

14 ДЕК 1998

На правах рукописи

САТИН Валерий Александрович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ПЛЕНОЧНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЛУЧНИСТЫХ ПОТОКОВ**

Специальность 05.14.05 - Теоретические основы теплотехники

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж - 1998

Работа выполнена на кафедре промышленной теплоэнергетики
Воронежского государственного технического университета

Научный руководитель : д-р техн. наук, проф., Заслуженный деятель науки
техники РФ Фалеев В.В.

Официальные оппоненты: д-р техн. наук, проф.
Пешков В.В.
канд. техн. наук
Лушникова Е.Н.

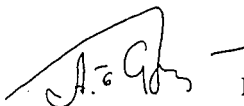
Ведущая организация - ОАО «ЛОМО» (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится "12" 01" 1999 г. в 11 час. на заседании
диссертационного совета Д.063.081.05 в конференц-зале Воронежского
государственного технического университета по адресу 394 026 , Воронеж;
Московский пр.,14.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского
государственного технического университета.

Автореферат разослан "7" 12" 1998 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Барakov А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Термоэлектрические преобразователи (ТП), обладающие простотой конструкции и надежностью, находят широкое применение в различных отраслях промышленности. В приборостроении ТП используются в качестве чувствительных элементов дистанционных измерителей тепловых потоков. Улучшение теплофизических параметров таких измерителей связано как с уменьшением их габаритно-массовых характеристик, так и повышением эффективности термоэлектрических материалов. Это достигается применением в качестве ТП пленочных структур. Пленочные ТП можно использовать также в качестве слаботочных термогенераторов в геотермоэнергетических установках, где возможна большая концентрация энергии на малой площадке.

Однако известные в настоящее время пленочные ТП для теплофизического приборостроения не превосходят еще по своим параметрам характеристики массивных ТП, что связано, на наш взгляд, с недооценкой современных достижений микроэлектроники, неправильным выбором материалов и размеров таких преобразователей. Правильный выбор материалов и размеров связан прежде всего с анализом тепловых процессов, протекающих в пленочных структурах ТП, что позволяет полнее использовать их преимущества. Применение же термоэлектрических пленочных структур для геотермоэнергетики находится пока в стадии обсуждения и научных экспериментов.

Таким образом, исследование теплофизических параметров измерительных пленочных ТП и пленочных термогенераторов и создание на этой основе эффективных устройств является актуальной задачей.

Диссертационная работа выполнялась по комплексному плану научно-исследовательских работ Воронежского политехнического института (ос.рег. № 75028213, гос.рег. № 75065782, гос.рег. № 77038358) в части создания измерительных пленочных ТП, а также по координационному плану НИР ИКИ АН СССР на основании распоряжения Президиума АН СССР № 00272 от 31.05.1973 г. и по постановлению ГКНТ СМ СССР № 119 от 31.08.1978 г., (проблема 01.09.).

Целью работы является моделирование и разработка методов теплового расчета оптимальных параметров пленочных ТП лучистых потоков и создание на их основе устройств для теплофизического приборостроения в геотермоэнергетике.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

1. Разработка математической модели и метода теплового расчета основных параметров пленочных термоэлектрических преобразователей лучистых потоков.

2. Разработка методов расчета оптимальных размеров пленочных ТП, применяемых в теплофизическом приборостроении и для выработки электрической энергии.

3. Разработка рекомендаций по выбору материалов для изготовления высокочувствительных измерителей лучистых потоков.

4. Создание и исследование быстродействующих и высокочувствительных измерителей лучистых потоков и слаботочных пленочных термогенераторов.

Научная новизна.

1. Предложены физическая и математическая модели теплопереноса в термоэлектрических пленочных преобразователях энергии и изучены основные особенности течения тепловых процессов.

2. Получены соотношения для расчета оптимальных размеров и теплофизических параметров пленочных ТП.

3. Установлены критерии оценки качества используемых термоэлектрических материалов.

4. Получены соотношения для определения оптимальных теплофизических параметров термоэлектрических материалов, применяемых в ТП.

5. Предложены и исследованы конструкции высокочувствительных и быстродействующих пленочных ТП для теплофизического приборостроения.

6. Предложен и исследован слаботочный пленочный термоэлектрический генератор.

Практическая ценность работы. Разработанные методики расчета оптимальных размеров и параметров пленочных ТП дают возможность сократить время для конструкторско-технологических проработок теплофизических приборов и пленочных генераторов. Устройства, разработанные на основе проведенных исследований, использовались в практике КБ "Энергия" им. академика С.П.Королева, МИЦ "Струйметехнология", Воронежском политехническом институте при проведении научных работ по дистанционному измерению интенсивных тепловых потоков, а также в цехах ряда предприятий г. Воронежа. Результаты используются в учебном процессе кафедр промышленной теплоэнергетики при выполнении курсового проекта.

За участие в разработке пленочных ТП для целей ракетно-космической техники автор награжден дипломом Федерации космонавтики СССР.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Республиканской конференции молодых ученых «Вопросы микроэлектроники и физики полупроводниковых приборов» (Тбилиси, 1977), IV Всесоюзной конференции по радиационному теплообмену (Киев, 1978), I и II Всесоюзных школах по термоэлектричеству (Яремча, 1976, 1978), III Всесоюзной конференции по охране труда (Каунас, 1982), XXVIII семинаре "Теплотехнические основы методов прямого преобразования тепловой энергии в электрическую (Киев, 1981), IX научных чтениях по космонавтике (Москва, 1985), Всесоюзном семинаре "Современное состояние теплофизического приборостроения" (Киев, 1985), I, III, IV и VI Всесоюзных семинарах по тепловым приемникам излучения (Мо-

сква, 1977, 1982, 1986, 1988) межвузовском семинаре «Процессы теплообмена в энергомашиностроении» (Воронеж, 1991), ежегодных научных конференциях Воронежского государственного технического университета с 1976 по 1997 г.

Публикации. По результатам проведенных автором исследований опубликовано 14 печатных работ.

Структура и объём работы. Работа изложена на 177 страницах машинописного текста, содержит 54 рисунка, 3 таблицы и состоит из введения, пяти глав, заключения, перечня библиографических источников, приложения. Библиографический список включает 67 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертации, цели и задачи исследования, научная новизна основных результатов, практическая значимость.

Первая глава посвящена описанию особенностей течения тепловых процессов в ТПП. Обзор развития ТПП и методов их расчета показал, что применение ТПП в качестве чувствительных элементов измерителей лучистых тепловых потоков улучшает характеристики таких приборов по сравнению с массивными преобразователями. Однако известные ТПП ещё не достигли своих оптимальных параметров. Известные методы расчета не учитывают некоторые особенности течения тепловых процессов в ТПП.

Тепловые процессы в ТПП сводятся к теплообмену с окружающей средой, накоплению тепла в самом преобразователе и термоэлектрическим эффектам. Для улучшения основных характеристик преобразователя всегда желательно уменьшать тепловые потери в окружающую среду, поэтому в данной работе рассматривается ТПП, работающий в вакууме.

Важной особенностью протекания тепловых процессов в ТПП является наличие в них термоэлектрических эффектов. Показано, что из пяти термоэлектрических эффектов необходимо учитывать эффекты Зеебека и Пельтье. Эффект Томпсона не учитывается, поскольку термоэлектрический материал, применяемый в рассматриваемых ТПП, считается однородным и без наличия градиента термоЭДС. Ввиду малости не учитываются также необратимые потери тепла за счет Джоулева нагрева.

Делается вывод о причинах, по которым ТПП не достигают своих предельных характеристик. К ним относится неверный выбор материалов и размеров подложки и термоэлектрических ветвей, что является следствием недооценки тщательного анализа протекания тепловых процессов в ТПП. Сформулированы основные направления развития ТПП и поставлены задачи исследования.

Во второй главе дано описание работы ТПП, введены их основные ха-

рактеристики. Составлено уравнение теплового баланса для пленочного термоэлектрического измерителя тепловых потоков (ПТЭП). Расчетная схема ПТЭП показана на рис. 1. При составлении уравнения теплового баланса было учтено, что важной особенностью ПТЭП являются их малые размеры. В этом случае можно считать свойства термоэлектрических материалов постоянными и независимыми от температуры, тогда влиянием эффекта

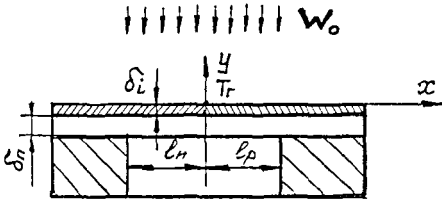


Рис.1. Расчетная схема ПТЭП

Томпсона на работу ПТЭП можно пренебречь. Проведенные нами оценки показали, что тепловой поток, выделяемый в ПТЭП за счет эффекта Джоуля мал и составляет $\approx 10^{-11}$ Вт, поэтому при анализе работы ПТЭП влиянием этого эффекта также можно пренебречь.

В общем случае уравнение теплового баланса для каждой из ветвей будет двумерным, описывающим распространение тепла вдоль и поперек полоски. Однако численные расчеты показали, что при отношениях теплопроводности подложки (λ_n) к теплопроводности ветви (λ_i): $\lambda_n / \lambda_i < 0,5$ и длины ветви к толщине подложки (δ_n): $l / \delta_n > 10$, что характерно для рассматриваемых в данной работе ПТЭП, погрешность расчета перепада температур на "горячем" спае термоэлектрических ветвей по одномерной модели составляет $< 3\%$ по сравнению с учетом поперечной неравномерности температурного поля.

С учетом принятых допущений уравнение теплопроводности для падающего теплового потока излучения, изменяющегося по гармоническому закону с частотой f в одномерном случае, будет иметь вид

$$c_i^* \frac{\partial U_i}{\partial t} \ell_i = \lambda_i^* \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i^2} \ell_i - B_i U_i \ell_i + \varepsilon W_0 A_i \exp(j\omega t), \quad (1)$$

где

$$c_i^* = c_n \rho_n S_n + c_p \rho_p S_p, \quad \lambda_i^* = \lambda_n S_n + \lambda_p S_p, \quad B_i = G + \frac{\alpha^2 T \sigma_i S_i}{2 \ell_i^2},$$

$$G = 4\sigma T^3 [b_i(\varepsilon_i - \varepsilon_n) + 2b_n \varepsilon_n], \quad A_i = b_i \ell_i, \quad i = n, p.$$

Здесь c_n, ρ_n, S_n - удельная теплоёмкость, плотность и площадь сечения подложки соответственно; $\lambda_n, b_n, \varepsilon_n$ - коэффициент теплопроводности, ширина и коэффициент излучения подложки соответственно; σ - постоянная Стефана-Больцмана; α - суммарная термоЭДС спаев; $j = \sqrt{-1}$; $\omega = 2\pi f$; ε, w_0 - коэффициент поглощения приемной площадки и плотность падающего теп-

лового потока соответственно, τ - время.

Граничными и начальными условиями для (1) являются

$$U_n(-\ell_n, 0) = U_p(\ell_p, 0) = 0 \quad , \quad U_n(0) = U_p(0) = U_0 \quad , \quad (2)$$

$$U_n(-\ell_n, \tau) = U_p(\ell_p, \tau) = 0 \quad , \quad \lambda_n^* \frac{\partial U_n}{\partial x} \Big|_{x=0} = \lambda_p^* \frac{\partial U_p}{\partial x} \Big|_{x=0} \quad .$$

В нашей работе были получены решения уравнений (1) при условиях (2), которые описывают распределение температуры вдоль термоэлектрических ветвей. При этом гиперболические функции, входящие в решение, разлагались в ряды с ограничением для синуса одним, а для косинуса - двумя членами ряда. Получено выражение для модуля температурного перепада в точке $x = 0$

$$U_0 = \frac{\varepsilon W_n S_{np}}{(\Lambda^2 + c^2 \omega^2)^{0.5}} \quad , \quad (3)$$

где

$$\Lambda = 2 \left(\frac{\lambda_n^*}{\ell_n} + \frac{\lambda_p^*}{\ell_p} \right) + G(\ell_n + \ell_p) + \frac{\alpha^2 T}{2} \left(\frac{\sigma_n S_n}{\ell_n} + \frac{\sigma_p S_p}{\ell_p} \right) \quad , \quad c = c_n^* \ell_n + c_p^* \ell_p$$

При этом вольтваттная чувствительность ПТЭП будет определяться по формуле

$$\Gamma = \frac{\varepsilon \alpha}{(\Lambda^2 + c^2 \omega^2)^{0.5}} \quad (4)$$

Считая, что шум ПТЭП ограничен Джонсоновским в полосе пропускания Δf , а сопротивление ПТЭП не зависит от частоты, было получено выражение для определения мощности эквивалентной шуму

$$MЭШ = \left[\frac{4kT N \Delta f}{\varepsilon^2 \alpha^2} \left(\frac{\ell_n}{\sigma_n S_n} + \frac{\ell_p}{\sigma_p S_p} \right) (\Lambda^2 + c^2 \omega^2) \right]^{0.5} \quad , \quad (5)$$

где k - постоянная Больцмана; N - число пар термоэлектрических ветвей.

При измерении периодически изменяющегося теплового потока можно считать, что ПТЭП работает как частотный фильтр с передаточной характеристикой

$$K(\omega) = 1 / \left(1 + \omega^2 \frac{c^2}{\Lambda^2} \right)$$

Тогда постоянная времени измерителя определяется выражением

$$\tau = c/\Lambda$$

(6)

Если падающий на измеритель тепловой поток изменяется по ступенчатому закону, то, считая длину ветвей одинаковой, получим для величины температурного перепада решение в виде ряда. Ограничиваясь первым слагаемым ряда, находим выражение для величины температурного перепада в точке $x = 0$

$$U_0 = \frac{\varepsilon H_0 (A_n + A_p)}{B\ell} \left[1 - \frac{1}{\operatorname{ch} \left[B / (\lambda_n + \lambda_p) \right]^{0.5}} \right] - \frac{16 \varepsilon H_0 (A_n + A_p) \ell}{B \left(4 \frac{B\ell^2}{\lambda_n + \lambda_p} + \pi^2 \right)} \exp \left[- \left(B\ell + \frac{\pi^2 (\lambda_n + \lambda_p)}{4(c_n + c_p)} \right) \tau \right], \quad (7)$$

Как уже указывалось, ТПП можно использовать в качестве слаботочного генератора. При этом тепловые процессы, происходящие в нем, будут описываться уравнением (1) с граничными и начальными условиями (2). Если предположить, что Джоулев нагрев мал, то температурный перепад на «горячем» спае термоэлектрических ветвей будет определяться формулами (3) или (7). Для упрощения расчетов параметров пленочного генератора можно принять, что длина ветвей одинакова. В этом случае необходимое согласование ветвей по тепловому режиму можно получить путем изменения площади их сечений. Принимая во внимание наши обоснования, получим выражение для вырабатываемой мощности в форме

$$W_r = \frac{(T_r - T_x) \varepsilon \alpha^2 \sigma_n S_n N W_0 \Lambda}{4\ell \left(1 + \frac{\sigma_n S_n}{\sigma_p S_p} \right) (\Lambda^2 + c^2 \omega^2)^{0.5}} \quad (8)$$

где T_r, T_x - температура «горячего» и «холодного» спаев соответственно.

Зная величину вырабатываемой мощности, можно определить КПД преобразователя по формуле

$$\eta = \frac{\varepsilon \alpha^2 \sigma_n S_n (T_r - T_x)}{4\ell \left(1 + \frac{\sigma_n S_n}{\sigma_p S_p} \right) (\Lambda^2 + c^2 \omega^2)^{0.5}} \quad (9)$$

Анализируя полученные зависимости для определения основных

параметров ТПП можно заметить, что все параметры допускают оптимизацию по геометрическим размерам и основным теплофизическим характеристикам.

Третья глава посвящена оптимизации параметров и рациональному выбору конструкции ТПП. Для измерительных ТПП можно оптимизировать величины n, r варьируя размеры и выбирая соответствующие термоэлектрические материалы.

Анализ выражений (3) и (4) показывает, что для n, r имеется оптимальная длина ветви, при которой эти параметры будут максимальными. При малых частотах модуляции теплового потока выполняется условие $\Lambda \gg \omega$, тогда имеем соотношение для оптимальной длины ветви

$$\ell_1^{\text{opt}} = \left[(2\lambda_n^2 + 0,5\alpha^2 T \sigma_n S_n) / G \right]^{0,5} \quad (10)$$

Если значения величин λ_n и λ_p , а также σ_n и σ_p близки, то из (10) можно получить $\ell_n \approx \ell_p$, и тогда площади сечения ветвей определяются по выражению

$$(S_n / S_p) = (2\lambda_p + 0,5\alpha^2 T \sigma_p) / (2\lambda_n + 0,5\alpha^2 T \sigma_n) \quad (11)$$

Из технологических соображений следует выполнять ветви одинаковой длины, а необходимое тепловое согласование проводить подбором сечения ветвей за счет изменения толщины пленок.

Для больших частот модуляции теплового потока или большой теплоёмкости приемной площадки ТПП выполняется условие $\Lambda \ll \omega$. В этом случае ветви следует изготавливать очень короткими с малым поперечным сечением, воспользовавшись соотношениями

$$\ell_n = \ell_p, \quad S_n / S_p = (c_n \rho_p) / (c_p \rho_n) \quad (12)$$

Получены также выражения для определения оптимальной длины ветви в случае $\lambda \approx \omega$ и уравнения для определения отношения ℓ_n / ℓ_p .

Оптимальная длина ветви для минимальной МЭШ будет отличаться от ℓ_{opt} для максимальной чувствительности. В предельном случае имеем для $\Lambda \gg \omega$ при $\ell_n / \ell_p = y = \text{const}$

$$\ell_1^{\text{opt}} = \left[\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{3G(y+1)} \right]^{0,5} \quad (13)$$

При этом, для оптимального значения y имеем

$$y_{\text{опт}}^3 + \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3}\gamma\right)y_{\text{опт}}^2 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left(\frac{1}{3} + \frac{2}{3}\gamma\right)y_{\text{опт}} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2}\gamma = 0$$

где

$$\lambda_1 = 2\lambda_n^* + \frac{\alpha^2 T}{2} \sigma_n S_n, \quad \lambda_2 = 2\lambda_p^* + \frac{\alpha^2 T}{2} \sigma_p S_p, \quad \gamma = (\sigma_n S_n) / (\sigma_p S_p)$$

При $\Lambda \ll c\omega$ необходимо выбирать $l_p = l_n$ таким образом, чтобы длина ветвей была минимально возможной.

В случае, когда $\lambda \approx c\omega$, оптимальную длину ветви можно определить по зависимости

$$l_p^{\text{опт}} = \left\{ \frac{(y+1)G \left(\frac{\lambda_1}{y} + \lambda_2 \right)}{3 \left[G^2 (y+1)^2 + c_1^2 \omega^2 \right]} \left[\sqrt{4 + 3 \frac{c_1^2 \omega^2}{G^2 (y+1)^2}} - 1 \right] \right\}^{0.5}, \quad (14)$$

где $c_1 = c_n^* y + c_p^*$.

В отличие от u_n для вольватной чувствительности и МЭШ имеется оптимальное значение термоЭДС

$$\alpha_{\text{опт}} = \left\{ \frac{2 \left[2 \left(\frac{\lambda_n^*}{l_n} + \frac{\lambda_p^*}{l_p} \right) + G(l_n + l_p) \right]^2 + c^2 \omega^2}{T \left(\frac{\sigma_n S_n}{l_n} + \frac{\sigma_p S_p}{l_p} \right)} \right\}^{0.5} \quad (15)$$

При выполнении условия (15) соотношения для оптимальных l и y будут несколько иными. В случае $\Lambda \gg c\omega$ для оптимального y имеем

$$y_{\text{опт}}^2 - \left(2 \frac{\lambda_n^*}{\ell^2 G} + \gamma + 2 \frac{\lambda_p^* \gamma}{\ell^2 G} \right) y_{\text{опт}} - 4 \frac{\lambda_n^* \gamma}{\ell^2 G} = 0$$

Отметим, что в этом случае чем больше длина ветви, тем выше чувствительность. Оптимальная длина ветви для минимизации МЭШ определяется выражением

$$l_p^{\text{опт}} = \left[\frac{2 \left(\frac{\lambda_n^*}{y} + \lambda_p^* \right)}{G(y+1)} \right]^{0.5}$$

Если $\lambda \gg c\omega$, то экстремальное значение r достигается при значении

$$y_{\text{опт}} = \left(\frac{\sigma_n S_n c_p^*}{\sigma_p S_p c_n^*} \right)^{0.5}$$

В этом случае длина ветви не оказывает существенного влияния на

чувствительность.

Оптимальное значение γ , соответствующее минимальной МЭШ, находится по зависимости

$$\gamma_{\text{опт}} = \gamma$$

Проведенные нами вычисления показали, что для исследуемых в данной работе ТПП значение $\alpha_{\text{мин}}$ может лежать в диапазоне 800 - 1200 мкВ/град. На наш взгляд, оптимизация параметров по термоЭДС несколько затруднена, поскольку термоэлектрические материалы, применяемые в наших экспериментах, имеют термоЭДС не более 250 мкВ/град.

Отметим, что для вольтваттной чувствительности оптимизированной по длине ветви, экстремального значения термоЭДС не существует. В этом случае с увеличением термоЭДС вольтваттная чувствительность растет.

Для ТПП, вырабатывающих электрическую энергию можно оптимизировать величины u_o, w_r и η . В рассматриваемых нами ТПП оптимальная длина ветви (для получения максимальной u_o) определяется выражением

$$\ell_{\text{опт}} = \left[\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{(4G^2 + c_1^2 \omega^2)^{0.5}} \right]^{0.5}$$

При этом длины обеих ветвей выбираются одинаковыми.

Для вырабатываемой мощности и КПД оптимальная длина ветви находится по зависимости

$$\ell_{\text{опт}} = \left\{ \frac{2G(\lambda_1 + \lambda_2)}{3(4G^2 + c_1^2 \omega^2)} \left[\sqrt{4 + 3 \left(\frac{c_1 \omega}{2G} \right)^2} - 1 \right] \right\}^{0.5}$$

Мощность и КПД экстремальны по отношению к параметру $\alpha^2 \sigma$, зависящему от свойств материала. Проводя согласование ветвей по условию $\sigma_n S_n = \sigma_p S_p$, получим выражение для экстремального $\alpha^2 \sigma_n$ в виде

$$(\alpha^2 \sigma_n)_{\text{опт}} = \frac{1}{TS_n} \left\{ 4 \left[(\lambda_n^* + \lambda_p^*) + G \ell^2 \right]^{0.5} + c^2 \omega^2 \ell^2 \right\}^{0.5}$$

В четвертой главе исследовалась проблема выбора материалов для изготовления ТПП. При этом учитывалось влияние теплофизических характеристик используемых материалов на основные параметры преобразователей. Анализировался выбор материалов для диэлектрической прослойки, чувствительных элементов и поглощающего покрытия.

Показано, что наиболее приемлемыми материалами для диэлектрической прослойки являются полимерные пленки, в частности на основе ароматических полиимидов. Приведено описание техпроцесса получения тонких (≈ 1 мкм) полиимидных пленок на основе лака ПМ-1.

Проведен анализ влияния теплофизических характеристик термоэлектрических материалов на величину вольтваттной чувствительности оптимизированных и не оптимизированных ПТЭП. Анализировалось влияние как отдельных величин коэффициентов теплопроводности (λ), теплоемкости (C),

термоЭДС (α), электропроводности (σ), так и критериев α/λ , $\alpha^2\sigma/\lambda$, $\alpha^3\sigma$ и $\alpha^2\sigma/\lambda^2$. Было установлено, что для всех типов приемников, работающих как на модулированном, так и на немодулированном тепловом потоке ($\Lambda \ll \omega$, $\Lambda \approx \omega$, $\Lambda \gg \omega$) наибольшее влияние на чувствительность оказывает термоЭДС, на величину которой и необходимо ориентироваться при выборе материала. Для ПТЭП, применяемых в метрологии для измерения тепловых потоков в большом диапазоне плотностей поглощенного потока, важен критерий α/λ , который должен быть максимальным и стабильным во всем измеряемом диапазоне. Для быстродействующих ПТЭП необходимо ориентироваться на критерий σ/λ , который должен быть минимальным. В ТПП, предназначенных для вырабатывания электрической энергии, необходимо использовать материалы с высоким значением $\alpha^2\sigma$ и $\alpha^3\sigma/\lambda^2$. Приведены данные о теплофизических свойствах ряда термоэлектрических материалов и сделан вывод о перспективности использования в качестве материалов чувствительных элементов ТПП халькогенидов сурьмы и висмута.

Теплофизические характеристики поглощающего покрытия в значительной мере определяют все характеристики преобразователей. На основании литературных данных и собственных экспериментов было установлено, что наилучшим поглощающим покрытием являются низковакуумные конденсаты золота, полученные по методике ЛОМО.

Пятая глава посвящена экспериментальному исследованию ТПП. Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены ТПП двух видов с прямоугольной и круглой приемными площадками. Измерительные ТПП исследовались нескольких типов - с 9, 11, 17, 22, 44 парами ветвей; с круглой площадкой одного типа с 12 парами. ТПП предназначенные для вырабатывания электрической энергии изготавливались с прямоугольной приемной площадкой и имели 12 пар ветвей.

Чувствительные ветви изготавливались из твердых растворов халькогенидов сурьмы и висмута. В работе для отрицательной ветви (n - тип) использовались материалы $Bi_2Te_{2.4}Se_{0.6}$, для положительной (p - тип) - $Bi_{0.8}Te_{1.2}Se_3$.

Термоэлектрические ветви формировались дискретным испарением в вакууме при конденсации на подогретую подложку. Полученные пленки отжигались в вакууме или в среде аргона. Изолирующей подложкой служила тонкая полиимидная пленка, методика получения которой описана в 4 главе. В качестве поглощающего покрытия использовались низковакуумные конденсаты золота или смеси $Bi - Sb$.

Поскольку система "теплоотвод - подложка" в значительной мере определяет тепловой баланс прибора, а следовательно, и его рабочие характеристики, то поэтому были сформулированы определенные требования к материалу теплоотвода и его конструкции. В качестве материала для теплоотвода была выбрана листовая медь марки МБ толщиной 0,4 - 0,3 мм. Описана технология получения теплоотвода и особенности техпроцесса.

Для формирования чувствительных ветвей применялся метод фотолитографии, поскольку этот метод позволяет получать очень высокую плотность монтажа элементов на единицу площади. Это приводит к возможности формирования большого числа последовательно соединенных спаев на приемной площадке ТПП и значительному увеличению выходного сигнала. Причем в работе основное внимание по отработке процесса фотолитографии было направлено не на увеличение разрешающей способности с целью уменьшения ширины ветвей, а на уменьшение зазора между ветвями. Приведена схема фотолитографического процесса по пленкам чувствительных элементов и рекомендации по технологическому процессу с описанием операций.

Полученные приемные элементы подвергались выходному контролю, а затем термическим испарением в вакууме на них наносились контактные площадки из серебра с подслоем хрома.

В данных исследованиях проводилось измерение чувствительности и постоянной времени ПТЭП. Чувствительность измерялась от стандартного интегрального источника излучения мощностью $3 \cdot 10^{-4}$ Вт/мм², сигнал на выходе ПТЭП фиксировался цифровым вольтметром. Постоянная времени определялась по стандартной методике из соотношения $\tau = 1 / (2\pi f_{0,707})$, где $f_{0,707}$ - частота модуляции лучистого теплового потока, на которой выходной сигнал составляет 0,707 от первоначального. Модуляция производилась с помощью перфорированного диска. Частота модуляции и ЭДС иридиевых элементов измерялась на стандартном осциллографе.

Исследована зависимость чувствительности и постоянной времени от степени вакуумирования для ПТЭП с поглощающим покрытием и без покрытия. Согласно полученным результатам эффективный рост чувствительности происходит до разряжения порядка $\approx 10^{-2}$ мм.рт.ст. и дальнейшее понижение давления практически не влияет на параметры прибора. Установлено, что поглощающее покрытие не вносит существенного изменения в характер роста чувствительности и постоянной времени от степени вакуумирования, в то время как уменьшение приемной площадки, а следовательно, и уменьшение интенсивности теплообмена поверхности ТПП с окружающей средой, приводит к значительному снижению чувствительности при вакуумировании.

Получены частотные характеристики исследуемых ТПП. Для прямоугольного ПТЭП с 17 парами ветвей частотная характеристика показана на рис.2, где кривая (1) соответствует ПТЭП работающему на воздухе, кривая (2) - в вакууме. Лучшие вакуумированные ПТЭП этого типа имели следующие характеристики: $r = 125$ В/Вт, $\tau = 5,5$ мс, МЭШ (расчет) $= 3,5 \cdot 10^{-10}$ Вт. Предельные характеристики по МЭШ имели ПТЭП с 44 парами ветвей, для прибора с $r = 247,8$ В/Вт, внутренним сопротивлением $R = 29$ кОм расчетное значение МЭШ $= 8,8 \cdot 10^{-11}$ Вт. В связи с тем, что основной областью

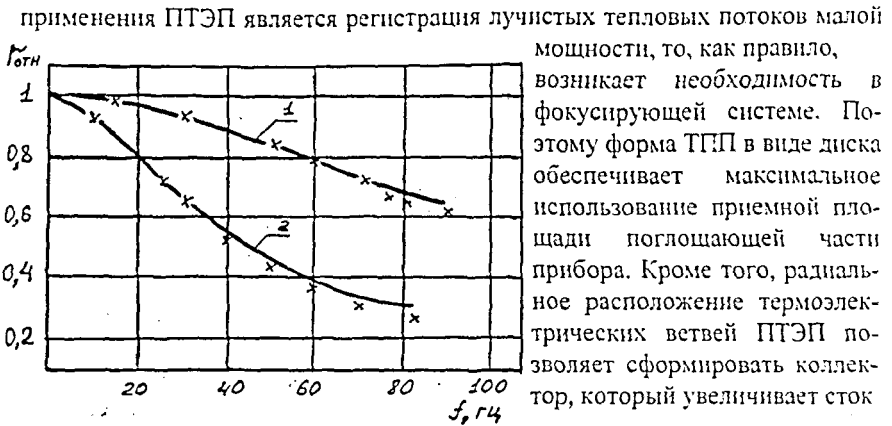


Рис. 2. Частотная характеристика ПТЭП.

поглощенного тепла с приемной площадкой ПТЭП, выравнивает по площади поглощательную способность приемной части, улучшая зональную чувствительность. В прямоугольных ПТЭП создание коллектора является достаточно сложной задачей. В этом случае коллекторные переемы не заполняют всю приемную площадку, поэтому не могут выполнить тепловыравнивающую функцию.

Исследовались ПТЭП, выполненные с коллектором из алюминия и серебра. Измерения чувствительности и постоянной времени для ПТЭП с коллектором из алюминия показали, что с увеличением толщины коллектора вначале (когда слой коллектора имеет островковую структуру) наблюдается уменьшение постоянной времени почти в 1,5 раза при неизменной чувствительности. Затем происходит стабилизация постоянной времени при незначительном ($\approx 20\%$) повышении чувствительности. Дальнейшее повышение толщины коллекторного слоя приводит к уменьшению обоих параметров. Существенно иная картина была получена для коллектора из серебра. Здесь в области сверхтонких слоев коллекторного металла происходит рост постоянной времени при неизменном значении чувствительности. Затем дальнейшее увеличение толщины коллектора приводит к уменьшению обоих параметров. Достаточно приближенные оценки показывают, что наиболее оптимальным является коллектор из алюминия толщиной от 0,005 до 0,03 мкм.

Проведенные эксперименты показали, что ПТЭП с радиальным расположением ветвей имеют достаточно низкую постоянную времени. Лучшие быстродействующие ПТЭП имели: $\gamma = 3,4 \text{ В/Вт}$, $\tau = 1 \text{ мс}$, МЭШ (расчет) $= 3,26 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}$. Лучшим по чувствительности был прибор с $\gamma = 47,6 \text{ В/Вт}$ (в вакууме), $\tau = 6,4 \text{ мс}$ (в вакууме), МЭШ (расчет) $= 0,27 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}$.

Проведены исследования по снижению постоянной времени для прямоугольных ПТЭП. Анализ выражения для расчета постоянной времени по-

казывает, что увеличить быстродействие прибора можно двумя путями: а) снижением теплоемкости приемной площадки; б) организацией теплообмена таким образом, чтобы рост теплоотдачи превалировал над ростом теплоемкости ПТЭП. Первый путь был реализован в нашей работе снижением толщины изолирующей подложки и чувствительных пленок, а также уменьшением длины ветвей (размеров приемной площадки). Систематические исследования по этому вопросу отсутствовали, а в нашем случае в связи с применением при изготовлении ПТЭП фотолитографии, появилась возможность получать ПТЭП с приемной площадкой различных размеров и геометрии.

Исследования проводились на не вакуумированных термоэлементах с 17 ветвями. Длина ветви определялась на микроскопе ПМТ-3 с погрешностью ± 10 мкм. Эксперименты показали, что уменьшение длины ветвей приводит к снижению постоянной времени, в то время как чувствительность имеет максимум при оптимальной длине ветви. В целом уменьшение размеров приемной площадки является перспективным направлением в дальнейшем совершенствовании конструкции быстродействующих ПТЭП.

Второй путь увеличения быстродействия ПТЭП за счет повышения теплосъема с поверхности приемной площадки реализован нами с помощью теплового шунтирования. На верхнюю поверхность термоэлектрических ветвей через изолирующую прослойку наносился слой материала с большой теплопроводностью, что значительно ускоряло сброс тепла с горячих спаев термоэлемента на массивный теплоотвод. В экспериментах исследовались термоэлементы прямоугольной формы с 9 парами ветвей. В качестве шунтирующего материала использовалось серебро. Эксперименты показали, что с увеличением толщины шунтирующей пленки происходит пропорциональное уменьшение постоянной времени и чувствительности ПТЭП. Тепловое шунтирование является эффективным средством повышения быстродействия. Так с помощью теплового шунтирования удалось снизить постоянную времени с 4,8 до 0,66 мс, при одновременном снижении чувствительности с 14 до 2 В/Вт. Шунтирование тонким (5 - 10 мкм) слоем серебра ПТЭП с 17 ветвями позволило получить постоянную времени 5 мс при одновременном снижении чувствительности с 196 до 35 В/Вт. Кроме того метод теплового шунтирования оказался весьма технологичным и надежным.

На основные параметры ПТЭП (чувствительность и МЭШ) оказывают влияние электрофизические характеристики термоэлектрических материалов и изолирующей прослойки, которые сами зависят сложным образом от температуры. Анализ литературных данных показал, что имеется интервал температур ПТЭП, где τ и МЭШ могут быть экстремальны. Были проведены измерения параметров ПТЭП в зависимости от температуры. Измерения проводились в вакуумной камере, а для охлаждения ПТЭП применялась термоэлектрическая термобатарея от серийно выпускаемого малогабаритного холодильника. Температура подложки измерялась термопарой градуировки ХК. Исследовался термоэлемент с 17 парами ветвей. Было установлено, что

постоянная времени в интервале температур до 140° С остается постоянной, а чувствительность имеет максимум в интервале 40° - 60° С. Минимальное значение МЭШ соответствовало 45°С.

При облучении только части приемной площадки чувствительности ПТЭП будет изменяться и зависеть от координаты расположения места облучения относительно «горячего» спая. Проведенные расчеты показали, что чувствительность ПТЭП зависит от места облучения по следующей зависимости

$$r = \frac{\varepsilon \cdot \alpha_{\Sigma}}{\left\{ \left[\frac{4\lambda_{\Sigma}}{\ell(1-K)} + \frac{\alpha_{\Sigma}^2 T \sigma_{\Sigma} S_T}{2\ell} + 2G\ell(1+K) \right]^2 + [2c\omega\ell(1+K)]^2 \right\}^{0,5}}, \quad (16)$$

где $K = \ell / \ell_0$; ℓ - длина ветви, ℓ_0 - координата места облучения.

При выводе (16) принято, что длина и сечение ветвей одинаковы, а их теплофизические характеристики средние. Исследовался термоэлемент с 17 парами ветвей. При этом длина ветви составляла 0,5 мм. Приведенные экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетной зависимостью. Введен коэффициент равномерности по чувствительности, который равен отношению длины той части ветви, чувствительность которой не ниже $0,9r_{\max}$, ко всей длине приемного элемента (2ℓ). Из экспериментальных данных следует, что с увеличением частоты падающего излучения чувствительность по длине термоэлектрической полоски несколько выравнивается. Однако коэффициент равномерности по чувствительности изменяется незначительно.

Были проведены исследования ТПП, предназначенного для выработки электрической энергии. Сняты нагрузочная и вольтамперная характеристики. Вырабатываемая мощность с площадки $0,5 \text{ мм}^2$ составила $4 \cdot 10^{-6}$ Вт, при КПД 0,02%. Низкие значения КПД объясняются малыми значениями термоЭДС пленок и отклонением размеров ТПП от оптимальных.

Основные результаты работы

1. Для бесконтактного измерения лучистых тепловых потоков разработана методика расчета энергетических параметров термоэлектрических пленочных преобразователей и технология изготовления пленочных структур из халькогенидов сурьмы и висмута с применением метода фотолитографии.

2. Установлен наиболее оптимальный температурный режим работы термоэлектрического пленочного преобразователя, позволяющий получить максимальную чувствительность и минимальную мощность эквивалентную шуму.

3. Для разработанного измерителя лучистых тепловых потоков с чувствительностью 247 В/Вт получены соотношения для определения оптимальных размеров преобразователей. Разработаны рекомендации по выбору ма-

териалов чувствительных элементов преобразователей, подложки и поглощающего покрытия. Наиболее перспективными для высокочувствительных преобразователей являются материалы с высоким значением термоЭДС.

4. Предложен способ теплового шунтирования пленочных термоэлектрических преобразователей для измерения лучистых тепловых потоков с постоянной времени менее 1 мс.

5. Основные результаты работы используются в практике КБ РКК «Энергия» им. С. П. Королева (г.Королев, Московской обл.).

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Малоинерционный термоэлектрический приемник ИК-излучения на основе халькогенидов висмута / А.П.Иванюк, Е.А.Малыгин, В.П.Милонов, А.С.Охотин, В.А.Сатин //Космическое материаловедение и технология. - М.: Наука, 1977-С. 168-171.

2. Малыгин Е. А., Милонов В. П., Сатин В. А. Пленочный термоэлемент для контроля тепловых режимов микроэлектронных приборов//Вопросы микроэлектроники и физики полупроводниковых приборов: Тез. докл.-Тбилиси. 1977-С. 107.

3. Разработка и исследование быстродействующих радиационных термоэлектрических приемников / М.П.Козорезов, Е.А.Малыгин, В.П.Милонов, В.А.Сатин //Тез. докл.IV Всесоюзной конференции по радиационному теплообмену. - Киев.: Наукова Думка, 1978-С. 54.

4. Пленочный термоэлектрический приемник ИК-излучения для контроля тепловых режимов микроэлектронных приборов / Е.А.Малыгин, В.П.Милонов, В.А.Сатин, Ю.А.Урывский //Электронная техника. Сер. 8 «Метрология управление качеством и стандартизация». - М.: ЦНИИ "Электроника", 1979, №6:С.78 - 81.

5. Быстродействующий термоэлектрический приемник ИК-излучения / М.П.Козорезов, В.П.Милонов, В.А.Сатин, Г.А.Ракова // "Материалы I и II Всесоюзных школ по термоэлектричеству 1976,1978г.г.":Сб.науч.тр. - М.: ВИНТИ, 1981. № 5559 - 81-С.175-177.

6. Сатин В. А. О выборе материалов чувствительных элементов пленочных термоэлектрических приемников лучистых потоков. Деп. в ЦНИИТЭИ, 1981, № 2448. 14 с.

7. Сатин В.А. О зональной чувствительности пленочных термоэлектрических приемников излучения // Тепловые приемники излучения - 82 : Тез. докл. III Всесоюзного семинара по тепловым приемникам излучения. - Л.: ГОИ, 1981-С.53-54.

8. Сатин В.А. О пленочных термоэлементах для измерения лучистых потоков // Проблемы охраны труда : Тез. докл. III Всесоюз. конф. по охране труда. - Каунас: КПИ, 1982 -С.461-462.

9. Тонкопленочные термоэлектрические приемники ИК-излучения / А.П.Иванюк , Е.А.Малыгин , В.П.Милонов , А.С.Охотин , В.А.Сатин // Материалы и процессы космической технологии. - М.: Наука,1980.-С.211 - 214.

10. Сатин В.А. Выбор оптимальных размеров ветвей пленочных термоэлектрических приемников излучения//Тепловые приемники излучения - 86 : Тез. докл. V Всесоюзного семинара по тепловым приемникам излучения.- Л.: ГОИ, 1986-С.55 - 56.

11. Сатин В.А. Оптимизация параметров пленочных термоэлектрических измерителей тепловых потоков // Промышленная теплотехника 1986. № 5:С. 65 - 69.

12. Козорезов М.П. , Милонов В.П., Сатин В.А. Тепловые приемники излучения на пленках халькогенидов сурьмы и висмута // Тепловые приемники излучения - 88: Тез.докл.VI Всесоюзного семинара по тепловым приемникам излучения. - Л.: ГОИ, 1988.-С.59 - 60.

13. Козорезов М.П., Милонов В.П., Сатин В.А. Дистанционный измеритель тепловых потоков биологических объектов// Измерения в медицине и их метрологическое обеспечение: Тез. докл. 9-ой Всесоюз. конф. - М.: ВНИИОФИ.1989:С. 102.

14. Фалеев В.В., Сатин В.А. О тепловой эффективности пленочных термоэлектрических преобразователей энергии// Теплообмен в энергетических установках и повышение эффективности их работы. Межвуз. Сб. Науч. тр. Воронеж, ВПИ.1992-С.113 - 117.

