

01;05;12

## Повышение эффективности ветви термоэлемента при линейном законе распределения концентрации носителей

© О.И. Марков

Орловский государственный университет,  
302015 Орел, Россия  
e-mail: Markov@e-mail.ru

(Поступило в Редакцию 3 июля 2003 г.)

Численно решена одномерная граничная задача по определению стационарного температурного поля ветви термоэлемента в режиме максимального температурного перепада в интервале температур горячего конца ветви 100–300 К. В расчете учтены эффект Томсона, распределенный эффект Пельтье и температурная зависимость подвижности носителей заряда. Проведена оптимизация по току и концентрации носителей.

Рост производства термоэлектрических охладителей, обозначившийся в последнее время, с большей остротой ставит задачу повышения термоэлектрической добротности полупроводниковых материалов. Достигнутые показатели еще далеки от теоретических пределов [1]. Одним из направлений повышения термоэлектрической добротности является использование неоднородных по длине ветвей термоэлемента [2]. Показано [3], что термоэлектрическая добротность повышается, если проводимость растет, а термоэдс уменьшается от горячего конца к холодному. Более последовательный подход, основанный на решении граничной задачи стационарной теплопроводности, использован в работе [4]. Оптимальное распределение примеси вдоль длины ветви определялось в результате решения граничной задачи. Авторы предполагали, что коэффициенты термоэдс, теплопроводности и электропроводности слабо зависят от температуры, а вкладом эффекта Томсона можно пренебречь. В настоящей работе сделана попытка с учетом температурной зависимости кинетических коэффициентов, а также эффекта Томсона и распределенного эффекта Пельтье получить решение граничной задачи [4] при линейном законе распределения носителей в широком интервале температур. Температурная зависимость электропроводности учтена в виде зависимости подвижности  $\text{const} \cdot T^{-3/2}$ . Нами получено численное решение граничной задачи. Рассмотрен режим максимального перепада температуры.

Температурное поле одномерной адиабатически изолированной неоднородной ветви термоэлемента в установившемся режиме максимального перепада температуры с учетом эффекта Томсона описывается стационарным уравнением теплопроводности

$$\frac{d}{dx} \left( \chi \frac{dT}{dx} \right) + \frac{y^2}{\sigma} - \frac{k}{e} y T \left( \frac{1}{n} \frac{dn}{dx} - \frac{3}{2T} \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (1)$$

с граничными условиями

$$\chi \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = \alpha y T \Big|_{x=0}, \quad T \Big|_{x=1} = T_1, \quad (2)$$

где для удобства решения задачи в отличие от [4] нами был введен параметр [5]  $y = J \cdot l/S$ , по которому проводилась оптимизация.

Кинетические коэффициенты для невырожденной статистики носителей заряда имеют следующий вид:

$$\sigma = enu, \quad u = \text{const} \cdot T^{-3/2}, \quad \chi = \chi_p + 2 \left( \frac{k}{e} \right)^2 T \sigma, \\ \alpha = \frac{k}{e} \left( 2 + \ln \frac{2(2\pi mkT)^{3/2}}{nh^3} \right).$$

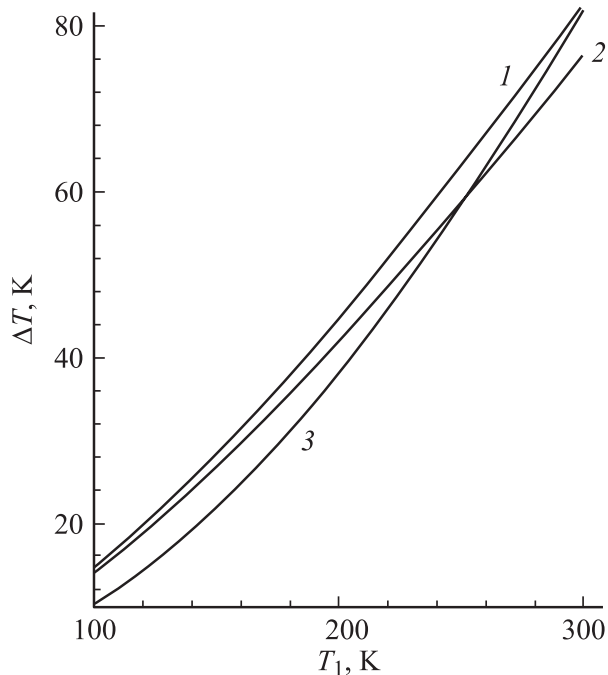
Решеточная теплопроводность, коэффициент пропорциональности  $\text{const}$  в температурной зависимости, подвижность носителей и эффективная масса  $m$  подбирались так, чтобы термоэлектрическая добротность соответствовала полупроводниковым материалам с  $Z = 3.0 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  при  $T_1 = 300 \text{ K}$ . Концентрация носителей заряда вдоль ветви менялась, как и в [4], по линейному закону

$$n = n_0(1 - gx). \quad (3)$$

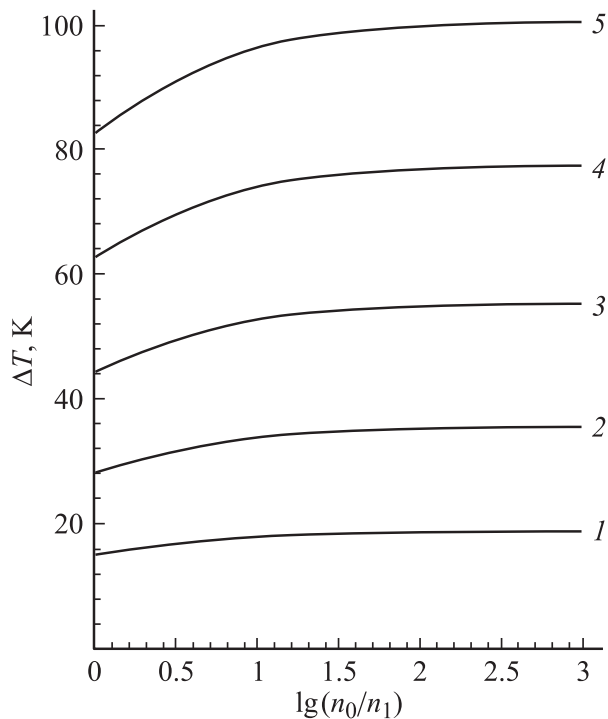
Введенный нами параметр  $y = J \cdot l/S$  может быть назван приведенным током [5].

При решении граничной задачи проводилась численная оптимизация перепада температуры по приведенному току и концентрации  $n_0$  на холодном конце ветви термоэлемента при заданном значении  $g$ . Был выбран достаточно широкий интервал вариации величины  $0 \leq g \leq 0.999$ , что соответствует изменению отношения концентраций носителей на холодном и горячем концах  $k = n_0/n_1$  в пределах  $1 \leq k \leq 10^3$ .

Результаты численного решения граничной задачи (1), (2) отражены в графиках. На рис. 1 представлены зависимости максимального перепада температуры от температуры горячего конца ветви термоэлемента, работающей в режиме максимального перепада температуры.



**Рис. 1.** Зависимость максимального перепада температуры от температуры горячего конца ветви. 1 — задача 1–3, 2 — согласно формуле (4), 3 получена из решения граничной задачи для твердых растворов на основе теллурида висмута.



**Рис. 2.** Зависимость максимального перепада температуры от логарифма отношения концентраций на холодном и горячем спае представлена для разных температур горячего конца ветви.  $T_1 = 100$  (1), 150 (2), 200 (3), 250 (4), 300 К (5).

Кривая 1 соответствует результатам расчета однородной ветви ( $g = 0$ ) согласно краевой задаче (1), (2). Кривая 2 отражает зависимость перепада температуры в однородной ветви, рассчитанной по формуле

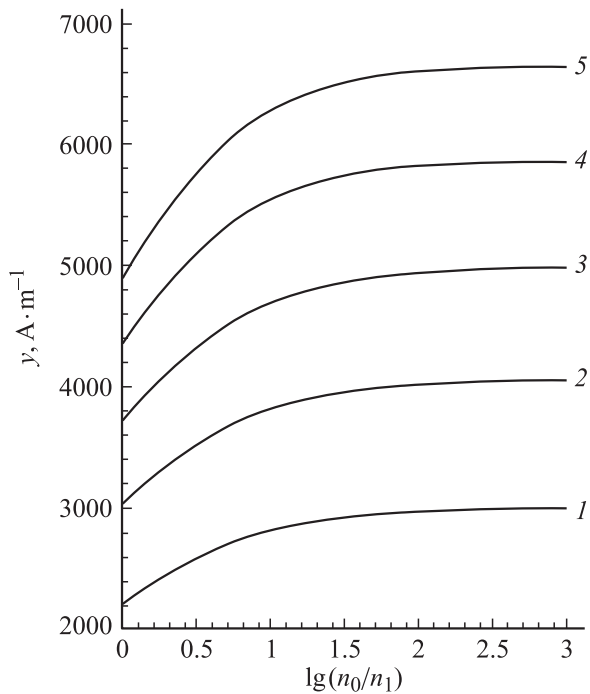
$$\Delta T = T_1 + \frac{1}{z} - \sqrt{\frac{1}{z} \left( 2T_1 + \frac{1}{z} \right)}. \quad (4)$$

Расхождение между ними обусловлено действием эффекта Томсона и температурными зависимостями кинетических коэффициентов. Кривая 3 отражает зависимость рассчитанного максимального температурного перепада в ветви на основе теллурида висмута, имеющей параметр термоэлектрической добротности при комнатной температуре, равный  $3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . В этом случае расчет перепада осуществлялся в результате решения граничной задачи [5], в которой температурные зависимости кинетических коэффициентов аппроксимировались степенными многочленами. Как видно из графиков, расхождение увеличивается со снижением температуры горячего конца ветви, что, по-видимому, обусловлено вырождением носителей.

Максимальный перепад температуры увеличивается для неоднородных ветвей. Зависимость максимального перепада температуры на длине ветви от логарифма отношения концентраций на холодном и горячем спае  $k$  представлена на рис. 2 для разных температур горячего конца ветви. Как видно из графика, изменять концентрацию носителей заряда более чем в 8–10 раз при линейном законе распределения нецелесообразно, так как добавки к температурному перепаду при больших отношениях становятся крайне малыми. Так, десятикратное изменение концентрации приводит к увеличению перепада температур на 16.8%, а тысячекратное — на 21.3% при температуре горячего конца 300 К. С уменьшением температуры горячего конца до 100 К температурные перепады увеличиваются на 20.6 и на 26.4% соответственно.

В неоднородной ветви увеличивается и величина оптимального тока. На рис. 3 представлены зависимости оптимального значения приведенного тока от логарифма отношения концентраций на холодном и горячем концах ветви. Как видно, при десятикратном изменении концентрации ток возрастает на 25.5%, а при тысячекратном — почти на 36.7%.

Наличие градиента концентрации носителей заряда приводит к понижению температуры холодного конца ветви за счет частичной или полной компенсации теплоты Джоуля теплотой Томсона. При оптимизации по концентрации на холодном конце ветви оптимальное значение концентрации  $n_0$  меняется в сторону увеличения. Рост оптимальной концентрации носителей заряда на холодном конце приводит к снижению значения термоэдс в этой точке, а следовательно, является неблагоприятным фактором, так как способствует уменьшению возможного перепада температуры.



**Рис. 3.** Зависимость приведенного тока от логарифма отношения концентраций на холодном и горячем спаях для разных температур горячего конца ветви. 1–5 — то же, что и на рис. 1.

Подводя итоги работы, можно сказать, что классическая статистика достаточно удовлетворительно описывает температурную зависимость максимального перепада температуры. Как показывают расчеты, использование ветвей термоэлементов с линейным распределением концентрации носителей заряда по длине ветви может существенно повысить максимальный перепад температуры и повысить холодопроизводительность термоэлектрических охладителей.

## Список литературы

- [1] *Rittner E.S.* // J. Appl. Phys. 1959. Vol. 30 (3). P. 702.
- [2] *Voerijk A.H.* // J. Appl. Phys. 1961. Vol. 32 (8). P. 1584.
- [3] *Семенов В.А.* // Теплофизика и теплотехника. 1978. Вып. 35. С. 80.
- [4] *Иванова К.Ф., Ривкин Ф.С.* // ЖТФ. 1982. Вып. 5 (7). С. 1406.
- [5] *Марков О.И., Мызникова О.А.* // Сб. докл. VIII Международного семинара „Термоэлектрики и их применения“. СПб.: ФТИ им. Иоффе, 2002. 327 с.