

エレクトロニクス

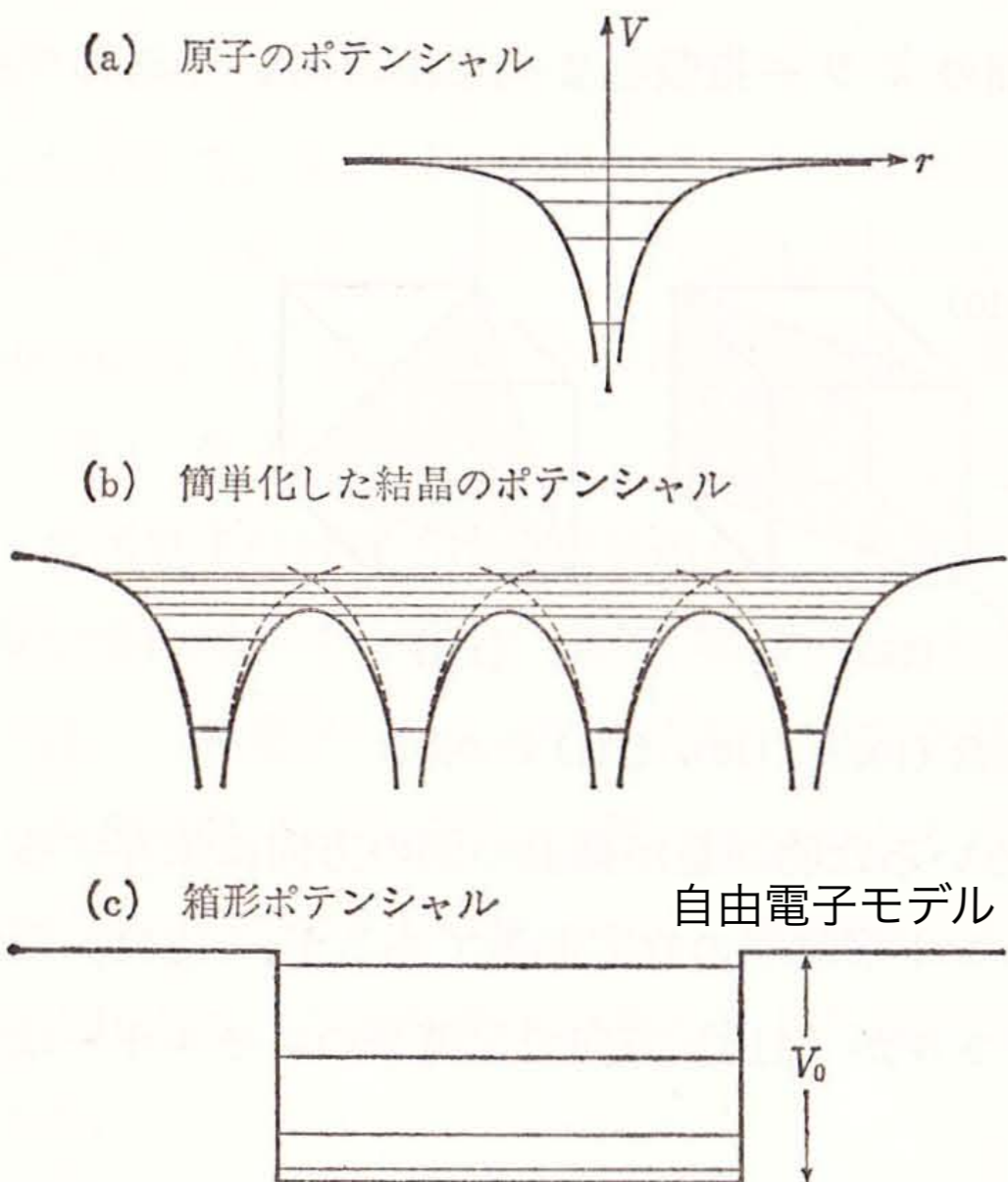
講義資料

第9章：半導体

ver. 2

鶴 剛 (tsuru@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp)

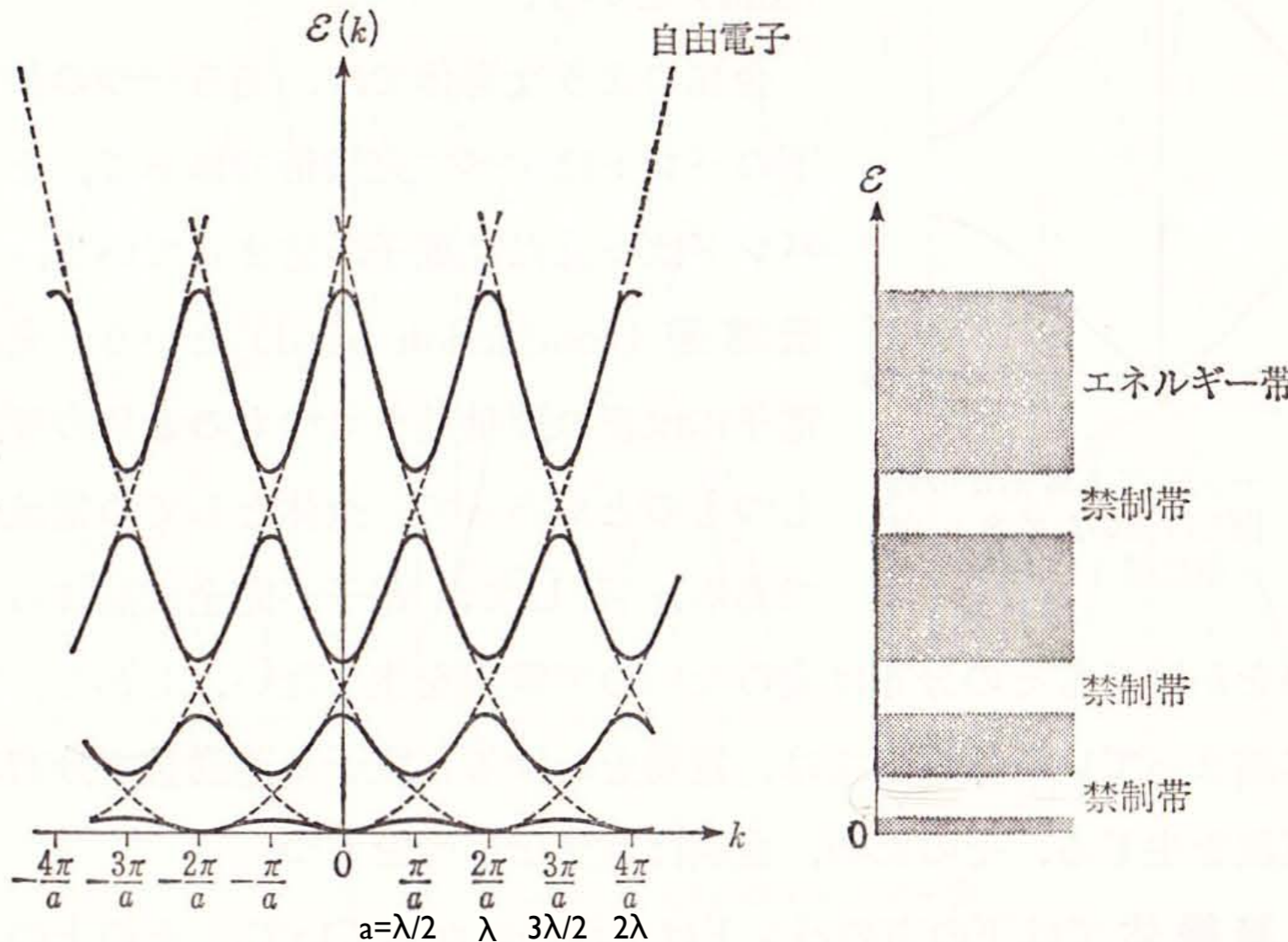
結晶内電子のエネルギーのバンド構造



2-2 図 (a) 原子, (b) 簡単化した結晶, (c) 箱形ポテンシャルの中の電子のエネルギー準位

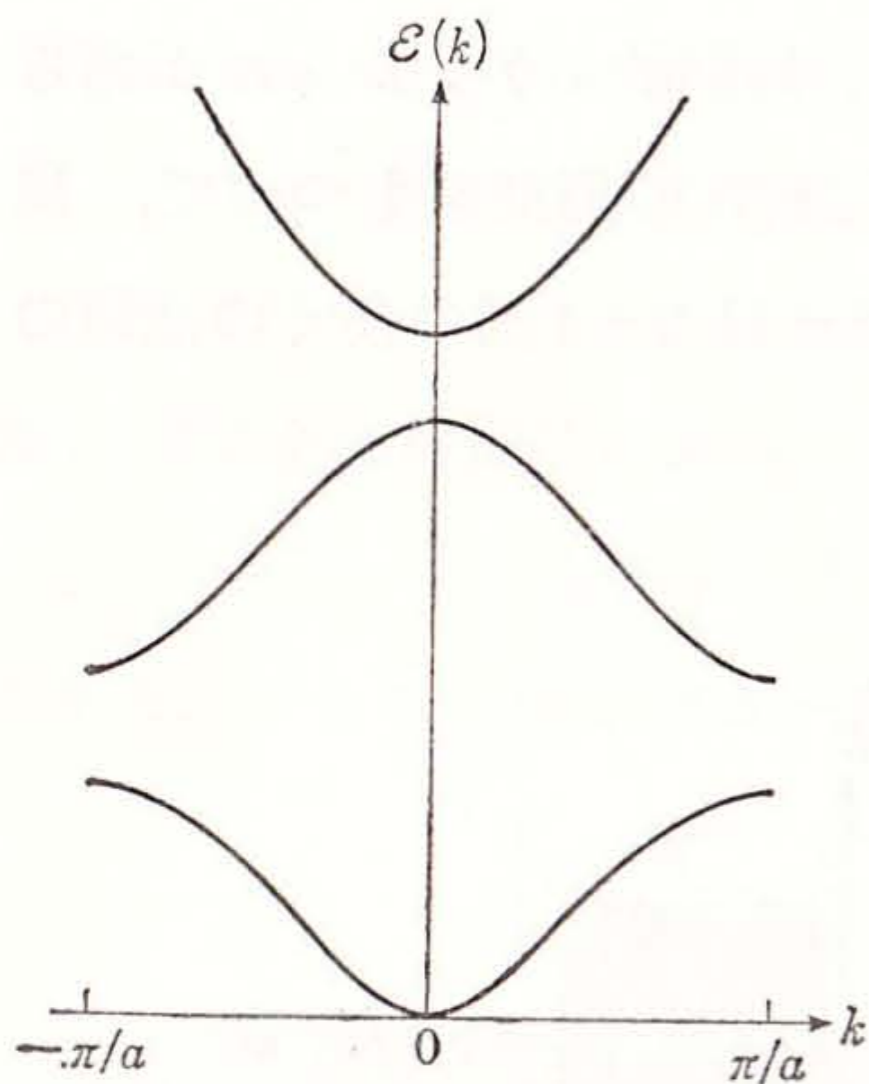
- 箱型ポテンシャルの長さLに対して, エネルギーEは連続的になる.
- 自由電子のエネルギーEと波数kとの関係は下記の放物線になる.

$$E_x = \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m}$$



2-4 図 周期 a の周期的ポテンシャルの中の電子の波動ベクトル k とエネルギー E の関係. 右側はこのときのエネルギーバンド (帯).

- 自由電子のエネルギーEと波数kとの関係は放物線になる(点線).
- 周期的ポテンシャル中の電子の波動関数は周期的になる(ブロッホの定理).
- ポテンシャルの周期がaの場合,
 - 波動関数はkについて $2\pi/a$ の周期を持つ.
 - 自由電子からの摂動は, $k=n\pi/a$ の付近で強く作用し実線のようになる.
 - 固有エネルギーが許される範囲と, 許されない範囲が生ずる.



2-5 図 $-\pi/a \leq k \leq \pi/a$ の範囲だけ描いたエネルギー準位図

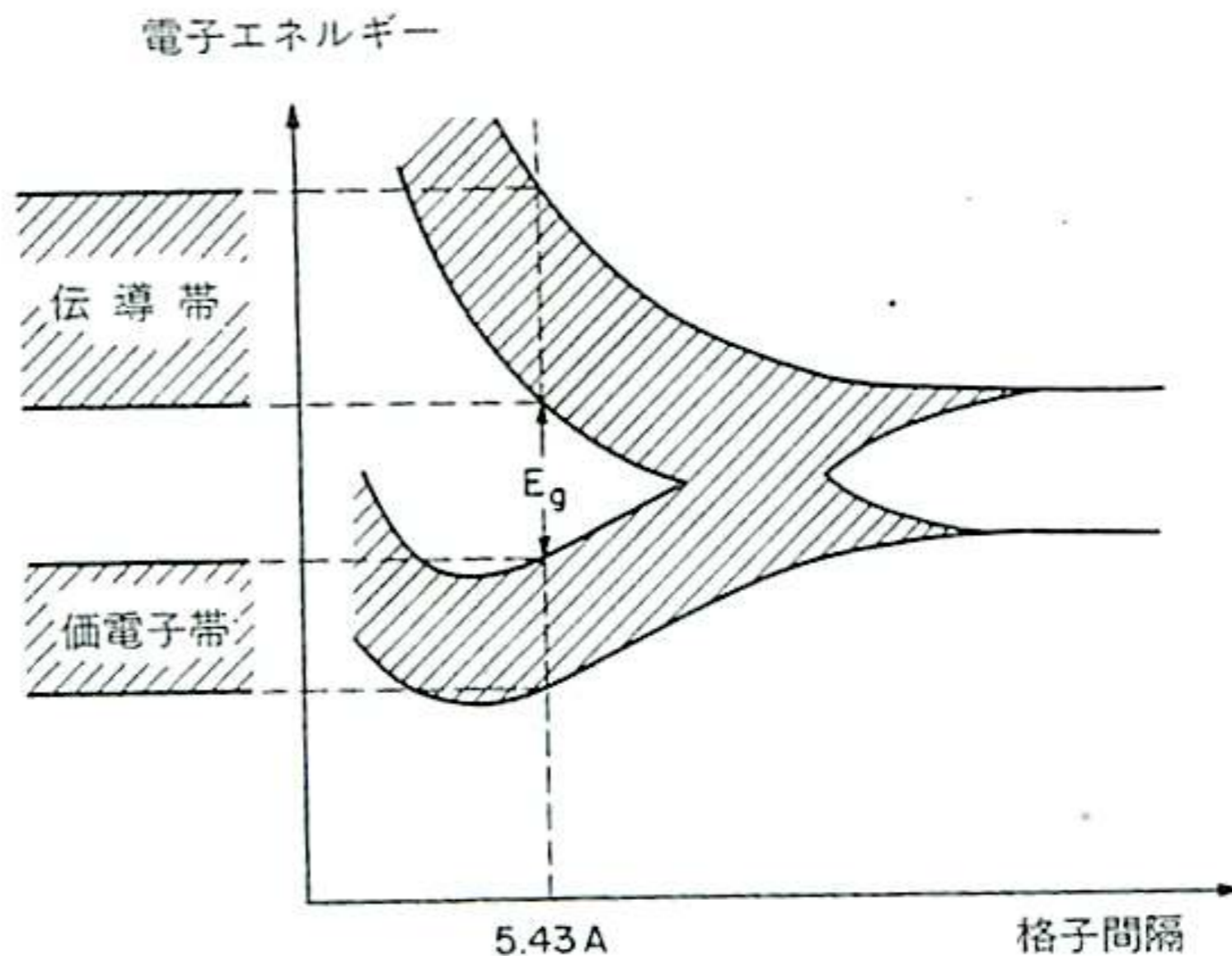


図 8 Si 原子を接近させ、ダイヤモンド格子を形成したときのエネルギーバンド.

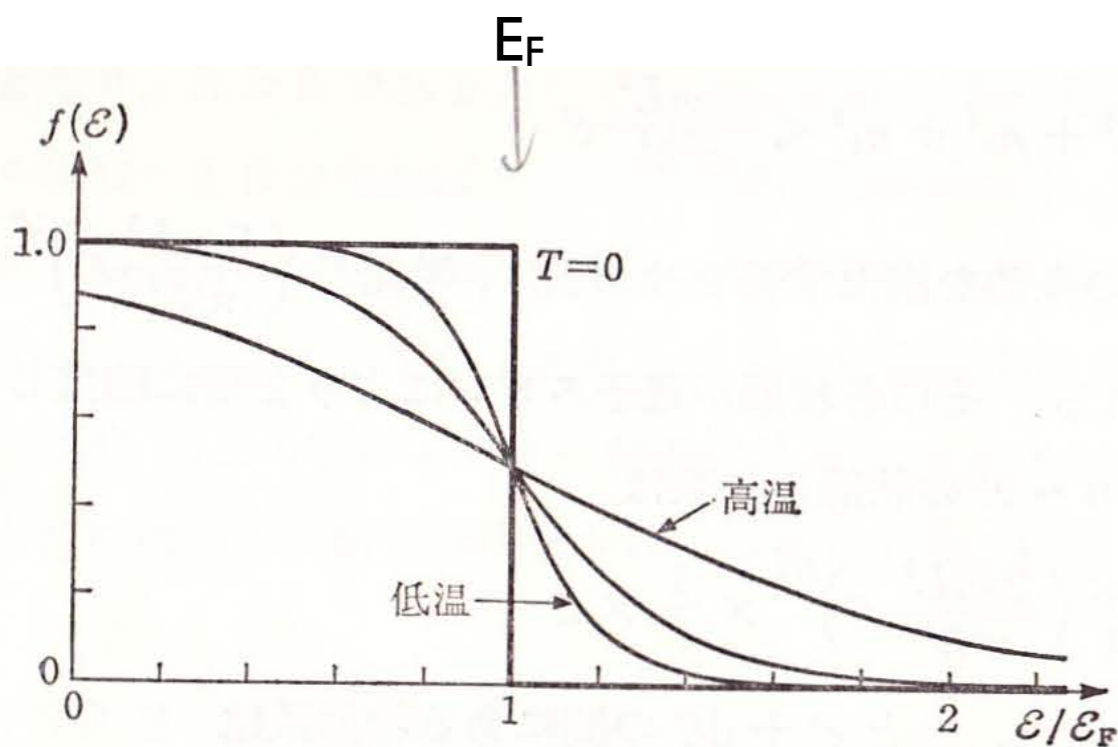
フェルミ分布と状態密度

f(E) : フェルミ分布関数

状態密度 ρ(E) : エネルギー準位の分布

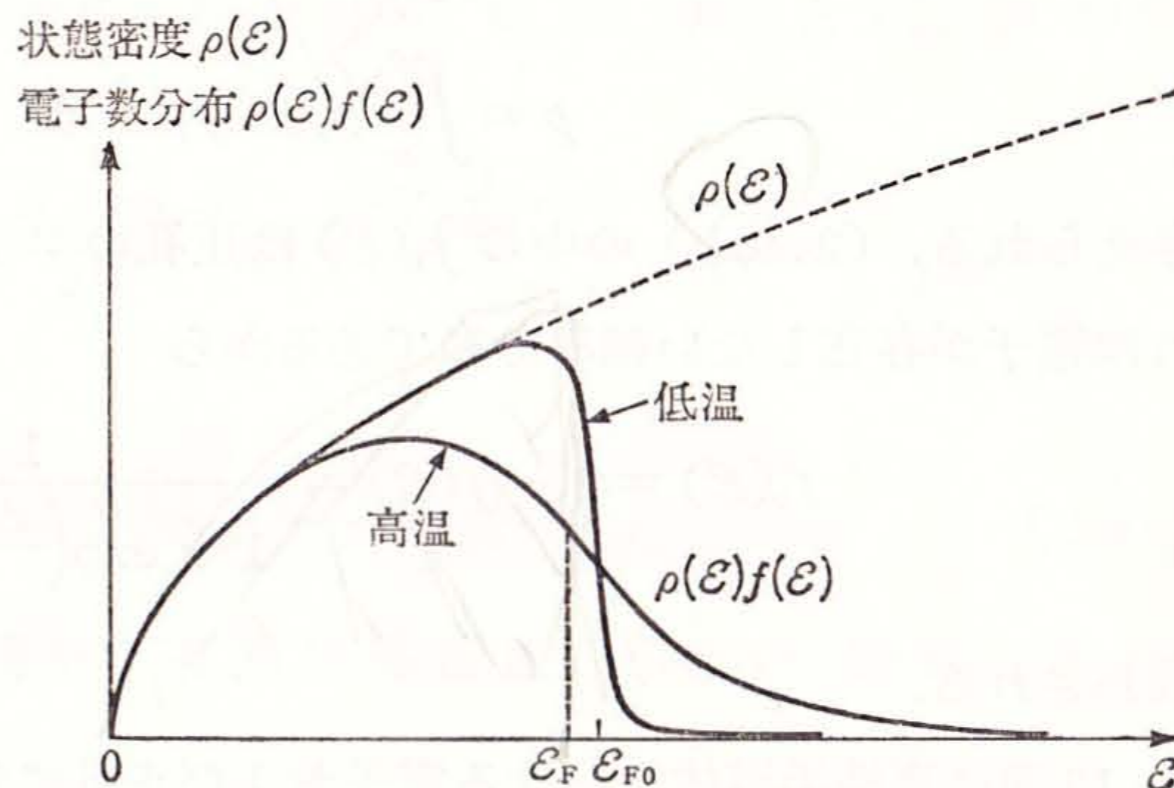
$$f(\mathcal{E}) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_F}{kT}\right)}$$

E_F : フェルミ準位 (Fermi level)



2-11 図 フェルミ分布

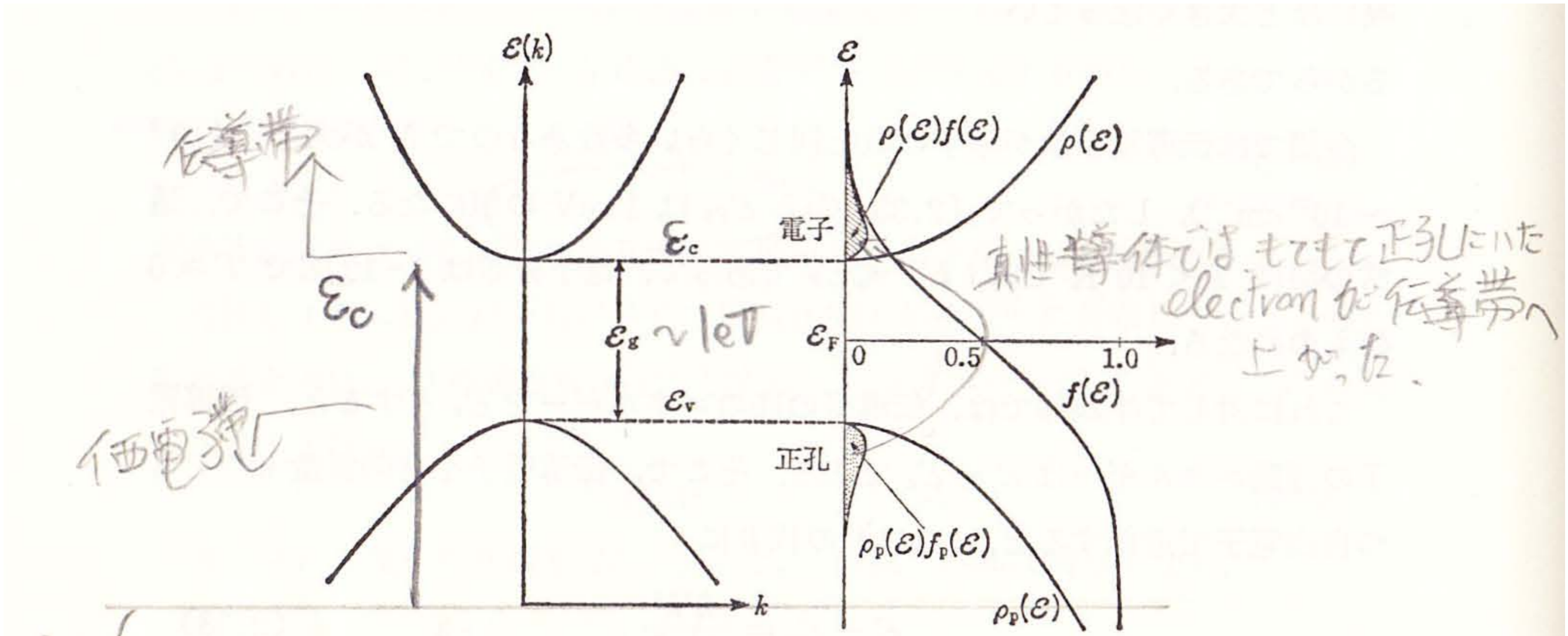
E_F : フェルミエネルギー
 $T=0$ のフェルミ準位



2-12 図 自由電子の状態密度と分布

実際にそれぞれの準位に電子が存在する確率は、分布関数f(E)と状態密度ρ(E)の掛け算

真性半導体の電子と正孔の分布



2-13 図 真性半導体の電子と正孔の分布. $f(\mathcal{E})$ はフェルミ分布, $\rho(\mathcal{E})$ は電子の状態密度, $\rho_p(\mathcal{E})$ は正孔の状態密度.

バンド構造

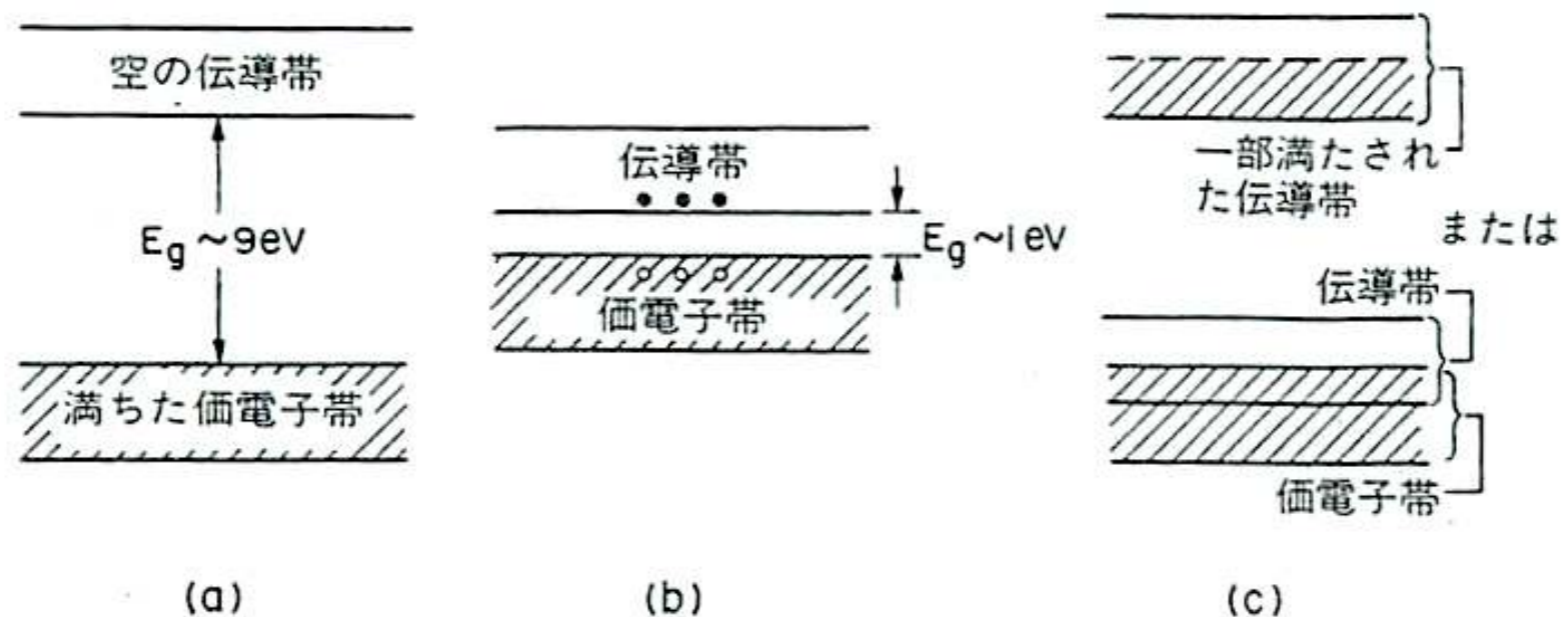


図 9 (a) 絶縁体のエネルギーバンド, (b) 半導体のエネルギーバンド, (c) 導体のエネルギーバンド.

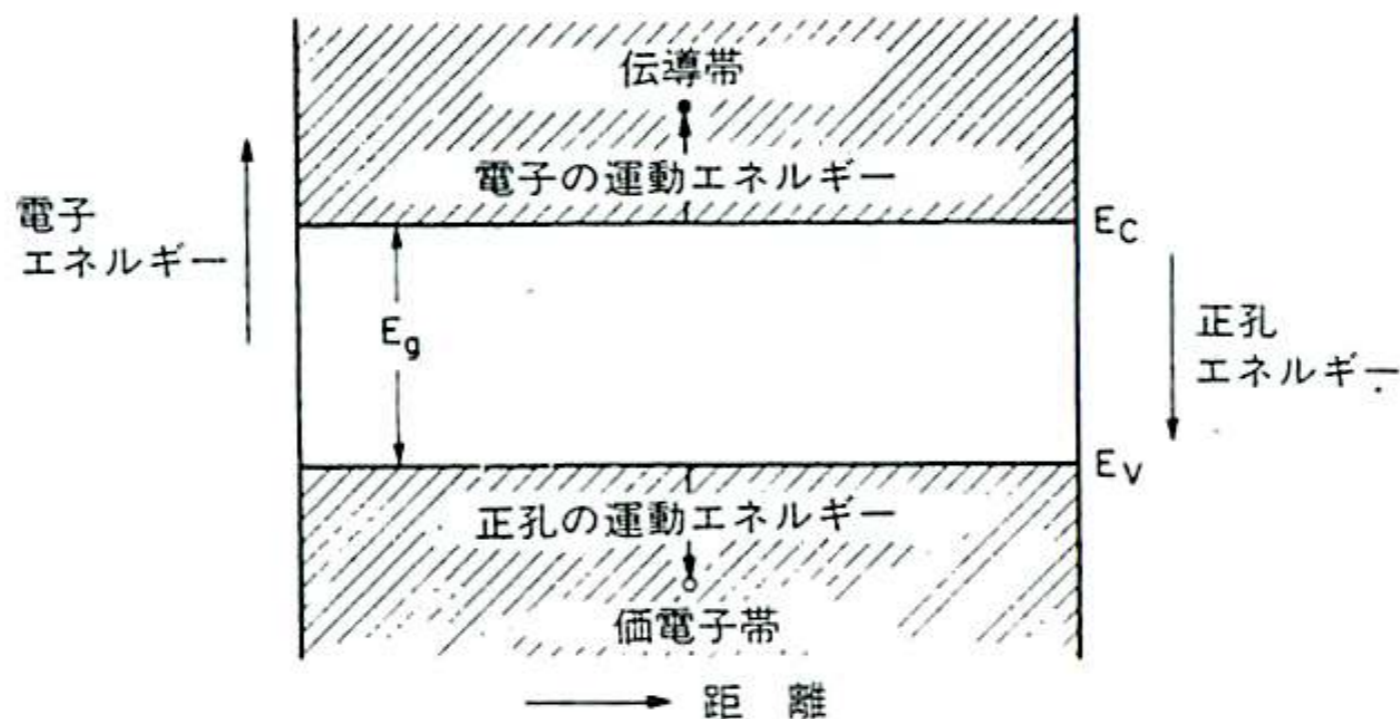
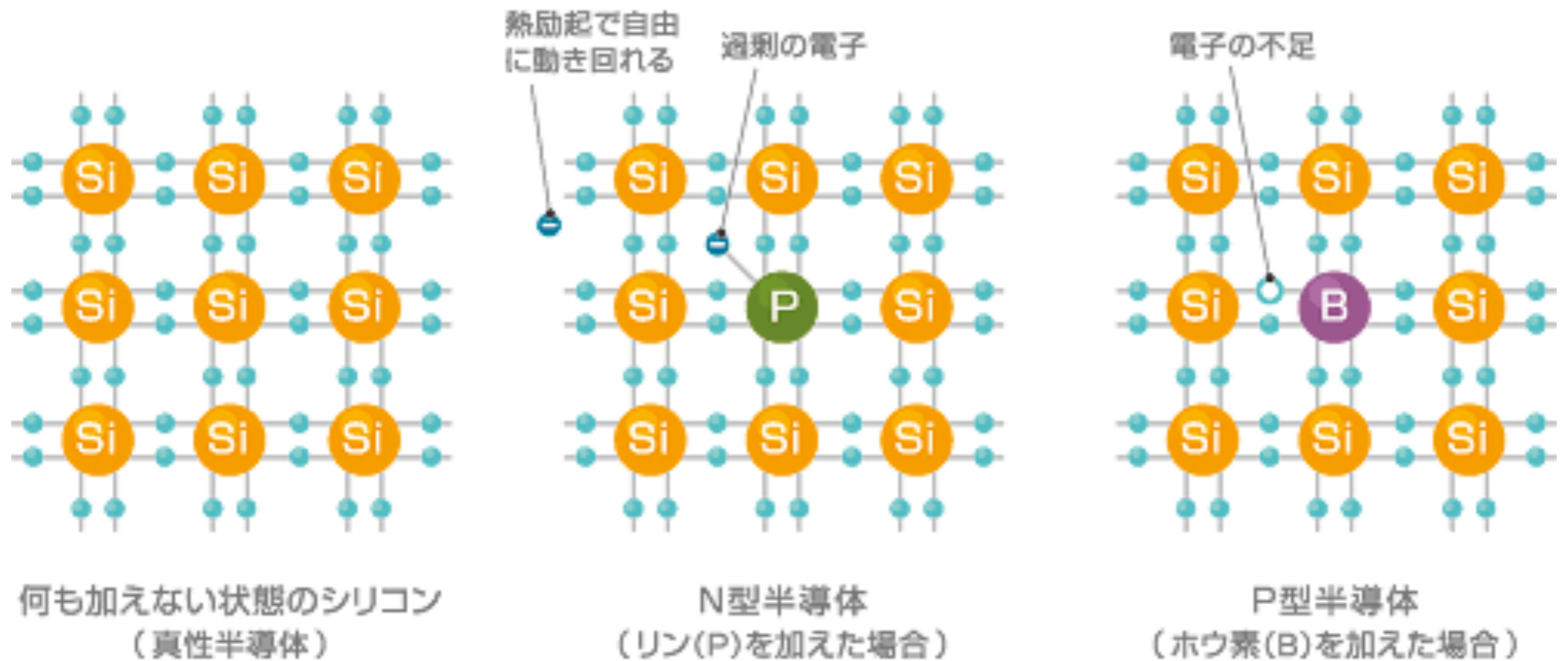


図 10 エネルギーバンド表示でのポテンシャルエネルギーと運動エネルギー.

P型半導体, N型半導体



ドナー(n型半導体)とアクセプタ(p型半導体)

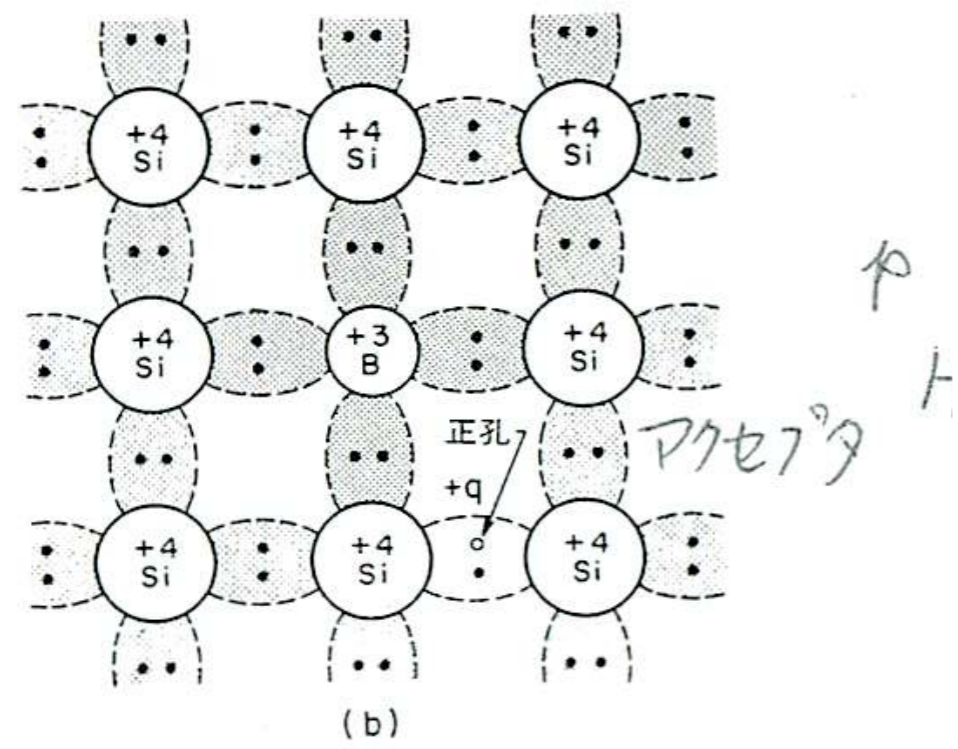
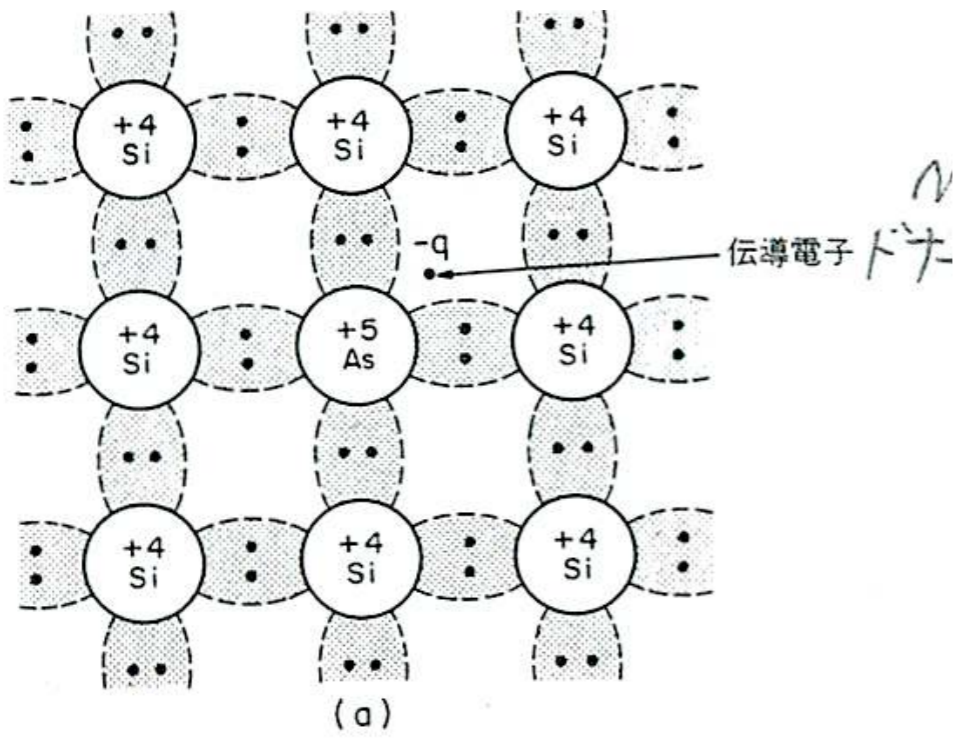


図 17 (a) As ドープ n 形 Si および, (b) B ドープ p 形 Si に対する結合の模式図.

	Sb	P	As	Ti	C	Pt	Au	O
Si	0.039	0.045	0.054	0.21	0.25	0.25 A	0.16	0.38 A
1.12							0.54 A	0.51 A
	0.045	0.067	0.072	0.16	0.34	0.35 D	0.36 D	0.29 D
	B	Al	Ga	In	Pd			
GaAs	0.006	0.006	0.006	0.03	0.0058	0.006	0.4	0.63 A
1.42							0.67 D	0.44 D
	0.028	0.028	0.031	0.035	0.035	0.026	0.24	0.14
	Be	Mg	Zn	Cd	Si	C	Cu	Cr

図 18 Si および GaAs における各種の不純物に対するイオン化エネルギーの実測値. バンドギャップの中心より下の準位のエネルギーは価電子帯上端からの数値であり, D と記されているもの以外はアクセプタ準位である. 中心より上の準位のエネルギーは, 伝導帯の底からの値であり, A と記されているもの以外はドナー準位である⁵.

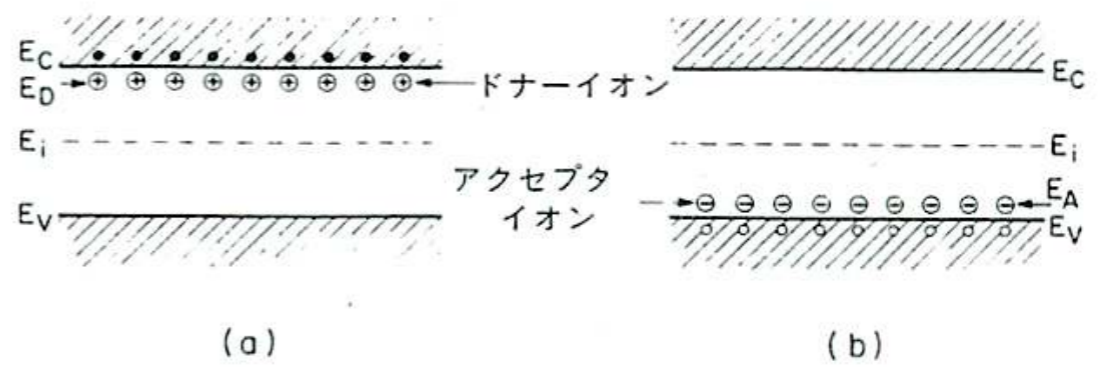


図 19 ドナーイオン(a) およびアクセプタイオン(b) を有する外因性半導体のエネルギーバンド図.

ドナー(n型半導体)とアクセプタ(p型半導体)

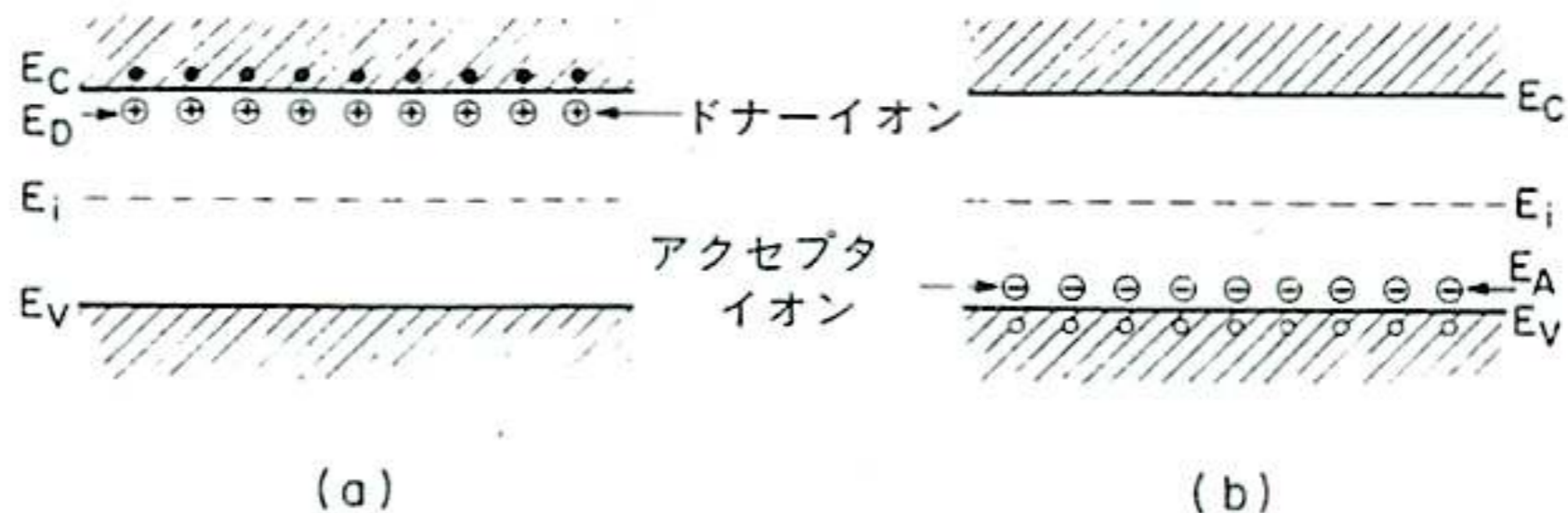


図 19 ドナーイオン(a) およびアクセプタイオン(b) を有する外因性半導体のエネルギーバンド図.

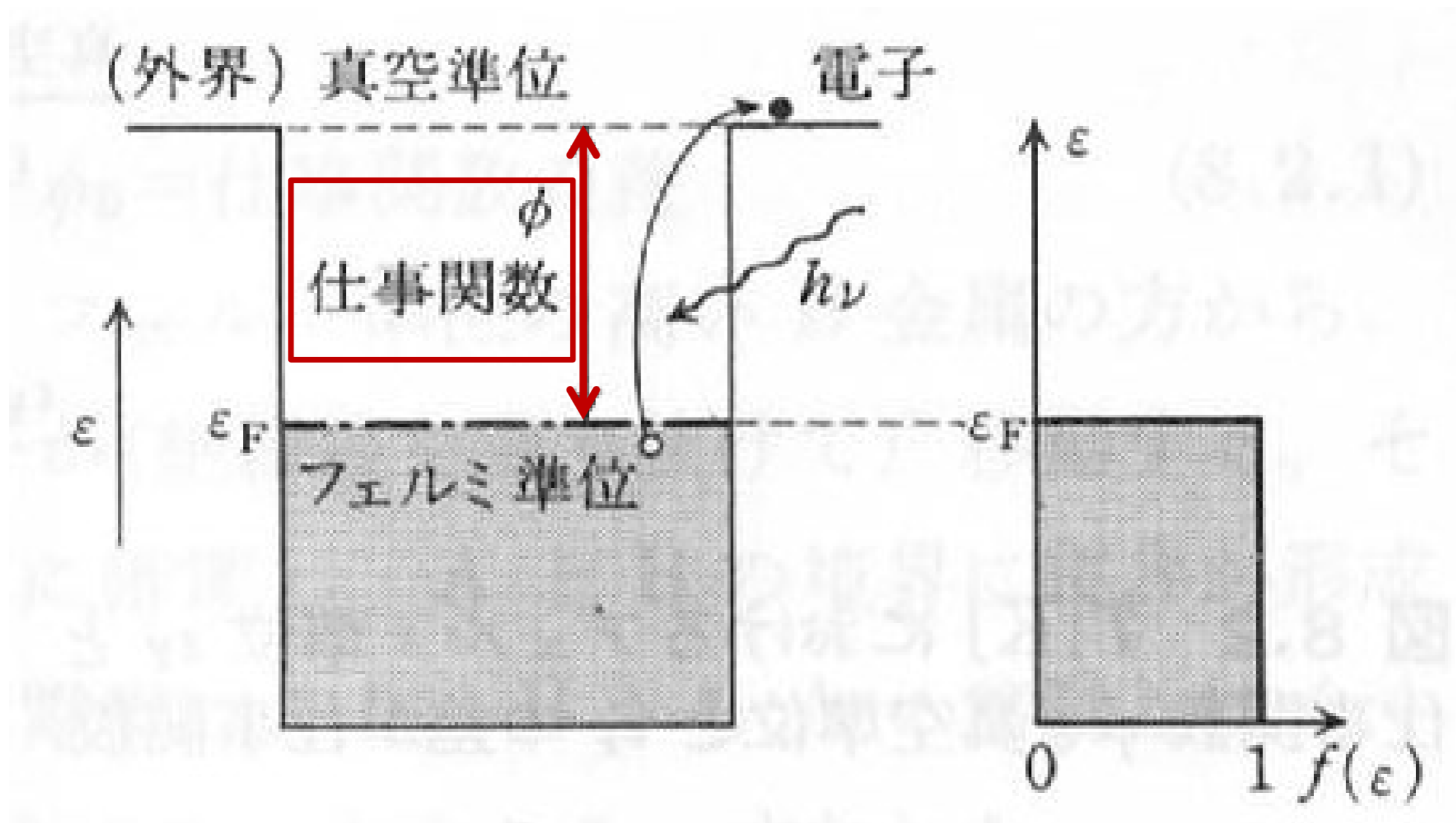
$$n = N_D \quad E_C - E_F = kT \ln \left[\frac{N_C}{N_D} \right]. \quad p = N_A \quad E_F - E_V = kT \ln \left[\frac{N_V}{N_A} \right].$$

ドナー濃度が高いほど ($E_C - E_F$) は小さくなる。
すなわち、フェルミ準位は伝導帯の底に接近する。
同様に、アクセプタ濃度が高いほど
フェルミ準位は価電子帯上端に近づく。

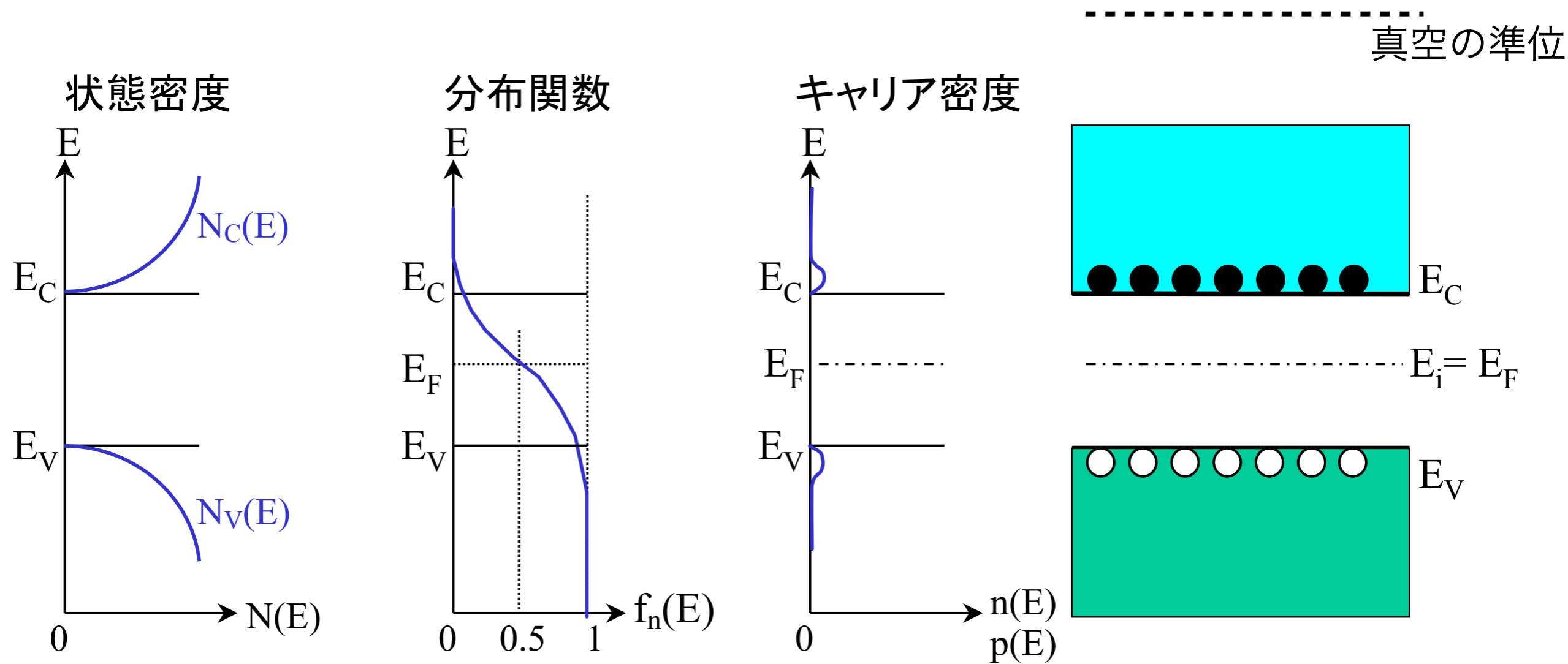
質量作用則 (式(24)) によれば、 n と p の積は真性半導体の場合と等しい ($np = n_i^2$)。

①仕事関数 (教科書 p. 154 - 155)

	Pt	Ni	W	Cu	Ca	Ba	Cs	BaO
ϕ [eV]	5.3	5.0	4.5	4.3	3.2	2.5	1.8	1.1



真性半導体中のキャリア密度



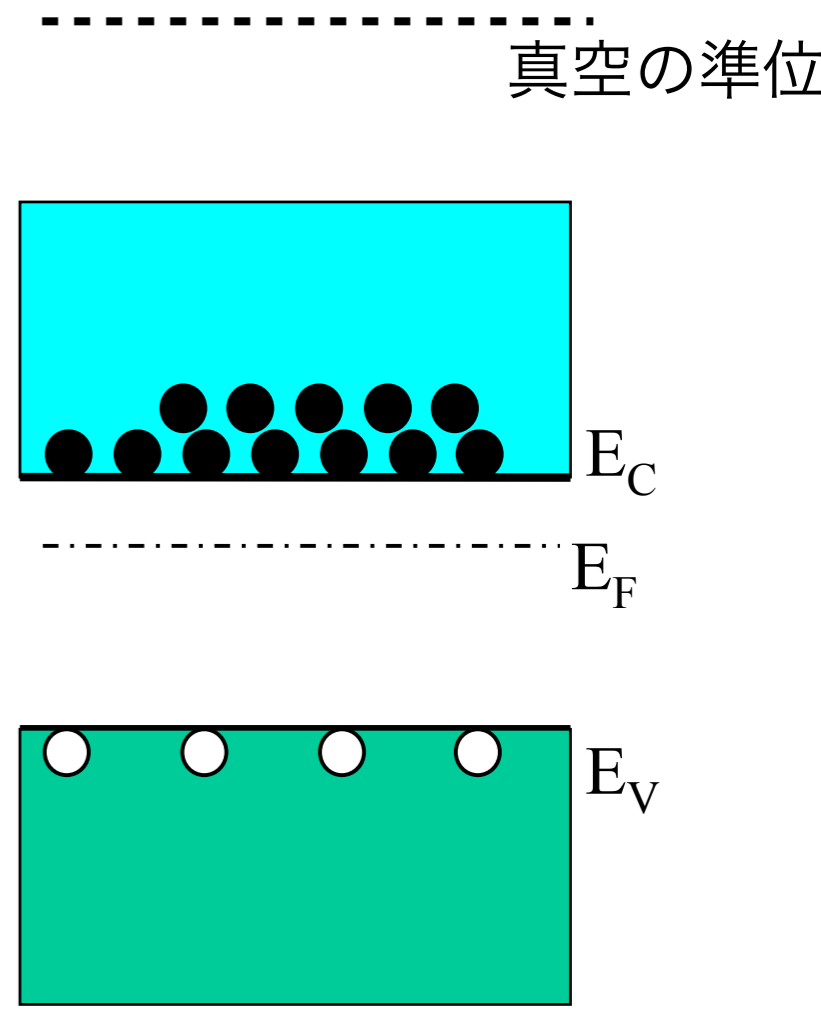
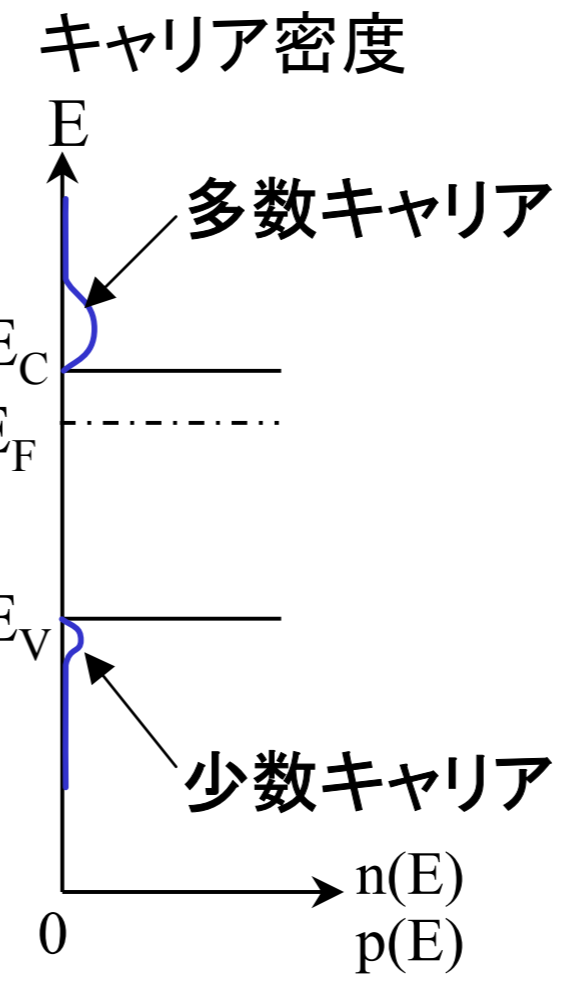
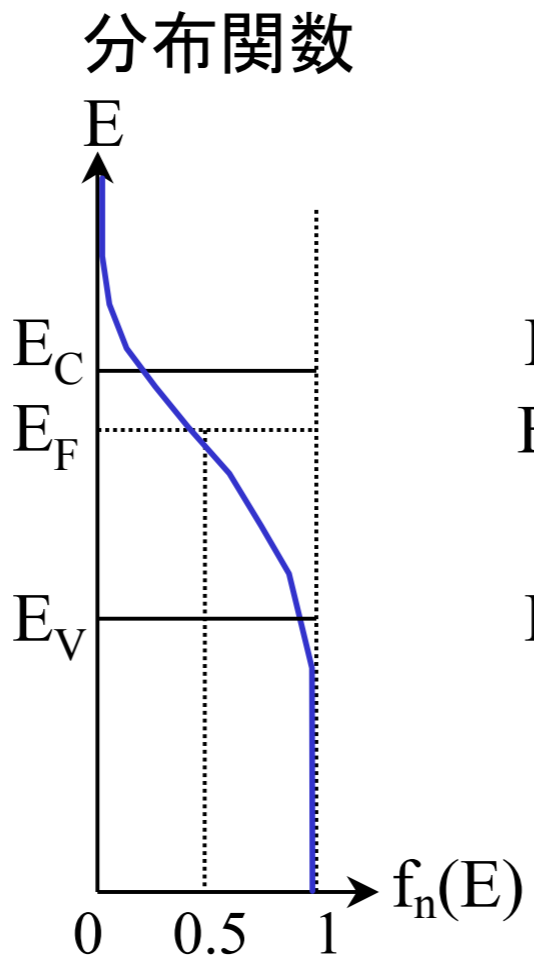
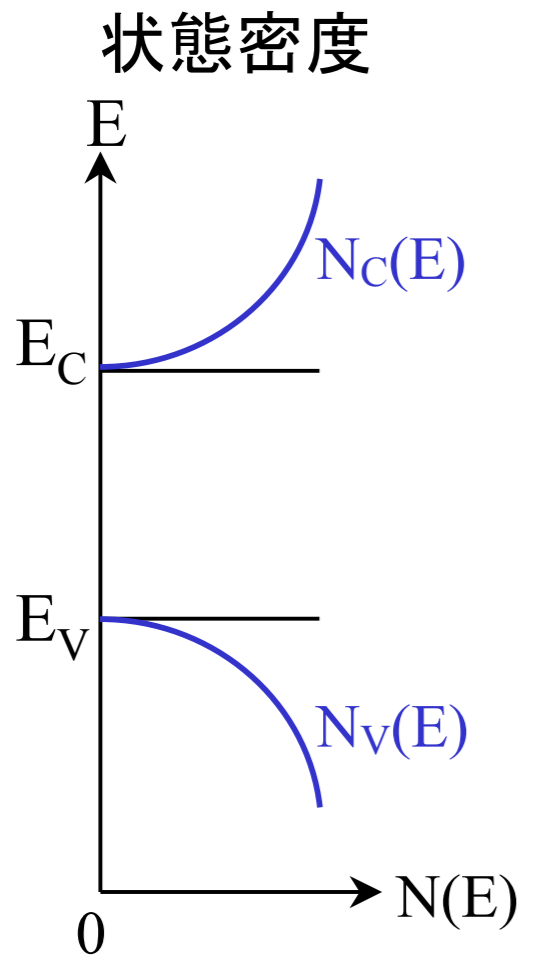
状態密度 × フェルミ分布 = キャリア密度

状態密度: あるエネルギーにおいてキャリアが存在できる座席の数

フェルミ分布: あるエネルギーのキャリアがいる割合

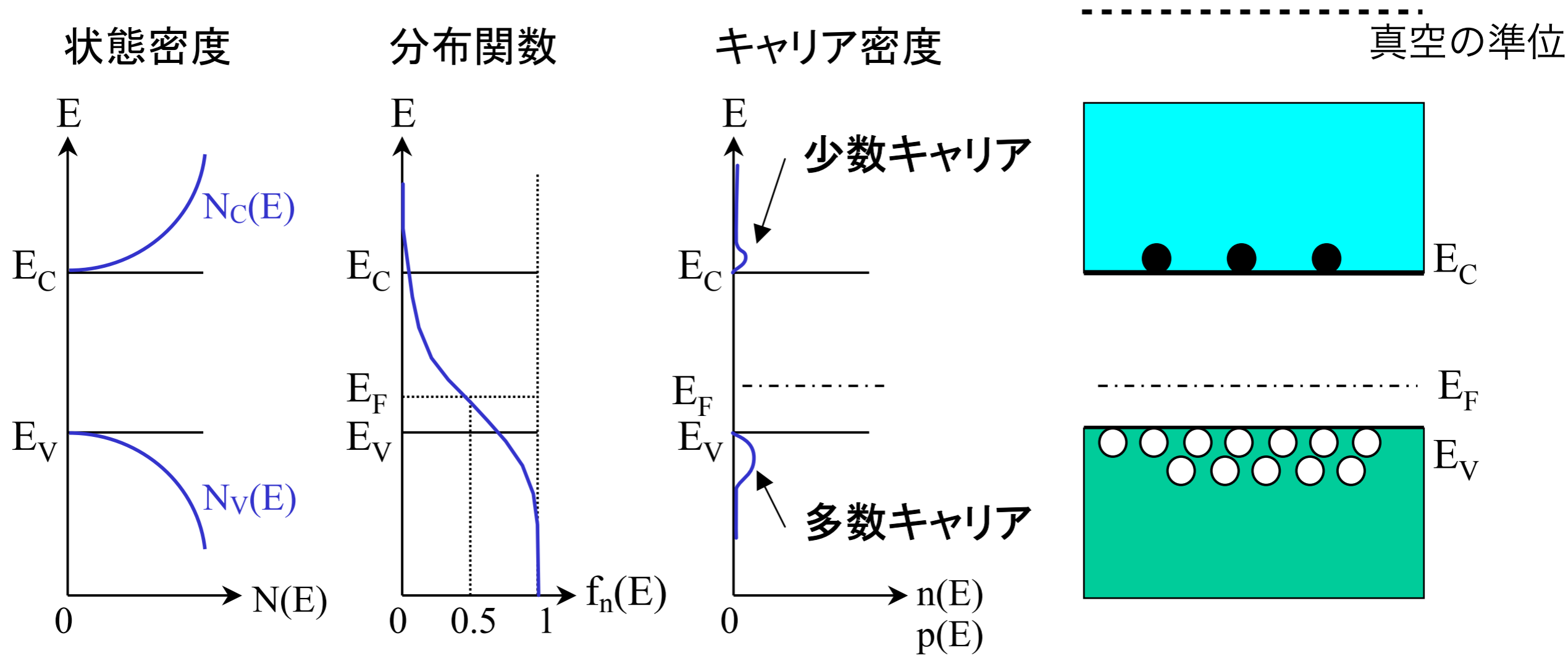
フェルミレベルは禁制帯の中央に位置する

N型半導体中のキャリア密度



フェルミレベルは禁制帯の中央より伝導帯よりに位置する

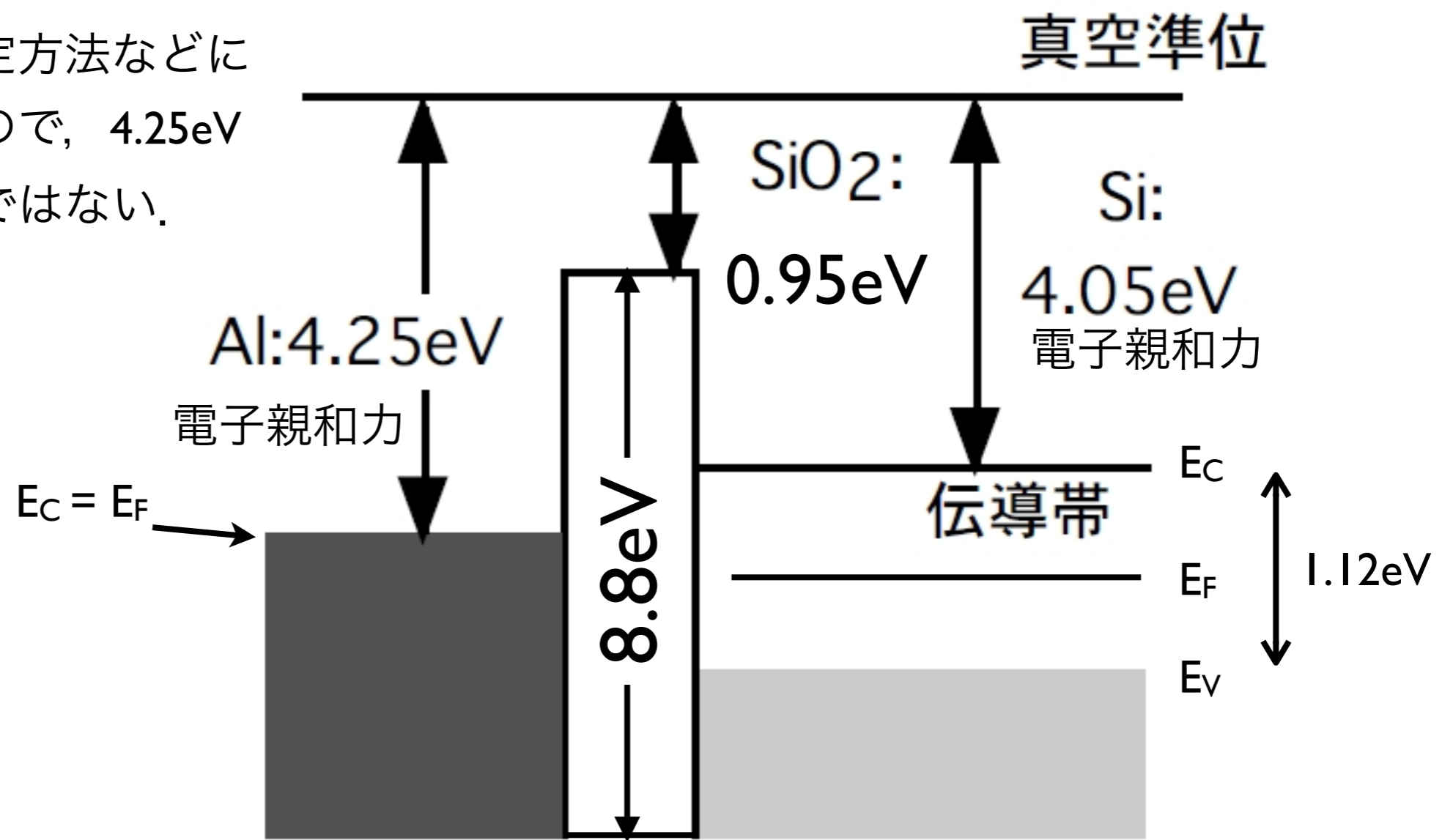
P型半導体中のキャリア密度



フェルミレベルは禁制帯の中央より価電子帯よりに位置する

バンド図の原則

数値は測定方法などに依存するので、4.25eV 決まり、ではない。



- 単独の時には真空の準位が基準電圧
- 図は電子にとってのポテンシャルを示している。電位としては下がプラスボルト
- フェルミエネルギー
 - 金属：電子を電離するために必要な最小エネルギー = 仕事関数 = フェルミエネルギー
 - 真性半導体：伝導帯と価電子帯の間
 - n型では電子が多いので、フェルミエネルギーは上昇する。p型では下がる。

材料	物理量	記号	値	単位
Si	電子親和力	χ	4.05	eV
	バンドギャップ	E_g	1.12	eV
	比誘電率	K_{Si}	11.7	
	真性キャリア密度	n_i	1.50×10^{15}	m^{-3}
SiO ₂	電子親和力	χ_{SiO_2}	0.95	eV
	バンドギャップ	E_g	8.8	eV
	比誘電率	K_{SiO_2}	3.9	
Al	仕事関数	ϕ_m	4.1	eV
物理定数	電子電荷	q	1.60×10^{-19}	C
	Boltzmann定数	k_B	1.38×10^{-23}	J/K
	真空の誘電率	ϵ_0	0.05×10^{-12}	F/m
	温度	T	300	K

金属	仕事関数(eV)
Al	4.10
Au	4.70
W	4.55
Pt	5.3
半導体	電子親和力 (eV)
Si	4.05
Ge	4.13
GaAs	4.07
GaP	4.30

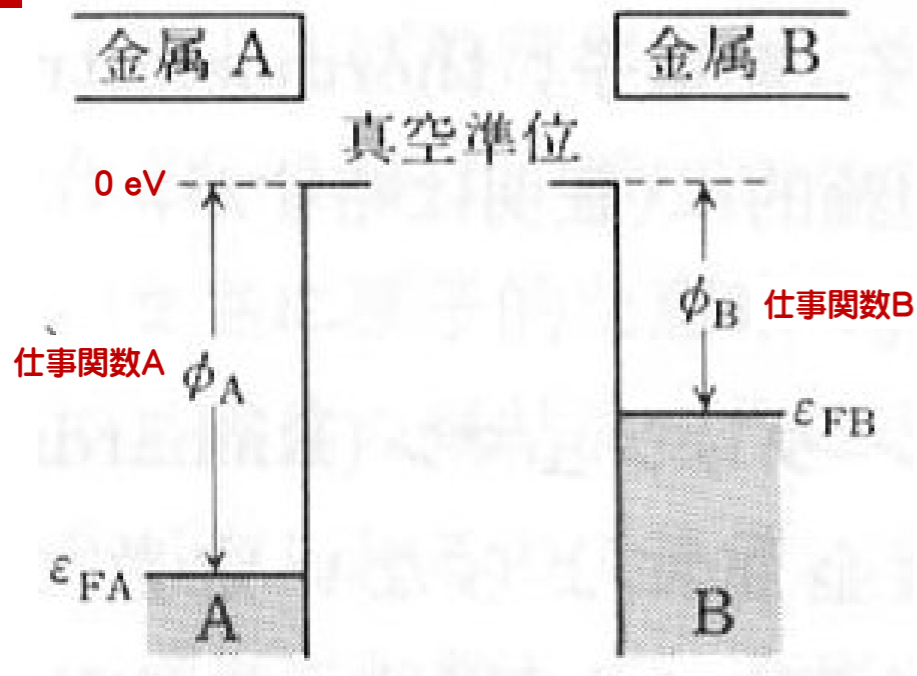
電子親和力 = 1個余分の電子を取り込んだ際に生ずるエネルギー。
 電子親和力は、原子の種類のみならず、状態にも依存するはず。

イオン化エネルギー・電子親和力(単位は共に“eV”)の長周期型周期表

		族																					
		1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8		1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	0					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18				
日本→	新IUPAC→																						
短 周 期	1	0.754209 13.598 <i>H</i>	←電子親和力 ←第一イオン化エネルギー ←元素記号 ←第二イオン化エネルギー ←第三イオン化エネルギー														<0 24.587 <i>He</i> 54.416						
	2	0.6180 5.392 75.638 122.451 <i>Li</i>	<0 9.322 18.211 153.893 <i>Be</i>	※ 単位変換の方法は、 1eV=23.06036kcal/mol=96.48455kJ/mol														0.277 8.298 25.124 37.930 <i>B</i>	1.2629 11.260 24.383 47.887 <i>C</i>	-0.07 14.534 29.601 47.448 <i>N</i>	1.4611215 13.618 35.116 54.934 <i>O</i>	3.399 17.422 34.970 62.707 <i>F</i>	<0 21.564 40.962 63.45 <i>Ne</i>
	3	0.54793 5.139 47.286 71.64 <i>Na</i>	<0 7.646 15.035 80.143 <i>Mg</i>	青色文字…非金属元素 緑色文字…金属元素 黒色文字…メタロイド(半金属元素) 紫色文字…希ガス元素														0.441 5.986 18.828 28.447 <i>Al</i>	1.385 8.152 16.345 33.492 <i>Si</i>	0.7465 10.486 19.725 30.18 <i>P</i>	2.077120 10.360 23.33 34.83 <i>S</i>	3.617 12.967 23.81 39.61 <i>Cl</i>	<0 15.760 27.629 40.74 <i>Ar</i>
長 周 期	4	0.50147 4.341 31.625 45.72 <i>K</i>	<0 6.113 11.871 50.908 <i>Ca</i>	0.188 6.54 12.80 24.76 <i>Sc</i>	0.079 6.82 13.58 27.491 <i>Ti</i>	0.525 6.74 14.65 29.310 <i>V</i>	0.666 6.766 16.50 30.96 <i>Cr</i>	<0 7.435 15.640 33.667 <i>Mn</i>	0.163 7.870 16.18 30.651 <i>Fe</i>	0.661 7.864 17.06 33.50 <i>Co</i>	1.156 7.635 18.168 35.17 <i>Ni</i>	1.228 7.726 20.292 36.83 <i>Cu</i>	<0 9.394 17.964 39.722 <i>Zn</i>	0.30 5.999 20.51 30.71 <i>Ga</i>	1.2 7.899 15.934 34.22 <i>Ge</i>	0.81 9.81 18.633 28.351 <i>As</i>	2.02 9.752 21.19 30.820 <i>Se</i>	3.365 11.814 21.8 36 <i>Br</i>	<0 13.999 24.359 36.95 <i>Kr</i>				
	5	0.48592 4.177 27.28 40 <i>Rb</i>	<0 5.695 11.030 43.6 <i>Sr</i>	0.307 6.38 12.24 20.52 <i>Y</i>	0.426 6.84 13.13 22.99 <i>Zr</i>	0.893 6.88 14.32 25.04 <i>Nb</i>	0.746 7.099 16.15 27.16 <i>Mo</i>	0.55 7.28 15.26 29.54 <i>Tc</i>	1.05 7.37 16.76 28.47 <i>Ru</i>	1.137 7.46 18.08 31.06 <i>Rh</i>	0.557 8.34 19.43 32.93 <i>Pd</i>	1.302 7.576 21.49 34.83 <i>Ag</i>	<0 8.993 16.908 37.48 <i>Cd</i>	0.3 5.786 18.869 28.03 <i>In</i>	1.2 7.344 14.632 25.3 <i>Sn</i>	1.07 8.641 16.53 27.96 <i>Sb</i>	1.9708 9.009 18.6 27.96 <i>Te</i>	3.0591 10.451 19.131 33 <i>I</i>	<0 12.130 21.21 32.1 <i>Xe</i>				
	6	0.471630 <i>Lr</i>	<0 <i>Lr</i>	~0 <i>Lr</i>	0.322 <i>Lr</i>	0.815 <i>Lr</i>	0.15 <i>Lr</i>	1.1 <i>Lr</i>	1.565 <i>Lr</i>	2.128 <i>Lr</i>	2.30863 <i>Lr</i>	<0 <i>Lr</i>	0.2 <i>Lr</i>	0.364 <i>Lr</i>	0.946 <i>Lr</i>	1.9 <i>Lr</i>	2.8 <i>Lr</i>	<0 <i>Lr</i>	<0 <i>Lr</i>	<0 <i>Lr</i>			

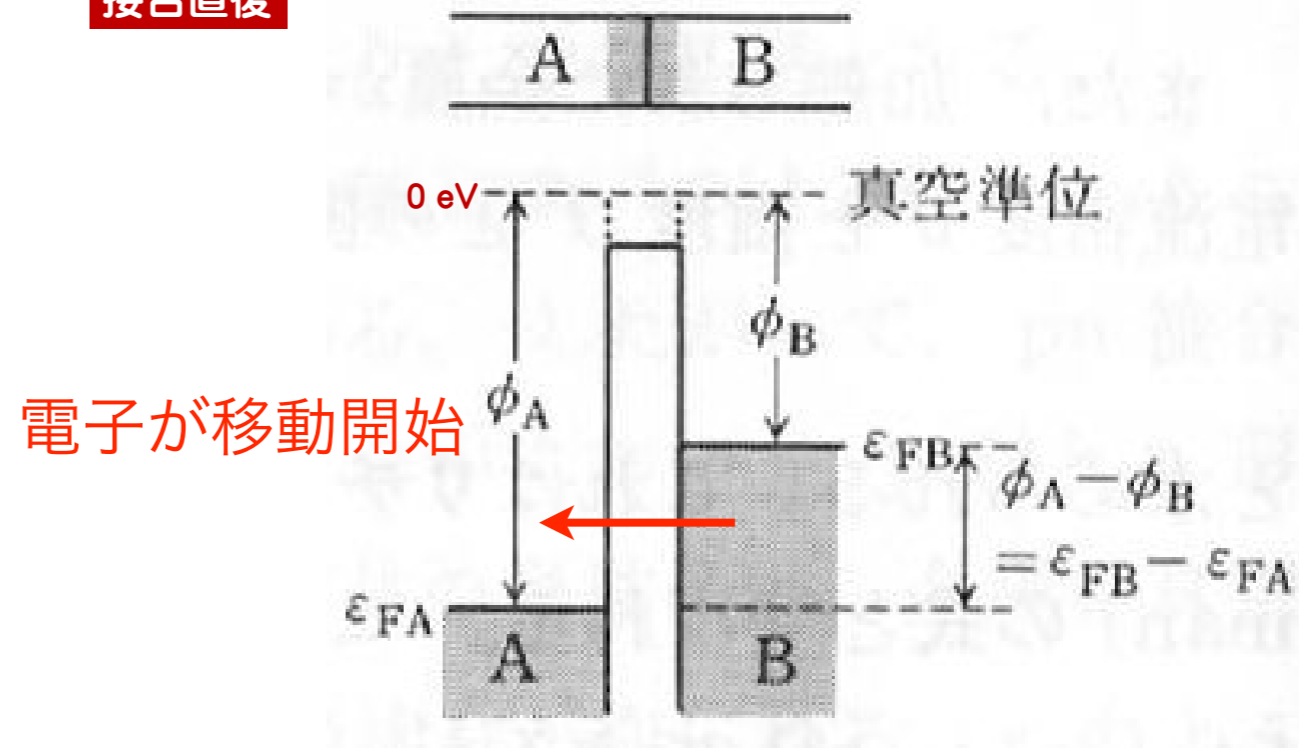
仕事関数の異なる金属接合 (教科書 p. 156)

接合前



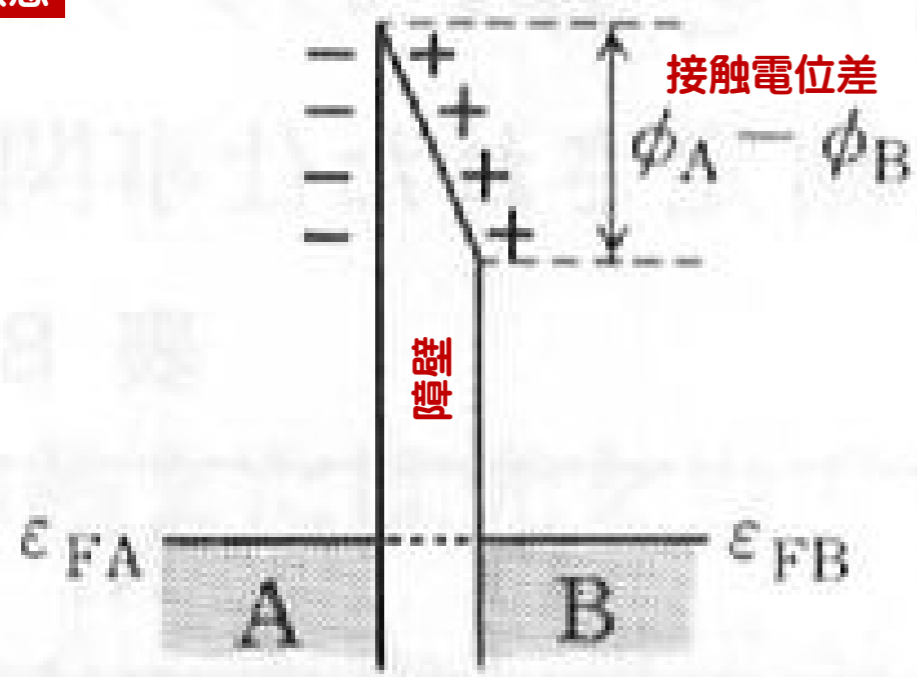
仕事関数の異なる金属接合 (教科書 p. 156)

接合直後



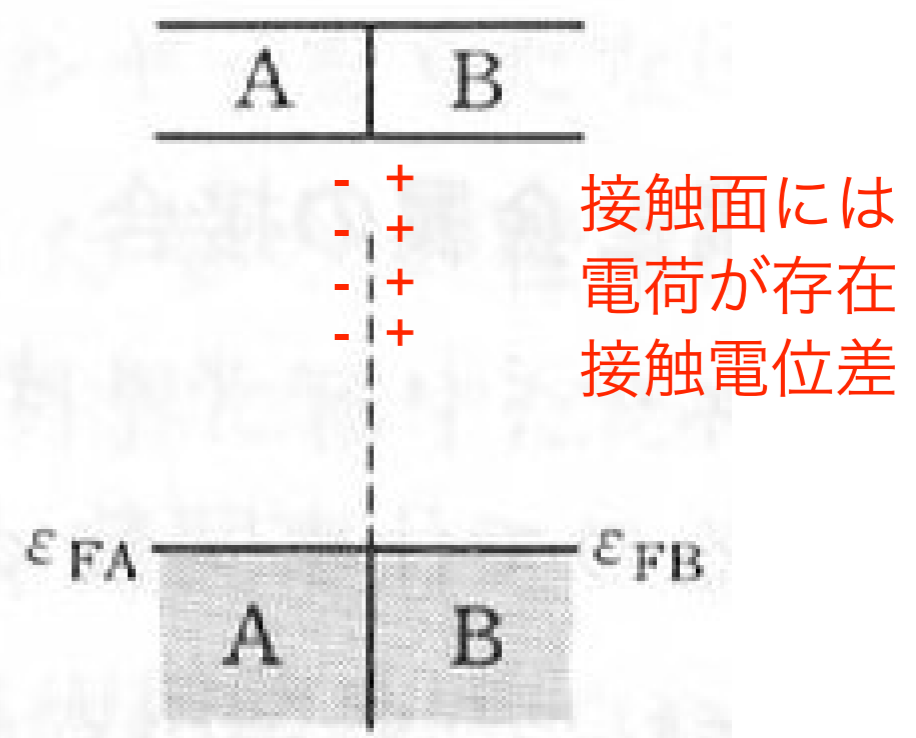
仕事関数の異なる金属接合 (教科書 p. 156)

遷移状態



仕事関数の異なる金属接合 (教科書 p. 156)

接合完了

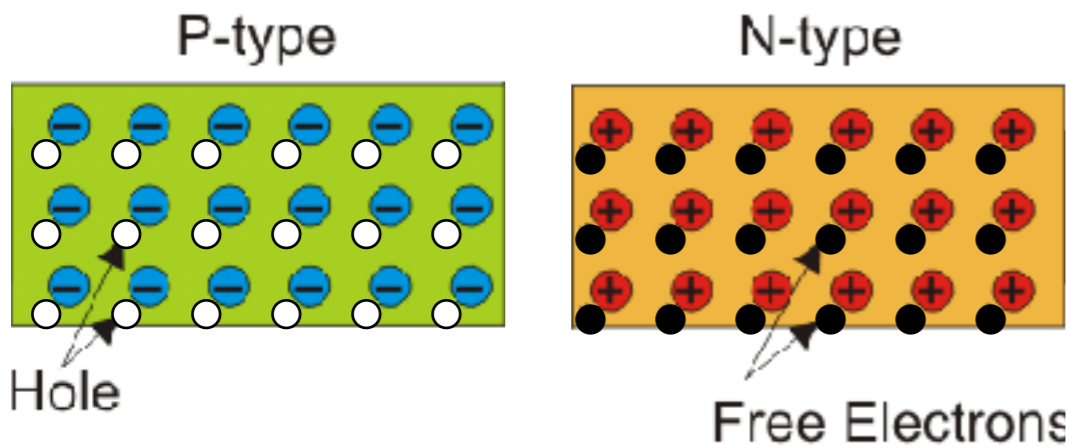


フェルミ準位が一致するまで移動

A側の光電離Eと, B側の光電離Eは, 同じ? 違う?

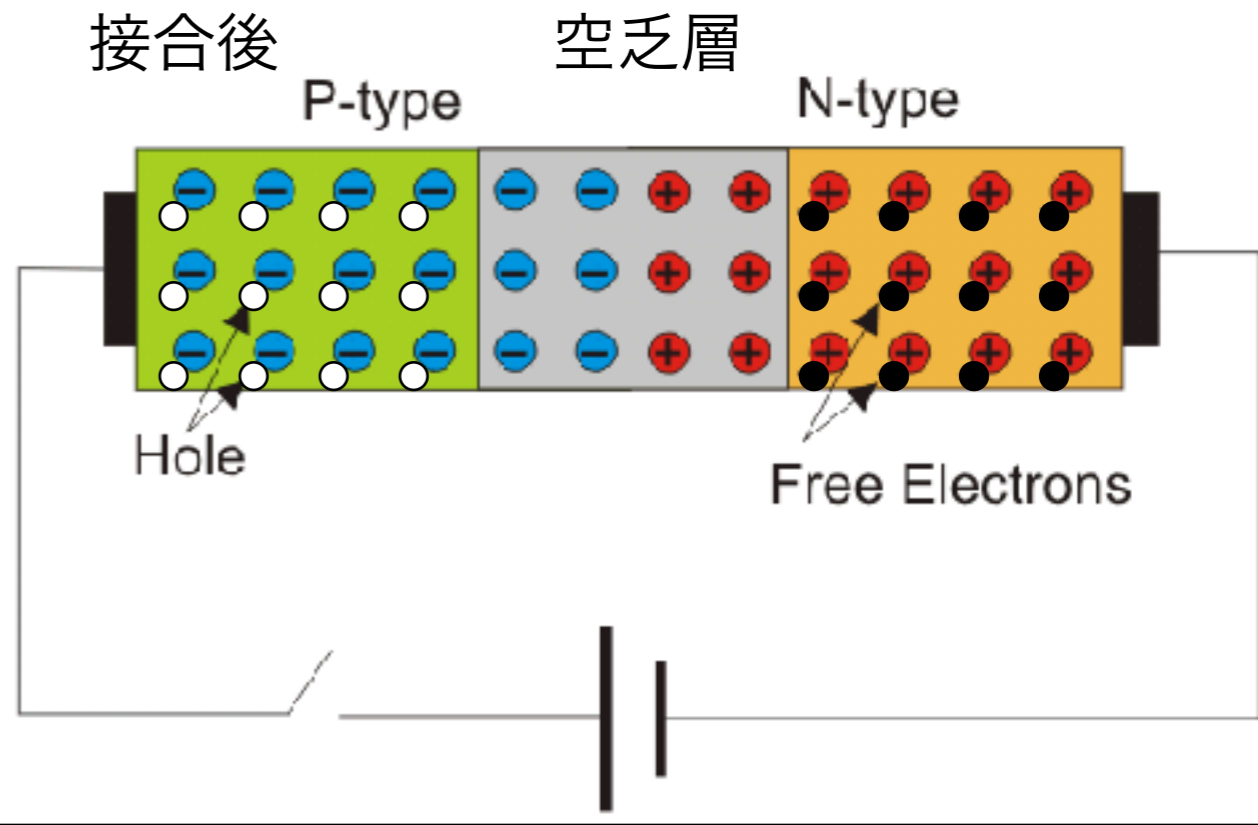
ダイオードの構造と動作

接合前

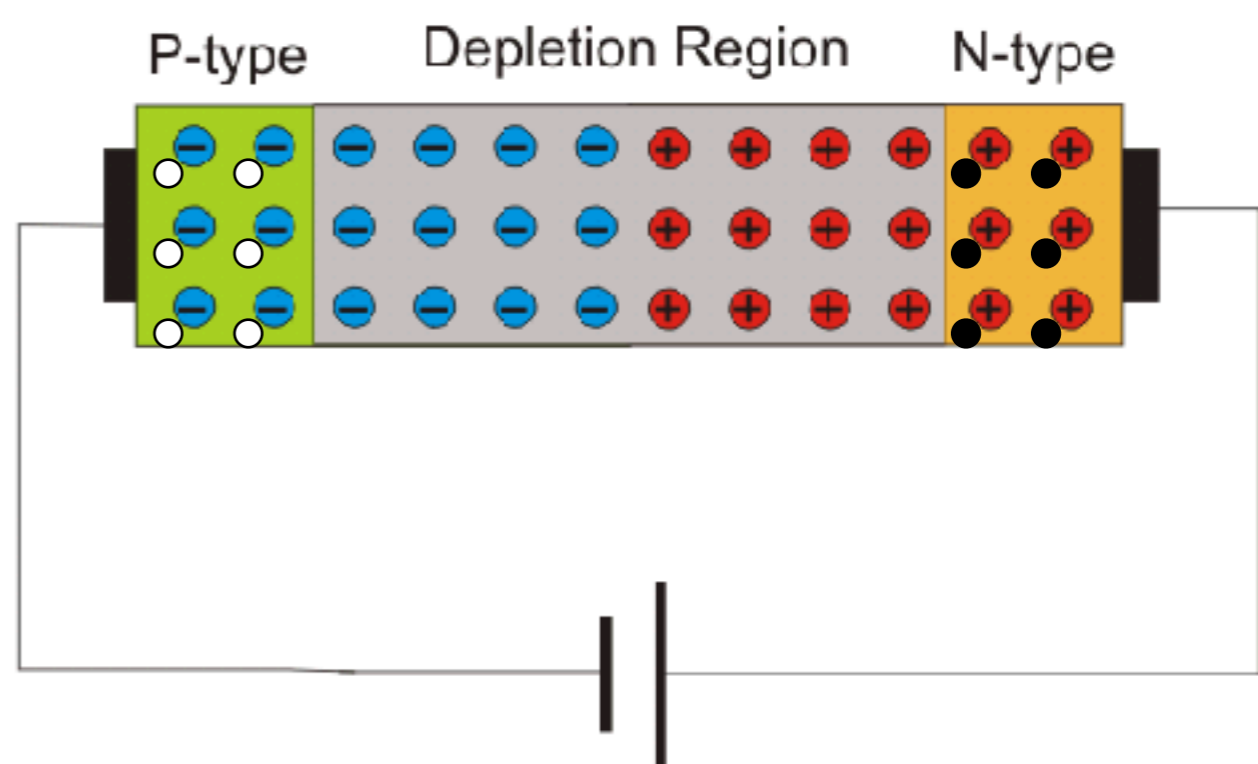


実際には、それぞれ独立に作ったP型とN型を物理的にくっつけるわけではない。もともと1つの結晶シリコンにP型とN型の領域を作る。

接合後

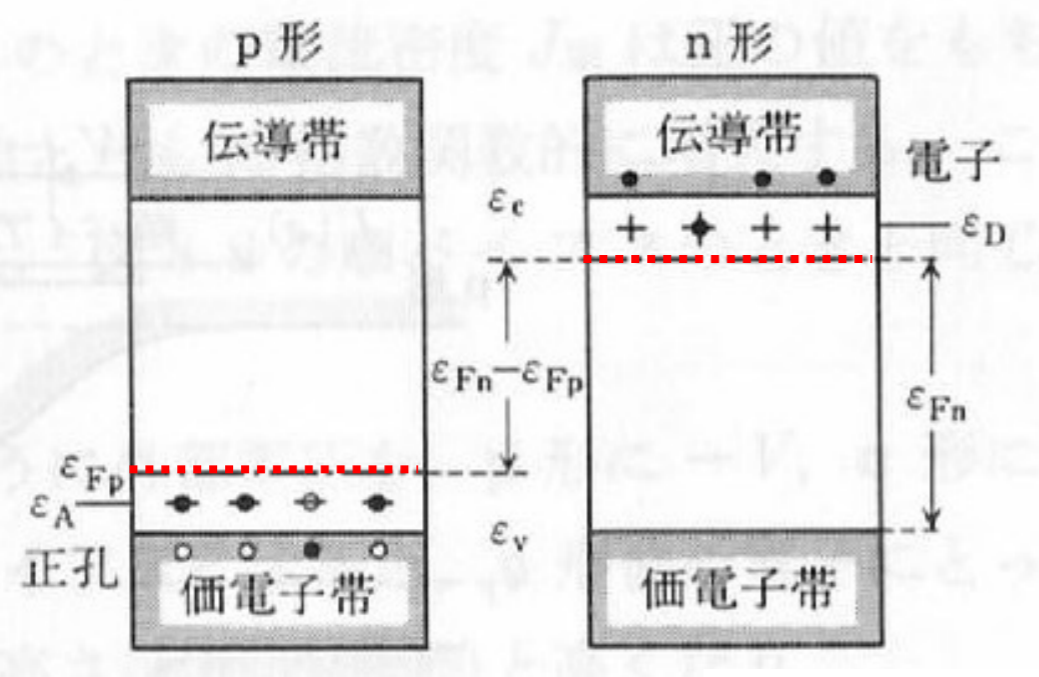


逆方向バイアス



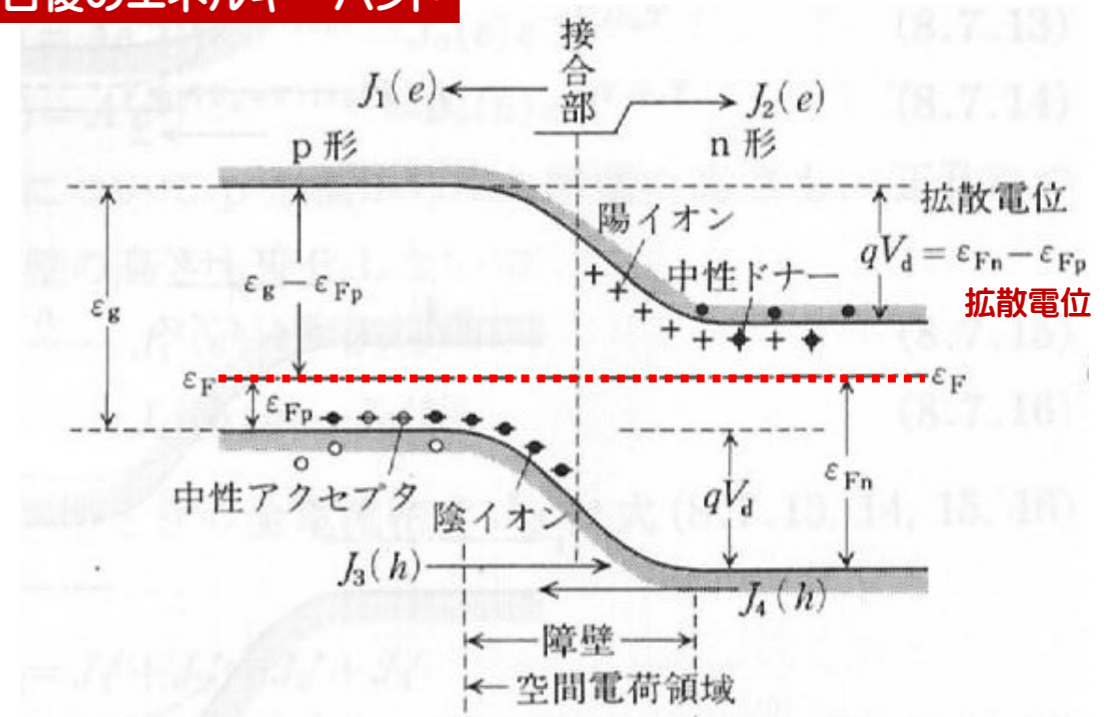
⑥pn接合 (教科書 p. 171)

接合前のエネルギーバンド

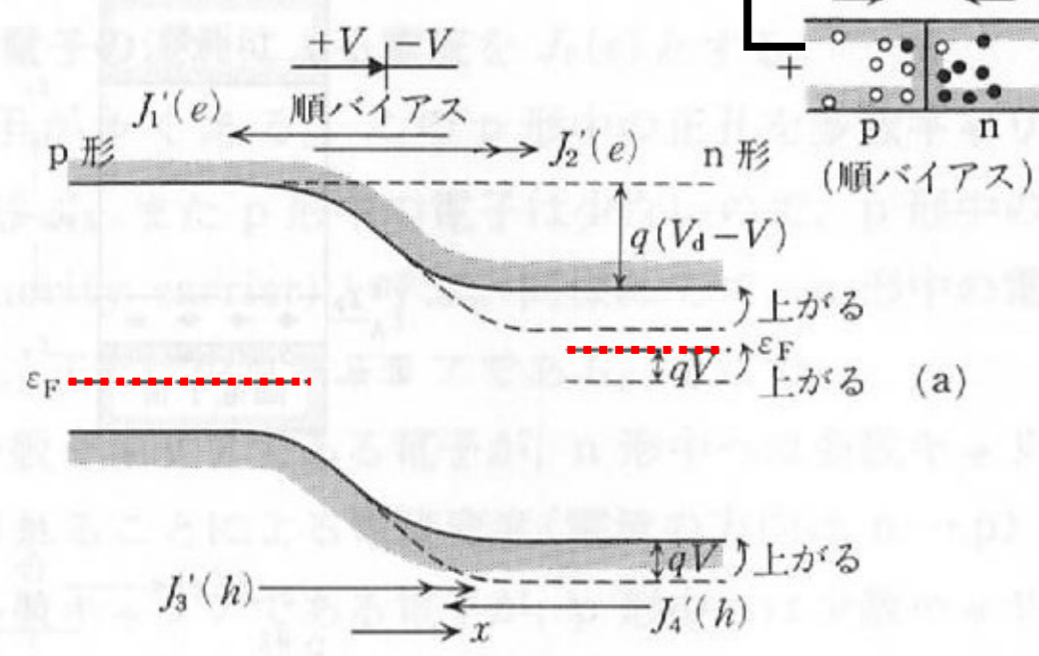
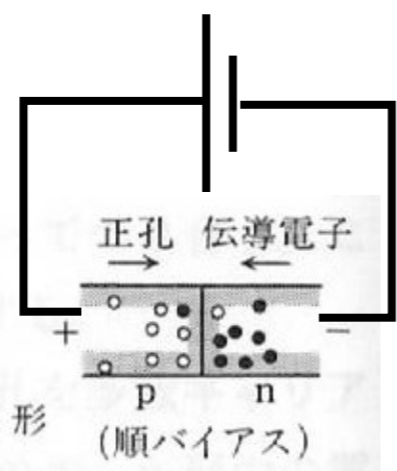


pn接合 (教科書 p. 171)

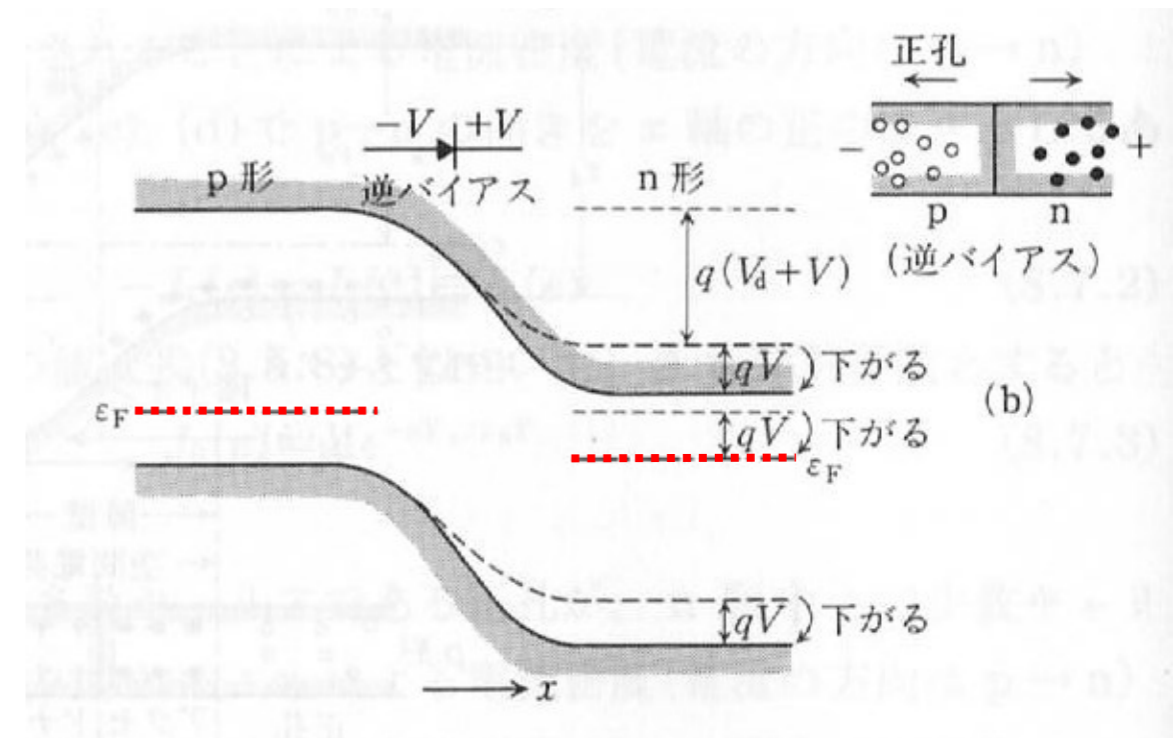
接合後のエネルギーバンド



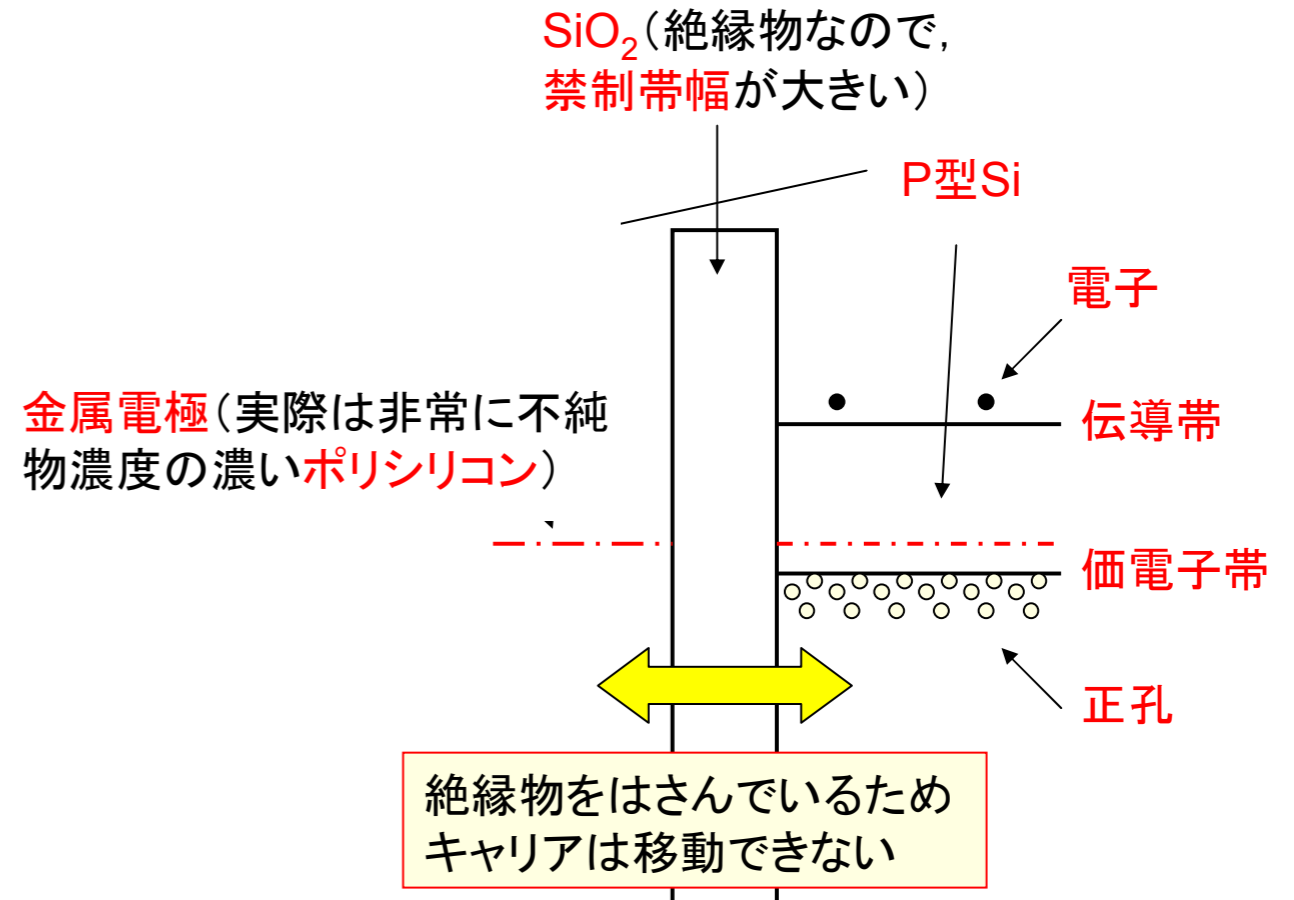
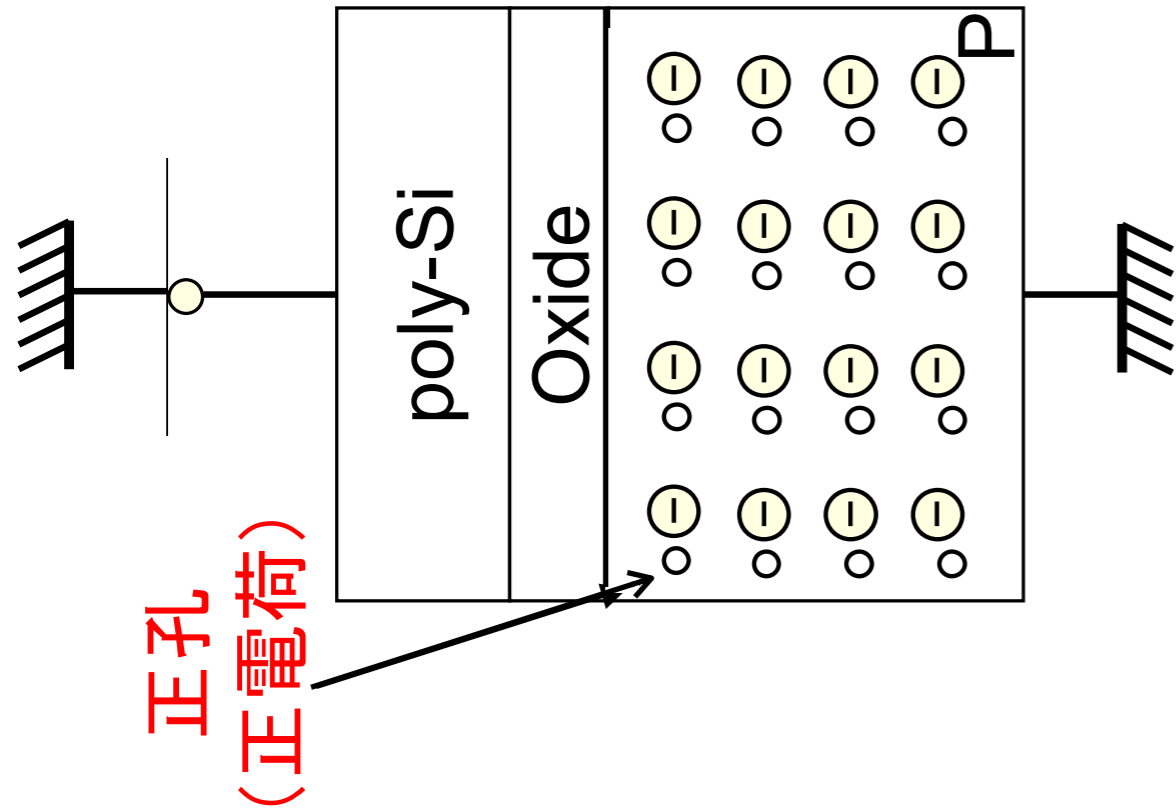
順バイアス (教科書 p. 172)



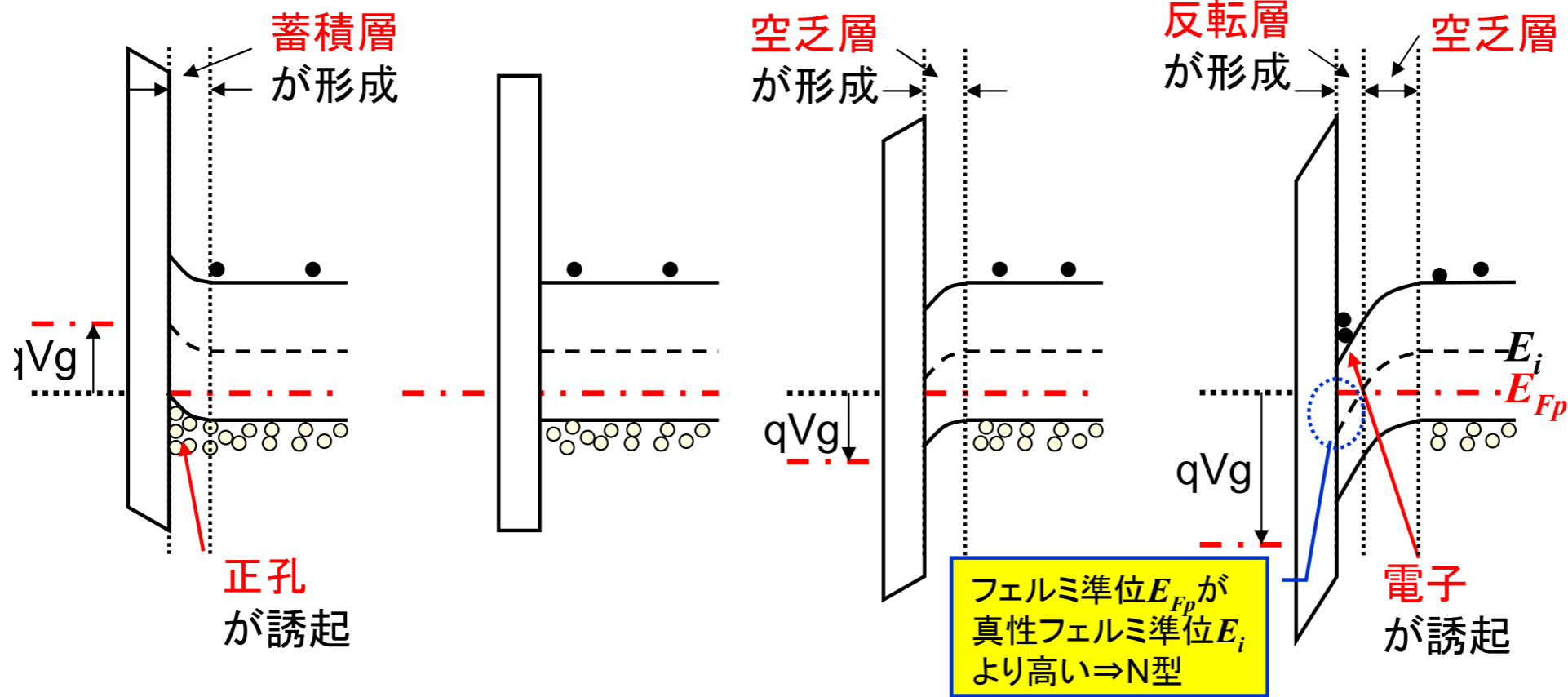
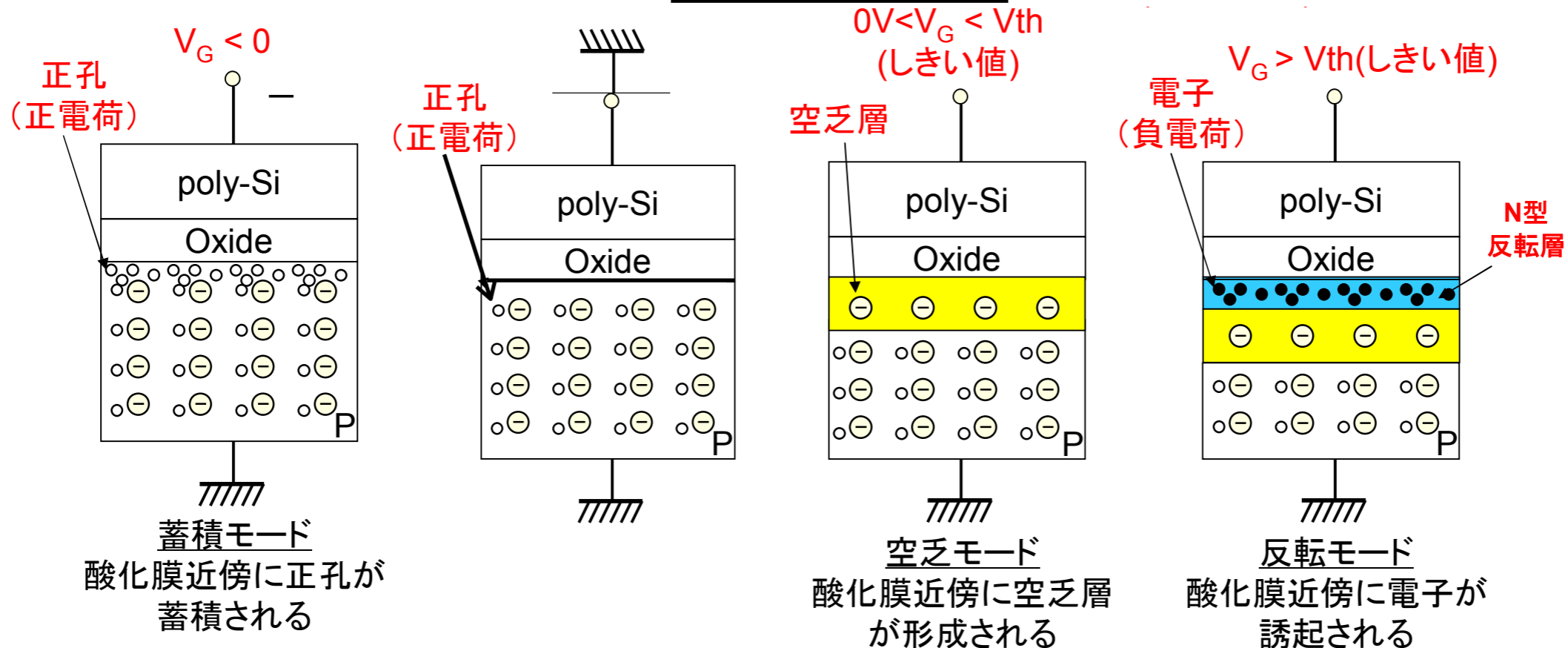
逆バイアス (教科書 p. 172)



MOS (Metal- Oxide - Semicon.) 構造



MOS構造



(a) $V_G < 0$: 蓄積状態

(b) $V_G = 0$: フラットバンド

(c) $V_G > 0$: 空乏状態

(d) $V_G \gg 0$: 反転状態

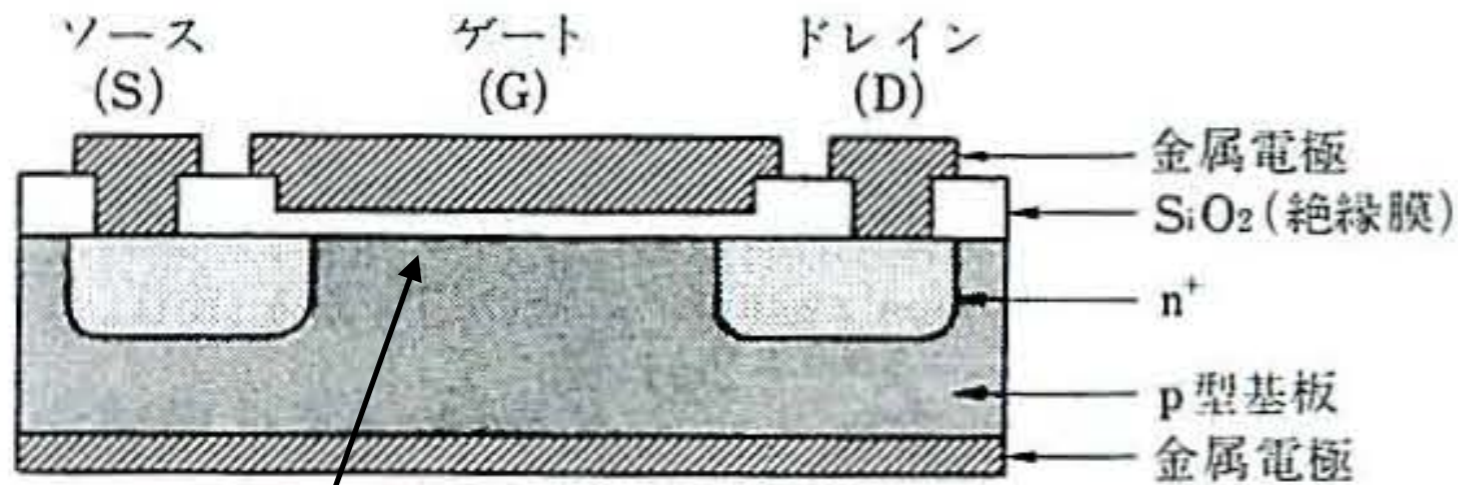


図 7.17 MOS-FET の構造
N-channel型MOSFET

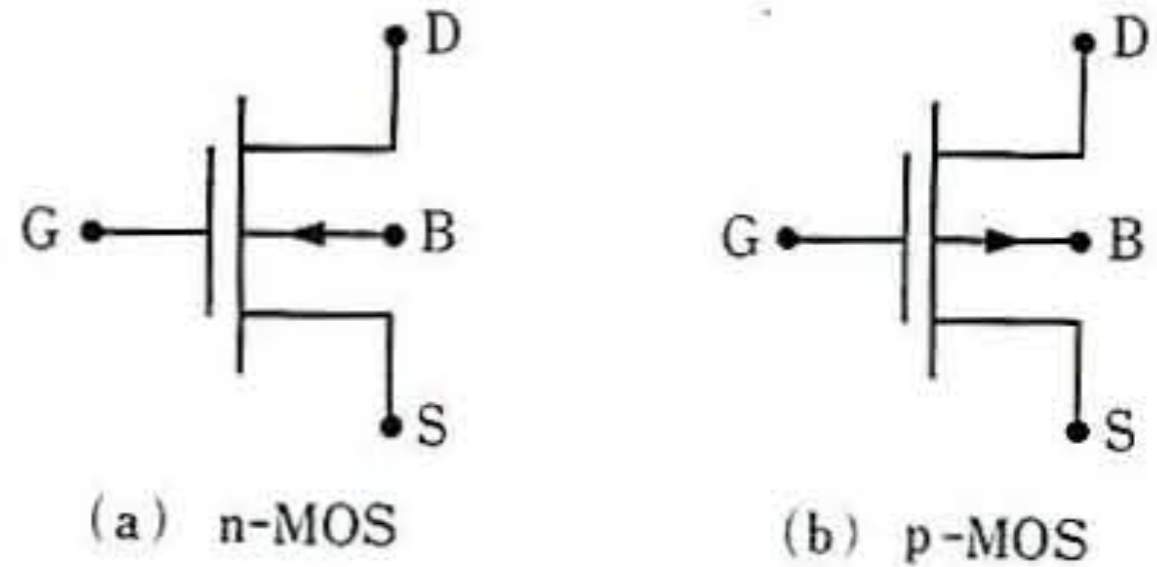


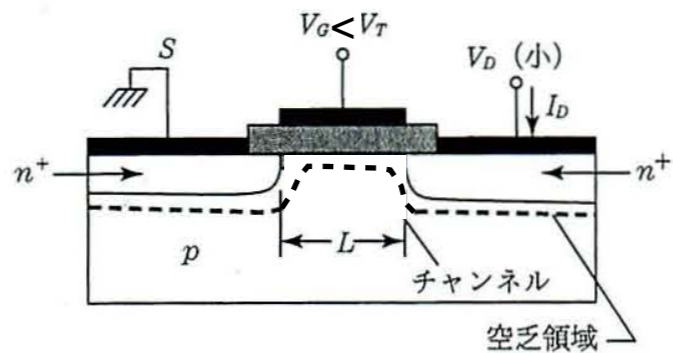
図 7.18 n-MOS と p-MOS の回路記号
(S) ソース, (G) ゲート, (D) ドレイン, (B) 基板

- ゲート電圧で、ゲート直下の領域に作られる反転層(N-channelならば電子)をコントロールすることで、ソース-ドレイン間に流れる電流量を制御する。
- ソース-ドレイン間の電流量は、ゲート、ソース、ドレインに印加する電圧の関数。

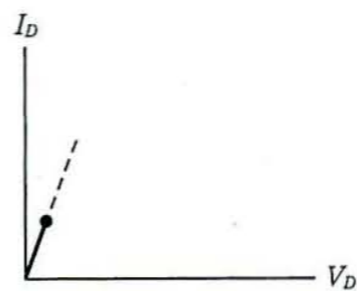
n+ : 不純物濃度が高いN型半導体

n- : 不純物濃度が低いN型半導体

反転層なし
電流が流れない



$I_D = 0$



反転層形成
電流が流れる

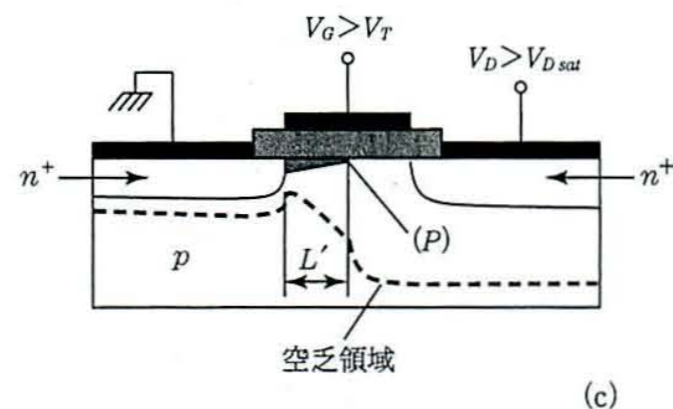
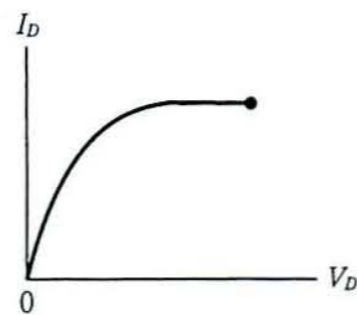
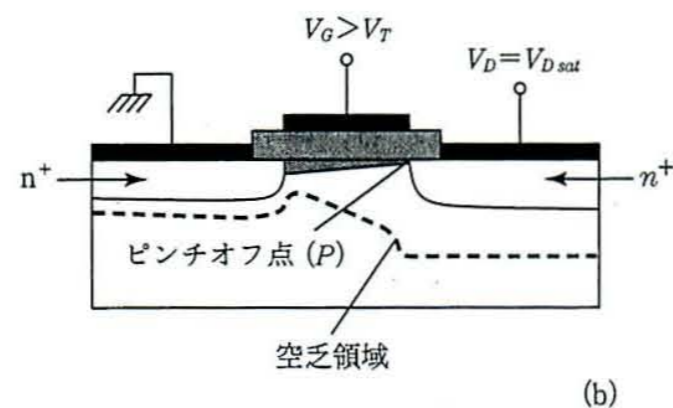
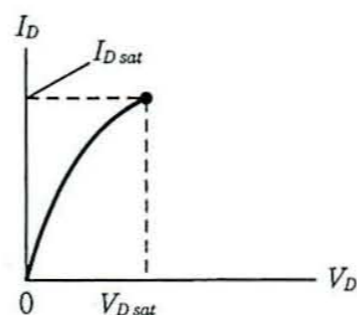
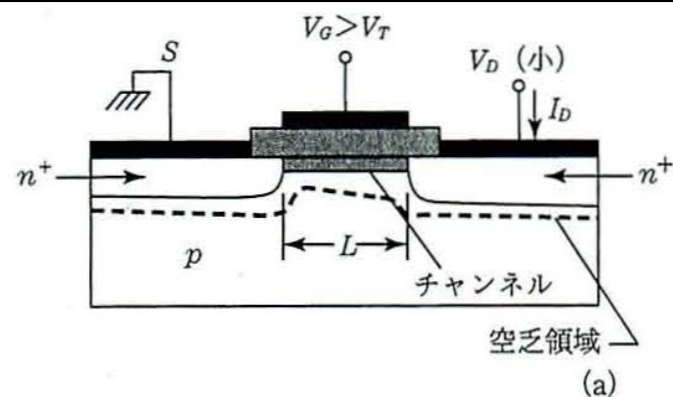


図 15 MOSFET の動作と I - V 出力特性. (a) 低ドレイン電圧, (b) 飽和の開始, 点 P はピンチオフ点を示す, (c) 飽和後.

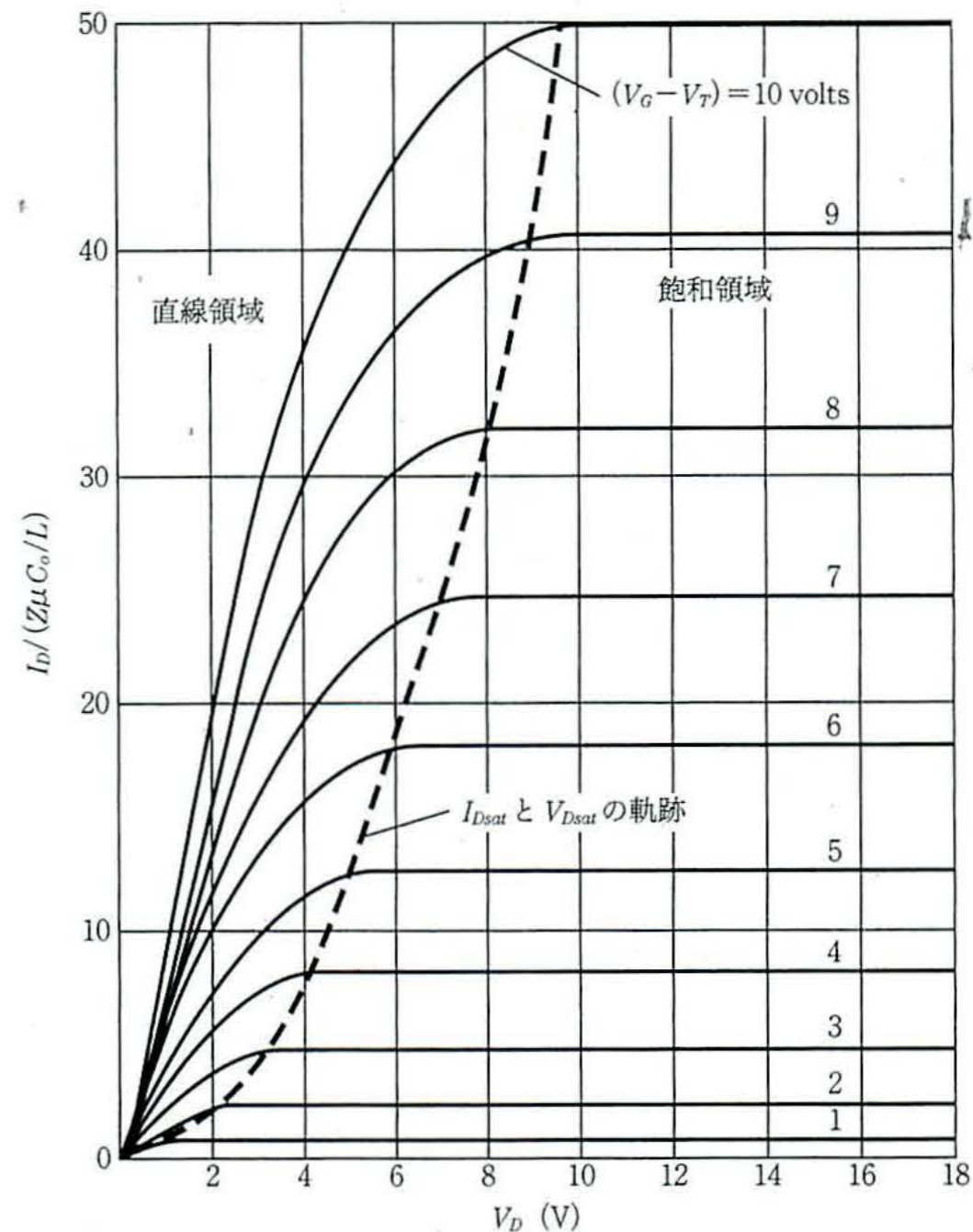
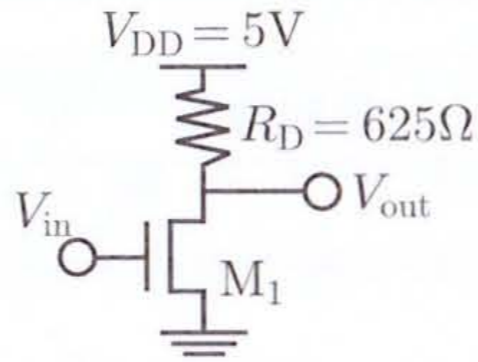


図 17 理想的な MOSFET の電流-電圧特性. $V_D = V_{Dsat}$ ではドレイン電流は一定になる.

MOSFETによるソース接地増幅回路



バイポーラトランジスタのエミッタ接地増幅回路と同様だと考える

図 4.2 抵抗負荷型ソース接地増幅回路

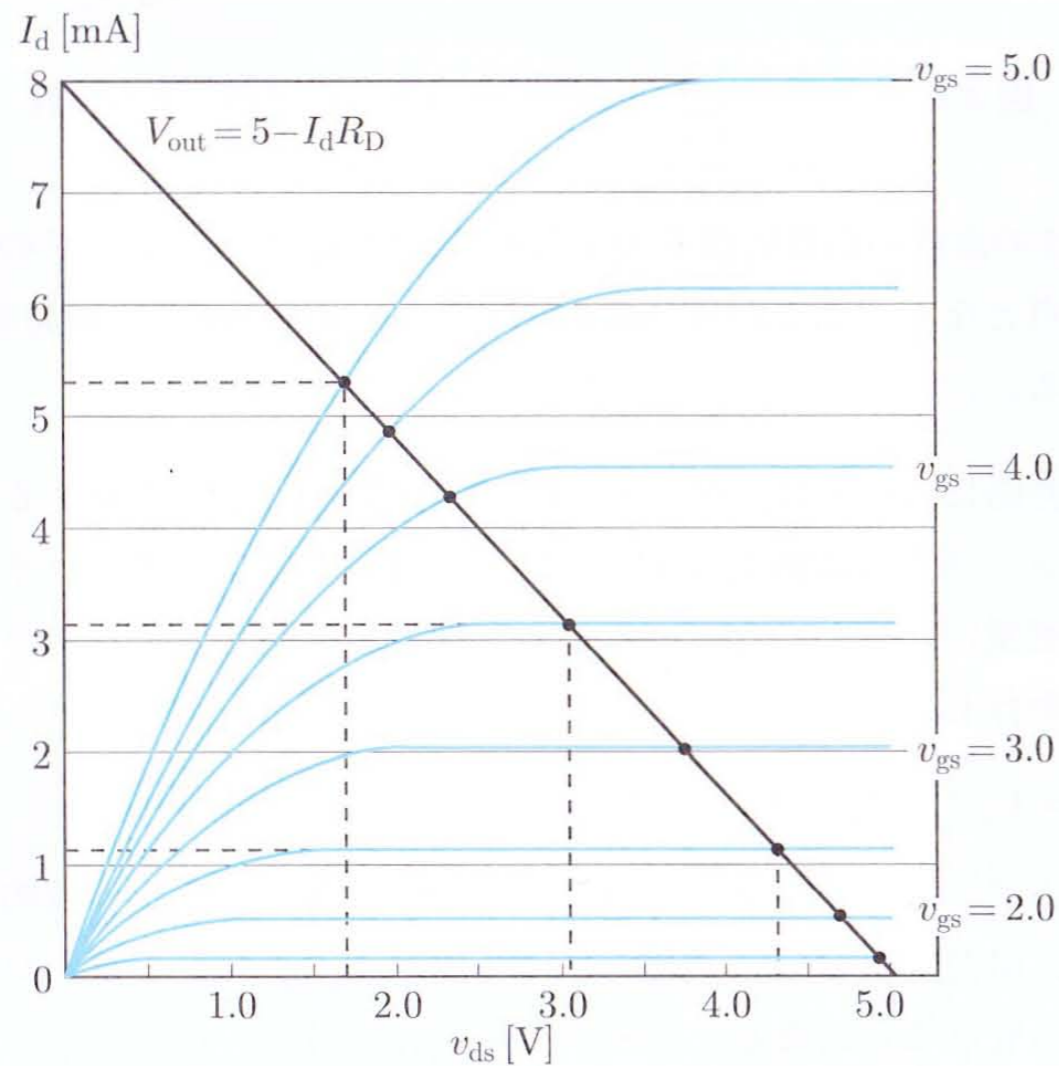


図 4.3 図 4.2 の MOS トランジスタの静特性と負荷特性

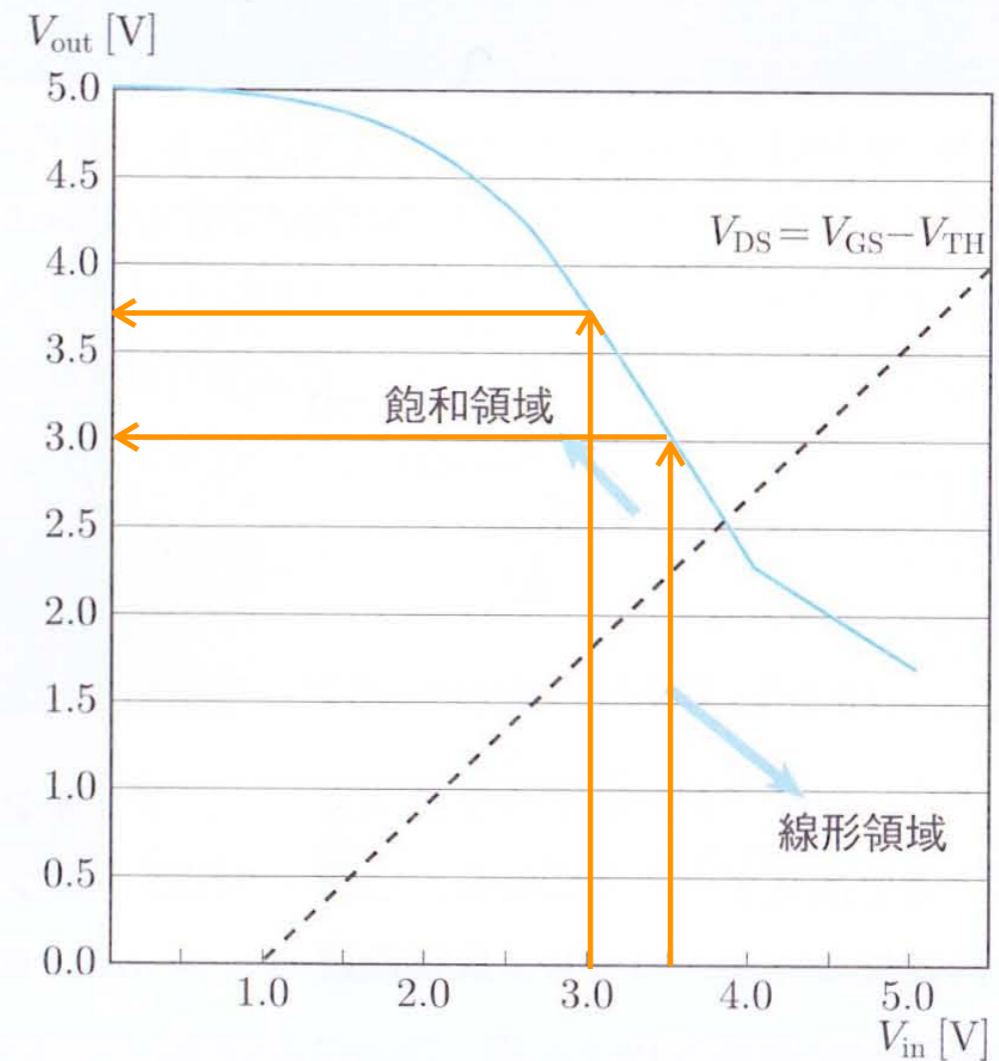


図 4.4 図 4.2 の抵抗負荷型ソース接地回路の入出力特性

MOSFETによるソースフォロア

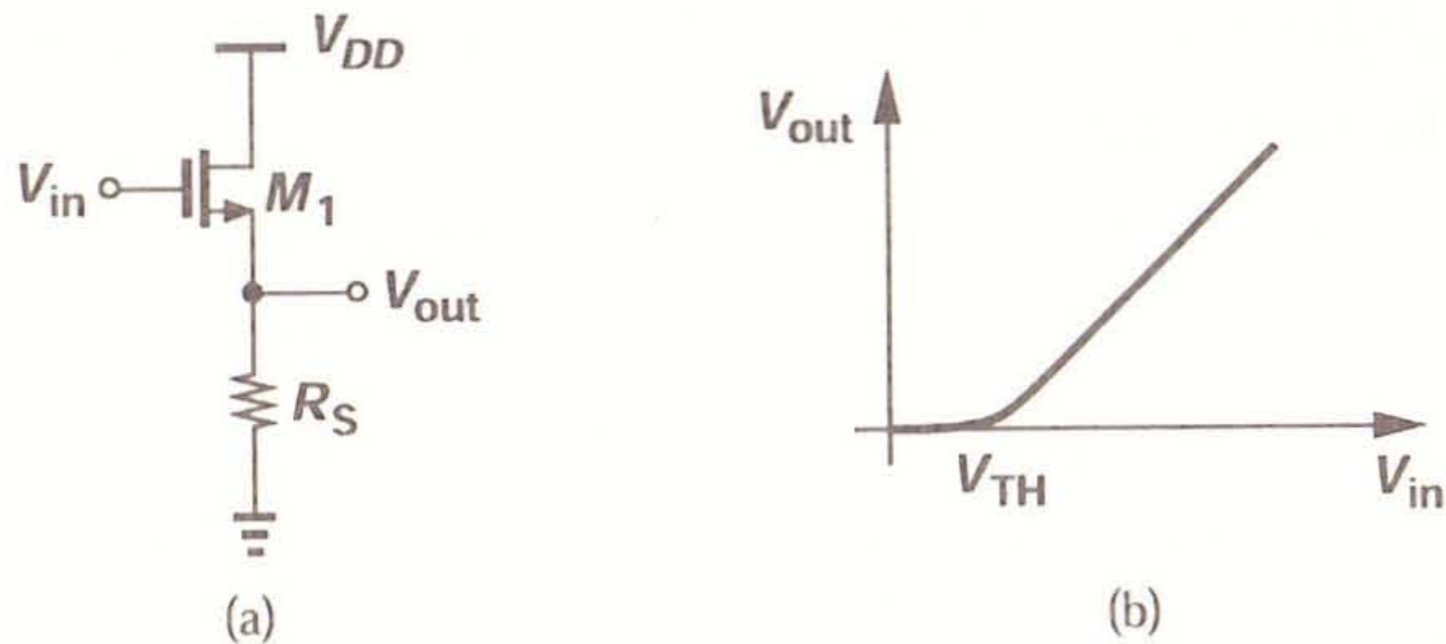


図3.27 (a) ソースフォロワ, および(b) その入出力特性.

バイポーラトランジスタのエミッタフォロア回路と同様だと考える

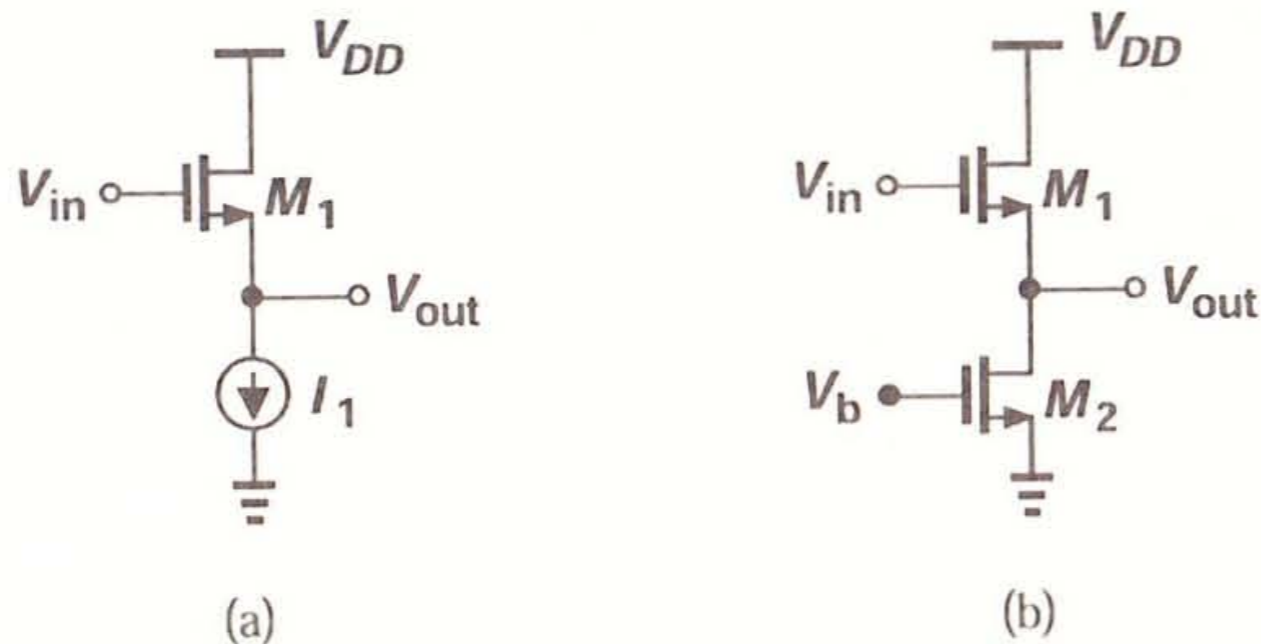


図3.30 電流源としてNMOSトランジスタを用いたソースフォロワ.