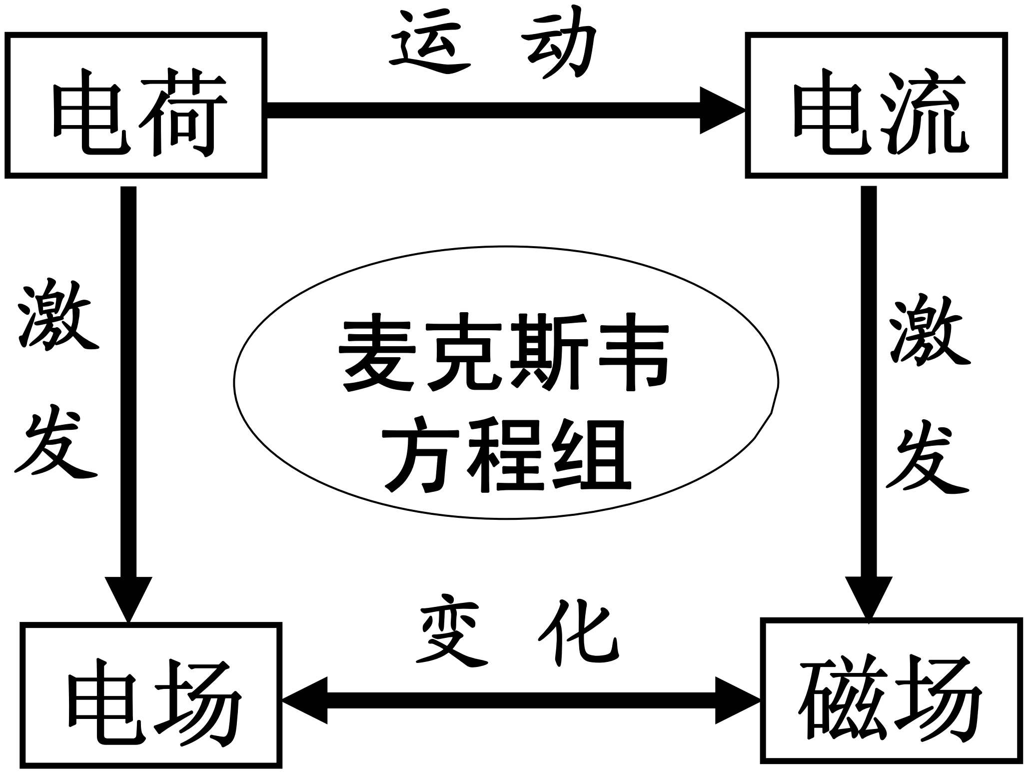
- 带电体在真空中产生的静电场
- 静电场中的导体
- 静电场中的电介质

- 稳恒电流



- 电磁感应
- 位移电流

- 稳恒电流在真空中产生的磁场
- 磁场对电流和运动电荷的磁场力
- 磁场中的磁介质

01:31:21

第三章　稳恒电流

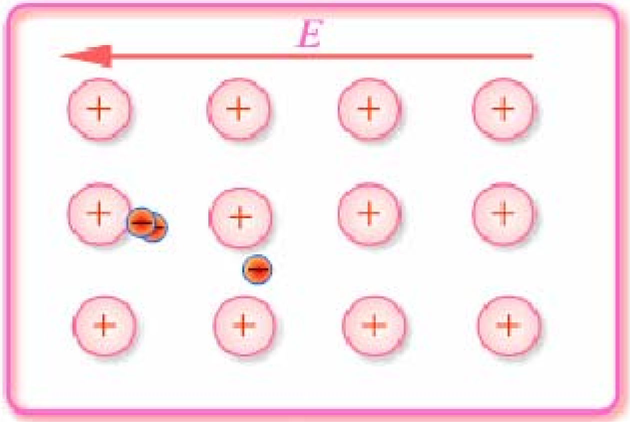
01:31:21

§1 电流密度

1.1 电流

•静电平衡

•电流←在导体内维持一个电场



➢形成电流的条件

•要有可以自由移动的电荷（载流子）

金属:电子；半导体:电子、空穴；电解质溶液:离子

•要有维持电荷作定向移动的电场，或电势差。

传导电流

运流电流:带电体的机械运动

判断题：　#T2301.

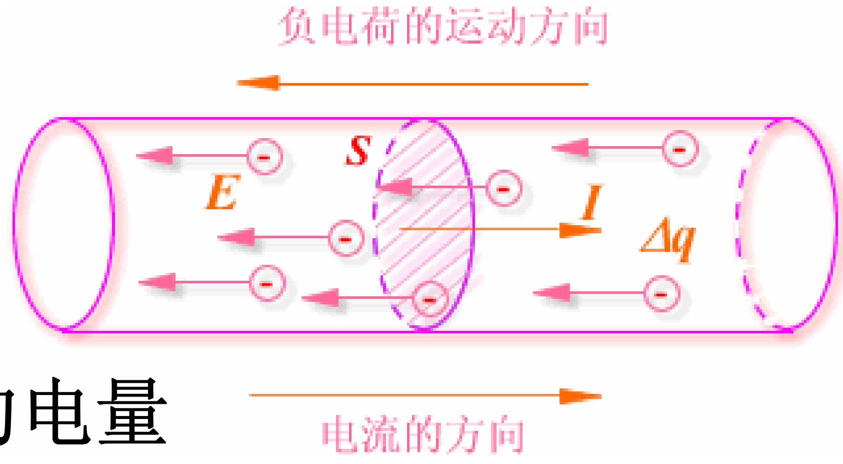
当金属导体中没有电场时，其中也没有电流；
当金属导体中没有电流时，其中不存在电场。

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

01:31:21

➢电流的方向

正电荷移动的方向



➢瞬时电流强度

单位时间内通过任一截面的电量

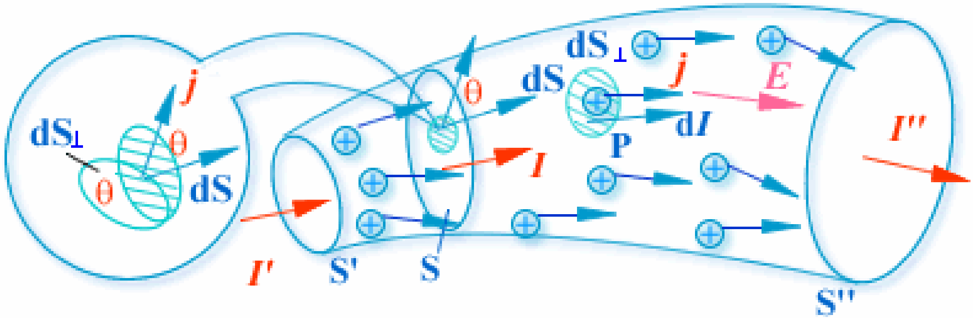
$$I = \frac{dq}{dt}$$

•标量

•国际单位制基本量　1安培=1库仑/秒

1.2 电流密度

$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}}$$

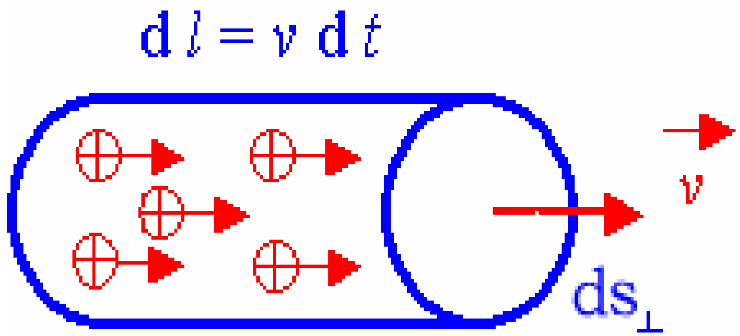


垂直于电流流向的单位面积上通过的电流强度

垂直于电流流向的单位面积上单位时间通过的电量

01:31:21

$\boldsymbol{v}$：漂移运动的平均速度



小柱体：$\mathbf{d}\boldsymbol{S}_\perp$、$\boldsymbol{v}\mathbf{d}\boldsymbol{t}$

设载流子数密度为$\boldsymbol{n}$

包含在小柱体中的载流子数 $\boldsymbol{n}\mathbf{d}\boldsymbol{S}_\perp\boldsymbol{v}\mathbf{d}\boldsymbol{t}$

即$\mathbf{d}\boldsymbol{t}$内通过截面$\mathbf{d}\boldsymbol{S}_\perp$的载流子数

设每个载流子携带电荷$+\boldsymbol{q}$

$\mathbf{d}\boldsymbol{t}$内通过截面$\mathbf{d}\boldsymbol{S}_\perp$的电量 $\boldsymbol{q}\boldsymbol{n}\mathbf{d}\boldsymbol{S}_\perp\boldsymbol{v}\mathbf{d}\boldsymbol{t}$

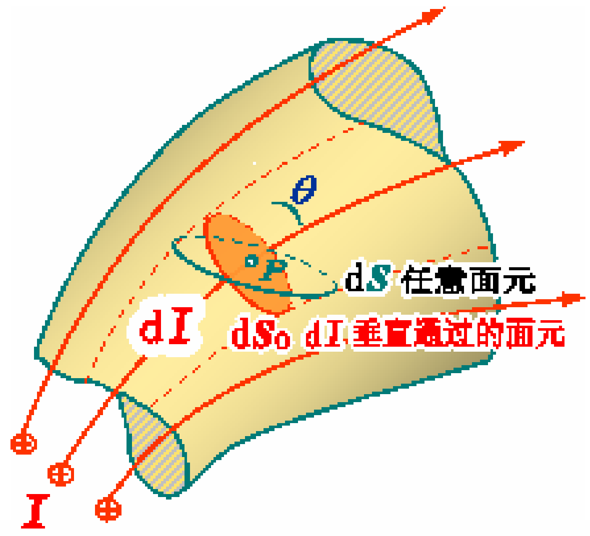
通过截面$\mathbf{d}\boldsymbol{S}_\perp$的电流 $\boldsymbol{dI}=\boldsymbol{qn}\mathbf{d}\boldsymbol{S}_\perp\boldsymbol{v}$

$$j = \frac{dI}{dS_\perp} = qnv$$ 写成矢量式 $\vec{j} = qn\vec{v}$

电流密度：矢量，方向是正电荷运动的方向。

➤电流线

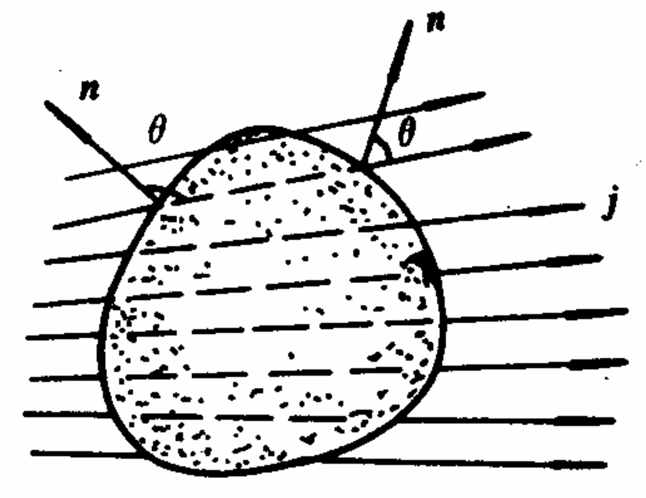
发出于正电荷减少的地方；
终止于正电荷增加的地方。



1.3 电流的连续性方程

$$j=\frac{dI}{dS_{\perp}}\Rightarrow dI=\vec{j}\bullet d\vec{S}$$

穿出闭合曲面的 $I=\oiint\limits_{S}\vec{j}\cdot d\vec{S}$



$$\oiint\limits_{S}\vec{j}\cdot d\vec{S}=-\frac{dQ_{内}}{dt}$$ 电流连续性方程

$$Idt=-dQ_{内}$$

$$\nabla\cdot\vec{j}=-\frac{\partial\rho_e}{\partial t}$$ 微分形式

01:31:21

§2 稳恒电流

2.1 稳恒电流

每一点的电流密度的大小和方向均不随时间改变。

➢稳恒条件

$$\oint_S \vec{j} \cdot d\vec{s} = 0 \quad 或 \quad \frac{dQ_{内}}{dt} = 0$$

反证：假设 $\oint_S \vec{j} \cdot d\vec{s} > 0$ $\quad \dfrac{dQ_{内}}{dt} < 0$

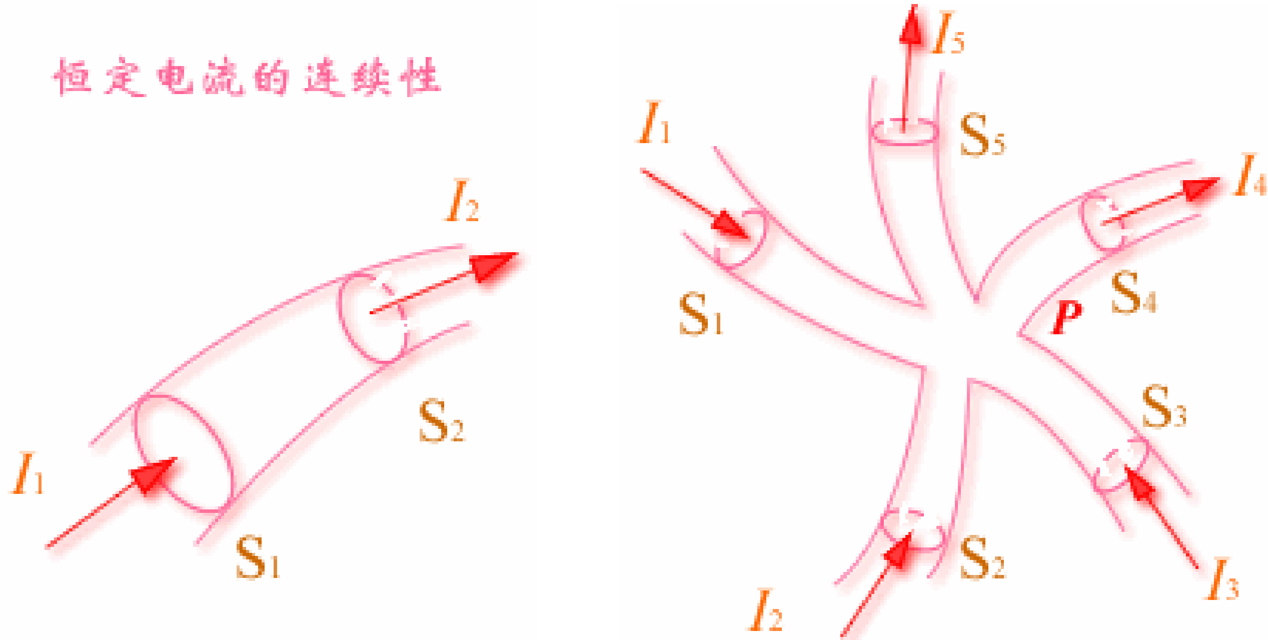
j 不变→面内电荷一直流出，违反电荷守恒定律。

•稳恒条件下，导体内各处电荷分布不随时间变化

•稳恒电流的电路必须闭合（否则形成电荷积累）

✶对稳恒电流，导体表面电流密度矢量没有法向分量(否则电荷积累在表面形成附加场)

✸无分支的稳恒电路各横截面的电流强度相等



(a) 无分支的电路　　(b) 有分支的电路

✹在稳恒电路中，任一节点处流入的电流强度之和等于流出节点的电流强度之和。

——节点电流定律 (基尔霍夫第一定律)

判断题： #T2302.

稳恒电路中各处的电流密度均相同.

01:31:21

2.2 稳恒电场

稳恒电场：稳恒电路中的电场

电荷运动，但电荷分布不随时间变化

→稳恒电场不随时间改变

类同于静止电荷产生的静电场

满足静电场的高斯定理、环路定理

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$ 保守场，可引入电势、电压

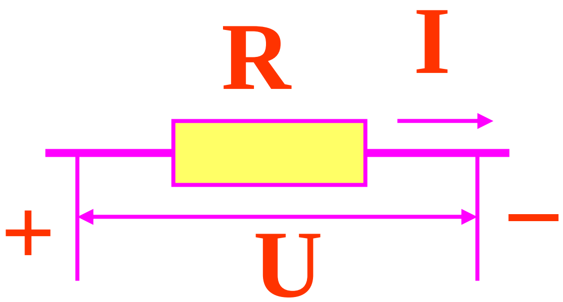
在稳恒电路中，沿任何闭合回路一周的电势降落的代数和等于零。

——回路电压定律 (基尔霍夫第二定律)

01:31:21

§3 欧姆定律的微分形式

3.1 欧姆定律



$$I=\frac{U}{R} \qquad I=GU$$

G——电导（S Siemens）

$R=1/G$——电阻（Ω 欧姆）

欧姆（Ohm，1787-1854）

德国物理学家，他从1825年开始研究导电学问题，他利用电流的磁效应来测定通过导线的电流，并采用验电器来测定电势差，在1827年发现了以他名字命名的欧姆定律。电流和电阻这两个术语也是由欧姆提出的。

01:31:21

3.2 电阻定律

对于粗细均匀的导体，当导体的材料与温度一定时

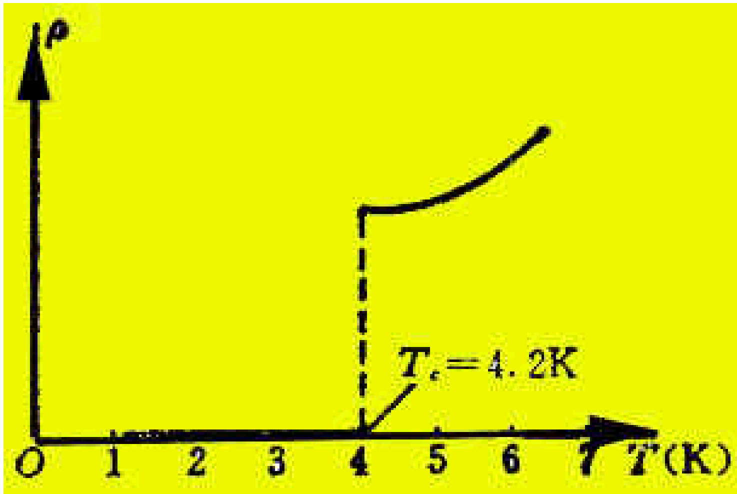
$$R=\rho\frac{l}{S}\qquad R=\frac{1}{\sigma}\frac{l}{S}$$

ρ： 电阻率

σ=1/ρ： 电导率

•经典电子论认为：自由电子与晶格碰撞，阻碍了电子定向的运动，在宏观上反映出来就是电阻。

•超导现象：荷兰物理学家昂尼斯1911年发现，1913年诺贝尔物理学奖。



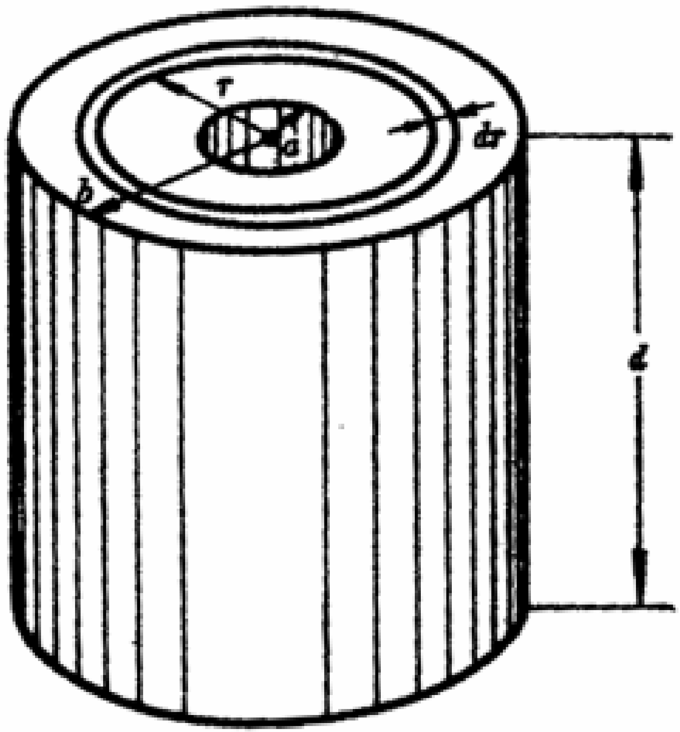
•若ρ、S变化

$$dR=\rho\frac{dl}{S}\qquad \boldsymbol{R=\int\rho\frac{dl}{S}}$$

例：有一内半径为*a*、外半径为*b*的金属圆柱筒，其长度为*d*，电阻率为ρ，若圆柱筒内缘的电势高于外缘的电势，且其电势差为*U*，

求：圆柱筒中沿径向的电流为多少？

解：取半径为*r*厚度为d*r*的圆柱面



圆柱面的电阻为

$$dR = \rho \frac{dl}{S} = \rho \frac{dr}{2\pi r d}$$

圆柱筒的径向总电阻为

$$R = \int_a^b \rho \frac{dr}{2\pi r d} = \frac{\rho}{2\pi d} \ln \frac{b}{a}$$

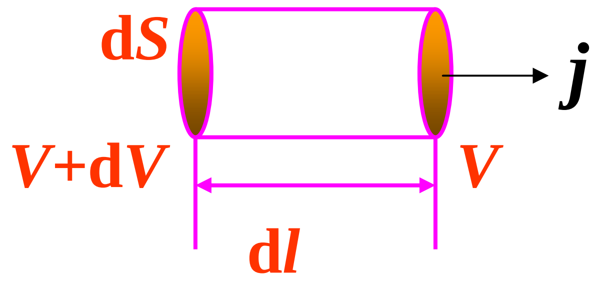
圆柱筒的径向电流为 $I = \frac{U}{R} = \frac{2\pi d U}{\rho} \ln \frac{a}{b}$

01:31:21

3.3 欧姆定律的微分形式

在导体中取一长为dl、横截面积为dS的小圆柱体

圆柱体的轴线与电流流向平行



通过截面dS的电流为

$$\left.\begin{aligned} dI &= \frac{dV}{dR} \\ dR &= \rho\frac{dl}{dS} \end{aligned}\right\} dI = \frac{1}{\rho}\frac{dV}{dl}dS \qquad \frac{dI}{dS} = \frac{1}{\rho}\frac{dV}{dl}$$

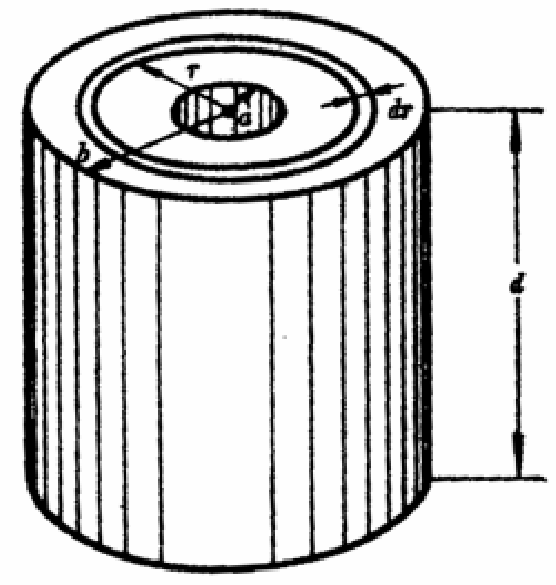
$$j = \frac{dI}{dS} \qquad \frac{dV}{dl} = E$$

$$\vec{j} = \frac{\vec{E}}{\rho} = \sigma\vec{E}$$ ——欧姆定律的微分形式

01:31:21

例：用欧姆定律的微分形式来解上例

解：取半径r的圆柱面



由于柱对称性，圆柱面上各点j
大小均相同，方向均沿径向向外

通过半径r的圆柱面的电流为

$$I = \int \vec{j} \cdot d\vec{s} = j 2\pi r d \Rightarrow j = \frac{I}{2\pi r d}$$

由欧姆定律的微分形式，圆柱面上电场强度为

$$E = \rho j = \frac{\rho I}{2\pi r d}$$

圆柱筒内缘和外缘之间的电势差为

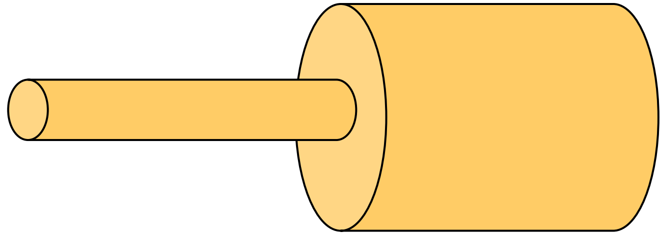
$$U = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{r} = \int_a^b \frac{\rho I}{2\pi r d} dr = \frac{\rho I}{2\pi d} \ln\frac{b}{a}$$

$$I = \frac{U}{\frac{\rho}{2\pi d} \ln\frac{b}{a}}$$

01:31:21

选择题： #S2301.

两截面不同的铜杆串接在一起，两端加有电压U，则



(1) 通过两杆的电流相同；

(2) 两杆的电流密度相同；

(3) 两杆内的电场强度相同；

(4) 如果两杆的长度相同，两杆上的电压相同。

01:31:21

选择题： #S2302.

一铜线外涂以银层，两端加上电压**U**，
则在铜线和银层中

(1) 通过的电流不可能相同；

(2) 电流密度相同；

(3) 电场强度相同。

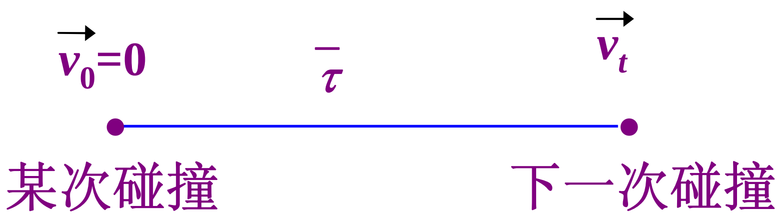
01:31:21

➢由经典电子论推导欧姆定律 $\vec{j} = \sigma\vec{E}$

设导体内有电场E，每个自由电子受力 $f = -eE$

加速度 $\vec{a} = -\dfrac{e\vec{E}}{m}$ 电子不能一直加速，会与点阵碰撞。

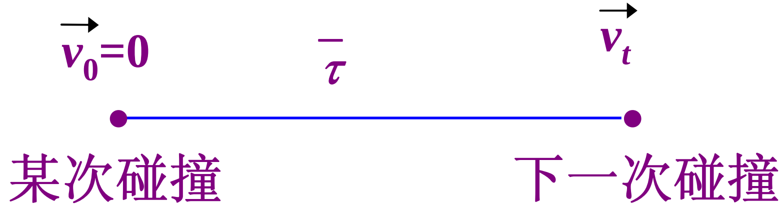
对大量电子平均而言，碰撞后电子向各方向运动的概率相等，碰撞后瞬间的定向速度(初速)为零



τ：两次碰撞间电子平均自由飞行时间

下次碰撞前的定向速度(末速) $\vec{v}_t = \vec{a}\bar{\tau} = -\dfrac{e\bar{\tau}}{m}\vec{E}$

$$\vec{v}_t = \vec{a}\bar{\tau} = -\frac{e\bar{\tau}}{m}\vec{E}$$



τ时间内，平均定向速度，即漂移速度

$$\vec{\bar{v}} = \frac{\vec{v}_0 + \vec{v}_t}{2} = -\frac{e\bar{\tau}}{2m}\vec{E}$$

$$\vec{j} = -en\vec{\bar{v}} = \frac{ne^2\bar{\tau}}{2m}\vec{E}$$ ——欧姆定律的微分形式

电导率 $\sigma = \dfrac{ne^2\bar{\tau}}{2m}$ $\quad \bar{\tau} = \dfrac{\bar{\lambda}}{\bar{v}}$ $\quad \bar{v} \propto E_k^{\frac{1}{2}} \propto T^{\frac{1}{2}}$ $\quad \rho \propto T^{\frac{1}{2}}$

实验指出，对大多数金属，$\rho \propto T$

古典电子论有困难，需要用量子理论来解释。

3.4 焦耳定律的微分形式

电场力作功 $W = qU = UIt$ →电流的热效应

对一段只含有电阻的电路，导体放出的热量为

$\boldsymbol{Q = I^2 Rt}$ ——焦耳定律 单位：焦耳

发热功率 $\boldsymbol{P = I^2 R}$

热功率密度——单位体积、单位时间所消耗的功

$$w = \frac{I^2 R}{V} = \frac{j^2 S^2 \rho l / S}{l \cdot S} = j^2 \rho = \frac{j^2}{\sigma}$$

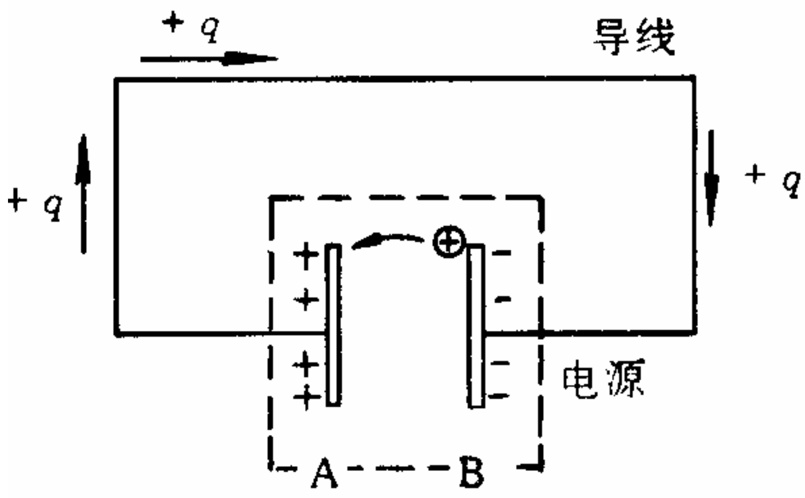
$$\vec{j} = \frac{\vec{E}}{\rho} = \sigma \vec{E}$$

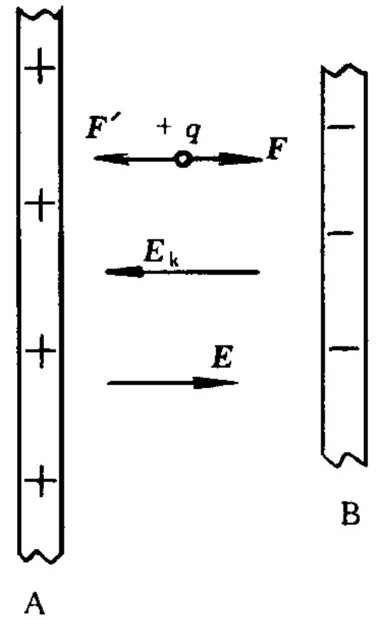
$w = \sigma E^2$——焦耳定律的微分形式

01:31:21

§4 电动势

4.1 电动势





电源：提供非静电力的装置，将其他能量转化为电能

电源电动势 $\mathcal{E}=\dfrac{W_{非}}{q}=\dfrac{\int_{-\,内}^{+}\vec{F}'\cdot d\vec{l}}{q}$ 非静电力作功本领

01:31:21

$\mathbf{E_k}$：非静电场——作用在单位电荷上的非静电力

$$\vec{E}_k=\frac{\vec{F}'}{q} \qquad \mathcal{E}=\int_{\substack{- \\ \text{内}}}^{+}\vec{E}_k\cdot d\vec{l}$$

若电动势存在于整个电流回路 $\mathcal{E}=\oint\vec{E}_k\cdot d\vec{l}$

•标量，但有方向：从负极经电源内部到正极。

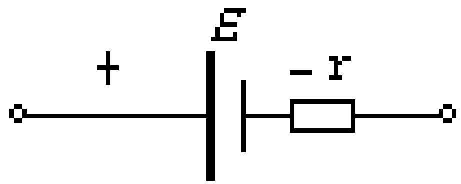
•单位：**1**伏特=**1**焦耳/库仑

•电源电动势与静电场的电势是两个不同的概念。

•只取决于电源本身的性质，而与外电路无关。

•电源两极之间的电势差称为路端电压，与电源的电动势不同。

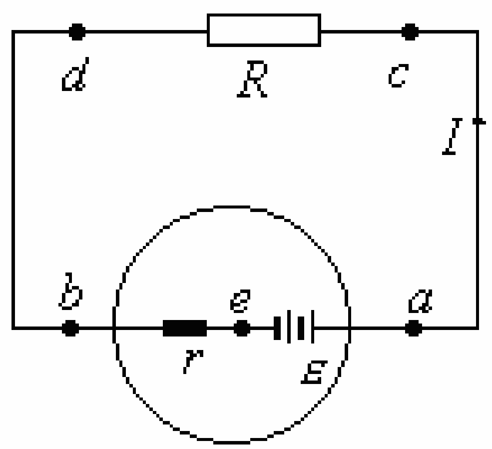
•电源内部也有电阻，称为内阻。



01:31:21

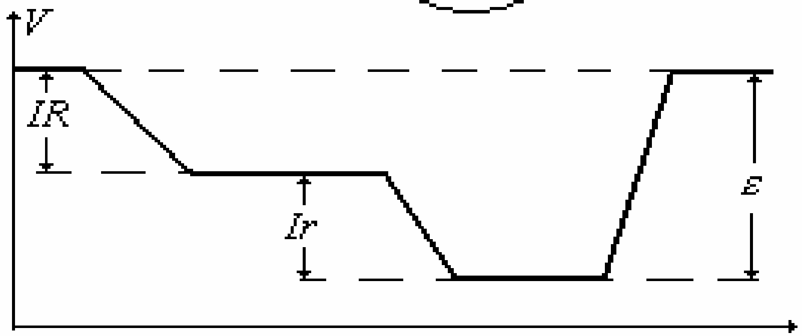
4.2 全电路欧姆定律

存在非静电力 $\vec{j}=\sigma(\vec{E}+\vec{E}_k)$



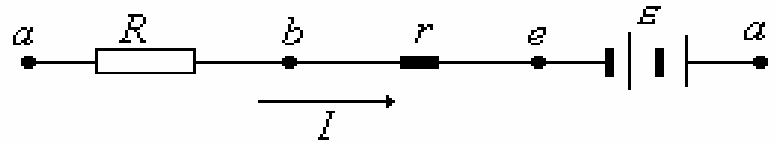
$$\vec{E}=\frac{\vec{j}}{\sigma}-\vec{E}_k \qquad \oint_l dU=\oint_l \vec{E}\cdot d\vec{l}=0$$

$$\oint_l \frac{\vec{j}\cdot d\vec{l}}{\sigma}=\oint_l \vec{E}_k\cdot d\vec{l}$$



$$\oint_l \vec{E}_k\cdot d\vec{l}=\mathcal{E}$$

$$\oint_l \frac{\vec{j}\cdot d\vec{l}}{\sigma}=\oint_l \frac{jSdl}{\sigma S}=I\oint_l \frac{\rho dl}{S}$$



$$IR+Ir=\mathcal{E}$$

全电路的欧姆定律

电源的路端电压

$$U=IR=\mathcal{E}-Ir$$

01:31:21

判断题：　#T2303.

电源的电动势和电源两端的路端电压尽管单位相同，
但它们是两个完全不同的概念，
分别描述两种不同的力所做的功。
但若忽略电源的内阻，或者电源与外电路开路时，
两者的数值相等。

$$U = IR = \mathcal{E} - Ir$$

01:31:21

判断题： #T2304.

电动势的方向与回路中电流的方向相同。

判断题： #T2305.

沿着电流线的方向，电势降低。

01:31:21

本章小结

- 电流 电流密度 与漂移速度关系 $\vec{j} = nq\vec{v}$
- 稳恒电流 稳恒条件
- 稳恒电场 与静电场的异同
- 电阻定律
- 欧姆定律的微分形式 $\vec{j} = \dfrac{\vec{E}}{\rho} = \sigma\vec{E}$
- 焦耳定律的微分形式 $w = j^2\rho = \sigma E^2$
- 电动势
- 全电路欧姆定律
- 基尔霍夫第一定律（节点电流定律）
- 基尔霍夫第二定律（回路电压定律）

01:31:21

作业：P122　8

01:31:21