第十二章

半导体在磁场中的效应

第十二章

12.1 霍尔效应

12.2 磁阻效应

12.3 热磁效应

12.1 霍尔效应

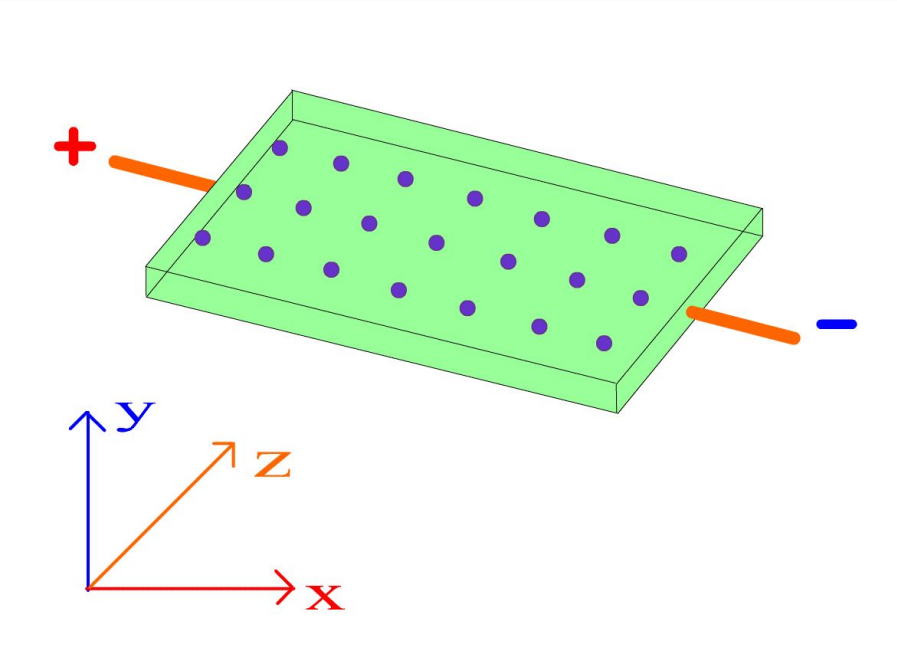
一、霍尔效应

样品受到x方向的电场E_x（在样品中存在电流J_x），z方向的磁场B_z，在y向上产生一个横向电场E_y，这一现象称为霍耳效应。

$$E_y = R_H J_x B_z$$

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z}$$

霍耳系数



二、只有一种载流子的霍尔效应

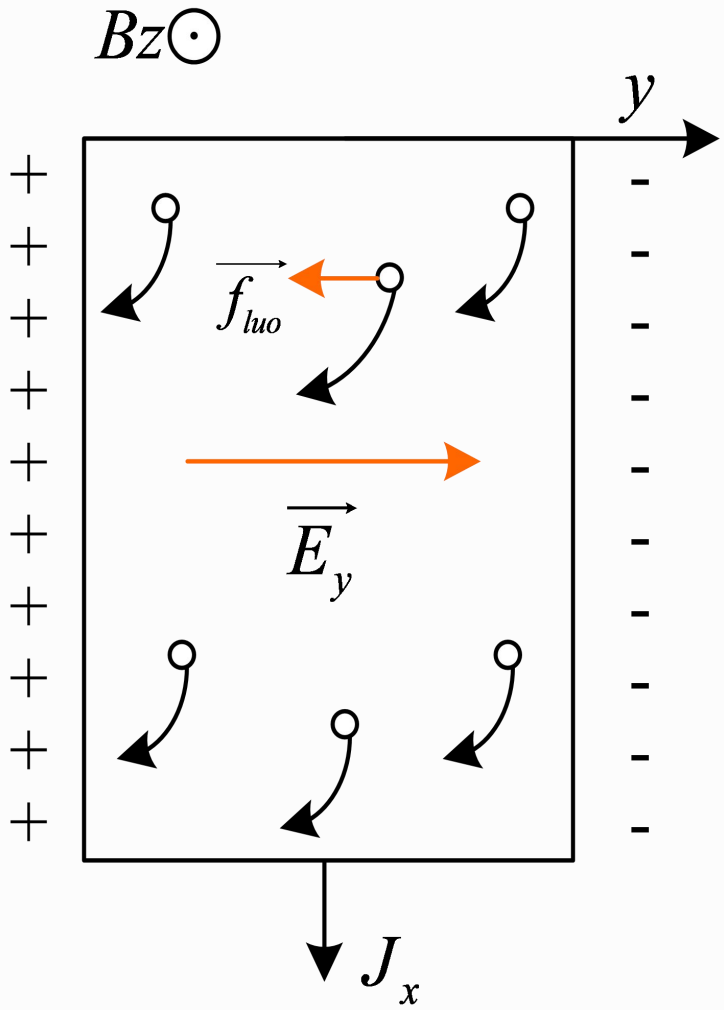
——假设只有一种载流子；

——温度均匀；

——忽略载流子的速度分布。

1、p型半导体(空穴)

空穴沿x方向运动时，受洛仑兹力的作用，向y方向偏移，积累在左边，形成霍耳电场E_y（沿y的正方向）



二、只有一种载流子的霍尔效应

空穴在 y 方向同时受到霍耳电场力和洛伦兹力的作用

$$\boxed{qE_y} \qquad \boxed{-qv_xB_z}$$

稳态时：
$$qE_y - qv_xB_z = 0$$

$$\boxed{J_x = qpv_x}$$

$$E_y = v_xB_z = \frac{J_x}{qp}B_z$$

$$\boxed{R_H = \frac{E_y}{J_xB_z}}$$

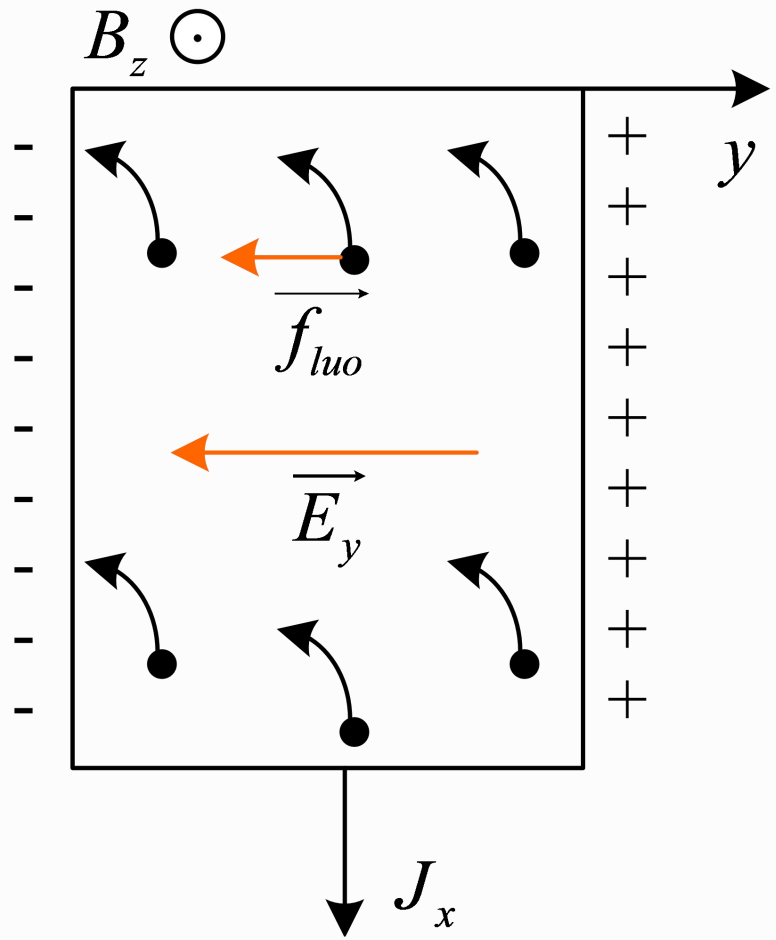
$$\boxed{R_H = \frac{1}{pq} > 0} \qquad [\,m^3/C\,]$$

二、只有一种载流子的霍尔效应

2、N型半导体（电子）

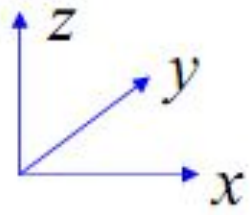
霍尔电场沿y的负方向

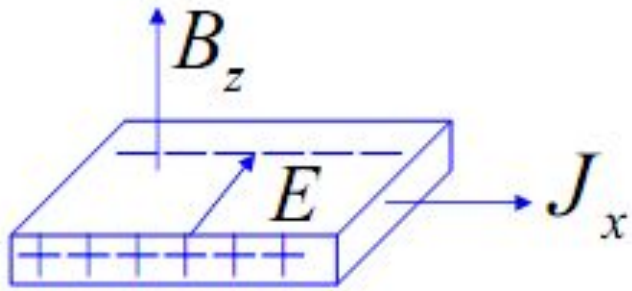
$$R_H = -\frac{1}{nq} < 0$$



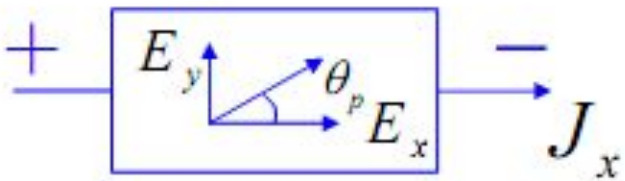
二、只有一种载流子的霍尔效应

霍耳角





p型

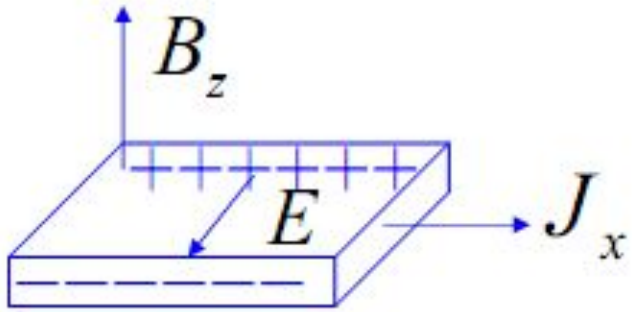


$$\tan\theta_p = \frac{E_y}{E_x} > 0$$

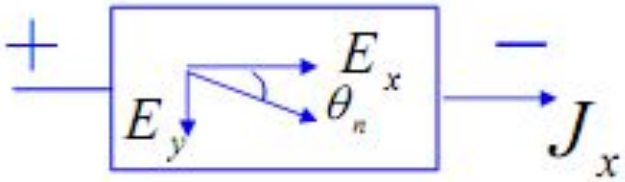
$$\tan\theta_p = \mu_p B_z$$

$$E_y = v_x B_z$$

$$v_x = \mu E_x$$



n型



$$\tan\theta_n = -\frac{E_y}{E_x} < 0$$

$$|\tan\theta_n| = \mu_n B_z$$

二、只有一种载流子的霍尔效应

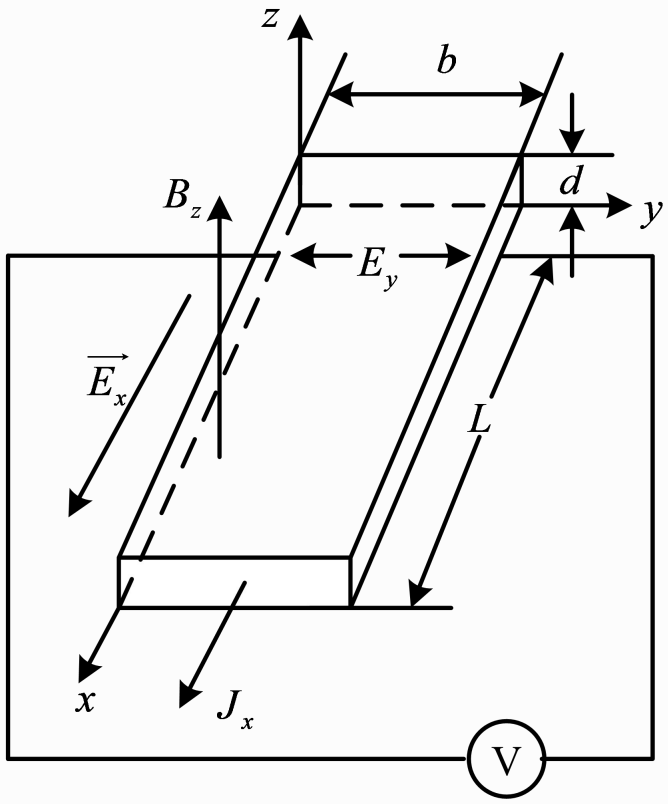
霍尔系数的测量

样品长为$l(x)$，宽为$b\ (y)$，厚为$d\ (z)$；

霍尔电场 $E_y = V_H / b$ $\quad J_x = I_x / bd$

$$E_y = R_H J_x B_z$$

$$V_H = R_H \frac{I_x B_z}{d}$$



根据其正负判断半导体的类型

三、有两种载流子的霍耳效应

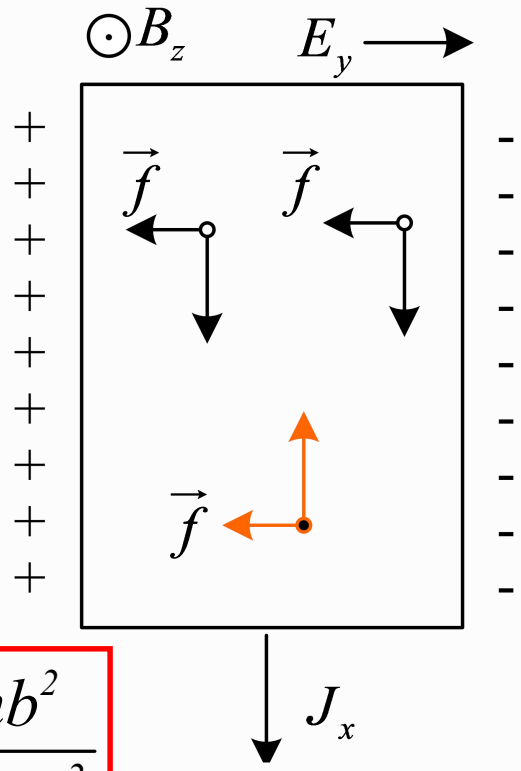
半导体中同时存在电子和空穴时 $J_x = q\left(n\mu_n + p\mu_p\right)E_x$

平衡时横向电流为零，包括空穴横向电流和电子横向电流：

$$J_y = \left(J_p\right)_y + \left(J_n\right)_y = 0$$

空穴：$\left(J_p\right)_y = pq\mu_p E_y - pq\mu_p^2 E_x B_z$

电子：$\left(J_n\right)_y = nq\mu_n E_y + nq\mu_n^2 E_x B_z$



$$R_H = \frac{1}{q}\cdot\frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{\left(p\mu_p + n\mu_n\right)^2}$$

$$b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$$

$$\boxed{R_H = \frac{1}{q}\cdot\frac{p - nb^2}{\left(p + nb\right)^2}}$$

霍耳系数随温度的变化

$$R_H = \frac{1}{q} \cdot \frac{p - nb^2}{(p + nb)^2} \qquad b = \frac{\mu_n}{\mu_p} > 1$$

1、n型半导体

常温 $R_H = -\frac{1}{nq} < 0$

随温度的升高 $R_H < 0$ $|R_H|$ 减小

当温度升高到本征温度时 $R_H = \frac{1}{qn_i} \cdot \frac{1 - b^2}{(1 + b)^2} < 0$ R_H 数值很小

霍耳系数始终小于零，但随温度升高，其数值减小。

三、有两种载流子的霍耳效应

$$R_H = \frac{1}{q} \cdot \frac{p - nb^2}{(p + nb)^2} \qquad b = \frac{\mu_n}{\mu_p} > 1$$

2、p型半导体

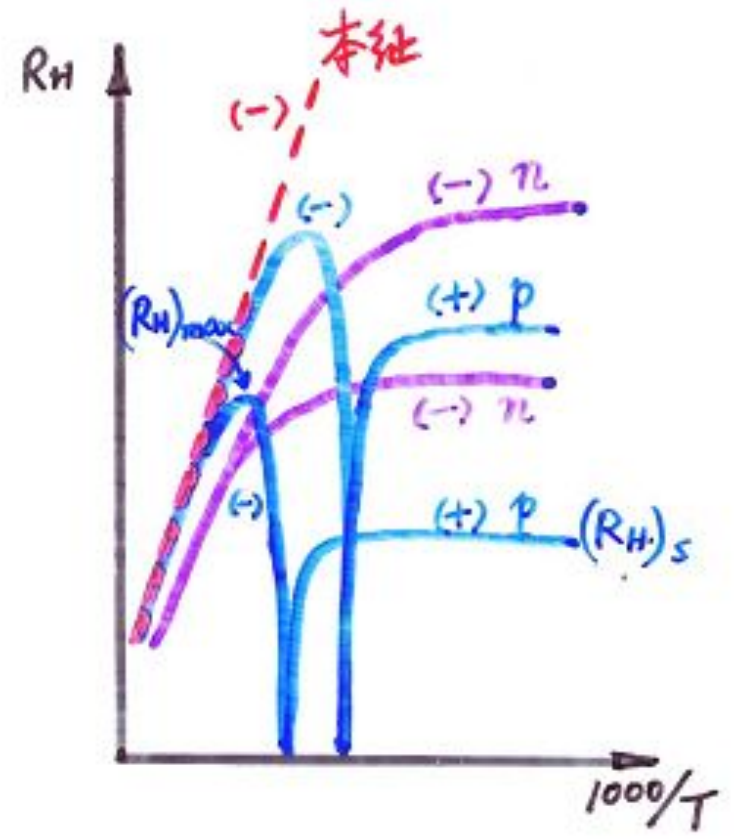
常温 $R_H = \dfrac{1}{pq} > 0$

温度升高到某一温度 T_R，使 $p = nb^2$ 时 $R_H = 0$

温度升高到本征温度 $R_H = \dfrac{1}{qn_i} \cdot \dfrac{1 - b^2}{(1 + b)^2} < 0$

当温度从杂质导电范围过渡到本征范围时，霍耳系数变号。

三、有两种载流子的霍耳效应



$$R_H = \frac{1}{q} \cdot \frac{p - nb^2}{(p + nb)^2} \qquad b = \frac{\mu_n}{\mu_p} > 1$$

3、本征半导体

$$R_H = \frac{1}{qn_i} \cdot \frac{1 - b^2}{(1 + b)^2} < 0$$

随着温度的升高， $|R_H|$ **减小**

速度分布的修正

若考虑速度分布，需将迁移率 μ 修正为霍耳迁移率 μ_H

霍耳角：$tan\theta = \mu_H B_z$

霍尔系数中代入 $r = \dfrac{\mu_H}{\mu}$

n-type：$\boxed{R_H = -\dfrac{r}{nq}}$ $\sigma_n = nq\mu$ $|R_H|\sigma_n = r\mu_n = (\mu_H)_n$

p-type：$\boxed{R_H = \dfrac{r}{pq}}$ $\sigma_p = pq\mu$ $|R_H|\sigma_p = r\mu_p = (\mu_H)_p$

12.2 磁阻效应

一、什么是磁阻效应

磁阻效应：

当在与电流垂直的方向加一磁场后，半导体沿外加电场方向的电流密度有所降低，或电阻有所增大。

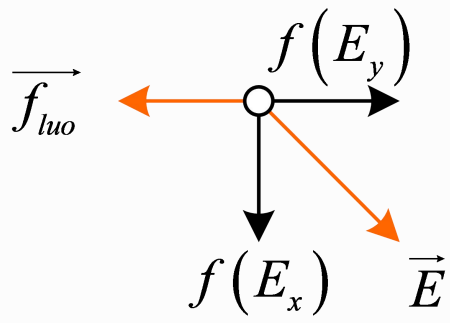
磁阻效应不但与所加的磁场有关（物理磁阻效应），还与材料的几何形状有关（几何磁阻效应）。

1、只考虑一种载流子

用电阻率的相对改变描述磁阻的大小，即 $\dfrac{\rho_B-\rho_0}{\rho_0}=\dfrac{\Delta\rho}{\rho_0}$

可以证明 $$\frac{\Delta\rho}{\rho_0}=\boxed{\xi}u_H^2B_z^2$$

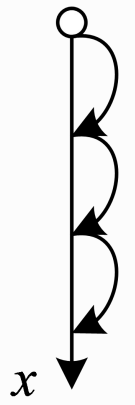
横向磁阻系数



■ 产生磁阻的原因：

①载流子散射几率增大

在电场力和洛仑兹力的作用下，空穴散射几率增大、迁移率下降，电导率降低。



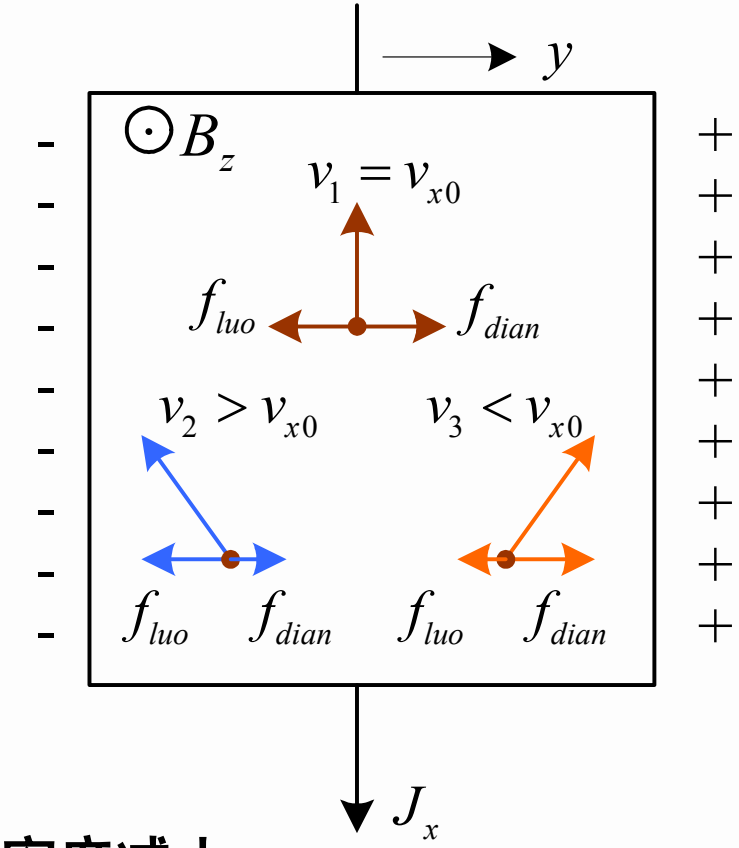
②半导体中载流子的速度分布

以电子为例：

$v_1 = v_{x0}$ $f_{dian} = f_{luo}$ 电子不偏转

$v_2 > v_{x0}$ $f_{luo} > f_{dian}$ 电子向左偏转；

$v_3 < v_{x0}$ $f_{luo} < f_{dian}$ 电子向右偏转；

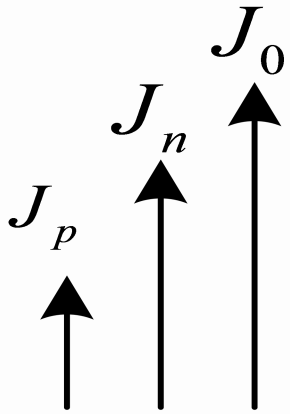


使沿电场方向运动的载流子数减少，电流密度减小。

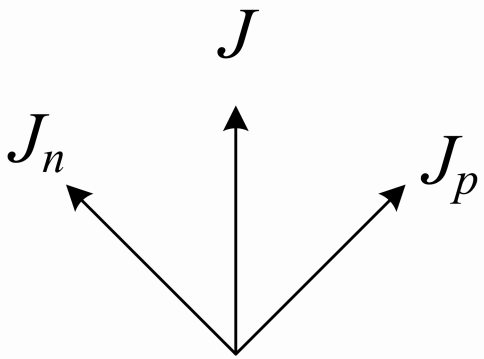
这是物理磁阻效应的主要原因。

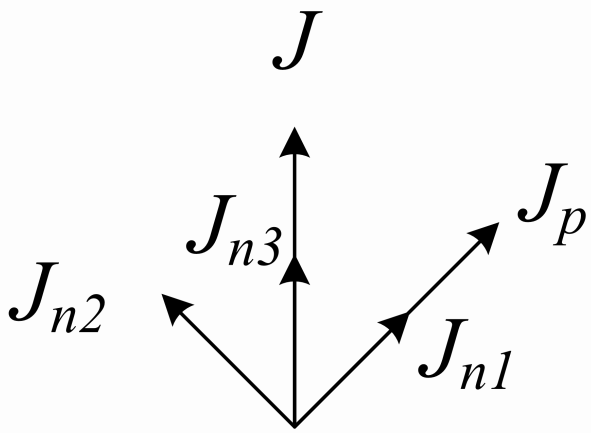
2、考虑两种载流子

➢无磁场作用时：



➢有磁场作用时：





沿x方向运动的载流子数总是减少的，x方向的电阻总是增大的。

三、几何磁阻效应

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = g\mu_H^2 B_z^2$$

↓

几何修正因子

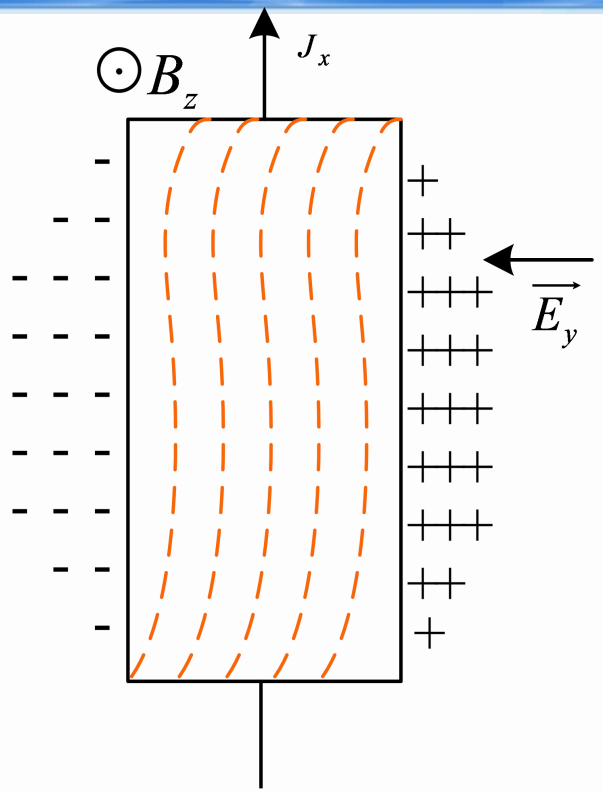
■产生几何磁阻的原因：

由于材料形状的影响，材料中的霍耳电场分布不均匀，导致某些区域载流子的运动轨迹发生弯曲，使电流流通的路径增长，样品电阻增大

三、几何磁阻效应

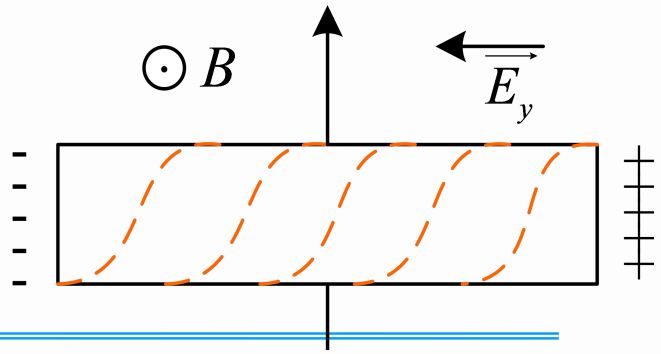
①长条形样品：

靠近电极处，载流子沿霍耳电场反方向偏转，电流流通路径增大，但不明显，**几何磁阻效应较弱**。



②扁条形样品：

载流子在样品内部一直沿霍耳电场反方向偏转，电流流通路径明显增长，**几何磁阻效应较强**。



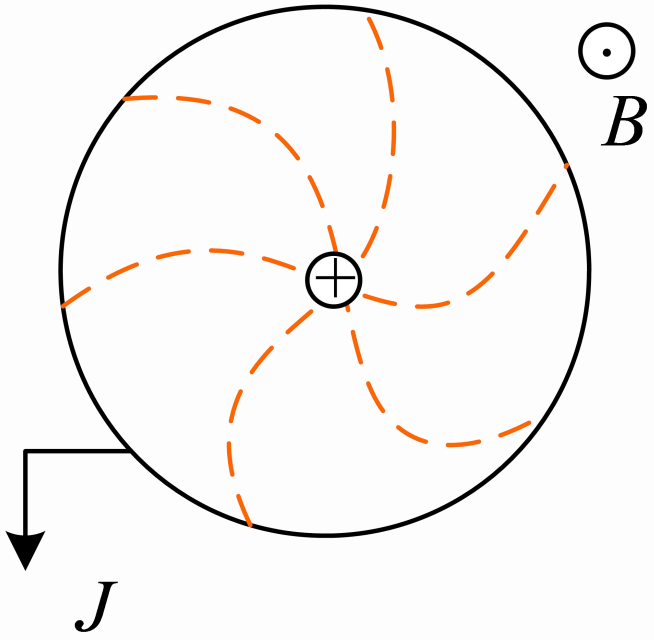
③圆盘形样品——科比诺圆盘

从圆盘中心施加辐射形外电场：从圆盘中心流出的电流在到达周围电极以前，总是沿螺旋路径流动，使电流流通路径大大增长。

有磁场时的电阻

$$\frac{R_B}{R_0}=\frac{\rho_B}{\rho_0}\left(1+\tan^2\theta\right)$$

无磁场时的电阻



12.3 热磁效应

一、爱廷豪森效应

- x方向的电流和z方向的磁场 → y方向的温度梯度

$$\frac{\partial T}{\partial y} = P J_x B_z$$

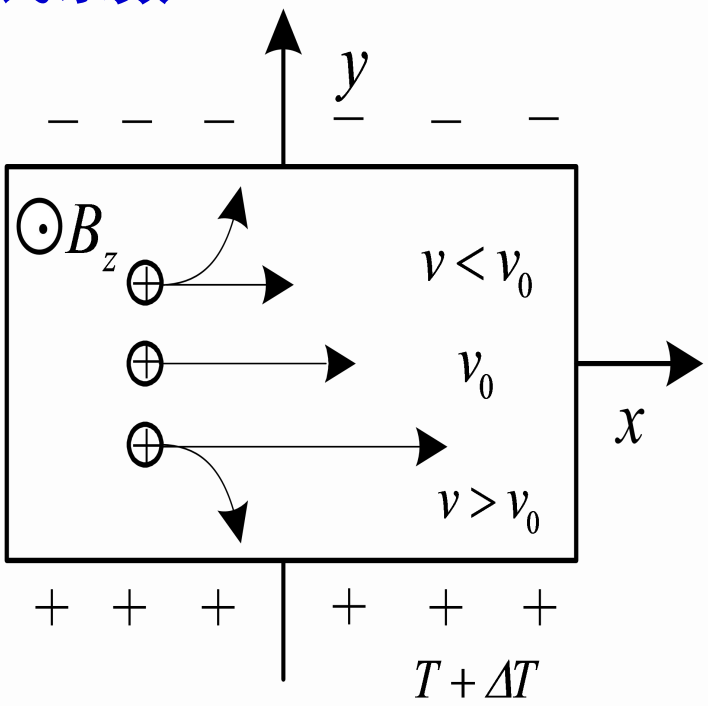
P → 爱氏系数

以p型材料为例：

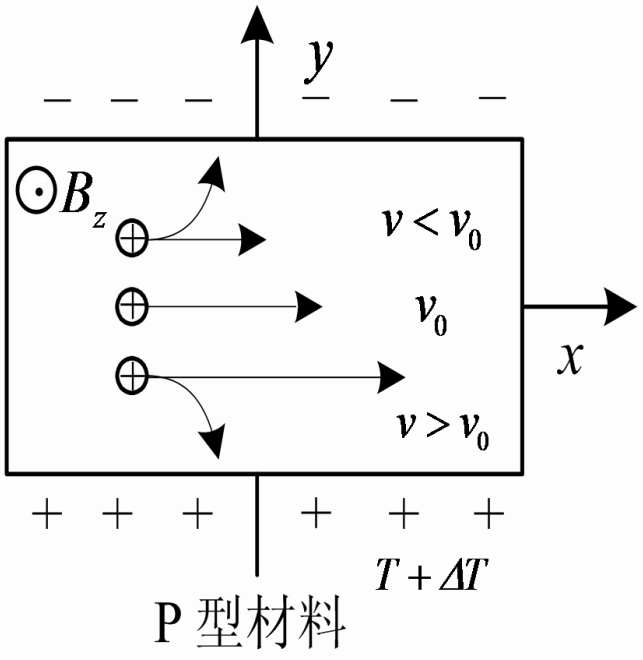
当$v = v_0$时，空穴不偏转；

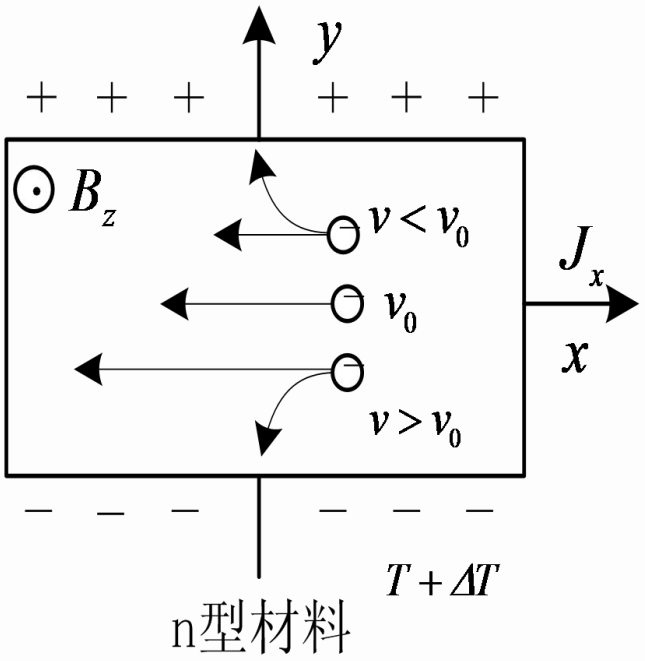
当$v < v_0$时，空穴向上偏转，与晶格碰撞吸收能量，晶格温度下降；

当$v > v_0$时，空穴向下偏转，与晶格碰撞放出能量，晶格温度升高。



一、爱廷豪森效应





p型材料：

温度梯度沿*y*的负方向，

霍耳电场与温度梯度方向相反。

n型材料：

温度梯度沿*y*的正方向，

霍耳电场与温度梯度方向相同。

能斯脱效应

x方向热流（或温度梯度），z方向磁场 → y方向的电动势

$$E_y = -\eta\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)B_z$$

η → 能斯脱系数

里纪-勒杜克效应

x方向热流，z方向磁场 → y方向的温度梯度

$$\frac{\partial T}{\partial y} = S\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)B_z$$

S → 里纪-勒杜克系数

霍尔效应 $E_y \sim J_x B_z$

磁阻效应 $\frac{\partial \rho}{\partial x} \sim J_x B_z$

爱廷豪森效应 $\frac{\partial T}{\partial y} \sim J_x B_z$

能斯脱效应 $E_y \sim \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) B_z$

里纪-勒杜克效应 $\frac{\partial T}{\partial y} \sim \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right) B_z$

谢　　谢