



第十一章

半导体的热电性质



前言

所谓热电效应，即指把热能转换为电能的过程。

半导体具有比金属大得多的温差电动势，也就是说，在热能与电能的转换过程中，半导体具有较高的转换效率。

半导体的热电性质已在温差发电、半导体制冷等方面得到了广泛的应用。



前言

半导体的热电效应与金属材料的热电效应一样，主要有：

塞贝克效应（德国物理学家，1821年发现）

铂耳贴效应（法国物理学家，1834年发现）

汤姆孙效应（英国物理学家，1852年发现）



第十一章

11.1 热电效应

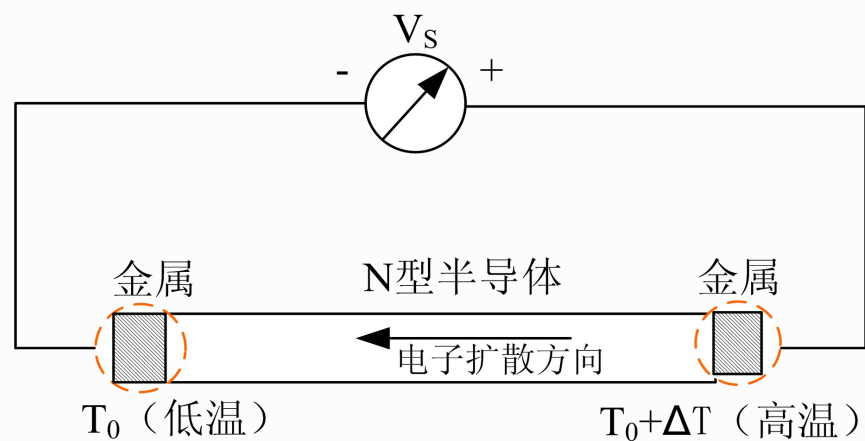
11.2 半导体的热导率



11.1 热电效应

一、塞贝克效应

在如图所示的结构中，n 型半导体的两端与同一种金属接触，并保持有温度差 ΔT ，此时回路中便有电流产生，该电流称为**温差电流**，产生该电流的电动势称为**温差电动势**。这种由于两端存在温度差而产生电动势的现象称为**塞贝克效应**。



一、塞贝克效应

对于 n 型半导体材料来说，电子浓度 n_0 由掺杂控制，并随温度的上升按指数规律增大。即

$$n_0 = 2 \frac{(2\pi m_n^* k_o T)^{3/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{k_o T}\right)$$

因此，半导体高温端的电子浓度大于低温端的电子浓度，在半导体材料内产生了电子浓度梯度。所以，电子就由高温端（即高电子浓度端）向低温端（即低电子浓度端）扩散，并在低温端积累有净的负电荷，高温端则由于电子离开而积累有净的正电荷，在半导体中产生电场，电场方向沿电子浓度梯度的反方向，即由高温端指向低温端。这个电场的存在必将引起电子沿着与扩散方向相反的方向作漂移运动。当漂移和扩散达到动态平衡时，即在半导体两端产生一稳定的电动势 V_s ，即**温差电动势**，其方向**高温端为正，低温端为负**。



一、塞贝克效应

半导体中塞贝克效应的温差电动势（以n型半导体为例）为：

$$V_s = \alpha \Delta T$$

其温差电动势率（即塞贝克系数）为：

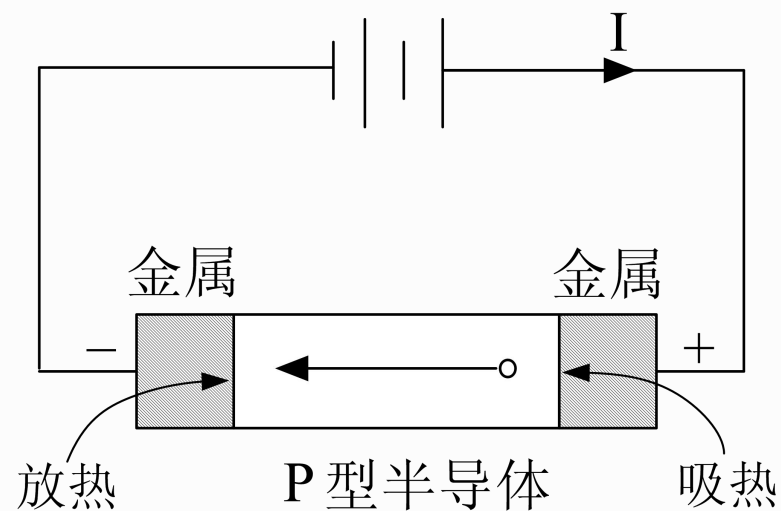
$$\alpha = -\left(\frac{E_c - E_F}{qT} + \frac{3}{2} \frac{k_0}{q}\right)$$

对于 P 型半导体材料可作类似的讨论，P型半导体材料的温差电动势的方向与n型半导体相反。根据这一点**可以用温差电动势的方向来判断半导体材料的导电类型**。由于半导体的塞贝克系数比金属的大得多，所以，**可用来制作温差发电装置（热能转化为电能）**。



二、珀耳贴效应

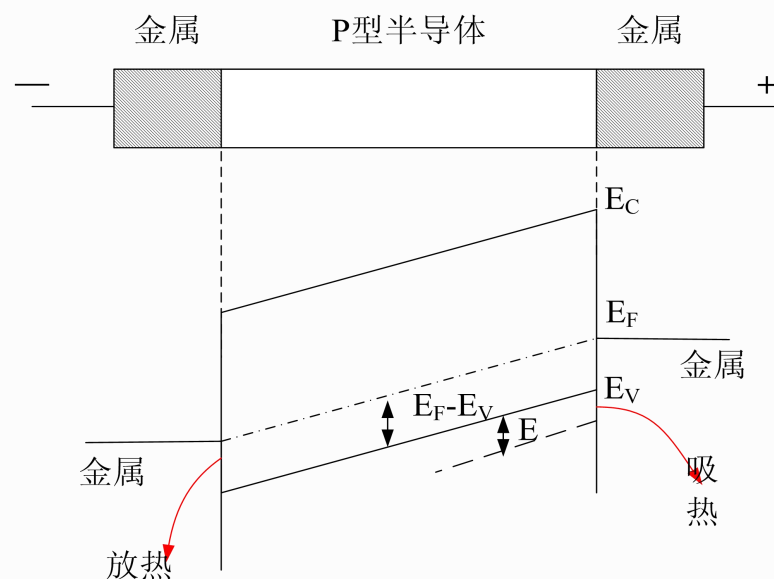
在如图所示的结构中，当半导体的两端与同一种金属接触，并在半导体两端施加一电压，使回路中有电流流过时，在半导体与金属的接触面处有吸热或放热产生，这一现象称为半导体的**珀耳贴效应**。半导体的珀耳贴效应是**可逆**的。



二、珀耳贴效应

以P型半导体和金属相接触为例来说明珀耳贴效应：金属与半导体的接触为欧姆接触，平衡时金属和半导体有统一的费米能级。当电流由金属流向半导体时，在金属中，空穴处于 E_F 附近，而半导体中 E_F 的位置比价带顶 E_V 高出 $E_F - E_V$ ，即半导体中价带顶的空穴能级比金属中的空穴能级高。所以，金属中的空穴至少要吸收 $E_F - E_V$ 的能量才能通过接触面进入半导体（实际过程是价带电子流向金属）。

进入半导体中的空穴，要在半导体中运动还需吸收能量 E ，因此，空穴要通过金属和半导体的接触面，必须吸收 $E_F - E_V + E$ 的能量。同理，空穴从半导体流向金属时，空穴必须放出 $E_F - E_V + E$ 的能量。



二、珀耳贴效应

若在回路中通过的电流为 I ，则单位时间内吸收或放出的热量为：

$$\frac{dQ}{dt} = I\pi$$

式中 π 称为珀耳贴系数，金属与半导体接触的珀耳贴系数

$$\pi = \pm \frac{k_0 T}{q} \left[\left(\frac{5}{2} + r \right) - \ln \frac{P}{N_v} \right] \quad (r \text{ 为泊松比})$$

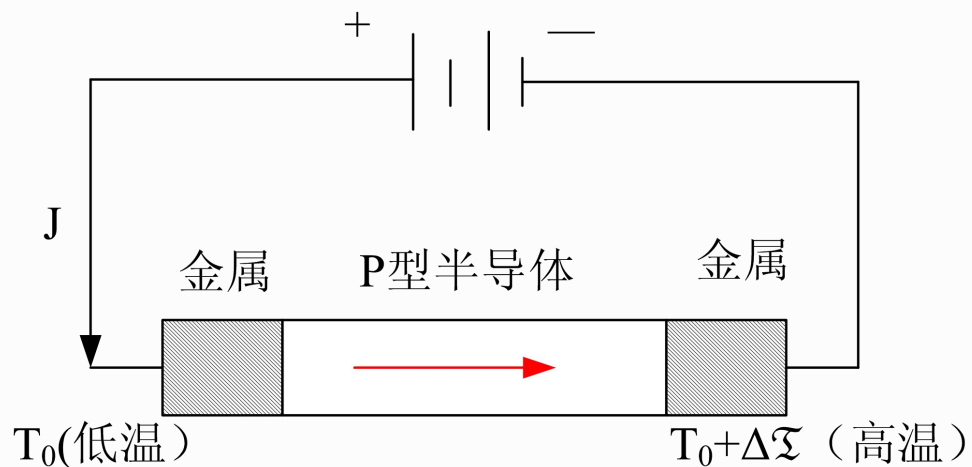
若电流由金属流向半导体（P型）为吸热过程，上式取“+”号；若电流由半导体（P型）流向金属为放热过程，上式取“-”号。

实际中，已利用珀耳贴效应的原理制造出了**半导体制冷器和半导体发热器件**。



三、汤姆孙效应

在如图所示的结构中，当半导体的两端与同一种金属接触，并保持温度差 ΔT （或温度梯度），这时回路中若有电流流过时，在半导体中除了产生焦耳热外，随着电流方向的不同，在半导体和金属的接触面处还要吸收或放出一定的热量，这一现象称为**汤姆孙效应**。吸收或放出的热量称为**汤姆孙热量**。汤姆孙效应也是可逆的。



三、汤姆孙效应

在单位时间、单位体积内吸收或放出的汤姆孙热量与电流密度和温度梯度有关，即：

$$\frac{dQ}{dt} = \sigma J_x \frac{dT}{dx}$$

式中 σ 是汤姆孙系数，单位为V/K。

以P型半导体和金属相接触为例来说明汤姆孙效应：金属与半导体的接触为欧姆接触，当电流从低温端流向高温端时，P型半导体中的空穴沿电势降落的方向从低温端运动到高温端，空穴的动能增加了 qV ；另一方面，空穴是沿着温度升高的方向运动的，即空穴从温度场中又获得了 $(k_0\Delta T 3/2)$ 的平均热能量。这两部分能量的代数和即为空穴自 T_0 端运动到 $T_0 + \Delta T$ 端时获得的净能量。即

$$\Delta E = qV + \frac{3}{2}k_0\Delta T$$



三、汤姆孙效应

实际中，对空穴从热场中获得的能量进行修正，得

$$\Delta E = qV + \left(\frac{5}{2} + \gamma \right) k_0 \Delta T$$

当净能量 ΔE 大于零时，对应于空穴从晶格中吸收这部分能量；当净能量 ΔE 小于零时，对应于空穴向晶格放出这部分能量。P型半导体材料的汤姆孙系数为：

$$\sigma_p^T = \frac{1}{q} \frac{dE_F}{dT} - \frac{E_F - E_V}{qT}$$

当电流沿正温度梯度方向流动时，空穴吸收能量， σ_p^T 为正；当电流沿负温度梯度方向流动时，空穴放出能量， σ_p^T 为负。n型半导体材料的汤姆孙系数为：

$$\sigma_n^T = \frac{1}{q} \frac{dE_F}{dT} + \frac{E_C - E_F}{qT}$$





半导体的热导率

概述

固体的热导率是晶格振动（声子）的贡献和导电载流子的贡献两部分组成。

优良的电导体一般也是好的热导体，如金属的热传导，主要是通过电子的运动，将能量由金属的高温部分带到低温部分。

绝缘体中没有自由载流子，因此，绝缘体的热传导主要依靠格波的传播，即声子的运动来传输热量。



概述

半导体材料的电学性质介于导体和绝缘体之间，因此，半导体的热导率由声子的运动和电子的运动两种机构决定。一般情况下，声子对热导率的贡献(K_p)所占的比例要比载流子的贡献(K_C)大得多。半导体材料的热导率可表示为：

$$K = K_p + K_C$$

式中各量的单位为：W/m.K



一、载流子对热导率的贡献

当半导体具有温度梯度，其中的载流子由高温端向低温端运动时，便将热能从高温端携带到低温端，形成热传导。

1、只有一种载流子存在

此时载流子的分布函数要随空间坐标变化，讨论载流子对热导率的贡献时，须求解玻耳兹曼方程。此处直接给出计算结果，即

$$K_C = \frac{8nl_n}{3} \frac{k_0^2 T}{\sqrt{2\pi m_n^* k_0 T}}$$



一、载流子对热导率的贡献

由于载流子带有电荷，在运输能量的同时也形成电流，因此，半导体的热导率与电导率之间一定存在某种联系。理论和实验证明：

$$\frac{K_C}{\sigma T} = L$$

式中 L 为常数，称为洛伦兹数。可以证明，对于长声学波散射机构，有：

$$\frac{K_C}{\sigma T} = 2 \frac{k_0^2}{q^2}$$

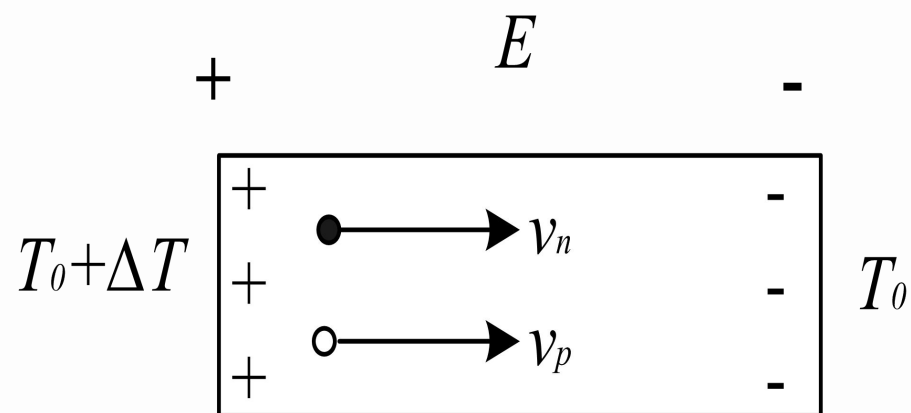
以上的结果是对只有一种载流子运动的非简并半导体而言的。



一、载流子对热导率的贡献

2、电子和空穴两种载流子同时存在

当电子和空穴两种载流子同时存在时，高温端的电子和空穴浓度均大于低温端，此时具有与温度梯度同方向的载流子浓度梯度，所以，电子和空穴由高温端向低温端扩散。



一、载流子对热导率的贡献

我们知道，半导体中电子和空穴的扩散速度各不相同，电子的扩散速度快，空穴的扩散速度慢，电子和空穴扩散运动的结果在半导体体内产生一电场，其方向沿温度梯度的反方向，该电场使空穴加速，电子减速，最终使得两者以相同的速度运动。这种扩散过程称为**双极扩散**。

在双极扩散过程中，电子和空穴不断复合，这样，电子和空穴在高温端吸收的热量，在低温端放出，转变为晶格的热振动能量，同时，电子和空穴相遇复合。通过双极扩散的机构，电子和空穴共同将能量从高温端运载到低温端。



二、声子对热导率的贡献

半导体中热传导绝大部分是声子（晶格振动）的贡献。

通过晶格振动将热量从高温处传输到低温处时，热能并不是沿直线由样品的一端传输到另一端，而是通过格波之间的散射交换能量，即通过声子的运动运载热能。因此，声子对热导率的贡献实质上就是格波之间的散射过程的贡献。

声子对热导率的贡献为：

$$K_p = \frac{1}{3} C_V v l_p$$

式中 v 为声子速度， C_V 为单位体积的定容热容量， l_p 为声子的平均自由程。





谢 谢



小论文题目

- 一、随着器件特征尺寸的不断缩小，CMOS器件和电路会出现什么问题？目前有哪些应对措施？
- 二、谈谈你对太阳能光伏技术和产业发展的认识。
- 三、以高电子迁移率晶体管（HEMT）为例分析说明异质结器件的优势。
- 四、简述非晶态半导体的应用和发展趋势。
- 五、什么是稀磁半导体？简述稀磁半导体的主要性质和应用。

