

УДК 536.6

## СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ВЕТВЕЙ ТЕРМОЭЛЕМЕНТОВ.

**Ф.К. АЛЕСКЕРОВ, А.Ш. АЛИЕВ, К.Ш. КАХРАМАНОВ.**

*НПО "СЕЛЕН" Института физики АН Азербайджана  
370143, Баку, ул. Ф.Агаева, 14.  
(Поступило 15.01.96)*

Рассматривается теория способа определения коэффициента теплопроводности полупроводниковых материалов, в котором исключена основная погрешность известных абсолютных и сравнительных способов измерения коэффициента теплопроводности, обусловленная сложностью точного определения величины теплового потока, проходящего через образец, и тепловых потерь с боковой поверхности.

Описан трехстадийный цикл экспериментальных измерений, позволяющий определить экспрессным способом коэффициенты теплопроводности, термоэдс и электропроводности, измерения которых сводятся к определению перепадов температур между внешней средой и гранями образца, в котором создают электрическое поле с различными характеристиками.

Результирующая температурно-энергетическая эффективность полупроводникового термоэлемента зависит от соответствия термоэлектрических свойств полупроводниковых материалов - коэффициентов термоэдс,  $\alpha$ , электропроводности  $\sigma$  и теплопроводности  $\chi$ , предварительно используемых в расчетах, тем реальным свойствам, которые имеют материалы в полупроводниковых ветвях.

Поэтому одним из обязательных этапов, который должен быть предусмотрен в технологическом процессе изготовления термоэлементов, является экспрессное определение термоэлектрических свойств полупроводниковых материалов непосредственно в ветвях, уточнение их реальных температурных зависимостей, отбраковка образцов, свойства которых оказываются несоответствующими задаваемым при расчетах. При этом особая сложность состоит в разработке экспрессного способа определения коэффициента теплопроводности большего количества полупроводниковых образцов.

Разработан способ определения коэффициента теплопроводности полупроводниковых материалов непосредственно в ветвях термоэлементов.

Теория способа основывается на определении температурных полей в полупроводниковом образце, в котором последовательно создают электрическое поле с различными характеристиками, поверхность которого, кроме теплоконтактной грани с температурой  $T_1$ , находится в теплообмене с внешней средой с температурой  $T_c$ .

Распределение температуры в образце в общем случае находится из решения дифференциального уравнения стационарной теплопроводности:

$$\frac{d^2 T(\bar{x})}{d\bar{x}^2} + \frac{J^2 l^2}{\sigma \alpha S^2} - \frac{\beta p l^2}{\alpha S} (T(\bar{x}) - T_c) = 0 \quad (1)$$

с граничными условиями

$$\bar{x} = 0 \quad T(\bar{x}) = T_1, \quad (2)$$

$$\bar{x} = 1 \quad \frac{dT(\bar{x})}{d\bar{x}} = - \left( \xi \frac{\beta \cdot l}{\alpha} \pm \alpha \frac{Jl}{\alpha S} \right) (T(\bar{x}) - T_c) \pm \frac{\alpha Jl}{\alpha S} T_c \quad (3)$$

где  $x$  - координата;  $\bar{x} = \frac{x}{l}$  - с безразмерная координата;  $l$  - длина, м;  $p$  - периметр, м;  $S$  - площадь, м<sup>2</sup>;  $I$  - ток, А;  $U$  - напряжение, В;  $\beta$  - коэффициент теплоотдачи, Вт · м<sup>2</sup>К<sup>-1</sup>;  $\xi$  - параметр, учитывающий влияние термопары и токопроводящей проволоки на интенсивность теплоотдачи со свободной грани образца.

Здесь "±" соответствует различным направлениям протекающего через образец электрического тока.

Решение уравнения (1) с граничными условиями (2) и (3) имеет вид

$$T(\bar{x}) = \left( (T_1 - T_c) - \frac{I^2}{\sigma \beta p S} \right) \left( \left( \xi \frac{\beta l}{\alpha} \pm \frac{Jl}{\alpha S} \right) \text{sh} \omega (1 - \bar{x}) + \right. \\ \left. + \omega \text{ch} \omega (1 - \bar{x}) - \left( \frac{I^2}{\sigma \beta p S} \left( \xi \frac{\beta p l}{\alpha} \pm \frac{\alpha l I}{\alpha S} \right) \pm \frac{\alpha l I}{\alpha S} T_c \right) \text{sh} \omega \bar{x} \right) \times \\ \times \left( \left( \xi \frac{\beta l}{\alpha} \pm \frac{\alpha l I}{\alpha S} \right) \text{sh} \omega + \omega \text{ch} \omega \right)^{-1} + \frac{I^2}{\sigma \beta p S} + T_c \quad (4)$$

где

$$\omega = 1 \left( \frac{\beta p}{\alpha S} \right)^{1/2} \quad (5)$$

Рассмотрим частные случаи, соответствующие различным стадиям экспериментальных измерений.

В случае отсутствия электрического тока, т.е. при  $I=0$ , температура свободной грани образца  $T_2^{(0)}$  определяется из уравнения:

$$T_2^{(0)} = (T_1 - T_c) \left( ch\omega + \xi \frac{\beta l}{\omega \alpha} sh\omega \right)^{-1} \quad (6)$$

Проведя несложные преобразования, можно получить:

$$\varphi_0 = ch\omega + \xi \frac{S}{pl} \omega sh\omega \quad (7)$$

где

$$\varphi_0 = (T_1 - T_c) / (T_2^{(0)} - T_c) \quad (8)$$

Уравнение (7) устанавливает неявную связь между коэффициентом теплопроводности полупроводникового образца, интенсивностью теплообмена боковой поверхности с внешней средой, температурами торцов образца и внешней средой, геометрическими размерами образца.

В [1] разработан вариант реализации способа измерения теплопроводности, основывающийся на изложенном выше физическом подходе. При этом установлено, что погрешность определения  $\omega$  по уравнению (7) при измерении  $\varphi_0$  посредством баланса термопарных сигналов в резистивном мосту, при выполнении условий  $\varphi_0 > 1,2$ , меньше 1%.

Недостаток этого способа заключается в экспериментальной сложности, состоящей в необходимости одновременного проведения комплекса измерений как параметров, определяющих коэффициент теплоотдачи  $\beta$ , так и разности температур между теплоконтактной поверхностью и свободной гранью образца и внешней средой.

Рассмотрим случай, когда через образец пропускают переменный ток, не вызывающий выделения теплоты Пельтье на спаях образца.

В этом случае температуру свободной грани образца  $T_2^{(1)}$  можно определить по формуле:

$$T_2^{(1)} = \frac{1}{\varphi_0} \left( T_1 - T_c - \frac{I^2}{\sigma \beta p S} - \xi \frac{I^2 l}{\sigma \alpha S p \omega} \operatorname{sh} \omega \right) + \frac{I^2}{\sigma \beta p S} + T_c \quad (9)$$

Совместно решая уравнения (5) и (9) относительно коэффициента теплопроводности, получим:

$$\alpha = \frac{I U l F_1}{(T_1 - T_c) \left( \frac{\varphi_0}{\varphi_1} - 1 \right)^3} \quad (10)$$

где

$$F_1 = (ch\omega - 1) \cdot \omega^{-2} \quad (11)$$

$$\varphi_1 = (T_1 - T_c) / (T_2^{(1)} - T_c) \quad (12)$$

Следовательно, для определения коэффициента теплопроводности полупроводникового образца необходимо измерение величины джоулевых тепловыделений в образце, измерение геометрических размеров, а также отношений первого и второго электрических сигналов, определяющих разности температур между внешней средой и теплоконтактными свободными гранями при отсутствии и пропускании через образец переменного тока.

Здесь исключена погрешность известных абсолютных и сравнительных способов измерения коэффициента теплопроводности [1,2], обусловленная сложностью точного определения величины теплового потока, проходящего через образец, и тепловых потерь с боковых поверхностей.

Рассматривая образец при пропускании постоянного тока, значение силы которого равно действующему значению силы переменного тока в предыдущей стадии, из уравнений (4) и (10) можно определить коэффициент термоэдс. Этот способ базируется на учете эффекта Пельтье и сводится к дополнительному измерению нового значения температуры свободной грани  $T_2^{(2)}$  и разности температур между внешней средой и свободной гранью:

$$\alpha = \frac{\left( 1 - \frac{\varphi_1}{\varphi_2} \right) \cdot U F_2}{\left( 1 - \frac{\varphi_1}{\varphi_0} \right) \cdot T_2^{(2)}} \quad (13)$$

где

$$F_2 = (ch\omega - 1) (\omega sh\omega)^{-1} \quad (14)$$

$$\varphi_2 = (T_1 - T_c) / (T_2^{(2)} - T_c) \quad (15)$$

Значения  $F_1$  и  $F_2$ , как показано в [3], можно определить с большой точностью и графическим путем.

Описанный выше трехстадийный цикл экспериментальных измерений позволяет определить экспрессным методом коэффициенты термоэдс, электро- и теплопроводности полупроводниковых образцов в интервале температур, соответствующем уровням эксплуатации термоэлементов.

Проводилось измерение температурных зависимостей термоэлектрических свойств полупроводниковых образцов  $n$ -типа (96% (мол)  $Bi_2Te_3$  + 4% (мол)  $Bi_2Se_3$  + 0.046 (вес)  $CdCl_2$ ) и  $p$ -типа (75% (мол)  $Sb_2Te_3$  + 25% (мол)  $Bi_2Te_3$  + 4% (вес)  $Te$ ), изготовленных в виде ветвей термоэлемента, в диапазоне температур 250...350K (рис.1).

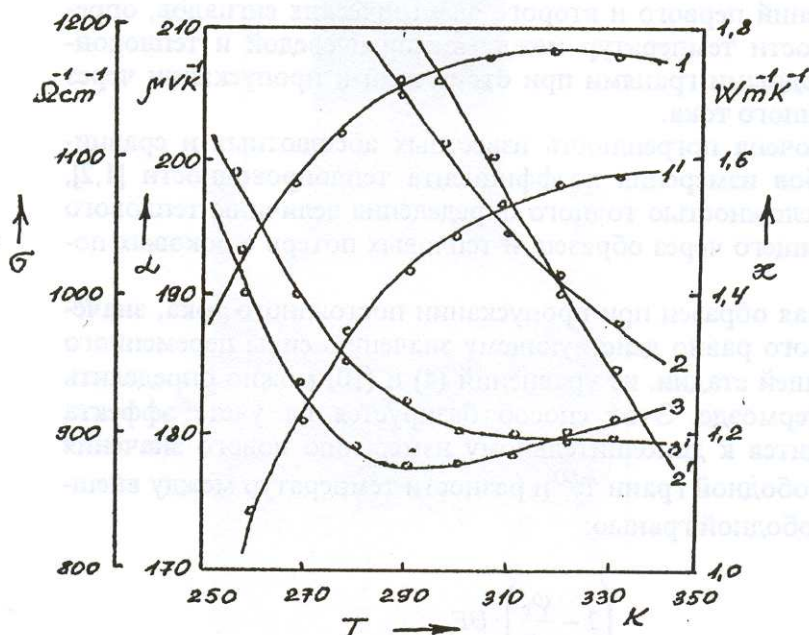


Рис. 1. Зависимость параметров ветвей термоэлемента от температуры. 1,2,3 - материал  $n$ -типа; 1',2',3' - материал  $p$ -типа; 1 - термоэдс; 2 - электропроводность; 3 - теплопроводность

Как показывает анализ, погрешность измерения коэффициентов термоэда, электро- и теплопроводности при единичных измерениях не превышает, соответственно, 4%, 1-3% и 1-2%, а при серийных измерениях - 7%, 3-6% и 4-5%.

Рассмотренный способ определения теплопроводности полупроводниковых образцов может быть использован при экспрессном измерении коэффициентов термоэда, электро- и теплопроводности большего числа полупроводниковых ветвей непосредственно в процессе изготовления термоэлементов.

### Литература

1. А.с. № 1636753; МКИ 01 К 25/18. Способ измерения коэффициента теплопроводности полупроводникового образца.
2. В.А.Осипова. Кн. "Экспериментальное исследование процессов теплообмена". М., "Энергия", 1979, 320 с.
3. Патент № 1790759 G 01 № 25/18. Способ измерения коэффициента теплопроводности электропроводящего образца.

**Ф.К. Ələskərov, А.Ş. Əliyev, К.Ş. Qəhrəmanov**

### TERMOELEMENTDƏ YARIMKEÇİRİCİ MATERIALLARIN İSTİLİKKEÇİRMƏ ƏMSALININ TAPILMASI ÜSULU

Məqələdə yarımkeçirici materialların istilikkeçirmə əmsalının tapılması üsuluna baxılır. Nümunədən keçən və nümunənin kənar səthlərindən ətraf mühitə verilən istilik sellərinin ölçülməsi ilə bağlı olan məlum mütləq və müqayisə metodlarının əsas xətası məqələdə verilmiş üsulda aradan qaldırılmışdır.

Ölçmə əməliyyatları ardıcıl olaraq bir neçə növ elektrik sahəsi yaradılmış nümunənin səthləri ilə ətraf mühit arasındakı temperatur fərqi ölçülməsindən ibarətdir. Yüksək sürətli üç mərhələli ölçmə əməliyyatları yarımkeçirici materialın istilikkeçirmə termoeəds və elektrikkeçirmə əmsallarının tapılmasına imkan verir.

**F.K.Aleskerov, A.Sh.Aliev, K.Sh.Kakhramanov.**

### DETERMINATION METHOD OF THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENTS OF SEMICONDUCTOR MATERIALS OF THERMOELEMENT ARMS.

The theory of the method of thermal conductivity coefficient determination of the semiconductor materials is considered. In this method the main error of the known absolute and comparative measurements of thermal conductivity coefficient caused by complexity exact determination of the heat flux value passing through the sample and thermal from lateral surface is excluded.

It has been presented the three-stage cycle of experimental measurements allowing to determine by the rapid method the thermal conductivity coefficients,

thermoelectromotive force and electric conductivity, measurements of which are reduced to determination of temperature gradients between the external medium and the sample faces where the electric field with different characteristics are created.