半導体の初期エミッタンス

栗木雅夫(広島大学/KEK)

概要

- 従来の電子放出理論は金属をベースに記述されている。
- 金属：三次元波数空間における井戸。
  - 真空ポテンシャル～仕事関数
- 半導体：金属と同様の井戸。
  - 真空ポテンシャル＋バンドギャップ～仕事関数
  - しかしバンド構造を考えないのは明らかに過剰な近似。

金属

- 温度T=0として、平均の横方向エネルギーExを求める。
- xとx'との相関なしとして、エミッタンスを計算。

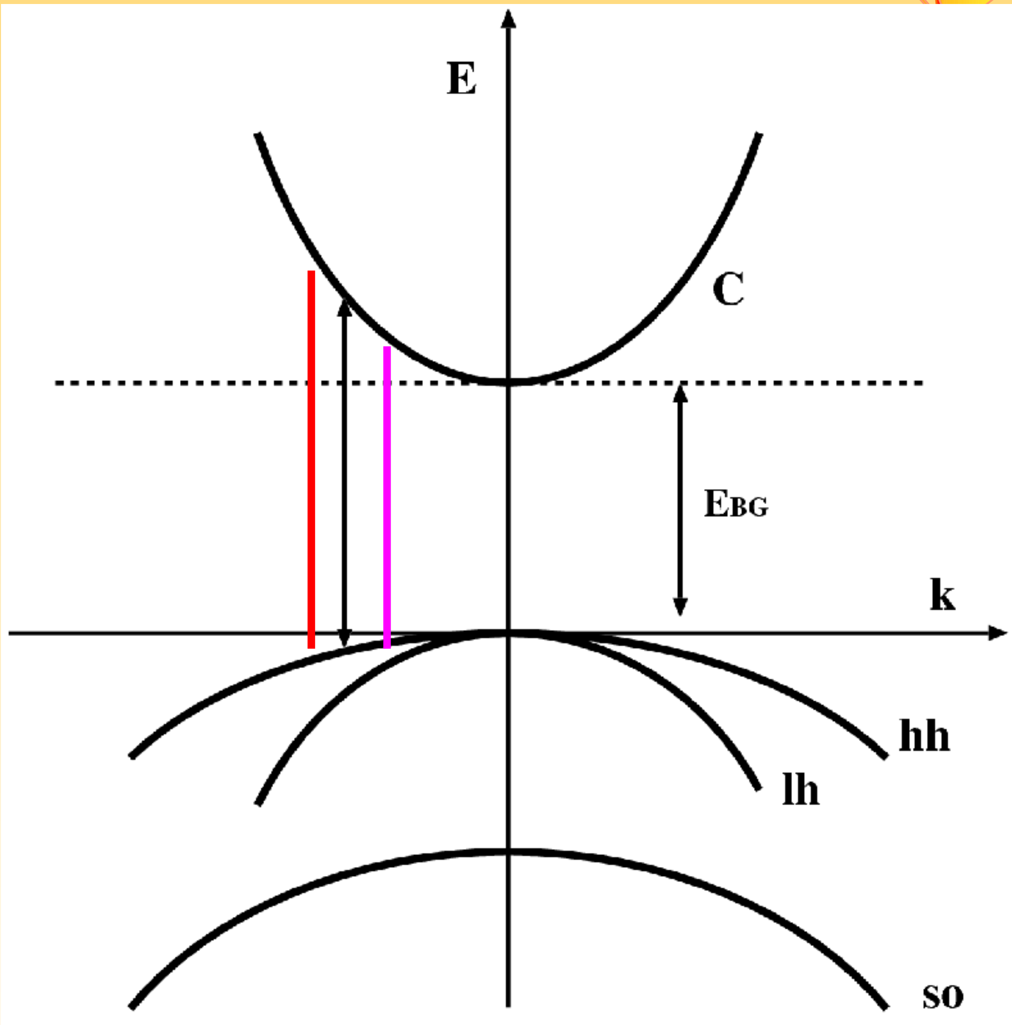
$$\overline{E_x} = \frac{h\nu - \phi}{6}$$

$$x' \equiv \frac{p_x}{p} = \frac{\sqrt{2\mathrm{mE}_x}}{\gamma\beta mc}$$

$$\varepsilon_{nx} = \gamma\beta\sigma_x\sigma_{x'} = \frac{R}{2}\sqrt{\frac{h\nu - \phi}{3\mathrm{mc}^2}}$$

半導体(1)

- 半導体（直接遷移型）はバンドギャップを有する。
- 各々のバンドは固有の質量を持つ。
- 波数によりエネルギー（差）は一意に決まるので、特定の波長の光により励起される電子は一定の波数（の大きさ）を持つ。



半導体（2）

- 伝導帯と価電子帯のバンドを有効質量で記述。
- 光のエネルギーは次の関係を満たす。μ *は換算質量。

$$E_c(k) = E_{BG} + \frac{\hbar k^2}{2m_c^*}$$

$$E_h(k) = -\frac{\hbar k^2}{2m_h^*}$$

$$\hbar\omega = E_{BG} + \frac{\hbar k^2}{2m_c^*} + \frac{\hbar k^2}{2m_h^*} = E_{BG} + \frac{\hbar k^2}{2\mu^*}$$

半導体(3)

- 伝導帯において、電子は決まった波数の大きさをもって分布している。
- $$E_e = \frac{\hbar^2(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)}{2\mathrm{m}_c^*}$$
-
- 電子親和性をχとすると、放出方向をzにとり、次の波数よりも大きな電子が真空中に放出されると考えられる。
- $$k_{z0} = \frac{\sqrt{2\mathrm{m}_c^* \chi}}{\hbar}$$
-

したがって、放出される電子について、平均のExを求めればエミッタンスを計算できる。

半導体(4)

- 波数空間において、放出される電子の表面積S
- $$S(k_z > k_{z0}) = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\alpha} d\theta \sin\theta \frac{2\mathrm{m}_c^* E_e}{\hbar^2} = \frac{4\pi m_c^* E_e}{\hbar^2}(1-\cos\alpha)$$
-
- 放出される電子についてのExの和E_{xtot} $\quad \zeta \equiv \frac{\chi}{E_e}$
- $$E_x = \frac{E_e}{2}(1-\cos^2\theta)$$
- $$E_{xtot} = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\alpha} d\theta\, k^2 \sin\theta\, E_x = \frac{2\pi m_c^* E_e^2}{\hbar^2}\left[\frac{1}{3}\zeta^{2/3} - \zeta^{1/2} + \frac{2}{3}\right]$$
- 平均のEx

$$\overline{E}_x = \frac{E_{xtot}}{S} = \frac{E_e}{2} \frac{\frac{1}{3}\zeta^{2/3} - \zeta^{1/2} + \frac{2}{3}}{1-\zeta^{1/2}}$$

半導体(5)

- 簡単のため χ , ζ =0としてみると
- $$\overline{E}_x = \frac{E_e}{3} = \frac{1}{3}\left(\hbar\omega - E_{BG}\right)\frac{\mu^*}{m_c^*}$$
- 横方向規格化エミッタンス
- $$\varepsilon_{nx} = \frac{R}{2}\sqrt{\frac{2\left(\hbar\omega - E_{BG}\right)}{3\mathrm{m}_0 c^2}\frac{\mu^*}{m_c^*}}$$
- $\mathrm{m_c}$=0.067$\mathrm{m_0}$, $\mathrm{m_{lh}}$=0.08$\mathrm{m_0}$を代入すると
- $$\varepsilon_{nx} = \frac{R}{2}\sqrt{\frac{1.08\left(\hbar\omega - E_{BG}\right)}{3\mathrm{m}_0 c^2}}$$
- 結果的に金属での計算結果と近い値

まとめ

- エミッタンスについて、半導体のバンド構造を考慮したモデルを考察。
- 半導体ではエネルギーと波数が一意に決まる。
- 励起された電子の横方向の平均エネルギーは金属の場合に比べてx2となる。
- 有効質量を考慮すると、ほぼ1.1倍となり、金属モデルとほぼ同じ結果をあたえる。
- 界面での屈折を考慮した結果は次回。