

УДК 536.2

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТОНКОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2013 г. Г. Н. Фрейберг, С. Г. Чернов*

Московский физико-технический институт

Россия, 141700, Долгопрудный Московской обл., Институтский пер., 9

*ООО «АлСил новые технологии»

Россия, 141009, Мытищи Московской обл., ул. Коминтерна, 15А

Поступила в редакцию 06.12.2011 г.

После доработки 09.02.2012 г.

Описана экспериментальная установка для определения абсолютных значений коэффициентов теплопроводности и теплоотдачи тонкослойных прокладок при температурах порядка или выше комнатных. Приведена методика обработки экспериментальных данных.

DOI: 10.7868/S0032816213010060

Современные микроэлектронные приборы содержат большое количество элементов, работа которых связана с сильным нагревом и выделением тепла. В связи с этим на практике необходимо решать проблему отвода тепла от рабочего элемента к радиатору и рассеяния его в окружающую среду.

В данной статье описано устройство для одновременного определения абсолютных значений коэффициентов объемной теплопроводности λ и теплоотдачи α тонкослойной прокладки, используемой для переноса теплоты от горячего элемента схемы к радиатору. Приведена методика проведе-

ния измерений и обработки экспериментальных данных. Область температур, при которых проводятся измерения, выбирается исходя из условий работы конкретных электронных устройств.

Принципиальная схема устройства показана на рис. 1. Окружающая среда – воздух в пространстве под жестким прозрачным колпаком 1 – изолирована от внешних воздушных потоков. В центре установки расположены горячее тело 2, тонкослойный исследуемый образец 3 и холодильник 4.

Горячее тело 2 и холодильник 4 изготовлены из алюминия (или меди) в виде коротких цилиндров

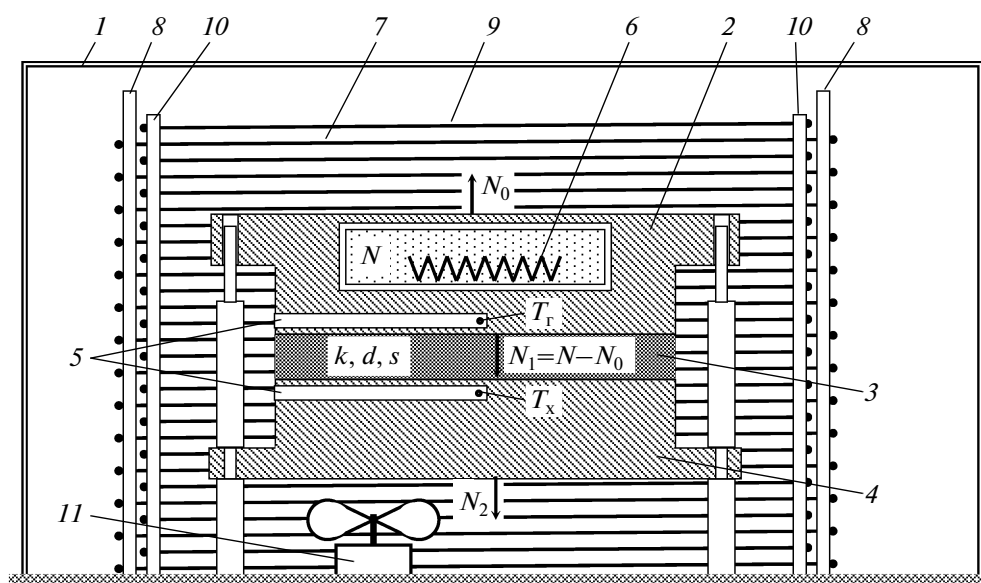


Рис. 1. Схематическое изображение установки. 1 – съемный колпак; 2 – горячее тело; 3 – исследуемый образец; 4 – холодное тело; 5 – тонкие каналы для термпар; 6 – нагреватель горячего тела; 7 – проволочный нагреватель воздуха под колпаком; 8 и 10 – стержни; 9 – проволочный терморезистор; 11 – вентилятор.

высотой 10 мм и диаметром 40 мм с плоскополированными контактными площадками. Датчиками температур T_r и T_x служат медь-константановые термопары, которые находятся около оси горячего тела и холодильника в конце тонких каналов 5, просверленных вблизи контактных поверхностей каждого из них (см. рис. 1).

Спиральный нагреватель 6 сопротивлением 20 Ом из константановой проволоки диаметром 0.12 мм расположен внутри горячего тела 2.

Нагреватель 7 внутреннего объема установки изготовлен из константановой проволоки диаметром 0.45 мм в виде тройной спирали, которая закреплена на тонких стержнях 8 высотой 200 мм, расположенных вертикально по окружности $\varnothing 180$ мм соосно с исследуемой системой. При параллельном соединении спиралей сопротивление нагревателя при комнатной температуре составляет 9.4 Ом.

Внутри нагревателя 7 расположен терморезистор 9, изготовленный в виде тройной спирали из медной проволоки диаметром 0.12 мм. Проволока намотана на тонкие стержни 10, расположенные вертикально по окружности чуть меньшего диаметра, чем диаметр нагревателя 7. При последовательном соединении спиралей сопротивление резистора при комнатной температуре составляет 49.5 Ом. Терморезистор 9 используется для определения, регулирования и стабилизации температуры T_b воздуха внутреннего объема установки.

Вентилятор 11 служит для поддержания однородности окружающей среды по температуре во внутреннем объеме установки.

Температура горячего тела T_r выбирается исходя из рабочей температуры элементов, которые требуется охлаждать в реальных условиях, но не выше 120°C. Как показал эксперимент, температура воздуха внутри установки T_b должна превышать температуру воздуха в лаборатории примерно на 10°C, при этом мощность, рассеиваемая на нагревателе среды, достигает 15 Вт.

Следует отметить, что в каждой серии измерений на образцах из одного и того же материала температуры T_r и T_b поддерживаются постоянными с точностью до 0.1 К. Для регистрации показаний термопар применен вольтметр В7-65/2 (В7-65/5); для стабилизации температуры используется двухканальный терморегулятор 2ТРМ0. Регистрация и обработка экспериментальных данных, приведенных в данной статье, производились вручную.

Тепловой поток N_1 , протекающий через образец 3, равен

$$N_1 = N - N_0 = k(T_r - T_x)S. \quad (1)$$

Здесь N – мощность, выделяемая в нагревателе горячего тела; N_0 – мощность, рассеиваемая в окружающую среду; S – площадь образца; T_r и T_x – температуры горячего тела и холодильника (радиатора)

соответственно; k – эффективный коэффициент теплопроводности исследуемого образца (листа толщиной d из исследуемого материала, расположенного между нагревателем и холодильником):

$$k = 1/(1/\alpha_1 + d/\lambda + 1/\alpha_2), \quad (2)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи через границы раздела между нагревателем и поверхностью образца и между образцом и холодильником; λ – коэффициент теплопроводности материала образца.

В описываемом устройстве для конкретного тонкослойного материала при проведении измерений горячее тело и воздух внутри установки имеют разные температуры, которые стабилизируются на одних и тех же уровнях независимо. В этом случае для корректного определения значений λ и α необходимо выполнить следующие условия:

- толщина измеряемого слоя d должна быть много меньше его поперечных размеров, чтобы можно было пренебречь рассеянием тепла боковой поверхностью образца;

- нагреватель и холодильник должны быть изготовлены из одного и того же материала с высокой теплопроводностью (например, алюминия или меди), их контактные площадки одинаково отполированы, в этом случае можно полагать, что $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$;

- в процессе измерений температуры горячего тела T_r и окружающей среды T_b поддерживаются постоянными, это дает основание полагать, что рассеиваемая тепловая мощность N_0 будет во всех экспериментах неизменной.

Исходя из перечисленных условий, уравнение (1) с учетом (2) можно записать в виде

$$N = N_0 + (T_r - T_x)S/(2/\alpha + d/\lambda). \quad (3)$$

Если измерения проводить при малой разности температур горячего тела и холодильника, так что $\Delta T/T_x = (T_r - T_x)/T_x \ll 1$, то коэффициенты λ и α можно считать постоянными. С учетом этого выражение (3) можно преобразовать к виду:

$$(T_r - T_x)S/(N - N_0) = 2/\alpha + d/\lambda. \quad (4)$$

Обозначив левую часть уравнения (4) через y :

$$y = (T_r - T_x)S/(N - N_0), \quad (5)$$

получим функцию, описывающую результаты экспериментов по измерению теплопроводности в тонком слое:

$$y [(K \cdot m^2)/Вт] = 2/\alpha + d/\lambda. \quad (6)$$

Исходя из размерности, величина y эквивалентна обратному значению коэффициента эффективной теплоотдачи k .

Мощность N_0 рассеяния зависит от конструкции и режимов работы установки. Однако, если проводить эксперименты таким образом, чтобы в

Экспериментальные данные и результаты их обработки

i	N_i , Вт	d_i , мм	$(T_r - T_x)_i$, К	Значения функции $y_i = (T_r - T_x)_i S / (N_i - N_0)$, (мК · м ²)/Вт при N_0					
				1.55	1.6	1.65	1.68	1.7	1.72
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2.28	0.09	1.50	2.47	2.65	2.86	3.00	3.10	3.21
2	2.08	0.18	1.50	3.40	3.75	4.19	4.50	4.74	5.00
3	1.88	0.36	1.44	5.24	6.17	7.51	8.64	9.60	10.80
4	1.82	0.72	1.55	6.89	8.45	10.94	13.29	15.50	18.60
5	1.75	1.44	1.50	9.00	12.00	18.00	25.71	36.00	60.00
Коэффициент достоверности R^2				0.928	0.957	0.986	0.997	0.991	0.961

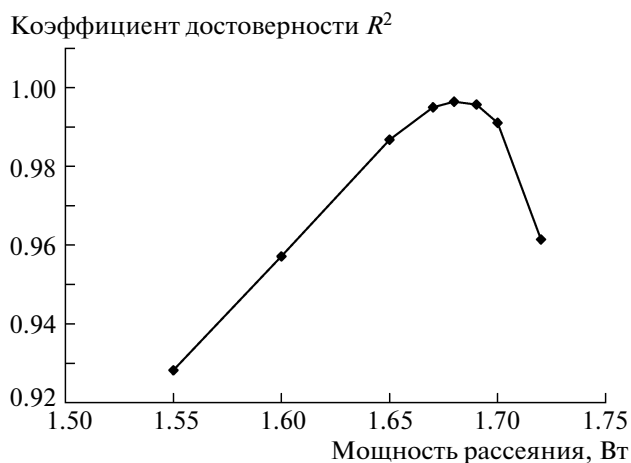


Рис. 2. Зависимость коэффициента достоверности R^2 от варьируемой величины N_0 .

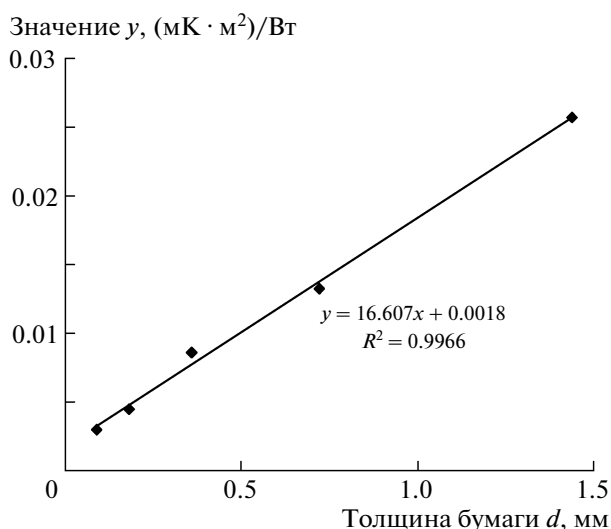


Рис. 3. Линейная зависимость $y(d)$ для оптимального значения мощности N_0 рассеяния.

серии измерений на образцах разной толщины d из одного и того же материала мощность рассеяния N_0 оставалась постоянной, т.е. выполнялись обозначенные выше условия: T_r и T_b фиксированы, то значение N_0 может быть определено в процессе обработки результатов измерений.

Методика обработки экспериментальных данных основана на том, что для реального значения мощности рассеяния N_0 функция $y(d)$ (см. (5)) должна быть линейной, т.е., согласно (6), это прямая линия с тангенсом угла наклона $1/\lambda$, пересекающая ось y в точке $2/\alpha$.

Устройство было опробовано при измерениях эффективной теплопроводности тонких листов бумаги, гетинакса, плексигласа и стеклотекстолита, для которых было возможно обеспечить требуемые условия измерений. Ниже приведены результаты измерений и методика обработки экспериментальных данных при исследовании эффективной теплопроводности листов писчей бумаги толщиной 0.09 мм для множительных аппаратов (бумага писчая, ГОСТ 6656-76, плотность 50 г/м²). Испытания проводились при $T_r = 40^\circ\text{C}$ и $T_b = 30^\circ\text{C}$, температура в лаборатории была примерно 20°C . Образцы представляли собой набор дисков диаметром 40 мм. Толщина образца d_i определялась количеством установленных дисков, при этом предполагалось, что контактное тепловое сопротивление между плотно прижатыми листами бумаги много меньше объемного теплового сопротивления листа.

Результаты измерений представлены в колонках 1–4 таблицы. На проведение измерений, результаты которых представлены в таблице, потребовалось около 3 ч. Величину N_0 находили из условия наилучшего соответствия массива точек $\{d_i, y_i\}$ линейной зависимости $y(d)$. В качестве критерия этого был выбран коэффициент досто-

верности R^2 , легко вычисляемый в среде Microsoft Excel. В колонках 5–10 таблицы представлены результаты определения значений y_i для разной рассеиваемой мощности N_0 , которую использовали в расчетах при определении коэффициентов λ и α .

На рис. 2 показано изменение коэффициента достоверности R^2 в зависимости от выбора варьируемой величины N_0 . Полученная кривая имеет максимум при $N_0 = 1.68$ Вт. Это и есть искомое значение мощности N_0 рассеяния, которое реализуется в данном эксперименте.

На рис. 3 представлена зависимость $y(d)$, полученная для значения $N_0 = 1.68$ Вт. Для полученной прямой тангенс угла наклона и координата $y(0)$ составили: $1/\lambda = 16.6 \text{ м} \cdot \text{К}/\text{Вт}$ и $2/\alpha = 0.0018 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

Таким образом, задача по определению коэффициентов теплопроводности λ и теплоотдачи α по результатам прямых измерений решена. Коэффициент теплопроводности исследуемой бумаги $\lambda = 1/16.6 = 0.06 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, что согласуется с данными работы [1], а коэффициент теплоотдачи между алюминием и бумагой $\alpha = 2/0.0018 = 1.1 \cdot 10^3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Авторы благодарны А.Д. Гладуну за обсуждение результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 361.