

7038

# パワーエレクトロニクス（2回目）

## 半導体の物理

2025年10月3日

神野 崇馬

[soma.jinno@oit.ac.jp](mailto:soma.jinno@oit.ac.jp)

# 本日の目標

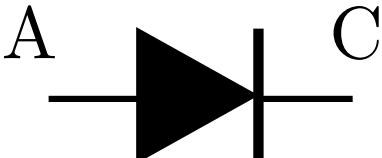
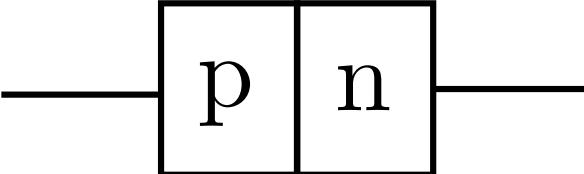
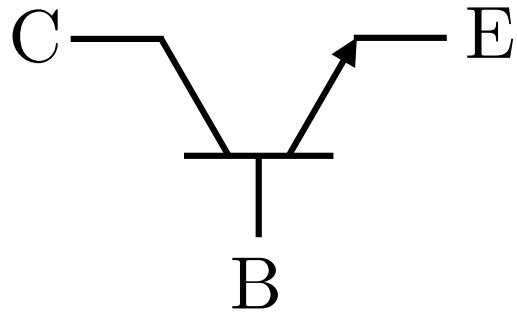
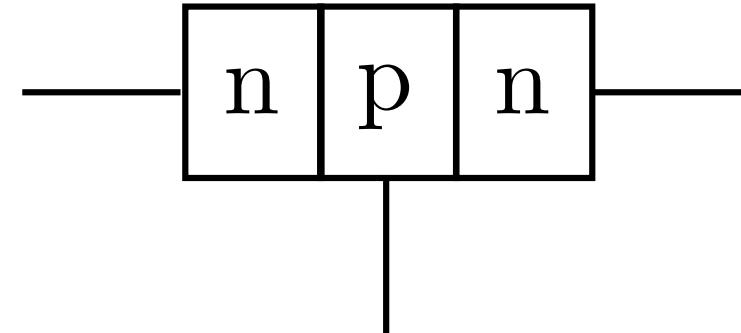
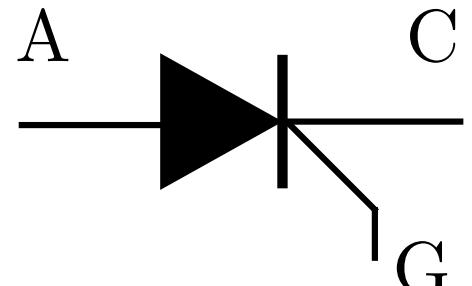
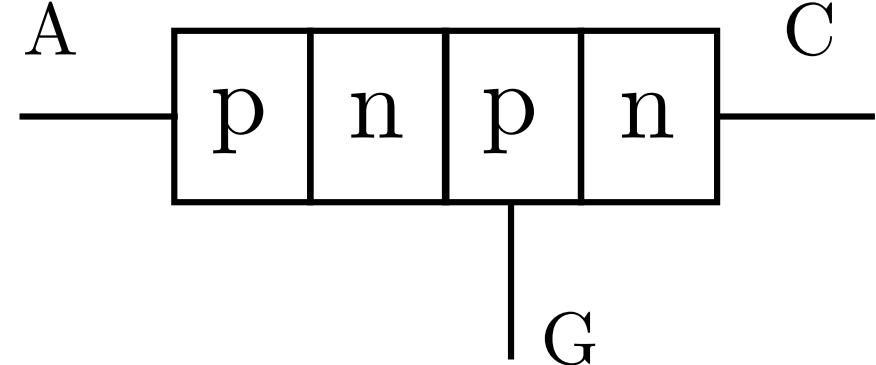
スイッチング素子である半導体の物理を理解する



- ・ 半導体の基本である**バンド理論**について理解する
- ・ **p-n接合**で起こる物理現象を理解する
- ・ **金属-半導体接合**で起こる物理現象を理解する
- ・ 電磁気学の観点からバンドが描ける

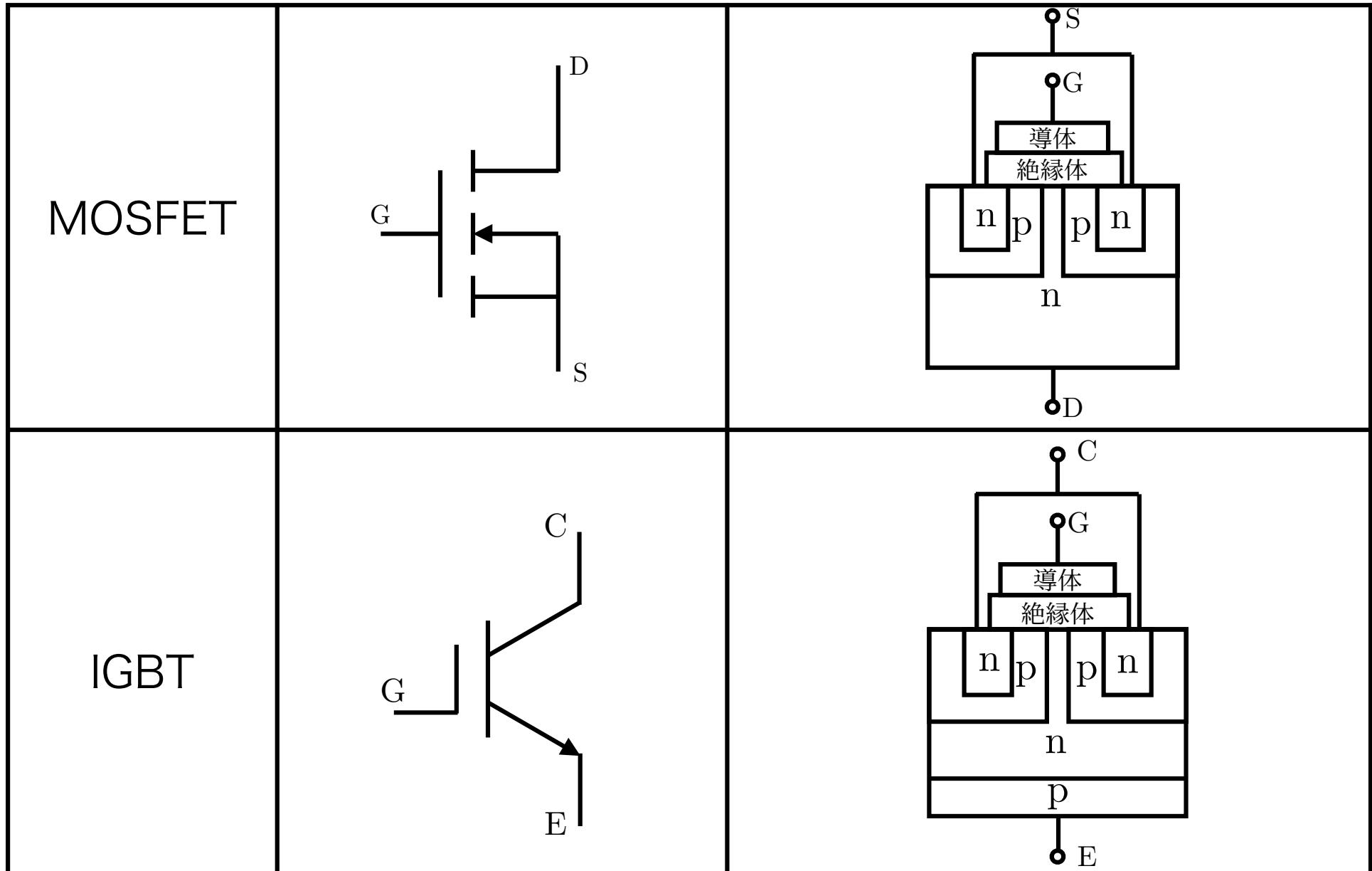
# パワーエレクトロニクスで用いる半導体

半導体の**pn接合**で動作している

ダイオード		
トランジスタ		
サイリスタ		

# パワーエレクトロニクスで用いる半導体

半導体の**pn接合+絶縁体+導体（金属）**で動作している



# 半導体とは？

半導体とは、電流を流したり、流さなかつたりする物質



電流は電荷（電子・正孔）が移動することで生じる現象

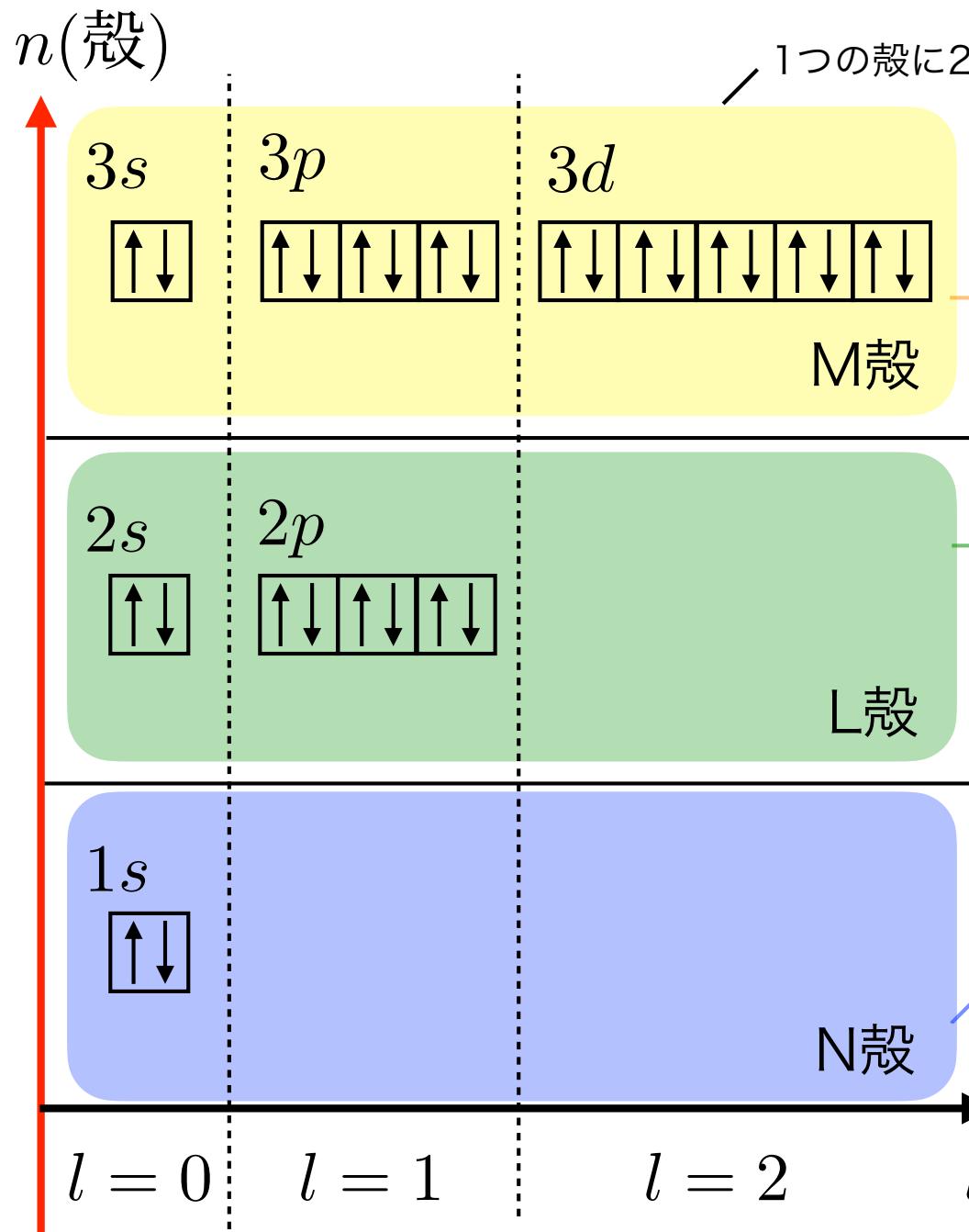


導体、半導体、絶縁体は電子の移動のしやすさで決まる

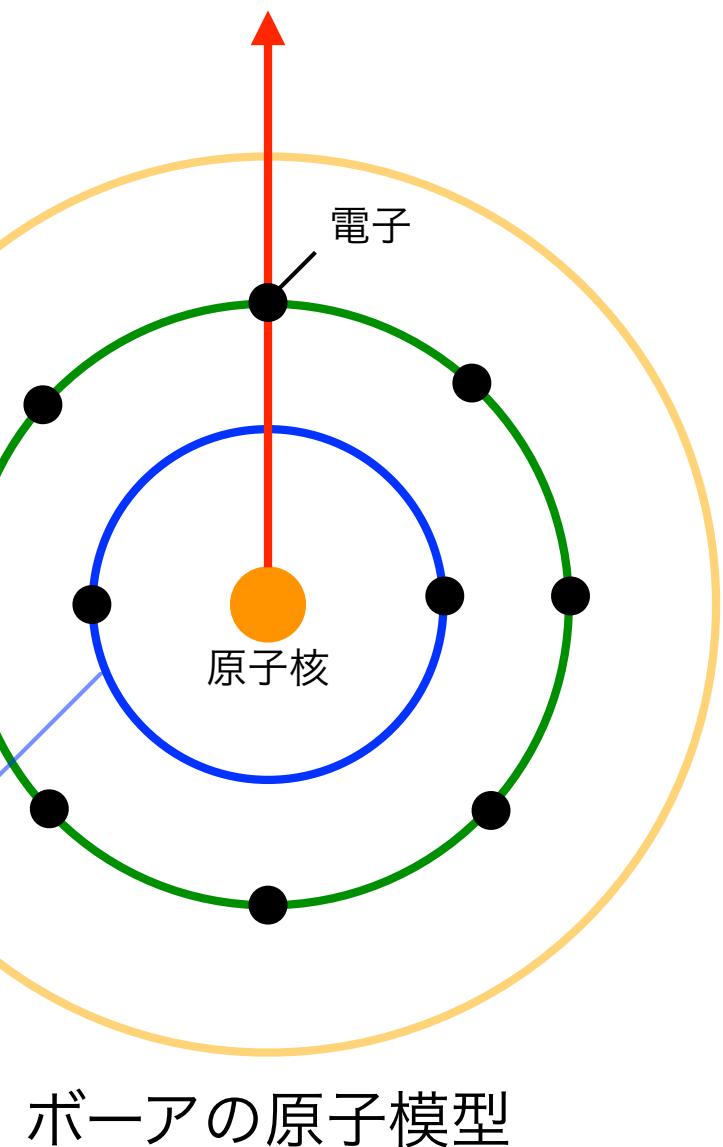


電子の移動のしやすさは何が決めている？

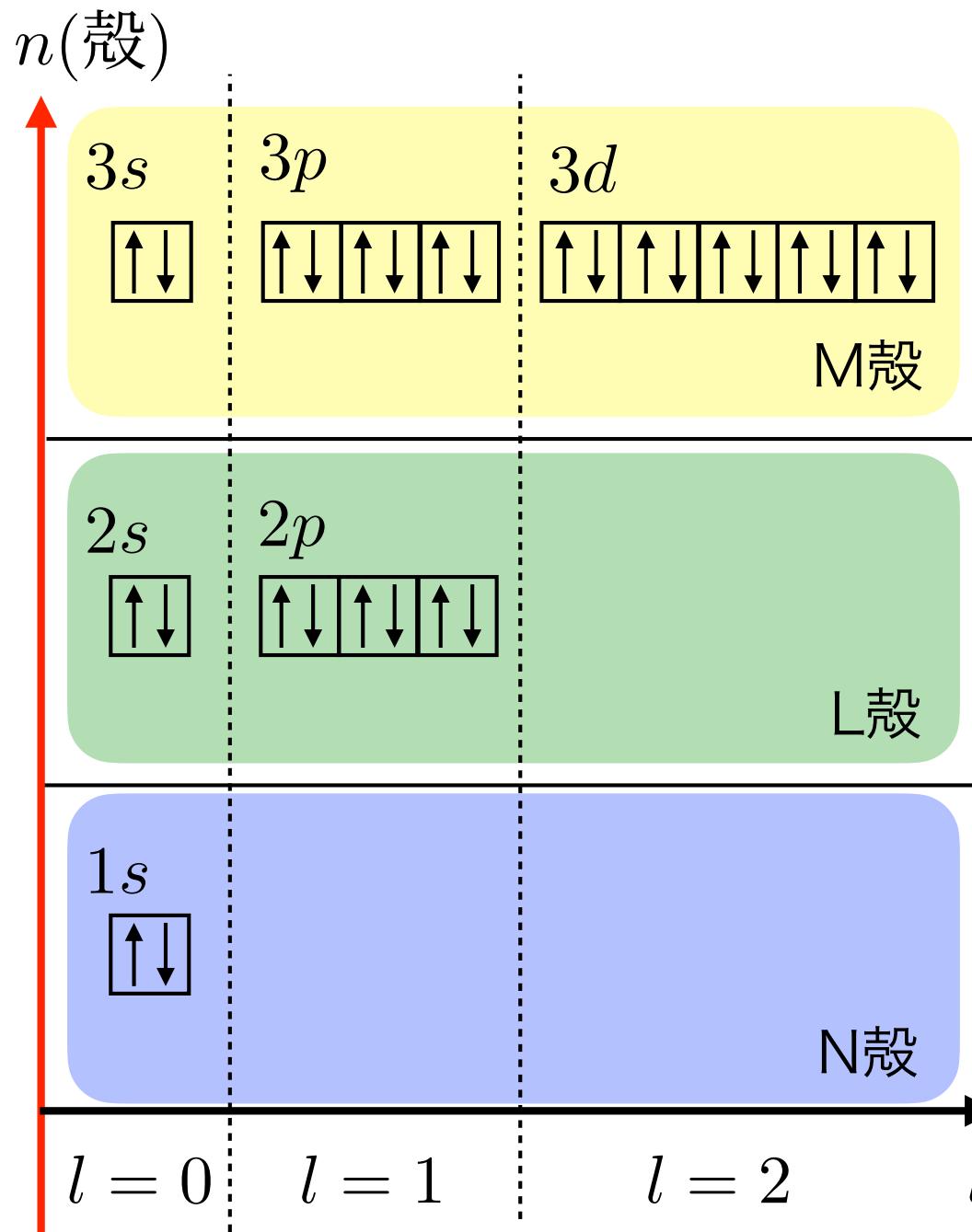
# 電子はどこにいる？



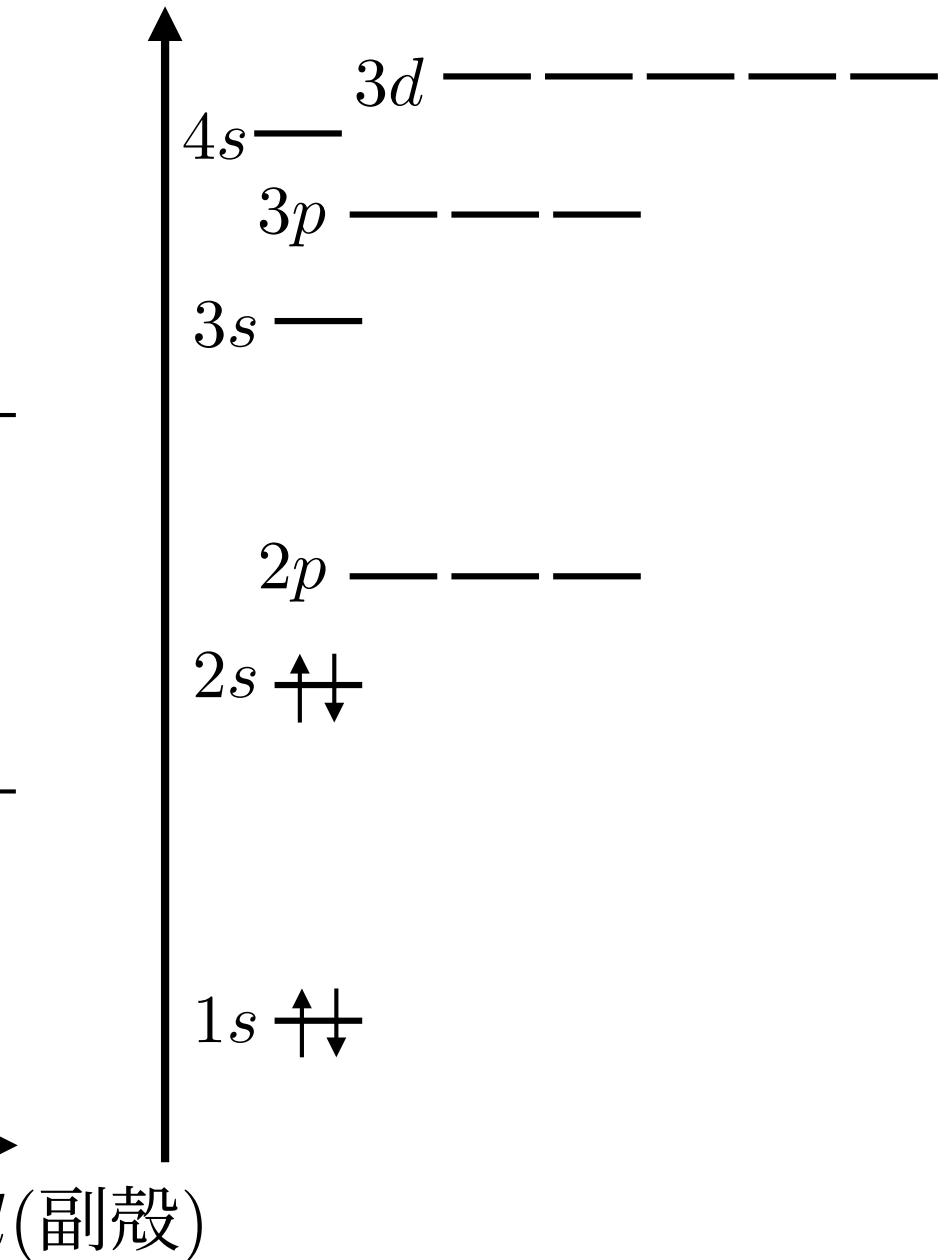
電子は原子核の周りの  
軌道上に存在する



# 電子はどこにいる？

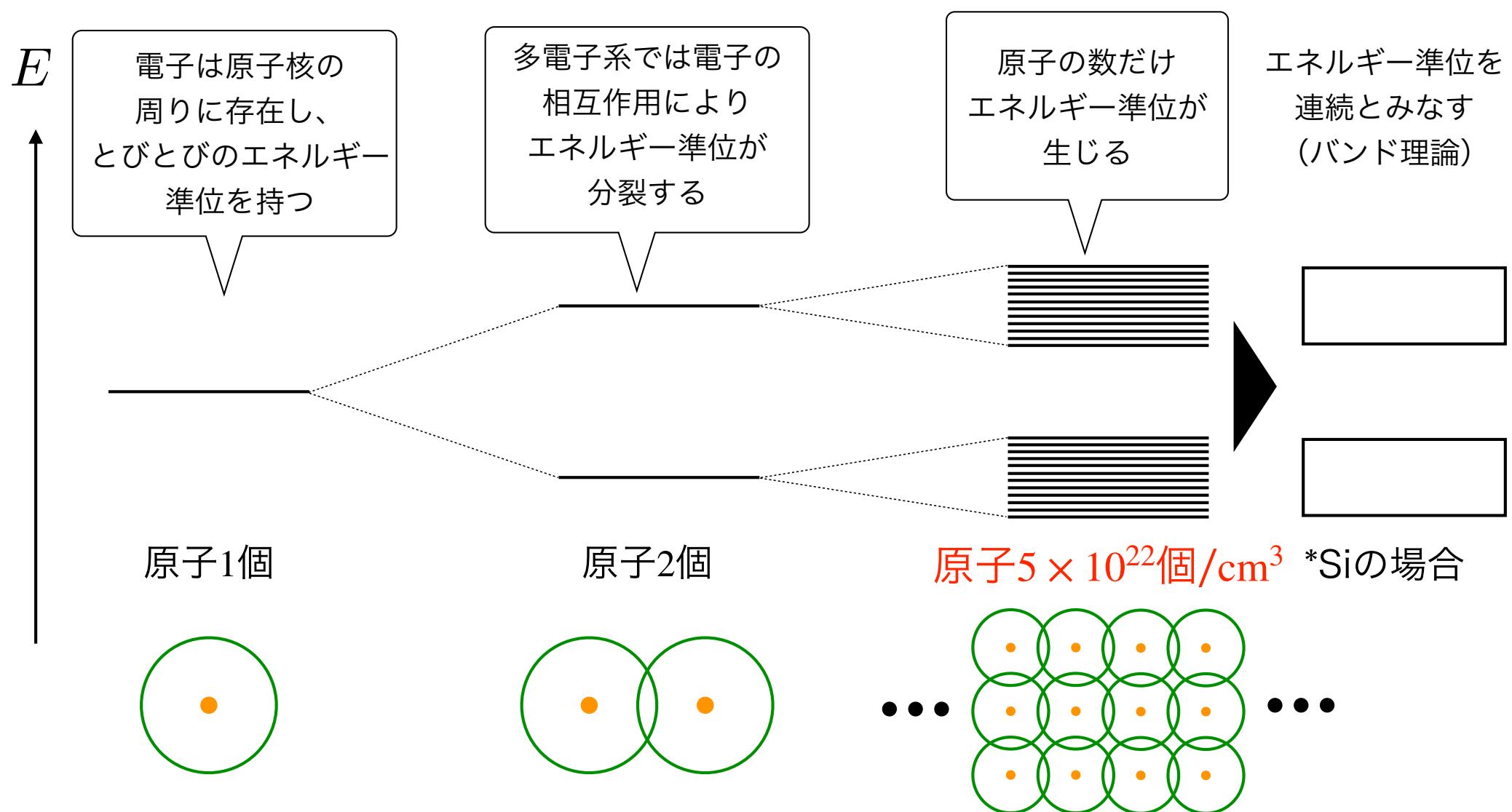


軌道は固有のエネルギーを持ち、  
低い方から順番に占有される



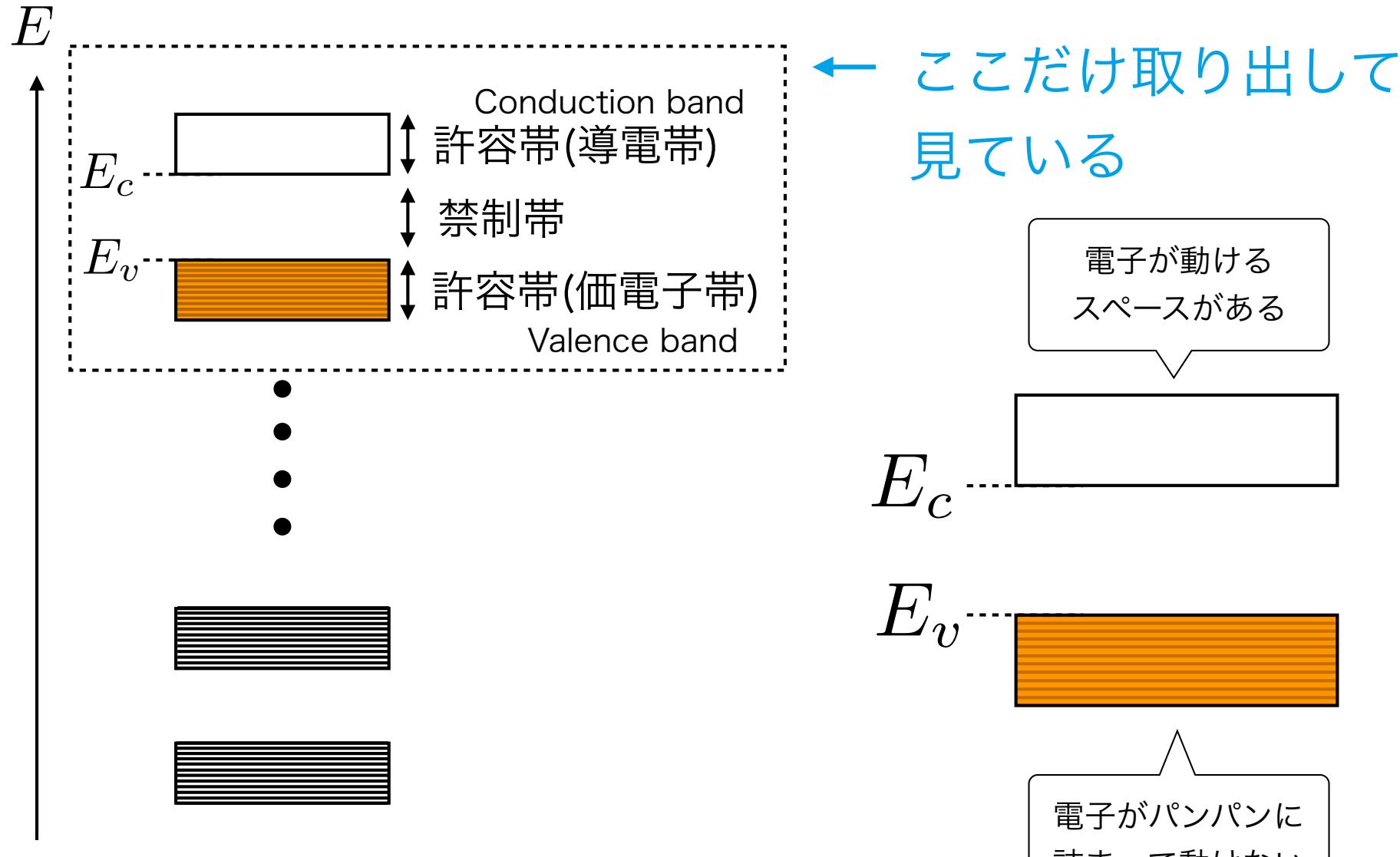
# バンド理論の概念

バンドは電子が存在できるエネルギー準位の集まりです



# エネルギー帯の扱い方

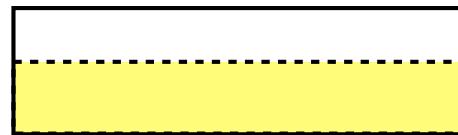
最上位のエネルギー帯（価電子帯と導電帯）を見る



# バンド図と物質の特徴

Quiz

それぞれ半導体・絶縁体・金属どの物質のバンドに対応する？



電子が導電帯に  
存在する



バンドギャップが  
比較的大きい

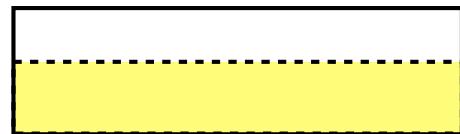


バンドギャップが  
比較的小さい

# バンド図と物質の特徴

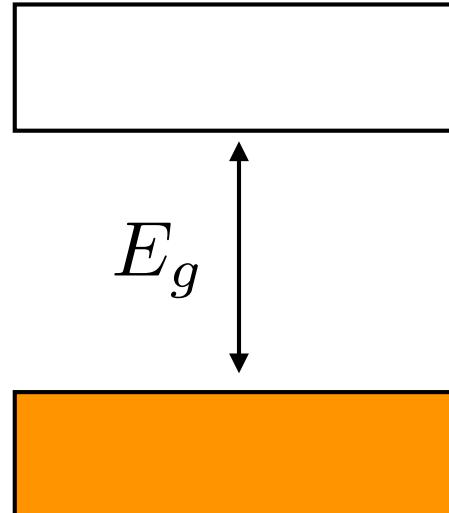
それぞれ半導体・絶縁体・金属どの物質のバンドに対応する？

導体（金属）



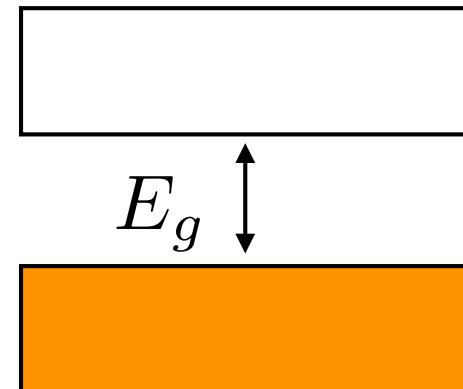
例 Cu, Al

絶縁体



例 SiO<sub>2</sub>

半導体



例 Si

$$E_g \approx 8.95 \text{ [eV]}$$

$$E_g \approx 1.1 \text{ [eV]}$$

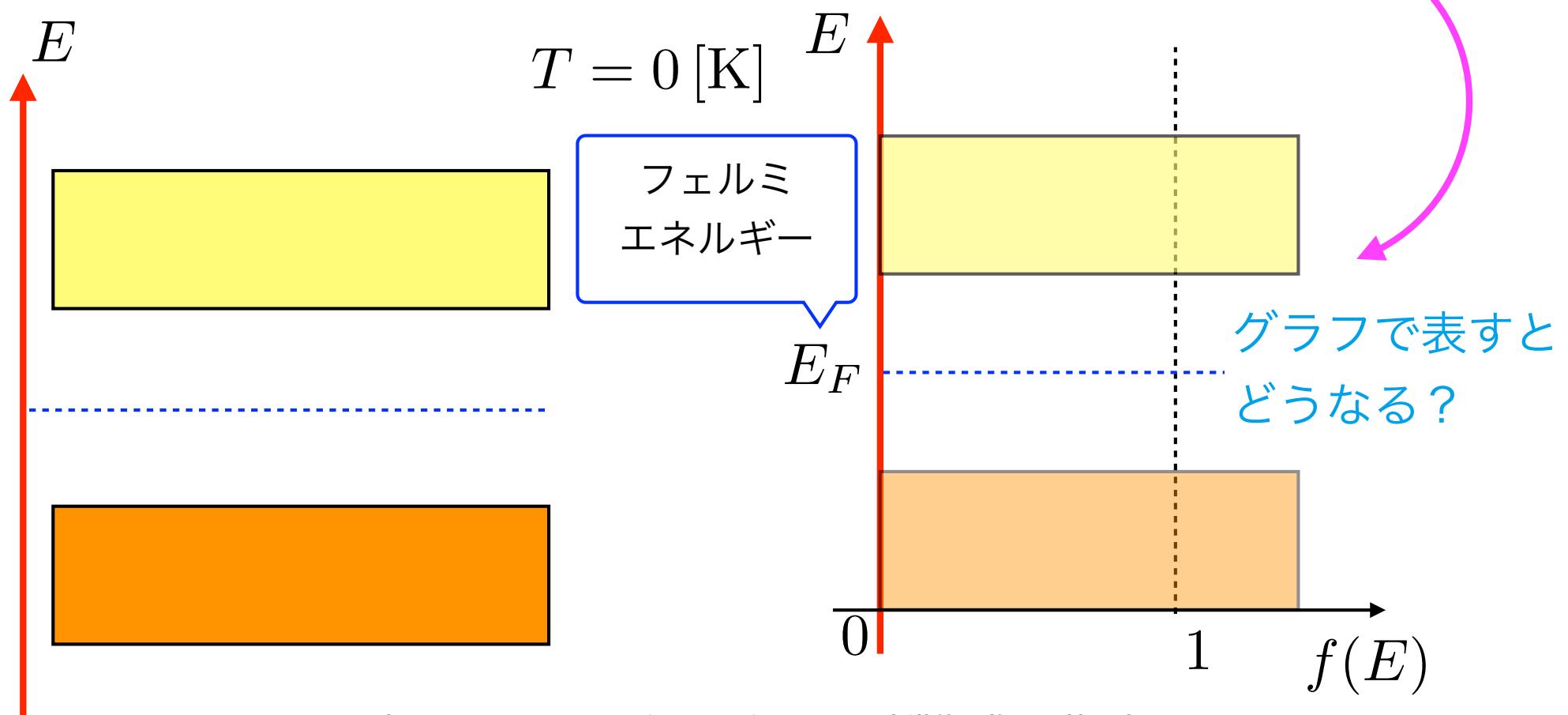
# バンド理論における電子の取り扱い

一つ一つ電子を数える  
のではなく、**統計的**に扱う

フェルミディラック分布

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)}$$

$k = 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ (ボルツマン定数)



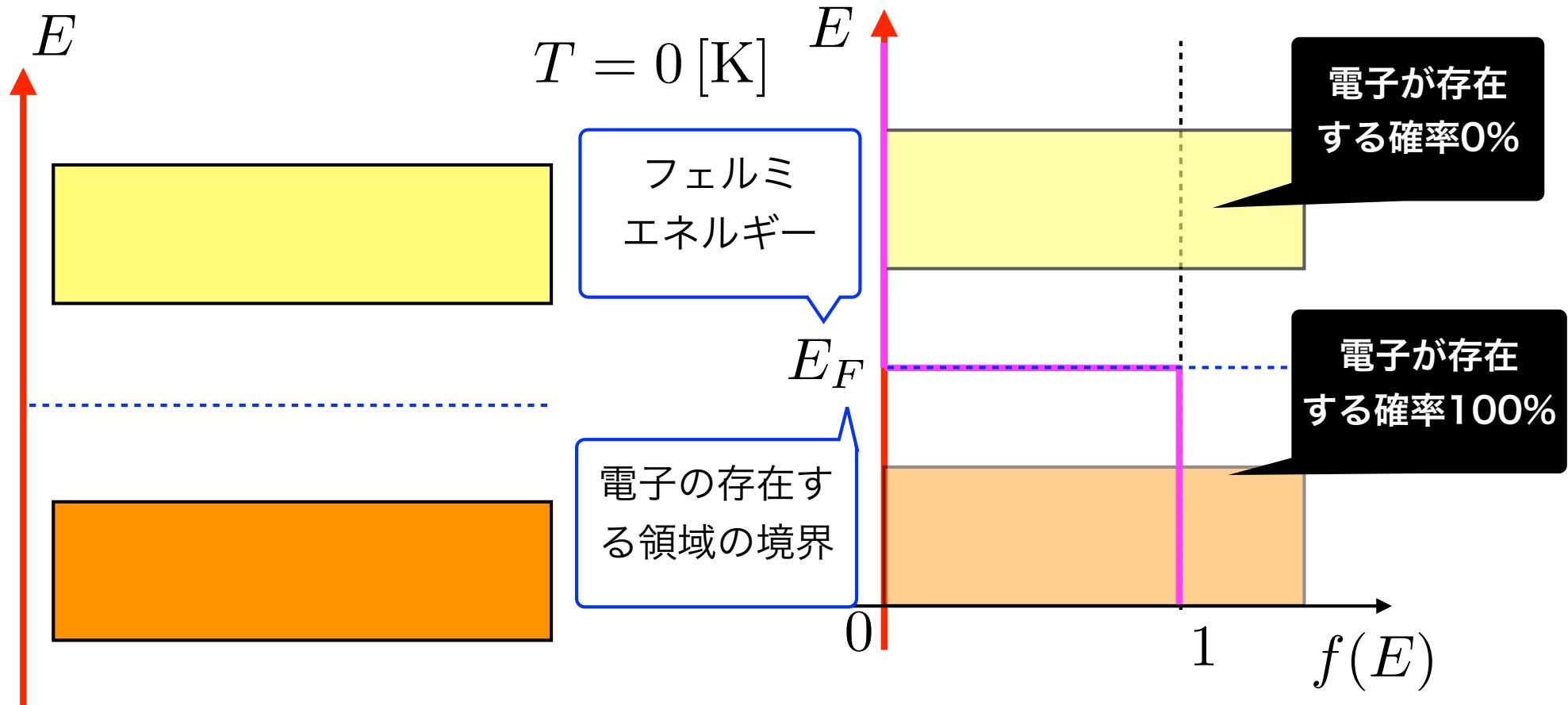
# バンド理論における電子の取り扱い

一つ一つ電子を数える  
のではなく、**統計的**に扱う

フェルミディラック分布

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)}$$

$k = 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ (ボルツマン定数)



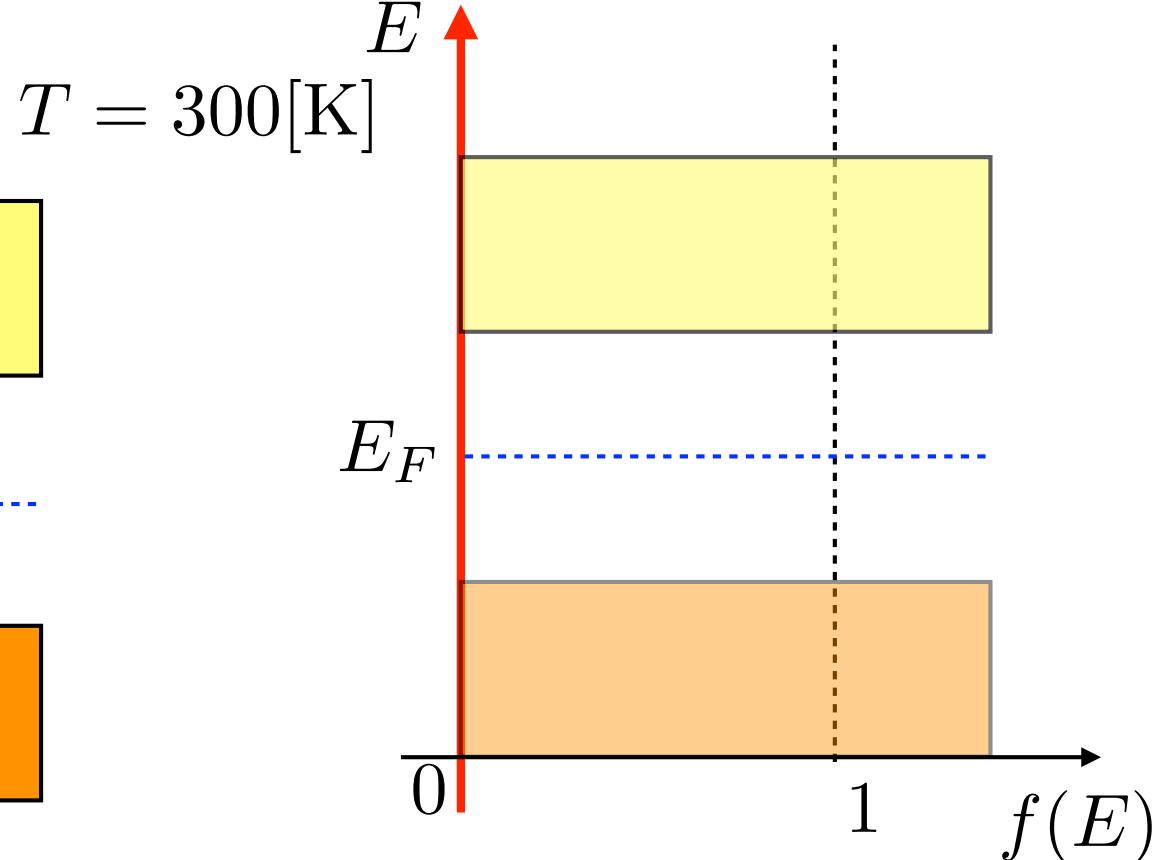
# バンド理論における電子の取り扱い

一つ一つ電子を数える  
のではなく、**統計的**に扱う

フェルミディラック分布

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)}$$

$k = 8.617 \times 10^{-5}$  eV/K(ボルツマン定数)



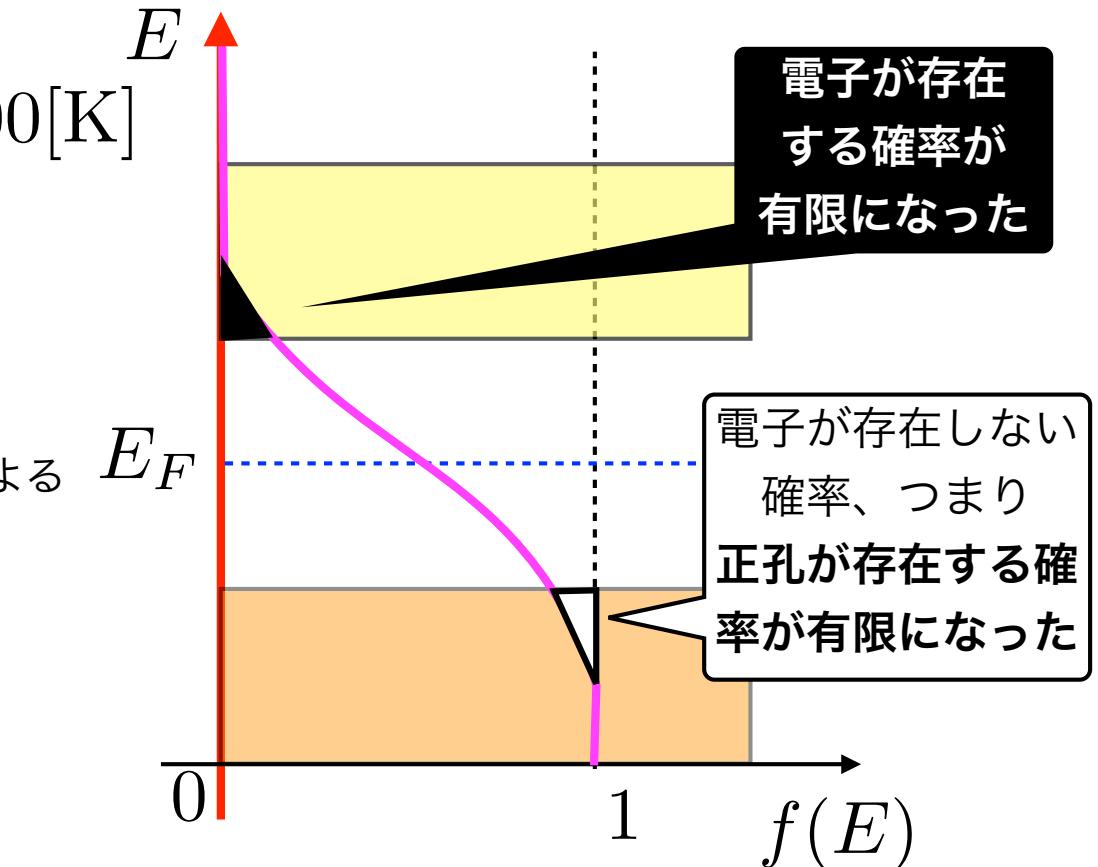
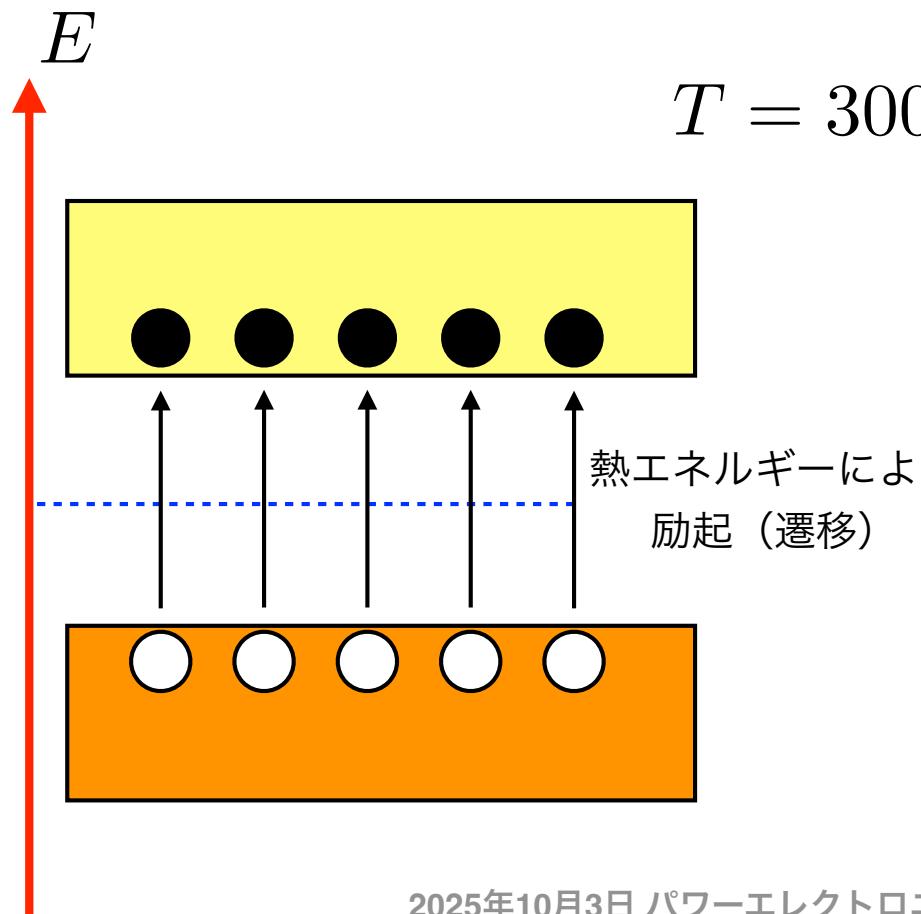
# バンド理論における電子の取り扱い

一つ一つ電子を数える  
のではなく、**統計的**に扱う

フェルミディラック分布

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)}$$

$k = 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ (ボルツマン定数)



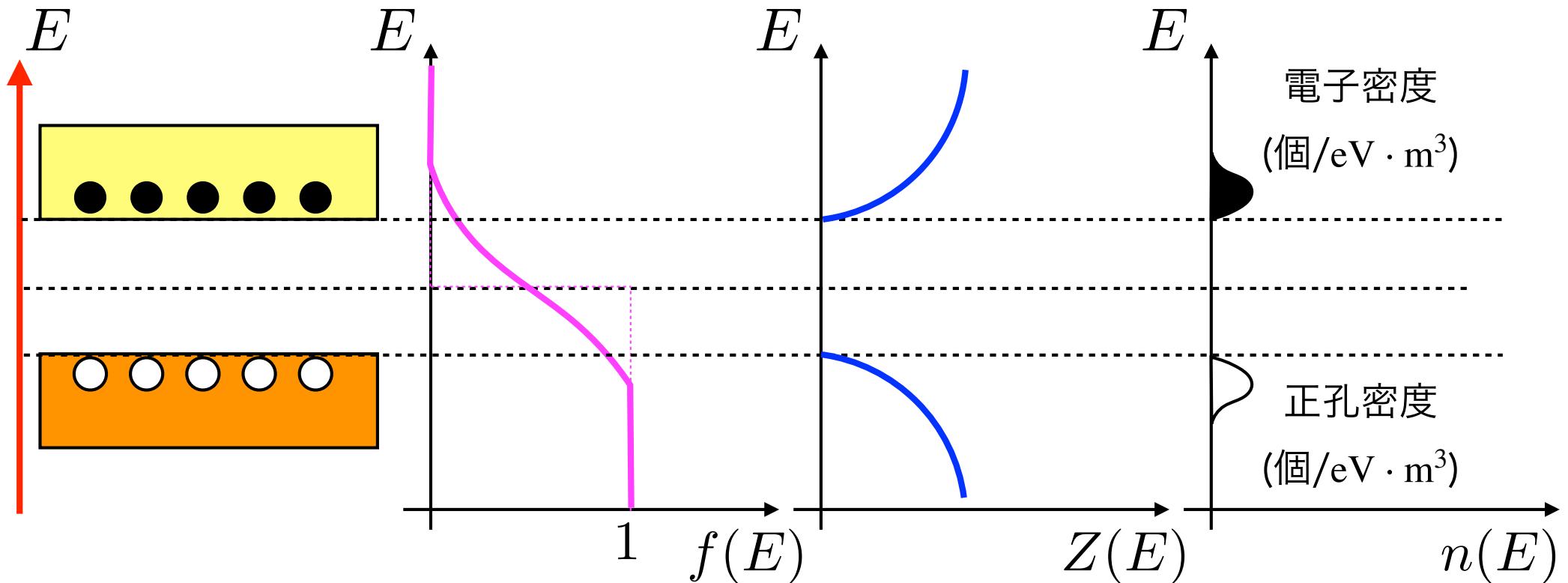
# 半導体中の電子密度

$$n(E) = f(E) \times Z(E)$$

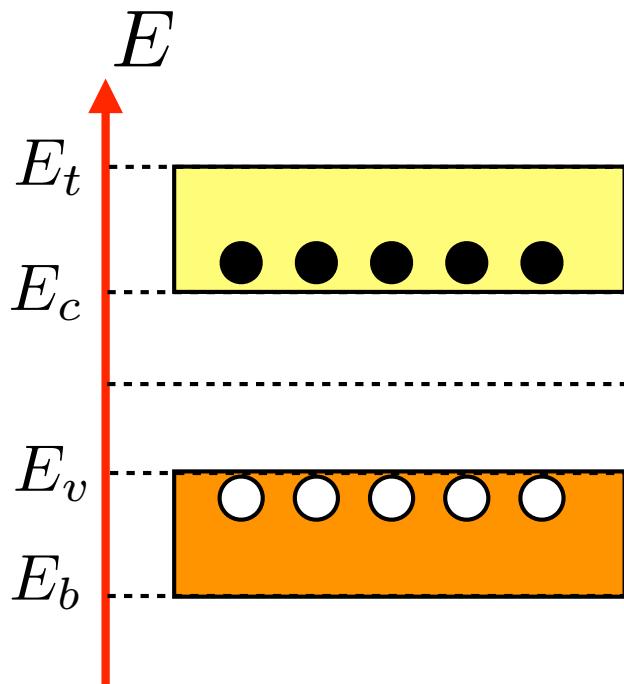
電子密度  
[個・eV<sup>-1</sup>・m<sup>-3</sup>]

電子の存在確率  
[個]

状態密度  
[eV<sup>-1</sup>・m<sup>-3</sup>]



# バンド内のキャリアの密度



$$n = \int_{E_c}^{E_t} f(E) Z(E) dE$$

$$= N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right) \quad [\text{m}^{-3}]$$

$N_c$  : 導電帯の有効状態密度

$$p = \int_{E_b}^{E_v} (1 - f(E)) Z(E) dE$$

$$= N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right) \quad [\text{m}^{-3}]$$

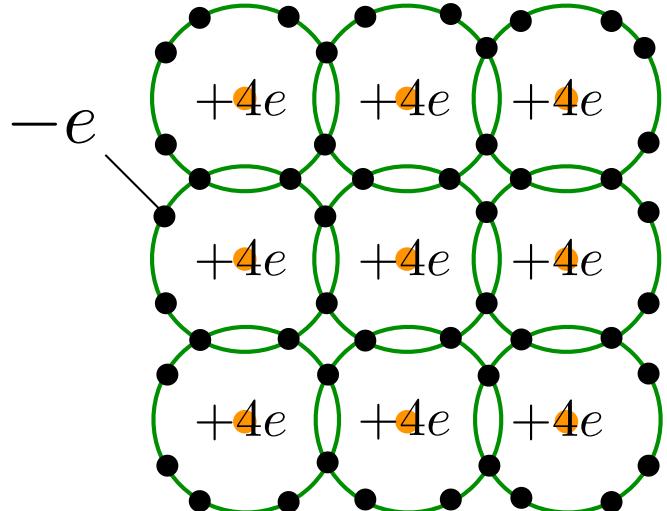
$N_v$  : 僮電子帯の有効状態密度

# n型半導体の作り方

電気的に中性

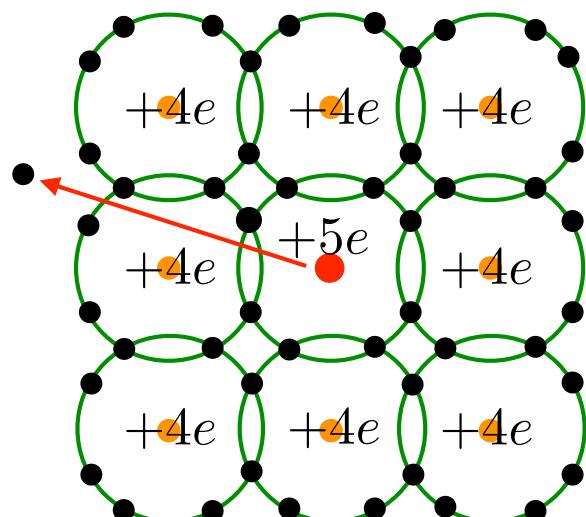
真性半導体

Si (4価) 結晶



n型半導体

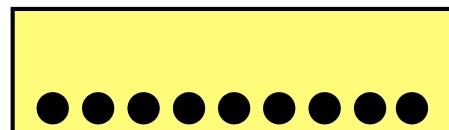
5価の元素 (不純物) をドーピング



共有結合により  
価電子帯の電子は  
埋まっている



不純物濃度を  
 $10^{13}$ 個/cm<sup>3</sup>から $10^{20}$ 個/cm<sup>3</sup>  
程度まで変化させる



⊕⊕⊕⊕⊕⊕⊕⊕

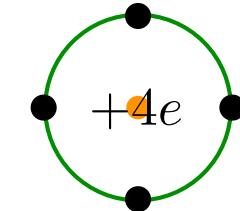
↑ ドナーイオン

共有結合の電子が余る  
↓  
伝導帶に電子が存在



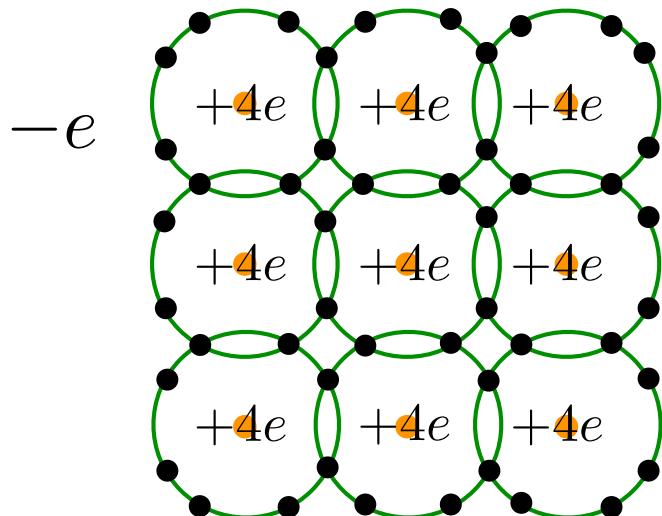
# p型半導体の作り方

電気的に中性



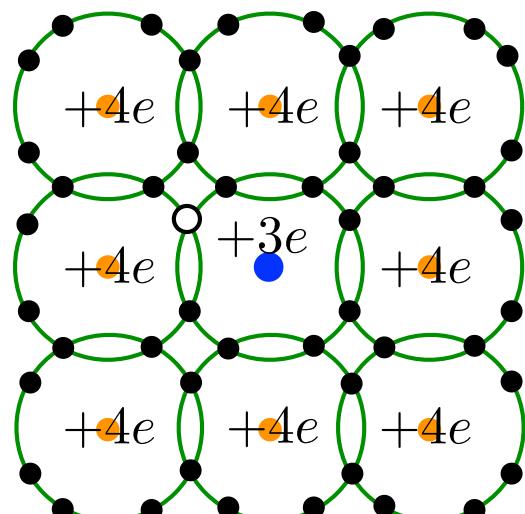
真性半導体

Si (4価) 結晶



p型半導体

3価の元素（不純物）をドーピング



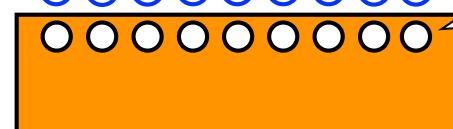
共有結合により  
価電子帯の電子は  
埋まっている



不純物濃度を  
10<sup>13</sup>個/cm<sup>3</sup>から10<sup>20</sup>個/cm<sup>3</sup>  
程度まで変化させる

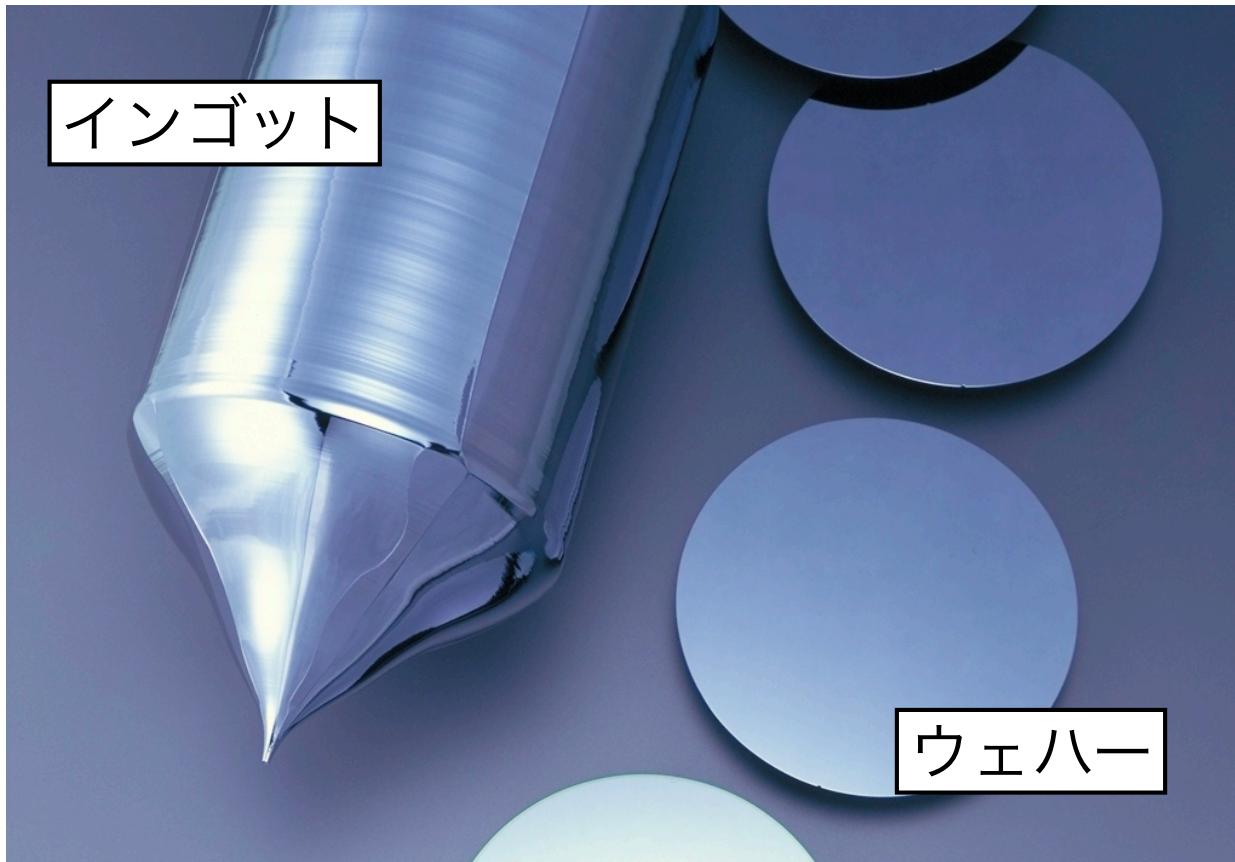


共有結合の一つの  
電子が足りなくなる  
↓  
価電子帯に正孔が存在



# 半導体の不純物濃度について

Siの純度：99.9999999% (←イレブンナイン)



不純物濃度を  
10<sup>13</sup>個/cm<sup>3</sup>から10<sup>20</sup>個/cm<sup>3</sup>  
程度まで変化させる

Siの原子密度：5 × 10<sup>22</sup>個/cm<sup>3</sup>

不純物濃度が10<sup>13</sup>個/cm<sup>3</sup>の場合  
→ 0.00000002%

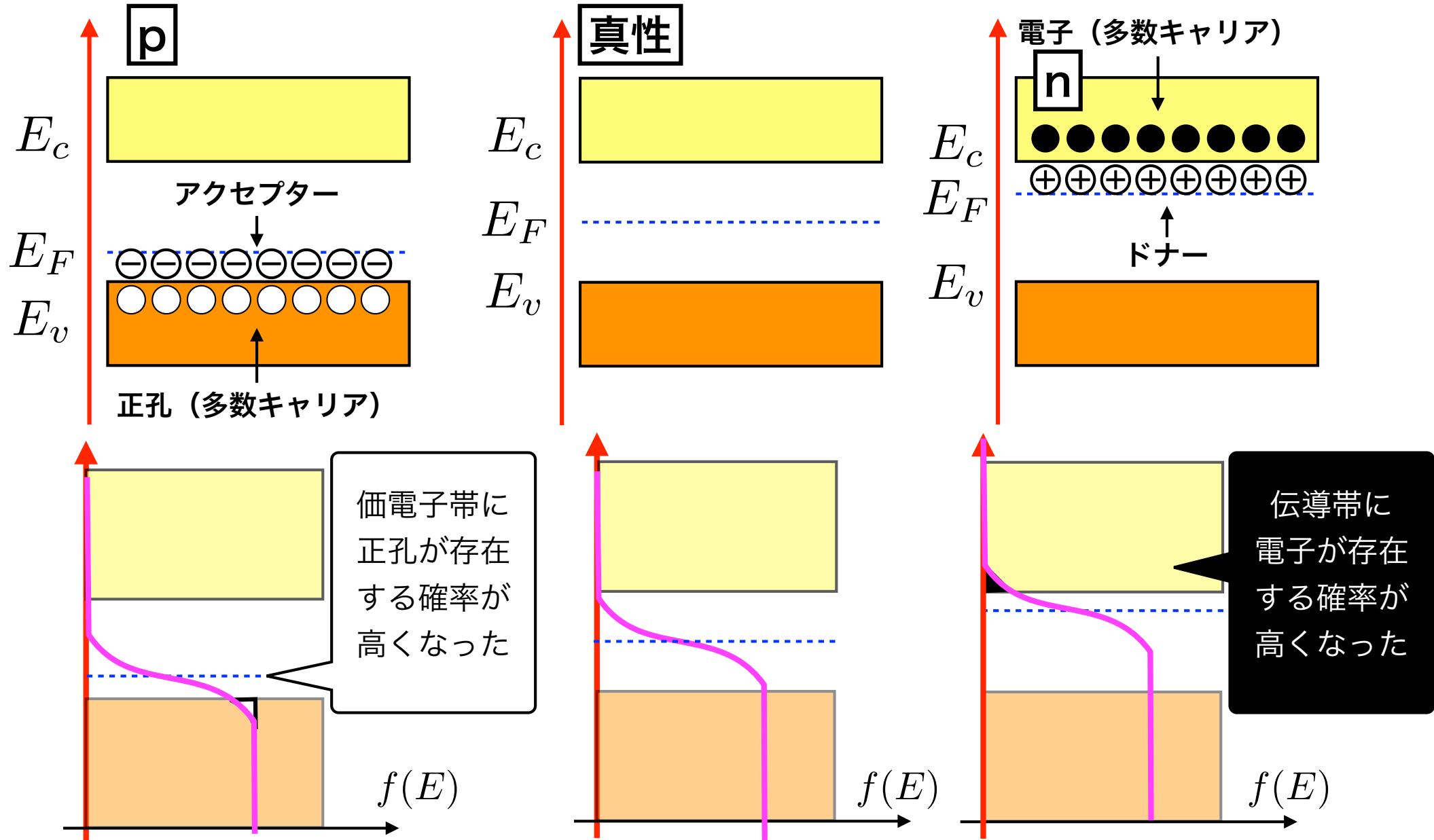
不純物濃度が10<sup>20</sup>個/cm<sup>3</sup>の場合  
→ 0.2%

信越化学工業株式会社：<https://www.shinetsu.co.jp/jp/products/%E9%9B%BB%E5%AD%90%E6%9D%90%E6%96%99%E4%BA%8B%E6%A5%AD/silicon-wafer/>

多くてもこれぐらいの割合

# n型・p型半導体のバンド図

不純物元素のドーピングにより、フェルミエネルギーが変化する

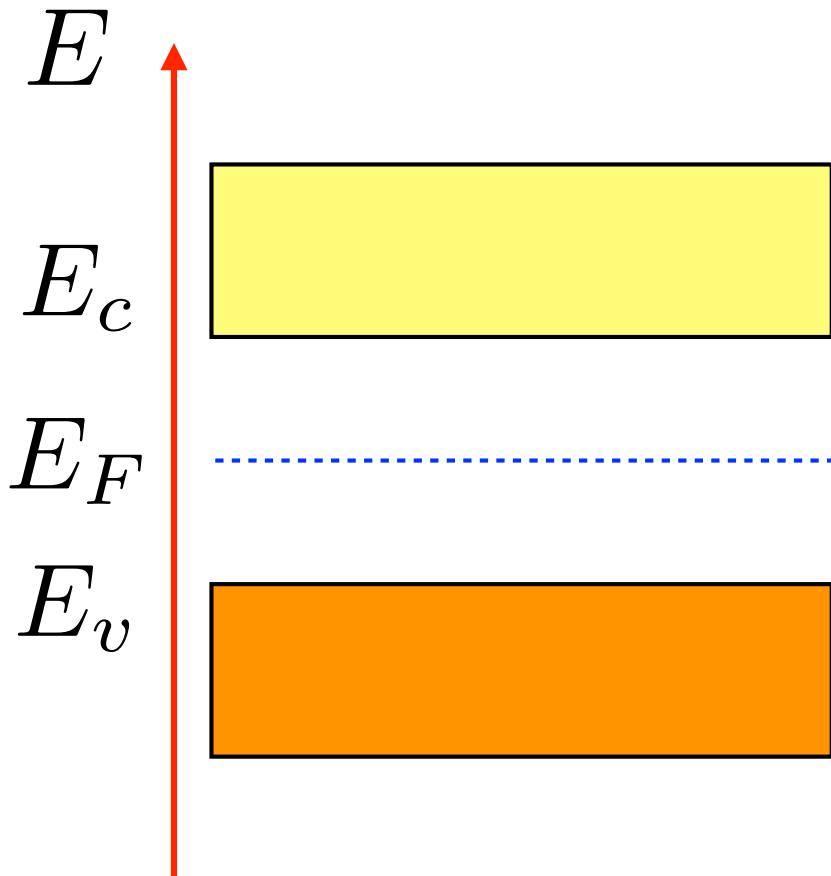


# バンド図の意味

バンドは電子が存在できる『エネルギー準位』の集まり



電磁気学でいう静電エネルギー

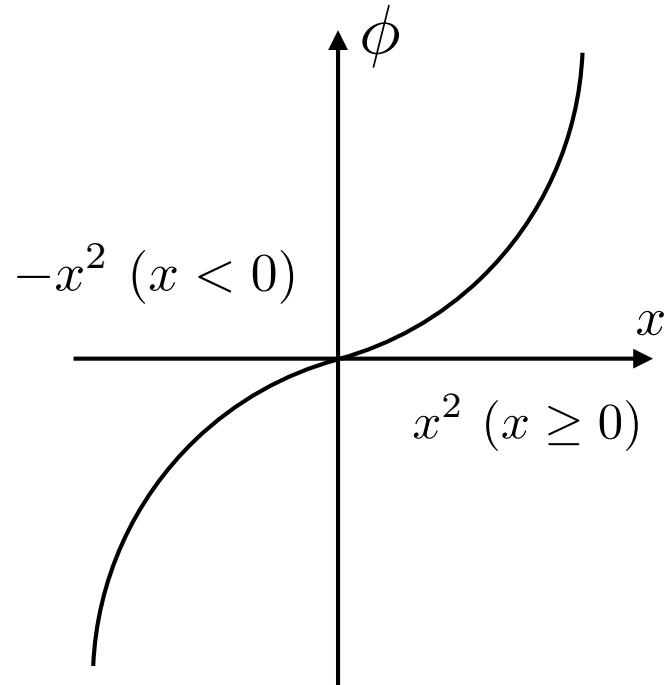


$$-e\phi \quad (e > 0)$$

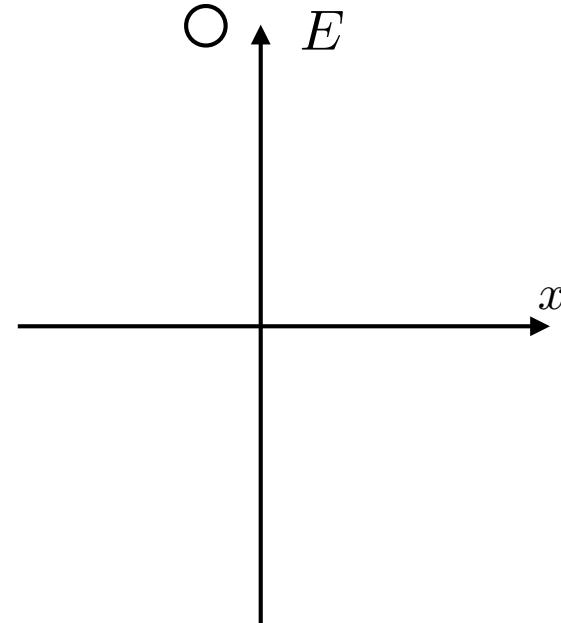
- バンド（静電エネルギー）が変化する  
↔ 電位（ポテンシャル）が変わる  
↔ 電場が生じる  
↔ 帯電している

# ポテンシャル分布・エネルギー分布・電場分布の関係

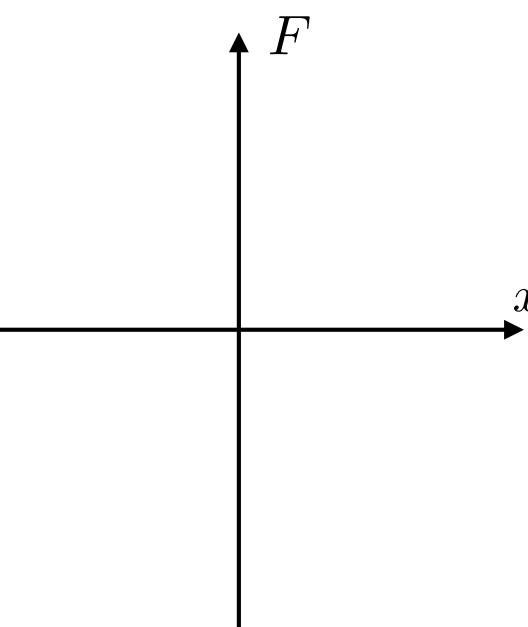
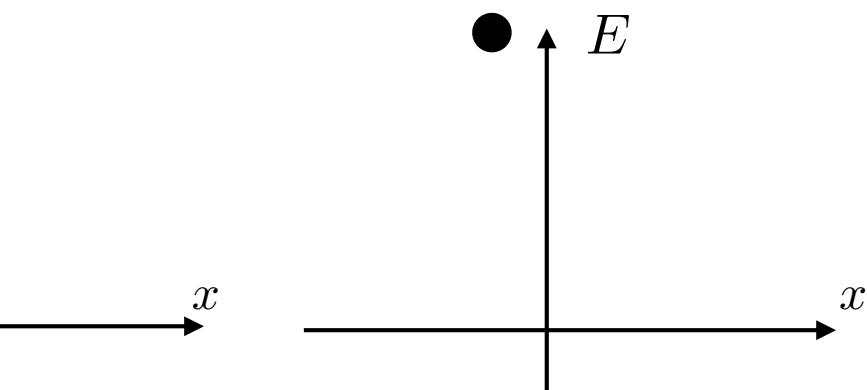
Quiz



正孔のエネルギー分布



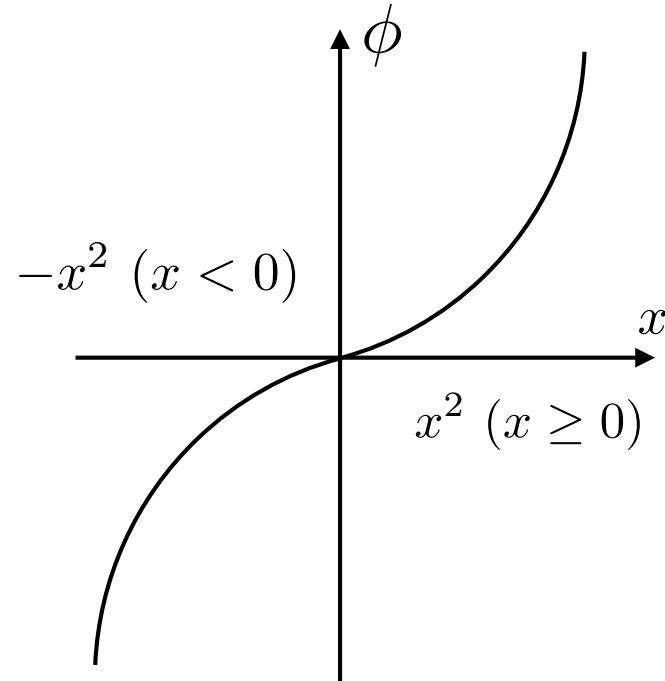
電子のエネルギー分布



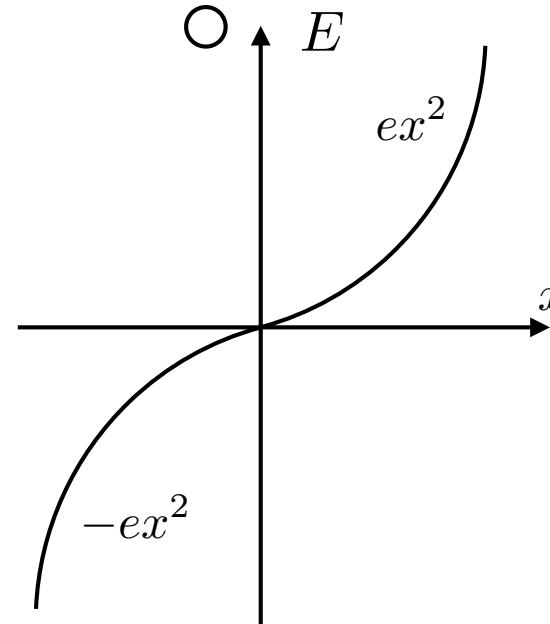
半導体は電場をF、  
エネルギーをEで  
表す慣例がある

# ポテンシャル分布・エネルギー分布・電場分布の関係

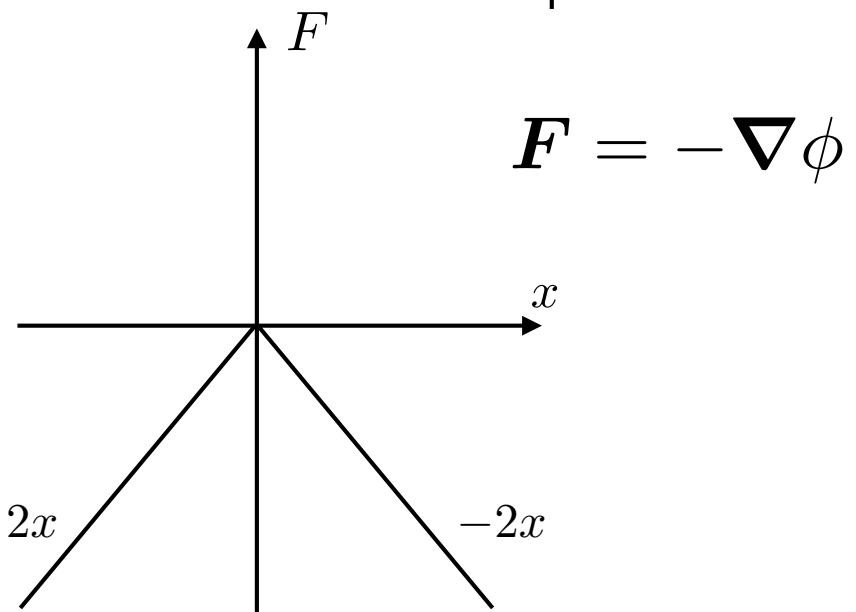
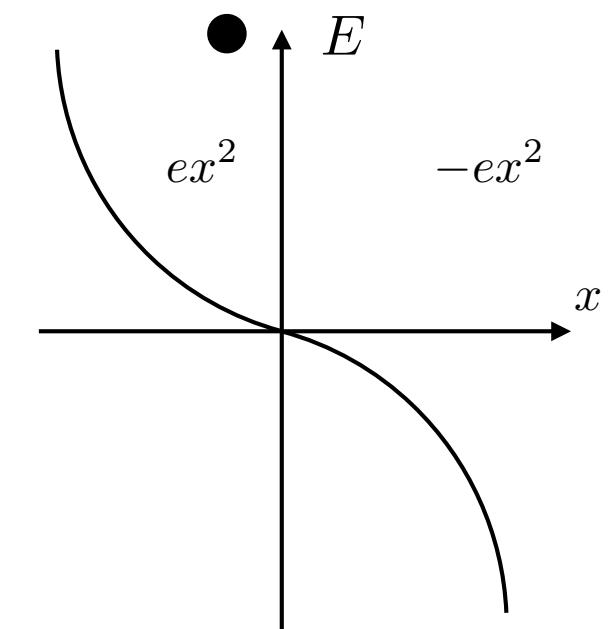
Quiz



正孔のエネルギー分布



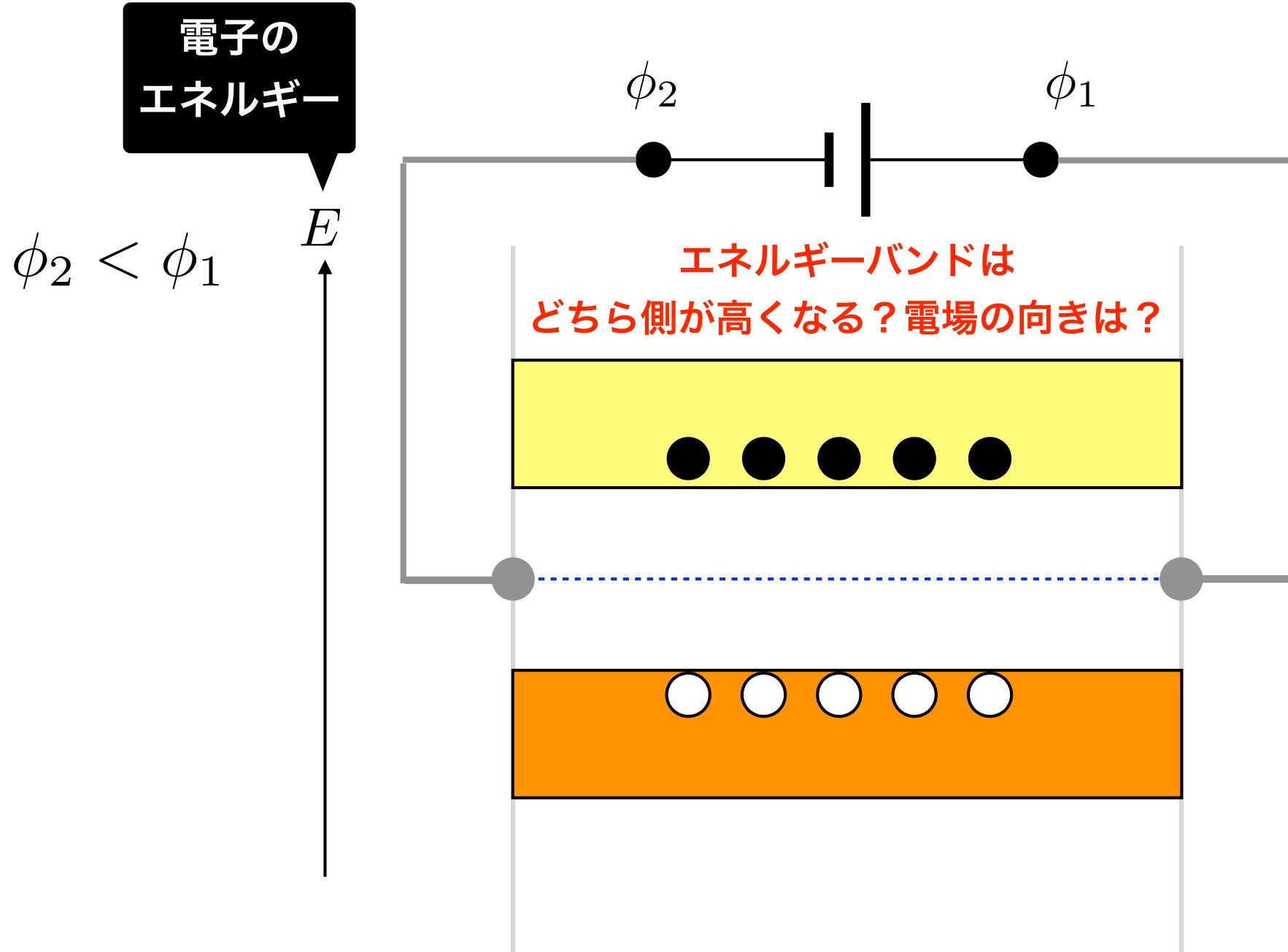
電子のエネルギー分布



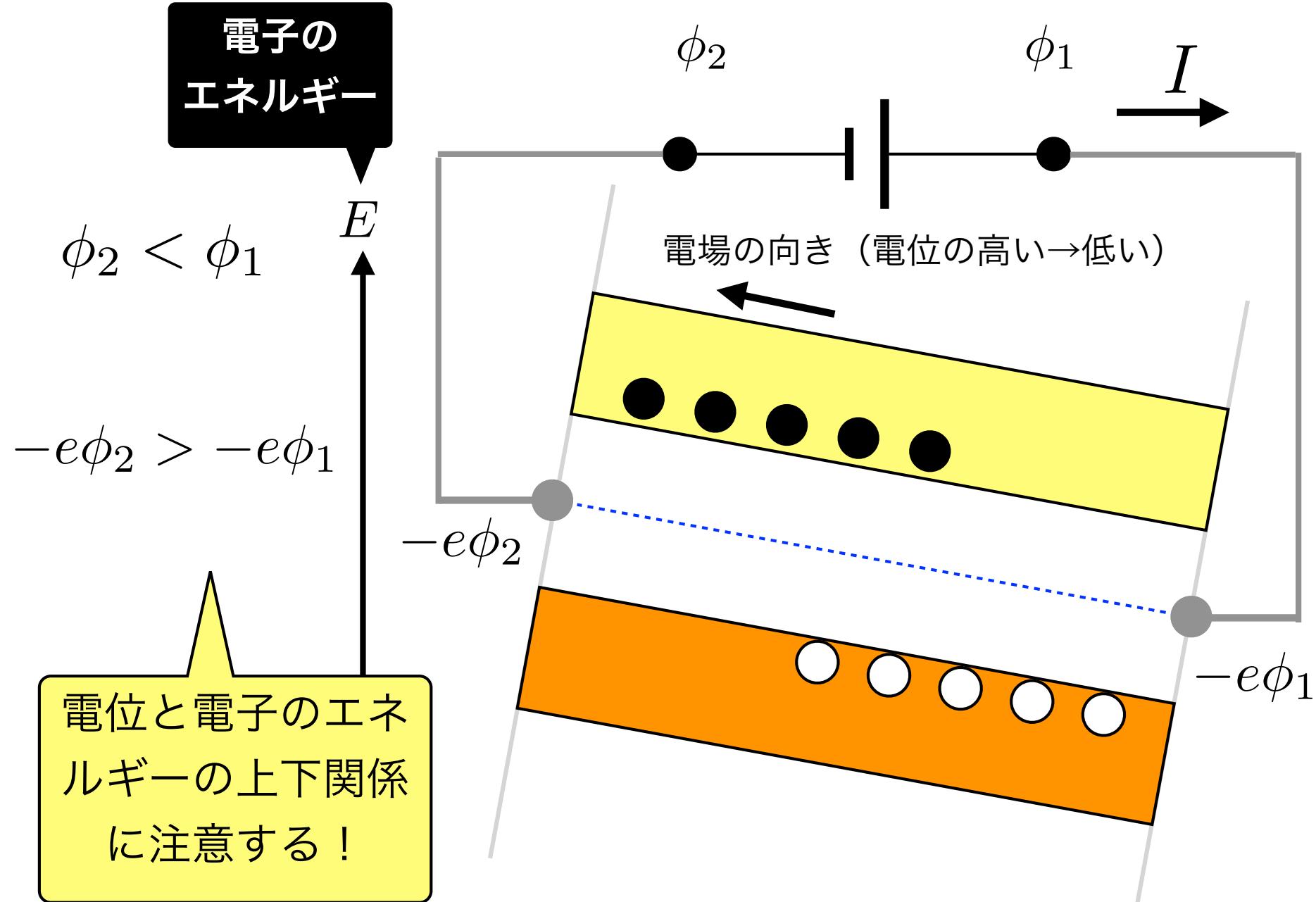
半導体は電場を $F$ 、エネルギーを $E$ で  
表す慣例がある

# バンド理論におけるエネルギーの関係

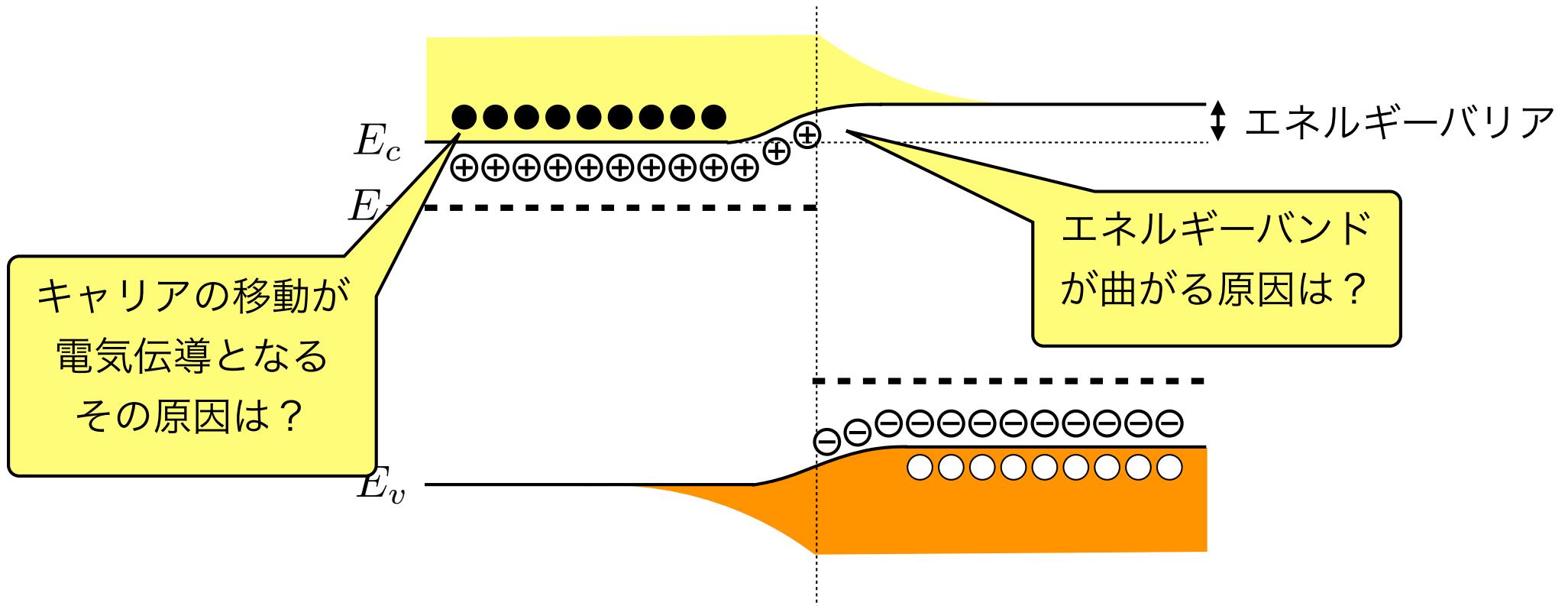
Quiz



# バンド理論におけるエネルギーの関係



# 半導体デバイスを理解するポイント



- ① キャリア（電子・正孔）の流れはどのようにして起こるのか？
- ② キャリアに対するエネルギーbarria (ポテンシャルbarria)  
はどのようにして形成されるのか？

→ それぞれ、外部電場、キャリアの濃度分布が起因となる

# ドリフト電流

キャリアが外部電場  $F$  に力を受け、移動する

$$J_n = en\mu_n F = \sigma_n F$$

$$J_p = ep\mu_p F = \sigma_p F$$

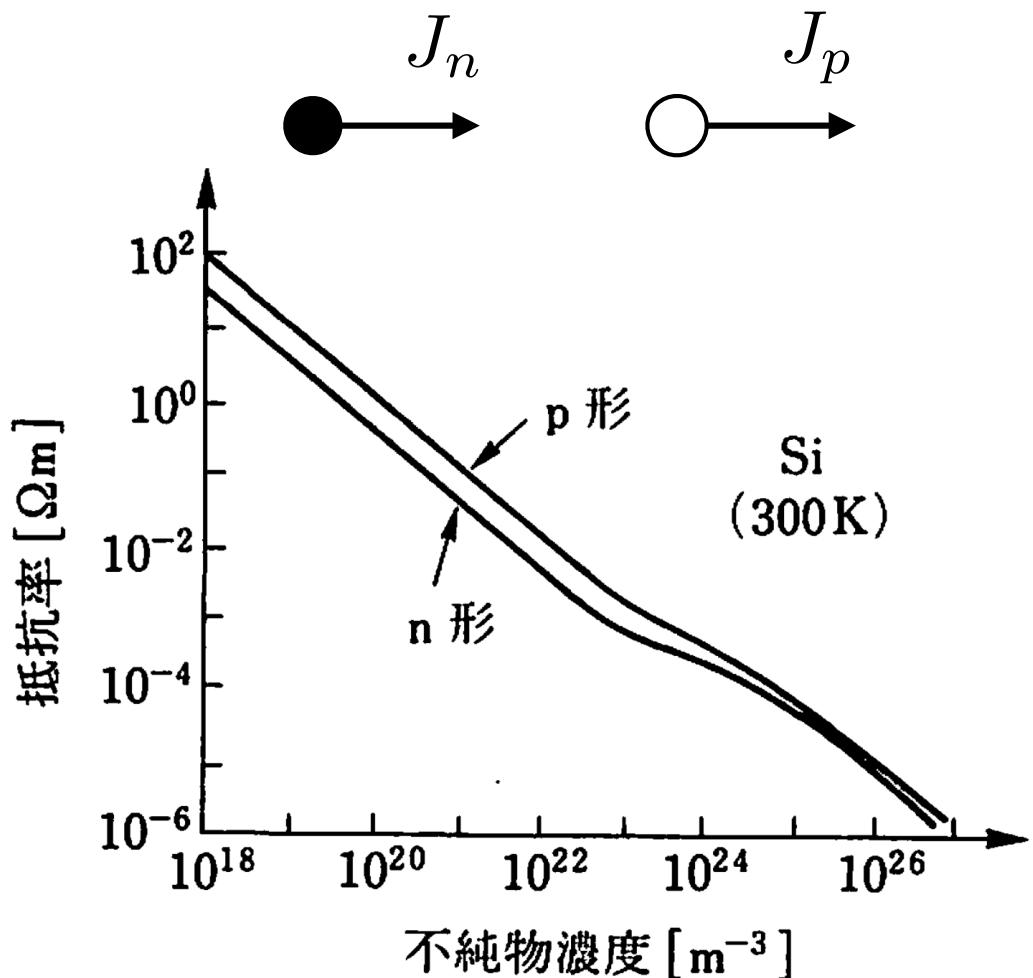
$\mu$  : ドリフト移動度 [ $\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ]

抵抗率 :  $\rho = \frac{1}{\sigma}$

抵抗率は

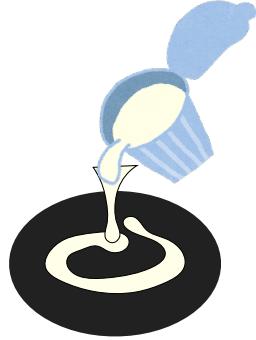
ドーピング濃度( $p, n$ )に反比例する

$$\rho_p = \frac{1}{ep\mu_n} \quad \rho_n = \frac{1}{en\mu_n}$$



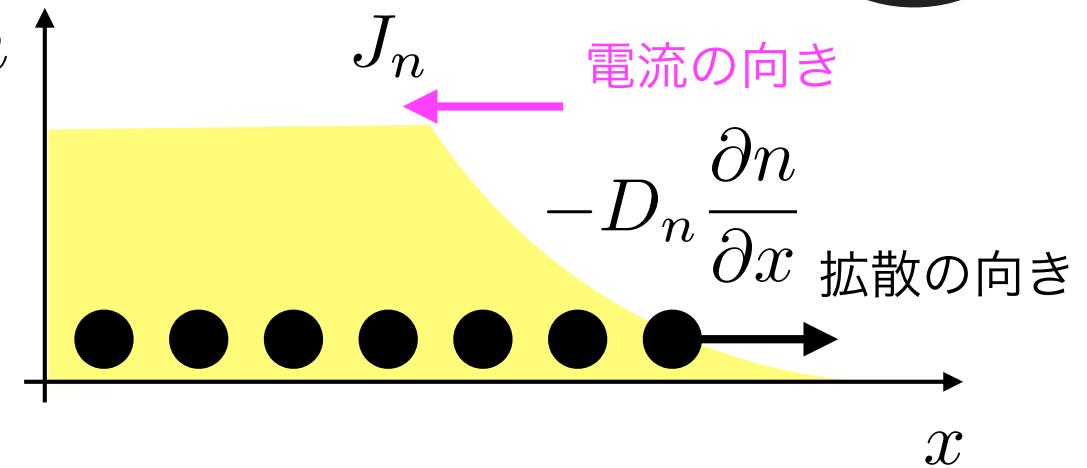
# 拡散電流

キャリア濃度に偏りがあると、キャリアが移動する



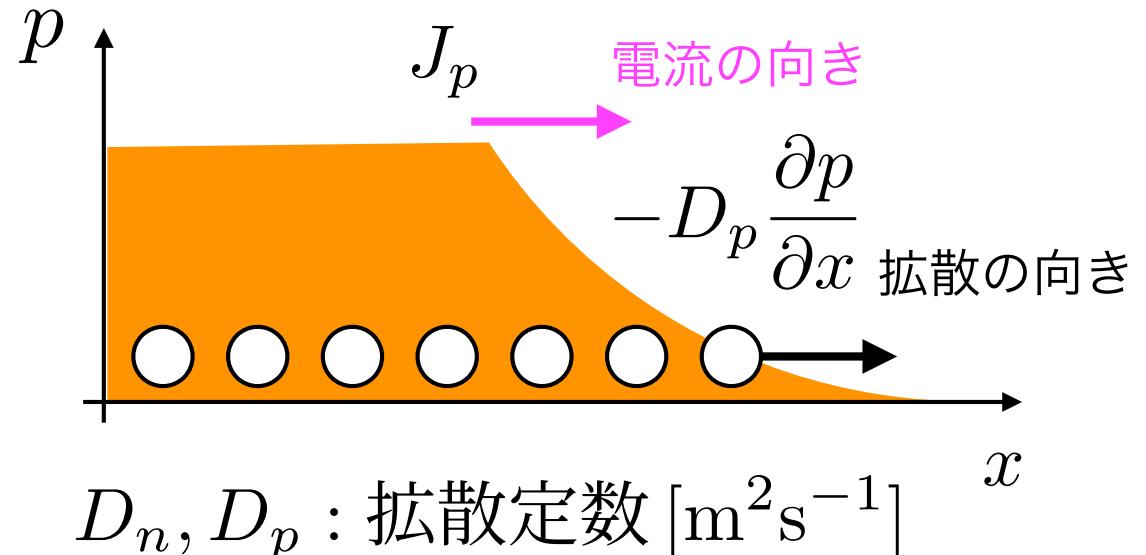
$$J_n = (-e) \times -D_n \frac{dn}{dx}$$

$$= e D_n \frac{dn}{dx}$$



$$J_p = (+e) \times -D_p \frac{dp}{dx}$$

$$= -e D_p \frac{dp}{dx}$$



$D_n, D_p$  : 拡散定数 [ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]

# pn接合のバンドが曲がるメカニズム

キャリアの濃度差による拡散が発生する



拡散したキャリアによりドナーイオン（n型）と  
アクセプタイオン（p型）が残り（空乏層）  
電荷分布の偏りが生じる



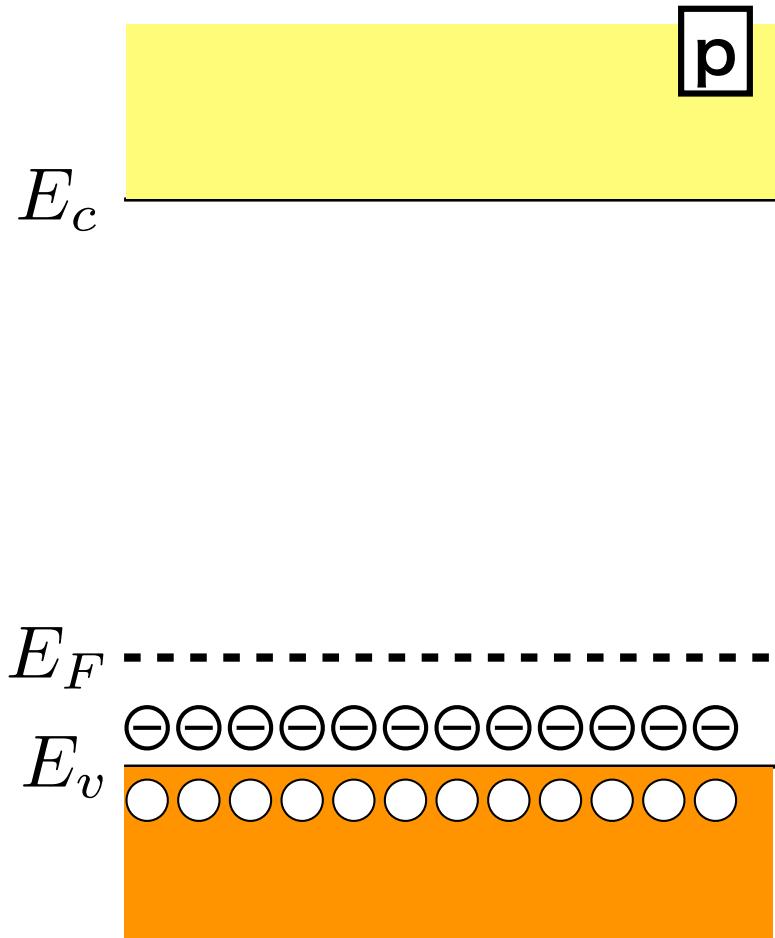
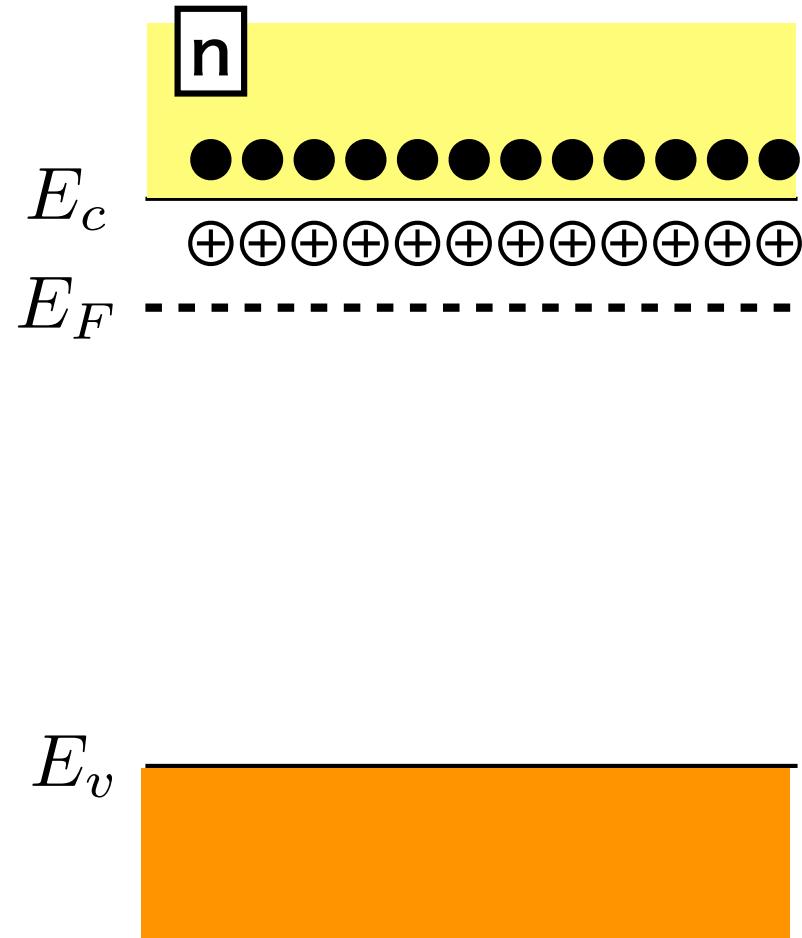
電荷分布の偏りにより、空乏層内で電場が発生する



電場が生じると、空乏層内には電位差が生じ、空乏層内の  
電子のエネルギーが変化しバンドが曲げられる  
バンドを曲げる向きに注意

# pn接合（接続前）

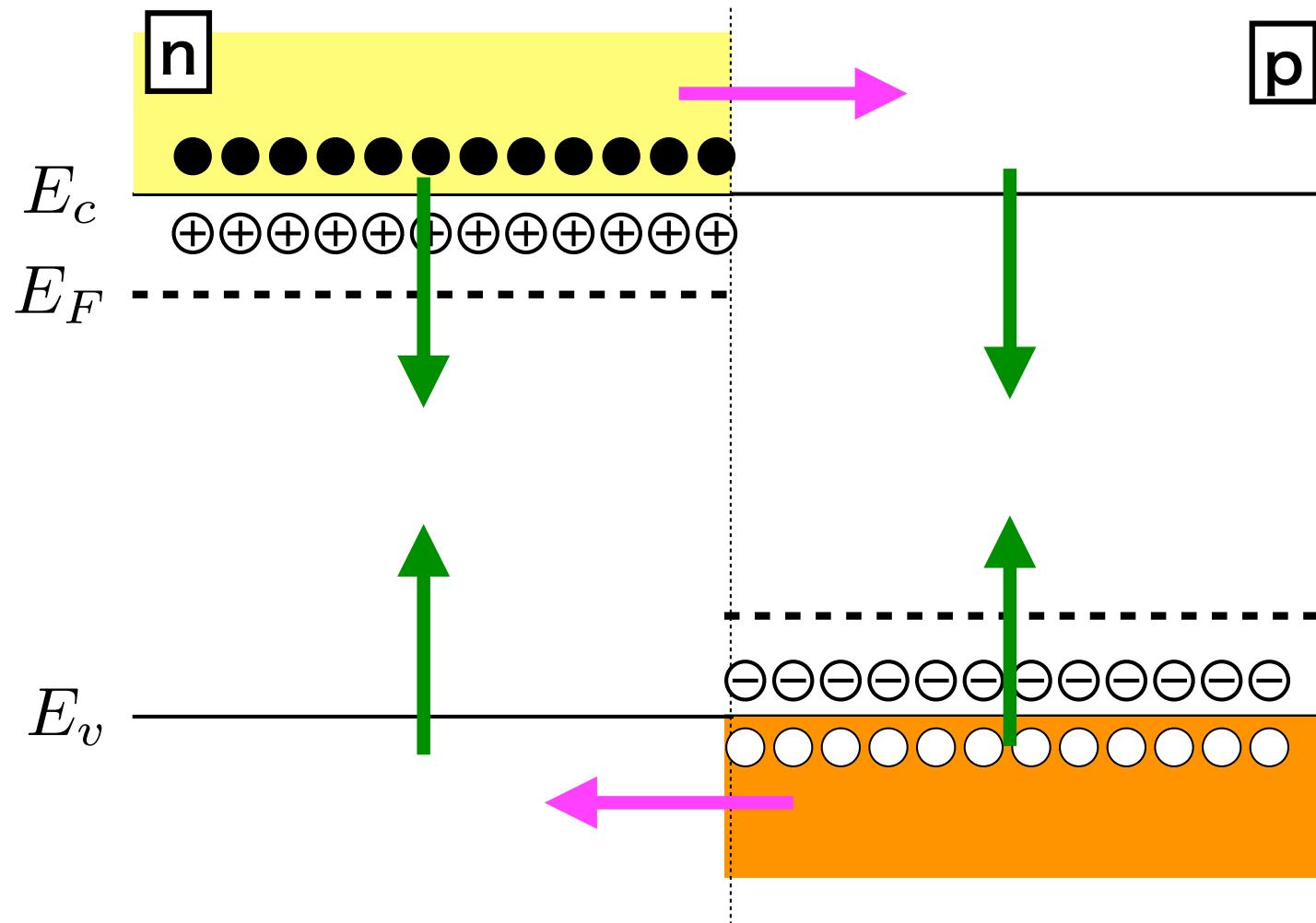
p型半導体とn型半導体をくっつけるとどうなる？



# pn接合（接続した瞬間）

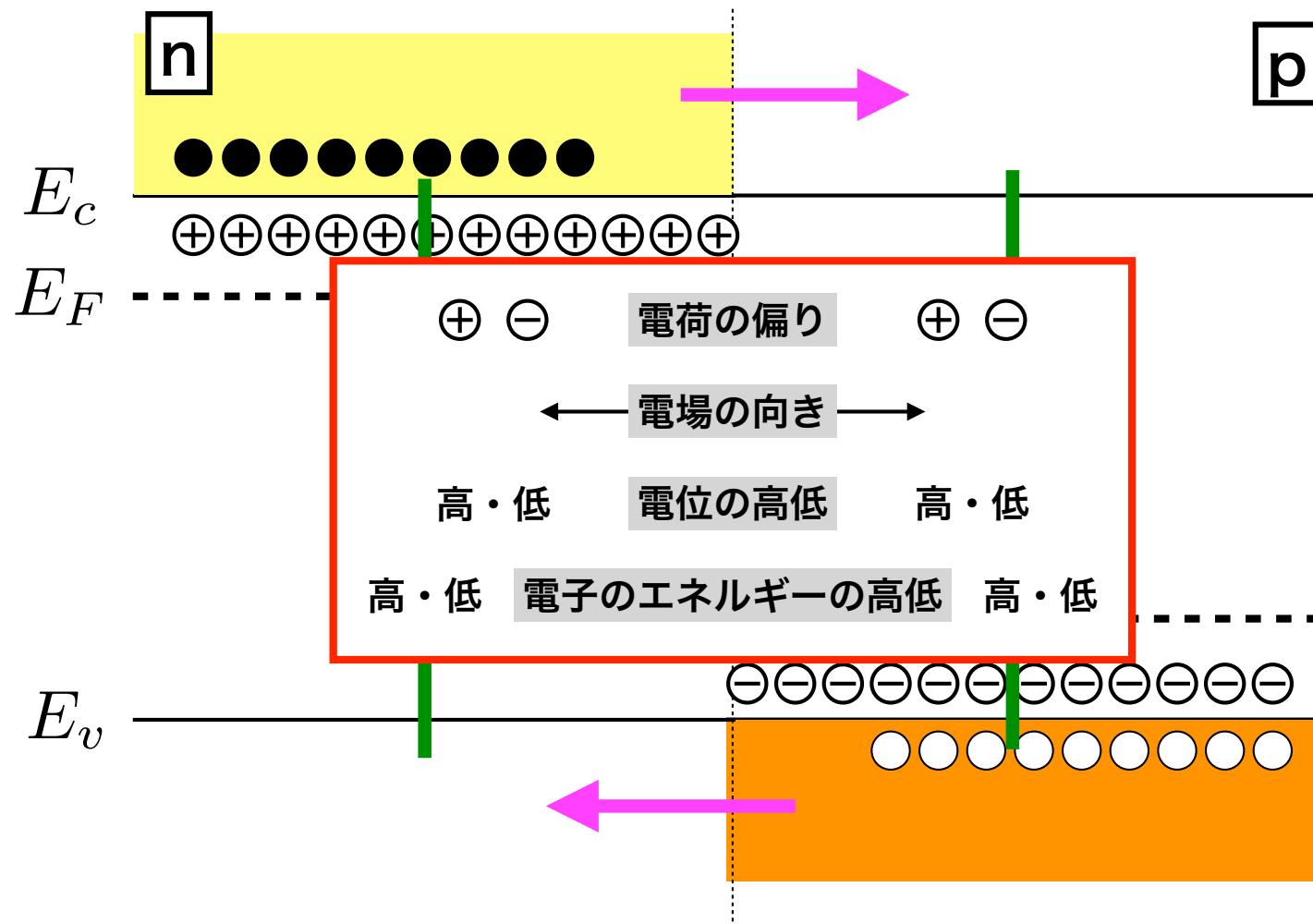
pn結合で生じる2つの  
電気伝導現象の要因

キャリアがいない方に拡散し、再結合（消滅）する



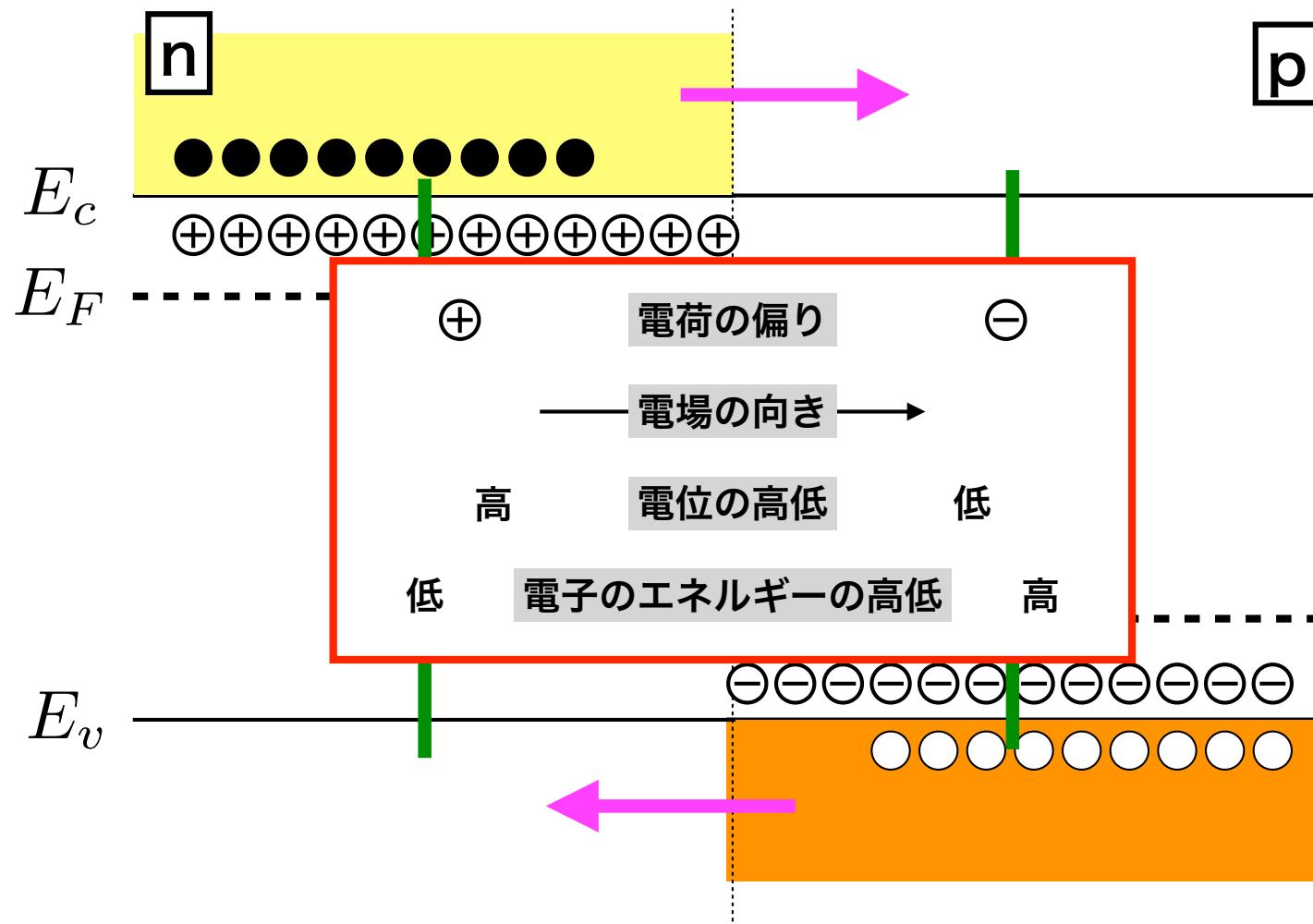
# pn接合（接続した瞬間）

キャリアがいない方に拡散し、再結合（消滅）する



# pn接合（接続した瞬間）

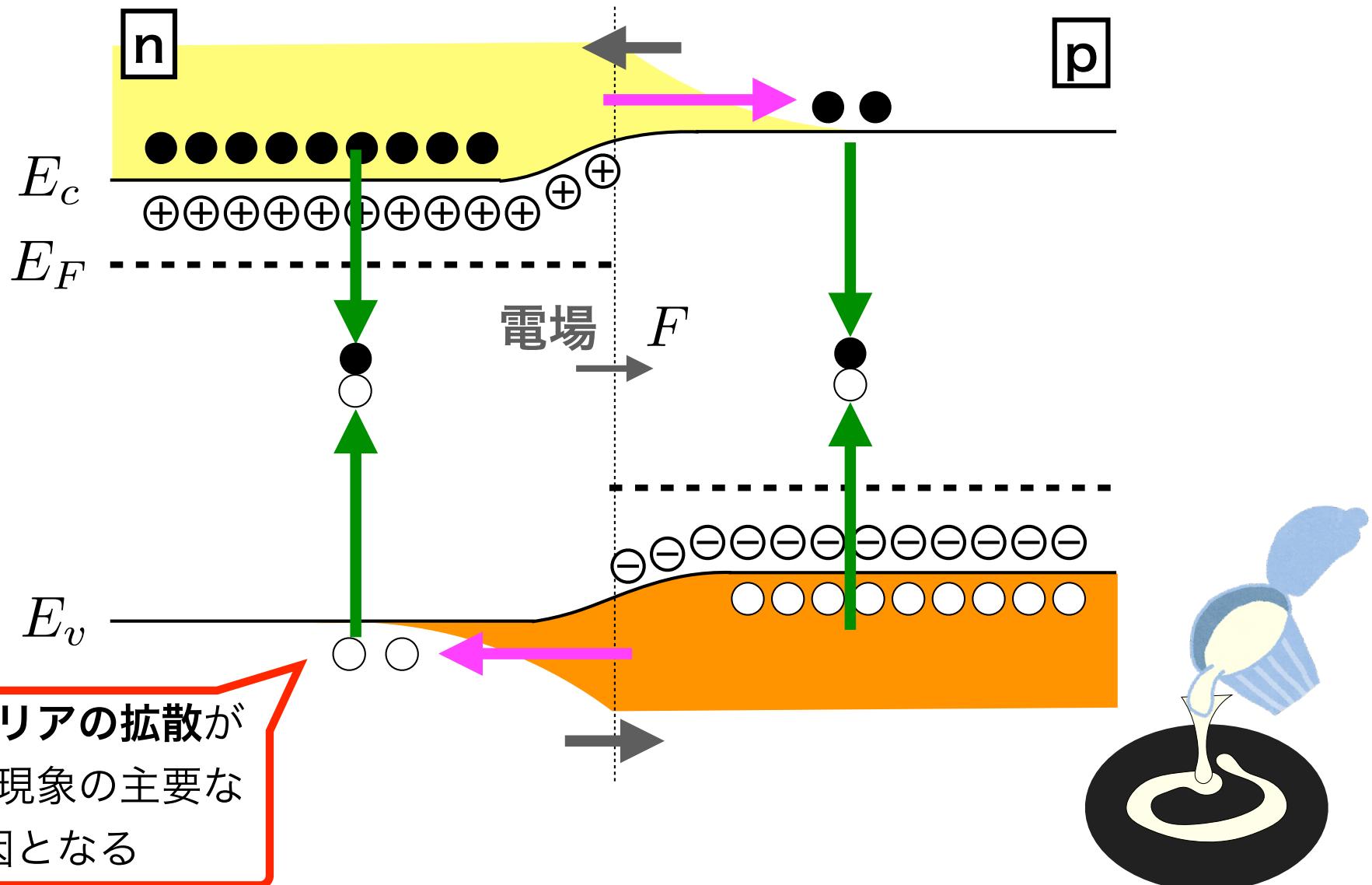
キャリアがいない方に拡散し、再結合（消滅）する



# pn接合（接続直後）

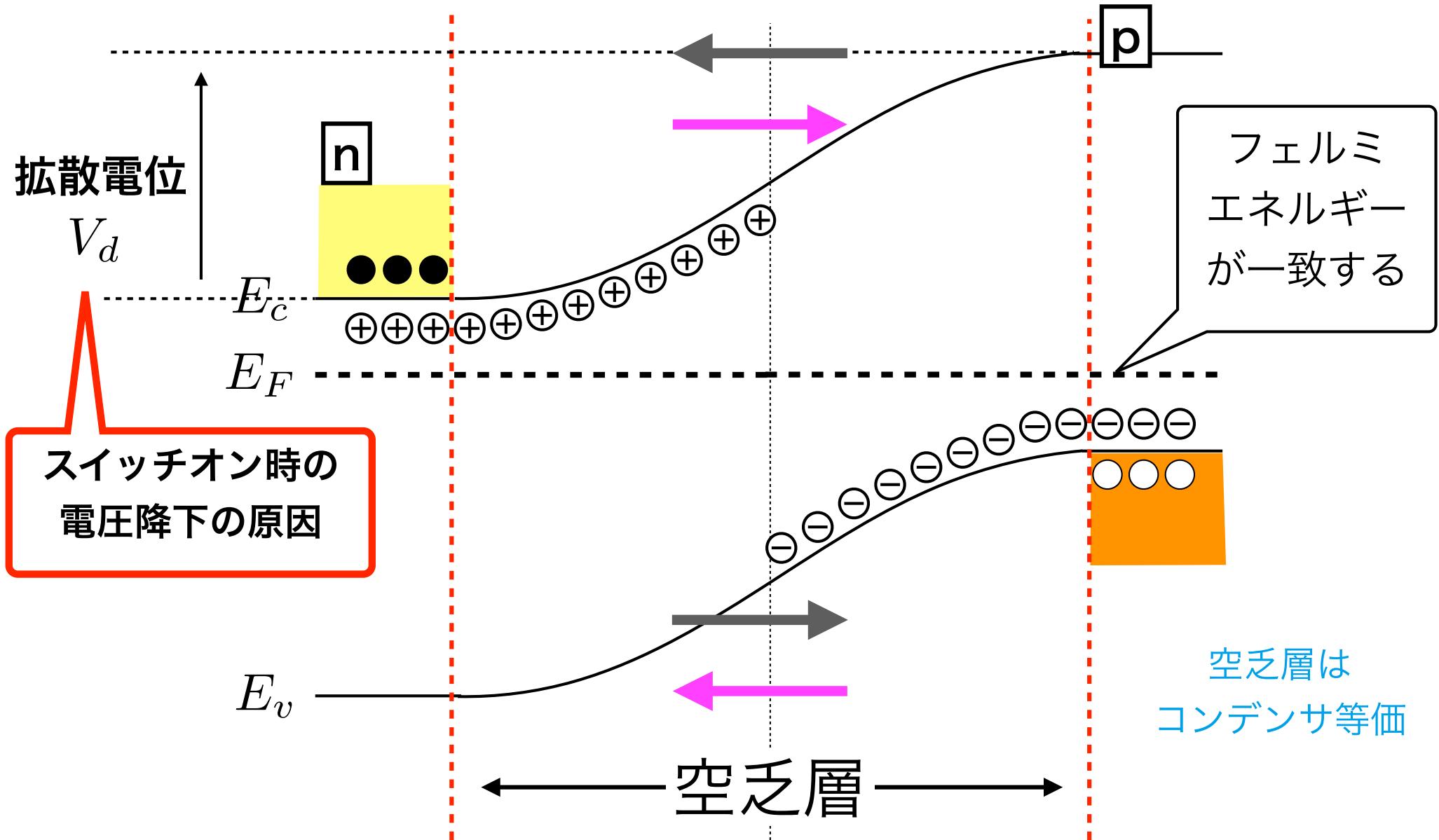
電場による電気伝導

接合部では、**拡散電流**とドリフト電流が発生する

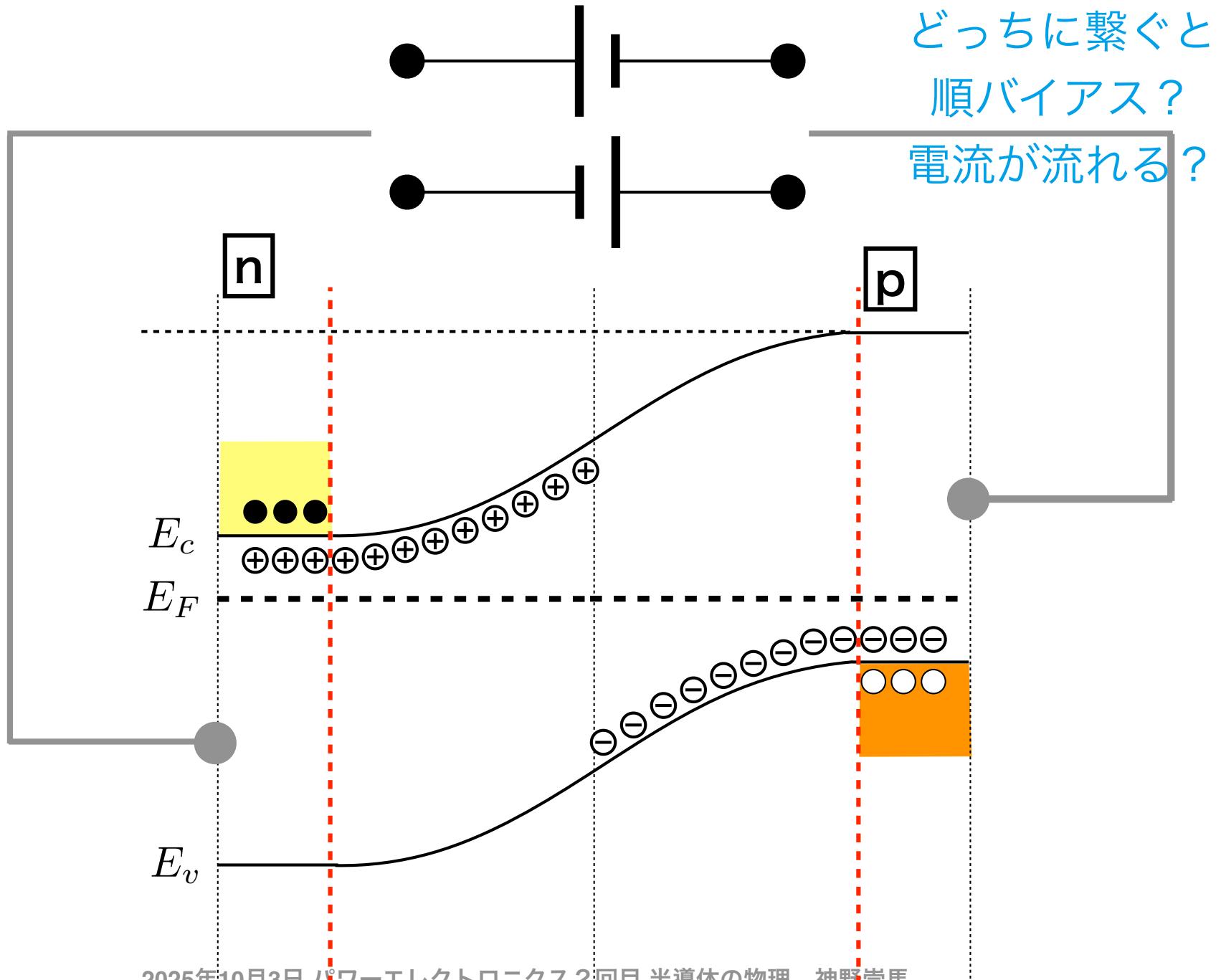


# pn接合（平衡状態）

拡散電流とドリフト電流が釣り合って電流が流れなくなる



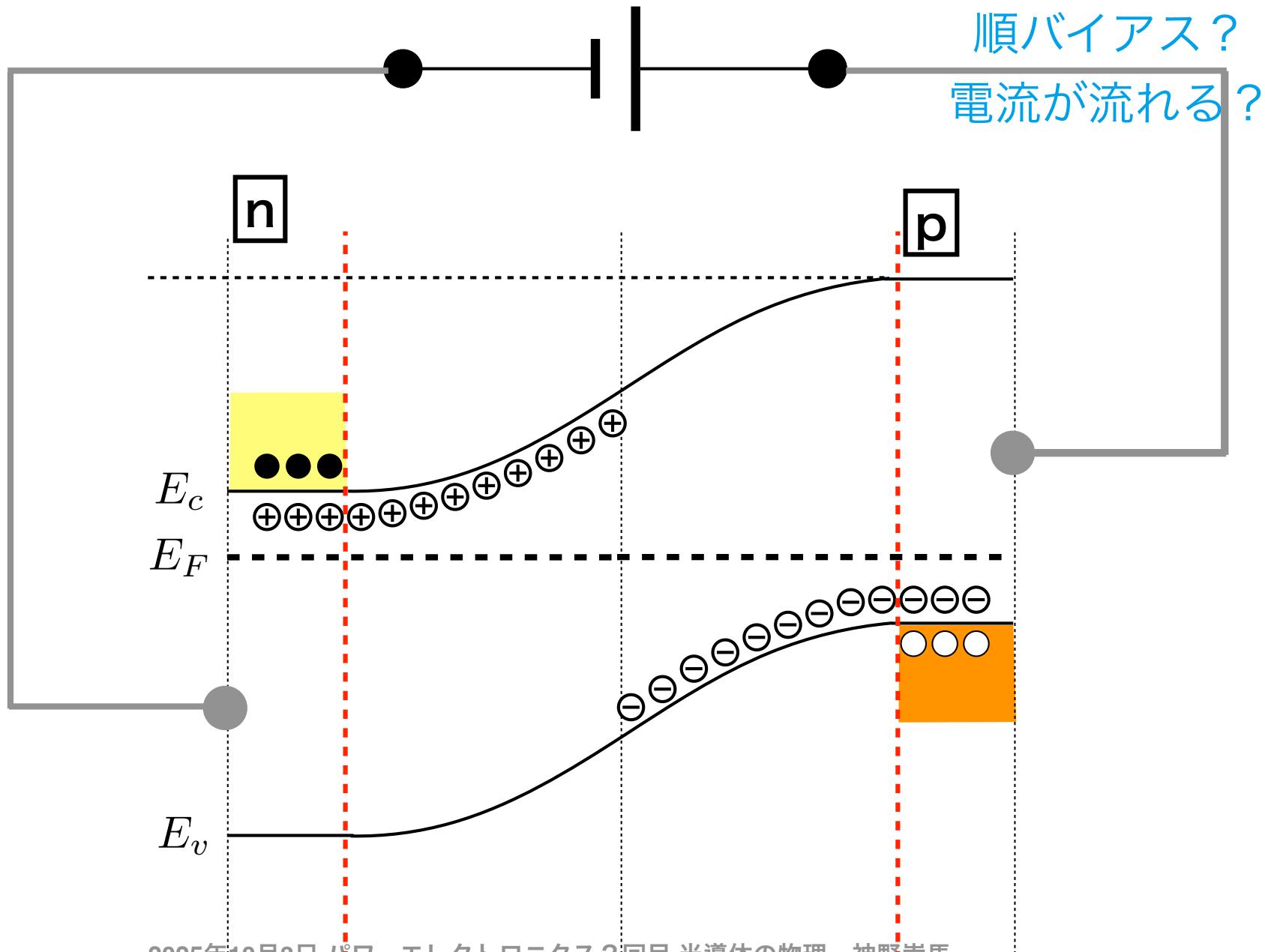
# 順バイアス = 電流を流しやすくする



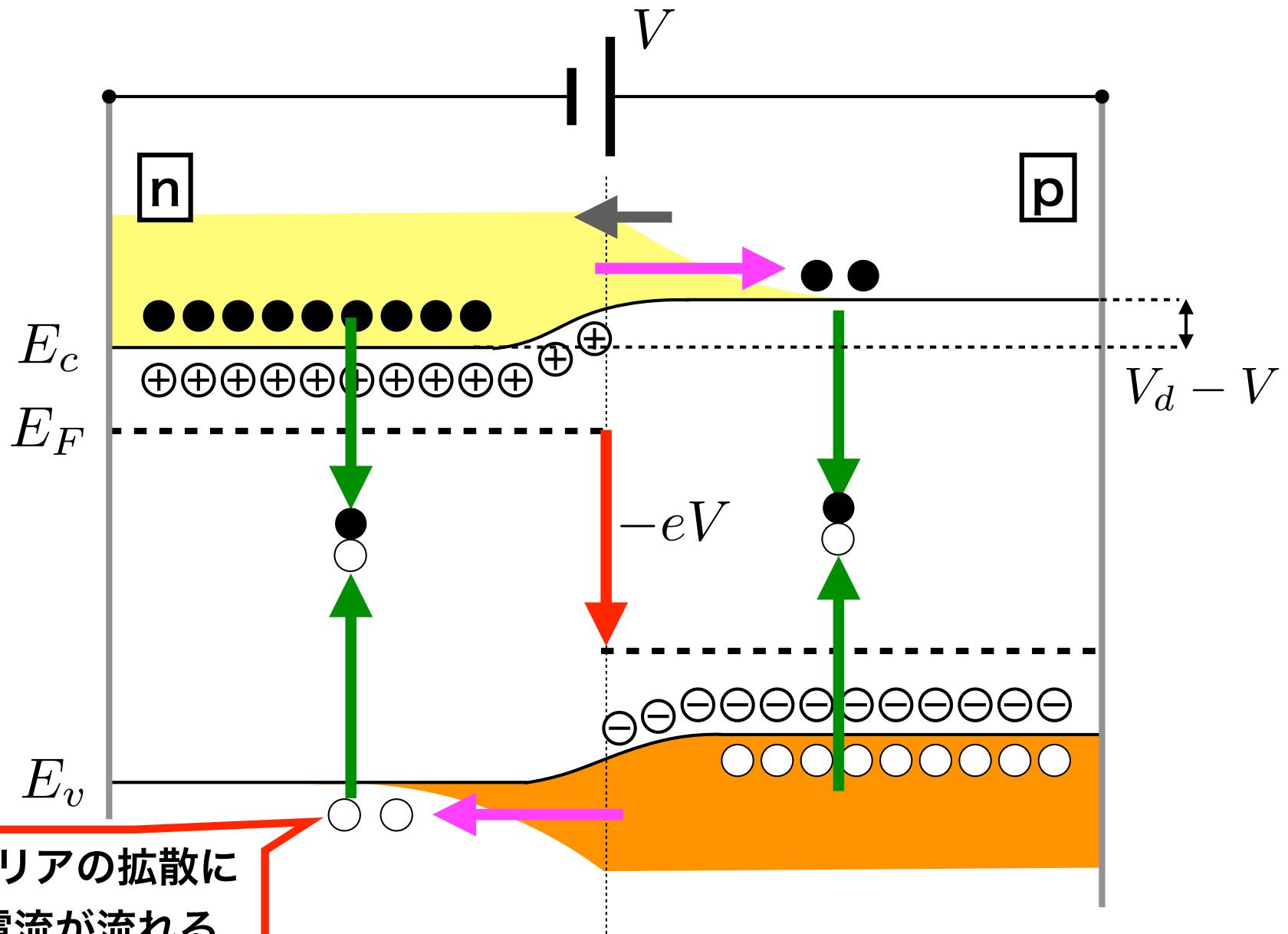
# 順バイアス = 電流を流しやすくする

p型半導体にplusを接続

どっちに繋ぐと  
順バイアス?  
電流が流れる?

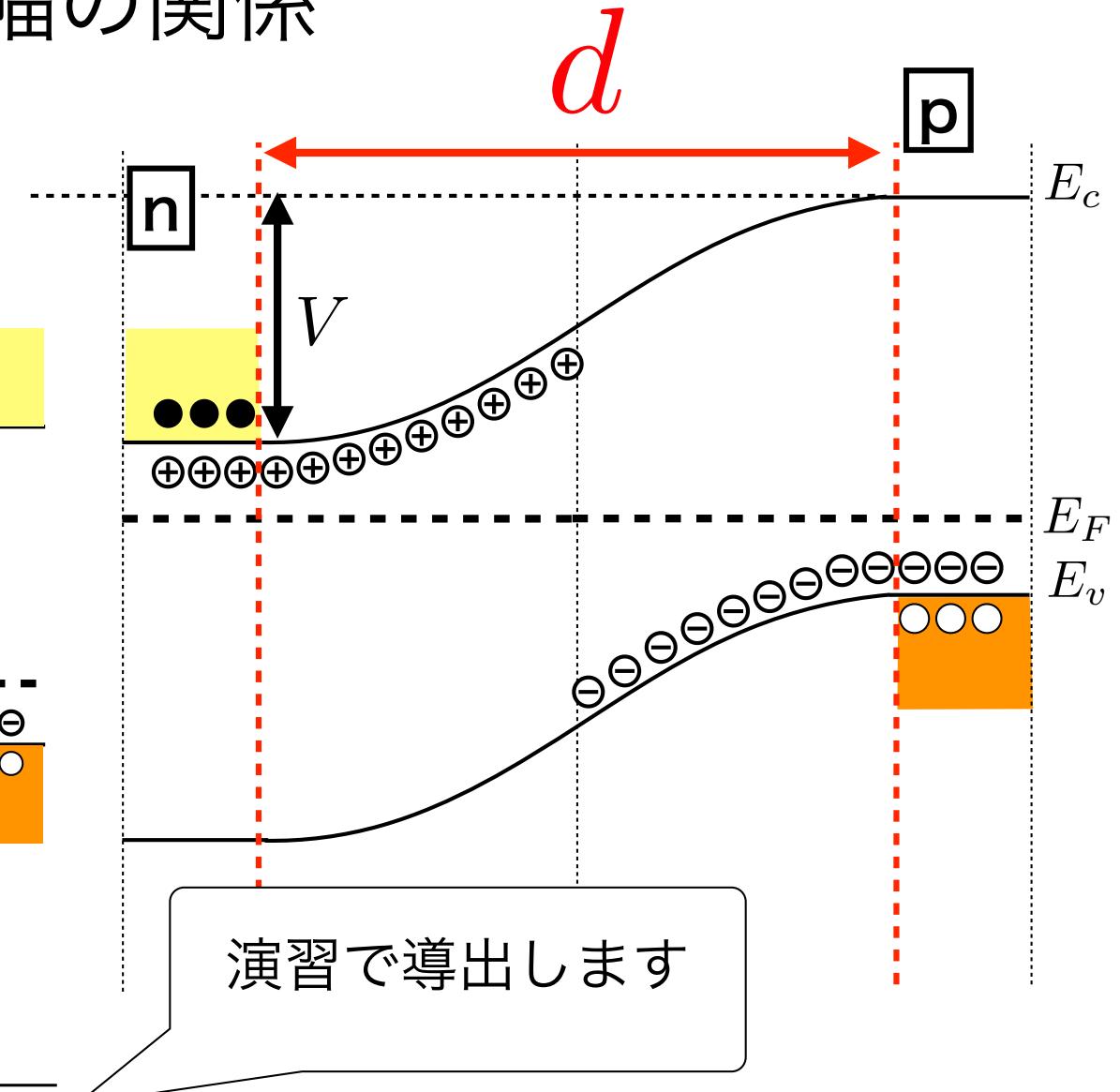
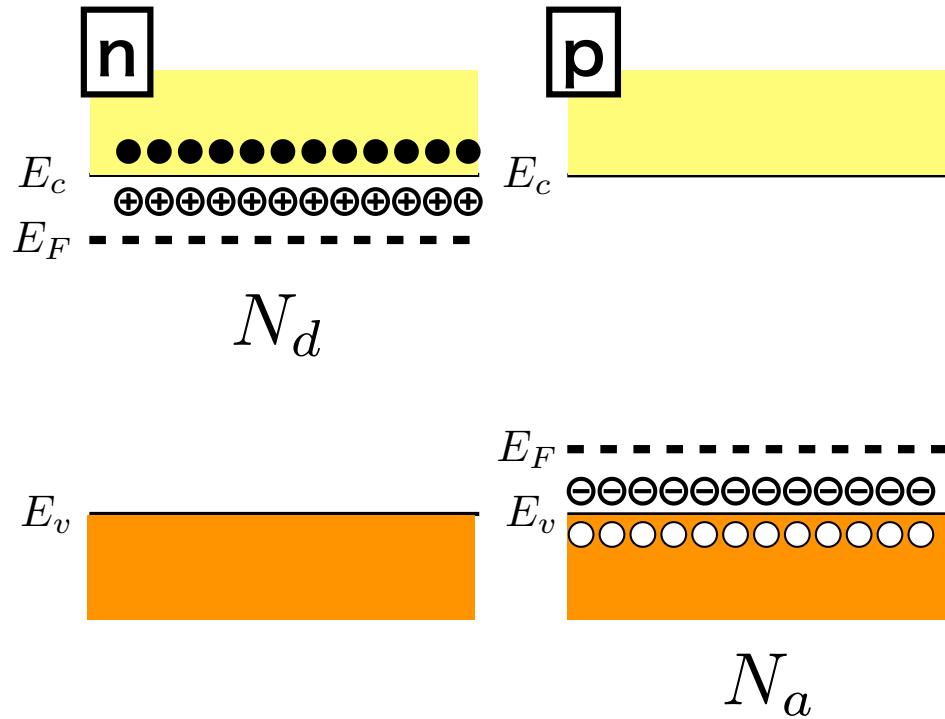


# 順バイアスをかけた時の電気伝導現象



# 不純物濃度と空乏層幅の関係

空乏層幅は不純物濃度の  
平方根に反比例



$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon V}{e} \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}$$

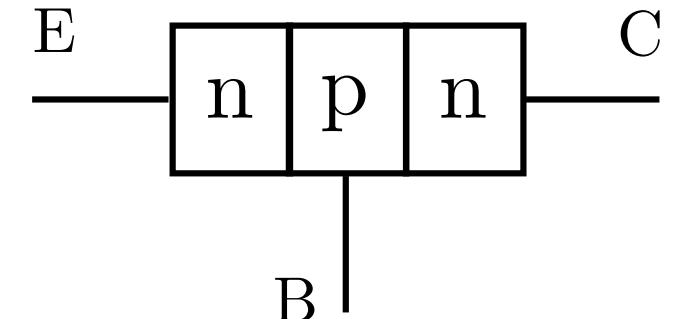
$N_d$  : ドナー濃度

$N_a$  : アクセプタ濃度

# バイポーラトランジスタのバンド構造

演習問題でやります

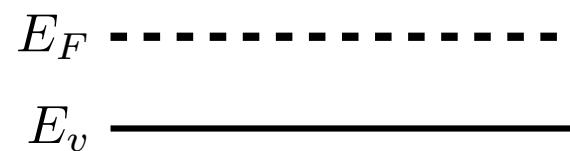
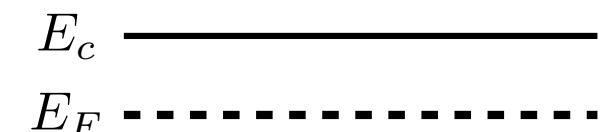
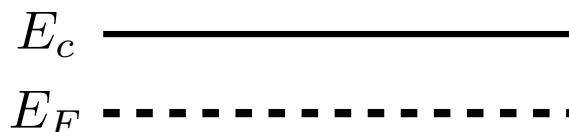
平衡状態のバンド構造はどうなる？



n型

p型

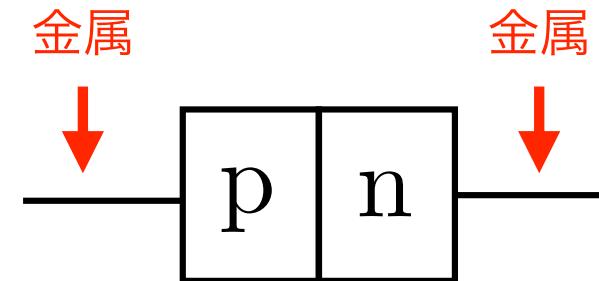
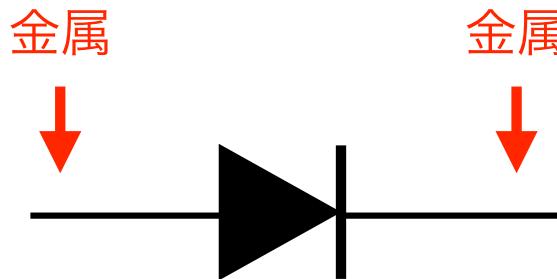
n型



# 金属と半導体の接合は？

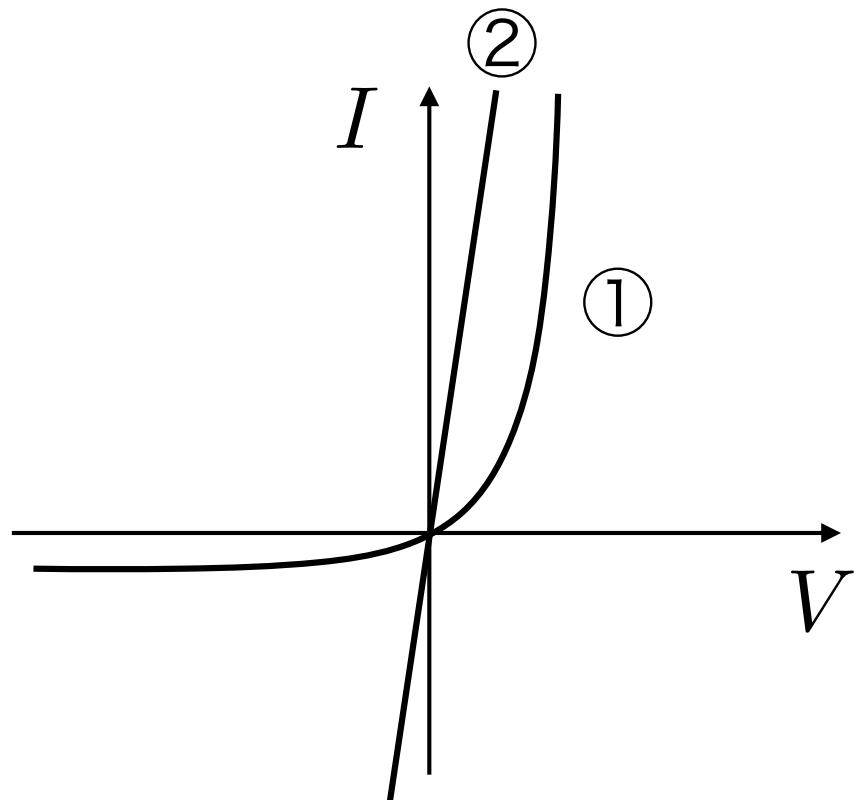


回路素子では必ず金属と半導体が接合している



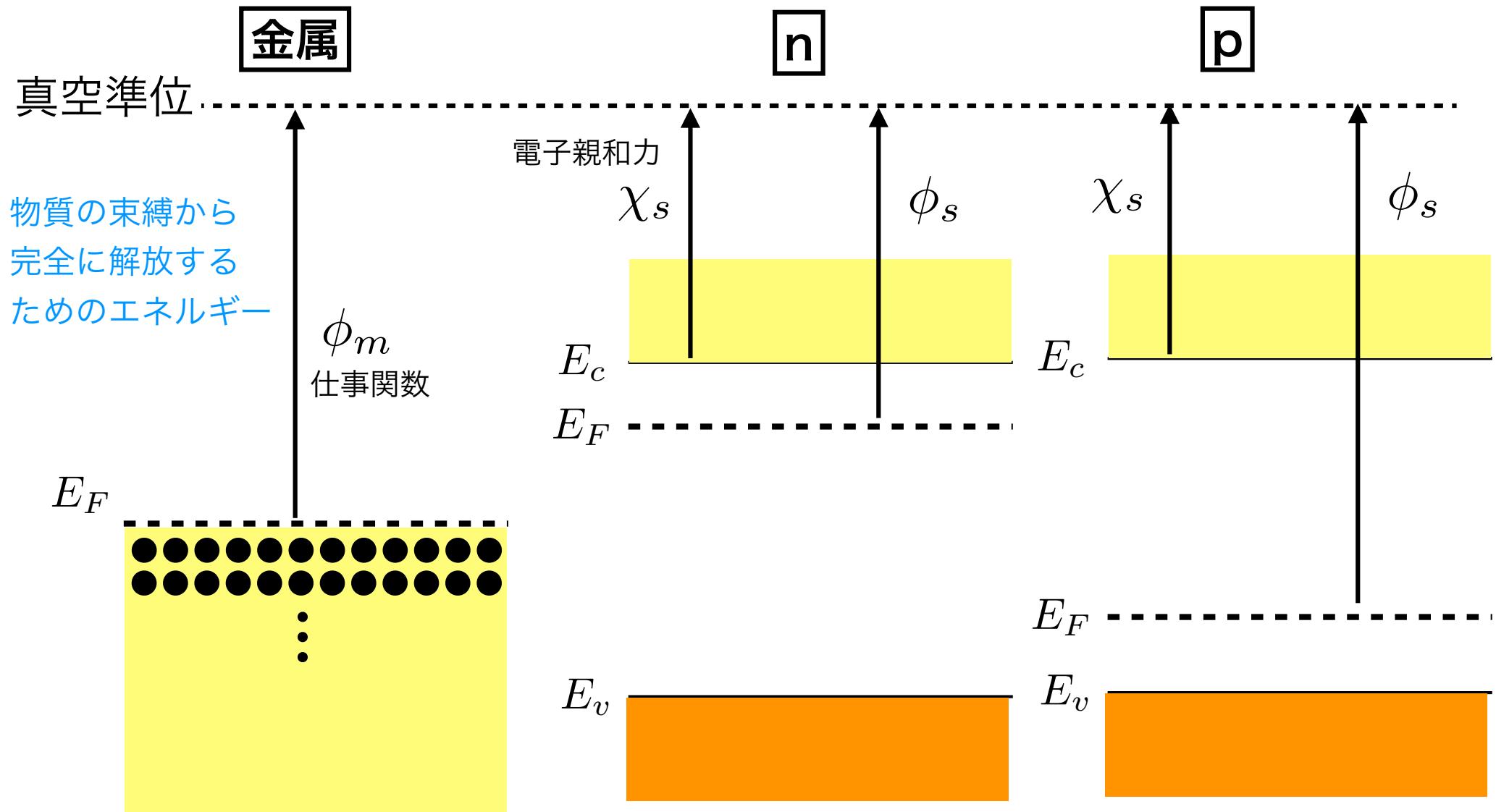
- ① 整流性接触
- ② 抵抗性接触

半導体素子の配線には  
抵抗性接触が用いられている



# 金属と半導体の接合によるバンド図

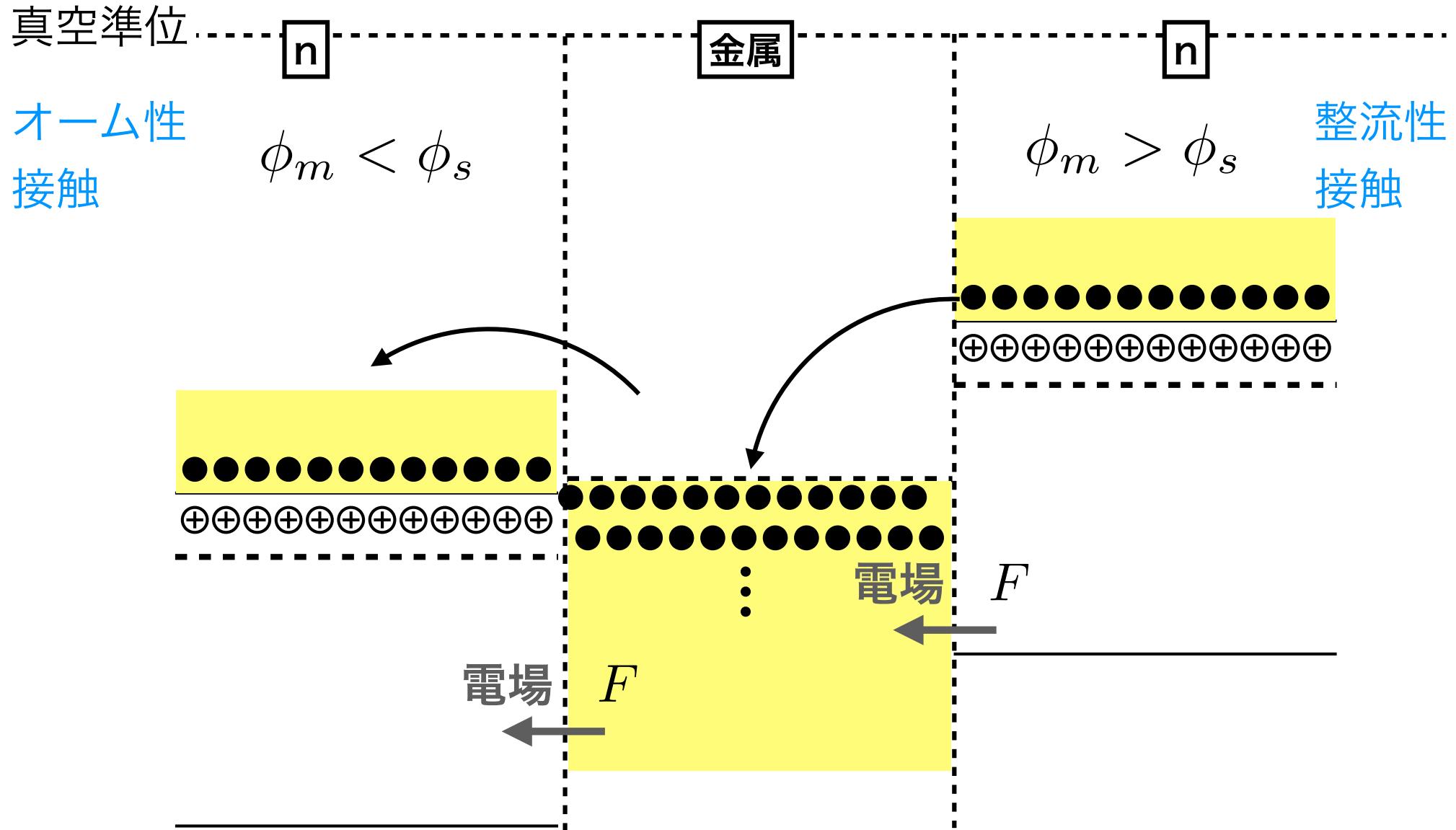
接合した後の平衡状態におけるバンド構造は？



# 金属とn型半導体の接合によるバンド図

Quiz

接合前（フェルミエネルギーの大小関係で変わる）



# 金属とn型半導体の接合によるバンド図

Quiz

接合した後：フェルミ順位が一致する

真空準位

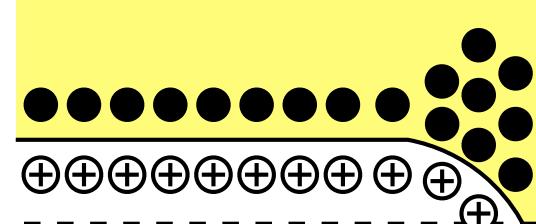
n

金属

n

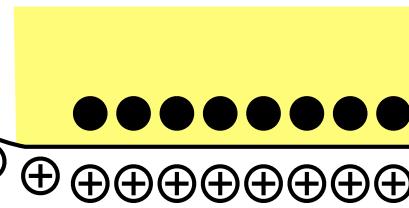
$$\phi_m < \phi_s$$

$$\phi_m > \phi_s$$



金属から移動した  
電子により負に帯電

$$\phi_m - \chi_x$$



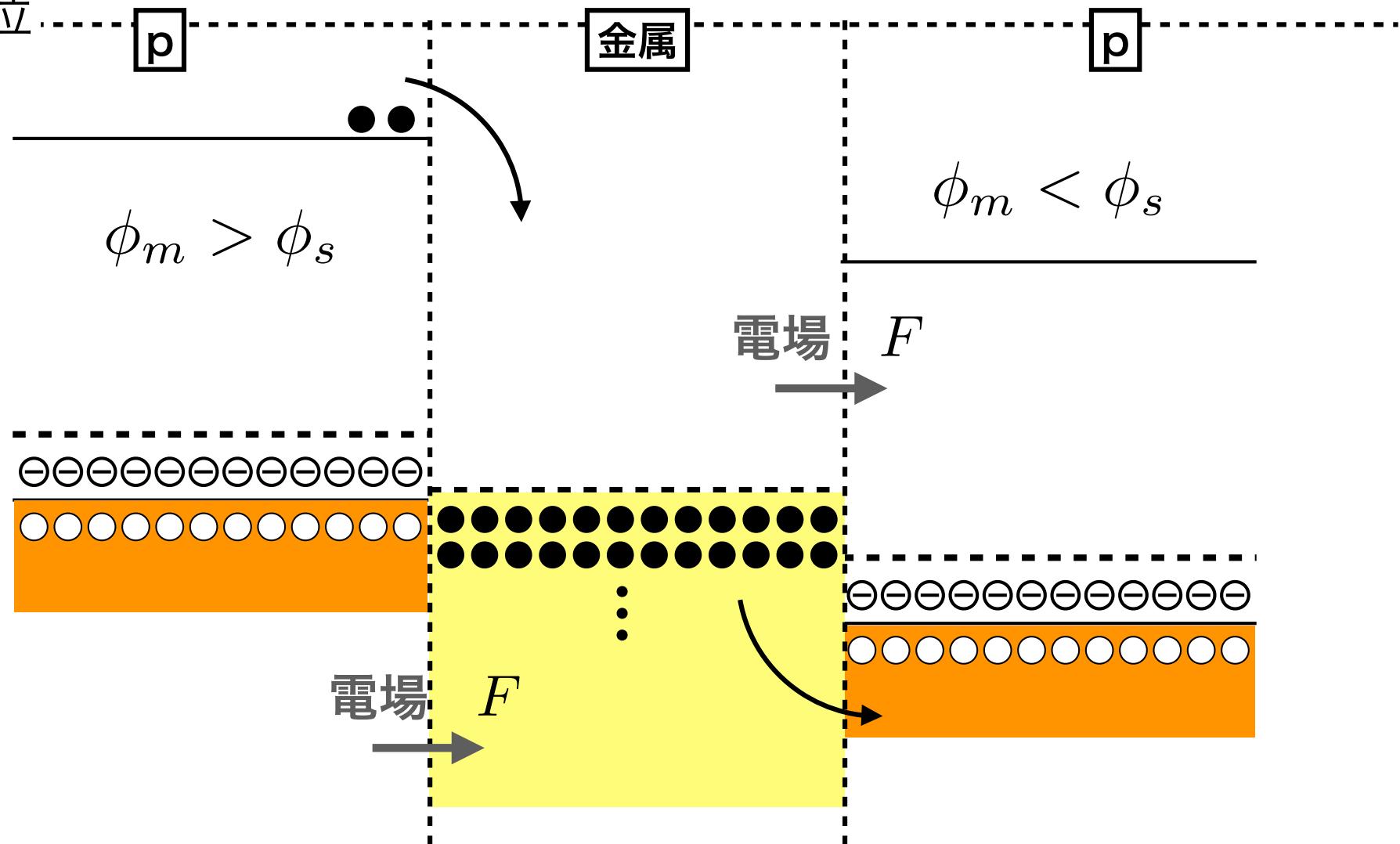
ドナーイオンにより  
正に帯電

# 金属とp型半導体の接合によるバンド図

Quiz

接合前（フェルミエネルギーの大小関係で変わる）

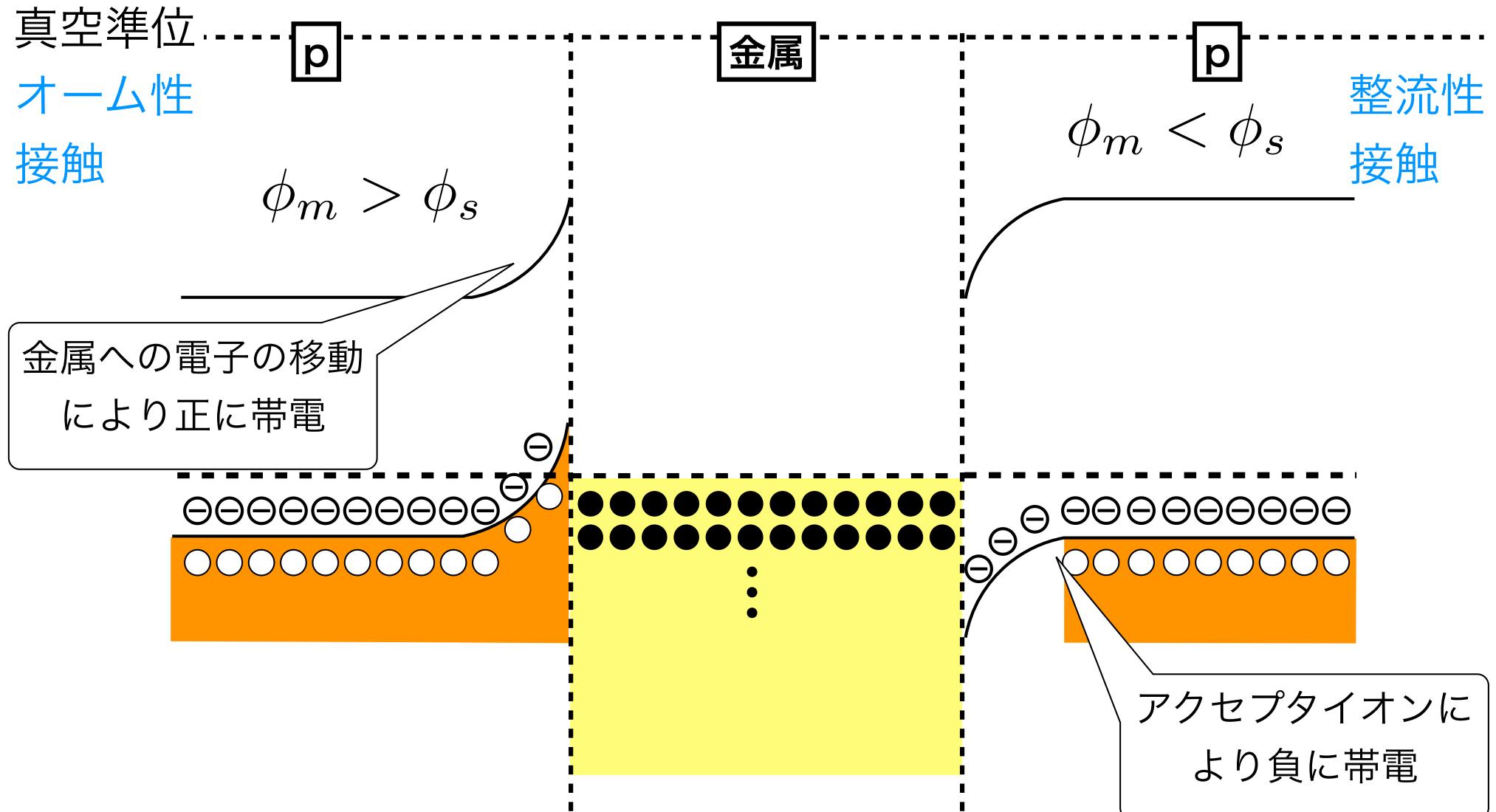
真空準位



# 金属とp型半導体の接合によるバンド図

Quiz

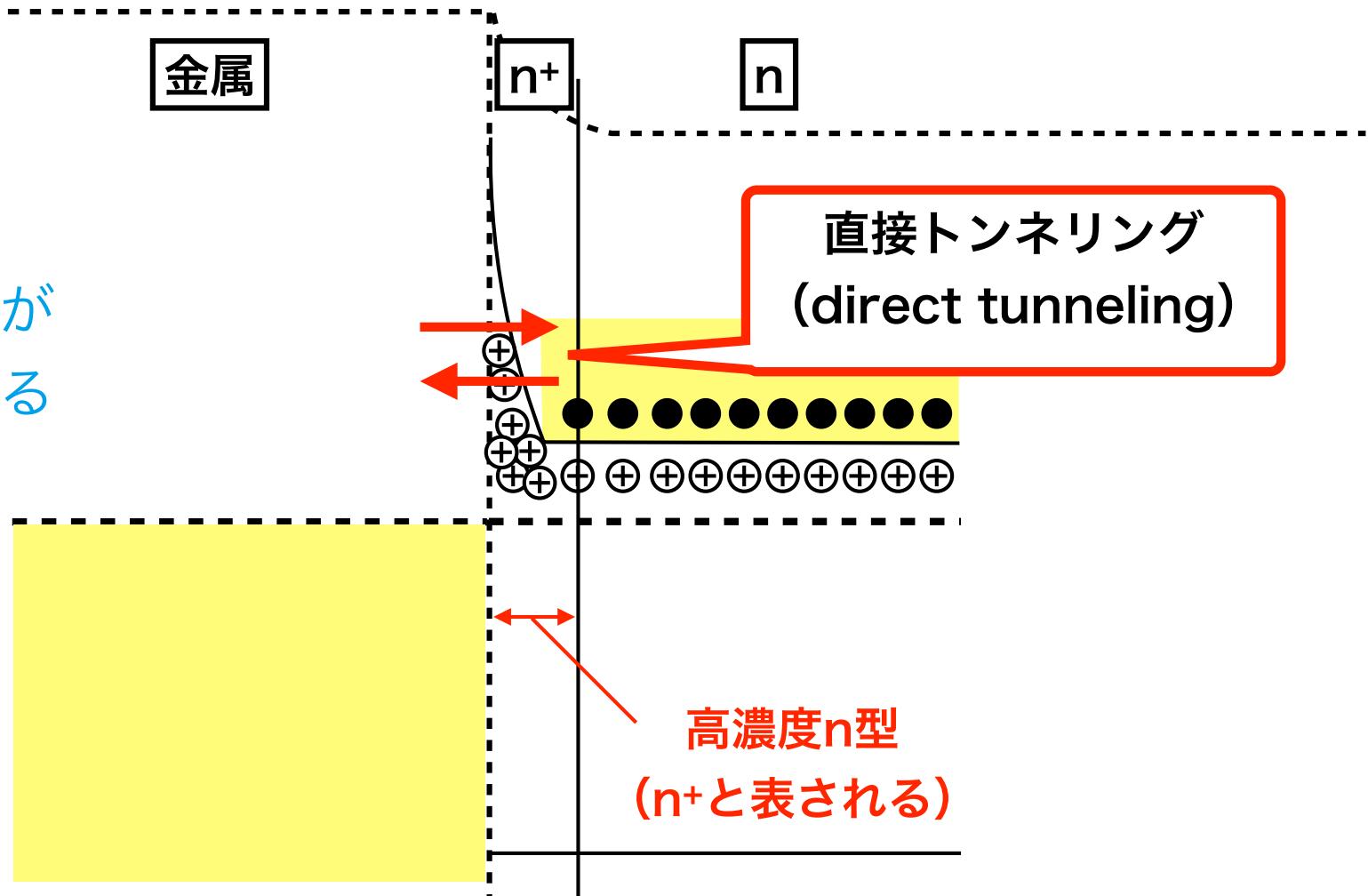
接合した後：フェルミ順位が一致する



# トンネル効果

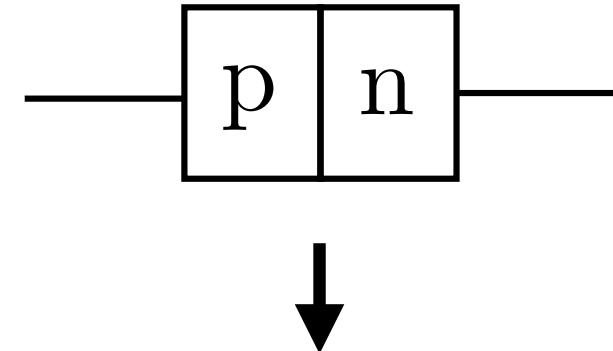
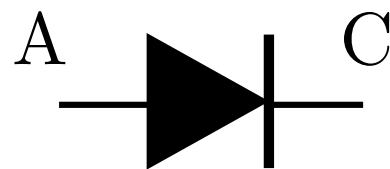
Siと金属の接合部は必ず整流特性となるので工夫が必要

半導体素子  
との配線は  
トンネル効果が  
用いられている

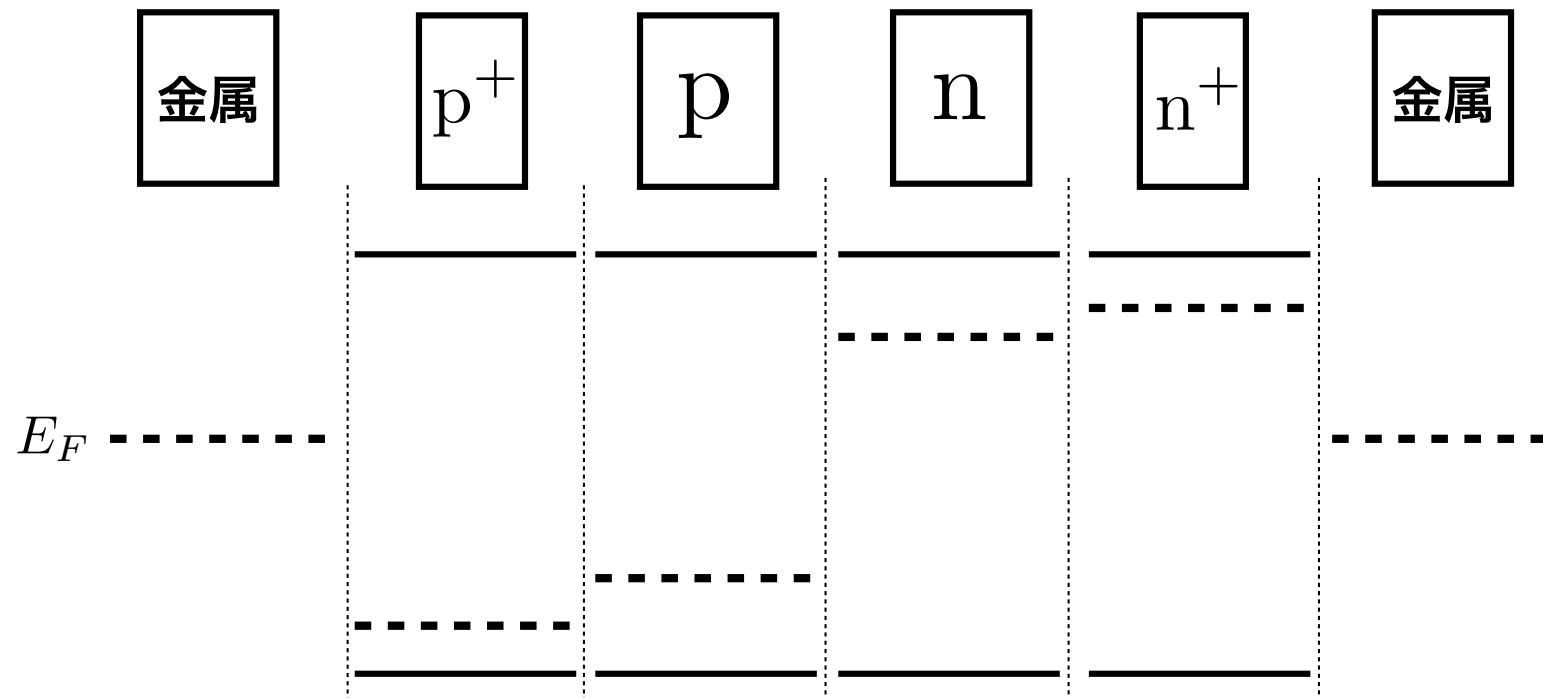
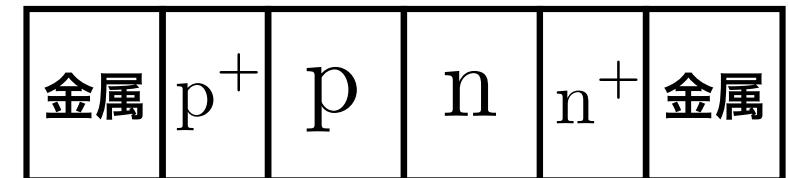


Siの場合、 $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  以上の不純物濃度で  
トンネル伝導が支配的になる。

# ダイオードの特性



平衡状態のバンド構造はどうなる？



# まとめ

半導体の物理について復習した

- ・ 半導体の基本である**バンド理論**について説明した
- ・ **pn接合**のバンド構造の形成過程を説明した
- ・ **金属-半導体接合**のバンド構造について説明した
- ・ 電磁気学の知識を使ってバンドの描き方について説明した