных материалов. Конструкция криостата позволяла производить измерение температурных зависимостей коэффициента термоэдс α , удельной электропроводности σ р- и n-ветвей и среднего значения теплопроводности термоэлемента λ , а также определять величину максимальной разности температур ΔT_{max} на различных температурных уровнях.

На рис. 4. приведены величины эффективной термоэлектрической добротности высокоомного и низкоомного термоэлементов, определенные по экспериментальным значениям ΔT_{max} . Как следует из графиков, в интервале 210...90К эффективная добротность высокоомного термоэлемента становится больше, чем низкоомного. Относительное увеличение растет с понижением температуры и достигает при $T=100$ К 20%.

Рассмотрим возможность улучшения габаритно-массовых и электрических характеристик термоэлектрических систем охлаждения путем изменения таких свойств полупроводниковых материалов как удельное электросопротивление ρ и коэффициент термоэдс α в пределах постоянного или мало изменяющегося комплекса Z . Анализ проведен для таких диапазонов изменения величин α и ρ , которые реально возможны при существующей технологии производства полупроводниковых термоэлектрических материалов.

Известно, что основным параметром, определяющим габаритно-массовые характеристики полупроводниковых охладителей, является высота термоэлемента l , минимальная величина которой зависит от условий теплообмена на спаях и относительной величины контактных электрических сопротивлений.

Ниже рассмотрен случай интенсивного теплообмена на спаях, когда определяющим фактором в выборе высоты оказывается только относительное контактное электрическое сопротивление.

Влияние контактного электрического сопротивления учитывается известным способом путем введения поправки в величину Z :

$$Z' = \frac{Z}{1 + \frac{\rho_k}{\rho \cdot l}} \quad (I)$$

Из уравнения (I) следует, что при заданном ограничении ($Z' = \text{const}$) и при постоянной относительной величине контактного элект-

рического сопротивления величины ρ и l связаны соотношением $\rho \cdot l = const$. Рассмотрим, как изменяются в режиме максимальной энергетической эффективности и при постоянной холодопроизводительности Q_{01} основные параметры термоэлемента - сила тока, отношение l/s и масса - при изменении величин α и ρ в пределах $\mathcal{Z} = const$. Естественно, что при принятых допущениях энергетическая эффективность термоэлемента также остается неизменной.

Из соотношений

$$I_0 = \frac{Q_{01} (M^2 - 1)}{\alpha M (MT_0 - T)}, \quad (2)$$

$$(l/s)_0 = \frac{\alpha \Delta T}{\rho I_0 (M - 1)}, \quad (3)$$

вытекает, что оптимальное значение силы тока при увеличении удельного электрического сопротивления материала снижается из-за роста коэффициента термоэдс α , а отношение $(l/s)_0$ после подстановки (2) в (3) оказывается пропорциональным комплексу

$$(l/s)_0 = A \frac{\alpha^2}{\rho}, \quad (4)$$

где A - постоянная при принятых допущениях величина.

Масса полупроводниковых материалов, необходимых для изготовления термобатареи, определяется из соотношения

$$m = 2\gamma l s N, \quad (5)$$

где

$$N = Q_0 / Q_{01}. \quad (6)$$

В режиме максимальной энергетической эффективности холодопроизводительность термоэлемента определяется по уравнению

$$Q_{01} = \frac{s}{l} \mathcal{Z} \lambda \frac{M(T - T_0)(MT_0 - T)}{(M - 1)^2 (M + 1)}. \quad (7)$$

После подстановки (6) и (7) в (5) и учитывая, что $\rho \cdot l = const$, а $\mathcal{Z} = \alpha^2 / (\rho \lambda)$, получим

$$m = B \gamma \frac{Q_0}{\alpha^2 \rho}, \quad (8)$$

где B , также как и A , постоянная величина. Отметим, что при выводе уравнения (4) предполагалось равенство площадей p - и n -ветвей термоэлемента.

Легко показать, что аналогичный результат получается и для любого другого режима работы термобатареи, характеризуемого постоянным значением холодильного коэффициента.

Таким образом, из приведенных выше соотношений следует, что проходящий через термоэлемент ток, отношение l/s и масса полупроводникового материала в термобатареи пропорциональны соответственно величинам $1/\alpha$, α^2/ρ и $1/(\alpha^2 \rho)$.

В практике исследования полупроводниковых материалов очень часто используется комплекс $\alpha^2 \sigma$ ($\sigma = 1/\rho$). На рис.5 (кривые I) показаны изменения относительных величин $\bar{m} = \alpha_0^2 \rho_0 / (\alpha^2 \rho)$ и $\bar{I} = \alpha_0 / \alpha$ в зависимости от относительного изменения комплекса $\alpha^2 \sigma$ в пределах реально возможных значений α и σ . За опорные приняты величины $\alpha = 200$ мкВ/К и $\sigma = 1000$ Ом⁻¹ см⁻¹. Из графиков видно, что в пределах относительно небольшого изменения комплекса $\alpha^2 \sigma$ удается в 2-3 раза сократить затраты полупроводниковых материалов на изготовлении термобатареи заданной холодопроизводительности и уменьшить на 20-23% силу тока.

В случае, когда при изменении параметров материала будут иметь место потери в \mathcal{Z} , выражения для \bar{I} и \bar{m} определяют соотношениями:

$$\bar{I} = \frac{\alpha_0}{\alpha} \frac{M_0 (M_0 T_0 - T) (M^2 - 1)}{M (M T_0 - T) (M_0^2 - 1)}, \quad (9)$$

$$\bar{m} = \frac{\alpha_0^2 \rho}{\alpha^2 \rho} \frac{(M - 1)^2 (M + 1) M_0 (M T_0 - T)}{M (M T_0 - T) (M_0 - 1)^2 (M_0 + 1)}, \quad (10)$$

где индекс "0" относится к параметрам опорного материала. Выражение (10) значительно упрощается, если \bar{m} выразить через \bar{I} :

$$\bar{m} = \bar{I} \frac{\alpha_0 \rho_0}{\alpha \rho} \frac{M - 1}{M_0 - 1}. \quad (11)$$

С помощью выражений (9) и (10) были проведены расчеты для ряда материалов, у которых при снижении величины $\alpha^2 \sigma / \alpha_0^2 \sigma_0$ имеют место потери в \mathcal{Z} . Результаты расчетов представлены на рис.5 в виде графиков.

Таким образом, приведенная методика позволяет производить предварительную оценку габаритно-массовых и электрических характеристик полупроводникового охладителя без подробного расчета охладителя не только в пределах основного принятого допущения ($\mathcal{Z} = const$), но и с учетом того, что при изменении параметров материала имеют место потери в \mathcal{Z} , т.е. потери в энергетической эффективности.

Известно, что схемы с разветвлением токов не позволяют достигнуть предельных значений температур и энергетической эффективности, которые при прочих равных условиях обеспечивают схемы с последовательным электропитанием каскадов. Этот недостаток обусловлен одина-

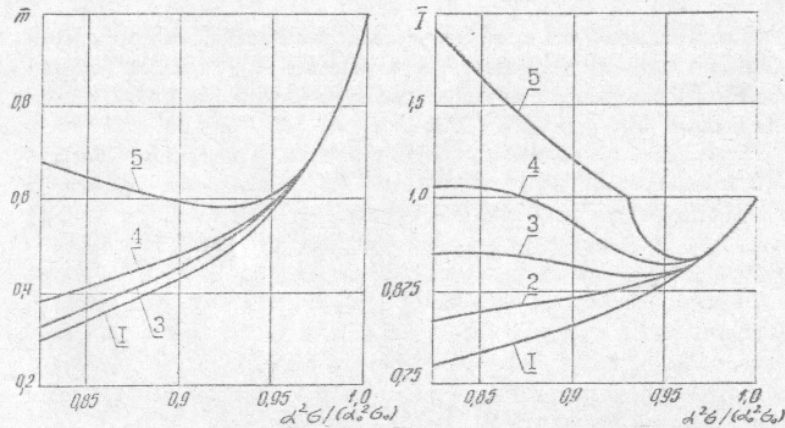


Рис.5. Зависимость величин \bar{m} и \bar{I} от относительного изменения свойств материалов: 1- $Z = const$; 2, 3, 4, 5- $Z = var$. 2- $\Delta \bar{T} = \Delta \bar{T}_p / \Delta \bar{T}_{max} = 0,5$; 3- $\Delta \bar{T} = 0,7$; 4- $\Delta \bar{T} = 0,8$; 5- $\Delta \bar{T} = 0,9$.

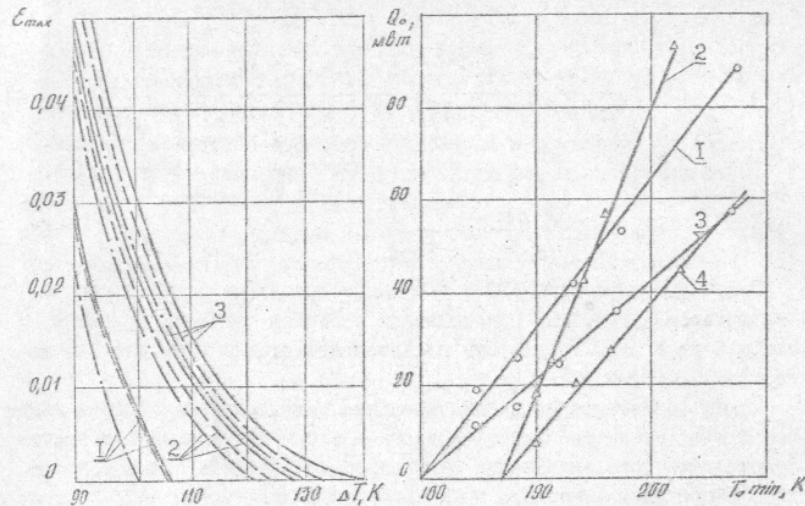


Рис.6. Зависимость $\mathcal{E}_{max} = f(\Delta T)$ для различных схем электропитания каскадных микроохладителей: 1-2к.; 2-3к.; 3-4к.; (—) — тип А; (---) — тип В.

Рис.7. Температурная зависимость холодопроизводительности (1, 2) и холодильного коэффициента (3, 4) трехкаскадных микроохладителей: Δ — без подбора; \circ — с подбором материалов.

ковым падением напряжения на термоэлементах всех каскадов, тогда как для обеспечения режима максимальной энергетической эффективности, необходимо, чтобы падение напряжения на термоэлементах изменялось по каскадам в соответствии с соотношением

$$U_i = \alpha_i \Delta T_i M_i / (M_i - 1) \quad (12)$$

Обычно соотношение величин, входящих в уравнение (12), такое, что U_i должно снижаться при переходе от высокотемпературных каскадов к низкотемпературным.

Соответствующий подбор материалов, связанный с использованием высокоомных термоэлементов в низкотемпературных каскадах, позволяет приблизить условие (12) к условию $U = const$ и тем самым улучшить характеристики рассматриваемых схем.

На рис.6 представлены температурные зависимости максимального холодильного коэффициента \mathcal{E}_{max} двух-, трех- и четырехкаскадных микроохладителей, рассчитанные при температуре горячих спаев $T = 303K$.

Рассматривались микроохладители двух типов: А и В. В микроохладителях типа А во всех каскадах использован один и тот же материал, имеющий оптимальные свойства при $T = 303K$ и известную зависимость $Z(T)$, а в микроохладителях типа В материалы подбирались по каскадам с существенно отличающимися коэффициентами термоэдс, но при условии, что для обоих типов микроохладителей $Z = idem$ по каскадам. На рис.6 приведены также данные для схем с последовательным электропитанием, определяющие предельные значения \mathcal{E}_{max} при выбранных значениях Z (сплошные кривые).

Из приведенных зависимостей видно, что путем подбора полупроводниковых материалов по каскадам (при условии $Z = idem$) можно существенно улучшить энергетические характеристики каскадных термоэлектрических микроохладителей с разветвленной схемой электропитания.

Для двухкаскадных микроохладителей типа В удается полностью компенсировать недостатки разветвленной схемы электропитания каскадов, а в трех- и четырехкаскадных микроохладителях значительно приблизить зависимость $\mathcal{E}_{max}(\Delta T)$ к соответствующей зависимости для схем с последовательным электропитанием каскадов.

С целью экспериментальной проверки предложенного способа оптимизации каскадных микроохладителей были изготовлены и исследованы две партии трехкаскадных микроохладителей типа А и В, выполненных по схеме с разветвлением токов по каскадам.

На рис.7 приведены опытные данные по температурным зависимо-

стям Q_0 и ε , полученные при исследовании микроохладителей обоих типов. Анализ полученных результатов показывает, что микроохладитель типа В за счет подбора полупроводниковых материалов по каскадам обеспечивает дополнительное снижение температуры по сравнению с микроохладителем типа А на 7К. При температуре холодного спая 190К холодопроизводительность охладителя типа В в 1,7 раза, а холодильный коэффициент в 2,3 раза больше, чем у микроохладителя типа А. Отметим, что расчетное приращение ΔT за счет подбора полупроводниковых материалов составило 8К.

Таким образом, в двух- и трехкаскадных микроохладителях с разветвленной схемой электропитания удается путем соответствующего подбора полупроводниковых материалов по каскадам существенно улучшить температурные и энергетические характеристики, вплотную приблизив их к соответствующим характеристикам схем с последовательным электропитанием каскадов.

На базе разработанных высокоомных материалов были изготовлены 150 охладителей полупроводниковых лазеров, а также созданы три системы термостабилизации лазерных диодов одновременно на пять температурных уровней каждая. Все разработанные микроохладители внедрены на предприятиях заказчика.

ВЫВОДЫ

1. Применение полупроводниковых материалов с повышенными значениями коэффициента термоэдс и удельного электрического сопротивления приводит к существенным улучшениям основных характеристик термоэлектрических охладителей.

2. Предложенная технология при использовании в качестве основы сплава $Bi_{1,9}Sb_{0,1}Te_{2,94}Se_{0,06}$ позволяет путем легирования трехиодистой сурьмой в количестве 0,06...0,07 вес.% при скорости выращения 4...6 мм/ч и градиенте температур 25 К/см получать материалы n -типа с коэффициентом термоэдс $\alpha = 250...270$ мкВ/К и удельной электропроводностью $\sigma = 400...550$ Ом⁻¹см⁻¹.

3. Предложенная технология при использовании в качестве основы $Bi_{0,5}Sb_{1,5}Te_3$, легированного 4 вес.% Te и 1 вес.% Se с допрессовкой выращенного слитка при давлении 500...750 МПа и отжи-

гом при температуре 660К в течение 10 часов позволяет получить материалы p -типа с величинами $\alpha = 240...255$ мкВ/К и $\sigma = 450...600$ Ом⁻¹см⁻¹.

4. Эффективное значение Z термоэлементов, изготовленных из разработанных материалов и определенное по величине ΔT_{max} , равно $2,6 \cdot 10^{-3}$ I/K при температуре 200...220К и на 20% превышает эффективность обычных материалов в области температур 100...120К.

5. Использование в низкотемпературных каскадах разработанных материалов дает возможность повысить энергетическую эффективность двух- и четырехкаскадных микроохладителей с разветвленным электропитанием, доведя ее в реальных конструкциях до эффективности устройств с последовательной коммутацией каскадов.

6. Разработанная методика позволяет с помощью комплексов $1/\alpha$, $1/(\alpha^2\rho)$ и α^2/ρ производить сравнительную оценку электрических и габаритно-массовых характеристик термоэлектрических батарей без подробного их расчета.

7. Применение в термоэлектрических охладителях материалов с повышенным удельным электросопротивлением приводит к сокращению расхода полупроводников в 1,5...2,0 раза и снижению тока электропитания на 20...23%.

8. Изготовленные и исследованные опытные образцы каскадных термоэлектрических охладителей различных элементов и узлов электронной аппаратуры, в которых были использованы разработанные материалы, подтвердили их высокие энергетические и габаритно-массовые характеристики и возможность расширения области применения термоэлектрического охлаждения.

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

1. Хирия А.Я., Яковлев Ю.А., Каплун В.М. Высокоомные полупроводниковые материалы для термоэлектрических охлаждающих устройств. - Холодильная техника и технология: Респ.межвед.науч.-техн.сб., 1978, вып.27, с.53-55.

2. Яковлев Ю.А. Исследование каскадных термоэлектрических микроохладителей. - В кн.: Тезисы докладов III Всесоюзной научно-

технической конференции по холод. машиностроению. М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1982, с.30-31.

3. Наер В.А., Яковлев Ю.А. Влияние свойств полупроводниковых материалов на характеристики термоэлектрических охладителей.- Холодильная техника, 1984, №3, с.44-45.

4. Каскадные термоэлектрические охладители/ В.А.Наер, Л.А.Белозерова, В.С.Спивак, А.Я.Хирич, Ю.А.Яковлев.- ПитЭ, 1984, №4, с.243-244.

5. Исследование каскадных термоэлектрических микроохладителей с разветвленной схемой электропитания/В.А.Наер, А.Я.Хирич, Ю.А.Яковлев, В.Г.Гайдай.- Холодильная техника и технология: Респ.межвед. науч.-техн.сб., 1985, вып.41, с.29-33.

6. Микротермостат для светоизлучающих устройств/В.А.Наер, А.Я.Хирич, В.Г.Иванов, Н.В.Прокопьева, Ю.А.Яковлев, Н.В.Тунев, А.Р.Мац.- ПитЭ, 1985, №4, с.250.

7. Наер В.А., Хирич А.Я., Яковлев Ю.А. Микротермостат для лазерного диода.- В кн.: Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции "Создание и использование лазерной техники и технологии в машиностроении и приборостроении". Киев, 1985, с.126-127.

В.А.с. II79869 (СССР). Способ изготовления положительной ветви охлаждающего термоэлемента /В.А.Наер, А.Я.Хирич, Ю.А.Яковлев и др.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

α - коэффициент термоэДС; σ - удельная электропроводность; ρ - удельное электросопротивление; ρ_k - удельное контактное электрическое сопротивление; $\lambda, \bar{\lambda}$ - удельная теплопроводность материала и термоэлемента; Z - термоэлектрическая добротность; Z' - термоэлектрическая добротность с учетом контактного электрического сопротивления; l - высота ветви термоэлемента; S - площадь сечения ветви термоэлемента; I_o, I - оптимальный и рабочий ток электропитания; T, T_o - температуры горячего и холодного спаев термоэлемента; $\Delta T = T - T_o$ - перепад температур на термоэлементе; M - безразмерный комплекс; N - число термоэлементов в батарее; Q_o, Q_{M1} - холодопроизводительность термобатареи и термоэлемента; m, γ - масса и плотность полупроводниковых материалов; n, u - концентрация и подвижность носителей электрических зарядов; β_i - электрическое сопротивление термоэлемента; ϵ, ϵ_{max} - холодильный коэффициент.