

半導體理工學

授業予定

1. ガイダンス
2. 半導体の歴史
3. 半導体の作製方法(1)
4. 半導体の作製方法(2)
5. 半導体の種類(1)
6. 半導体プロセスの復習(ビデオ視聴)
7. 半導体の種類(2)、バンド理論
8. 半導体の電気的性質
9. 半導体の電気伝導(1)
10. 半導体の電気伝導(2)
11. pn接合の理論(1) (pn接合)
12. pn接合の理論(2) (電流-電圧特性)
13. pn接合の理論(3) (空乏層容量、降伏)
14. 試験とまとめ

※変更の可能性有

半導体の種類(2)

①真性半導体

②不純物半導体

■ 真性半導体

- 不純物を含まず、周期的な格子配列を有する。
- 全電子は原子に拘束@極低温(→絶縁体に類似)。

しかし、室温付近では伝導性を示す・・・>なぜか？
(「半導体」なので当たり前だが)

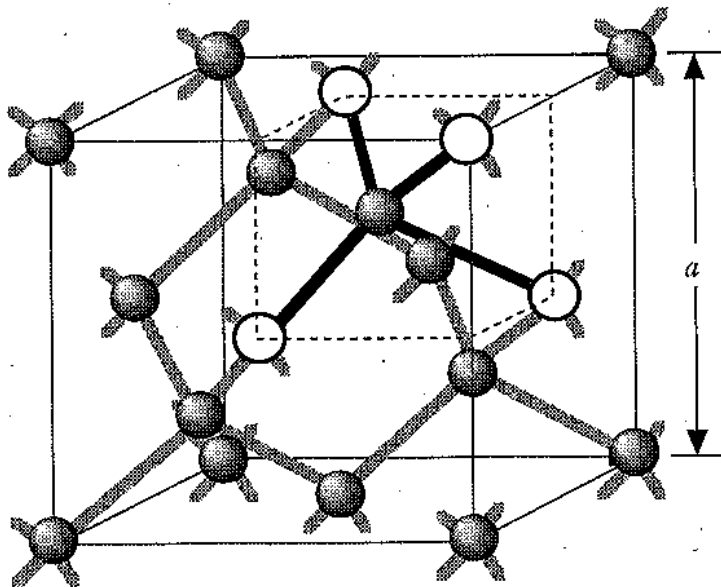
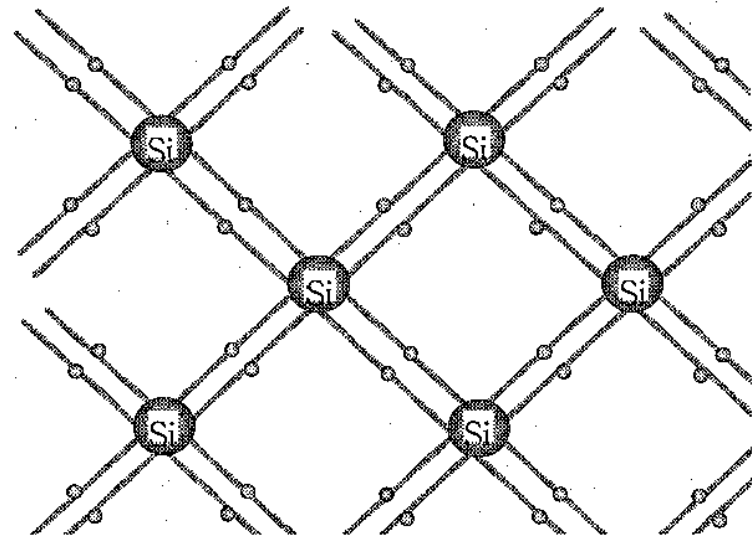


図 2.2 Si の結晶構造



(b) 共有結合の様子

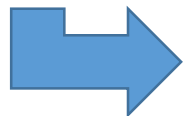
- 固体中の原子はどの温度でも、格子点を中心に熱振動する。
(※絶対零度ではゼロ点振動:量子力学)
- 振動エネルギーの一部は電子にも伝わる(移る)。



電子は $k_B T$ (k_B :ボルツマン定数)の熱エネルギーをもって運動する。

当然、温度上昇とともに電子の熱運動は激しくなる。

共有結合力 $< k_B T$ になったとき、電子は結合から飛び出し、結晶中を自由に動けるようになる。



自由電子(電荷キャリア)の誕生！

電子が飛び出すと、孔が出来る。



電氣的には正なので、あたかも
正の電荷のように振る舞う

→ 正孔(ホール)

電子が抜けて、正孔ができるので、
両者は対で生成される(電子-正孔対)。



両者の密度(単位体積当たりのキャリア数)は等しい。

$$\text{電子密度 } n_0 = \text{ホール密度 } p_0 \equiv n_i(T)$$

真性キャリア密度

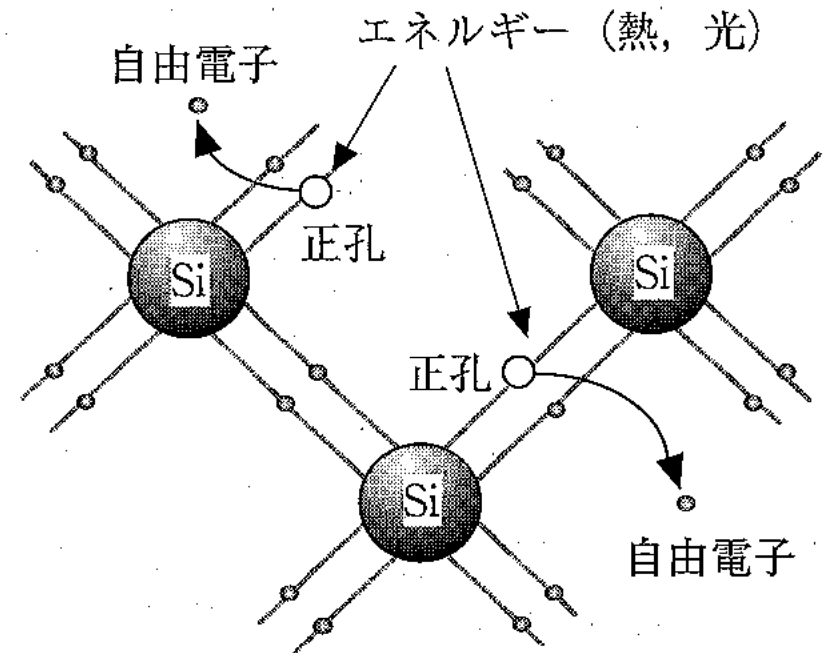
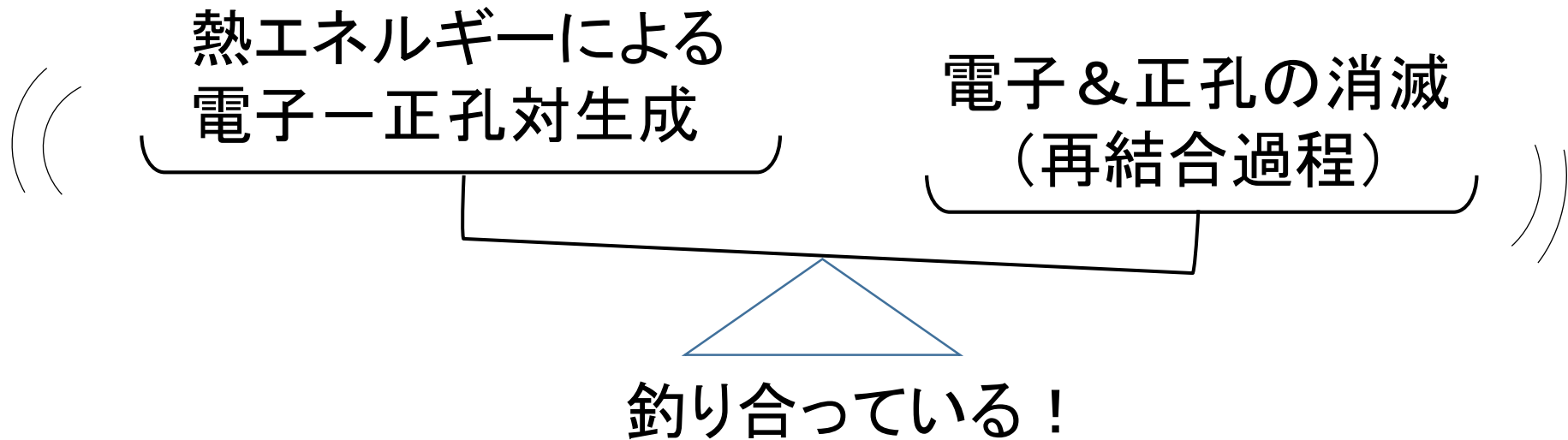


図 2.4 電子-正孔対の生成

真性キャリア密度：熱平衡状態では一定値



キャリア密度が温度に依存(敏感)

→制御が難しい

→実用デバイスには不向き(ほとんど使われない...)



キャリア導入の必要性

■不純物(外因性)半導体

- 真性半導体に不純物を添加(ドーピング)。



キャリア(電子or正孔)生成



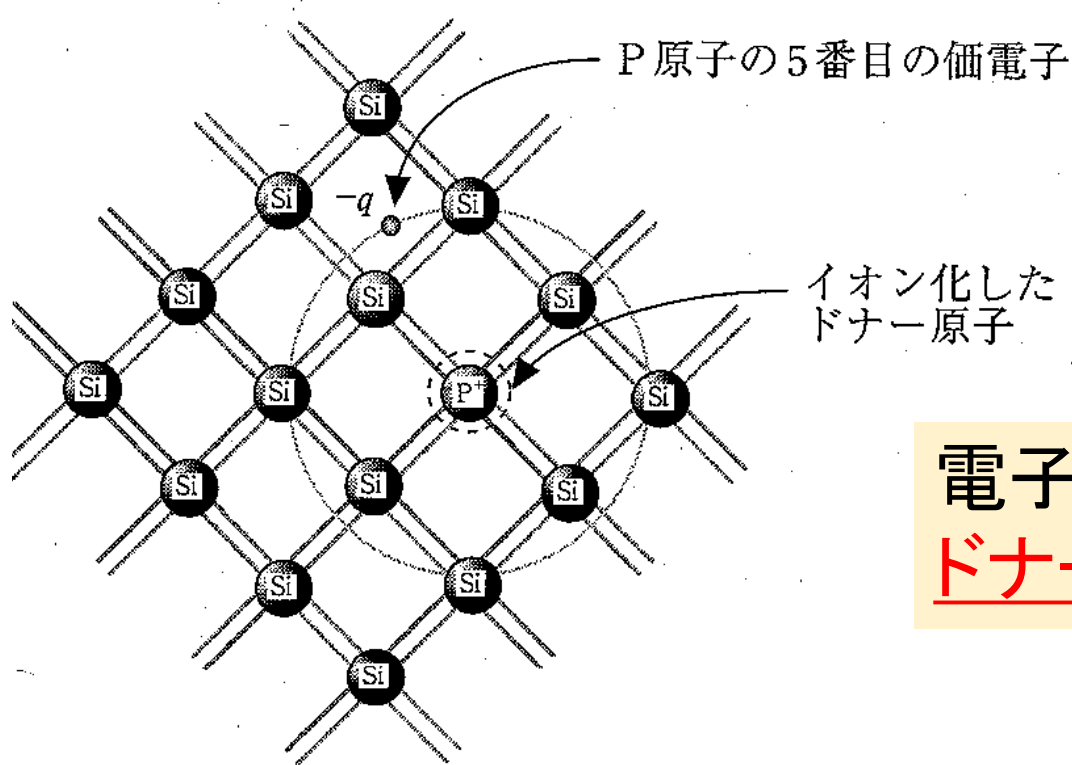
伝導性の制御

- 不純物の種類によって、生成する電荷の符号が決まる。

1) 電子ドーピング(n型): negative carrier-type

Si(IV B族)結晶に、V B族元素(P、As等)をドーピングする。

- V B族元素は、Si結晶の格子点に入る(置換形不純物)。
- 5個の価電子のうち、4個はSi原子との共有結合に使われ、残りの1個は自由電子となる。

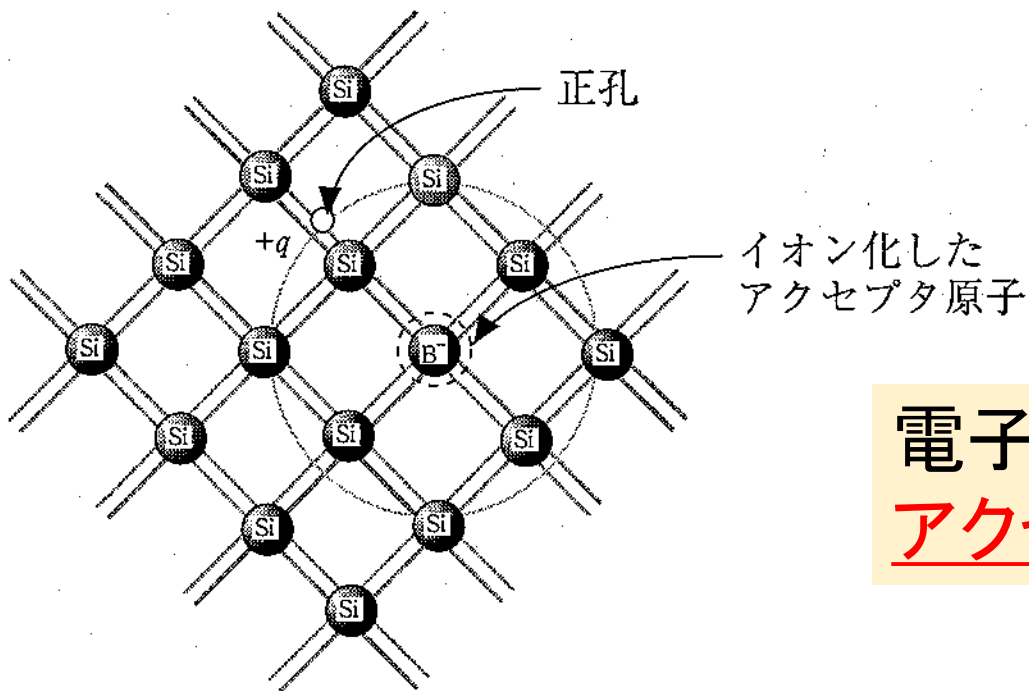


電子を与える不純物は、ドナー(donor)と呼ばれる。

2) 正孔ドーピング(p型): **p**ositive carrier-type

Si(IV B族)結晶に、III B族元素(B等)をドーピングする。

- III B族元素も、Si結晶の格子点に入る(置換形不純物)。
- 価電子数3個なので、3個のSi原子と共有結合する。
- Bは価電子1個を受け取って正孔を放出する。



キャリア！

電子を受け取る不純物は、アクセプタ(acceptor)と呼ばれる。

ここで疑問に思うか？

- ・価電子数の異なる不純物をドーピングすると、電子もしくはホールがキャリアとして生成することは分かった(すでに知っていた)。
- ・だが、不純物ドーピングによって真性半導体の問題は解決したか？



バンド構造を知る必要がある！

電氣的性質

～エネルギーバンド～

（今週は準備運動）

■孤立原子的エネルギーバンド構造

半導体の電氣的性質を理解するには？

→電子の挙動を知る。

→エネルギーバンド構造を知る。

①一電子の場合(水素)

i) 電子は原子核の周りを円運動している。

求心力(クーロン力)と電子に働く遠心力は釣り合っているので、

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{r^2} = \frac{m_0 v^2}{r}$$

ϵ_0 : 真空の誘電率 q : 電子の電荷 r : 円軌道の半径

m_0 : 電子の静止質量 v : 電子の速度

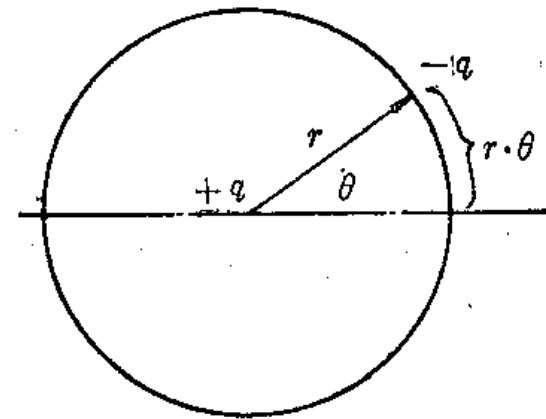


図 4.1

ii) 電子の角運動量は常に $h/2\pi$ (h : プランク定数) の整数 (n) 倍

$$m_0 v r = n \frac{h}{2\pi}$$

iii) 電子の全エネルギー E_n は運動エネルギーとポテンシャルエネルギーの和

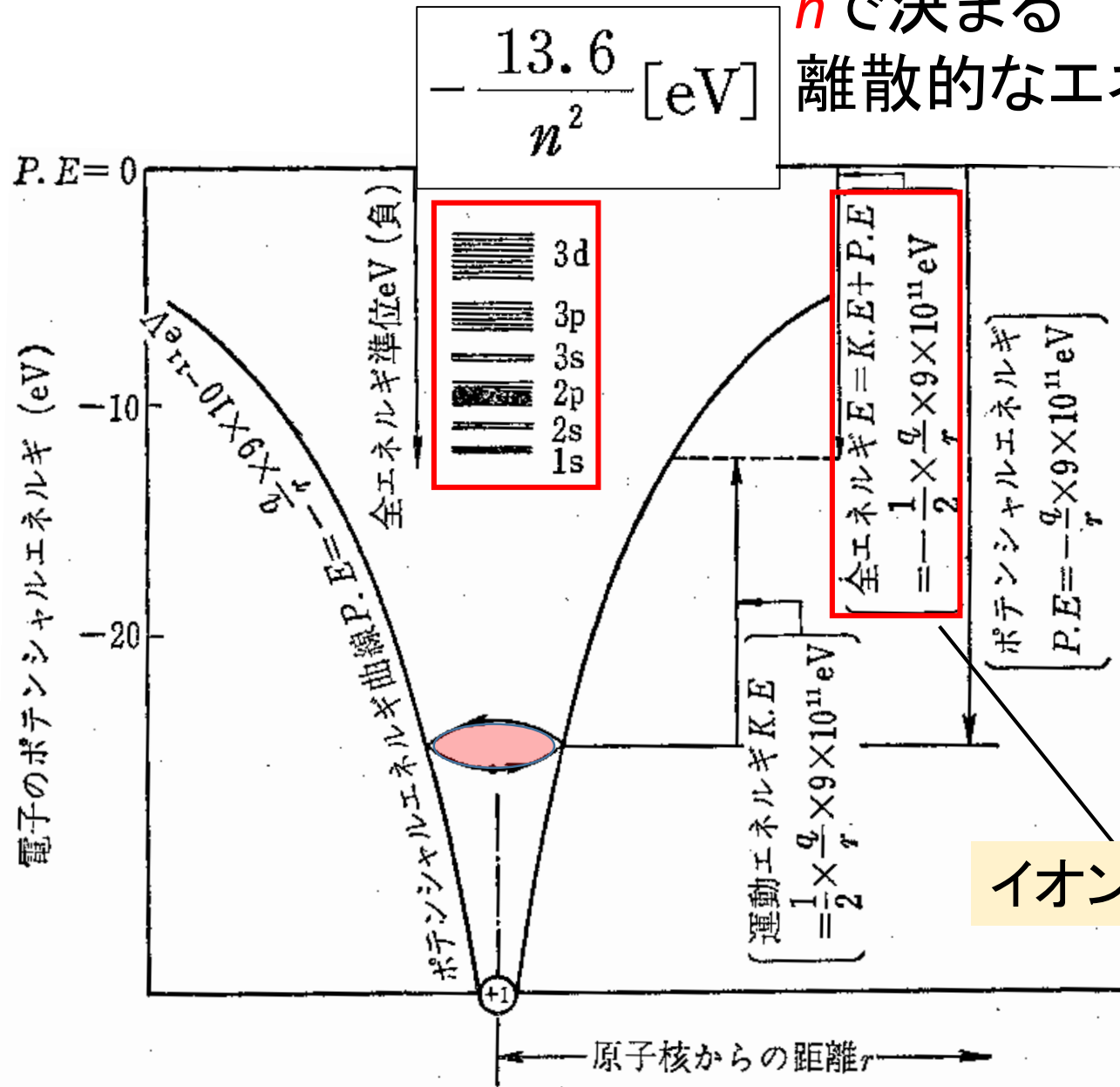
$$E_n = \frac{1}{2} m_0 v^2 + \left(-\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right)$$

以上の3条件の式をまとめると、

$$E_n = -\frac{m_0 q^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2} = -\frac{13.6}{n^2} [\text{eV}] \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

n で決まる

離散的なエネルギーを持つ。

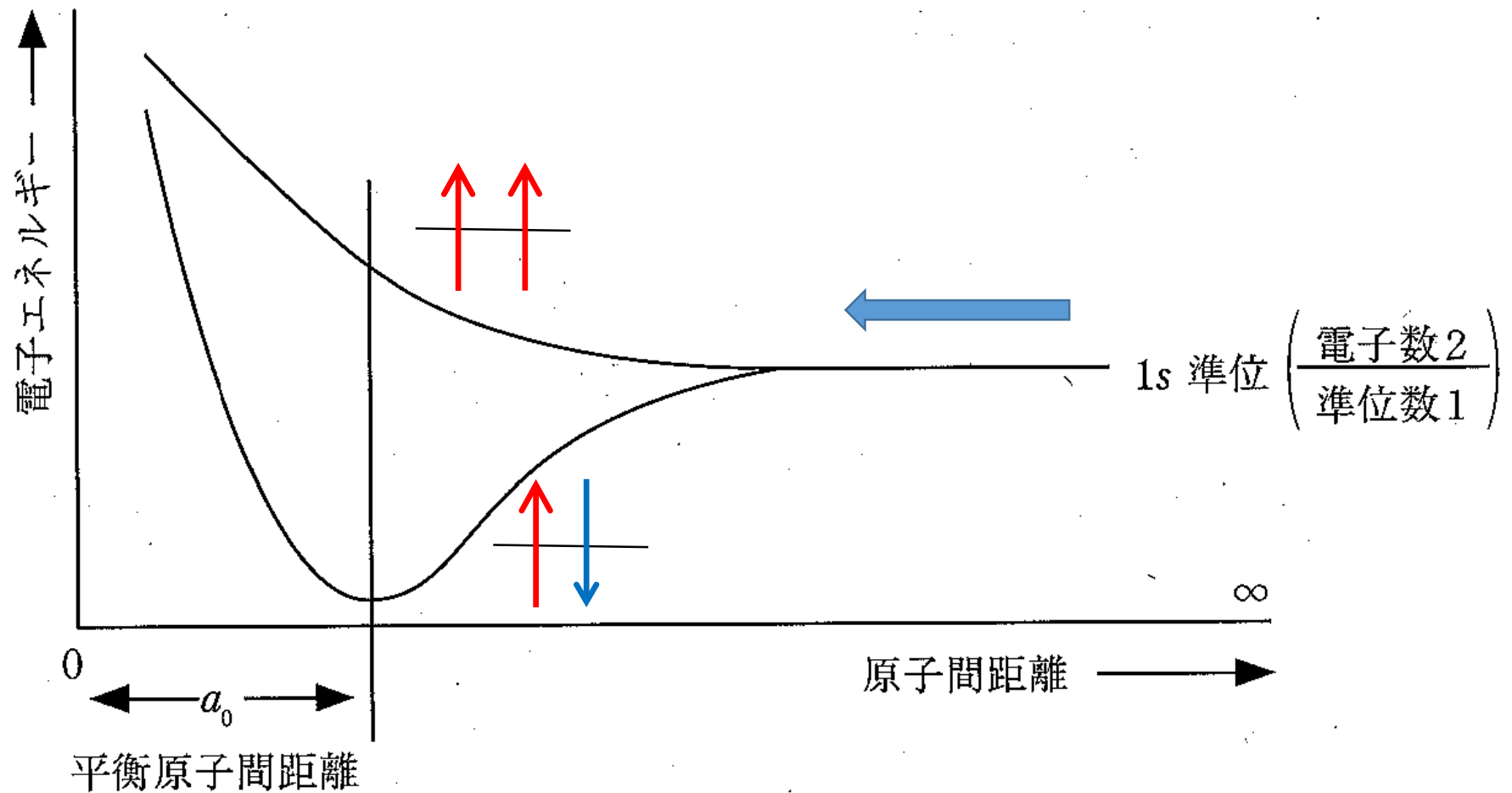


イオン化エネルギー

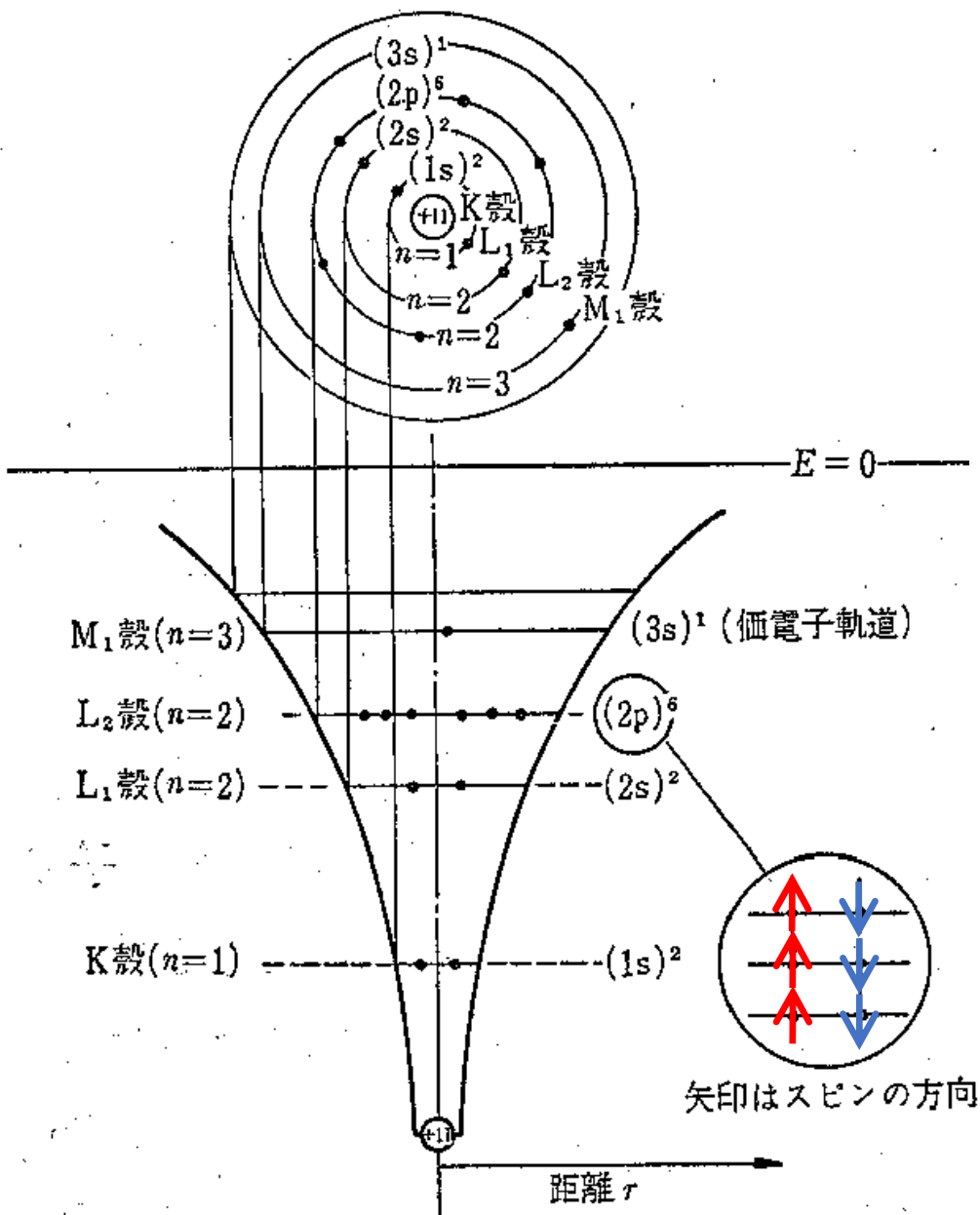
電子が無限遠まで離れる→イオン化

2個の水素原子を近づけると?

2通りのスピンの組合せ($\uparrow\downarrow$)、($\uparrow\uparrow$)があるため、
2つのエネルギー準位が出来る。



②-1: 多電子の場合 (Na原子の場合)



元素名	元素記号	分光記号 原子番号	X線記号		
			K	L	M
			1s	2s 2p	3s 3p 3d
水素	H	1	1		
ヘリウム	He	2	2		

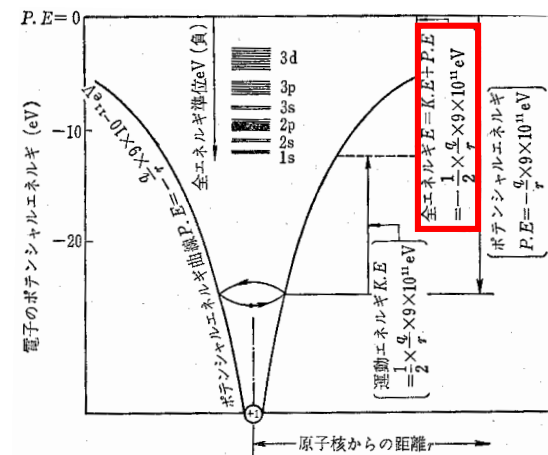
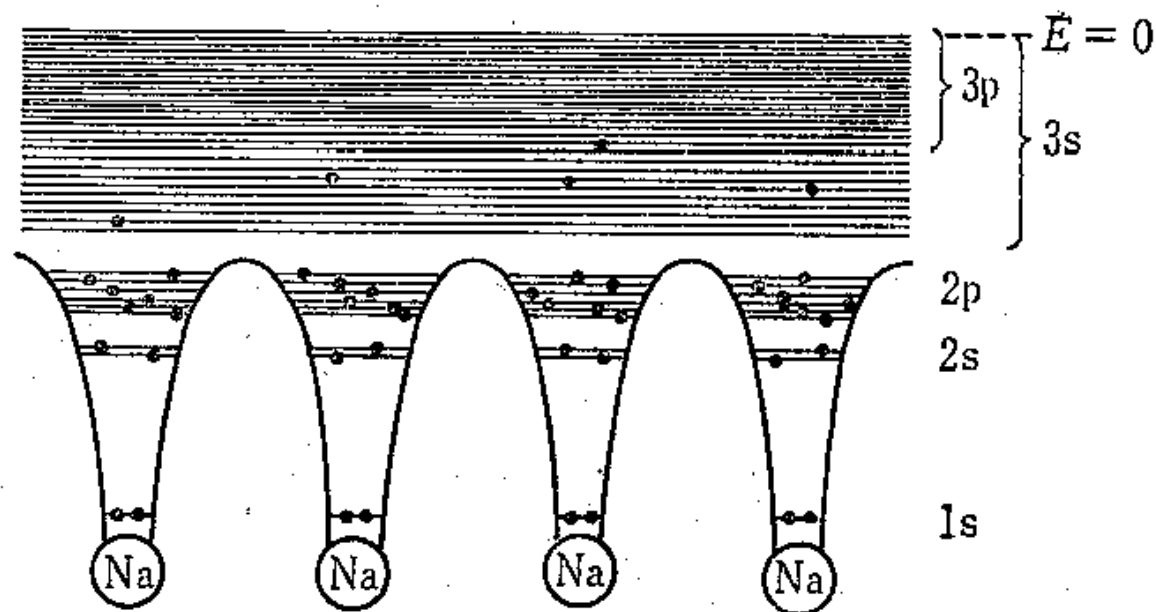
本来3sには電子が2個入れるが、Naは1個のみ。

これが価電子

ネ	オ	ソ	コ	ア		2	2	6	
ナ	ト	リ	ウ	ム	Na	11	2	2	6
									1

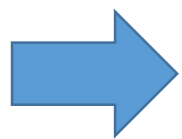
②-2: 多電子の場合 (Na結晶の場合)

N 個のNa原子で結晶を作っている場合のエネルギー図



原子間のポテンシャルエネルギーは互いの接近により、

- 結晶表面(外側)のように $E=0$ まで上がらない。
- 各原子の価電子が占めるエネルギー準位の下位にポテンシャルの山を作る。



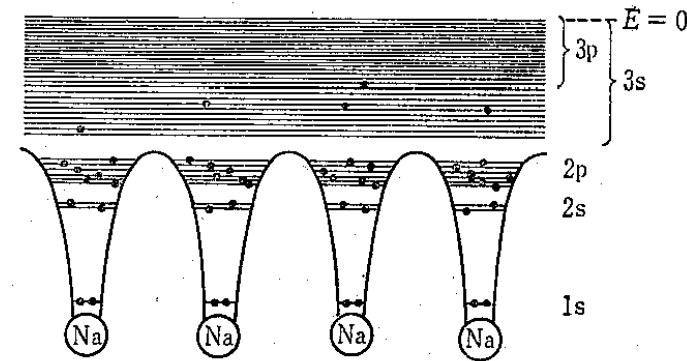
価電子は容易に原子を離れて自由に結晶中を動き回る！ (**自由電子**)

結晶内では、原子間の相互作用によって、
離散的なエネルギー準位

→帯状となる(エネルギー帯:バンド)

各エネルギー帯には、

- N 個の原子と同数の準位がある。
- この準位は極めて密に、かつ離散的に並んでいる。



つまり、(1s)、(2s)、(2p)、(3s)の
各状態の **N 倍個**の準位が存在。

		(1s)	(2s)	(2p)	(3s)	(3p)
Na	11		2	2 6	1	

※エネルギー帯3sと3pは重なり合っている。

→3s電子の一部が3p帯の底の準位に入る。

→3p帯の底より高い3sと3pの準位を電子が居なくなるまで順に満たす。

■ 絶縁体のバンド構造 (KCl: イオン結晶)

価電子1個

- K(電子数19個): $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^6(4s)^1$
- Cl(電子数17個): $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^5$



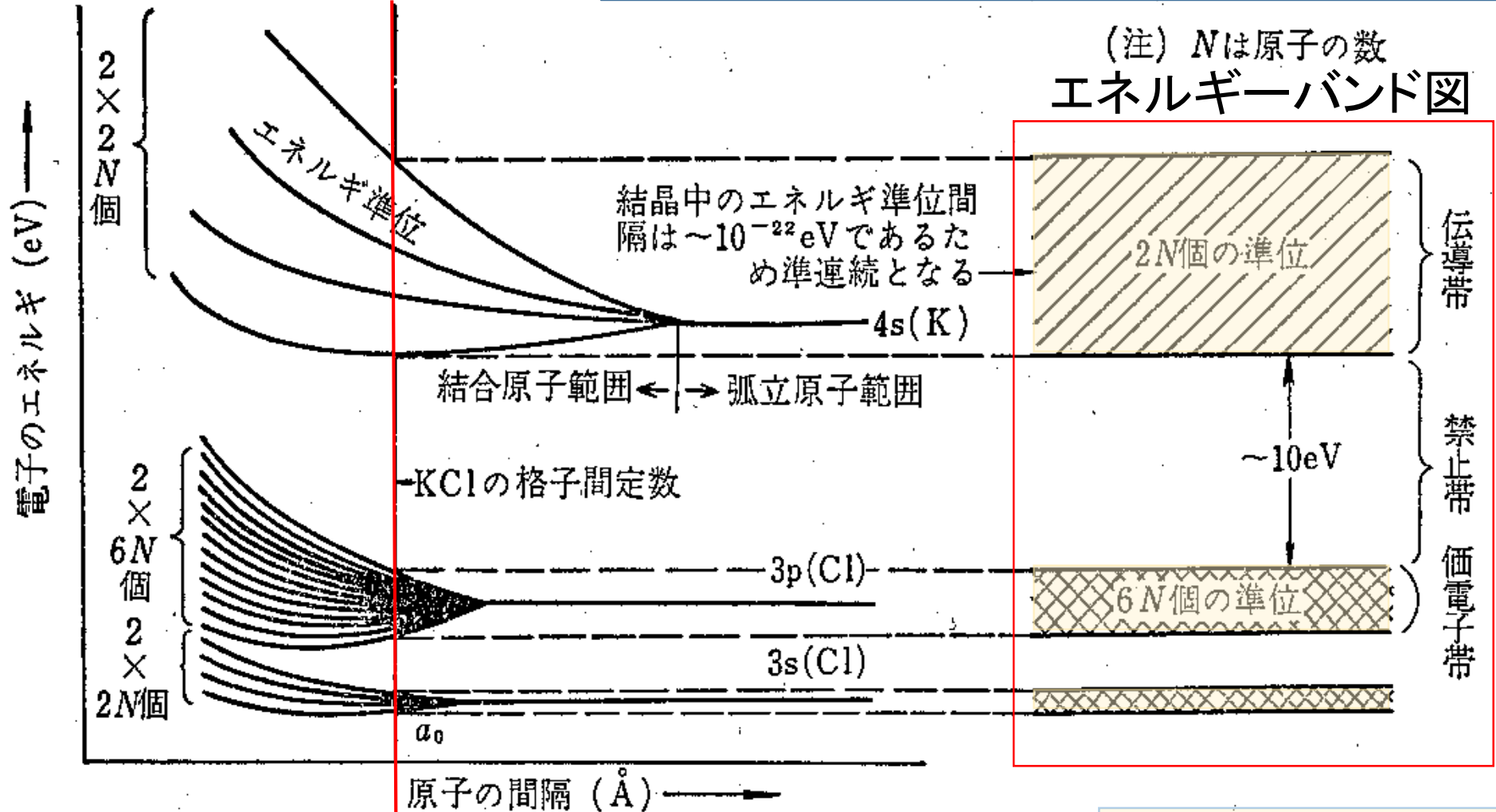
閉殻 $(3p)^6$ に
電子1個不足

- K(電子数19個): $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^6(4s)^{1 \rightarrow 0}$
- Cl(電子数17個): $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^{5 \rightarrow 6}$

Kから4s電子1個を移して、
Cl原子の閉殻 $(3p)^6$ を作る。

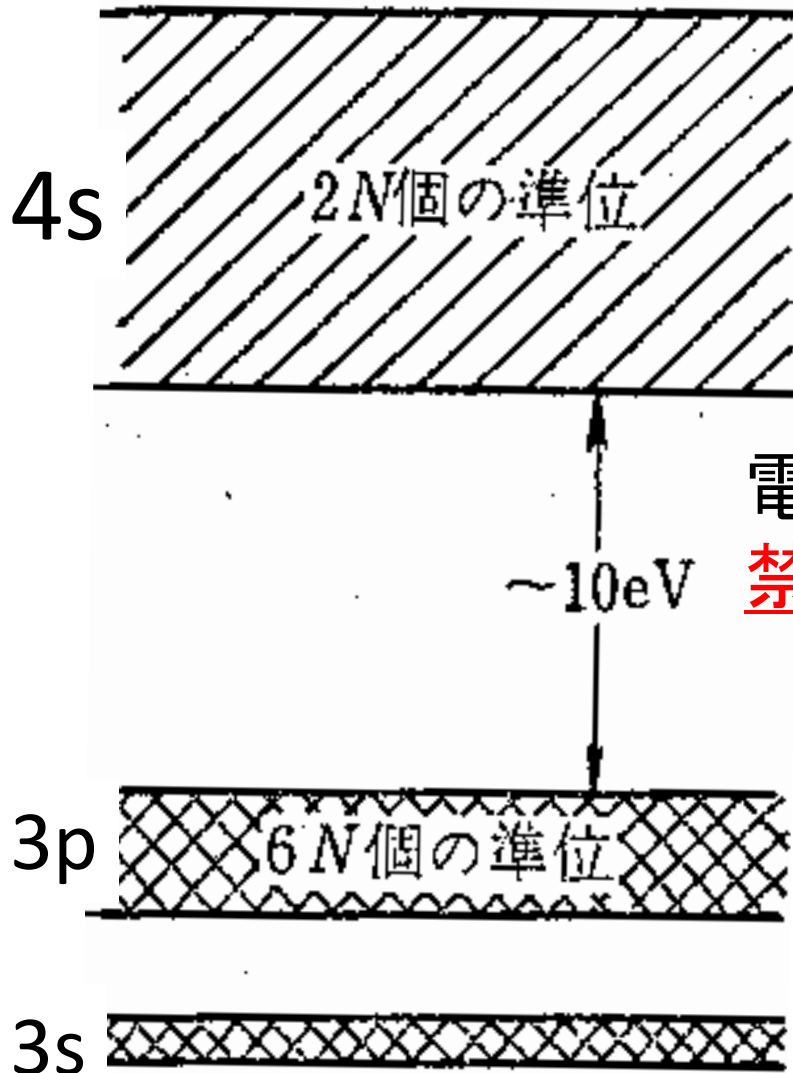
格子間隔 a_0

- K(電子数19個): $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^6(4s)^1$
- Cl(電子数17個): $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^5$



許容帯
(電子が居られる)

- K(電子数19個): $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^6(4s)^{1 \rightarrow 0}$
- Cl(電子数17個): $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^{5 \rightarrow 6}$



ここに励起された電子は
自由に運動できる。

伝導帯 (Conduction band)

電子は居られない。

禁制帯 (forbidden band); バンドギャップ

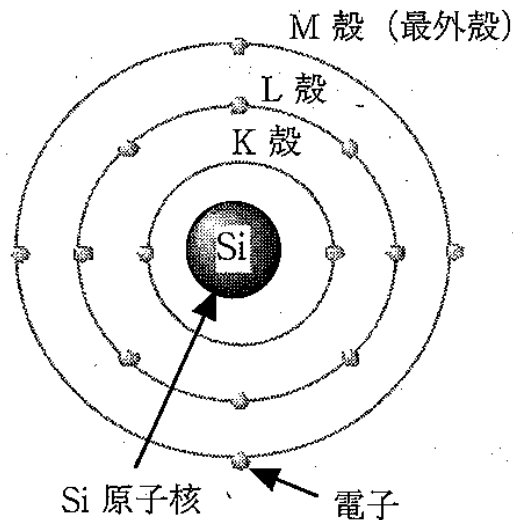
絶縁体: 禁制帯幅 > 熱エネルギー

ここまで電子が詰まっている。

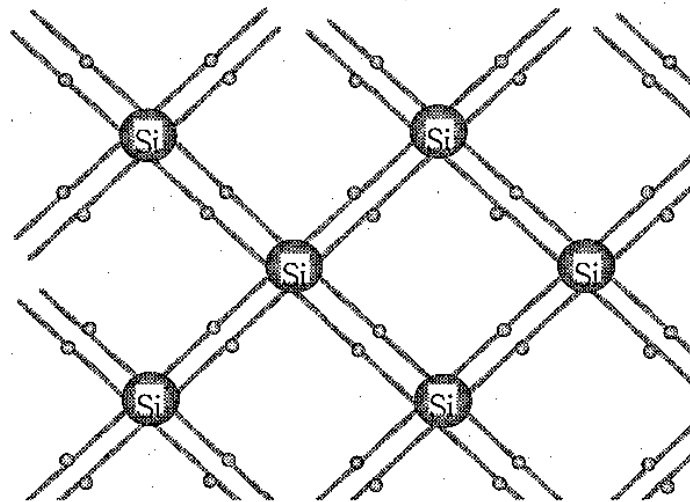
価電子帯 (Valence band; 充満帯)

■半導体のバンド構造(Si)

- 4個の価電子(最外殻電子配置: $(3s)^2(3p)^2$)
- ダイヤモンド構造の共有結合結晶
- 1つのSi原子は4個の最近接Siから成る**正**4面体に囲まれる。
- **等価**な4つの電子軌道。
- 向きが反対のスピンの電子が1つずつ入って結合。



(a) 原子模型



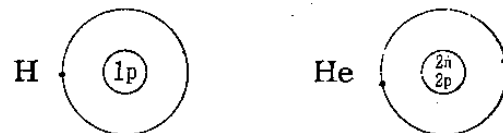
(b) 共有結合の様子

図 2.3 Si の原子模型と共有結合の様子

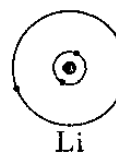
表 1.1 元素の核外電子配置表

X線記号 分光記号 元素記号 原子番号		K	L	M	N	O	P	Q
		1s	2s 2p	3s 3p 3d	4s 4p 4d 4f	5s 5p 5d 5f	6s 6p 6d	7s

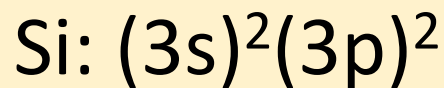
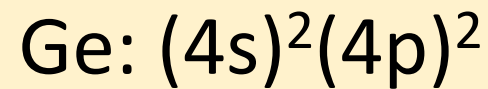
水素	H	1	1					
ヘリウム	He	2	2					



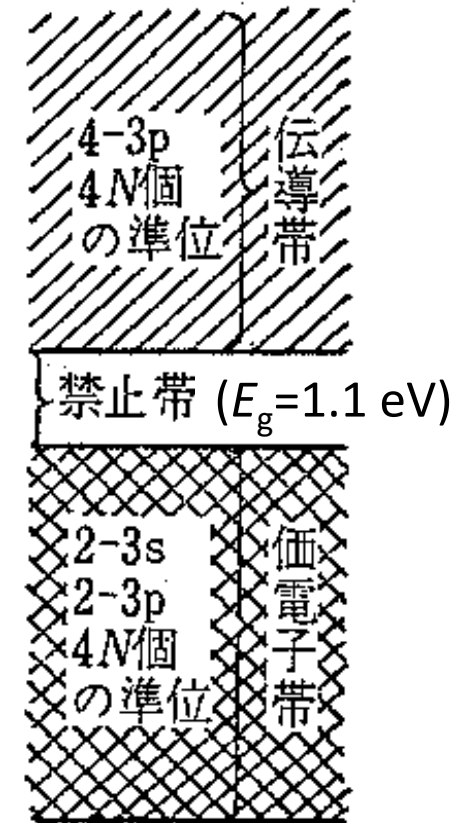
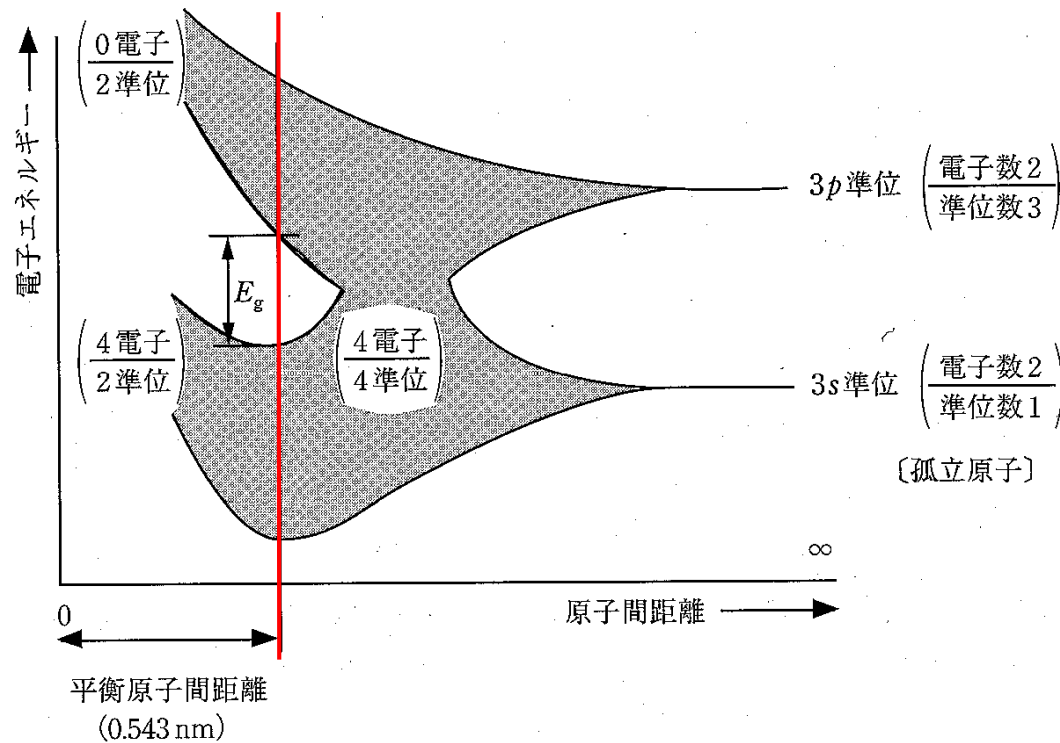
X線記号 分光記号 元素記号 原子番号		K	L	M	N
		1s	2s 2p	3s 3p 3d	4s 4p 4d 4f
ヘリウム	He	2			
リチウム	Li	3	2 1		
ベリリウム	Be	4	2 2		
硼	B	5	2 2 1		
炭素	C	6	2 2 2		
窒素	N	7	2 2 3		
酸素	O	8	2 2 4		
フッ素	F	9	2 2 5		
ネオン	Ne	10	2 2 6		
ネオン	Ne	2	2 6		
ナトリウム	Na	11	2 2 6 1		
マグネシウム	Mg	12	2 2 6 2		
アルミニウム	Al	13	2 2 6 2 1		
シリコン	Si	14	2 2 6 2 2		
リン	P	15	2 2 6 2 3		
硫黄	S	16	2 2 6 2 4		
塩素	Cl	17	2 2 6 2 5		
アールゴ	Ar	18	2 2 6 2 6		
アールゴ	Ar	2	2 6	2 6	



X線記号 分光記号 元素記号 原子番号		K	L	M	N
		1s	2s 2p	3s 3p 3d	4s 4p 4d 4f
ガリウム	Ga	31	2 2 6	2 6 10	2 1
ゲルマニウム	Ge	32	2 2 6	2 6 10	2 2
砒素	As	33	2 2 6	2 6 10	2 3
セレン	Se	34	2 2 6	2 6 10	2 4
臭素	Br	35	2 2 6	2 6 10	2 5
クリプトン	Kr	36	2 2 6	2 6 10	2 6
クリプトン	Kr	2	2 6	2 6 10	2 6



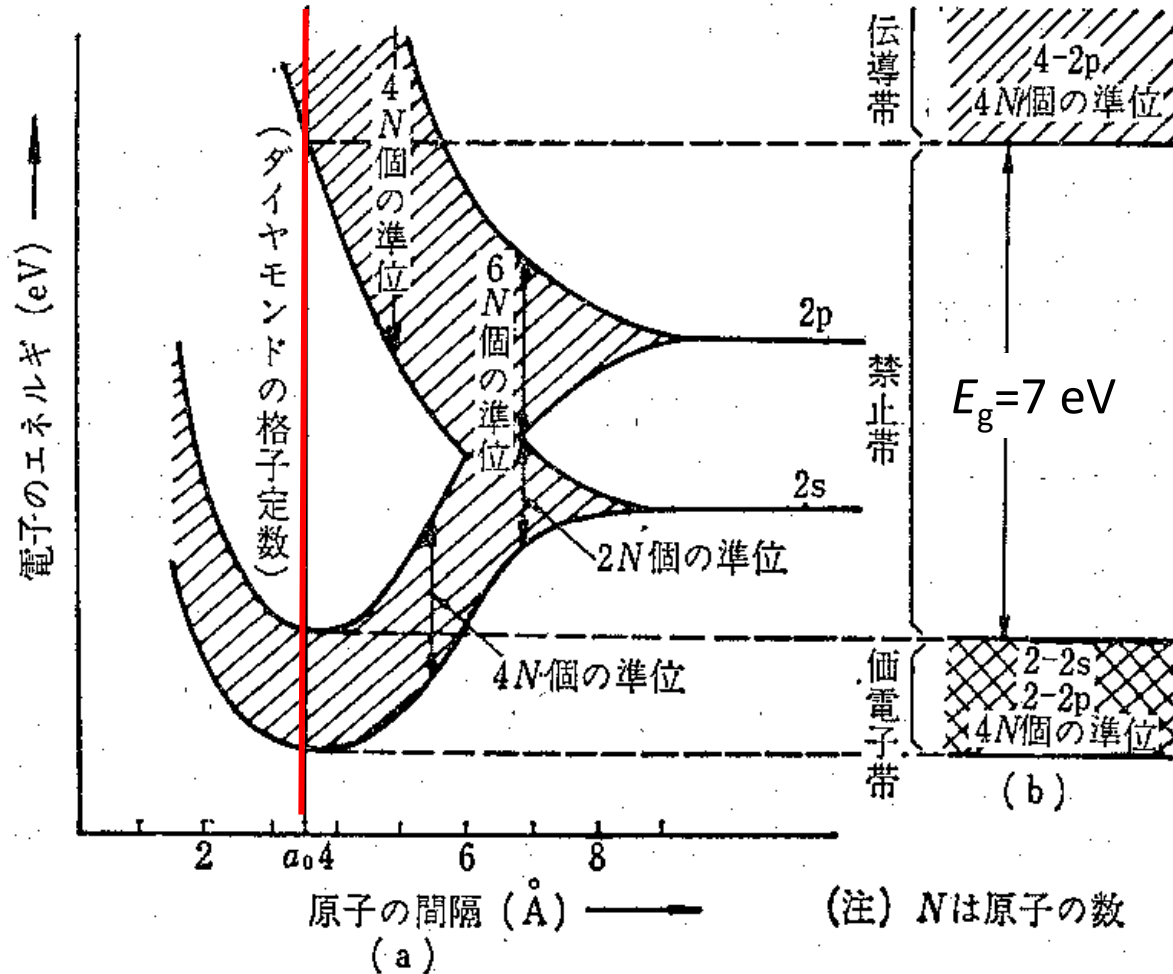
■ Siのバンド構造



複数のSi原子を遠くから近づけてくると、

- (3s)と(3p)準位は徐々に広がってバンドになってくる。
- (3p)の6個中2つの状態(電子が詰まっている)は(3p)帯の下側に分布し、(3s)²と共鳴しあいながら近づく。
- (3s)と(3p)の交点で下方のエネルギー帯にsp³混成軌道を作る(電子が満たされる)。

■ (参考) ダイヤモンドのバンド構造



C原子: $(1s)^2(2s)^2(2p)^2$

- ダイヤモンド結晶を作る。
- Siと同様のバンドを作る。
- バンドギャップが7eVのため、構造が同じでも**絶縁体**。

■ 金属のバンド構造 (Cuを例に)

- Cuの電子配置: $(1s)^2(2s)^2(2p)^6(3s)^2(3p)^6(3d)^{10}(4s)^1$
- 互いにCu原子を近づけていくと、
- エネルギー準位が相互作用を始める。
- さらに近づけると、次の準位が分裂し始める。
- Cu結晶の原子間距離 a_0 になるまでに、(3d)、(4s)、(4p)は十分広がって重なり合う。

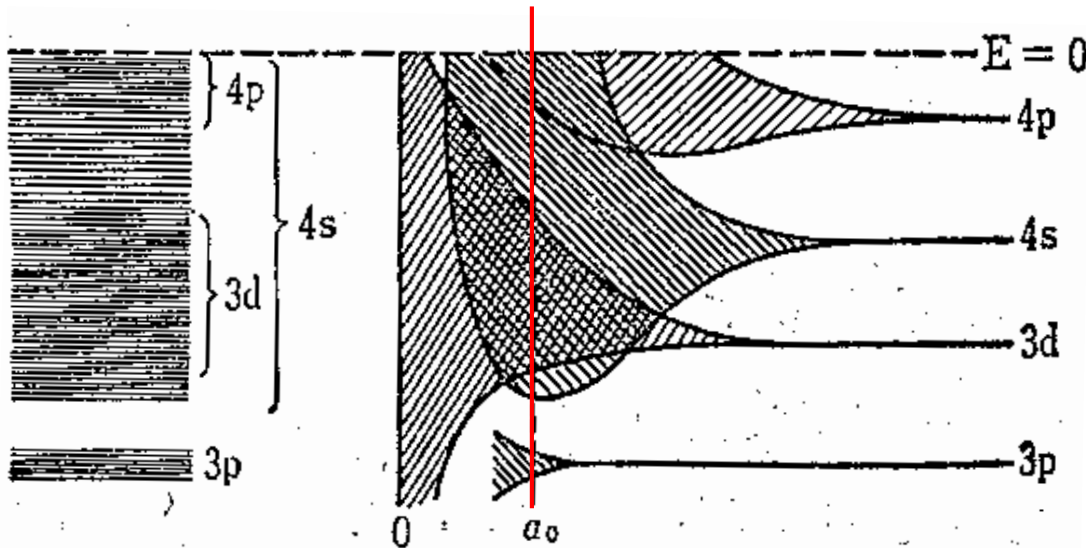


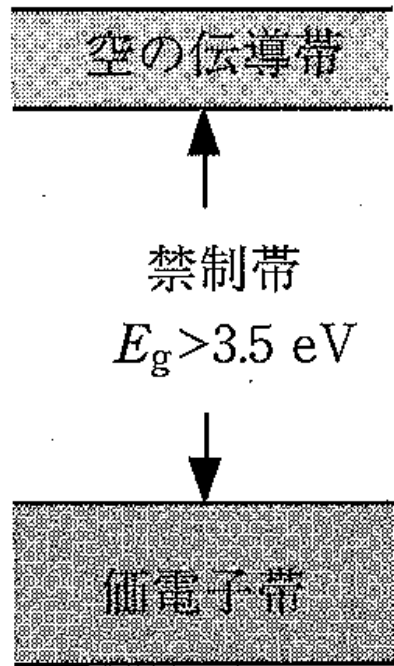
図 4.13 金属 Cu のエネルギー帯

- (3d)と(4s)帯は良く重なり合っている。
- また、(4s)には半分しか電子が満たされていない。

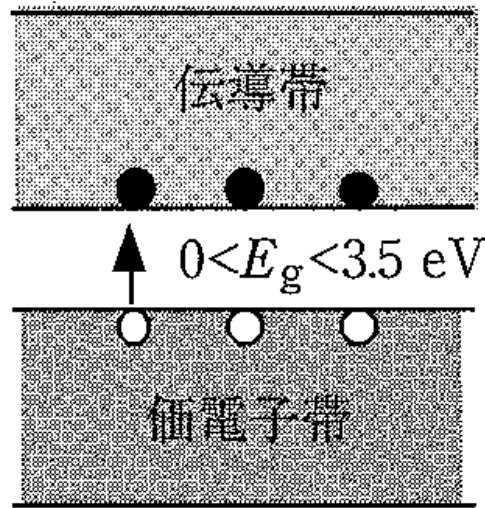
電子が移れる準位がある

良導体となる！

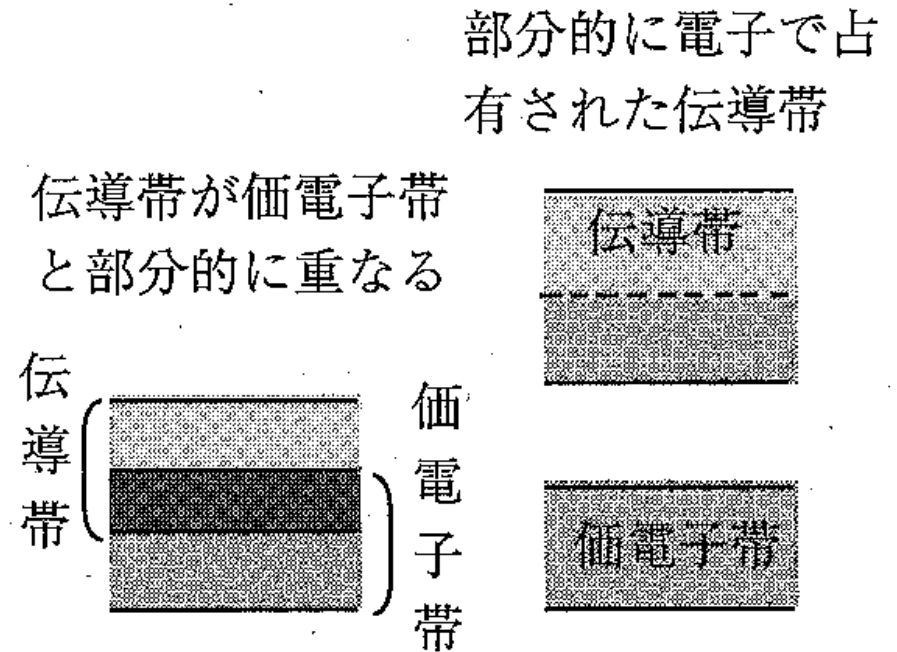
■ バンド構造による物質の区別



(a) 絶縁体



(b) 半導体



(c) 導体

熱励起で超えられる
バンドギャップか否か？

- ギャップレス
- 伝導帯に電子が居る