

ВЛИЯНИЕ ВИДА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА НА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Марков О.И.

Орловский государственный университет, Орел, Россия
E-mail: O.I.Markov@mail.ru

Введение

Основную надежду на рост эффективности термоэлектрического охлаждения обычно связывают с повышением параметра термоэлектрической добротности, что породило одну из важнейших задач полупроводникового материаловедения и, соответственно, вызвало активный интерес исследователей. Их основные усилия направлены на поиски новых высокоэффективных термоэлектриков, однако, возможности уже используемых термоэлектриков далеко не исчерпаны. В связи с этим возникает проблема оптимизации распределения концентрации носителей заряда в соответствии с распределением температуры вдоль ветви термоэлемента. Неоднородные термоэлементы со свойствами, меняющимися вдоль ветви, могут иметь термоэлектрическую эффективность, превосходящую эффективность однородных термоэлементов [1-4]. В работе [5] сделана попытка определить оптимальное распределение концентрации носителей вдоль ветви термоэлемента с использованием принципа оптимального управления. Результаты расчета показали, что оптимальным является линейное распределение носителей заряда. При этом распределении возникает ненулевой градиент температуры на горячем конце ветви, что указывает на появление теплового потока из термостата. Соответственно возникает вопрос: зачем выкачивать дополнительную теплоту из термостата, чтобы потом ее ликвидировать с помощью распределенного эффекта Пельтье? В другой работе [6] сделана попытка аналитического решения проблемы оптимального распределения концентрации носителей заряда. Она основана на идее полной компенсации джоулевой теплоты распределенным эффектом Пельтье. В данном случае возникает другой вопрос. Стоит ли компенсировать всю теплоту Джоуля? Эффект Джоуля не столь вреден, чтобы уничтожить его действие полностью. Он формирует профиль распределения температуры вдоль ветви термоэлемента. В случае однородной ветви в режиме максимального

перепада температур он создает своеобразный «тепловой затвор», препятствующий притоку теплоты из термостата. Поэтому при поиске оптимального распределения носителей заряда необходимо учесть это обстоятельство, что было сделано в работах [7-9]. Поиску лучшего распределения концентрации носителей заряда, чем линейное посвящена данная работа.

Расчет химического потенциала в случае градиентно-неоднородного термоэлектрика

Поскольку кинетические коэффициенты реальных термоэлектриков являются функциями температуры, то оптимизированный в конкретном температурном поле термоэлектрик был оптимален в каждой точке и, поэтому должен быть неоднороден. Температурное поле в направлении оси ξ неоднородного термоэлектрика с учетом эффекта Томсона и распределенного эффекта Пельтье описывается стационарным уравнением теплопроводности

$$\frac{d}{d\xi} \left(\chi \frac{dT}{d\xi} \right) + \frac{Y^2}{\sigma} - Y \cdot T \cdot \left(\frac{d\alpha}{dT} \cdot \frac{dT}{d\xi} + \frac{d\alpha}{d\xi} \right) = 0 \quad (1)$$

с граничными условиями

$$\chi \frac{dT}{d\xi} \Big|_{\xi=0} = \alpha \cdot Y \cdot T \Big|_{\xi=0}, T \Big|_{\xi=1} = T_1, \quad (2)$$

где параметр $Y = I \cdot l/S$, l – длина ветви, S – сечение ветви, I – ток ветви. В простой модели дифференциальная термоэдс α , удельная электропроводность σ и удельная теплопроводность χ вычислялись по формулам

$$\sigma = e \cdot n \cdot u, \quad (3)$$

$$\chi = \chi_{ph} + L \cdot \sigma \cdot T, \quad (4)$$

$$\alpha = -\frac{k}{e} \left(\frac{F_2(\eta)}{F_1(\eta)} - \eta \right) \quad (5)$$

для случая носителей заряда одного типа с квадратичным законом дисперсии с использованием выражений для концентрации носителей заряда:

$$n = \frac{8 \pi}{3h} (2m^* kT)^{3/2} F_{3/2}(\eta), \quad (6)$$

и числа Лоренца

$$L = \left(\frac{k}{e}\right)^2 \left[\frac{F_3(\eta)}{F_1(\eta)} - \left(\frac{F_2(\eta)}{F_1(\eta)}\right)^2 \right]. \quad (7)$$

В достаточно широком температурном интервале можно учесть температурную зависимость подвижности носителей заряда в виде [10]

$$u \sim \text{const} \cdot m^{*-5/2} \cdot T^{-3/2}, \quad (8)$$

а решеточную составляющую теплопроводности в виде зависимости

$$\chi_{ph} = \text{const}/T \quad (9)$$

При численном расчете величину эффективной массы носителей выберем равной $0,5 m_0$. Константы в выражениях для подвижности и решеточной теплопроводности подобраны таким образом, чтобы при комнатной температуре коэффициент термоэлектрической эффективности Z достигал значения $3 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$. Поставленная граничная задача нелинейная, и поэтому может быть решена численными методами. Одновременно необходимо проводить численную оптимизацию по параметру Y и по концентрации носителей. Интервал вариации приведенного химического потенциала составлял $-4,4 \leq \eta \leq 2,5$.

Поскольку определить оптимальную функцию распределения концентрации носителей заряда в данной постановке задачи не представляется возможным, естественно сначала показать, почему линейный закон распределения

$$n = n_0 \cdot (1 - g \cdot \xi) \quad (10)$$

не является оптимальным.

Распределение температур в неоднородном термоэлектрике существенно меняется по сравнению с однородным случаем (рис. 1а). Близкое к параболическому закону для однородного термоэлектрика (кривая 1) распределение температуры становится практически линейным при соотношении концентраций на холодном и горячем концах ветви $n_0/n_1 = 5$. Как видно из графика (кривые 2 и 3) градиент температуры в точке $\xi=1$ не равен нулю, следовательно, появляется тепловой поток из термостата. Для неоднородной ветви распределение приведенного химического потенциала изменяет свой вид (рис. 1б) по сравнению с однородным (кривая

1). При переходе к линейному закону распределения концентрации носителей приводит к значительному изменению химического потенциала вблизи горячего конца ветви. Чем больше скорость роста химического потенциала, тем больше теплоты поглощается в распределенном эффекте Пельтье. Поэтому увеличение теплопритока из термостата и рост поглощения теплоты вблизи горячего конца при линейном распределении концентрации носителей заряда не позволяют ему быть оптимальным.

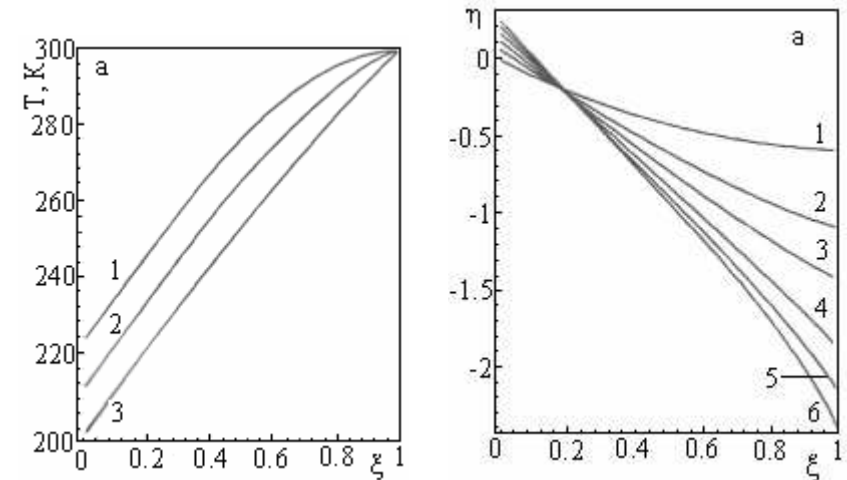


Рис. 1. а) Распределение температуры вдоль оси ξ при $T_1 = 300 \text{K}$ для линейного распределения концентрации носителей при разных отношениях n_0/n_1 (1 - $n_0/n_1 = 1$, 2 - 2, 3 - 5). б) Распределение приведенного химического потенциала вдоль оси ξ при $T_1 = 300 \text{K}$ для линейного распределения концентрации носителей при разных отношениях n_0/n_1 (1 — $n_0/n_1=1$, 2 — 1,5, 3 — 2, 4 — 3, 5 — 4, 6 — 5).

Чтобы это исправить, область поглощения теплоты за счет распределенного эффекта Пельтье следует сместить к холодной грани «ячейки Пельтье», для чего следует изменить закон распределения концентрации носителей. Изменение концентрации носителей заряда вблизи горячей грани должно быть как можно меньше, а область быстрого изменения концентрации нужно сместить к холодной грани. Этого можно сделать, если выбрать экспоненциальное распределение концентрации носителей

$$n = b \cdot \exp(-\beta \cdot \xi) + c \quad (11)$$

Где β , b и c - константы, которые выражались через n_0 - концентрацию носителей заряда в точке $\xi=0$ и n_0/n_1 - отношение концентраций носителей заряда в точках $\xi=0$ и $\xi=1$.

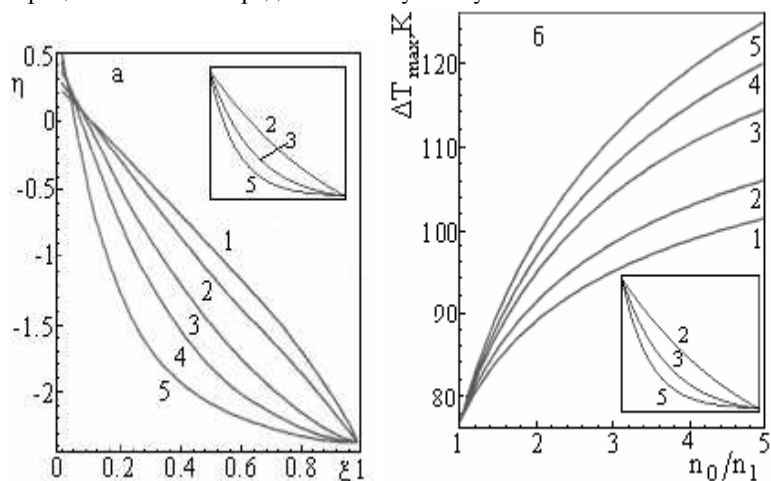


Рис. 2. а) Распределение приведенного химического потенциала вдоль оси ξ для случая $T_1 = 300$ К и отношения $n_0/n_1 = 5$ при разных распределениях концентрации носителей (по линейному закону (1), по экспоненте, $\beta = 1$ (2), 3 (3), 5 (4), 10 (5)). На врезке график распределения концентрации носителей заряда. б) Зависимость максимального перепада температур от отношения концентраций носителей на холодной и горячей гранях n_0/n_1 для случая $T_1 = 300$ К при разных распределениях носителей вдоль оси ξ (по линейному закону (1) $n_0/n_1 = 5$, по экспоненте, $\beta = 1$ - (2), 3- (3), 5- (4), 10- (5)). На врезке график распределения концентрации носителей заряда.

Зависимость приведенного химического потенциала от координаты ξ для распределения концентрации экспоненциального типа представлена на рис. 2а. Увеличение градиента концентрации носителей заряда вблизи холодной грани, по сравнению с линейной зависимостью приводит к большому снижению температуры на холодной грани за счет большей компенсации теплоты Джоуля в этой области. Вблизи горячей

грани наоборот снижается градиент концентрации, что позволяет уменьшить градиент химического потенциала и тем самым снизить поглощение теплоты. Это уменьшает градиент температуры в точке $\xi=1$ и тем самым уменьшает тепловой поток из термостата.

На рис. 2б показана зависимость перепада температуры от перепада концентрации при различных распределениях концентрации вдоль ветви термоэлемента.

Выводы

Таким образом, оптимизацию по концентрации носителей тока в рабочем интервале температур следует проводить, моделируя теплофизические процессы граничной задачи с тем или иным распределением носителей заряда; линейное распределение концентрации носителей вдоль ветви термоэлемента не является оптимальным, как это утверждается в [5]; использование экспоненциального распределения концентрации носителей увеличивает эффективность термоэлектрического преобразования энергии по сравнению с линейным распределением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Reich A.D. Bull. Amer. Phys. Soc., 1972. v.17. N3. p.282.
2. Семенюк В.А. Теплофизика и теплотехника, 1978. в.35. с.80—84.
3. Анатычук Л.И., Семенюк В.А. Оптимальное управление свойствами термоэлектрических материалов и приборов. Черновцы, Прут, 1992, 264 с.
4. Kaliazin A.E. Kuznetsov V.L., Rowe D.M. Rigorous calculations related to functionally graded and segmented thermoelements// Proceedings of the XX Int. Conf. on Thermoelectrics. Beijing, China, 2001, p.286—291.
5. Иванова К.Ф., Ривкин А.С. ЖТФ, 1982. т. 52. в. 7. с.1406—1411.
6. Агеев Ю.И., Иванова К.Ф., Каганов М.А., Стыльбанс Л.С., Шер Э.М. ЖТФ, 1985. т 55. в.11. с.2266—2269.
7. Марков О.И. ЖТФ, 2005. т. 75. в. 2. с. 62—66.
8. Марков О.И. ИФЖ, 2006. т.79. N1. с.167—172.
9. Марков О.И. Физические проблемы термоэлектрического преобразования энергии. Орел., ОГУ, 2013, 144 с.
10. Аскеров Б.И. Электронные явления переноса в полупроводниках. М., Наука, 1985, 320с.