



# 光電子材料工学特論

---

理工学部 電気電子工学科 教授  
沼居貴陽 (Numai, Takahiro)



# 開講にあたって

---

- 講義形式と成績評価
- 教科書・参考書
- 講義内容



# 講義形式と成績評価

---

- 講義形式
  - ゼミ形式(当番を決めて発表)
- 成績評価
  - 発表内容
  - レポート(論文講読)



# 開講にあたって

---

- 講義形式と成績評価
- 教科書・参考書
- 講義内容



# 教科書・参考書

---

## ■教科書

- 沼居貴陽, 「半導体レーザー工学の基礎」(丸善)

## ■参考書

- Takahiro Numai, "Fundamentals of Semiconductor Lasers" (Springer)



# 開講にあたって

---

- 講義形式と成績評価
- 教科書・参考書
- **講義内容**



# 講義内容

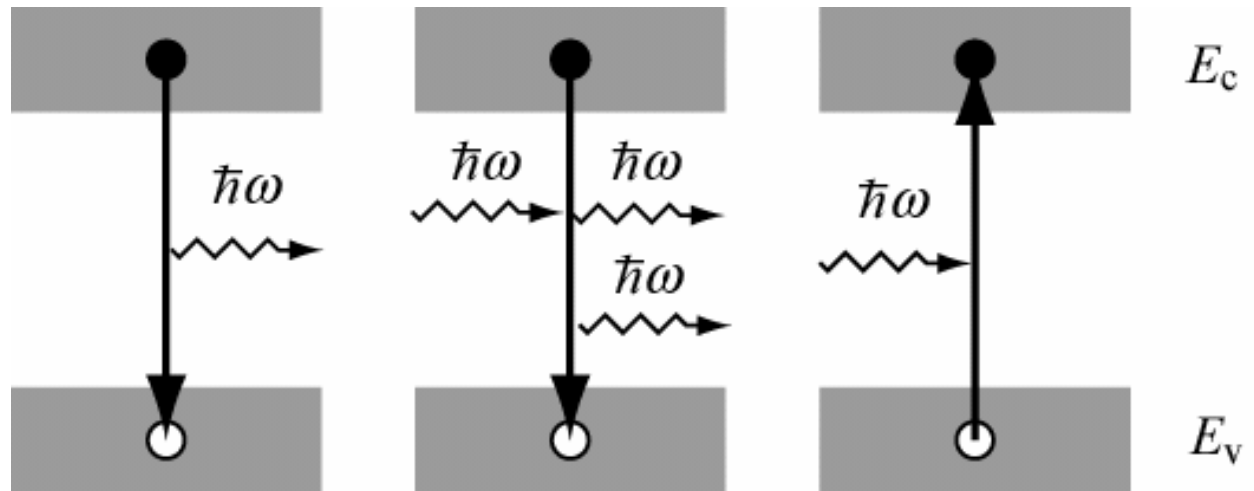
---

- バンド構造
- 光学遷移
- 光導波路
- 光共振器
- 半導体レーザー
- 自然放出の制御

# エネルギーバンド

## ■ エネルギーバンドと光学遷移

伝導帯



価電子帯

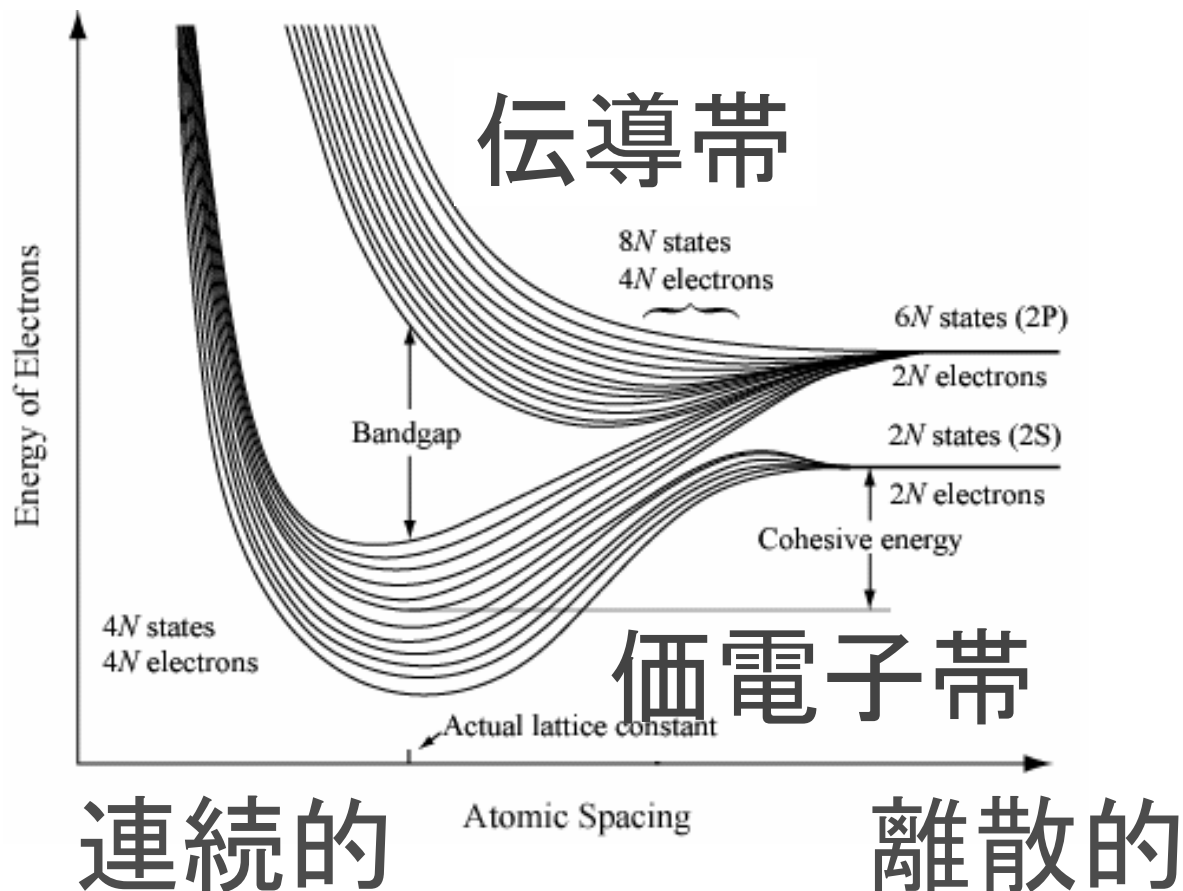
発 光

吸 収



# エネルギーバンド

## ■ エネルギーと原子間距離



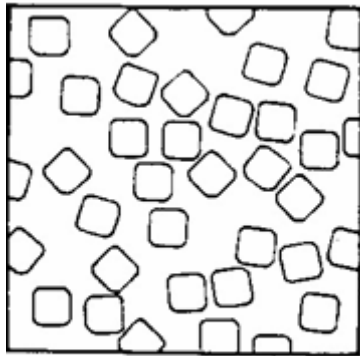
# エネルギーバンド

## ■ シュレーディンガー方程式

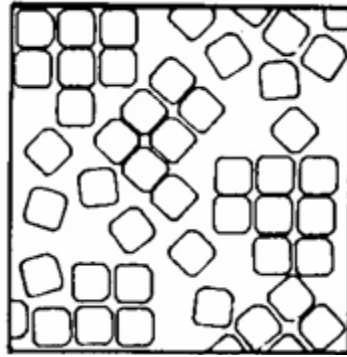
$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) \right] \psi_{nk}(\mathbf{r}) = E_n(\mathbf{k}) \psi_{nk}(\mathbf{r})$$

# エネルギーバンド

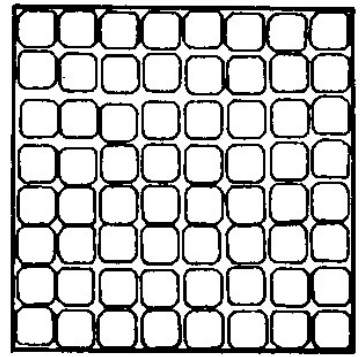
## ■ 物質の構造



非晶質



多結晶

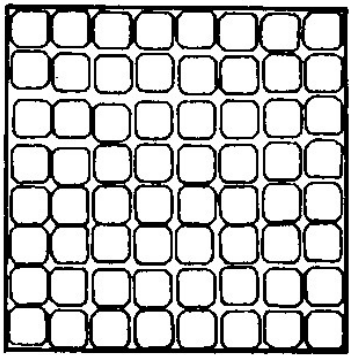


単結晶

低抵抗

# エネルギーバンド

## ■ 単結晶における波動関数



単結晶

$$\psi_{nk}(\mathbf{r}) = \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) u_{nk}(\mathbf{r})$$

$$u_{nk}(\mathbf{r}) = u_{nk}(\mathbf{r} + \mathbf{R})$$

ブロッホの定理

# エネルギーバンド

## ■ $k \cdot p$ 摂動

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) + H' \right] u_{nk}(\mathbf{r}) = E_n(\mathbf{k}) u_{nk}(\mathbf{r})$$

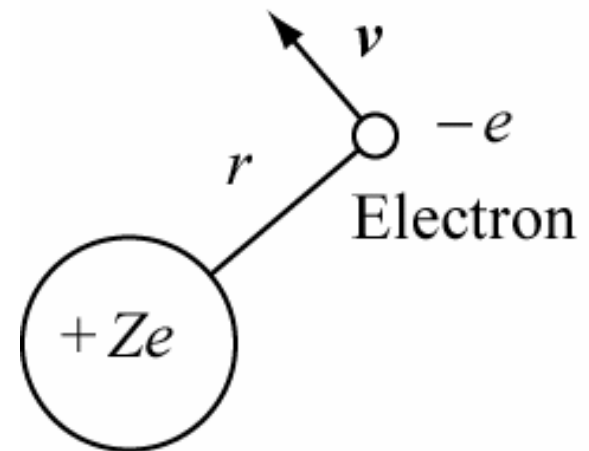
$$H' = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + \frac{\hbar}{m} \mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$$

# エネルギーバンド

## ■ スピン軌道相互作用

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{r}) + H' + H_{\text{SO}} \right] u_{n\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = E_n(\mathbf{k}) u_{n\mathbf{k}}(\mathbf{r})$$

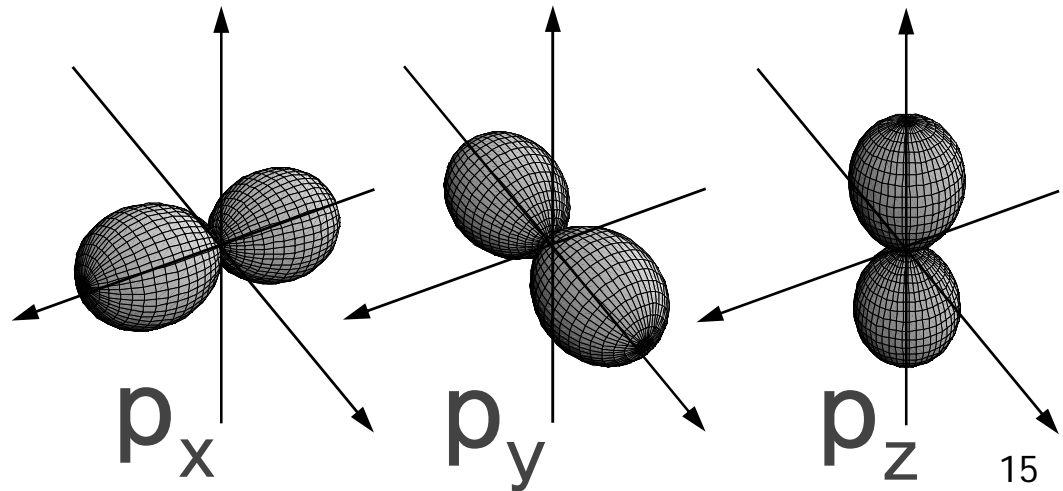
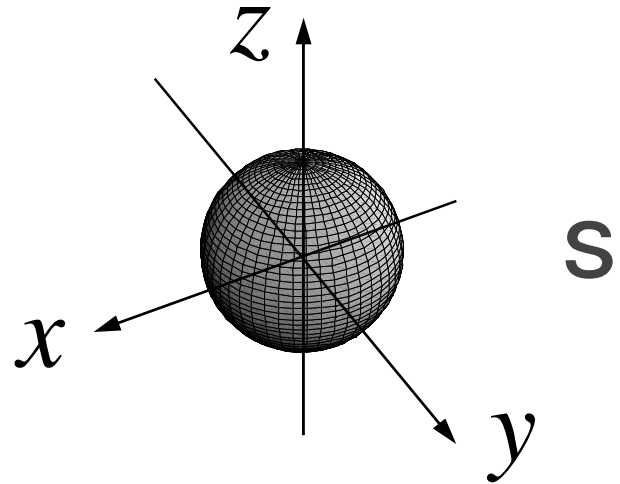
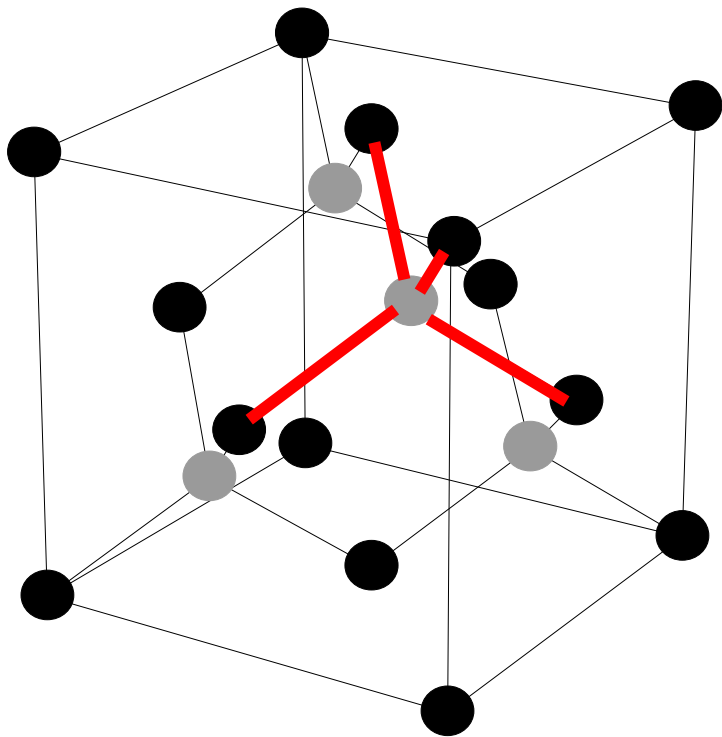
$$H_{\text{SO}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Ze^2}{2m^2} \frac{1}{r^3} \mathbf{l} \cdot \mathbf{s}$$



Nucleus

# 閃亜鉛鋅構造の軌道

$sp^3$ 混成軌道

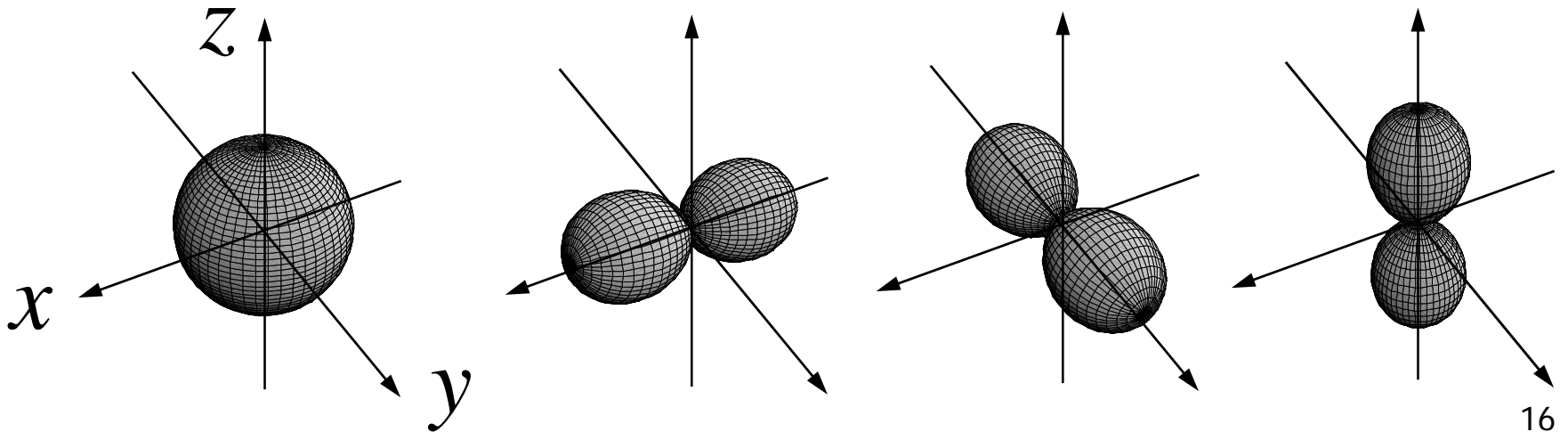


# 閃亜鉛鋅構造の波動関数

## ■ $sp^3$ 混成軌道

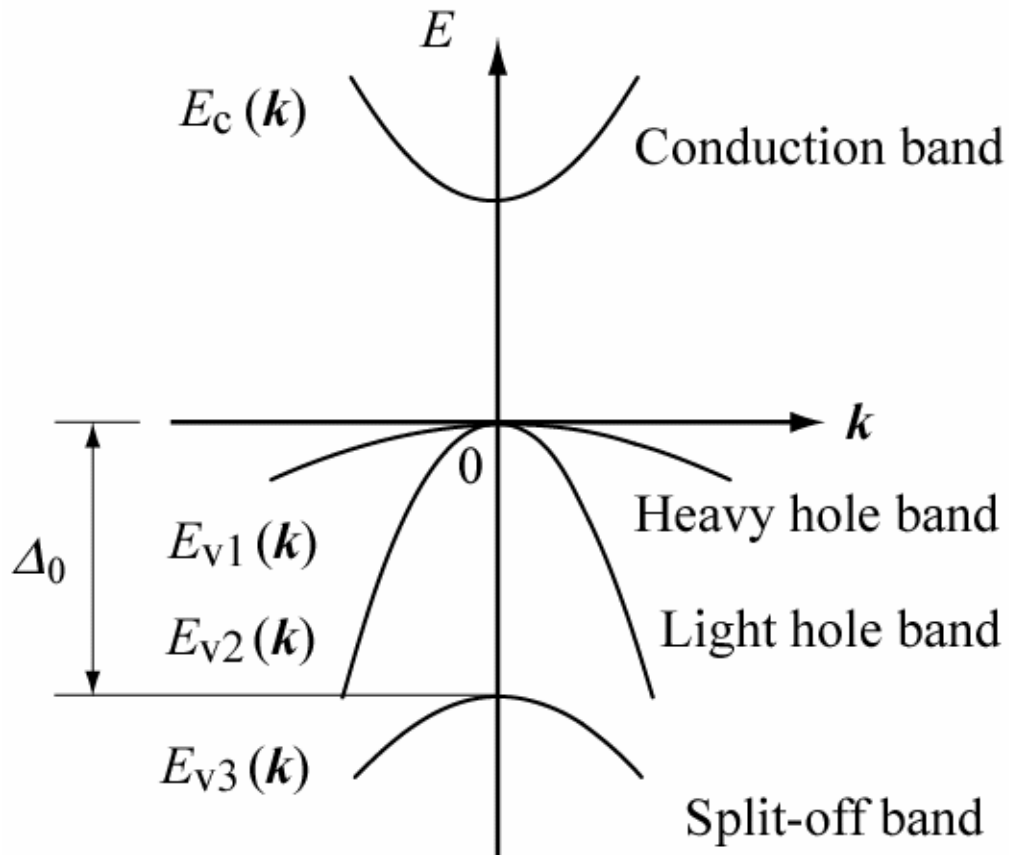
$$u_{nk}(\mathbf{r}) =$$

$$Au_s(\mathbf{r}) + Bu_x(\mathbf{r}) + Cu_y(\mathbf{r}) + Du_z(\mathbf{r})$$

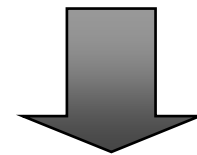




# 伝導帯と価電子帯



サイクロトロン  
共鳴



有効質量

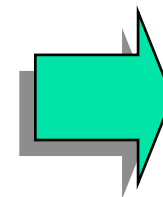
# 有効質量

## ■ エネルギーと有効質量

$$E(\mathbf{k}) = E_0 + \frac{\hbar^2}{2} \sum_{i,j} \left( \frac{1}{m} \right)_{i,j} k_i k_j$$

$$\left( \frac{1}{m} \right)_{i,j} \equiv \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 E}{\partial k_i \partial k_j}$$

結晶ポテンシャル



質量に  
繰込み

# 価電子帯の波動関数

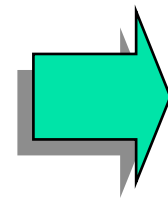
## ■ 全角運動量演算子 $j$

$$j = l + s$$

$\left\{ \begin{array}{l} l: \text{軌道角運動量演算子} \\ s: \text{スピン演算子} \end{array} \right.$

$j^2$ の固有値:  $j(j+1)\hbar^2$

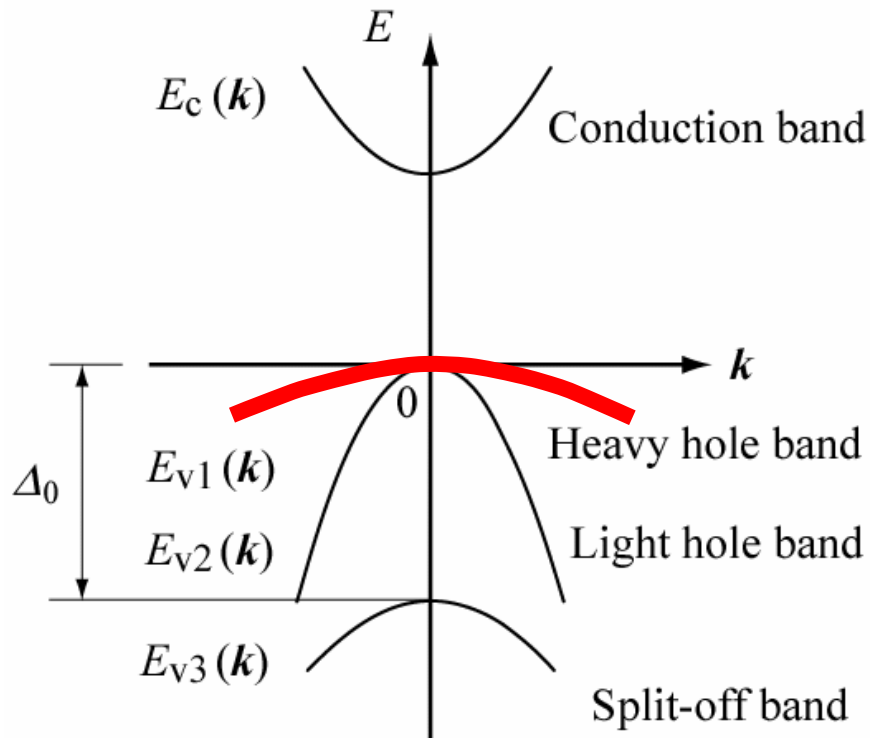
$j_z$ の固有値:  $m_j\hbar$



$$|j, m_j\rangle$$

# 価電子帯の波動関数

## ■ 重い正孔バンド

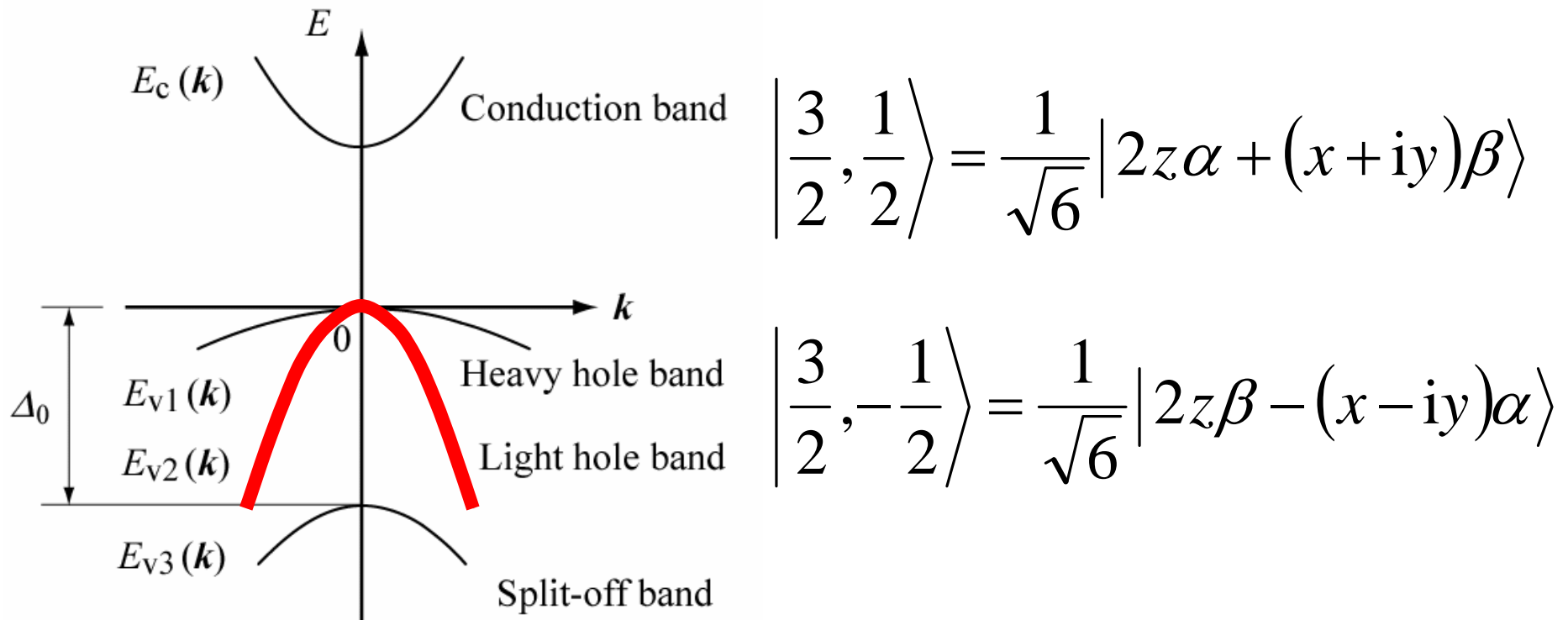


$$\left| \frac{3}{2}, \frac{3}{2} \right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |(x + iy)\alpha\rangle$$

$$\left| \frac{3}{2}, -\frac{3}{2} \right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |(x - iy)\beta\rangle$$

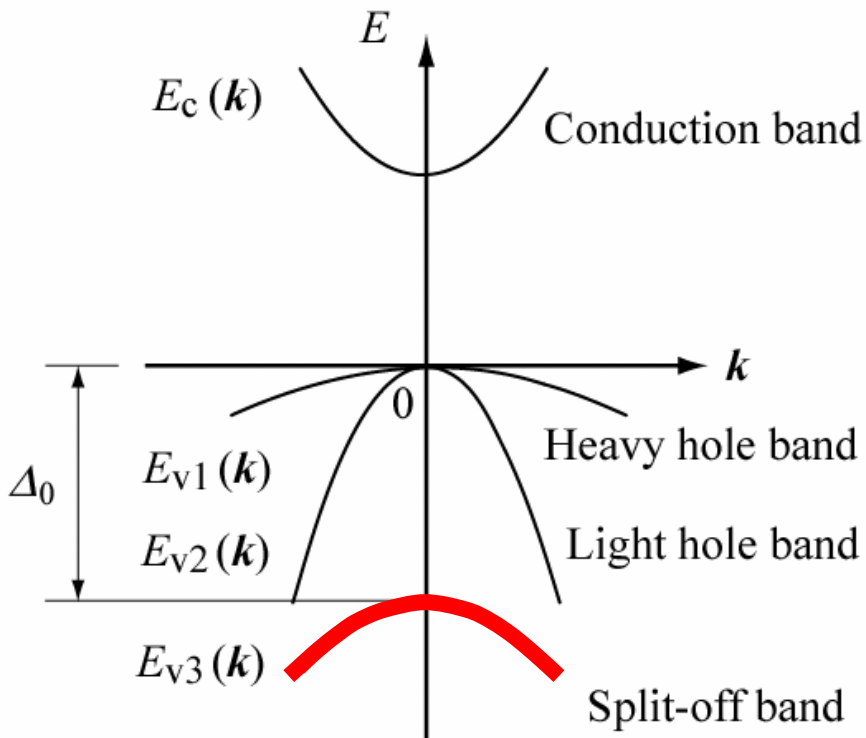
# 価電子帯の波動関数

## ■ 軽い正孔バンド



# 価電子帯の波動関数

## ■ スプリットオフバンド



$$\left| \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}} |z\alpha - (x + iy)\beta\rangle$$

$$\left| \frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}} |z\beta + (x - iy)\alpha\rangle$$