

$$q_i = \sum_{k=1}^3 \pi_{ik} j_k - \sum_{k=1}^3 \kappa_{ik} \frac{\partial T}{\partial x_k}$$

где j_i , q_i , $\partial T / \partial x_k$, E_k — компоненты векторов плотности тока, плотности потока тепла, град. темп-ры и обобщённого электрич. поля ($E' = E + \nabla \mu / e$, где μ — хим. потенциал для носителей заряда); σ_{ik} , α_{ik} , π_{ik} , κ_{ik} — компоненты тензоров электропроводности, термоэдс, Пельтье, теплопроводности. При $j=0$ и $\nabla T=0$ имеет место эффект Зеебека $E'_i = \sum \alpha_{ik} \partial T / \partial x_k$. При $\nabla T=0$, $q_i = \sum \pi_{ik} j_k$ — эффект Пельтье.

Большинство полупроводников в отсутствие магн. поля термоэлектрически изотропны, т. е. тензоры σ_{ik} и др. — скалярные величины. Для них эффекты Пельтье и Зеебека можно наблюдать только в электрич. цепях, составленных из разнородных материалов.

В термоэлектрических анизотропных материалах (напр., Bi, ZnS) можно наблюдать поперечные эффекты Зеебека и Пельтье, если направления приложенного градиента темп-ры или тока j не совпадают с гл. осями тензоров α_{ik} , π_{ik} . В прямоугольной пластинке размерами l_x , l_y , l_z возникают разность потенциалов между боковыми гранями $U_y = \alpha_{yx} \Delta T_x l_y / l_x$ или поперечный перепад темп-ры $\Delta T_y = \pi_{yx} I_x / \kappa_{yy} l_z$. Изменения тензоров α_{ik} и π_{ik} в магн. поле приводят к продольным и поперечным термогальваномагнитным явлениям.

Т. я. лежат в основе разл. техн. устройств. Термоэлементы применяются для непосредств. превращения тепловой энергии в электрическую, а также для «перекачки тепла и холода». Согласно теории Иоффе, эффективность термогенерирующего и охлаждающего термоэлементов определяется параметром

$$Z = \left[\frac{|\alpha_p| + |\alpha_n|}{(\kappa_n / \sigma_n)^{1/2} + (\kappa_p / \sigma_p)^{1/2}} \right]^2$$

где индексы n и p относятся соответственно к ветвям с электронной и дырочной проводимостью. Если $\kappa_n \approx \kappa_p$ и $\sigma_n = \sigma_p$, то $Z = \alpha^2 / \chi$. Для диэлектриков и для металлов Z мало, а достигает макс. значения в легиров. полупроводниках с концентрацией носителей $n \sim 10^{19} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Лит.: Ансельм А. И., Введение в теорию полупроводников, 2 изд., М., 1978; Зеегер К., Физика полупроводников, пер. с англ., М., 1977; Аскеров Б. И., Электронные явления переноса в полупроводниках, М., 1985. З. М. Дашевский.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР — устройство для непосредств. преобразования тепловой энергии в электрическую на основе *Зеебека эффекта*. В состав Т. г. входят термобатареи, набранные из полупроводниковых термоэлементов, соединённых последовательно или параллельно. Идея использования полупроводниковых термоэлементов вместо металлич. термопар принадлежит А. Ф. Иоффе (СССР).

Различают Т. г. низко-, средне- и высокотемпературные (диапазоны темп-р 20—300, 300—600, 600—1000 °С соответственно); в качестве материалов термоэлементов применяются твёрдые растворы на основе халькогенидов элементов V группы, IV группы периодич. системы элементов и твёрдые растворы Si—Ge (см. *Полупроводниковые материалы*). По типу используемого источника тепла Т. г. делятся на изотопные (наиб. распространены), солнечные, на органическом и жидком топливе и др. (см. также *Солнечная батарея*). Условия работы Т. г. при повыш. темп-рах требуют применения противокоррозийной и антисублимац. защиты термоэлементов, введения прослоек, снижающих хим. взаимодействие полупроводниковых материалов с коммутац. переключками и согласующих их по термич. расширению. Наличие шунтирующих тепловой поток покрытий, создающих дополнит. термич. сопротивление, приводит к снижению кпд преобразования энергии, к-рый для лучших Т. г. достигает 15%. Мощность разл. Т. г. от неск. мкВт до неск. сотен кВт.

Осн. преимущество Т. г. (по сравнению, напр., с турбогенератором) — отсутствие движущихся частей, высокая надёжность, большой срок службы (до 25 лет), способ-

ность работать в широком диапазоне темп-р, автономность. Т. г. применяют в качестве осн. и вспомогат. источников электропитания удалённых и труднодоступных потребителей электрич. энергии (автоматич. маяков, навигац. буёв, метеорологич. станций, активных ретрансляторов космич. аппаратов, станций антикоррозионной защиты газопроводов и т. д.).

Н. В. Коломоец.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОХЛАЖДАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО — устройство для переноса тепловой энергии от теплоотдачика с низкой темп-рой к теплоприёмнику с высокой темп-рой, действие к-рого основано на *Пельтье эффекте* (см. также *Термоэлектрические явления*). Осн. функциональный узел Т. о. у. — термоэлектрич. батарея, набранная из термоэлементов, электрически соединённых между собой. При прохождении электрич. тока (от внеш. источника) через термоэлемент возникает разность темп-р горячего и холодного спаев термоэлемента; при этом на холодном спае тепло из охлаждаемого вещества поглощается и передаётся горячему спаю и далее в окружающую среду. Одноврем. в цепи термоэлемента выделяется тепло, к-рое передаётся холодному спаю путём теплопроводности.

Т. о. у. характеризуются эффективностью охлаждения $Z = \alpha^2 / \sigma \lambda$, где α — термоэлектрич. коэф., σ и λ — уд. электро- и теплопроводности соответственно. Параметр Z — функция темп-ры и концентрации носителей заряда, причём для каждой заданной темп-ры существует оптим. значение концентрации, при к-рой величина Z максимальна. Макс. снижение темп-ры связано с величиной эффективности выражением $\Delta T_{\text{макс}} = (1/2) Z T^2$, где T_x — темп-ра холодного спаея термоэлемента. Совр. Т. о. у. обеспечивают снижение темп-ры от +20 до -200 °С; их холодопроизводительность, как правило, не более 100 Вт.

При изготовлении Т. о. у. обычно используют *полупроводниковые материалы*, преим. халькогениды висмута и сурьмы. Такие соединения являются узкозонными полупроводниками с высокой подвижностью носителей заряда, для к-рых характерно к тому же увеличение *термоэдс* в умеренных магн. полях (до 1 Тл). Противокоррозионная и антисублимац. защита термоэлементов в Т. о. у. осуществляется путём заливки термобатарей оксидными компаундами.

Т. о. у. отличаются простотой управления, возможностью тонкого регулирования темп-ры, беспшумностью, высокой надёжностью работы; имеют практически безграничный срок службы. Осн. недостаток Т. о. у. — малая эффективность (до 10^{-2} K^{-1}). Т. о. у. применяются для охлаждения и термостатирования термочувствит. элементов радиозлектронной и оптич. аппаратуры, а также в бытовых и транспортных холодильниках, термостабах, медико-биол. приборах (напр., криозондах) и т. д.

Н. В. Коломоец.

ТЕРМОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ — испускание электронов нагретыми телами (эмиттерами) в вакуум или др. среду. Выйти из тела могут только те электроны, энергия к-рых больше энергии покоящегося вне эмиттера электрона (см. *Работа выхода*). Число таких электронов (обычно это электроны с энергиями ≥ 1 эВ относительно фермиуровня в эмиттере) в условиях термодинамич. равновесия в соответствии с Ферми — Дирака распределением ничтожно мало при темп-рах $T \approx 300 \text{ K}$ и экспоненциально растёт с T . Поэтому ток Т. э. заметен только для нагретых тел. Вылет электронов приводит к охлаждению эмиттера. При отсутствии «отсасывающего» электрич. поля (или при малой его величине) вылетевшие электроны образуют вблизи поверхности эмиттера отрицательный пространств. заряд, ограничивающий ток Т. э.

Основные соотношения. При малых напряжениях V между эмиттером и анодом плотность тока моноэнергетич. электронов описывается известной ф-лой (закон трёх вторых) $j \sim V^{3/2}$ (см. *Ленгмюра формула*); учёт разброса скоростей электронов, преодолевающих созданный пространств. зарядом потенци. барьер, значительно усложняет ф-лу, но характер зависимости $j(V)$ не изменяется; при увеличении V пространств. заряд рассасывается и ток достигает насыщения j_0 , а при дальнейшем росте V ток слабо растёт