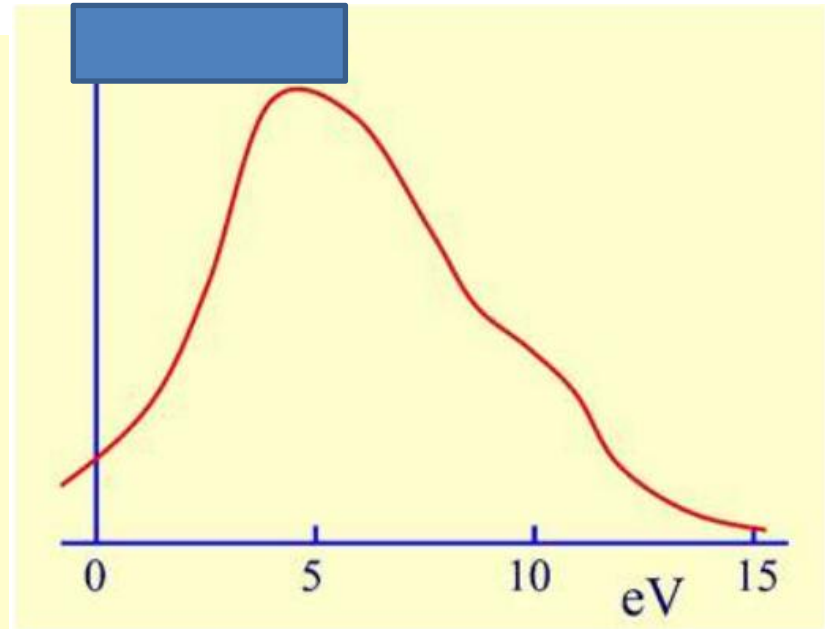
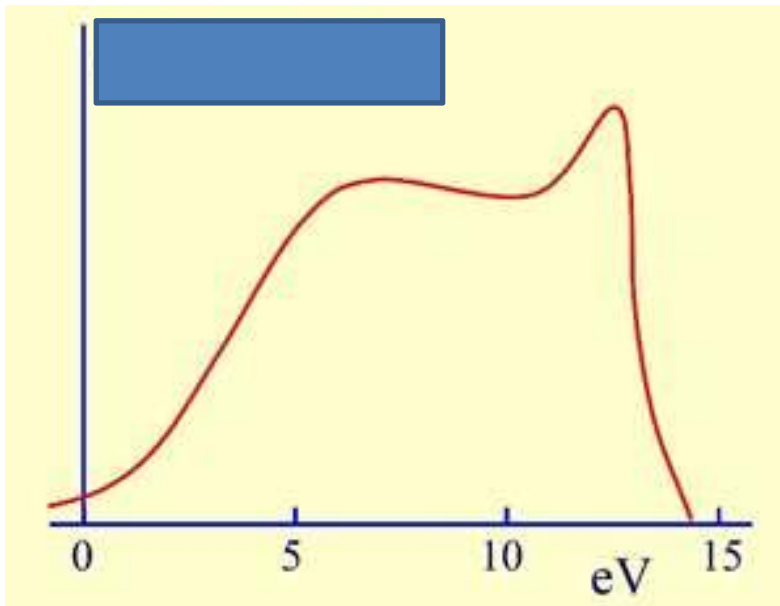
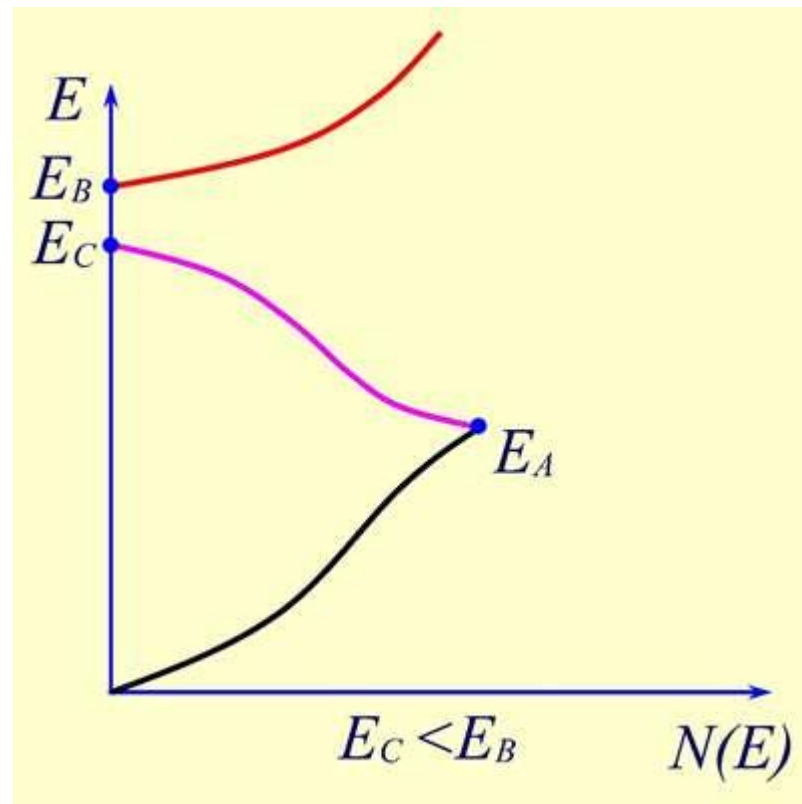
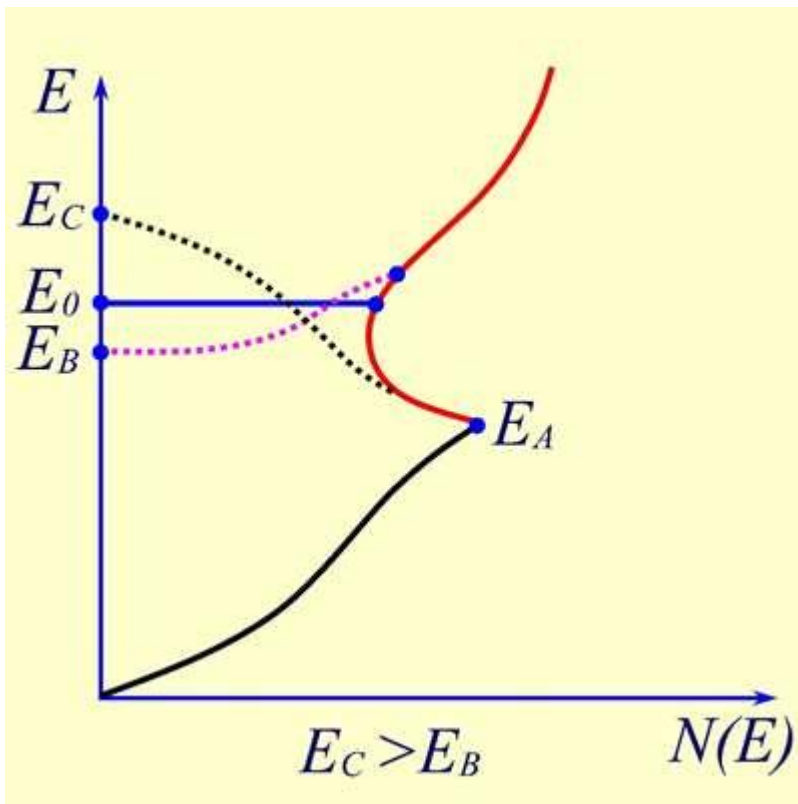


问题1:



X光子谱

判断这两种X光子谱是来自金属还是半导体！
说明判断的理由！



问题2:

- 能够将晶体中的电子看成准经典粒子来处理问题的条件是什么？

波包远远大于原胞, 在这一个限度里才能将电子看做是准经典粒子。例如在输运过程中, 只有当自由程远远大于原胞的情况下, 才可以把电子看做一个准经典粒子。

问题3:

- 晶体中电子在外界作用力下，其运动规律可以写成类似牛顿定律的形式：

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{1}{m^*} \vec{F}$$

$\frac{1}{m^*}$ 名称是什么？ $m^* = 1/\frac{1}{m^*}$ 是否正确？

m^* 为什么有正、有负？

周期性势场力的作用被归并到晶体中电子的质量中 m^* 。

电子通过与原子散射而交换动量，电子从晶格获得的动量大于付出给晶格的动量 $m^* > 0$ ，电子从晶格获得的动量小于付出给晶格的动量 $m^* < 0$

§ 5.2 恒定电场作用下电子是如何运动的？

理想晶体

—— 一维紧束缚近似下，电子在恒定电场作用下的运动规律
已知条件：

①在无外场条件下电子的能量、速度和有效质量。

电子的能量 $E^i(k) = \varepsilon_i - J_0 - 2J_1 \cos ka$

电子的速度 $v(k) = \frac{1}{\hbar} \frac{dE(k)}{dk}$ $v(k) = \frac{2J_1 a}{\hbar} \sin ka$

有效质量 $m^*(k) = \hbar^2 / \frac{d^2 E}{dk^2}$

$$m^*(k) = \hbar^2 / 2J_1 a^2 \cos ka$$

分析问题目标：掌握半导体在热平衡、非热平衡时，基本半导体器件结构在热平衡、施加电压时电子的运动规律、电流-电压特性，并能够运用所学的半导体的基本规律对半导体及半导体器件的基本特性进行识别并正确的表述、分析。

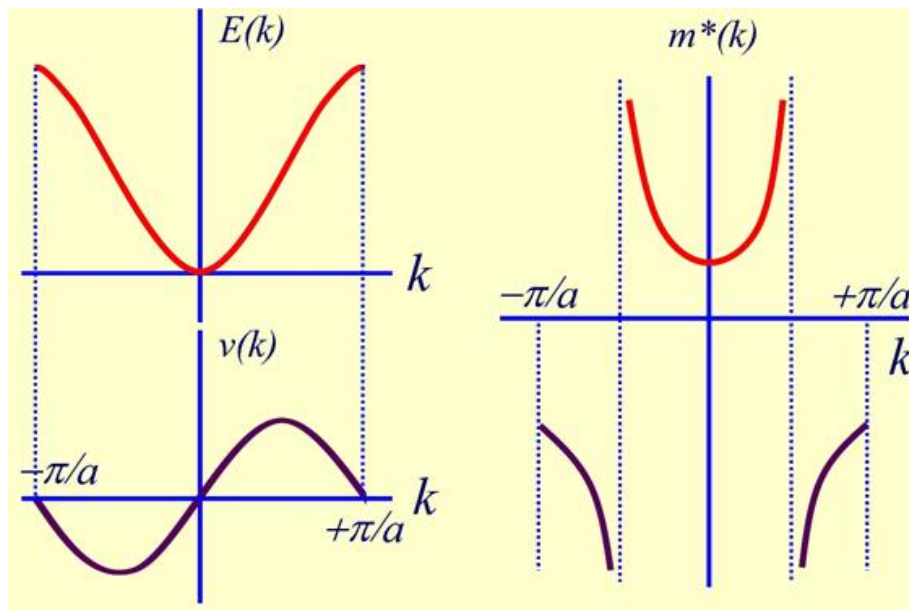
简约布里渊区能带、电子的速度和有效质量

$$E^i(k) = \varepsilon_i - J_0 - 2J_1 \cos ka \quad v(k) = \frac{2J_1 a}{\hbar} \sin ka$$

$$m^*(k) = \hbar^2 / 2J_1 a^2 \cos ka$$

画图

$J_1 > 0$



能带底部 $k = 0$ $v(k) = 0$ $m^*(k) = \frac{\hbar^2}{2J_1 a^2}$

能带顶部 $k = \pm\pi / a$ $v(k) = 0$ $m^*(k) = -\frac{\hbar^2}{2J_1 a^2}$

②在外加低电场作用下电子的运动

电场力 $\vec{F} = -q\vec{E}$ —— 沿k轴的正方向（E沿k的负方向）

$$\boxed{\frac{\hbar dk}{dt} = F} \text{ —— 电子在k空间做匀速运动}$$

$$E^i(k) = \varepsilon_i - J_0 - 2J_1 \cos ka$$

电子的速度

$$v(k) = \frac{1}{\hbar} \frac{dE(k)}{dk} \quad v(k) = \frac{2J_1 a}{\hbar} \sin ka$$

$$v(k) = \frac{2J_1 a}{\hbar} \sin\left(a \frac{1}{\hbar} Ft\right)$$

—— 电子在k空间做匀速运动

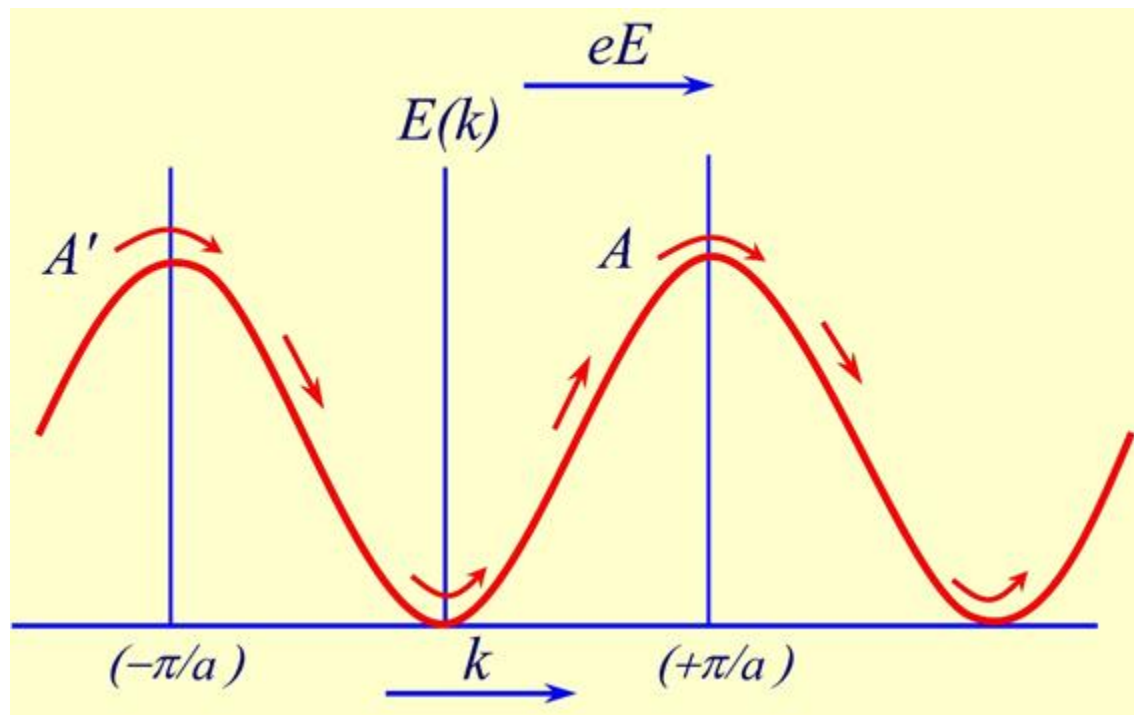
$$\frac{\hbar dk}{dt} = F$$

—— 电子的运动保持在同一个能带内，能量周期性变化

—— k空间布里渊区

—— 电子从 $k=\pi/a$
移动出去

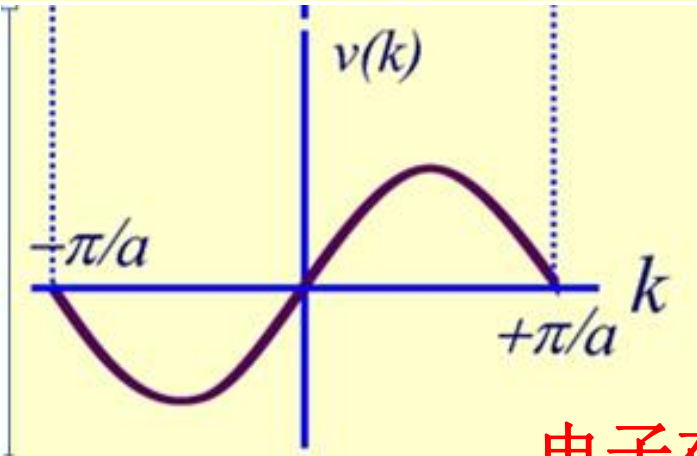
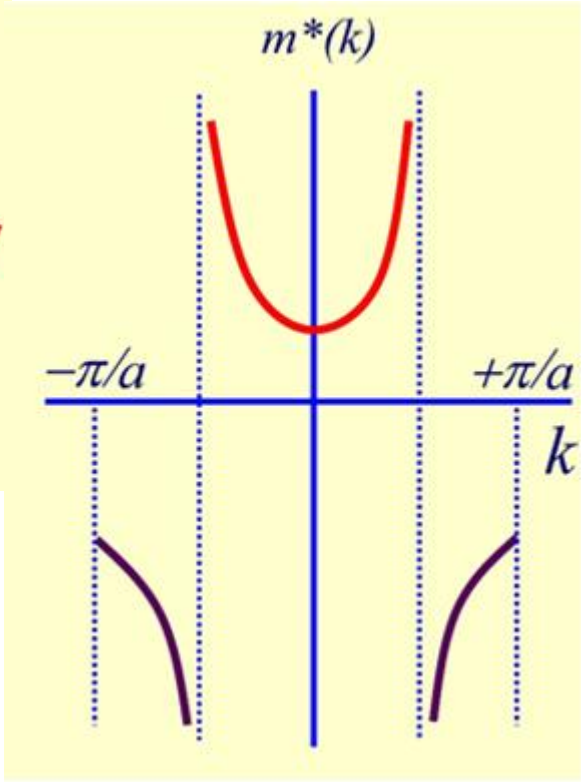
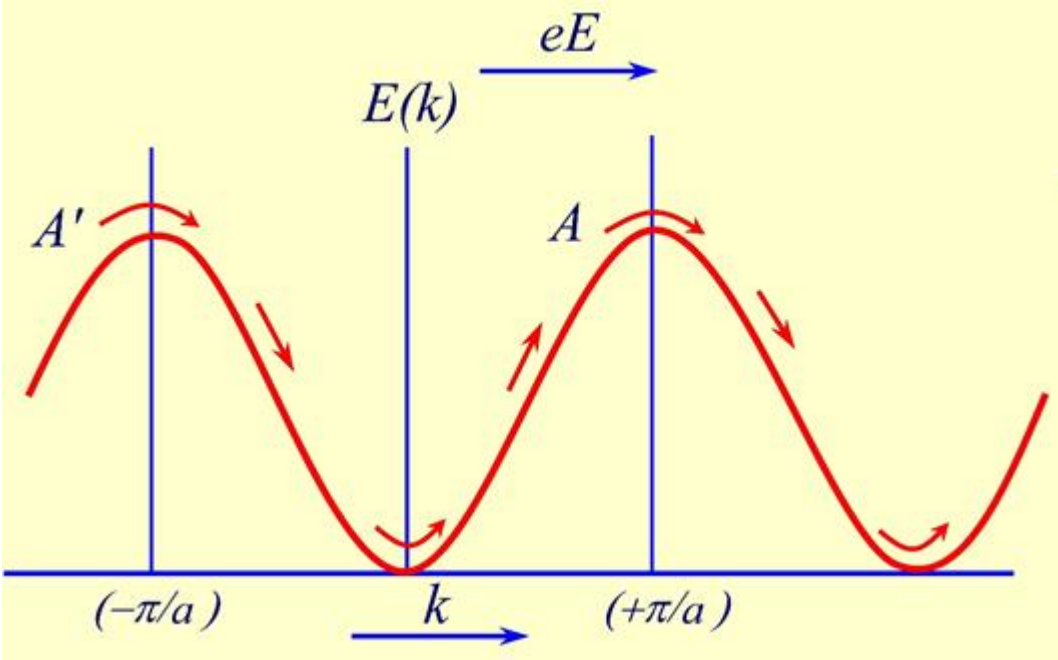
—— 同时从 $k=-\pi/a$
移动进来



电子速度振荡

$$v(k) = \frac{2J_1 a}{\hbar} \sin a \frac{1}{\hbar} F t$$

$$m^*(k) = \frac{\hbar^2}{2J_1 a^2 \cos ka}$$



—— 电子在实空间中运动的振荡

电子运动在实空间中的描述

$$v(k) = \frac{2J_1 a}{\hbar} \sin a \frac{1}{\hbar} F t \text{ —— 电子在实空间中运动的振荡}$$

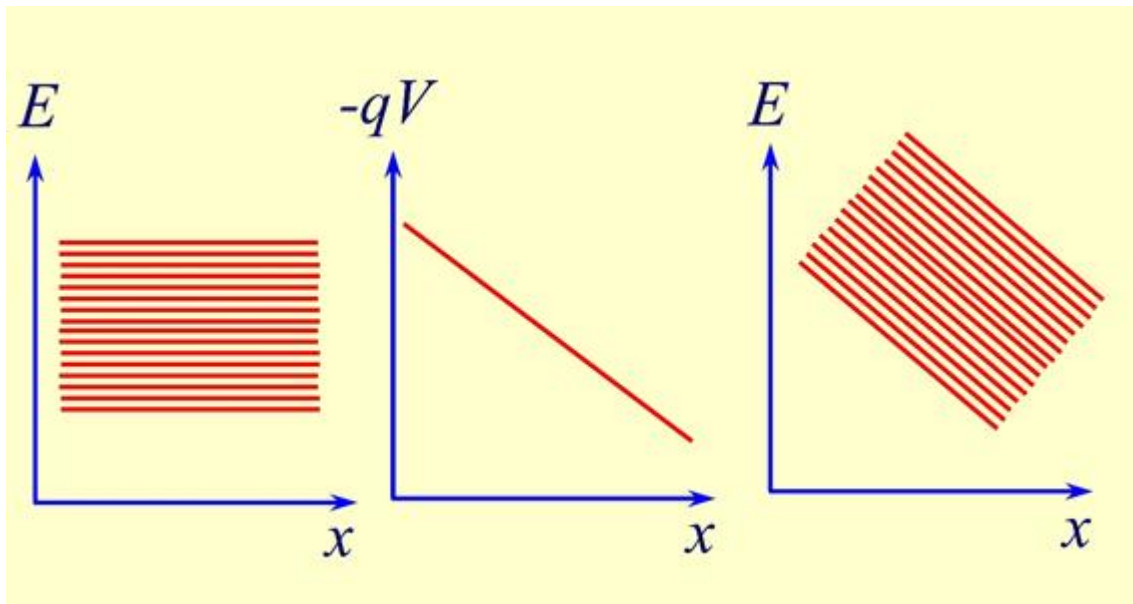
能带的倾斜 外电场对电子能量本征值附加的能量

$$E = -\frac{dV}{dx} \quad V = -Ex \quad U = -qV = qEx$$

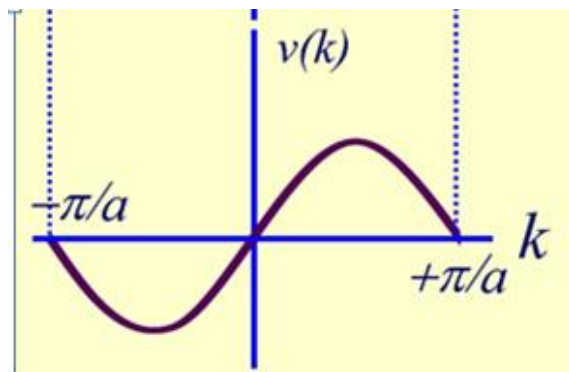
—— E 沿 $-x$ 方向

$$U = qEx$$

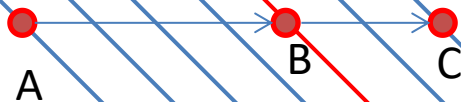
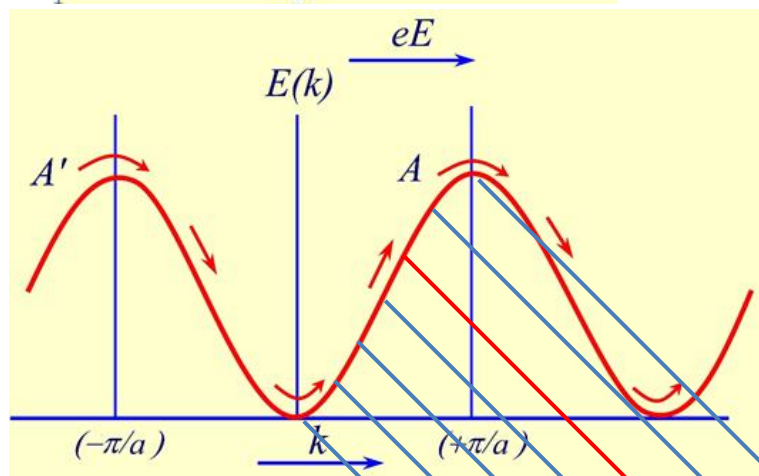
$$E = E_0 + qEx$$



电子运动的振荡



—— 两个能带的情形中，电子在实空间的运动振荡



非理想因素？

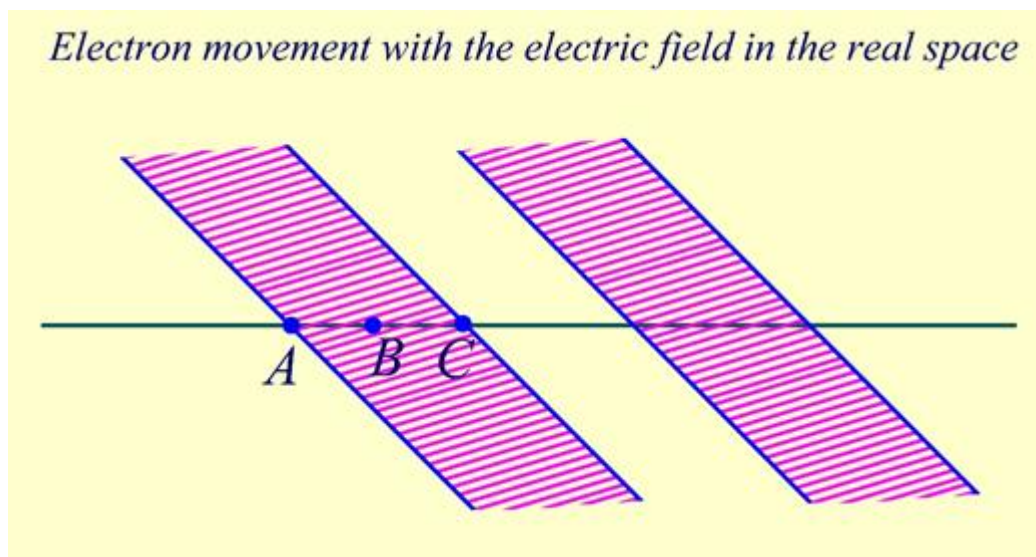
—— ①电子在运动的过程中，由于受到声子、杂质和缺陷的散射（碰撞），相邻两次散射之间的平均时间间隔为电子的平均自由运动时间： τ

—— 如果 τ 很小，电子来不及完成振荡运动就被散射破坏了

观察电子运动振荡的条件

—— $\omega\tau \gg 1$

—— ω 振荡圆频率



振荡圆频率 $\omega = \frac{2\pi}{T}$

$$T = \frac{2\pi / a}{v(k)}$$

$$\frac{\hbar dk}{dt} = F$$

$$v(k) = \frac{dk}{dt} = \frac{qE}{\hbar}$$

$$\omega = 2\pi \left(\frac{2\pi / a}{qE / \hbar} \right)^{-1} \quad \omega\tau \gg 1$$

如果 $a \approx 0.3 \text{ nm}$, $\tau \approx 10^{-13} \text{ s}$, 则 $E > 2 \times 10^7 \text{ V/m}$

—— 在金属中无法实现

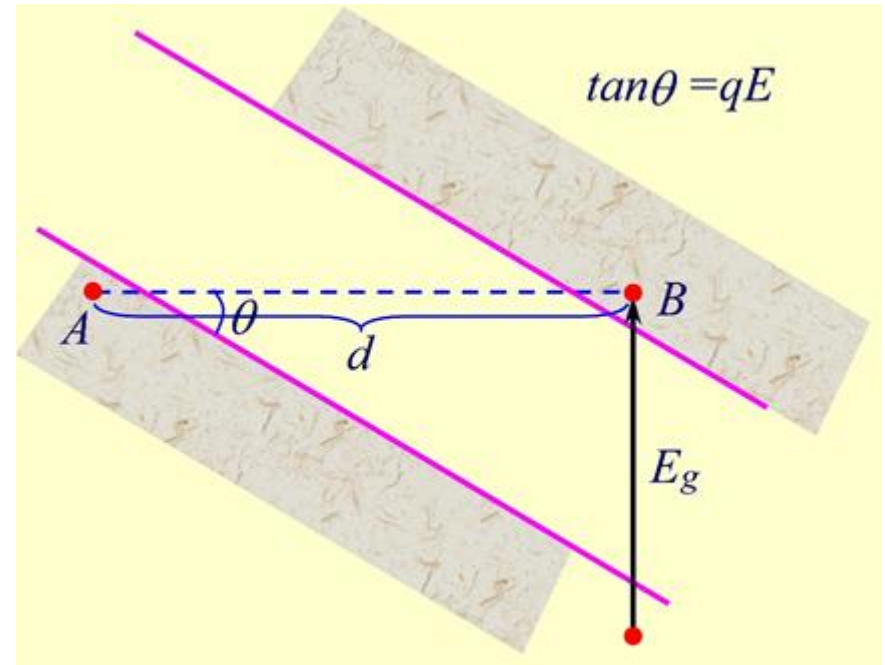
—— 很难观察到电子的振荡, 在一般电场下, 在k空间电子只是发生了一个小位移, 无法实现振荡

—— ②根据量子理论，电子可以发生势垒贯穿效应

穿透位垒的几率

$$\propto E \exp\left[-\frac{\pi^2 \sqrt{2mE_g}}{\hbar} \left(\frac{E_g}{qE}\right)\right]$$

$$d = \frac{E_g}{qE} \text{ —— 位垒长度}$$



—— 当电场足够强时，若下面的能带被电子填满，或者接近填满，上面能带是空带可以接纳电子，此时电子有一定的几率从价带穿透带隙进入导带

—— 隧道效应

§ 5.3 导体、绝缘体和半导体的能带论解释

——问题的提出

——所有固体都包含大量的电子，但电子的导电性却相差非常大

导体的电阻率 $\rho \sim 10^{-6} \Omega \cdot cm$

半导体的电阻率 $\rho \sim 10^{-2} - 10^9 \Omega \cdot cm$

绝缘体的电阻率 $\rho \sim 10^{14} - 10^{22} \Omega \cdot cm$

—— 导体、半导体和绝缘体的区别在哪里？

1. 满带中的电子对导电的贡献

电子能量是波矢的偶函数 $E_n(\vec{k}) = E_n(-\vec{k})$

波矢为 \vec{k} 的电子的速度 $\vec{v}(\vec{k}) = \frac{1}{\hbar} \nabla_{\vec{k}} E = -\frac{1}{\hbar} \nabla_{-\vec{k}} E$

波矢为 $-\vec{k}$ 的电子的速度 $\vec{v}(-\vec{k}) = \frac{1}{\hbar} \nabla_{-\vec{k}} E$

$$\vec{v}(\vec{k}) = -\vec{v}(-\vec{k})$$

—— \vec{k} 状态和 $-\vec{k}$ 状态中电子的速度大小相等、方向相反

1) 在无外场时，**满带**

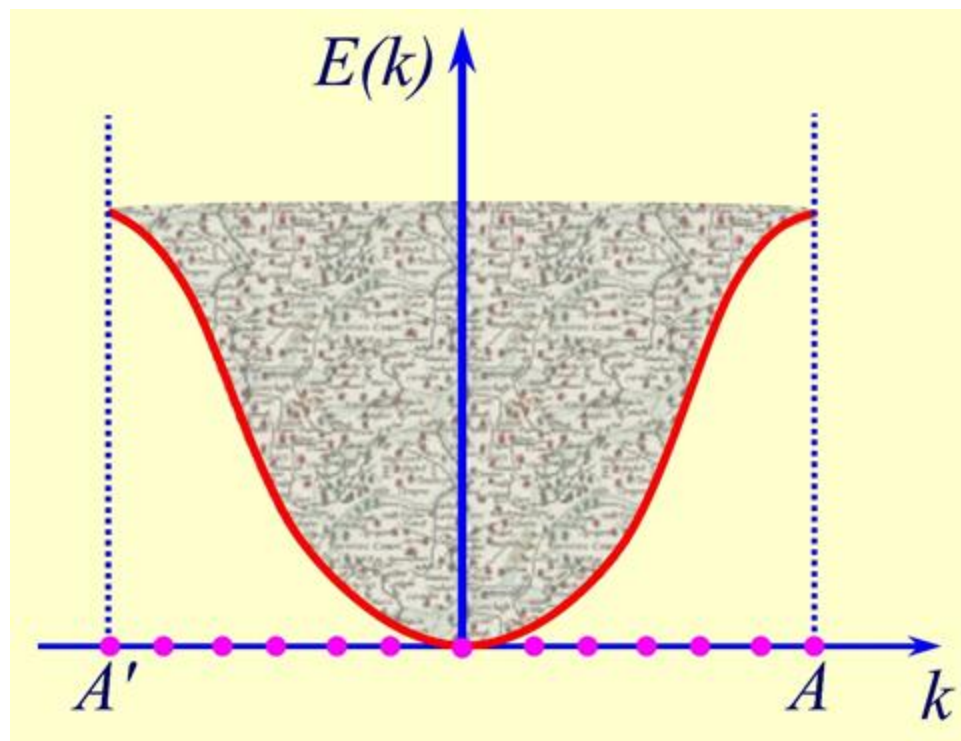
—— \vec{k} 状态和 $-\vec{k}$ 状态中电子的速度大小相等、方向相反

每个电子产生的电流 $-q\vec{v}$

—— **对电流的贡献相互抵消**

热平衡状态下，电子占据波矢为 \vec{k} 的状态和占据波矢为 $-\vec{k}$ 的状态的几率相等

—— **晶体中的满带在无外场时，不产生电流**



2) 在有外场 \vec{E} 作用时，**满带**

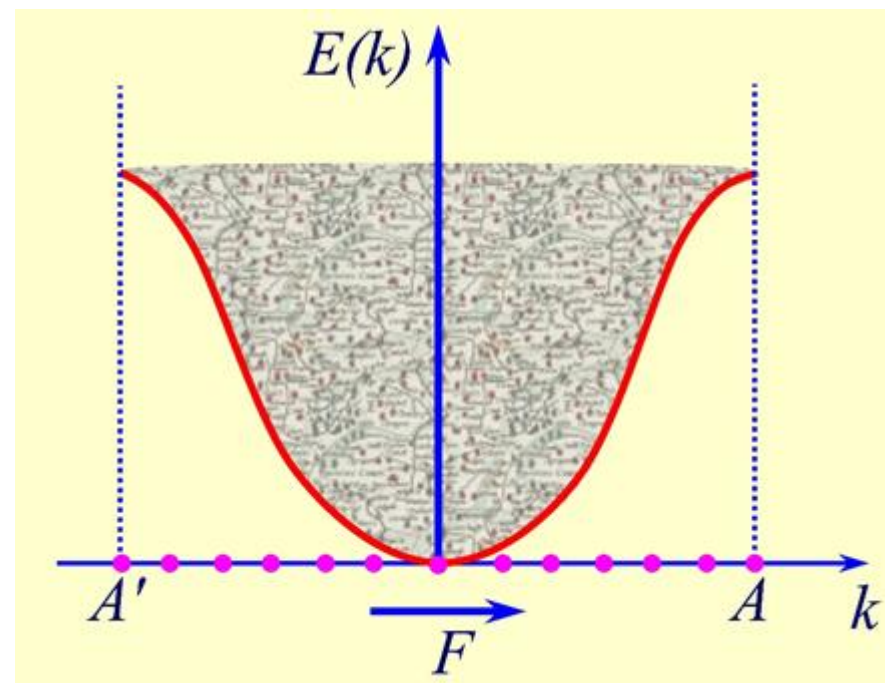
电子受到的作用力 $\vec{F} = -q\vec{E}$

电子动量的变化 $\frac{d(\hbar\vec{k})}{dt} = \vec{F}$

—— 所有电子状态以相同的速度沿着电场的反方向运动

$$\frac{d\vec{k}}{dt} = -\frac{1}{\hbar}q\vec{E}$$

—— **满带的情形中，电子的运动不改变布里渊区中电子的分布，满带中的电子不产生宏观的电流**



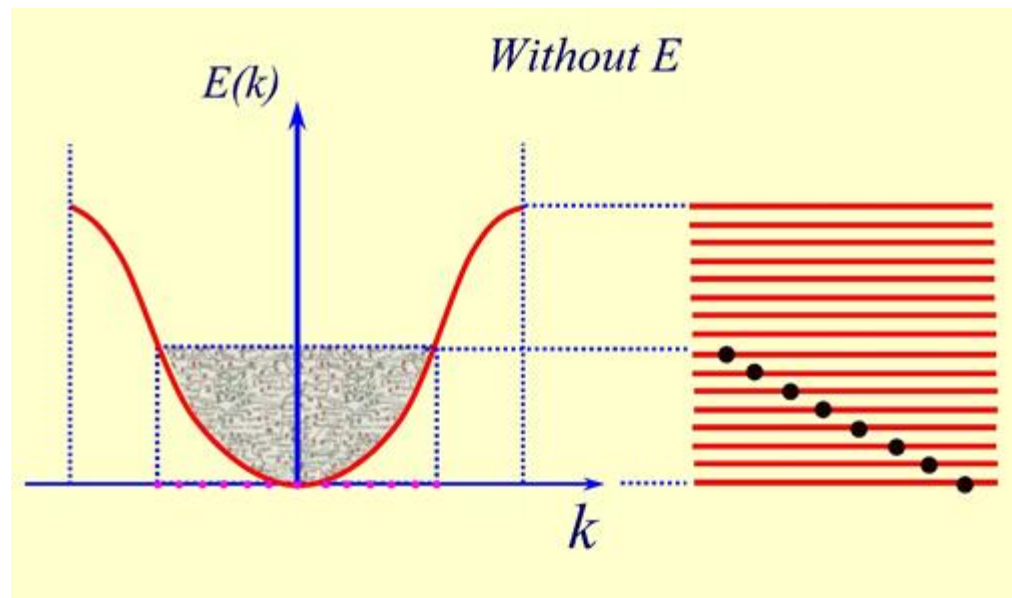
2. 导带中的电子对导电的贡献

1) 无外场存在时

—— 虽然只有部分状态被电子填充，但波矢为 \vec{k} 的状态和波矢为 $-\vec{k}$ 的状态中电子的速度大小相等、方向相反，对电流的贡献相互抵消

—— 热平衡状态下，电子占据两个状态的几率相等

—— 晶体中的导带在无外场作用时，不产生电流



2) 在有外场作用时

- 导带中只有部分状态被电子填充，外场的作用会使布里渊区的状态分布发生变化
- 所有的电子状态以相同的速度沿着电场的反方向运动，但由于能带是不满带，逆电场方向上运动的电子较多

$$\frac{d\vec{k}}{dt} = -\frac{1}{\hbar} q \vec{E}$$

- 在外场作用下，
导带中的电子产生电流

