УДК 536.629.7

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОДЛОЖКИ ДАТЧИКА ТЕПЛОВОГО ПОТОКА НА АНИЗОТРОПНЫХ ТЕРМОЭЛЕМЕНТАХ НА ВЕЛИЧИНУ ТЕРМОЭДС В СТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

Бобашев С.В., Попов П.А., Резников Б.И., Сахаров В.А.

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Выполнено численное моделирование тепловых и термоэлектрических процессов в анизотропных термоэлементах расположенных на подложках из различных материалов. Показано, что при одинаковом тепловом потоке, проходящем через термоэлемент, теплофизические свойства подложки и интенсивность теплообмена на ее тыльной поверхности существенно влияют на распределение температуры и генерируемую термоЭДС.

ВВЕДЕНИЕ

Анизотропные термоэлементы широко применяются в генераторах термоЭДС, устройствах охлаждения [1, 2], тепловых датчиках [3]. Большое количество работ посвящено исследованию влияния анизотропии свойств материала термоэлемента на генерируемую им термоЭДС [4]. Традиционно считается, что влияние анизотропии теплопроводности пренебрежимо мало и им можно пренебречь при расчете термоЭДС. Данное утверждение можно считать справедливым только для определенных граничных условий на поверхности термоэлемента, когда распределение температуры близко к одномерному. В настоящей работе рассматриваются особенности генерации термоЭДС когда анизотропные термоэлементы применяются в качестве тепловых датчиков. Это определяет тип граничных условий и выбор материала подложки на которой расположен термоэлемент.

МОДЕЛЬ ДАТЧИКА ТЕПЛОВОГО ПОТОКА НА АНИЗОТРОПНЫХ ТЕРМОЭЛЕМЕНТАХ

Рассмотрим анизотропный термоэлемент (1) прямоугольной формы длиной l и толщиной h, закрепленный на электроизоляционной подложке (2) толщиной s (рис. 1). На рабочую поверхность термоэлемента $y = h$ действует постоянный тепловой поток плотностью q_h, боковые поверхности термоэлемента и подложки $x = 0$ и $x = l$ теплоизолированы. На тыльной поверхности подложки $y = -s$ осуществляется конвективный теплообмен $q_s = \alpha_s \left(T_s - T_e\right)$, где α_s – коэффициент теплоотдачи, $W/m \cdot K$, T_s и T_e – температура подложки и окружающей среды соответственно, K. На всех поверхностях термоэлемента задается условие электроизоляции $j_n = 0$. Генерируемая термоЭДС регистрируется в точках А и В, расположенных на рабочей поверхности $y = h$.

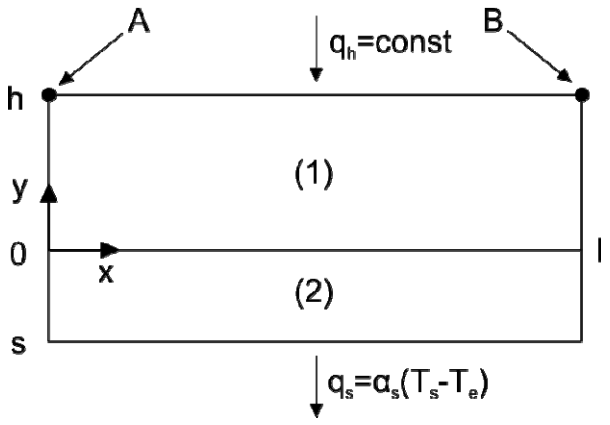

Рис. 1 Рис. 1. Расчетная область: (1) – анизотропный термоэлемент, (2) – подложка, А и В – точки регистрации генерируемой термоЭДС.

Стационарное распределение температуры и электрического потенциала находится из решения

системы уравнений теплопроводности и электропроводности [5]. Учитывается анизотропия теплопроводности, электропроводности и термоЭДС материала термоэлемента, свойства подложки изотропны. Будем рассматривать достаточно толстые подложки, чтобы распределение теплового потока на ее тыльной поверхности можно было считать однородным. В данном расчете толщина подложки и термоэлемента были равны. Поскольку изменение температуры по толщине термоэлемента и подложки составляло $(T_h - T_s) \approx 10\,K$, физические свойства материалов задавались постоянными. Тестовые расчеты показали, что в данных условиях выделение теплоты Джоуля, Томсона и Бриджмена оказывает пренебрежимо малое влияние на поле температуры, и в модели не учитывается.

Численное решение системы уравнений с заданными граничными условиями проведено в пакете COMSOL Multiphysics в коэффициентной форме.

$$\nabla\left[-C_{11}\nabla T\right] + \nabla\left[-C_{12}\nabla\varphi\right] = 0$$
$$\nabla\left[-C_{21}\nabla T\right] + \nabla\left[-C_{22}\nabla\varphi\right] = 0$$

где T – температура, K; φ – электрический потенциал, V; коэффициенты C_{ij} выражаются следующим образом:

$$C_{11} = \lambda, \quad C_{12} = 0$$
$$C_{21} = \sigma\alpha, \quad C_{22} = \sigma$$

где λ – тензор коэффициента теплопроводности, $W/m \cdot K$; σ – электропроводности, $1/Ohm \cdot m$ и α – термоЭДС, V/K.

Для верификации численного решения использовались экспериментальные данные, полученные при стационарной калибровке градиентного датчика теплового потока (ГДТП) [3]. Датчик размером в плане 2.2 x 2.2 mm представлял собой батарею из 10 соединенных последовательно термоэлементов из висмута длиной $l = 2.2\,mm$ и толщиной $h = 0.2\,mm$ закрепленных на подложке из слюды. Калибровка проводилась на специальном стенде при заданной плотности теплового потока $q_h = 100\,kW/m^2$.

Рассчитанная разность потенциалов между точками А и В составила $\Delta\varphi_{AB} = 0.43\,mV$, а суммарная разность потенциалов батареи $\Delta\varphi = 4.3\,mV$. По результатам эксперимента, выходной сигнал ГДТП составил $U = 6.8\,mV$. Таким образом, отличие экспериментального значения от рассчитанного составляет ≈ 35%.

Необходимо отметить, что в силу анизотропии термоЭДС изопотенциальные линии имеют некоторый наклон относительно рабочей поверхности термоэлемента (см. рис. 2). По этой причине максимальная разность потенциалов создается между диагонально расположенными точками в термоэлементе. В данном расчете максимальная разность потенциалов батареи составила $\Delta\varphi_{\max} = 6.5\,mV$ и отличие от экспериментального значения 5%. Полученные в тестовом расчете результаты можно признать удовлетворительно совпадающими с опытными данными.

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОДЛОЖКИ НА ГЕНЕРИРУЕМУЮ ТЕРМОЭДС

Рассмотрим влияние теплофизических свойств подложки на распределение температуры в термоэлементе и генерируемую им термоЭДС. Рассмотрим два случая, когда температуропроводность $a = \lambda/C\rho$ термоэлемента и подложки близки $a_{(1)} \approx a_{(2)}$ и значительно различаются $a_{(1)} << a_{(2)}$ Первый случай соответствует расположению термоэлемента на теплоизоляционном материале, например, слюде $a \sim 10^{-7}\ m^2/s$, а второй - расположению на металле, например? на меди с $a \sim 10^{-4}\ m^2/s$. Рассматриваемый диапазон теплофизических свойств материала подложки соответствует возможным условиям использования теплового датчика.

На рис. 2 показаны рассчитанные поля температуры и электрического потенциала в случае термоэлемента с соотношением сторон $l/h = 10$ для двух вариантов подложки. В качестве точки отсчета использовалась минимальная температура во всей расчетной области. Видно, что при одинаковой плотности теплового потока, действующего на рабочую поверхность $y = h$, в силу анизотропии теплопроводности материала термоэлемента распределение температуры различно и определяется теплофизическими свойствами подложки. В случае подложки с малой температуропроводностью, во всем термоэлементе изотермы имеют практически одинаковый наклон относительно рабочей поверхности, определяемый его анизотропной теплопроводностью. Подложка с большой температуропроводностью существенно искажает распределение температуры в термоэлементе, и оно становится близко к одномерному. В этом случае, влияние анизотропии теплопроводности сказывается только вблизи его торцов, а разность температуры между рабочей поверхностью термоэлемента и тыльной поверхностью подложки $(T_h - T_s)$ значительно меньше. Распределение теплового потока q_0 на тыльной поверхности термоэлемента $y = 0$ также различается, в случае подложки с большой температуропроводностью оно существенно неоднородно.

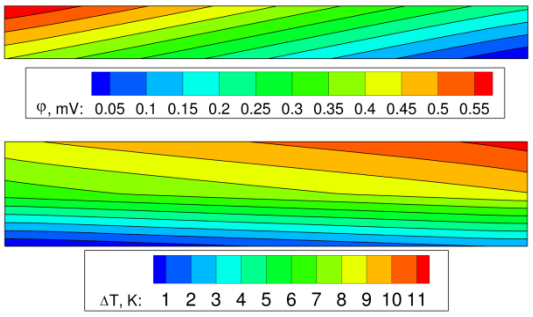

Рис. 2 Поле температуры (верхний рисунок) и потенциала (нижний рисунок) в анизотропном термоэлементе с соотношением сторон $l/h = 10$ и подложке с низкой температуропроводностью.

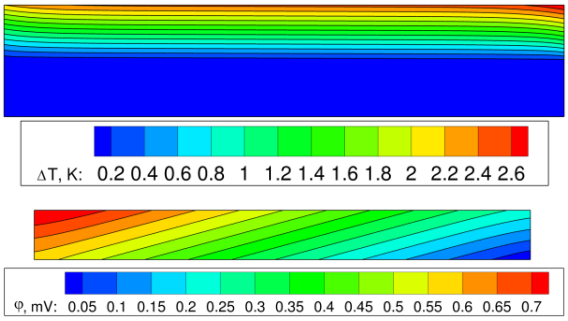

Рис. 3 Поля температуры (верхний рисунок) и потенциала (нижний рисунок) в анизотропном термоэлементе с соотношением сторон $l/h = 10$ и подложке с высокой температуропроводностью.

Поскольку поля температуры различны, то будут отличаться направление и величина вектора градиента температуры, определяющего структуру термоэлектрического поля $\mathbf{E}^T = -\alpha \nabla T$ (рис. 2 и 3). В силу анизотропии термоЭДС изменится соотношение между его продольной и поперечной компонентами, что в итоге приводит к изменению суммарной термоЭДС генерируемой термоэлементом.

Рассмотрим влияние отношения длины к толщине термоэлемента l/h на генерируемую термоЭДС при расположении на подложках с различной температуропроводностью и неизменной плотности теплового потока q_h. На рис. 4 показана зависимость термоЭДС $\Delta\varphi/\Delta\varphi*$ от отношения сторон l/h. В качестве масштаба выбрана термоЭДС квадратного термоэлемента единичной длины $\Delta\varphi*$. Линии (1) и (2) соответствуют расположению термоэлемента на подложке с высокой и низкой температуропроводностью соответственно. Видно, что при одинаковых геометрических размерах в силу различного распределения температуры различается и величина термоЭДС. Линия (3) соответствует расчету генерируемой термоЭДС по формуле $\Delta\varphi = q_h S \Delta\varphi*$ где S – площадь рабочей поверхности термоэлемента, m^2 [6]. Видно, что данный способ расчета дает существенные погрешности в случае достаточно длинных термоэлементов. На рис. 5 показано относительное изменение термоЭДС $(\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2)/\Delta\varphi_1$ на подложках с различной температуропроводностью. Видно, что при практически важном соотношении сторон $l/h = 10 \div 20$ отличие генерируемой термоЭДС достигает 40%.

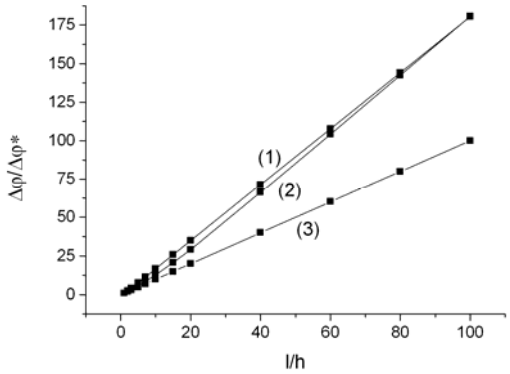

Рис. 4 Зависимость генерируемой термоЭДС $\Delta\varphi/\Delta\varphi*$ от отношения сторон l/h термоэлемента при постоянном проходящем через него тепловом потоке. Линии (1) и (2) – случай подложки с высокой и низкой температуропроводностью, линия (3) - расчет термоЭДС по формуле $\Delta\varphi = q_h S \Delta\varphi*$.

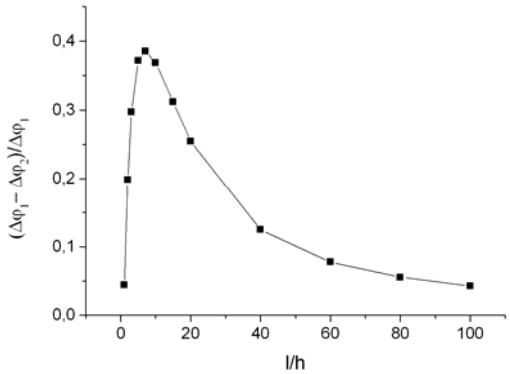

Рис. 5 Относительное изменение термоЭДС $(\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2)/\Delta\varphi_1$ для различных соотношений сторон термоэлемента l/h и расположенных на подложках с различными теплофизическими свойствами.

Также следует отметить зависимость генерируемой термоЭДС от интенсивности теплообмена на тыльной поверхности подложки с малой температуропроводностью при неизменной плотности теплового потока q_h. При соотношении сторон термоэлемента $l/h = 10$ и изменении коэффициента теплоотдачи $\alpha_s = 10 \div 1000$ $W/m \cdot K$ уменьшение термоЭДС не превышает 5%, а при $l/h = 100$ достигает 30%. Это также является следствием перестроения поля температуры в силу анизотропии теплопроводности материала термоэлемента. Для подложек с большой температуропроводностью данный эффект не наблюдается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты расчетов показывают, что при одном и том же тепловом потоке, проходящем через термоэлемент, теплофизические свойства материала подложки и интенсивность теплообмена на ее тыльной поверхности существенно влияют на распределение температуры и генерируемую термоЭДС. В случае тепловых датчиков на анизотропных термоэлементах это означает, что при высоких требованиях к точности измерений, стационарная калибровка датчика должна проводиться на подложке с теплофизическими свойствами, близкими к свойствам поверхности, на которой предполагается проводить измерения. Также следует отметить, что датчики с различными размерами термоэлементов необходимо калибровать индивидуально, в силу различного вклада продольной и поперечной термоЭДС. Несмотря на то, что в расчете рассматривались анизотропные термоэлементы на основе монокристалла висмута, полученные результаты применимы и к другим материалам обладающим анизотропией теплопроводности и термоЭДС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник. Киев: Наук. думка, 1979. 768 с.

   Anatychuk L.I. Termoelementy i termoelektricheskie ustroystva. Spravochnik. Kiev: Nauk. dumka, 1979. 768 pp.

2. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Т. 2. Термоэлектрические преобразователи энергии. Киев: Институт термоэлектричества, 2003. 376 с.

   Anatychuk L.I. Termoelektrichestvo. T. 2. Termoelektricheskie preobrazovateli energii. Kiev: Institut termoelektrichestva, 2003. 376 pp.

3. Andrey V. Mityakov, Sergey Z. Sapozhnikov, Vladimir Y. Mityakov, Andrei A. Snarskii, Maxim I. Zhenirovsky, Juha J. Pyrhönen, Gradient heat flux sensors for high temperature environments, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 176, April 2012, Pages 1-9

4. Снарский А.А., Пальти А.М., Ащеулов А.А. Анизотропные термоэлементы. Обзор // ФТП. 1997. Т. 31. № 11. С. 1281–1298.

   Snarskiy A.A., Palti A.M., Ashcheulov A.A. Anizotropnye termoelementy. Obzor // FTP. 1997. T. 31. № 11. S. 1281–1298.

5. А.Г.Самойлович. В сб.: Проблемы современной физики. Л., Наука, 1980. 304 с.

   A.G.Samoylovich. V sb.: Problemy sovremennoy fiziki. L., Nauka, 1980. 304 pp.

6. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Основы градиентной теплометрии. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2012. 203 с.

   Sapozhnikov S.Z., Mityakov V.Yu., Mityakov A.V. Osnovy gradientnoy teplometrii. SPb.: Izd-vo Politekhnicheskogo un-ta, 2012. 203 pp.