

УДК 535:621.362:621.317.794

О.Е. МАРЫКИВСКИЙ

*Институт радиофизики и электроники НАН Украины, Харьков***МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОВОЛОЧНОГО ПЕРВИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПРОХОДЯЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Предложена математическая модель проволочного первичного преобразователя, используемого для измерения больших уровней мощности проходящего излучения. Модель описывает микро проволочный терморезистивный приемник излучения. Рассмотренная задача направлена на учет теплофизических свойств покрытия проволоки, образующего термоэлектрический контакт измерительного преобразователя. Разработанный подход к модели позволяет по реальным теплофизическим характеристикам материалов, таких как теплопроводность рассчитывать коэффициент преобразования, включая зонную характеристику преобразования. Показана адекватность предложенной математической модели реальным характеристикам проволочного преобразователя. Полученные результаты позволяют проводить численное моделирование проволочных преобразователей без затрат времени на экспериментальные исследования характеристик, что уменьшает сроки разработки микро проволочных терморезистивных измерительных преобразователей проходящего излучения и стоимость этих работ

Ключевые слова: лазерное излучение, СВЧ излучение, измерение мощности излучения, проволочный приемник излучения, расчет зонных характеристик, измерение зонных характеристик, терморезистивный приемник излучения.

Введение

Измерение больших значений мощности СВЧ и лазерного излучения в проходящем режиме имеет большое практическое значение. Применение для такого рода измерений проволочных приемников излучения проходящей мощности является перспективным. Проволочные первичные измерительные преобразователи представляют собой ансамбль тонких проволок диаметром несколько десятков микрон, расположенных в пространстве параллельно друг другу на пути прохождения электромагнитной энергии [1]. Эти преобразователи могут быть двух типов: болометрического (термометр сопротивления) [2, 3] и термоэлектрического [2]. Последние получают путем нанесения термоэлектрического слоя таким образом, чтобы в зоне проходящего излучения образовывался «горячий» термоэлектрический контакт, а «холодный» на элементах конструкции при постоянной температуре. Тонко проволочные преобразователи имеют ряд преимуществ перед другими тепловыми преобразователями [3]. Им характерны следующие основные особенности - малая постоянная времени, работа в проходящем излучении, работа с большими уровнями мощности. Болометрические преобразователи достаточно подробно экспериментально исследовались длительный период времени. Результаты исследований опубликованы во многих работах. Как пример можно привести ряд из них [4-7]. Развитие проволочных боломет-

рических преобразователей привело к появлению термоэлектрических проволочных преобразователей. Термоэлектрические преобразователи имеют как ряд положительных преимуществ перед болометрическими, так и ряд недостатков. Для них не требуется источника питания болометрического моста, как не требуется и элементы самого моста. В тоже время большая зависимость выходного сигнала от места попадания излучения приводит к более неравномерной зонной характеристике. Существует возможность конструктивного улучшения зонных характеристик [1]. Однако экспериментальное изучение характеристик термоэлектрических проволочных приемников затруднительно в связи со сложностью изготовления приемников с различными конструктивными параметрами. При изготовлении проволочных приемников излучения применяются сложные и дорогостоящие технологии. Поэтому целесообразным является разработка математической модели термоэлектрических проволочных приемников излучения для исследования их характеристик путем проведения численного эксперимента.

Постановка задачи исследования

Модель одиночного элемента проволочного термоэлектрического преобразователя можно представить в виде двух цилиндров, имеющих тепловой контакт по торцевой поверхности в месте образования «горячего» термоконтакта, как показано на

рис.1. Противоположные концы цилиндров находятся в хорошем тепловом контакте с элементами конструкции, т.е. постоянно поддерживаются при температуре окружающей среды. Преобразовательный элемент (ПЭ) расположен относительно прямоугольной системы координат XOY таким образом, что его ось симметрии совпадает с осью X, а координата $x=0$ определяет положение одного из торцов.

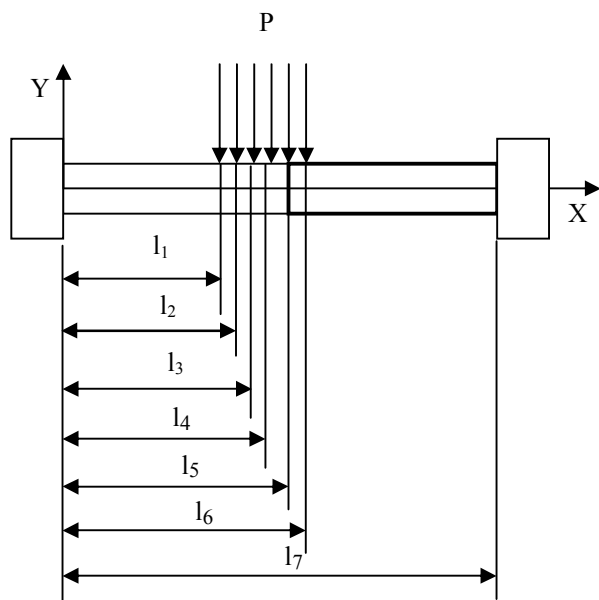


Рис. 1. Представление модели преобразовательного элемента

Часть ПЭ от $x = 0$ до $x = l_5$, является проволокой основой с коэффициентом теплопроводности материала K_1 . Вторая часть ПЭ с координатами от $x=l_5$ до $x=l_7$, представляет проволоку основу с нанесенным термоэлектрическим слоем, т.е. двухслойный цилиндр и имеет эквивалентный коэффициент теплопроводности K_2 . Координата $x = l_5$ определяет положение “горячего” термодатчика.

Теплообмен с окружающей средой характеризуется коэффициентом $b^2 = P_\alpha \cdot h / (C \cdot \rho \cdot S)$, где P_α , S – периметр и площадь поперечного сечения ПЭ радиуса r соответственно,

C и ρ – плотность и удельная теплоемкость материала ПЭ соответственно,

h – коэффициент теплообмена с окружающей средой.

Задача решается в стационарной, одномерной постановке, так как длина ПЭ l_7 значительно превышает его диаметр $d = 2 \cdot r$ и исследуется установившийся режим теплообмена. Разобьем участок, на который падает излучение (так называемый участок засветки) с координатами $x \in [l_1, l_6]$ на n элементарных участков $\Delta x = (l_6 - l_1)/n$ как показано на рис. 1. Тогда тепловое поле, распределенное по ПЭ, опре-

деляется суммой n тепловых полей, вызванных засветкой элементарных участков Δx .

Плотность потока электромагнитной энергии при равномерном распределении ее по пучку определяется как:

$$W = \varepsilon_\lambda \cdot P / (\pi \cdot R^2),$$

где P – интегральная мощность излучения,

R – радиус пучка излучения,

ε_λ – спектральный коэффициент поглощения материала ПЭ.

Нормируя выражение для плотности потока электромагнитной энергии по спектральному коэффициенту поглощения $\varepsilon_{\lambda,}$, получаем

$$W_\lambda = P / (\pi \cdot R^2).$$

Количество теплоты, выделяющееся в элементарном объеме на участке Δx , определяется выражением [2]

$$Q = W_\lambda \cdot S_n / (C \cdot \rho \cdot \pi \cdot r),$$

где $S_n = \Delta x \cdot 2 \cdot r$ – площадь максимального продольного сечения участка проволоки Δx .

ПЭ при засветке излучением элементарного участка Δx состоит из нескольких областей: первая область – не засвеченный участок с коэффициентом теплопроводности K_1 , вторая область – засвеченный участок с коэффициентом теплопроводности K_1 , третья и четвертая области представляют собой не засвеченные участки ПЭ с коэффициентами теплопроводности K_1 и K_2 соответственно. Для указанных областей дифференциальные уравнения теплового баланса запишутся следующим образом [2]:

$$a_1^2 \cdot \frac{\partial^2 U_1}{\partial x^2} - b^2 \cdot U_1 = 0, \quad x \in [0, l_2];$$

$$a_1^2 \cdot \frac{\partial^2 U_2}{\partial x^2} - b^2 \cdot U_2 + q = 0, \quad x \in [l_2, l_4];$$

$$a_1^2 \cdot \frac{\partial^2 U_3}{\partial x^2} - b^2 \cdot U_3 = 0, \quad x \in [l_4, l_5];$$

$$a_2^2 \cdot \frac{\partial^2 U_4}{\partial x^2} - b^2 \cdot U_4 = 0, \quad x \in [l_4, l_5];$$

где U_1, U_2, U_3, U_4 – разность температур нагрева соответствующих областей ПЭ и температуры окружающей среды; $a_{1,2} = K_{1,2} / C \cdot \rho$ – коэффициент теплопроводности для K_1 и K_2 соответственно.

Решения уравнения теплового баланса имеют вид:

$$U_1 = C_1 \cdot \exp(B_1 \cdot x) + C_2 \cdot \exp(-B_1 \cdot x),$$

$$U_2 = C_3 \cdot \exp(B_1 \cdot x) + C_4 \cdot \exp(-B_1 \cdot x) + Q,$$

$$U_3 = C_5 \cdot \exp(B_1 \cdot x) + C_6 \cdot \exp(-B_1 \cdot x);$$

$$U_4 = C_7 \cdot \exp(B_2 \cdot x) + C_8 \cdot \exp(-B_2 \cdot x),$$

где $B_1 = b^2 / a_1^2$, $B_2 = b^2 / a_2^2$, $Q = q / b^2$.

Используя граничные условия для решения уравнений теплового баланса $U_1 = 0$ для $x = 0$ и $U_4 = 0$ для $x = l_7$, получаем:

$$U_1 = 2 \cdot C_1 \cdot \text{sh}(B_1 \cdot x);$$

$$U_4 = 2 \cdot C_7 \cdot \exp(B_2 \cdot l_7) \cdot \text{sh}[-B_2 \cdot (l_7 - x)].$$

Условия “сшивки” уравнений теплового баланса для областей ПЭ при $x=l_2$ имеют вид: $U_1=U_2$ и $U_1'=U_2'$ т.е. на границе областей равны и тепловые потоки через поперечное сечение проволоки. Соответственно при $x=l_4$ $U_2=U_3$ и $U_2'=U_3'$, при $x=l_5$ $U_3=U_4$ и $U_3'=U_4'$. Указанные условия для “сшивки” первых двух областей приводят к следующей системе уравнений

$$2 \cdot C_1 \cdot \text{sh}(B_1 \cdot l_2) = C_3 \cdot \exp(B_1 \cdot l_2) + C_4 \cdot \exp(-B_1 \cdot l_2) + Q;$$

$$2 \cdot C_1 \cdot \text{ch}(B_1 \cdot l_2) = C_3 \cdot \exp(B_1 \cdot l_2) + C_4 \cdot \exp(-B_1 \cdot l_2).$$

Решение этой системы:

$$C_3 = C_1 - [Q \cdot \exp(-B_1 \cdot l_2)] / 2;$$

$$C_4 = C_1 - [Q \cdot \exp(B_1 \cdot l_2)] / 2.$$

С учетом этого выражение для U_2 для области $x \in [l_2, l_4]$ принимает вид

$$U_2 = 2 \cdot C_1 \cdot \text{sh}(B_1 \cdot x) - Q \cdot \{\text{ch}[B_1 \cdot (x - l_2)] - 1\}.$$

Для областей $x \in [l_2, l_4]$ и $x \in [l_4, l_5]$ получаем систему уравнений

$$2 \cdot C_1 \cdot \text{sh}(B_1 \cdot l_4) - Q \cdot \{\text{ch}[B_1(l_4 - l_2)] - 1\} = C_5 \cdot \exp(B_1 \cdot l_4) + C_6 \cdot \exp(-B_1 \cdot l_4);$$

$$2 \cdot C_1 \cdot \text{ch}(B_1 \cdot l_4) - Q \cdot \text{sh}[B_1(l_4 - l_2)] = C_5 \cdot \exp(B_1 \cdot l_4) - C_6 \cdot \exp(-B_1 \cdot l_4),$$

решения которой

$$C_5 = C_1 - [\exp(-B_1 \cdot l_2) - \exp(-B_1 \cdot l_4)] \cdot Q / 2;$$

$$C_6 = -C_1 - [\exp(B_1 \cdot l_2) - \exp(B_1 \cdot l_4)] \cdot Q / 2.$$

Выражения для разности температур в области и $x \in [l_4, l_5]$ и окружающей среды с учетом полученных значений для C_5 и C_6 запишется в виде

$$U_3 = 2 \cdot C_1 \cdot \text{sh}(B_1 \cdot x) - Q \cdot \{\text{ch}[B_1 \cdot (x - l_2)] - \text{ch}[B_1 \cdot (x - l_4)]\}.$$

При “сшивке” областей $x \in [l_4, l_5]$ и $x \in [l_4, l_7]$ получаем систему уравнений

$$2 \cdot C_1 \cdot \text{sh}(B_1 \cdot l_5) - Q \cdot \{\text{ch}[B_1(l_5 - l_2)] - \text{ch}[B_1(l_5 - l_4)]\} = -2 \cdot C_7 \cdot \exp(B_2 \cdot l_7) \cdot \text{sh}[B_2(l_7 - l_5)];$$

$$B_1 \cdot 2 \cdot C_1 \cdot \text{ch}(B_1 \cdot l_5) - B_1 \cdot Q \cdot \{\text{sh}[B_1(l_4 - l_2)] - \text{sh}[B_1(l_5 - l_4)]\} = B_2 \cdot 2 \cdot C_7 \cdot \exp(B_2 \cdot l_7) \cdot \text{ch}[B_2 \cdot (l_7 - l_5)].$$

Введем обозначения

$$\alpha = 2 \cdot \text{sh}(B_1 \cdot l_5);$$

$$\delta = 2 \cdot B_1 \cdot \text{sh}(B_1 \cdot l_5);$$

$$\beta = Q \cdot \{\text{ch}[B_1 \cdot (l_5 - l_2)] - \text{ch}[B_1 \cdot (l_5 - l_4)]\};$$

$$\varepsilon = B_1 \cdot Q \cdot \{\text{sh}[B_1 \cdot (l_5 - l_2)] - \text{sh}[B_1 \cdot (l_5 - l_4)]\};$$

$$\gamma = 2 \cdot \exp(B_2 \cdot l_7) \cdot \text{sh}[(B_2 \cdot (l_7 - l_5))],$$

$$\eta = 2 \cdot B_2 \cdot \exp(B_2 \cdot l_7) \cdot \text{sh}[(B_2 \cdot (l_7 - l_5))].$$

С учетом введенных обозначений система уравнений при “сшивке” областей $x \in [l_4, l_5]$ и $x \in [l_4, l_7]$ переписывается в виде

$$\alpha \cdot C_1 + \gamma \cdot C_7 = \beta,$$

$$\delta \cdot C_1 - \eta \cdot C_7 = \varepsilon.$$

Ее решение с учетом вводимых обозначений $C_1 = D$ и $C_7 = A$:

$$D = (\beta \cdot \eta + \varepsilon \cdot \gamma) / (\alpha \cdot \eta + \delta \cdot \gamma);$$

$$A = -(\alpha \cdot \varepsilon - \delta \cdot \beta) / (\alpha \cdot \eta + \delta \cdot \gamma).$$

Для области $x \in [l_5, l_7]$ уравнение для U_4 запишется в виде

$$U_4 = -2 \cdot [(\alpha \cdot \varepsilon - \delta \cdot \beta) / (\alpha \cdot \eta + \delta \cdot \gamma)] \times \exp(B_2 \cdot l_7) \cdot \text{sh}[B_2(l_7 - x)].$$

с учетом ранее введенных обозначений.

Так как “горячий” термоконтакт имеет координату $x = l_5$, то превышение его температуры относительно “холодного”, т.е. фактически температуры окружающей среды, определится выражением для U_4 при подстановке в него $x = l_5$

$$U_T = 2 \cdot A \cdot \exp(B_2 \cdot l_7) \cdot \text{sh}[B_2(l_7 - l_5)].$$

Полученное выражение для U_T позволяет вычислить превышение температуры “горячего” термоконтакта ПЭ над температурой окружающей среды, при которой находятся “холодные” термоконтакты, для случая воздействия излучения на элементарный участок засветки Δx ПЭ.

При произвольной засветке пучком излучения ПЭ возможны три случая положения засвеченной области относительно “горячего” термоконтакта.

В первом случае, представленном на рис. 1, излучение попадает в область $x \in [0, l_5]$, т.е. на проволоку основу.

Во втором случае излучение засвечивает участок ПЭ с нанесенным термоэлектрическим слоем в области $x \in [l_5, l_7]$.

Третий случай представляет собой совокупность первых двух, когда излучение попадает в область термоконтактов, как показано, т.е. засвечивает термоконтакт. Полученное ранее выражение для U_r описывает случай воздействия излучения на элементарный участок Δx при засветке пучком излучения области с $x \in [0, l_5]$, т.е. для первого случая положения засветки. Превышение температуры "горячего" термоконтакта определяется как сумма n тепловых откликов от каждого засвеченного элементарного участка Δx в области $x \in [0, l_5]$. Таким образом, для случая, когда пучок излучения попадает на проволоку основу разность температур "горячего" и "холодного" T_x термоконтактов для первого случая

$$(T_r - T_x)_1 = \sum_{i=0}^N U_r = \sum_{i=0}^N \{2 \cdot A_i' \cdot \exp(B_2' \cdot l_7') \cdot \text{sh}[B_2'(l_7' - l_5')]\},$$

где $N = 2 \cdot R/\Delta x - 1$, $\Delta x = (l_1' + R)/N$, R – радиус пучка излучения.

Коэффициент A_i' для каждого члена ряда определяется с учетом ранее введенных обозначений и при условии, что:

$$\begin{aligned} (l_2')_i &= l_{1+i}' \cdot \Delta x, (l_4')_i = (l_2')_i + \Delta x; \\ A_i' &= -(\alpha' \cdot \varepsilon' \cdot \delta' \cdot \beta') / (\alpha' \cdot \eta' + \delta' \cdot \gamma'), \\ \alpha' &= 2 \cdot \text{sh}(B_1' \cdot l_5'); \\ \delta' &= 2 \cdot B_1' \cdot \text{sh}(B_1' \cdot l_5'); \\ \beta_i' &= Q^* \cdot \text{ch}\{B_1' \cdot [l_5' - (l_2')_i]\} - \text{ch}\{B_1' \cdot [l_5' - (l_4')_i]\}; \\ \varepsilon_i' &= B_1' \cdot Q^* \cdot \text{sh}\{B_1' \cdot [l_5' - (l_2')_i]\} - \text{sh}\{B_1' \cdot [l_5' - (l_4')_i]\}; \\ \gamma' &= 2 \cdot \exp(B_2' \cdot l_7') \cdot \text{sh}[(B_2' \cdot (l_7' - l_5'))]; \\ \eta' &= 2 \cdot B_2' \cdot \exp(B_2' \cdot l_7') \cdot \text{sh}[(B_2' \cdot (l_7' - l_5'))]; \\ B_1' &= B_1, B_2' = B_2, l_1' = l_1, l_5' = l_5, l_7' = l_7. \end{aligned}$$

Для случая, когда пучок излучения падает на термоэлектрический слой, т.е. в область $x \in [l_5, l_7]$ выражение для превышения температуры "горячего" термоконтакта имеет вид

$$(T_r - T_x)_2 = \sum_{j=0}^M U_r = \sum_{j=0}^M \{2 \cdot A_j'' \cdot \exp(B_2'' \cdot l_7'') \cdot \text{sh}[B_2''(l_7'' - l_5'')]\},$$

где $M = 2 \cdot R/\Delta x - 1$,

$$A_j'' = -(\alpha'' \cdot \varepsilon'' \cdot \delta'' \cdot \beta'') / (\alpha'' \cdot \eta'' + \delta'' \cdot \gamma'');$$

$$\alpha'' = 2 \cdot \text{sh}(B_1'' \cdot l_5'');$$

$$\delta'' = 2 \cdot B_1'' \cdot \text{sh}(B_1'' \cdot l_5'');$$

$$\beta_j'' = Q^* \cdot \text{ch}\{B_1'' \cdot [l_5'' - (l_2'')_j]\} - \text{ch}\{B_1'' \cdot [l_5'' - (l_4'')_j]\};$$

$$\varepsilon_j'' = B_1'' \cdot Q^* \cdot \text{sh}\{B_1'' \cdot [l_5'' - (l_2'')_j]\} - \text{sh}\{B_1'' \cdot [l_5'' - (l_4'')_j]\};$$

$$\gamma'' = 2 \cdot \exp(B_2'' \cdot l_7'') \cdot \text{sh}[(B_2'' \cdot (l_7'' - l_5''))];$$

$$\eta'' = 2 \cdot B_2'' \cdot \exp(B_2'' \cdot l_7'') \cdot \text{sh}[(B_2'' \cdot (l_7'' - l_5''))];$$

$$(l_2'')_j = l_{1+j}'' \cdot \Delta x, (l_4'')_j = (l_2'')_j + \Delta x,$$

$$B_1'' = B_1, B_2'' = B_2, l_1'' = l_7 - l_6, l_5'' = l_7 - l_5, l_7'' = l_7.$$

Третий случай, когда излучение засвечивает область термоконтакта, представляет собой совокупность первых двух и описывается выражением

$$(T_r - T_x)_3 = \sum_{i=0}^{N'} U_r + \sum_{j=0}^{M'} U_r = \sum_{i=0}^{N'} \{2 \cdot A_i' \cdot \exp(B_2' \cdot l_7') \cdot \text{sh}[B_2'(l_7' - l_5')]\} + \sum_{j=0}^{M'} \{2 \cdot A_j'' \cdot \exp(B_2'' \cdot l_7'') \cdot \text{sh}[B_2''(l_7'' - l_5'')]\},$$

где $N' = (l_5' - l_1') / \Delta x - 1$, $M' = [(l_1' + 2 \cdot R) - l_5'] / \Delta x - 1$, коэффициенты A_i' и A_j'' определены ранее.

Последнее соотношение можно использовать для определения зависимости превышения температуры "горячего" термоконтакта для всех трех случаев падения пучка излучения на ПЭ. Если выполняется условие $l_1 + 2 \cdot R \leq l_5$, превышение температуры описывается первым слагаемым суммы. При выполнении условия $l_1 \geq l_5$ вычисления проводятся по второму слагаемому.

Указанный алгоритм вычисления превышения температуры "горячего" термоконтакта по полученному выражению и использовался при численном анализе влияния параметров ПЭ и пучка излучения на коэффициент преобразования и его зонную характеристику. Коэффициент преобразования определяется следующим выражением

$$K_{пр} \approx (T_x - T_r)_3 \cdot \alpha_{1,2},$$

где $\alpha_{1,2}$ – коэффициент термо э.д.с. пары материалов, образующих термопару.

Заключение

Для определения достоверности полученных результатов был проведен численный эксперимент и сравнение с экспериментальными результатами. Так как при проведении численного эксперимента необходимо определиться с числом членов суммы в вы-

ражении для превышения температуры “горячего” термоконтакта, которое зависит от длины элементарного участка разбиения Δx , то первоначально анализировалась погрешность вычислений суммы в зависимости от количества участков разбиения n . Результаты численного эксперимента показывают, что уже при $n \geq 5$ дальнейшее увеличение n приводит к монотонному изменению величины $(T_x - T_r)_3$ на сотые процента и менее. Это указывает на быструю сходимость суммы для этого выражения. Поэтому для всех последующих расчетов принималось $n=10$.

До проведения численных экспериментов необходимо оценить адекватность полученной математической модели реальным конструкциям проволочных приемников излучения. Так как одной из наиболее важных характеристик является зонная характеристика приемника излучения, т.е. зависимость коэффициента преобразования от геометрического места попадания излучения, то оценка адекватности математической модели проведем именно на исследовании этой характеристики. Зонная характеристика экспериментально исследуется измерением выходного сигнала преобразователя при перемещении пучка излучения по первичному преобразователю в двух перпендикулярных направлениях по осям преобразователя. Безусловно определяющей является неравномерность зонной характеристики в направлении проволок преобразователя. В этом случае важное значение имеет теплоотдача на элементы конструкции, отличие теплопроводностей двух ветвей термопар: только проволоки и проволоки с покрытием.

Экспериментальные характеристики ряда первичных преобразователей приведены в [1]. Приведенные в этой работе основные технологические приемы изготовления термопарных проволочных преобразователей показывают высокую сложность изготовления. Поэтому использование предложенной в работе модели такого преобразователя существенно упрощает процесс проведения исследований различных конструкций и вариантов преобразователей.

На рис. 2 приведены экспериментальная и расчетные зависимости зонных характеристик для пучка излучения диаметром 10 мм.

При проведении численного исследования модели преобразователя использовался эквивалентный коэффициент теплопроводности ветви термопары – проволоки покрытием.

Как видно из приведенных характеристик результаты, полученные в результате численного моделирования, достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными, что указывает на адекватный выбор модели проволочного первичного преобразователя и соответствие отдельного преоб-

разовательного элемента реальным конструкциям ПЭ.

Полученная модель проволочного термоэлектрического первичного преобразователя проходящей мощности излучения позволяет проводить численные эксперименты при создании и модификации реальных конструкций проволочных преобразователей, уменьшая сроки и стоимость работ.

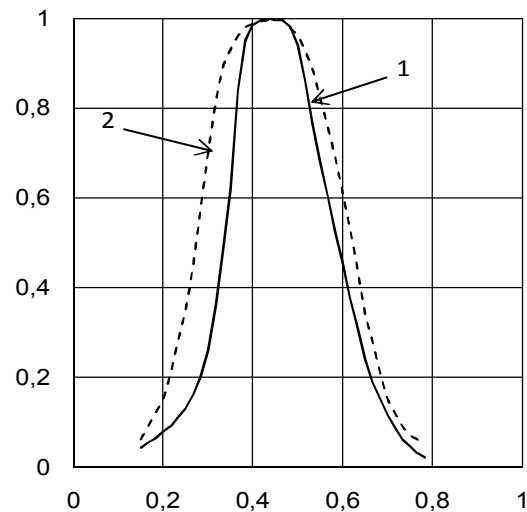


Рис. 2. Зонные характеристики проволочных первичных преобразователей для диаметра пучка излучения 10 мм: 1 – экспериментальная зависимость, 2 – расчетная зависимость

Литература

1. Марыкивский О.Е. Исследование микропроволочных первичных преобразователей проходящего излучения / О.Е. Марыкивский // Сборник научных трудов Харьковского университета Воздушных Сил. – Вып. 3(9). – X., 2006. – С. 108-112.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков – М.: Гос.изд-во техн.-теорет. литературы. 1952. – 392 с.
3. Измерение энергетических параметров и характеристик лазерного излучения / Под ред. А.Ф. Котюка. – М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.
4. Кузьмичев В.М. Нелинейность характеристики преобразования тонкопроволочного болометра сфокусированного лазерного излучения / В.М. Кузьмичев, С.В. Погорелов // Измерительная техника. – 1999. – № 12. – С. 44-46.
5. Кузьмичев В.М. Решетчатый измеритель энергии импульсов излучения оптического квантового генератора / В.М. Кузьмичев, Ю.М. Латынин, И.А. Приз // Приборы и техника эксперимента. – 1974. – №2. – С. 190-193.

6. Кузьмичев В.М. Малоинерционный измеритель мощности излучения лазера на двуокиси углерода / В.М. Кузьмичев, М.П. Перепечай // Квантовая электроника. – 1974. – № 11. – С. 2407-2410.

7. Скляр Ю.А. Абсолютный болометрический измеритель выходной мощности лазеров непрерывного излучения / Ю.А. Скляр, В.А. Седелников, Л.И. Кац // Приборы и техника эксперимента. – 1965. – № 6. – С. 165-167.

8. Марыкивский О.Е. Расчет эквивалентного коэффициента теплопроводности конструктивного элемента микропроволочного приемника проходящего излучения – двухслойного цилиндра / О.Е. Марыкивский // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Вип. 1 (13). – Х., 2007. – С. 40 - 44.

Поступила в редакцию 11.08.2009

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. С.А. Масалов, Институт радиопизики и электроники Национальной Академии наук Украины, Харьков, Украина.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДРОТЯНОГО ПЕРВИННОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ВІПРОМІНЮВАННЯ, ЩО ПРОХОДИТЬ

О.Е. Мариківський

Запропонована математична модель дротяного первинного перетворювача, використовуваного для вимірювання великих рівнів потужності випромінювання, що проходить. Модель описує мікродротяний термопарний приймач випромінювання. Розглянуте завдання направлене на врахування теплофізичних властивостей покриття дроту, створюючого термоелектричний контакт вимірювального перетворювача. Розроблений підхід до моделі дозволяє по реальних теплофізичних характеристиках матеріалів, таких як теплопровідність, розраховувати коефіцієнт перетворення, включаючи зонну характеристику перетворення. Показана адекватність запропонованої математичної моделі реальним характеристикам дротяного перетворювача. Отримані результати дозволяють проводити чисельне моделювання дротяних перетворювачів без витрат часу на експериментальні дослідження характеристик, що зменшує терміни розробки мікродротяних термопарних вимірювальних перетворювачів випромінювання, що проходить, і вартість цих робіт.

Ключові слова: лазерне випромінювання, НВЧ-випромінювання, вимірювання потужності випромінювання, дротяний приймач випромінювання, розрахунок зонних характеристик, вимірювання зонних характеристик, термопара.

MATHEMATICAL MODEL OF THE WIRE PRIMARY CONVERTER OF PASSING RADIATION

O.E. Marykivsky

The mathematical model of the wire primary converter used for measurement of the big levels of capacity of passing radiation is offered. The model describes the micro wire thermopair receiver of radiation. The considered problem is directed on the account warmly physical properties of a covering of the wire forming thermoelectric contact of the measuring converter. The developed approach to model allows on real to warmly physical characteristics of materials, such as heat conductivity to count transformation factor, including the working areas characteristic of transformation. Adequacy of the offered mathematical model to real characteristics of the wire converter is shown. The received results allow to spend numerical modelling of wire converters without expenses of time for experimental researches of characteristics that reduces working out terms micro wire thermopair measuring converters of passing radiation and cost of these works

Key words: laser radiation, СВЧ radiation, measurement of capacity of radiation, the wire receiver of radiation, calculation of working areas characteristics, measurement of working areas characteristics, the thermocouple.

Марыкивський Олег Евмениевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института радиопизики и электроники Национальной Академии наук Украины, Харьков, Украина, e-mail: moe_ire@ire.kharkov.ua, moe_mail@mail.ru.