

01;05

Об оптимизации концентрации носителей заряда ветви охлаждающего термоэлемента

© О.И. Марков

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

(Поступило в Редакцию 11 октября 2004 г.)

Проведено компьютерное моделирование температурного поля для ветви термоэлемента в режимах максимального перепада температуры и максимальной холодопроизводительности. В расчетах использовано дифференциальное уравнение стационарной теплопроводности с зависящими от температуры кинетическими коэффициентами. С использованием классической статистики рассчитана оптимальная концентрация носителей заряда.

Невысокая эффективность термоэлектрических охлаждающих устройств является основным препятствием их широкого применения. Перспективы в этой области обычно связывают с созданием более эффективных материалов. Однако наряду с поисками новых высокоэффективных термоэлектриков следует более тщательно проанализировать возможности уже имеющихся материалов. Общеизвестно, что основным критерием качества полупроводниковых материалов для термоэлектрических охладителей является коэффициент термоэлектрической добротности [1]

$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\chi}, \quad (1)$$

где α — коэффициент термоэдс, σ — проводимость, χ — коэффициент теплопроводности.

Учет температурной зависимости кинетических коэффициентов реальных термоэлектриков осуществляется усреднением их по рабочему температурному интервалу [2]

$$\bar{f} = \frac{1}{\Delta T} \int_{T_0}^{T_1} f dT. \quad (2)$$

Зависимость кинетических коэффициентов от концентрации свободных носителей зарядов позволяет, проведя оптимизацию, достичь максимума коэффициента термоэлектрической добротности. Как справедливо отмечено в [3], обычно оптимизацию проводят для каждого из материалов ветвей в отдельности, что не обеспечивает максимум добротности термопары в целом. Максимальное значение Z для полупроводников p - и n -типа проводимости достигается при некоторых оптимальных значениях концентрации носителей заряда. Такой расчет может быть проведен до конца лишь для простейших аналитических зависимостей кинетических коэффициентов от концентрации носителей заряда [3]. При этом не учитывается концентрационной зависимости коэффициента теплопроводности. Не совсем понятен в работе [3] и процесс усреднения коэффициентов по температурному интервалу.

Предлагаемая в данной работе методика численной оптимизации термоэлементов позволяет найти и оптимальную величину концентрации носителей в ветви термоэлемента, работающего в заданных температурном интервале и режиме. Очевидно, что при этом расчете необходим выбор определенной зонной структуры полупроводника и статистики. Продемонстрируем на модели однодолинного невырожденного примесного полупроводника со сферической поверхностью Ферми. Рассмотрим классическую статистику носителей заряда. В случае рассеяния на акустических фонах кинетические коэффициенты имеют вид [4]: дифференциальная термоэдс

$$\alpha = \frac{k}{e} \left(2 + \ln \frac{2(2\pi mkT)^{3/2}}{nh^3} \right), \quad (3)$$

электропроводность

$$\sigma = enu, \quad (4)$$

теплопроводность

$$\chi = \chi_{ph} + 2 \left(\frac{k}{e} \right)^2 T \sigma, \quad (5)$$

где $\chi_{ph} = a/\sqrt{T}$ — решеточная составляющая теплопроводности, $u = b \cdot T^{-3/2}$ — подвижность носителей заряда.

Коэффициенты a и b в формулах для подвижности носителей заряда и решеточной теплопроводности были выбраны так, чтобы температурные зависимости были близки экспериментальным данным по соединению $n-(\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{Te}_3$. Эффективная масса была принята равной $0.7 \cdot m_0$. Расчет Z , проведенный при температуре 300 К, дал величину $3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Определенные согласно классической методике величины максимального перепада температуры и оптимальной концентрации носителей составляют 75.8 К и $n_0 = 7.5 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$ соответственно.

Наряду с этим расчетом решена граничная задача для ветви термоэлемента, аналогичная приведенной в работе [5]. В данном подходе можно оптимизировать по концентрации каждую ветвь отдельно, так как тепловое воздействие второй ветви учитывается в виде

нагрузки q_0 . Для активно работающей ветви тепловая нагрузка $q_0 > 0$, а для пассивно работающей $q_0 < 0$ [6]. Температурное поле одномерной адиабатически изолированной однородной ветви термоэлемента в установившемся режиме с учетом эффекта Томсона описывается стационарным уравнением теплопроводности

$$\frac{d}{dx} \left(\chi \cdot \frac{dT}{dx} \right) + \frac{Y^2}{\sigma} - YT \frac{d\alpha}{dT} \frac{dT}{dx} = 0 \quad (6)$$

с граничными условиями

$$\chi \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = \alpha Y T \Big|_{x=0} - q_0, \quad T \Big|_{x=1} = T_1, \quad (7)$$

где $q_0 = Q_0 \cdot l/S$ — удельная тепловая нагрузка ветви, $Y = J \cdot l/S$ — удельный ток ветви.

Решение граничной задачи осуществлялось численными методами с одновременной оптимизацией решения по удельному току и концентрации носителей. Расчет проводился как в режиме максимального перепада температуры, так и максимальной холодопроизводительности в широком интервале температур 100–300 К. Результаты этих вычислений представлены на рисунках. Рис. 1 дает представление о рассчитанных температурных полях в ветви термоэлемента, работающего в режиме максимального перепада температур (кривая 5), и максимальной холодопроизводительности (кривые 1–4) при температуре горячего конца ветви $T = 300$ К. На рис. 2 приведены зависимости оптимальной концентрации носителей от температуры горячего конца ветви в широком температурном интервале для режима максимального перепада температур (кривая 5) и максимальной холодопроизводительности (кривые 1–4). Из рис. 2 видно, что каждому режиму при определенной величине перепада соответствует определенное значение оптимальной концентрации носителей. Согласно решению граничной оптимизационной задачи, при нулевом перепаде температур оптимальной является концентрация $16.1 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$, которая более чем в два раза выше n_0 . Так как перепад температур при этом равен нулю, то усреднение по температурному интервалу при этом не требуется и оптимальной концентрацией должна быть $n_0 = 7.5 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Объяснить этот результат можно тем, что в центральной части ветвь перегрета (кривая 1 на рис. 1), поэтому оптимальной концентрацией носителей является большая величина, поскольку большая часть ветви работает при температурах выше 300 К. Рассчитанная удельная холодопроизводительность для нулевого перепада температур при концентрации $n_0 = 7.5 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ оказывается меньше, чем при оптимальной концентрации носителей заряда $16.1 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ на 12.5%. Следовательно, что для ветви, работающей в активном режиме, оптимальная концентрация, определенная „методом средних параметров“, будет определена с той или иной долей систематической ошибки.

Отсюда следует, что существующий метод расчета термоэлектрических охлаждающих устройств не всегда

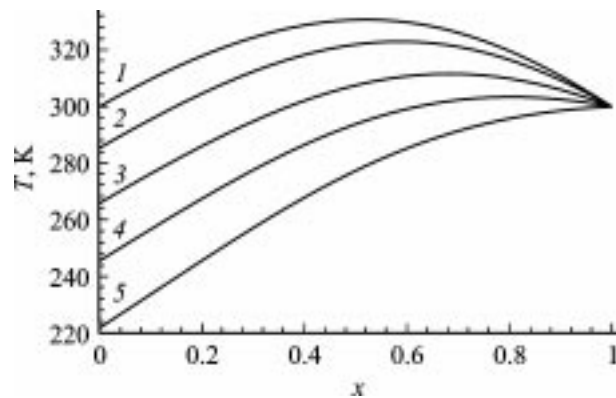


Рис. 1. Распределение температуры вдоль ветви термоэлемента в разных режимах работы для перепадов температуры: $\Delta T = 0$ (1), 15 (2), 35 (3), 55 К (4), ΔT_{\max} (5).

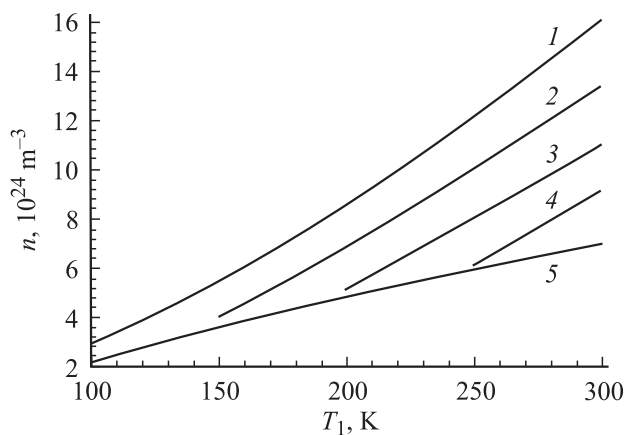


Рис. 2. Графики зависимости оптимальной концентрации носителей заряда от температуры горячего конца ветви для перепадов температуры. 1–5 — то же, что и на рис. 1.

позволяет определить величину оптимальной концентрации носителей заряда в ветвях охлаждающего термоэлемента. Усреднение кинетических коэффициентов при использовании „метода средних параметров“ следует проводить не по рабочему температурному интервалу, а по профилю распределения температуры вдоль ветви термоэлемента.

Список литературы

- [1] Иоффе А.Ф. Полупроводниковые термоэлементы. М.:Л., 1960. 188 с.
- [2] Бурштейн А.И. Физические основы расчета полупроводниковых термоэлектрических устройств. М.: 1962. 135 с.
- [3] Жукова Н.М., Кашин А.П., Максимов М.З., Марченко О.В. // ФТП. 1989. Т. 23. Вып. 10. С. 1908–1910.
- [4] Аскеров Б.М. Кинетические коэффициенты в полупроводниках. Л., 1970. 303 с.
- [5] Марков О.И. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 2. С. 138–140.
- [6] Марков О.И. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 13. С. 7–11.