

講義が始まる前に・・・

Templateでないもの、氏名の書かれていないものがありました。
各週の課題の評価点は6点相当になりますので、ご注意ください。

講義スライドをpdfにしたファイルをILIASに上げておきます。
開封パスワードは、講義した年月日です（例；20200518）。各ページの左上にマウスカーソルを持って行くと、私が喋ったセリフのテキストが教示されます。Acrobat以外のアプリだと文字が化けるとの報告があります。

著作権の問題がありますので、印刷・コピーの譲渡など一切禁止です。一連の講義資料から副次的作品を作って譲渡・販売することも禁止です。メモ機能については解禁しましたが、「聴取力」を養成するのも講義の役目なので、手書きノートを書く習慣を付けることをお勧めします。

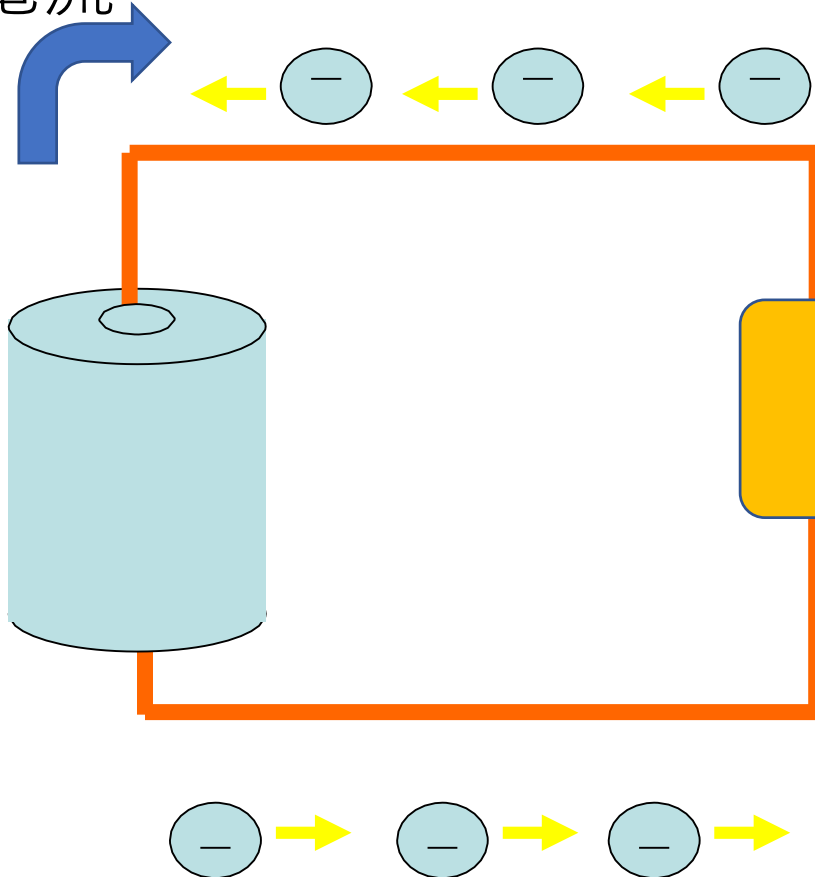


第3講 半導体材料

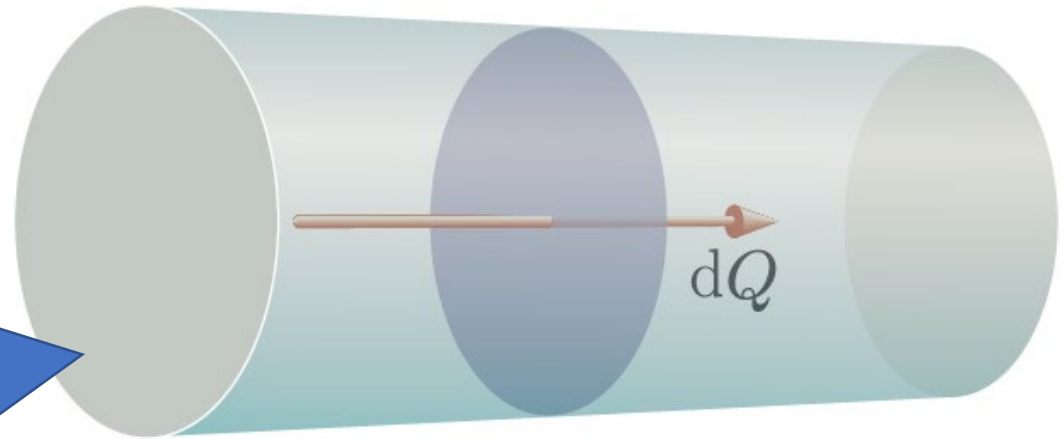
教科書 p.81~

ここをダブルクリック
すると読み上げ原稿が
表示されます。

電流



拡大



絶縁体よりは電流を流せる物質を
半導体という。・・・それだけか？





半導体の特性（重要）

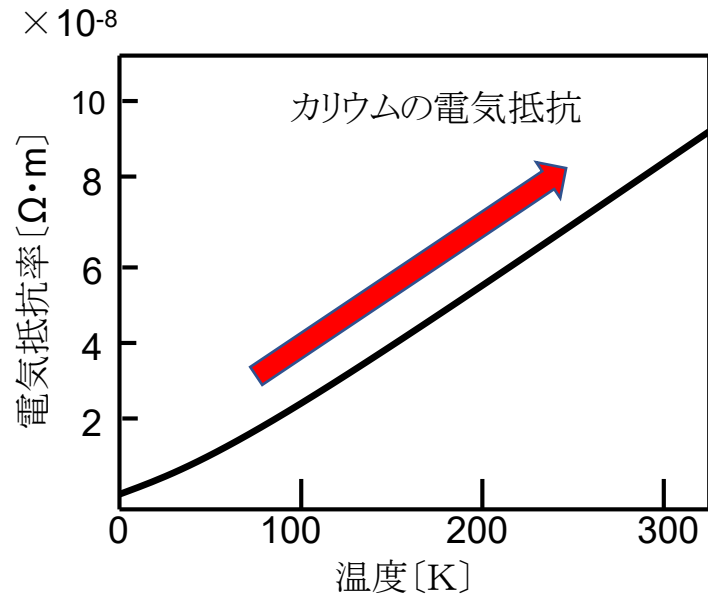
教科書 p.81~

1. 電気抵抗が導体と絶縁体の中間の値を持つ
2. 電気抵抗が温度上昇により減少する
3. 不純物の影響を大きく受ける
4. 外部エネルギーに反応が大きい



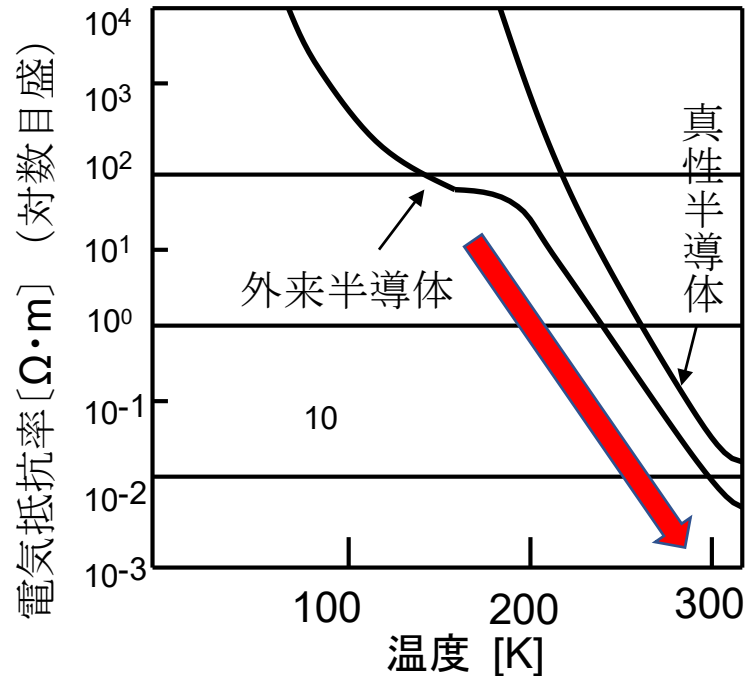
半導体の電気抵抗の温度変化

教科書 p.81~



(a) 典型的な金属の電気抵抗率の温度依存性

($\rho = \rho_i + aT$ というマシーゼンの法則に従う。ここに、 ρ_i を残留抵抗と呼ぶ)



(b) 典型的な半導体の電気抵抗率 (抵抗率の変化範囲が広いので対数目盛になっていることに注意)

- 金属と半導体の電気抵抗の温度変化の比較



半導体の特性（重要）

教科書 p.81~

1. 電気抵抗が導体と絶縁体の中間の値を持つ
2. 電気抵抗が温度上昇により減少する
3. 不純物の影響を大きく受ける
4. 外部エネルギーに反応が大きい




「ノート取ろうね」
のアイコンです！



スライド問題3-1



半導体の重要な性質を 4 つ挙げよ



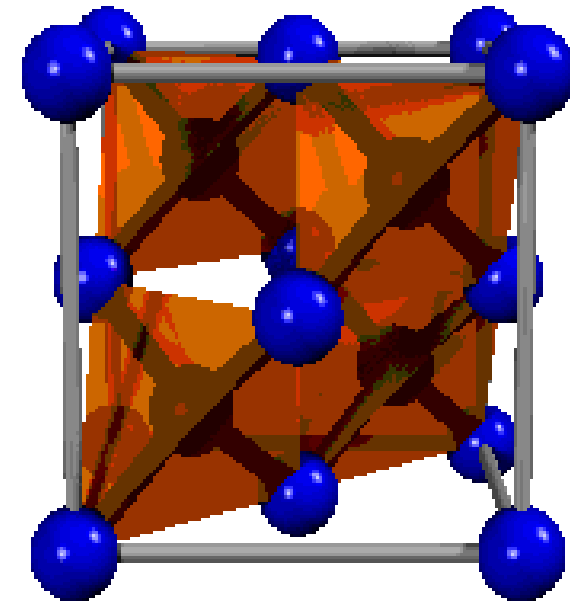
周期律表上の半導体（重要）


教科書 p.82

表 4 ・ 1 半導体に関係のある原子

I族	II族	III族	IV族	V族	VI族	VII族
3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F
11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl
19 K	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br
	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	
	80 Hg		82 Pb			

(注) 上の数字は原子番号



 ダイヤモンド構造



半導体の特性（重要）

教科書 p.82~

半導体	エネルギーギャップ [eV] 300K	遷移	移動度		用途、特徴
			[m ² /V・s]		
	直接: D, 間接: I	m _n	m _p		
Si	1.14	I	0.15	0.05	トランジスタ、ダイオード, IC,光電池
					パワーMOSFET, IGBT, サイリスタ
					トランジスタ,太陽電池
Ge	0.67	I	0.45	0.19	トランジスタ
GaAs	1.52	D	0.97	0.07	マイクロ波デバイス, FET, ガンダイオード
					ホール素子,LED, 半導体レーザー
					太陽電池
GaN	3.43	D	0.15	0.003	LED
GaP	2.26	I	0.011	0.0075	LED
InSb	0.23	D	7.7	0.075	ホール素子
InAs	0.36	D	3.3	0.046	ホール素子
InP	1.35	D	0.46	0.065	パワーデバイス
PbTe	0.3	I	0.16	0.075	熱電冷却
bFeSi ₂	0.83	I	0.05	0.05	熱電材料
SiC	2.86	I	0.07	0.006	パワートランジスタ
ZnO	3.2	D	0.018		センサ,バリスタ、透明電極

表 4・2
各種半導体の特徴



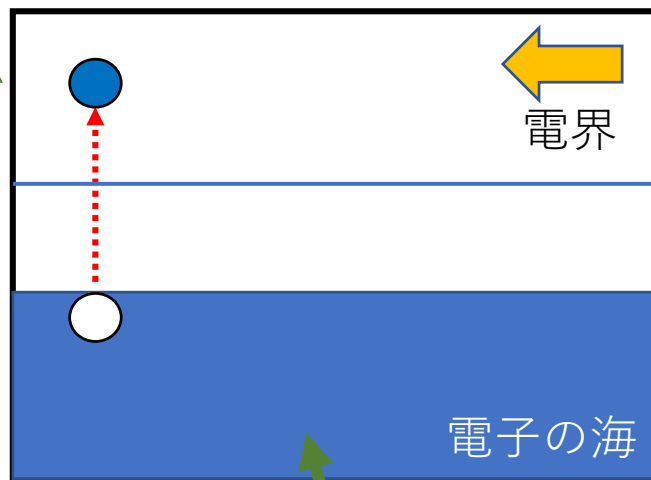
半導体の導電機構

教科書 p.83



これは、前回の講義の中で「半充满帯」の説明でも似た図が出て来ましたね。

伝導帯



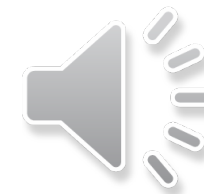
価電子帯

キャリア：

電界によって、電子とホールは結晶内を動いて電荷を運ぶ

平衡状態：

キャリアの発生する数と消滅する数は、温度が一定であれば、ある数でバランスする。
(どっちかが極端に増えたりしない)

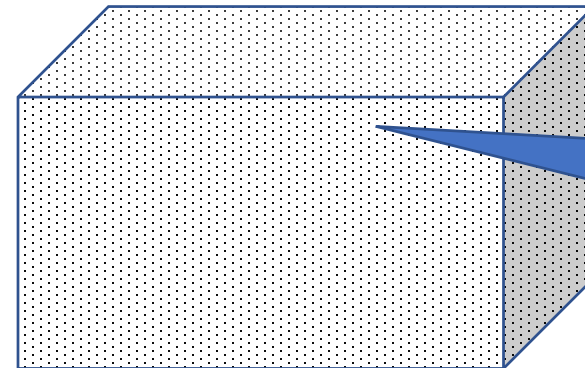


導電率、キャリア密度、移動度

- 導電率 σ 、キャリア密度 n 、移動度 μ の間には $\sigma = ne\mu$ の関係式が成り立つ。
- 抵抗率 ρ と 導電率 σ の関係は $\rho = \sigma^{-1}$ である。
- キャリア移動度とは、単位電界 E [V/cm] の印加によって得られる平均速度 v [cm/s] を表わし

$$v = \mu E$$

である。

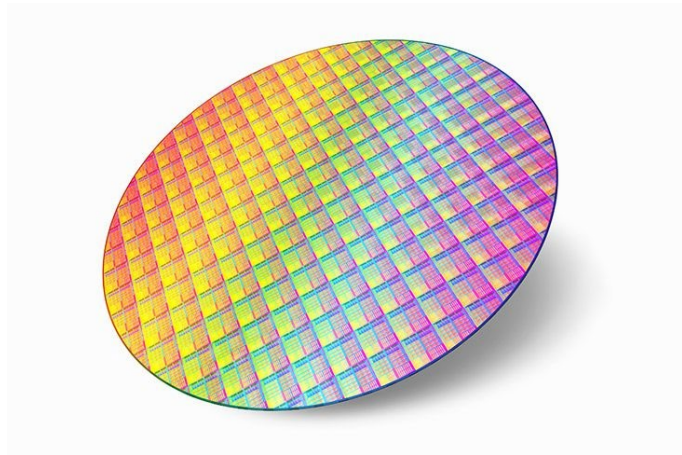


ある直方体を
密度 n で
キャリアが
充満

スライド問題3-2



厚さ $1\mu\text{m}$ のシリコンウェーハの表裏の間に 1V の電圧を印加した。



シリコンのキャリア移動度 $\mu=1000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$,
キャリア数を 10^{16}cm^{-3} として、
キャリアの平均移動速度と抵抗率を求めなさい。



スライド問題3-2 解答例

厚さ $1\text{ }\mu\text{m}$ のシリコンウェーハの表裏の間に 1 V の電圧を印加したので、ウェーハ中の電界は、 $E=10^4\text{ V/cm}$
[この分野の慣例で cm であることに注意して下さい。]



$$v = \mu E = 10^7\text{ cm/s} \text{ となる。}$$

このときの導電率はキャリア数が 10^{16} cm^{-3} なので

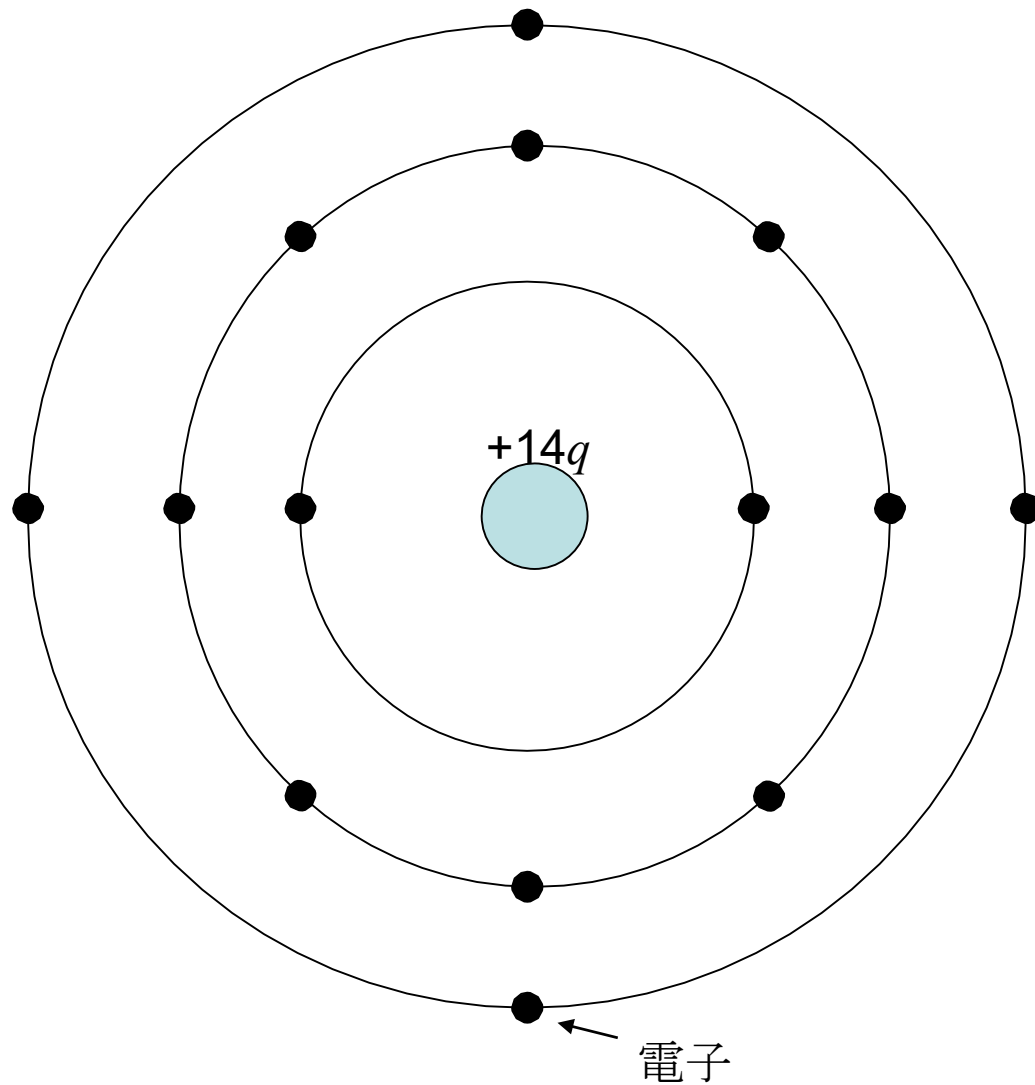
$$\sigma = ne\mu = 10^{16} \times \underline{1.6 \times 10^{-19}} \times 10^3 = 1.6\text{ S/cm}$$
$$\rho = 0.625\text{ }\Omega\text{cm}$$

電子の電荷量

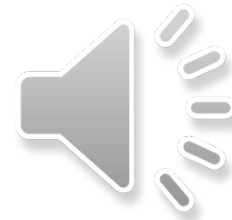


最重要項目なので
良く練習しておいて
下さい

ボーアの原子モデルでのSi



軌道	電子数
1	2
2	8
3	4

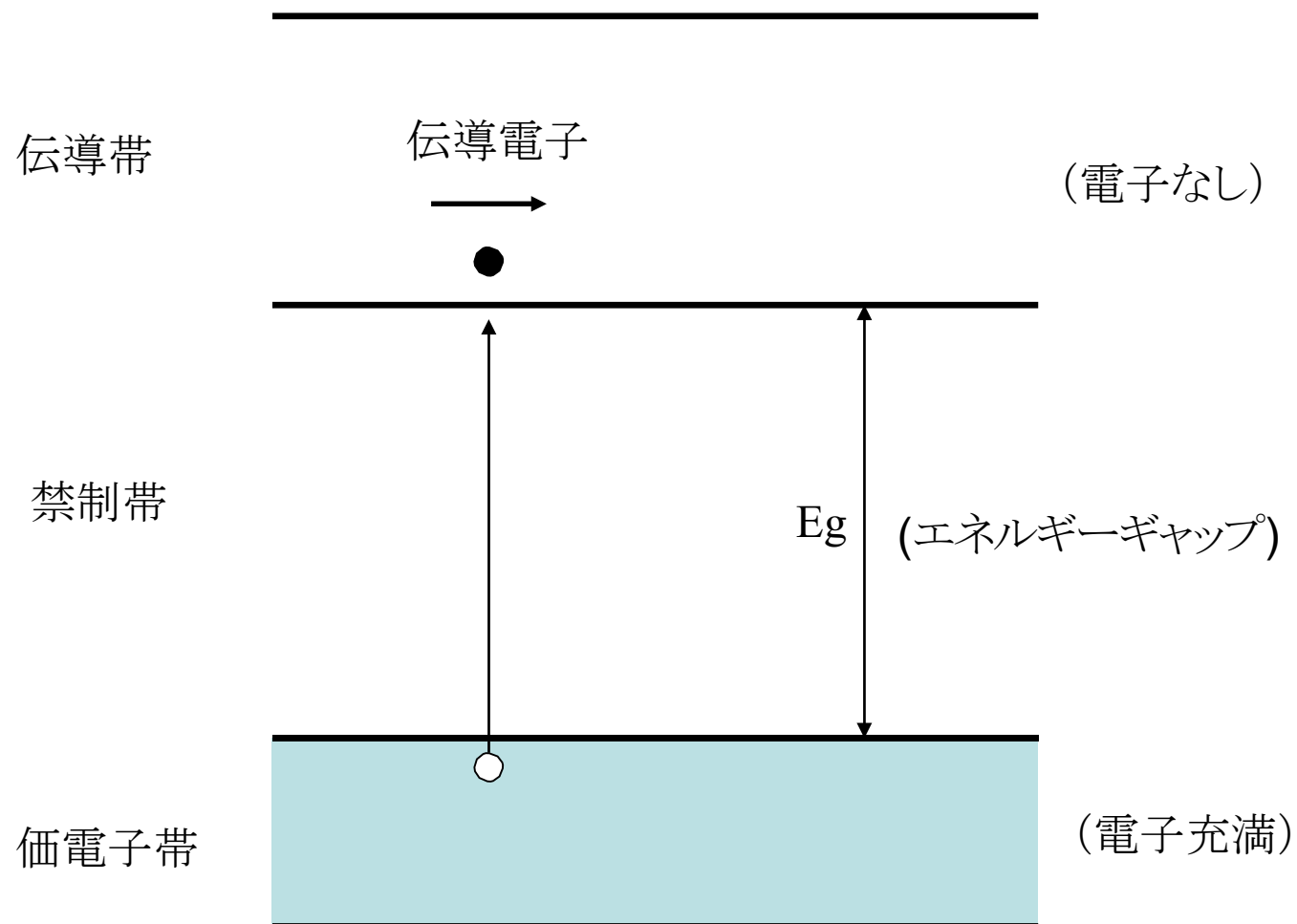




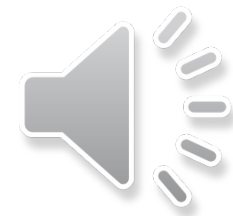
真性半導体

教科書 p.85

半導体のエネルギーバンド図

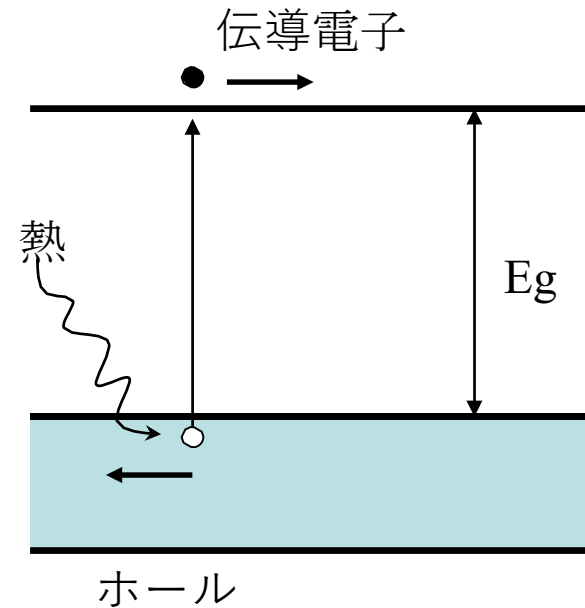
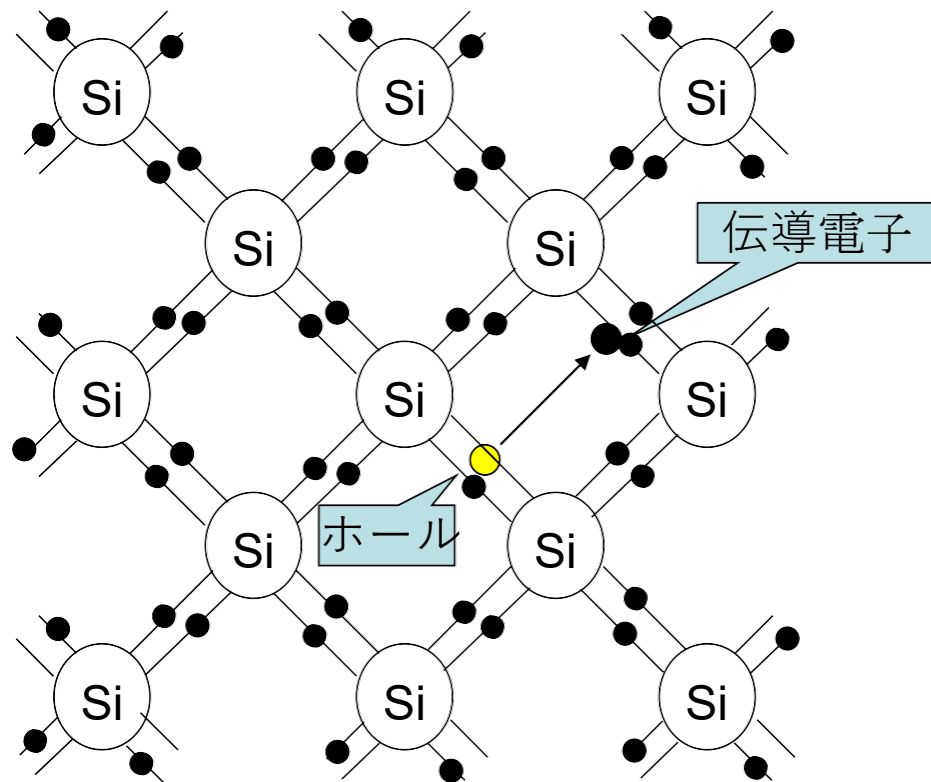
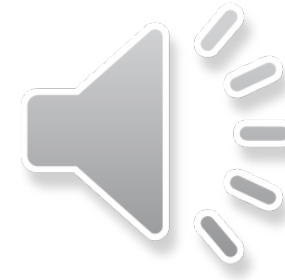


不純物を含まない
半導体のこと



真性半導体の電子とホール

教科書 p.86

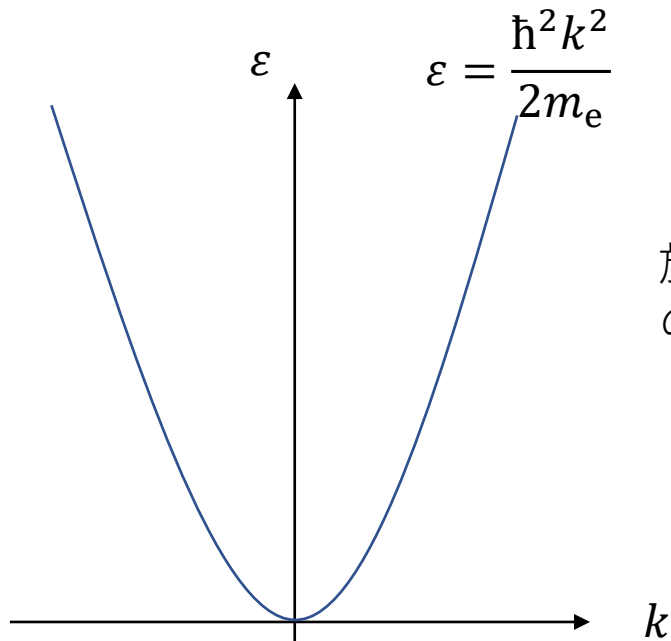


電子の有効質量

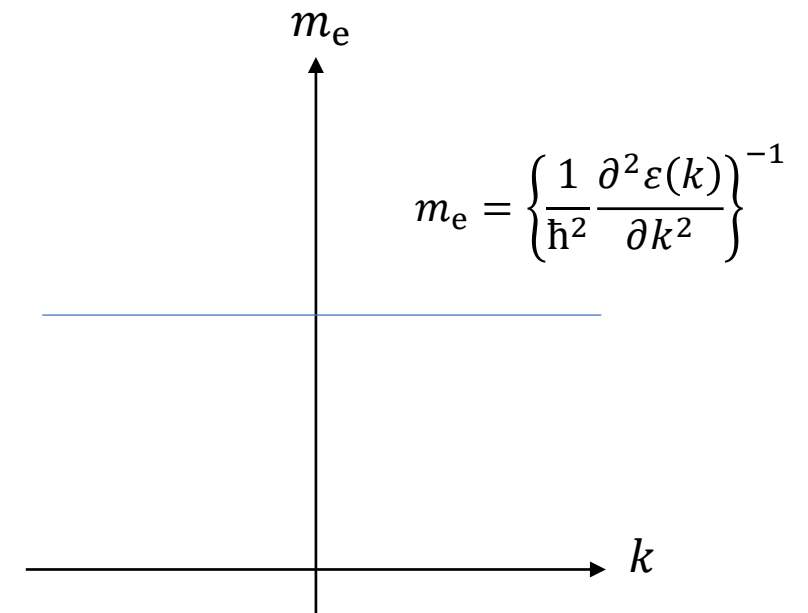
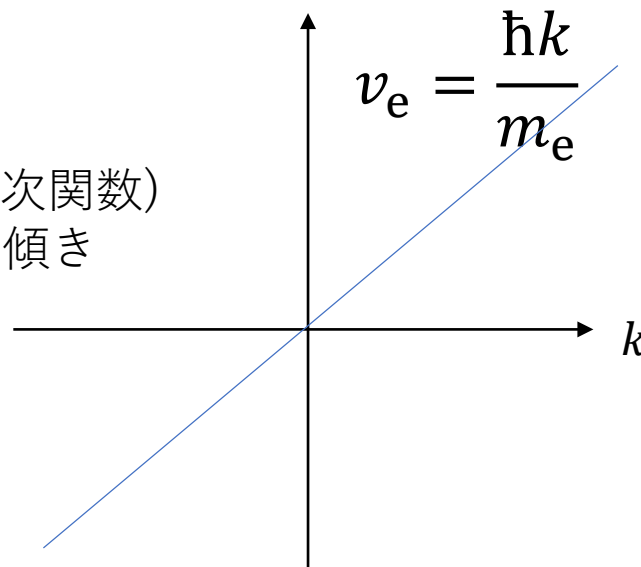
$$m_e = \frac{F}{dv_e/dt}$$
$$F = \hbar \frac{\partial k}{\partial t}$$
$$\frac{dv_e}{dt} = \frac{1}{\hbar} \frac{\partial^2 \varepsilon(k)}{\partial k^2} \frac{dk}{dt}$$

$$m_e^* = \left\{ \frac{1}{\hbar^2} \frac{\partial^2 \varepsilon(k)}{\partial k^2} \right\}^{-1}$$

．．．．電子の有効質量



放物線(2次関数)
の微分 = 傾き





不純物半導体

教科書 p.86

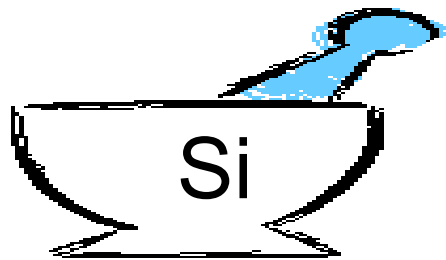


Doping

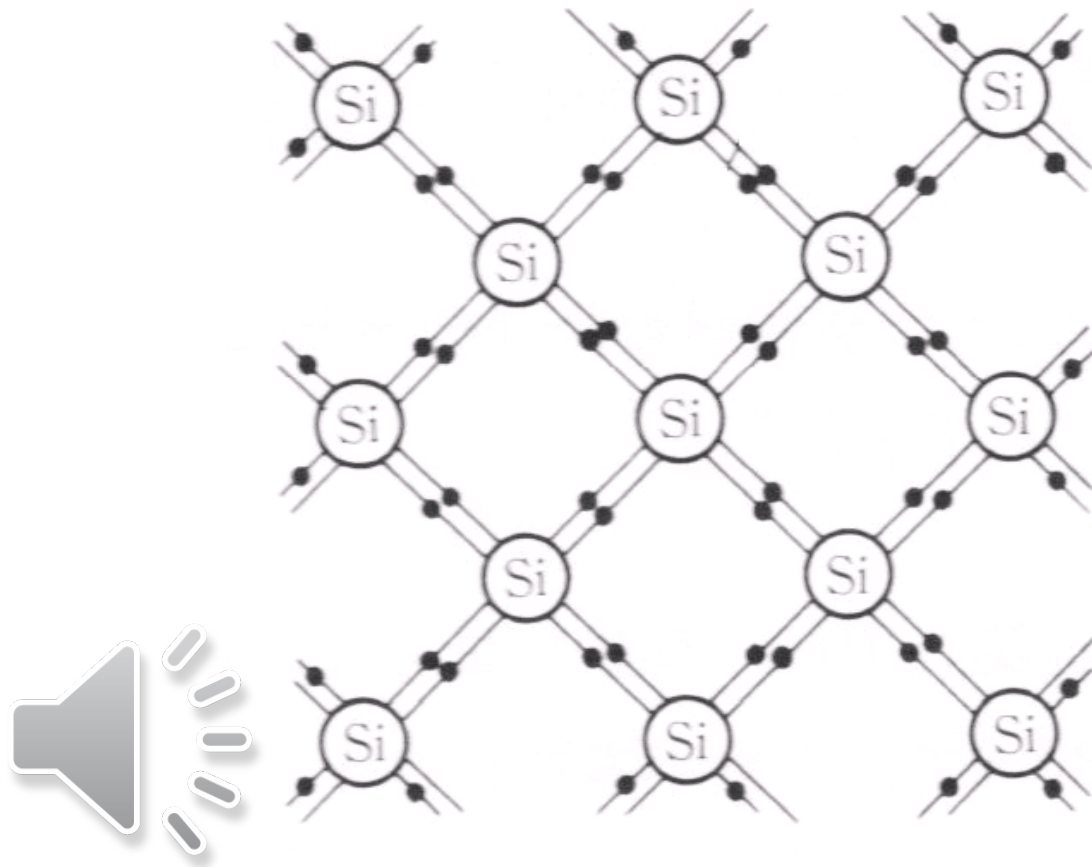
= 半導体に、母材とは異なる原子を添加すること

不純物

目的：キャリア密度の制御

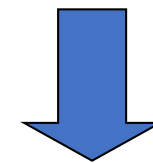


n 型半導体



^{14}Si
最外殻電子は4個

^{15}P
最外殻電子は5個



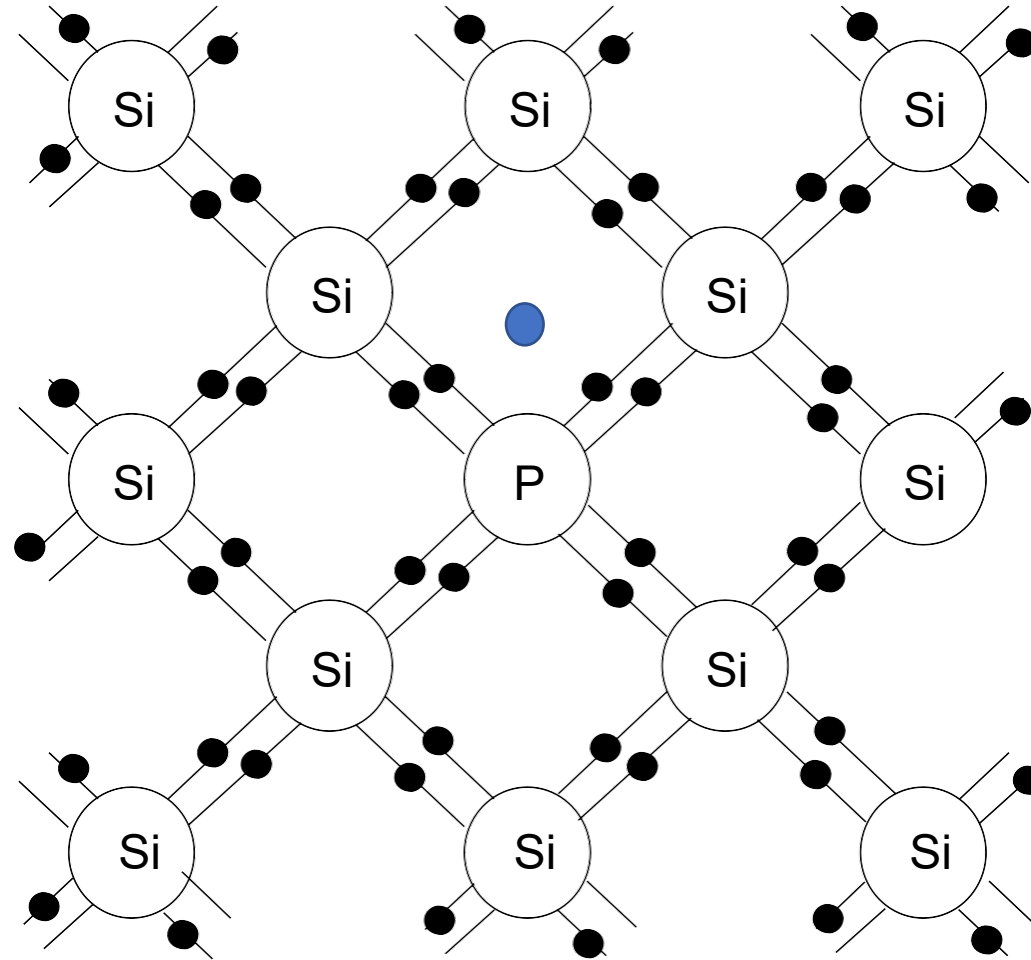
1個置換

電子が1つ余る





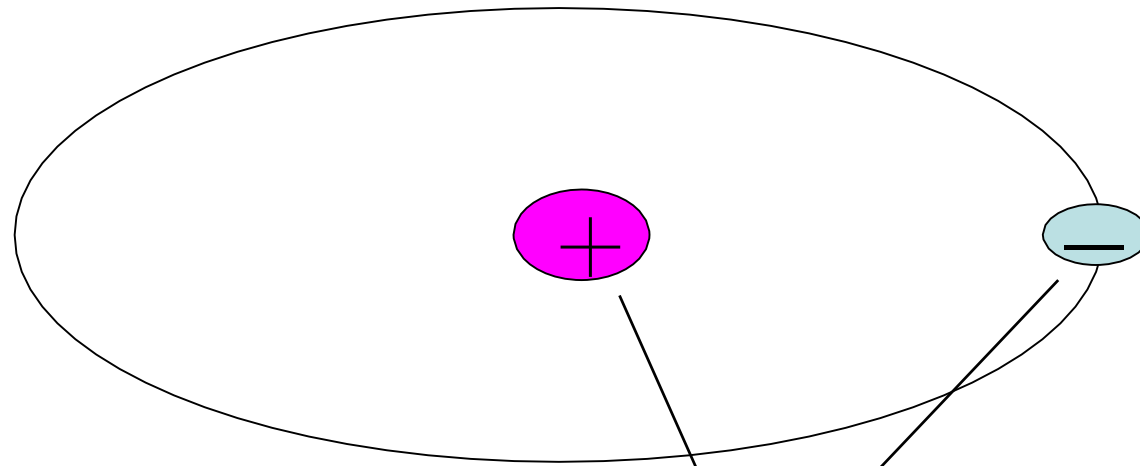
温度が低い時は



21:00

電子はP原子の周りを回っている

5番目の電子のエネルギー準位 水素原子モデルを適用

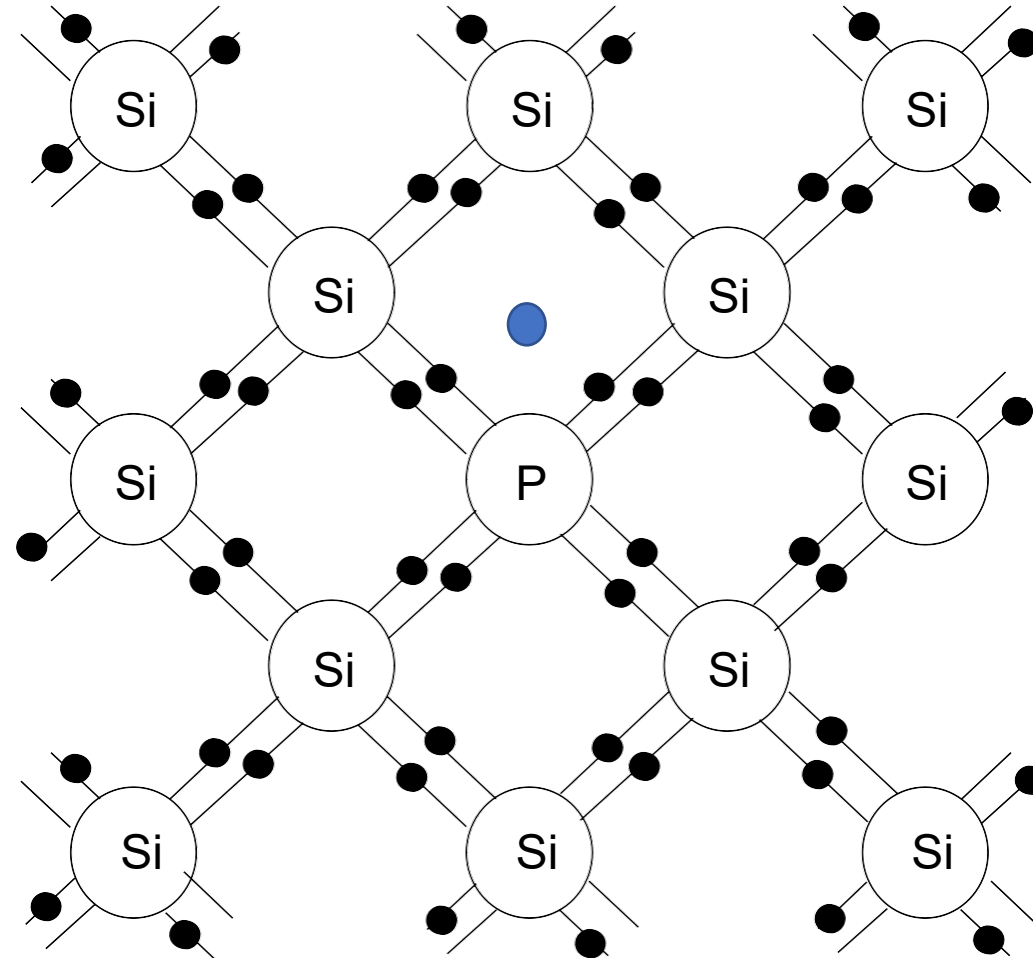


$$V(r) = -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_{si}r}$$





室温付近では



電子は自由に結晶内を運動してる

n 型半導体

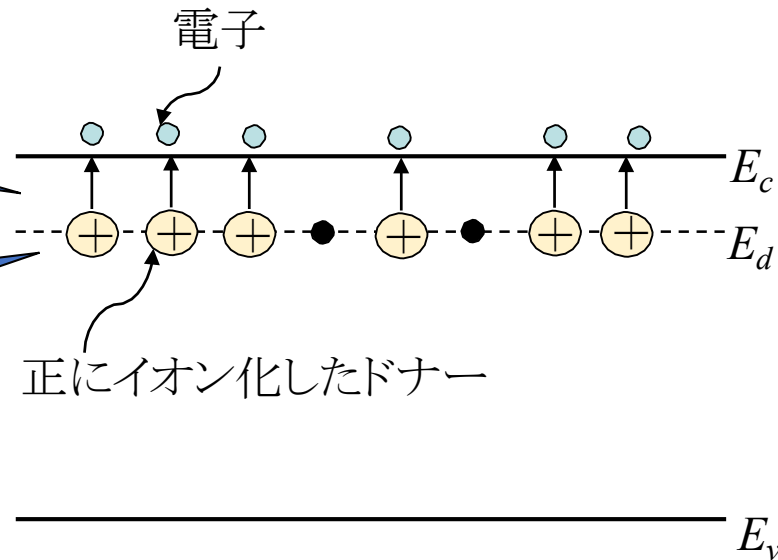
教科書 p.87



伝導帯から E_d だけ
下にエネルギー準位
を作る(弱い束縛)

熱エネルギーで
伝導帯に励起
↓
自由電子となる

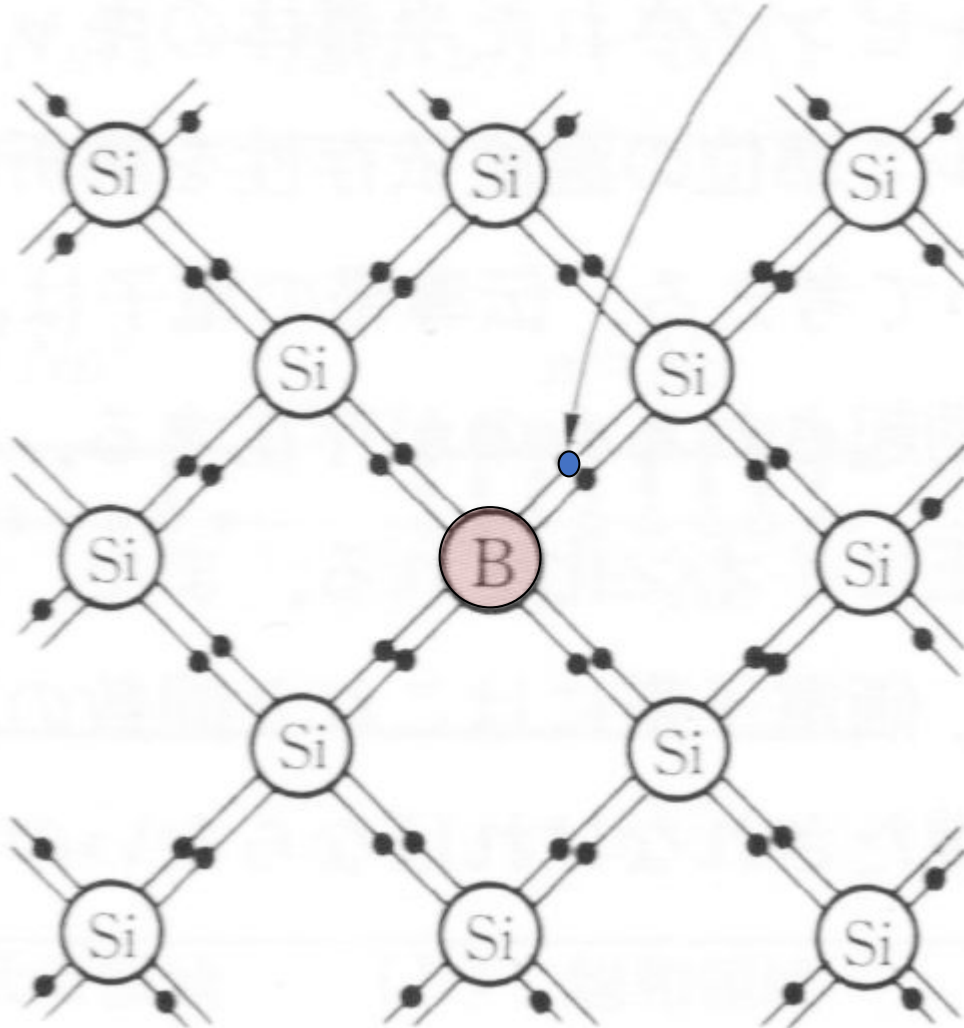
ドナー準位 E_d



p 型半導体

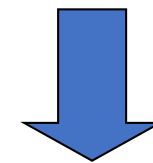


アクセプタから供給された正孔



^{14}Si
最外殻電子は4個

^5B
最外殻電子は3個



1個置換

電子が1つ不足

スライド問題3-3



シリコンに以下の物質を添加したら、何型の半導体になるか答えなさい。

インジウム、砒素、ガリウム、アルミニウム、
アンチモン

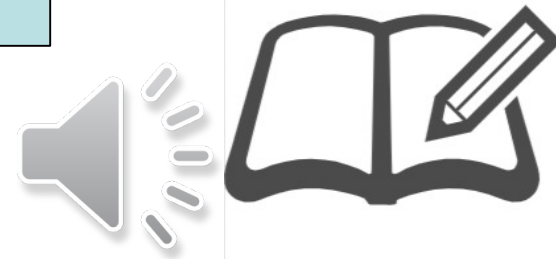
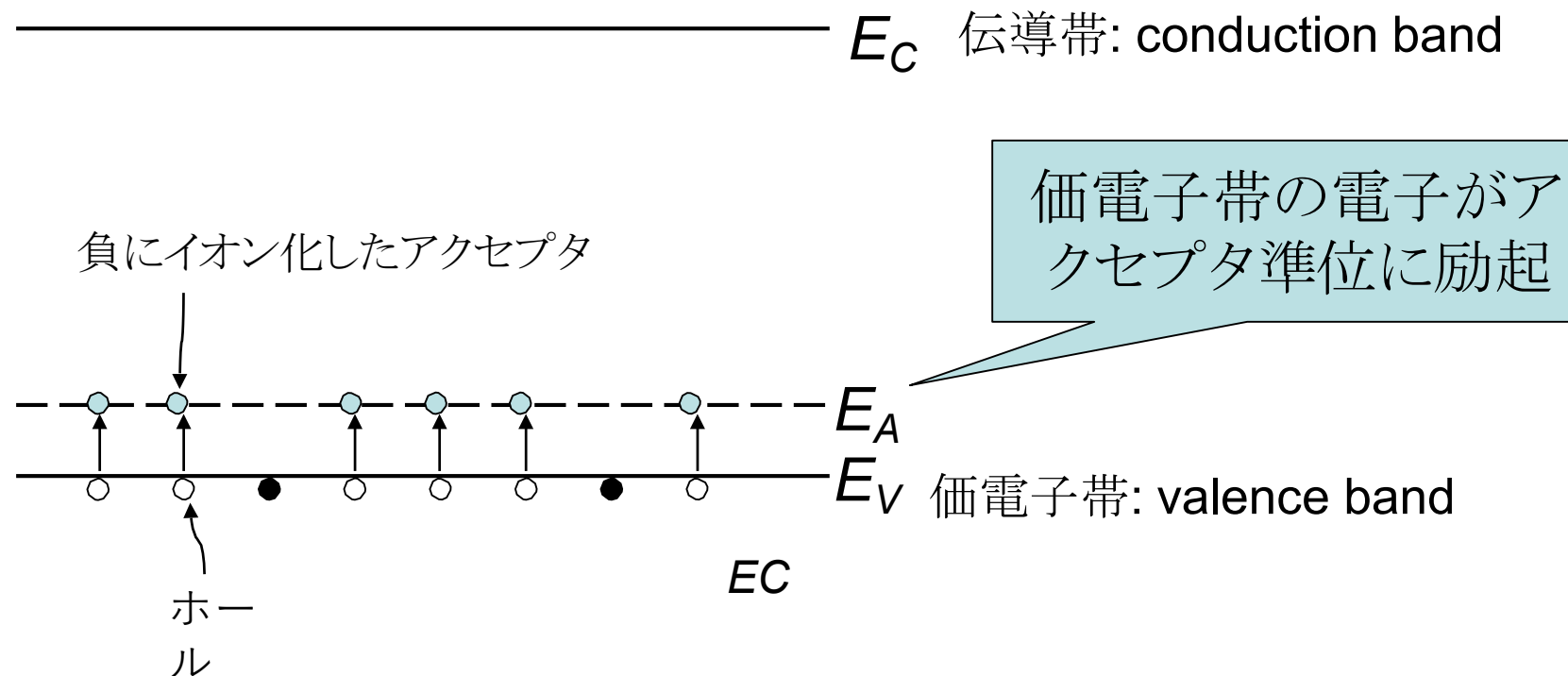


スライド問題3-3 解答例

砒素、アンチモンはリンと同じV族なのでn型。
ガリウム、アルミニウム、インジウムは
ホウ素と同じIII族なのでp型。



少数キャリア



アクセプタ順位は価電子帯のすぐ上

ホール密度が増加→電子密度は減少

$$pn = n_i^2 = N_c \cdot N_v \exp\left(-\frac{E_g}{k_B T}\right)$$

温度・バンドギャップに依存

n_i を真性キャリア密度

N_c 、 N_v ：伝導帯・価電子帯の実効状態密度

n型半導体でも成立する

熱平衡状態なら

Doping量に寄らずpn積は一定



電子密度が増加→ホール密度は減少

多数キャリア

少数キャリア

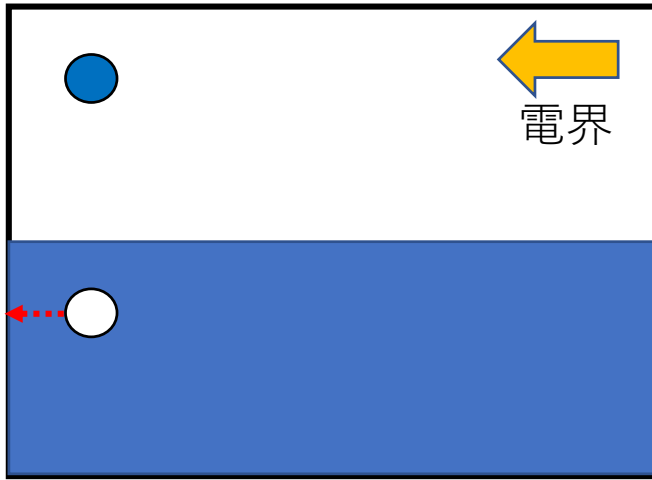


半導体の電気伝導

教科書 p.88-90

この平均速度をドリフト速度といいます。

※ 電子の電荷量(電荷素量)は e を使いますが、ここでは q になっていることに注意。



$$\sigma = nq\mu$$

$$v = \mu E$$

$$J = \sigma E$$

$$\vec{J} = nq\vec{v} = nq\mu\vec{E} = \sigma\vec{E}$$

$$[\text{A/m}^2] \quad (4 \cdot 17)$$



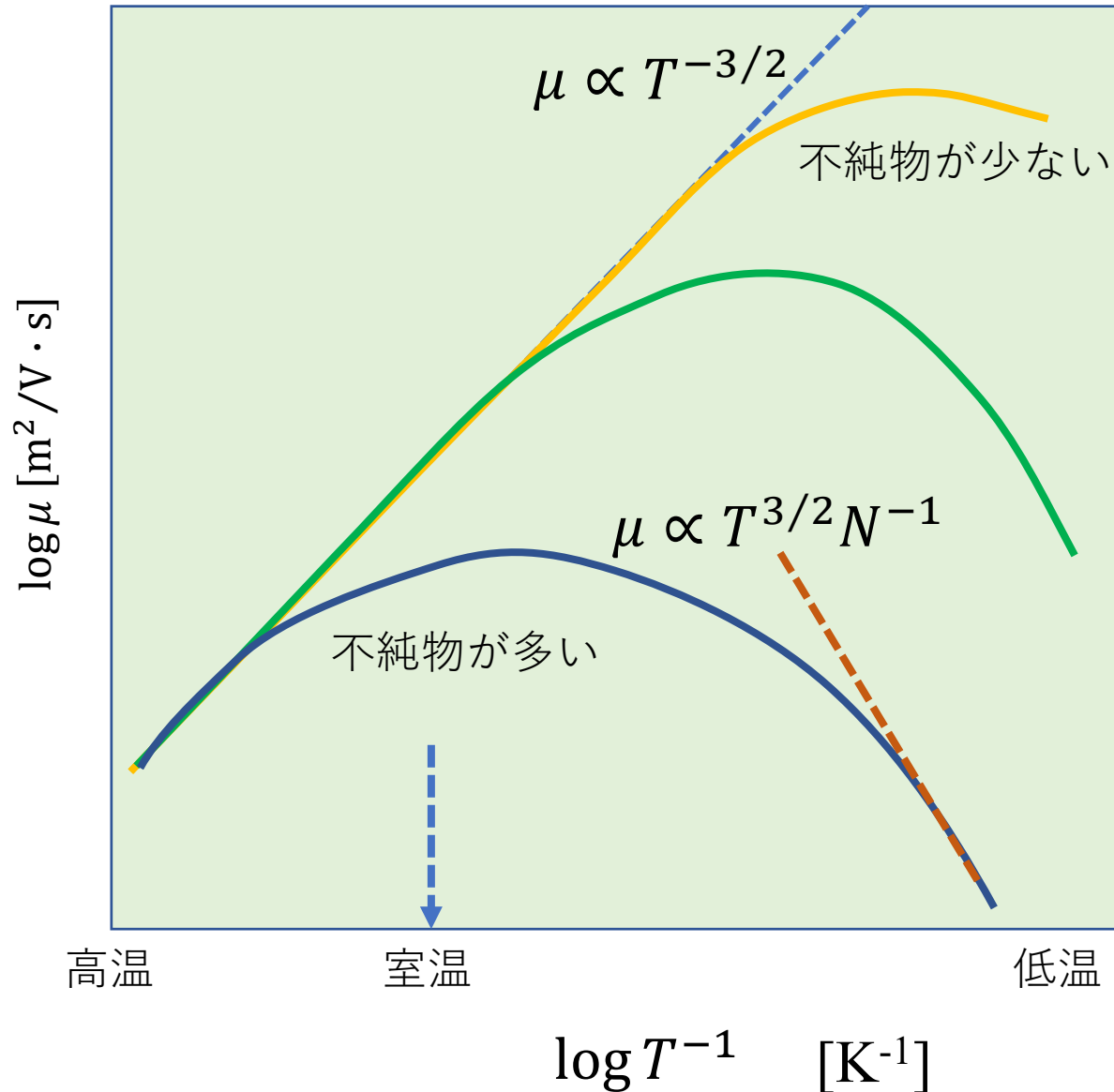
$$\vec{J} = (nq\mu_n + pq\mu_p)\vec{E}$$

(4 · 18)



移動度の温度依存性

教科書 p.90



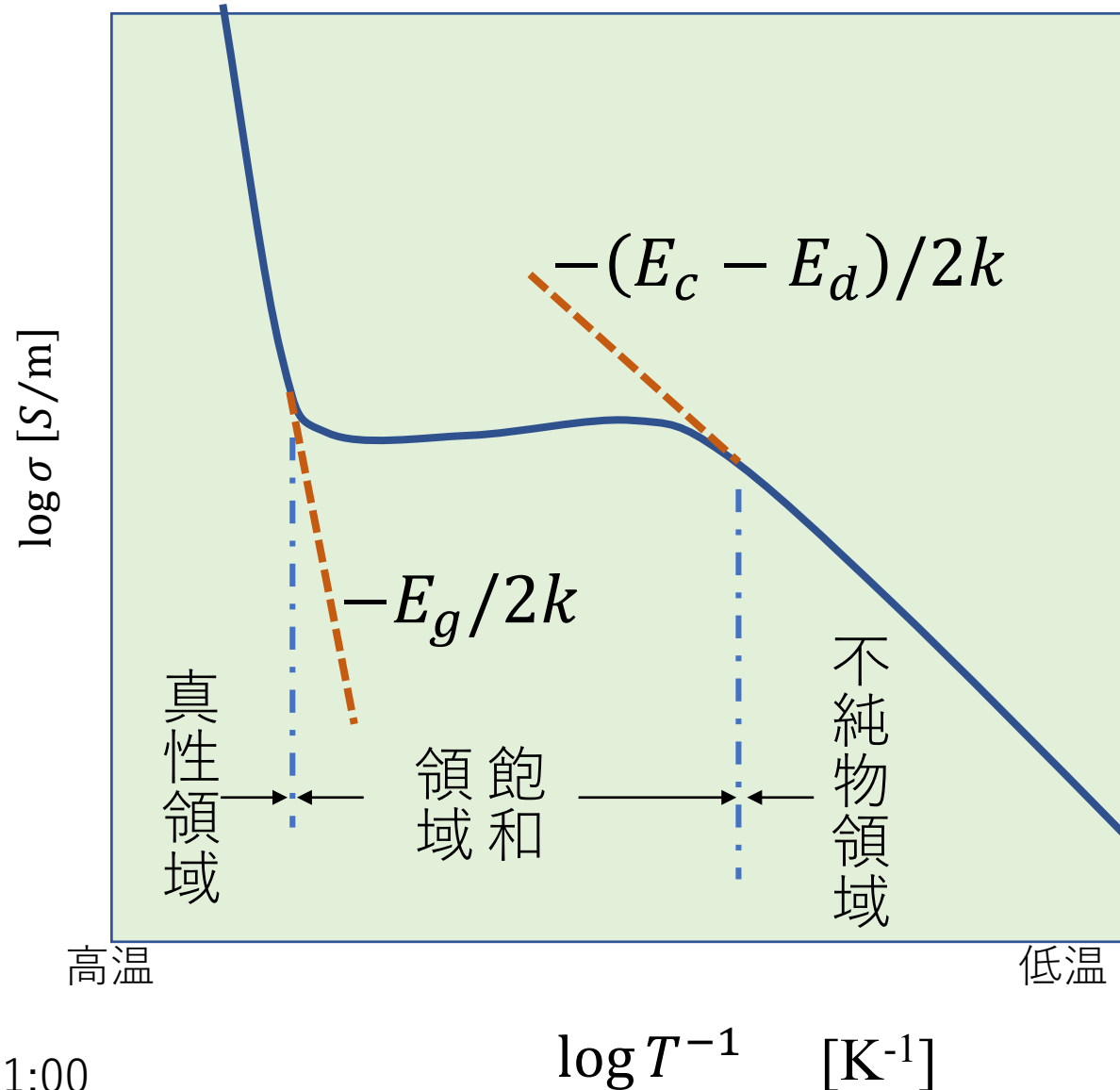
低温：イオン化不純物散乱が支配的

高温：熱振動による格子散乱が支配的



導電率 σ の温度依存性

教科書 p.90-91



低温：イオン化不純物散乱が支配的

高温：熱振動による格子散乱が支配的

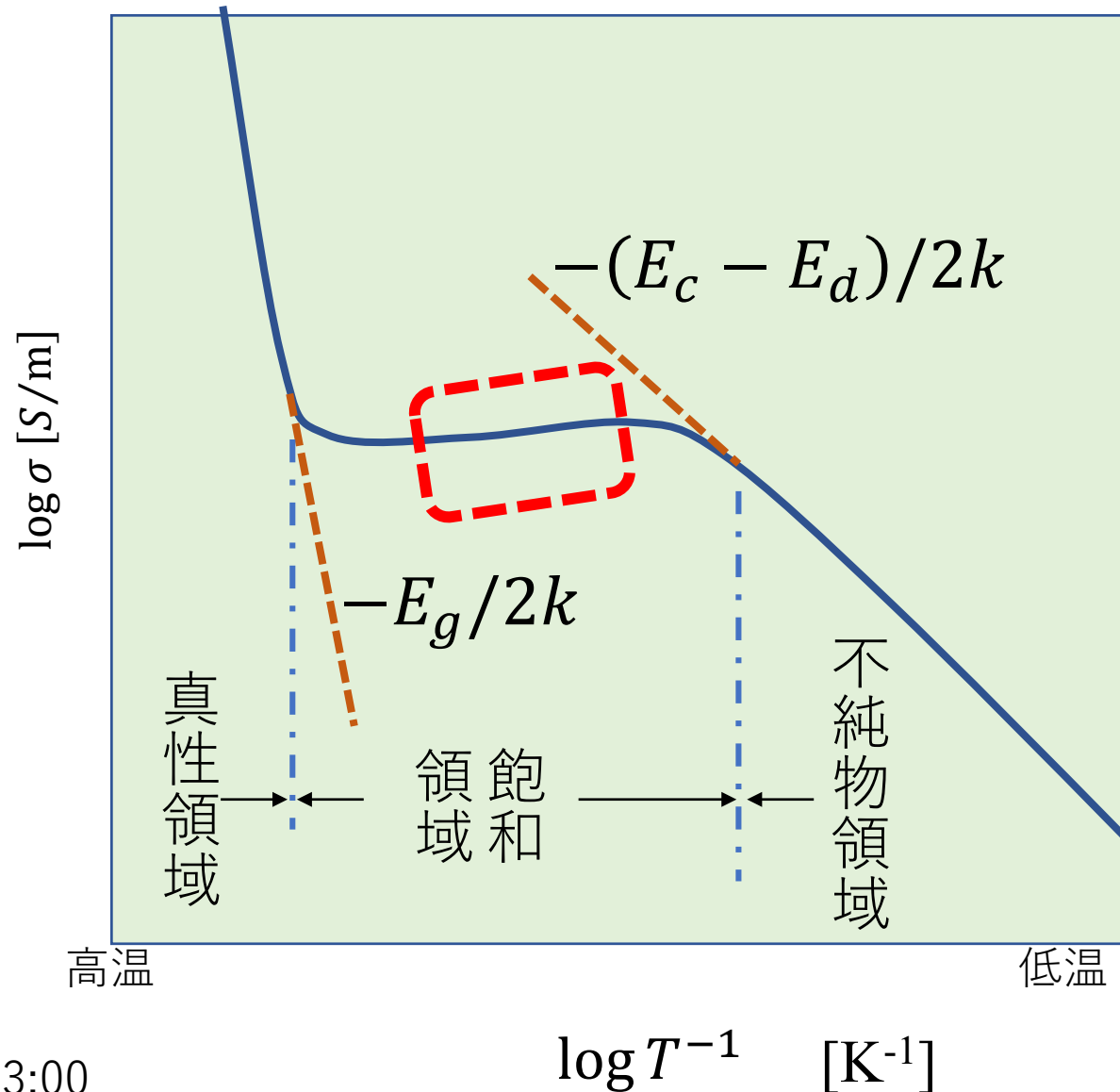


スライド問題3-4

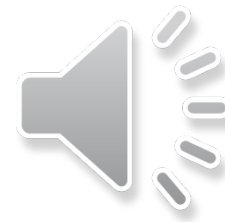


直前のスライドで「金属的」という言葉が急に出てきたけれど、何の何処が金属的なもの？

スライド問題3-4 解答例



「金属」と同じように、
温度の上昇(右から左へ；
Tの逆数で表示されてい
ることに注意)するに従っ
て、導電率が減少してる



ショットキー接合

教科書 p.91



Walter H. Schottkyさんがみつけたので、その名が残る。

p n 接合同様に整流作用を示すが、半導体同士の p n 接合よりも高速応答であることが知られている（実用的）。

p n 接合が実用化される以前から使われていた。



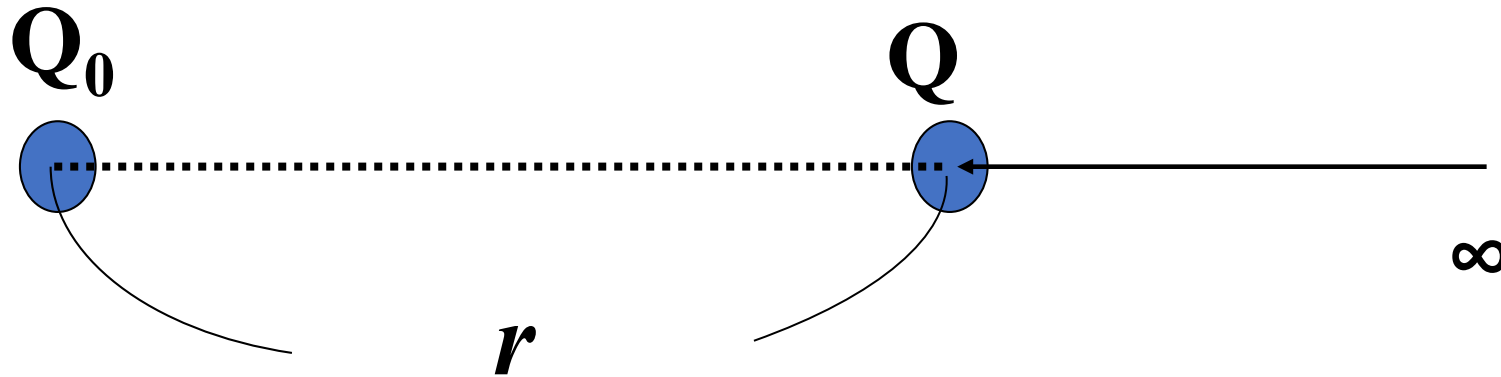
Walter H. Schottky
(1886年7月23日 - 1976年3月4日)

金属と半導体を接触させる場合、接触が整流性を示すか／オーム性を示すかは、金属と半導体の仕事関数によって決まります。

電磁気学(基礎)のおさらい

仕事関数 (Work function) ? ?

電位を求めよ！



電荷 Q_0 (C) があつた。無限に遠いところから、 Q (C) の電荷を運んできた時の仕事は？

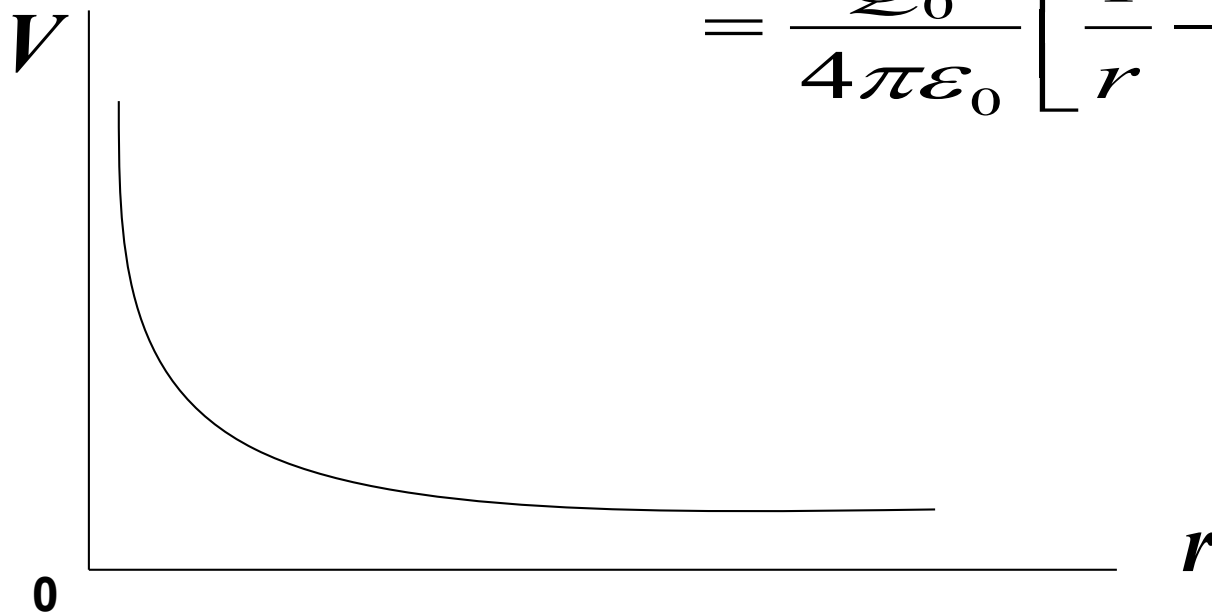
同符号とする。



電位差・ポテンシャル

解答

$$\begin{aligned} V_P &= \int_{\infty}^r \frac{-Q_0}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = \frac{-Q_0}{4\pi\epsilon_0} \left[-\frac{1}{r} \right]_{\infty}^r \\ &= \frac{Q_0}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{r} - \frac{1}{\infty} \right] = \frac{Q_0}{4\pi\epsilon_0 r} \quad [\text{V}] \end{aligned}$$



固体内にある電子を、固体の外、真空中に取り出すために必要な最小限のエネルギーの大きさのこと



ショットキー接合

教科書 p.91-92

無限遠点

真空準位

ϕ_m

E_f

金属

χ_s

ϕ_s

E_c

E_f

E_d

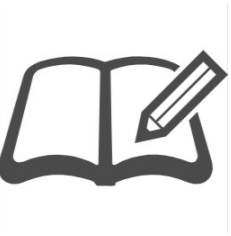
E_g

n 型半導体

図4・6(a)

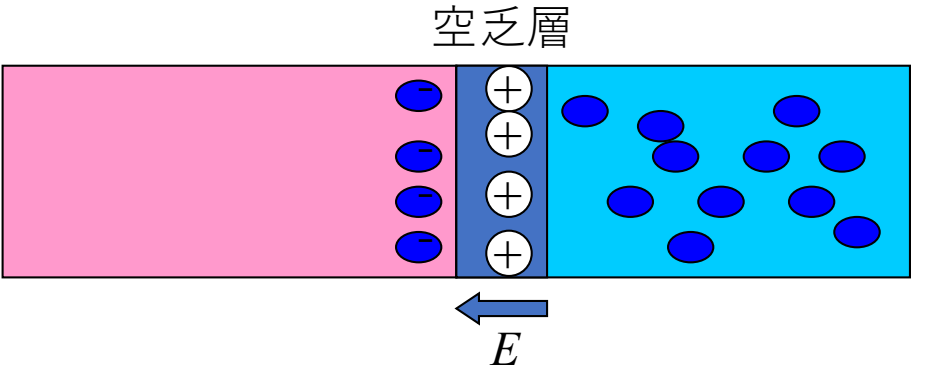
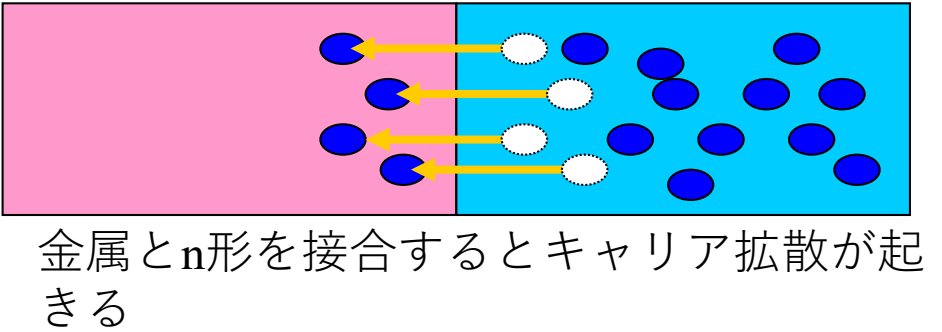
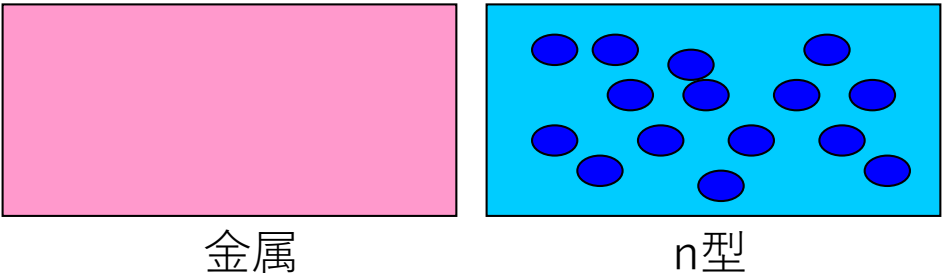
接触前

$$\phi_m > \phi_s$$





ショットキー接合した様子



スライド問題3-5



直前のスライドの「*question*」には何が入る？

図を良く見て、図中の記号で答えなさい。



スライド問題3-5 解答

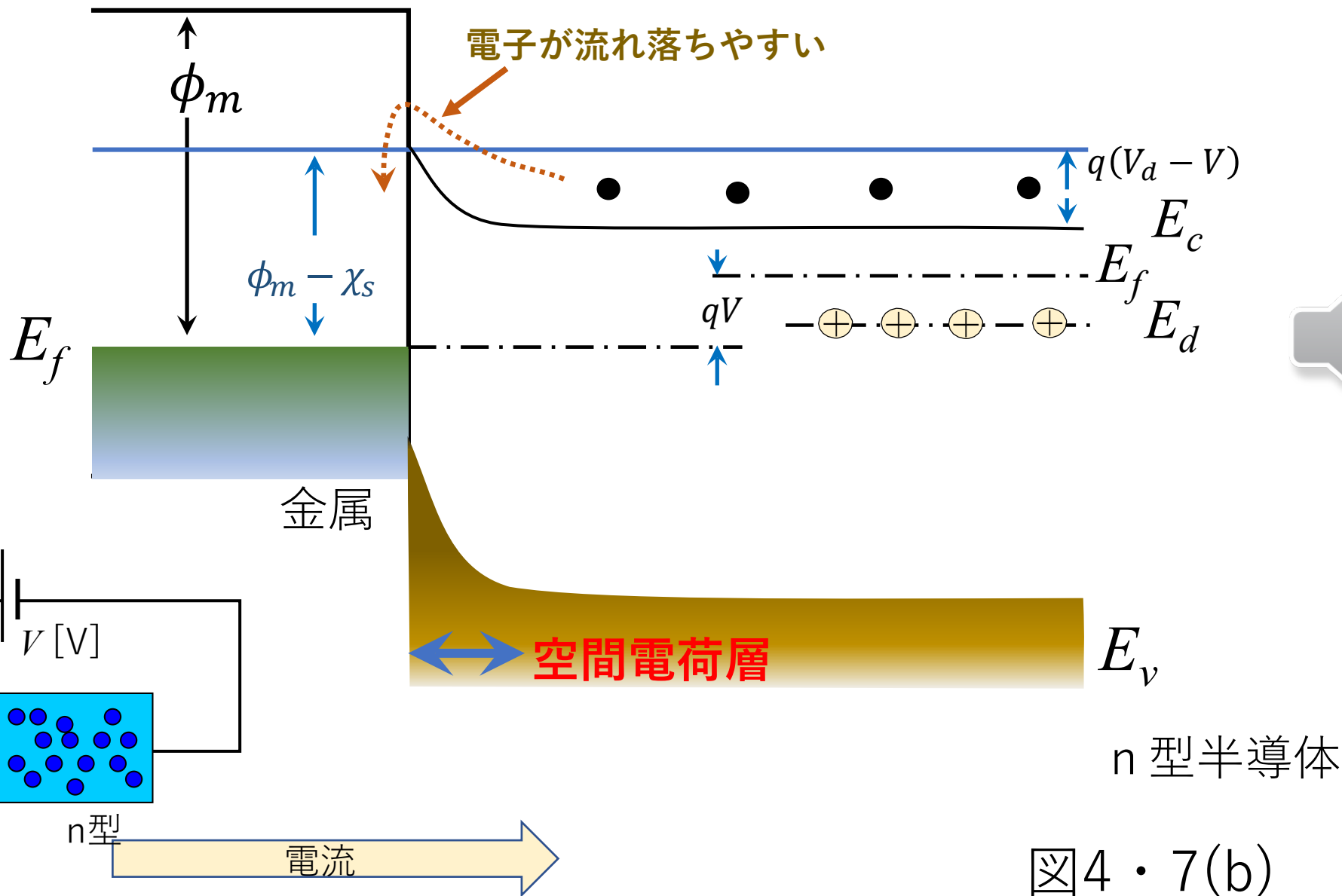


$$qV_d$$





順方向バイアス



逆方向バイアス

教科書 p.92-93

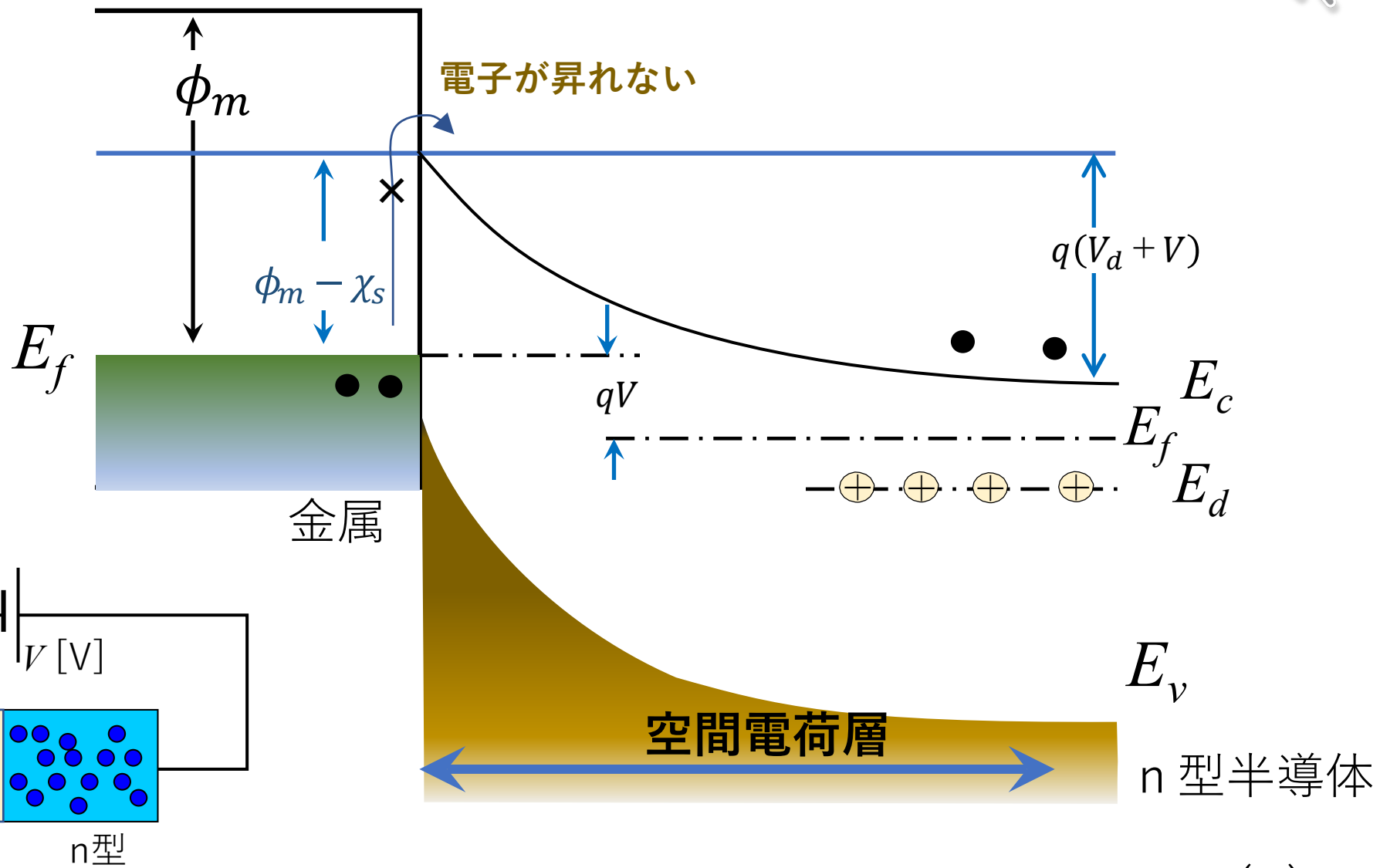
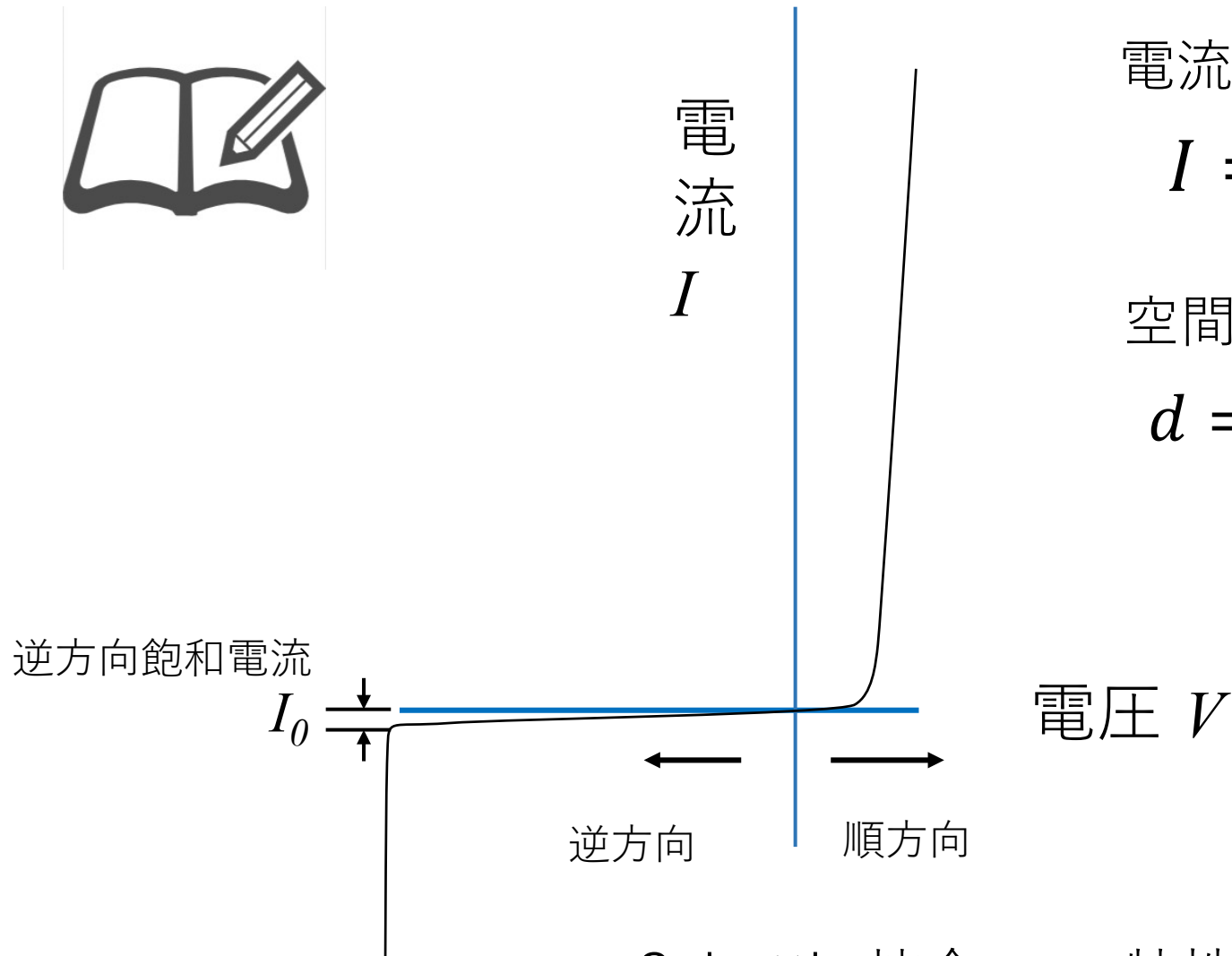


図4・7(b)



整流作用

教科書 p.92-93



電流

$$I = I_0 \{ \exp(qV/k_B T) - 1 \}$$

空間電荷層の厚さ

$$d = \{ (2\varepsilon/qN_d)(V_d - V) \}^{1/2} \quad (4 \cdot 19) \text{式}$$

教科書の誤記

教科書の誤記



Schottky接合の V - I 特性 $\phi_m > \phi_s$

オーム性接触

教科書 p.92-93

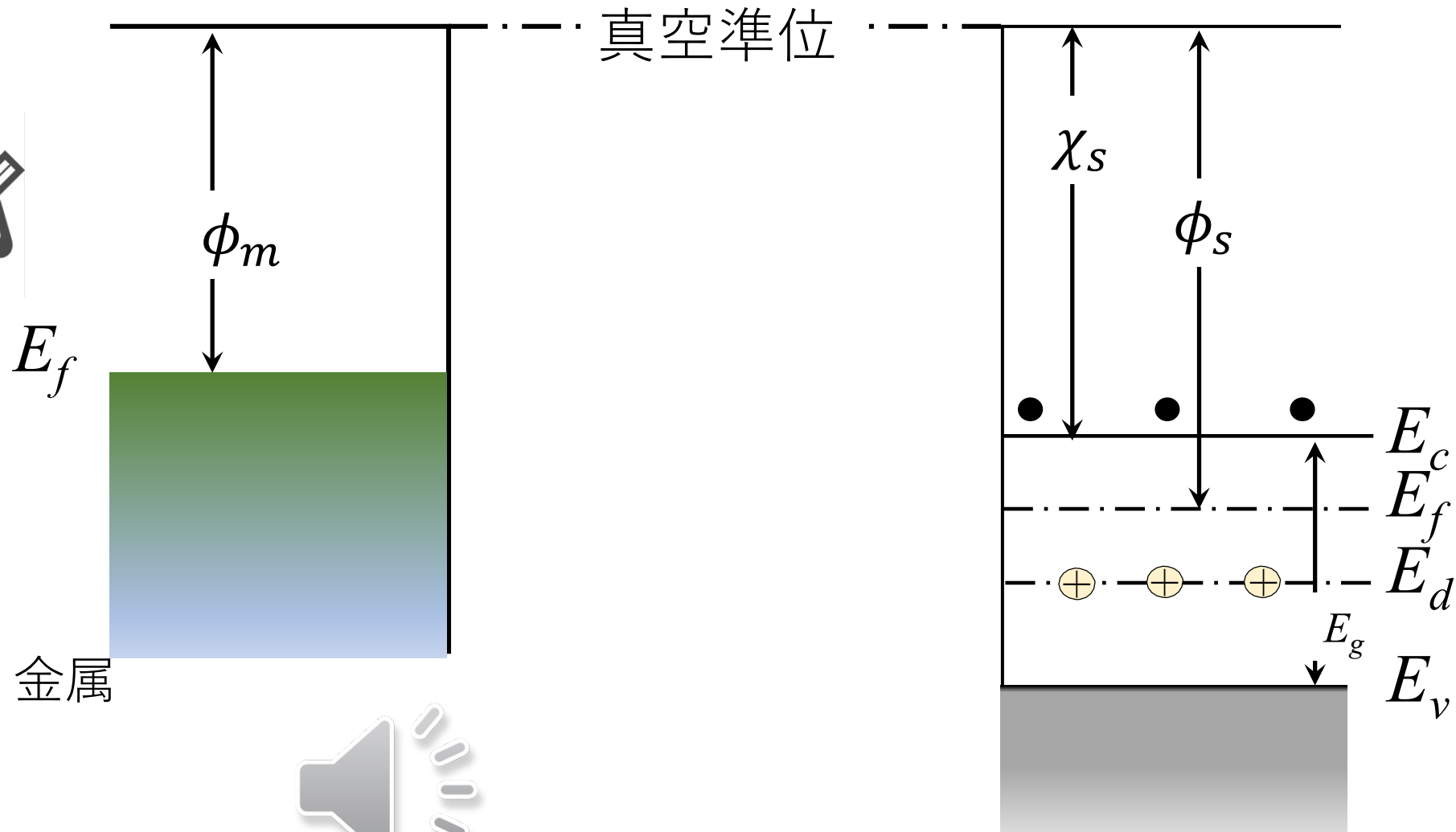


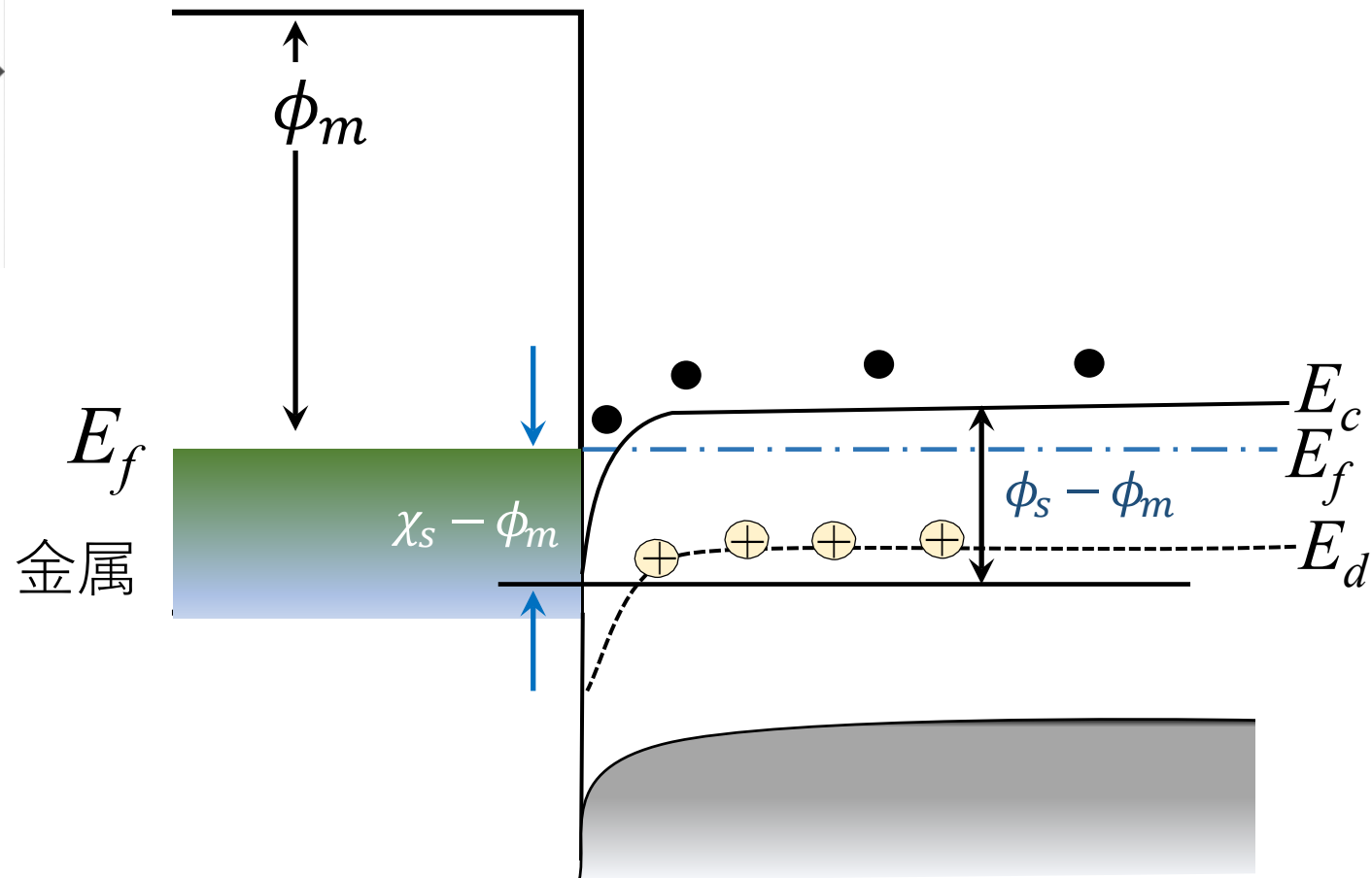
図4・8(a)
接触前
 $\phi_m < \phi_s$

n 型半導体



オーム性接触

教科書 p.93



n 型半導体

図4・8(b)

スライド問題3-6

スピーカー ドーピングしてn型半導体としたシリコンの仕事関数が $\phi_s = 4.05 \text{ eV}$, 禁制帯幅 $E_c = 1.27 \text{ eV}$ とします。表の各金属の仕事関数から、シリコンと各金属を接触させたときに、ショットキー性になるのかそれともオーム性になるのか、空欄を埋めなさい。



元素	仕事関数 ϕ_m	ショットキー性 or オーム性
Au	4.80eV	
Pt	6.30eV	
Cu	4.18eV	
Ni	4.01eV	
W	4.5eV	
Ca	3.2eV	

スライド問題3-6

シリコンの電子親和力 $\chi_s = 4.05 \text{ eV}$, 禁制帯幅 $E_g = 1.12 \text{ eV}$ とします。表の各金属の仕事関数から、**n型半導体**としたシリコンと各金属を接触させたときに、ショットキー性になるのかそれともオーム性になるのか、空欄を埋めなさい。



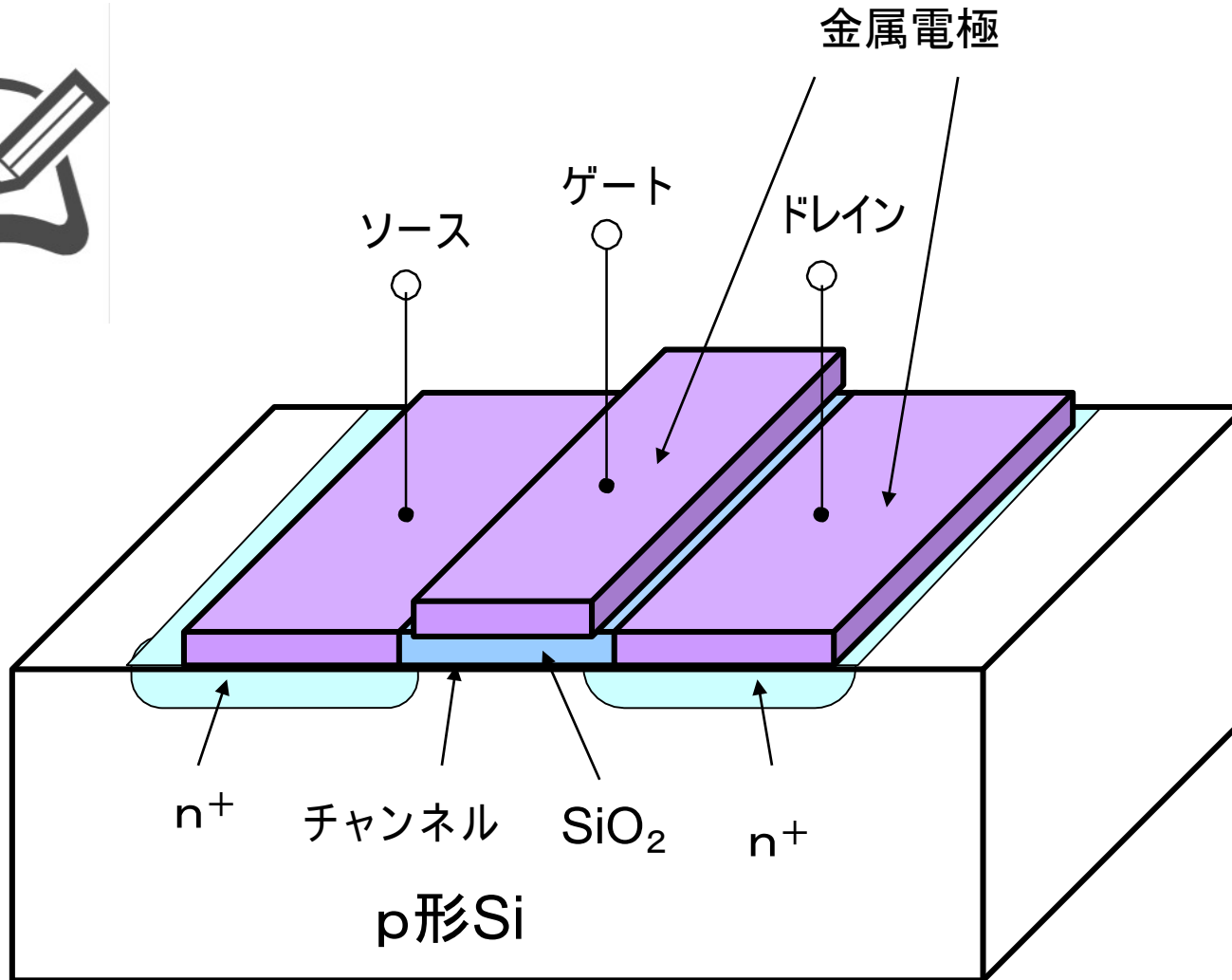
元素	仕事関数 ϕ_m	ショットキー性 or オーム性
Au	4.80eV	ショットキー
Pt	6.30eV	ショットキー
Cu	4.18eV	ショットキー
Ni	4.01eV	オーム
W	4.5eV	ショットキー
Ca	3.2eV	オーム

電界効果トランジスタ (FET)

教科書 p.101

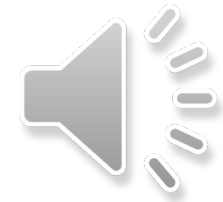
~101

Field Effect Transistor



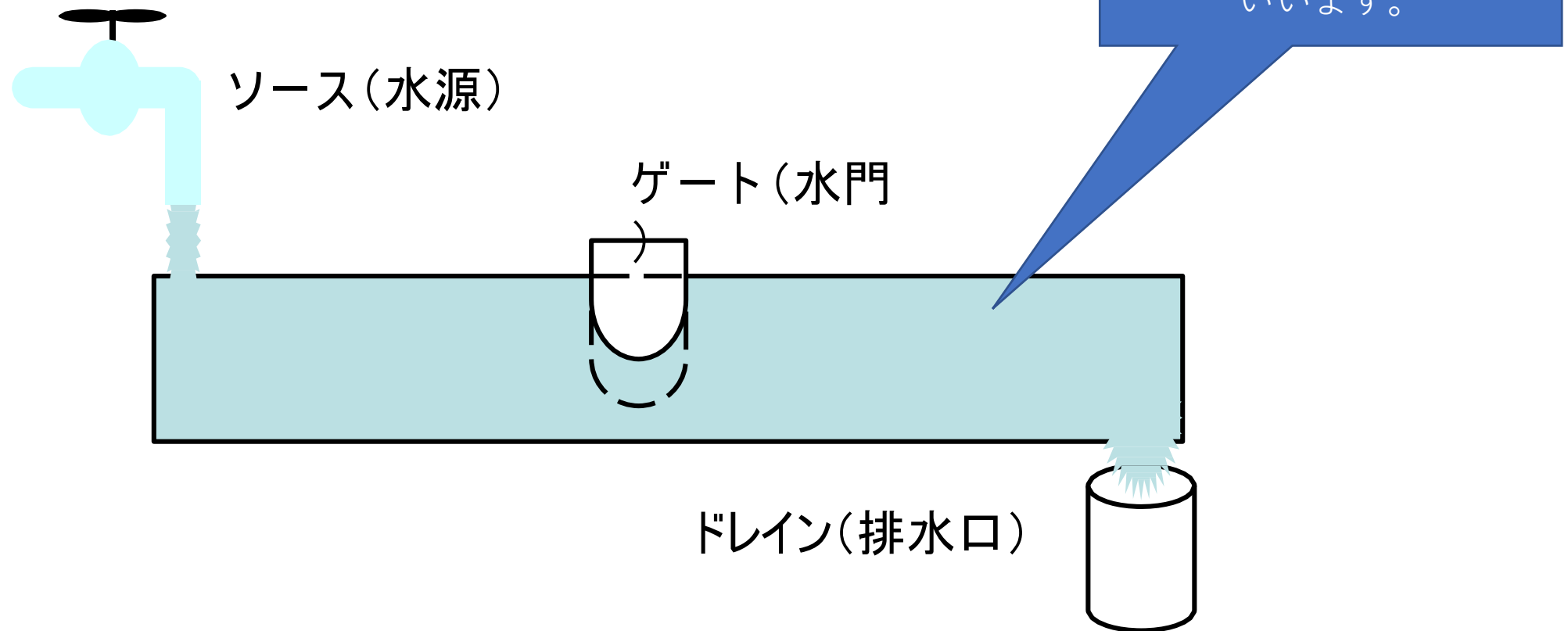
バイポーラトランジスタによる回路と異なり、バイアス回路が要らない。

↓
アイドリング電流が無い分だけ
低消費電力



MOSFETは水路に似ている

MOSFETの動作は、「水の流れ」に
たとえることができる

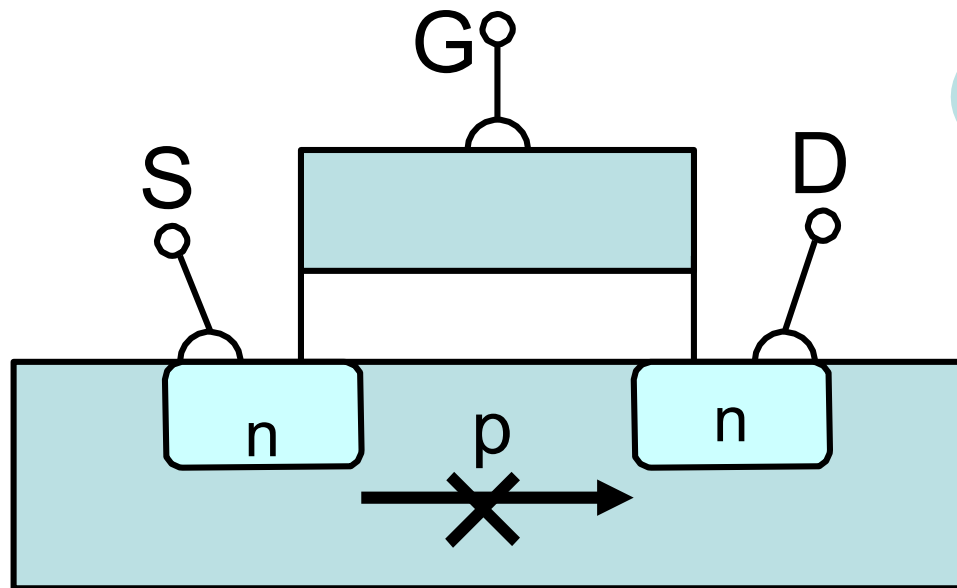


MOSFETの動作(OFF時)

教科書 p.103

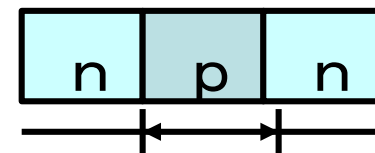


◆ゲートに電圧をかけないと



電流は流れない

動作



これと同じ

MOSFETの動作(ON時)

教科書 p.103

〈 ゲートにプラスの電圧をかけると 〉

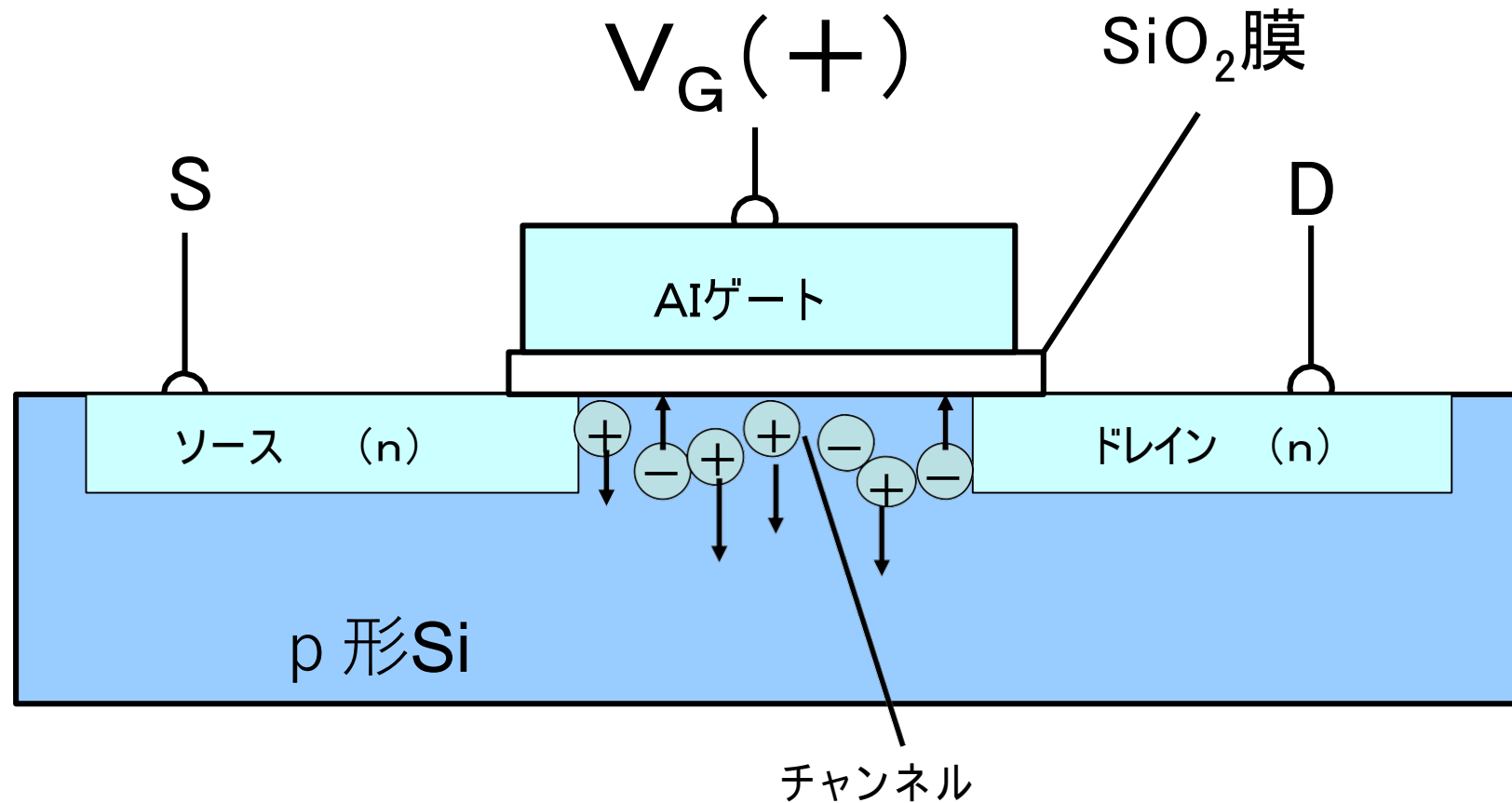


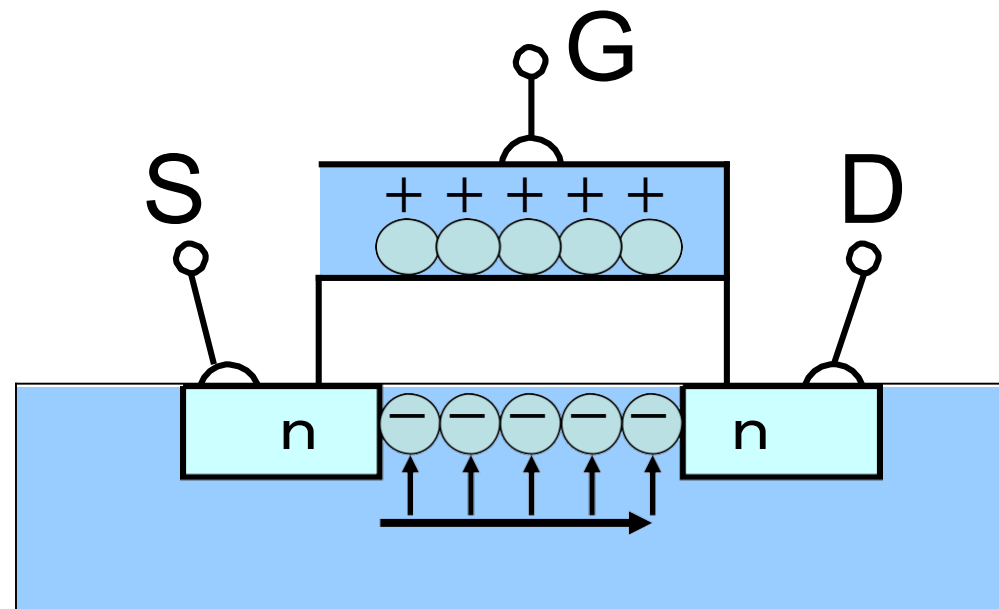
図4・18

電界効果トランジスタ (FET)

教科書 p.101



◆ゲートに \oplus の大電圧をかけると

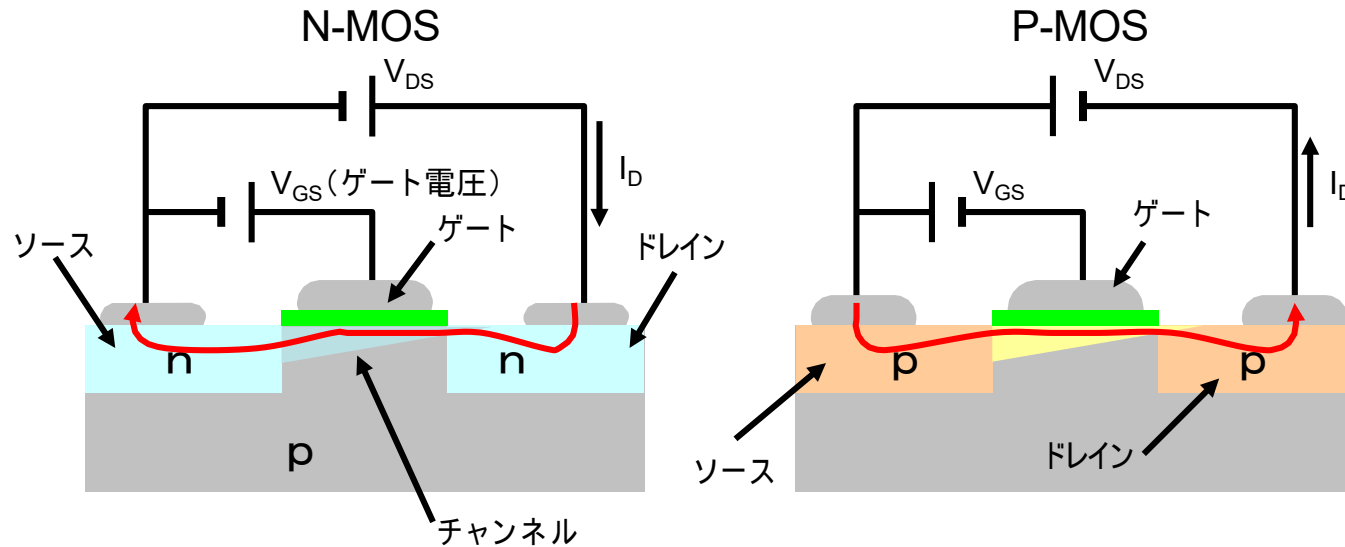


n	n	n
---	---	---

ダイオードがなくなり
導通しているのと同じに
なる

電流が流れる
ようになる

図4・18



MOSFETの利点

- バイポーラトランジスタのような複雑なバイアス回路が要らないため、アイドリング電流が流れないために、消費電力が少なく、発熱も少ない。
- ハイインピーダンス（ゲートの下に絶縁層がある）
- 小信号～大電力制御まで様々な用途の型が開発されている
- その構造から、集積回路に向いている



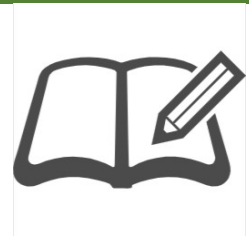
スライド問題3-7

ゲート電極(金属)・絶縁層(SiO_2)・p型シリコンで構成されているnチャネル型MOSFETを考える。

ゲートに大きな電圧が印加されたとする。絶縁層近傍のp型シリコンにおけるエネルギーバンド図を書きなさい。



スライド問題3-7 解答例



反転層が形成される

電子が誘起
される

空乏層

E_c

E_i : 真性半導体の
フェルミ準位

E_{fp} : p型半導体の
フェルミ準位

qV_g

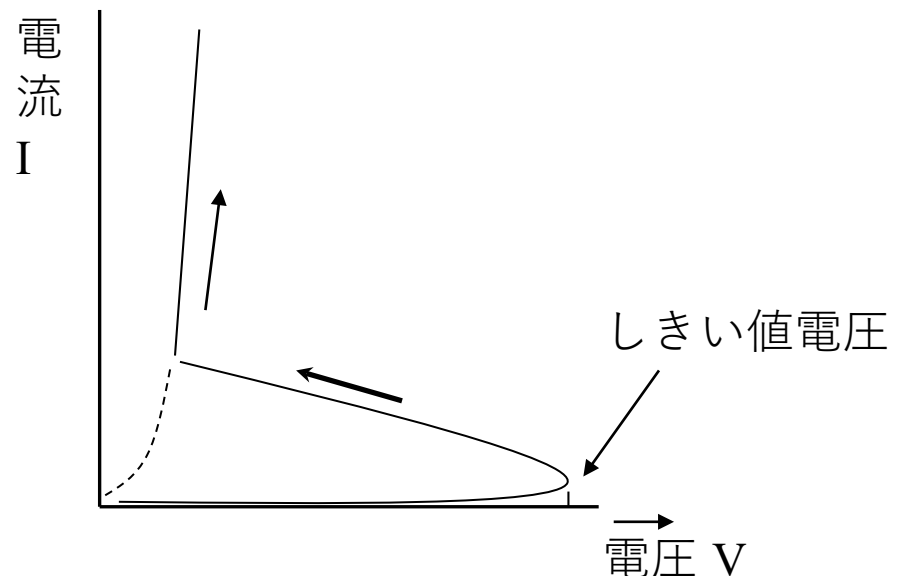
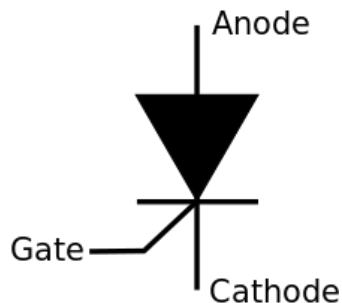
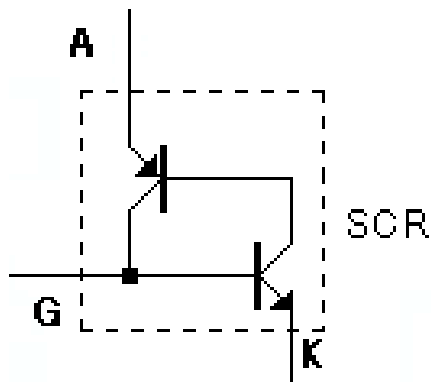
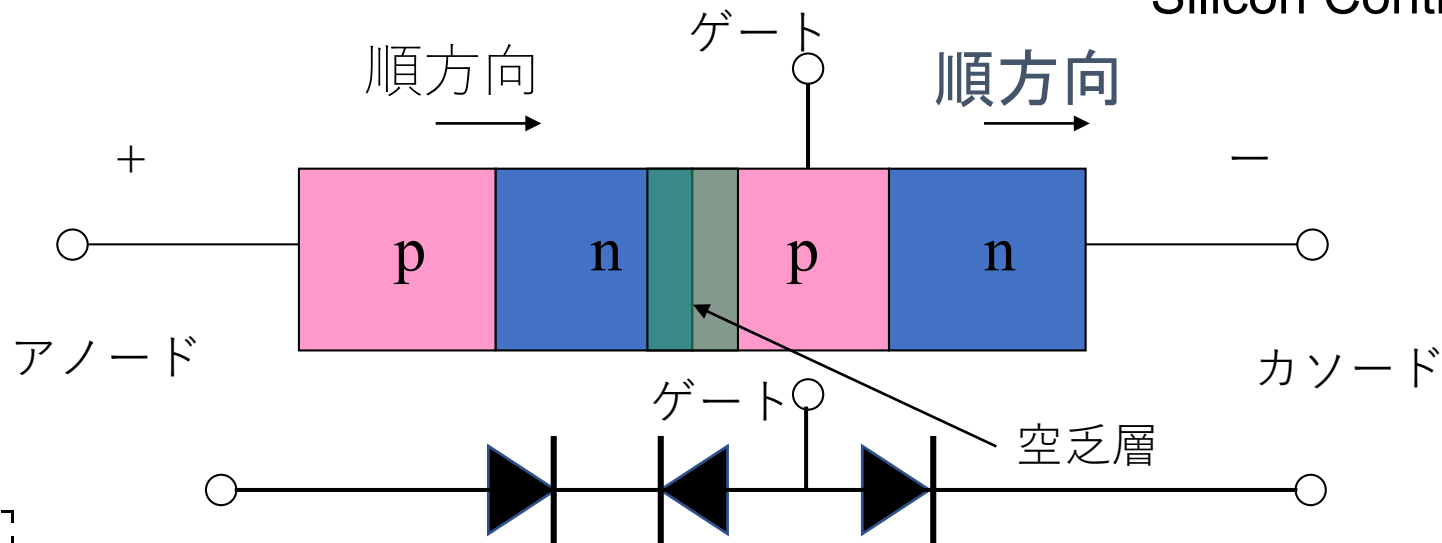
E_{fp} が E_i より高い
⇒ n 型に変わる



サイリスタ (SCR)



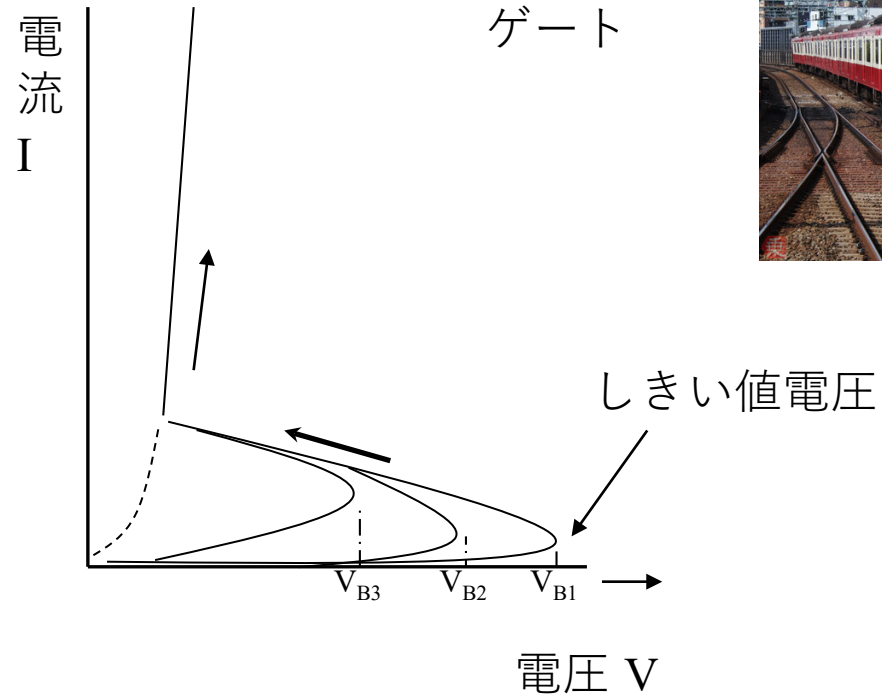
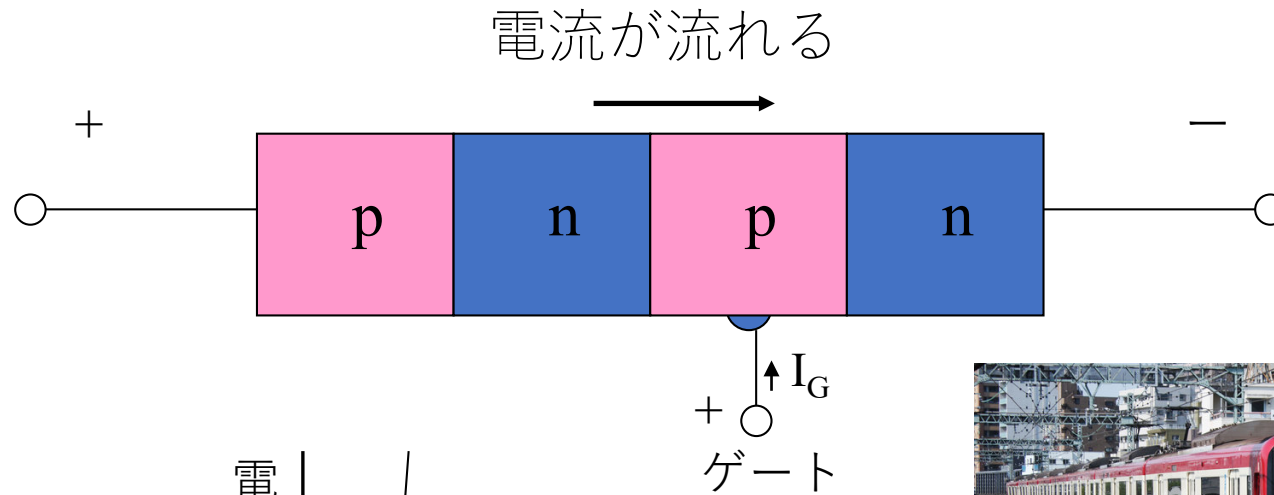
Silicon Controlled Rectifier





サイリスタ (SCR)

教科書 p.101



京急電車
1000系の発
車音(16秒～)
「ドレミファ
インバータ」
とも呼ばれる。



課題レポート (Homework)



以下のレポートを作成し、ILIASを使って提出してください。

MSWordで作成すること。テンプレートはILIASに置いてあります。提出期限は5月24日(日)13時JST.

ファイル名は、必ず学籍番号の数字を含めて「例：20310185-HW03.docx」のような名前にして提出すること。

課題1 (字数は1000字程度。適宜、図も入れて下さい)

(4・19)式[教科書 p.92]を、各自でポアソン方程式(電磁気学で習っていると思います)から出発して導き出して下さい。金属と半導体の界面を $x=0$ として半導体方向が正となるように軸をとり、空乏層の幅を d 、イオン化されたドナーのドーピング密度を N_d 、半導体内の電位を V 、電界を E 、半導体層の誘電率を ϵ とする。

$$x=0 \text{ のとき、 } V=0; \quad x=d \text{ のとき、 } E=0; \quad x=d \text{ のとき、 } V=V_d - V_{bi}$$

などと適切に置きなおすと良い。導出例は探せば出ては来るが、丸写しはいけない。何故なら、Webに載っている参考例の過半数は符号が間違っていたり、置き換えた記号の意味が書かれていないので、丸写しは直ぐに分かります。記号の意味を説明しつつ、途中の導出を詳しく書いて下さい(詳しく書けば加点します)。

課題2 (字数は1000字程度)

スライド#31のグラフは、半導体の導電率の温度依存性を表わしていました。

n型半導体のキャリア密度の温度依存性のグラフを書き、説明しなさい。縦軸は対数、横軸は温度の逆数とすること。曲線の特徴を説明するコメントを詳細に書くと加点します(例:出払い領域、とか。何が出払っているかのコメントも)