

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ КОНТАКТНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПАРЫ «ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ — МЕТАЛЛ»

Д. ф.-м. н. Л. Н. Вихор¹, д. ф.-м. н. П. В. Горский^{1,2}

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины;

²Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича
Украина, г. Черновцы
gena.grim@gmail.com

Рассчитаны температурные зависимости электрического контактного сопротивления пары «термоэлектрический материал — металл» на примере контактной пары «теллурид висмута — никель» с учетом как составляющей, обусловленной потенциальным барьером на контакте, так и переходным слоем, создаваемым в процессе стационарной диффузии никеля в теллурид висмута из постоянного источника. Показано, что в интервале температур от 200 до 400 К при толщине переходных слоев от 20 до 150 мкм электрическое контактное сопротивление изменяется от $4 \cdot 10^{-7}$ до $2 \cdot 10^{-6}$ Ом·см².

Ключевые слова: контакт, потенциальный барьер, переходной слой, стационарная диффузия, контактное сопротивление.

Электрическое контактное сопротивление пары «термоэлектрический материал — металл» является важным параметром, характеризующим качество термоэлектрических преобразователей энергии. При традиционных расчетах зависимость их контактного сопротивления от температуры не принимается во внимание, а она важна для получения достоверной информации об ожидаемых значениях параметров преобразователя. Существуют определенные экспериментальные данные по температурным зависимостям контактного сопротивления, в том числе для пары «теллурид висмута — никель» [1]. Однако теория этого сопротивления для термоэлектрических материалов до настоящего времени не разработана, если не считать работы [2], в которой рассмотрена часть контактного сопротивления, обусловленная туннелированием носителей заряда через потенциальный барьер. При этом в реальных режимах работы термоэлектрических преобразователей энергии имеет место совместное действие как туннелирования, так и эмиссии носителей заряда через контакт. Кроме того, в это сопротивление входит сопротивление переходного слоя, обусловленного диффузией никеля в термоэлектрический материал. Целью настоящей работы был расчет температурной зависимости контактного сопротивления с учетом этих факторов.

Для расчета сопротивления переходного слоя, обусловленного диффузией никеля в термоэлектрический материал, из уравнения стационарной диффузии с постоянным источником определялось распределение атомов никеля по глубине переходного слоя:

$$n(x) = n_0 (1 - x^2) \quad (1)$$

где n_0 — концентрация частиц никеля на границе термоэлектрического материала с металлом; x — нормированная на толщину переходного слоя координата, отсчитываемая вглубь от этой границы. Поэтому относительная объемная доля атомов металла на глубине x равна:

$$v(x) = (A_m/\gamma_m)(1-x^2) \left[(A_m/\gamma_m)(1-x^2) + (A_m/\gamma_m)x^2 \right]^{-1}, \quad (2)$$

где $A_m, \gamma_m, A_s, \gamma_s$ — атомная (молекулярная) масса и плотность металла и полупроводника соответственно.

С учетом (2) получаем следующую формулу для части электрического контактного сопротивления, обусловленной диффузией частиц никеля в термоэлектрический материал:

$$r_i = h \int_0^1 \frac{(A_m/\gamma_m)(1-x^2) + (A_s/\gamma_s)x^2}{\sigma_m (A_m/\gamma_m)(1-x^2) + \sigma_s (A_m/\gamma_m)x^2} dx \quad (3)$$

где h — толщина переходного слоя; σ_m, σ_s — проводимость металла и термоэлектрического материала соответственно.

Контактное сопротивление, обусловленное потенциальным барьером на границе «металл — термоэлектрический материал», определялось следующим образом [3]:

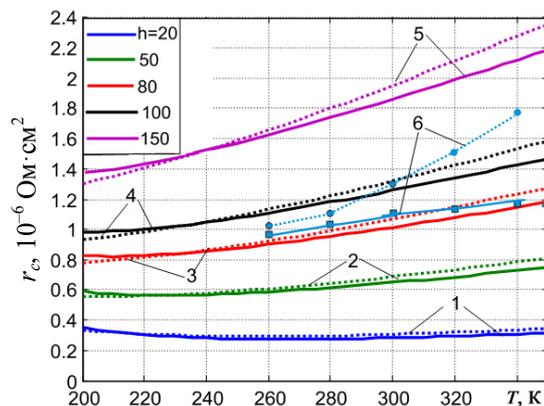
$$r_b = \frac{k\sqrt{E_{00}} \operatorname{ch}(E_{00}/kT) \operatorname{cth}(E_{00}/kT)}{eAT\sqrt{\pi}(E_b + \zeta)} \exp\left[\frac{E_b + \zeta}{E_{00} \operatorname{cth}(E_{00}/kT)} - \frac{\zeta}{kT}\right], \quad (4)$$

где $E_{00} = 0,5e\hbar\sqrt{N_i/(m^*\varepsilon_s\varepsilon_0)}$; N_i — концентрация однократно ионизированных донорных либо акцепторных примесей в термоэлектрическом материале; m^* — эффективная масса электронов (дырок); ε_s — относительная диэлектрическая проницаемость; ε_0 — диэлектрическая постоянная вакуума; T — абсолютная температура; A — постоянная Ричардсона; E_b — высота потенциального барьера; ζ — химический потенциал подсистемы свободных носителей заряда в термоэлектрическом материале, значение которого определяется из уравнения:

$$N_i = \left[4\sqrt{\pi}(2m^*kT)^{3/2}/h^3\right] F_{1/2}(\zeta/kT), \quad (5)$$

где $F_{1/2}(\eta) = \int_0^\infty \sqrt{x} [\exp(x-\eta) + 1]^{-1} dx$ — интеграл Ферми.

Результаты расчетов температурных зависимостей электрического контактного сопротивления r_c приведены на рисунке.



Температурные зависимости электрического контактного сопротивления:

- 1...5 — для толщины переходных слоев 20, 50, 80, 100, 150 мкм соответственно для материалов n -типа (сплошные линии) и p -типа (пунктир);
6 — экспериментальные данные из [1]

Таким образом, полученные температурные зависимости контактного сопротивления пары «теллурид висмута — никель» свидетельствуют о том, что при толщине переходного слоя до 50 мкм существенную роль играет составляющая, обусловленная потенциальным барьером, а при большой толщине — составляющая, обусловленная диффузией частиц никеля в термоэлектрический материал. В рассмотренном интервале температуры и толщины контактных слоев электрическое контактное сопротивление изменяется в интервале от $3 \cdot 10^{-7}$ до $2,4 \cdot 10^{-6}$ Ом·см².

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Gupta R.P., McCarty R., Sharp J. Practical Contact Resistance Measurement Method for Bulk Bi₂Te₃ based thermoelectric devices // J. Electron. Mater. — 2014. — Vol. 43(6). — P. 1608—1612.
2. Da Silva L. W., Kaviany M. Micro-thermoelectric cooler: interfacial effects on thermal and electrical transport // Int. J. Heat and Mass Transfer. — 2004. — Vol. 47(10-11). — P. 2417—2435.
3. Sze S.M., Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices. — Hoboken NJ: John Wiley & Sons, 2007.

L. N. Vikhor, P. V. Gorskyi

Electrical contact resistance of the thermoelectric material — metal junction

Temperature dependences of the electrical contact resistance of the thermoelectric material — metal junction were calculated for a bismuth telluride — nickel pair, taking into account both component caused by the potential barrier at the contact and the one caused by the interfacial layer created due to a stationary diffusion of nickel into bismuth telluride. It was shown that in the temperature range from 200 to 400 K for a thickness of interfacial layers from 20 to 150 μm, the electrical contact resistance varies from $3 \cdot 10^{-7}$ to $2.4 \cdot 10^{-6}$ Ω·cm².

Keywords: contact, potential barrier, interfacial layer, stationary diffusion, contact resistance.