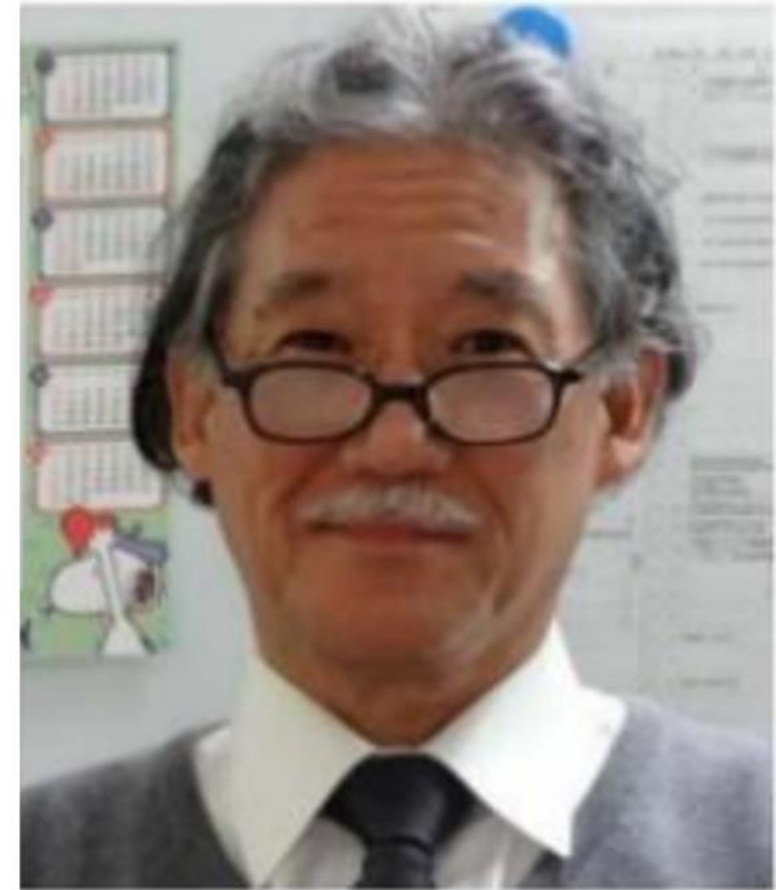


受光表面P+層と裏面のP+層の両面がピン留め接地された、P+PNPP+接合型新型太陽電池の提案

非常に複雑な半導体電子デバイスの物理動作とその構造の説明に挑戦する事になる。できるだけ直観に訴える方法で説明し、数式は極力さけて、基本原理動作を直観的なイメージで理解できる様に工夫をこらして文系の一般社会人の皆様にも親しみを感じる半導体の基礎知識の紹介となればと希望する。

- (1) 金属と絶縁体の違い
- (2) 半導体の基本特性
- (3) single接合型のダイオードの整流特性
- (4) double 接合型バイポーラトランジスタの電流増幅特性
- (5) triple 接合型サイリスタ型の理想的な高速Switch動作特性
- (6) MOS型のトランジスタの電流増幅特性
- (7) CMOS型インバータ回路の省エネ特性
- (8) 超光感度のCMOS型イメージセンサーの特性
- (9) double接合型の新型太陽電池の構造とその動作原理



崇城大学 理事長付き 特任教授
IEEE Life Fellow, Ph.D., 工学博士

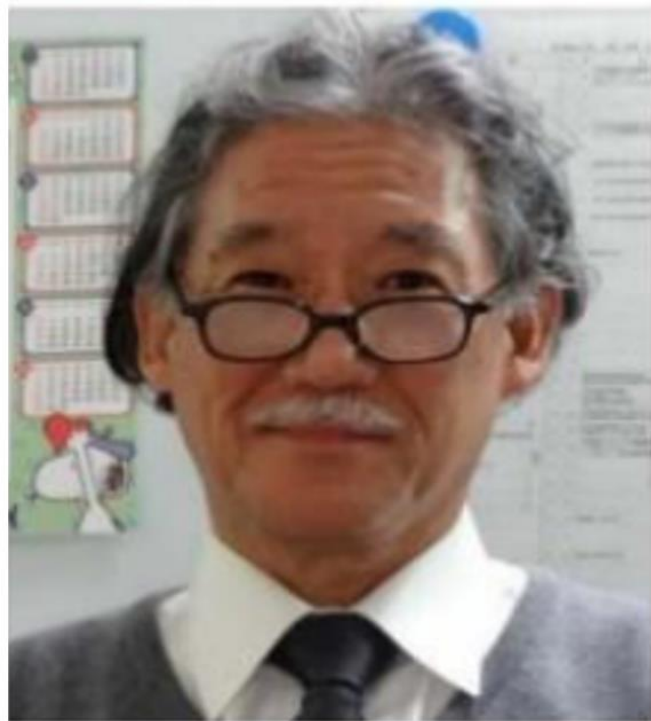
受光表面P+層と裏面のP+層の両面がピン留め接地された、P+PNPP+接合型新型太陽電池の提案

(2) 半導体の基本特性

詳細は青山社出版の人工知能パートナーシステム(AIPS)を支える「デジタル回路の世界」に記載。

<https://www.seizansha.co.jp/ISBN/ISBN978-4-88359-339-2.html>

<https://www.seizansha.co.jp/>



崇城大学 理事長付き 特任教授
IEEE Life Fellow, Ph.D., 工学博士

仕様:B5判上製

475ページ

ISBN978-4-88359-339-2

発行日:2016/03/01



人工知能パートナーシステム(AIPS)を支える
デジタル回路の世界

IEEE Life Fellow, Ph.D.

萩原 良昭 著

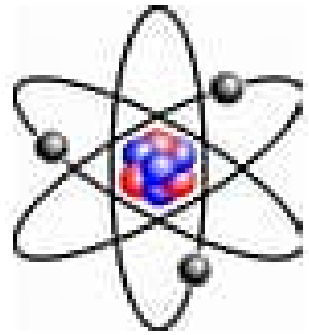
ISBN978-4-88359-339-2 B5判 上製 475頁

定価(本体9,000円+税)

未来の人間社会には人工知能パートナーシステム(AIPS)とも言える人間にやさしい支援システムが出現すると期待している。AIPS搭載の自動走行車や老人介護システム、人間型歩行ロボットやロボット・ハウスなどである。そこで本書では、そのAIPSを支える「デジタル回路の世界」と題し、ハードとソフトの両面で、人とコンピュータをつなぐデジタル技術について紹介している。図や絵をたくさん用意して、基礎からやさしく解説している。

(2)半導体の基本特性

原子とは？



原子核



電子



陽子



中性子

物質を構成する基本的な粒子で化学元素としての特性を失わない最小の微粒子。一個の原子核とそれを取りまく何個かの電子とから構成される。大きさは半径 10^{-10} m 程度。原子の化学的性質は主としてそのもつ電子の個数で定まる。

物質には質量がある。重力（万有引力）の法則に従う。
電子と陽子には質量の他にさらに電荷があり、クーロンの法則に従う。

原子

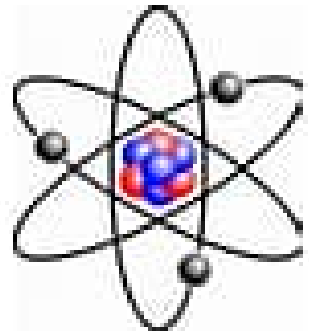
物質を作っている最小の粒子



(2)半導体の基本特性

電子とは？

素粒子の一。記号 e^- 負の電気素量をもち、スピン $1/2$ 、質量 9.1×10^{-31} kg で安定。レプトンに属する。原子核のまわりに分布して原子を構成。物質内の電子の状態は物質の性質を決める重要な要素であり、またすべての電磁氣的現象の根源である。



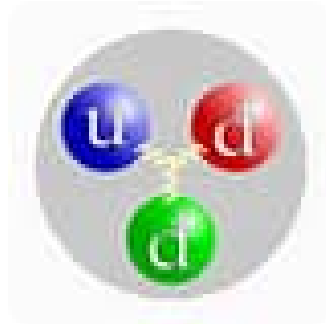
原子核



電子



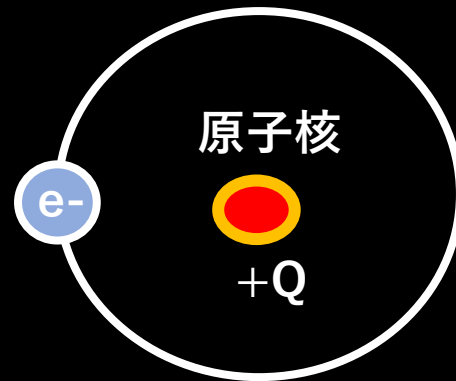
陽子



中性子

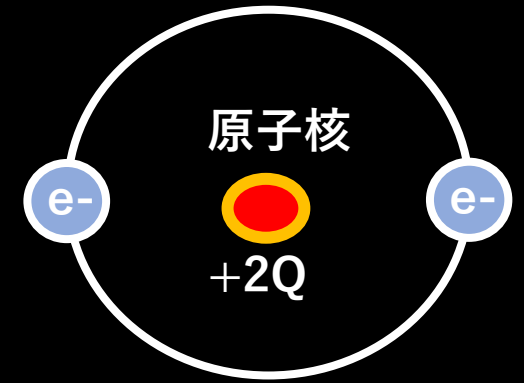
物質には質量がある。重力（万有引力）の法則に従う。
電子と陽子には質量の他にさらに電荷があり、クーロンの法則に従う。

水素原子



原子番号 1

ヘリウム原子

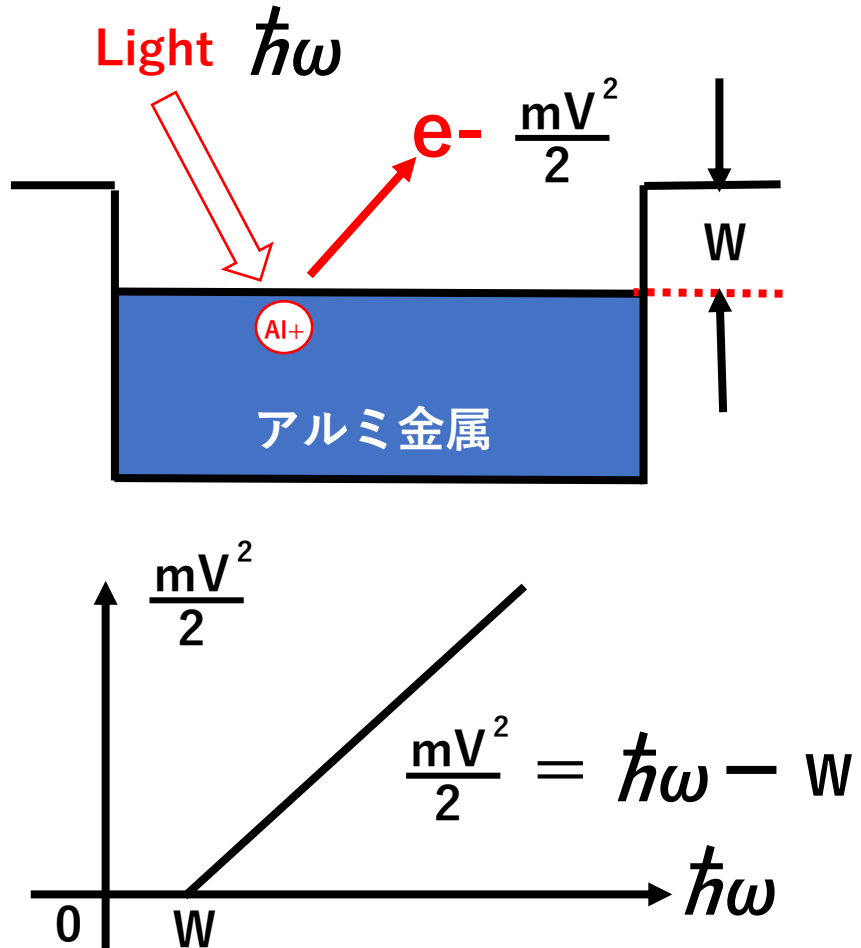


原子番号 2

受光表面P+層と裏面のP+層の両面がピン留め接地された、P+PNPP+接合型新型太陽電池の提案

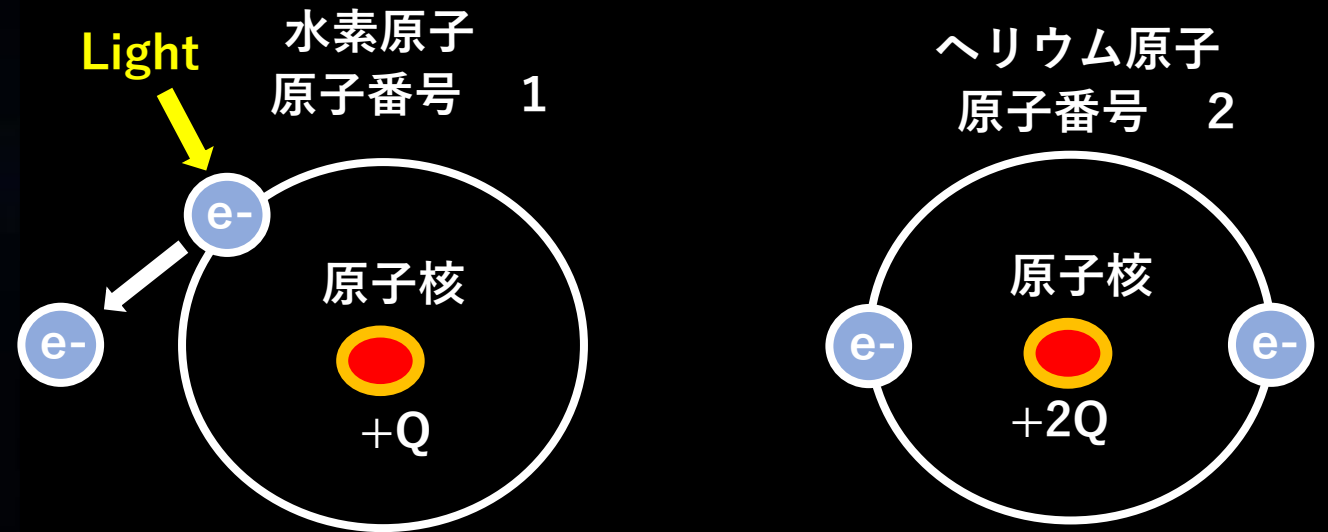
(2)半導体の基本特性

金属とは？



単体のうち、金属光沢をもち、熱や電気をよく伝え、展性や延性に富む物質の総称。比重が四ないし五以下のものを軽金属、それより大きなものを重金属という。金・銀・白金族元素、あるいはこれらにイオン化傾向が水素より小さい銅・水銀なども加えて貴金属といい、イオン化傾向が大きい金属を卑金属という。さまざまな異種金属間の固溶体や金属間化合物を合金といい、広義にはこれも金属に含める。

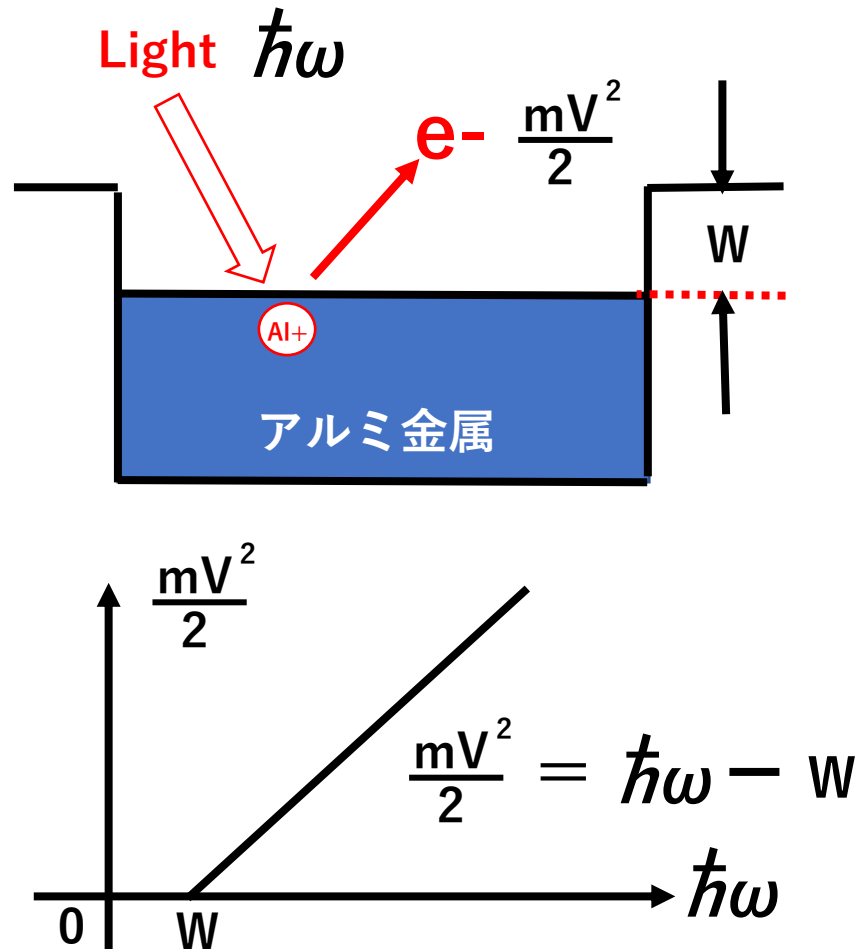
物質には質量がある。重力（万有引力）の法則に従う。
電子と陽子には質量の他にさらに電荷があり、クーロンの法則に従う。



$W =$ 引力脱出エネルギー

(2)半導体の基本特性

金属とは？



単体のうち、金属光沢をもち、熱や電気をよく伝え、展性や延性に富む物質の総称。比重が四ないし五以下のものを軽金属、それより大きなものを重金属という。金・銀・白金族元素、あるいはこれらにイオン化傾向が水素より小さい銅・水銀なども加えて貴金属といい、イオン化傾向が大きい金属を卑金属という。さまざまな異種金属間の固溶体や金属間化合物を合金といい、広義にはこれも金属に含める。

物質には質量がある。重力（万有引力）の法則に従う。
電子と陽子には質量の他にさらに電荷があり、クーロンの法則に従う。

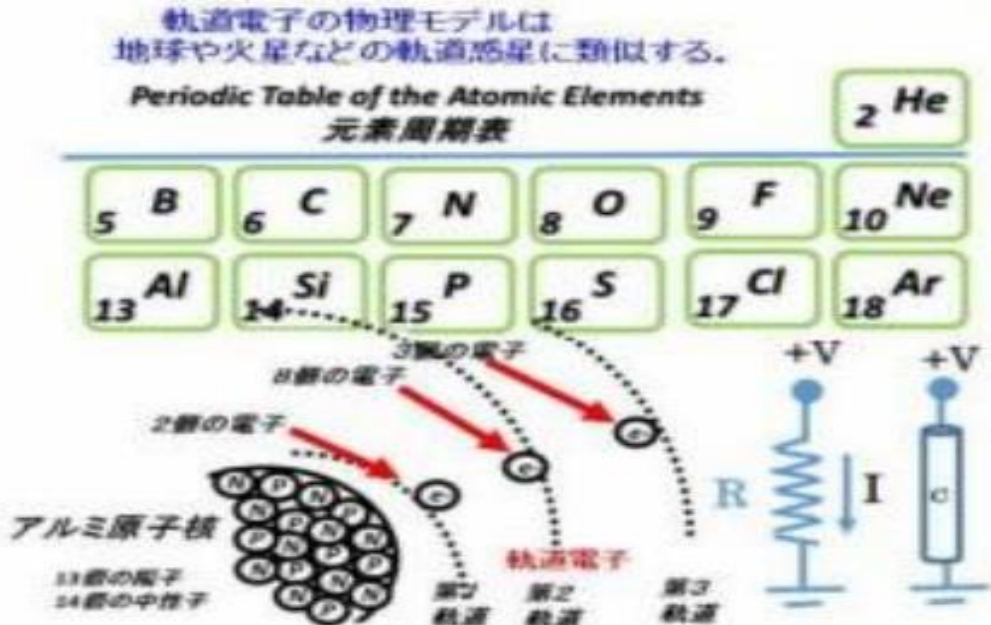
地球の引力圏から無重力宇宙空間へ脱出するロケット



W = 引力脱出エネルギー

受光表面P+層と裏面のP+層の両面がピン留め接地された、P+PNPP+接合型新型太陽電池の提案

(2)半導体の基本特性

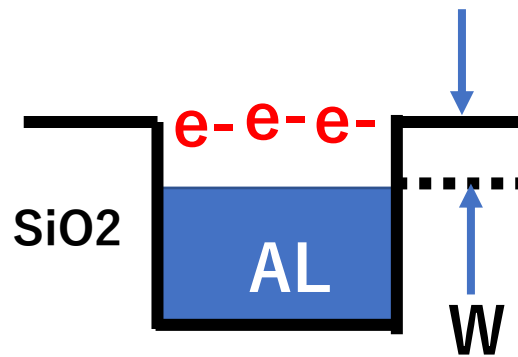


2個、8個、8個の軌道電子

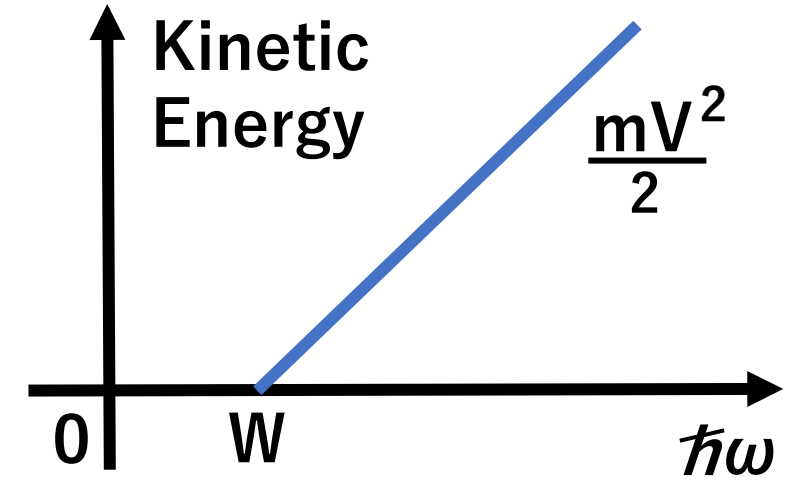
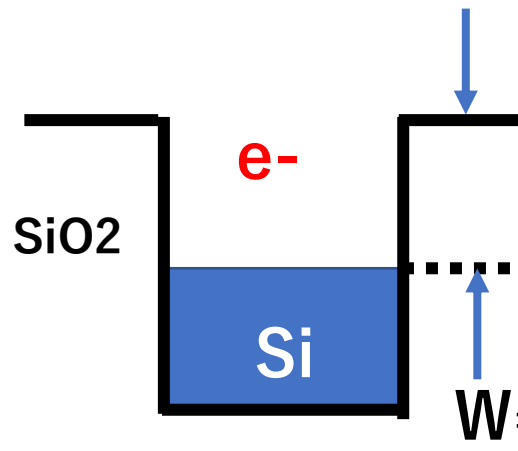
●自由電子は当然空間を自由に浮遊し移動する。しかし、結晶体の中でも、結晶体の原子核の引力圏の外では自由に電子は浮遊することができる。

●シリコン結晶体では、電子を1つ失ったシリコンイオン(Si+)は隣接する中性のシリコン原子から電子を1つ盗み、中性にもどる。その電子を盗まれた、シリコンイオン(Si+)は、また別の中性のシリコン原子から電子を盗む。ホールはこうして移動する。

アルミ金属内では自由電子が多くて抵抗値Rが小さい。



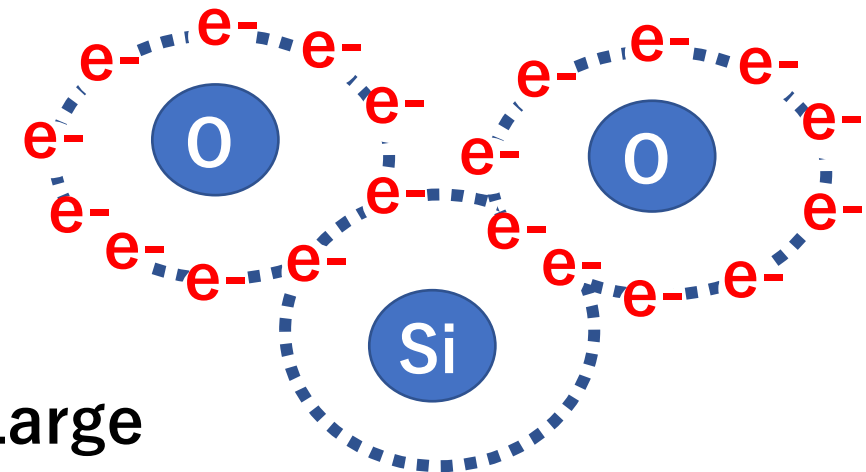
シリコン結晶体の中では自由電子が大変少ない。抵抗値Rが大きい。



絶縁体(SiO2)となると自由電子はゼロとなる。抵抗値Rは無限大となる。Silicon原子の4つの軌道電子は2つの酸素原子に共有結合される。

8個の軌道電子(O)

8個の軌道電子(O)

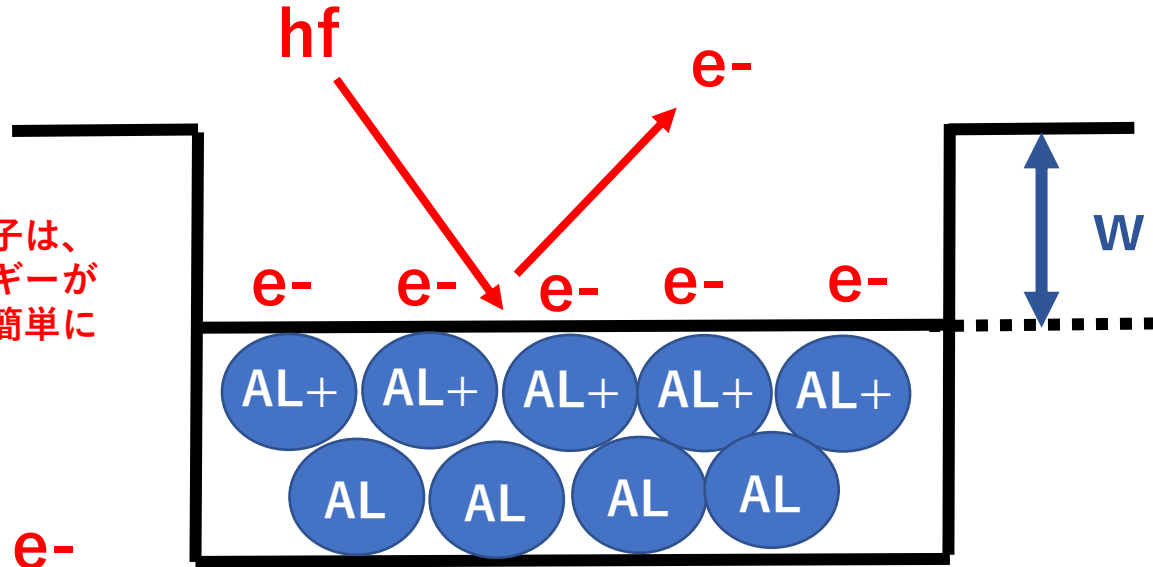
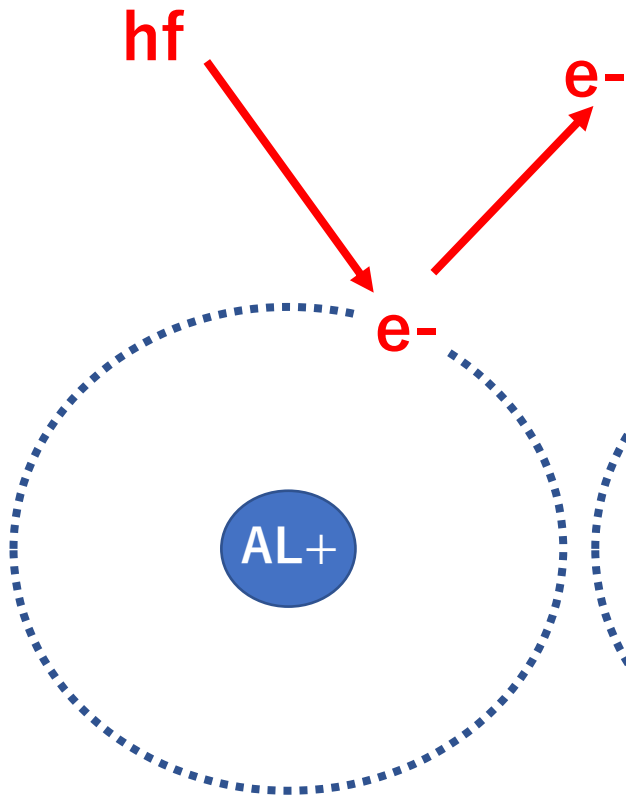


4個の軌道電子(Si)

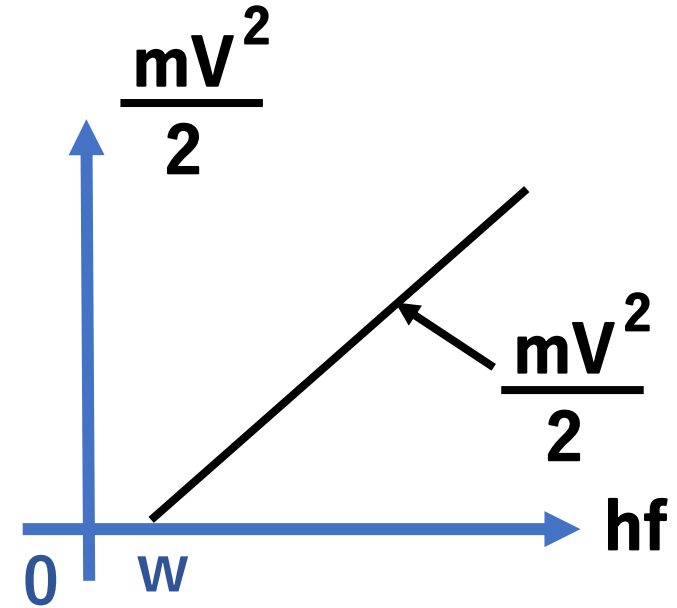
(2)半導体の基本特性

アルミ原子の物理モデル

アルミ原子の一番外側にある軌道電子は、原子核による引力からの脱出エネルギーが一番小さいので光エネルギーにより簡単に無重力自由空間に脱出が容易である。



アルミ金属の中の電子の物理モデルは器に入った水の粒子の動きに似ている。

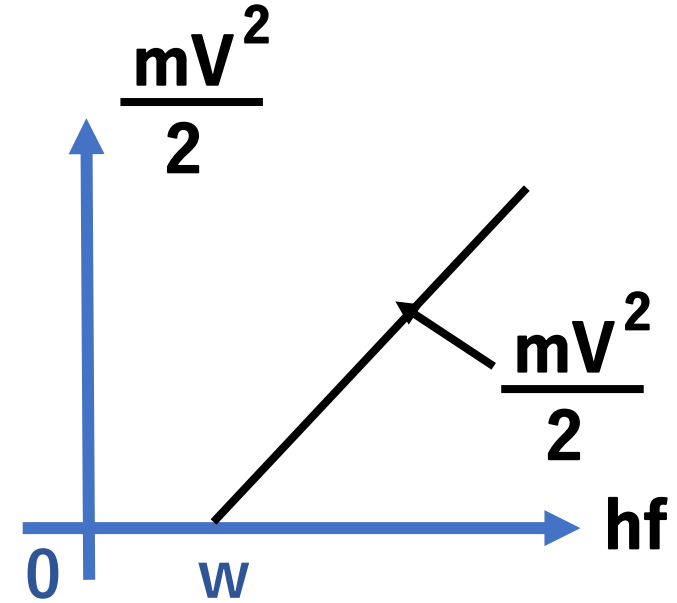
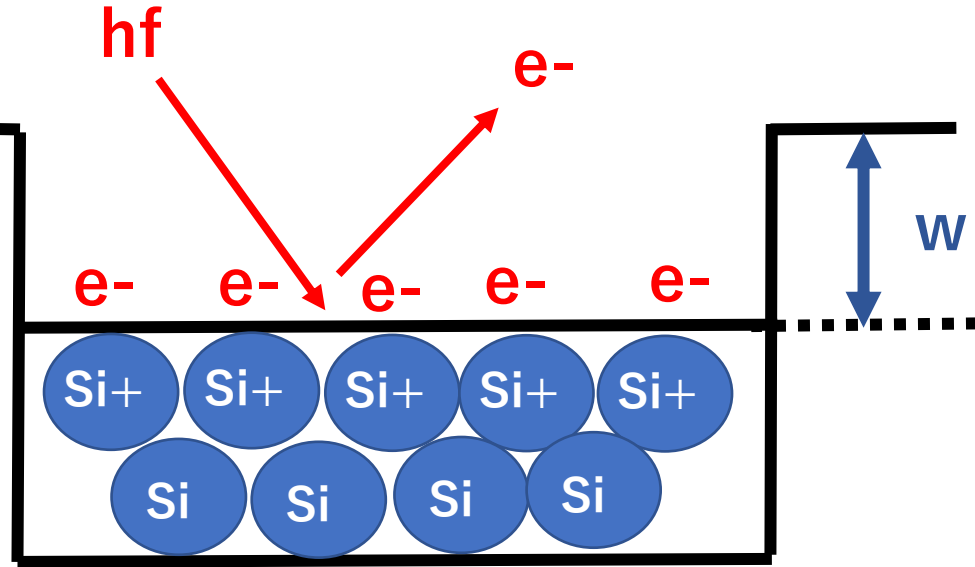


$W \sim 0.00 \text{ eV} ?$

(2)半導体の基本特性

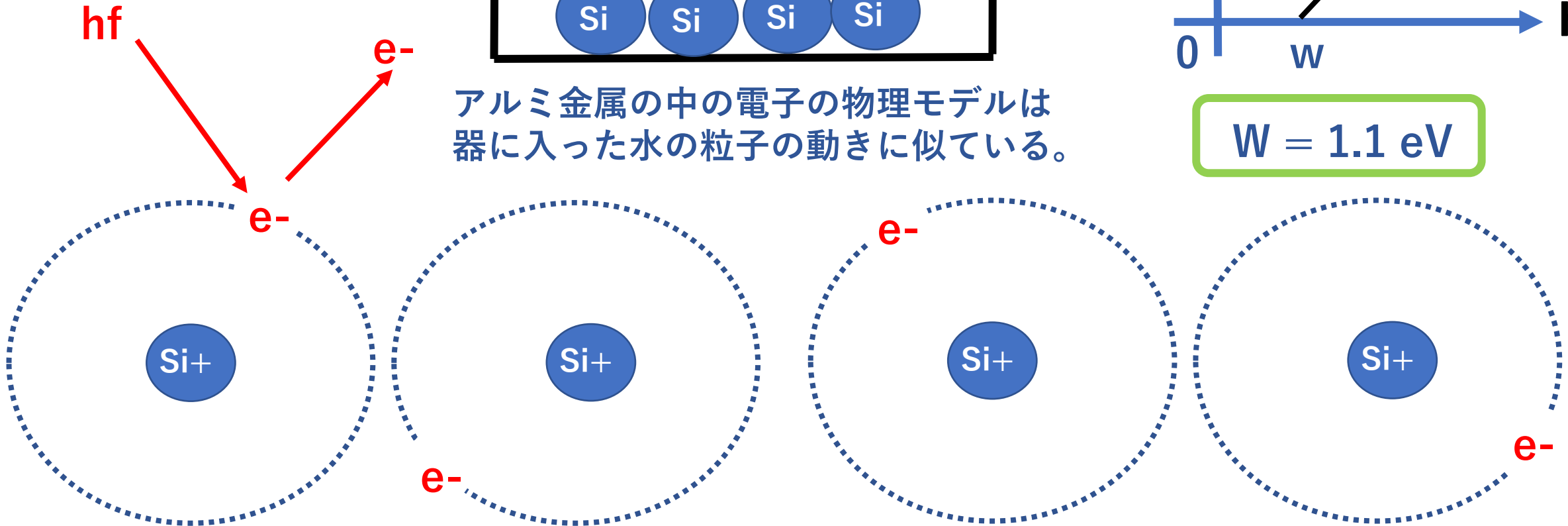
シリコン原子の物理モデル

シリコン原子の一番外側にある軌道電子は、原子核による引力からの脱出エネルギーが一番小さいので光エネルギーにより簡単に無重力自由空間に脱出が容易である。



アルミ金属の中の電子の物理モデルは器に入った水の粒子の動きに似ている。

$W = 1.1 \text{ eV}$



軌道電子の物理モデルは地球や火星などの軌道惑星に類似する。

Periodic Table of the Atomic Elements
元素周期表

2 He

5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar



●原子構造(原子核と電子)と太陽系(太陽と惑星)の類似

アルミ原子(中性)₁₃ = アルミイオン (Al⁺)₁₂ + 自由電子 (e⁻)

シリコン原子(中性)₁₄ = シリコンイオン (Si⁺)₁₃ + 自由電子 (e⁻)

りん原子(中性)₁₅ = りんイオン (P⁺)₁₄ + 自由電子 (e⁻)

ボロンの原子(中性)₅ + 自由電子 (e⁻) = ボロンイオン (B⁻)₆

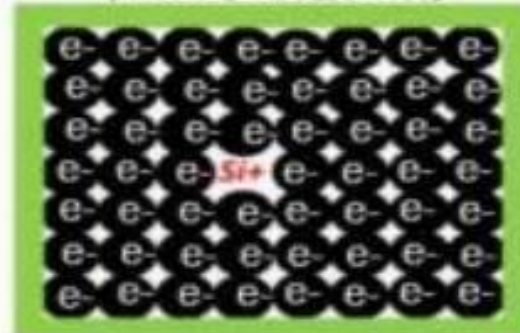
●自由電子は当然空間を自由に浮遊し移動する。しかし、結晶体の中でも、結晶体の原子核の引力圏の外では自由に電子は浮遊することができる。

●シリコン結晶体では、電子を1つ失ったシリコンイオン(Si⁺) は隣接する中性のシリコン原子から電子を1つ盗み、中性にもどる。その電子を盗まれた、シリコンイオン(Si⁺) は、また別の中性のシリコン原子から電子を盗む。ホールはこうして移動する。

P型半導体の物理モデル

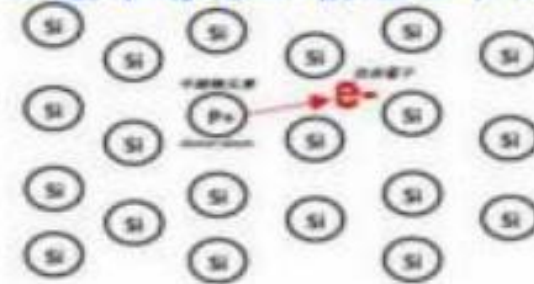


ホールがずっしり移った跡



Holeが主役

N型半導体の物理モデル



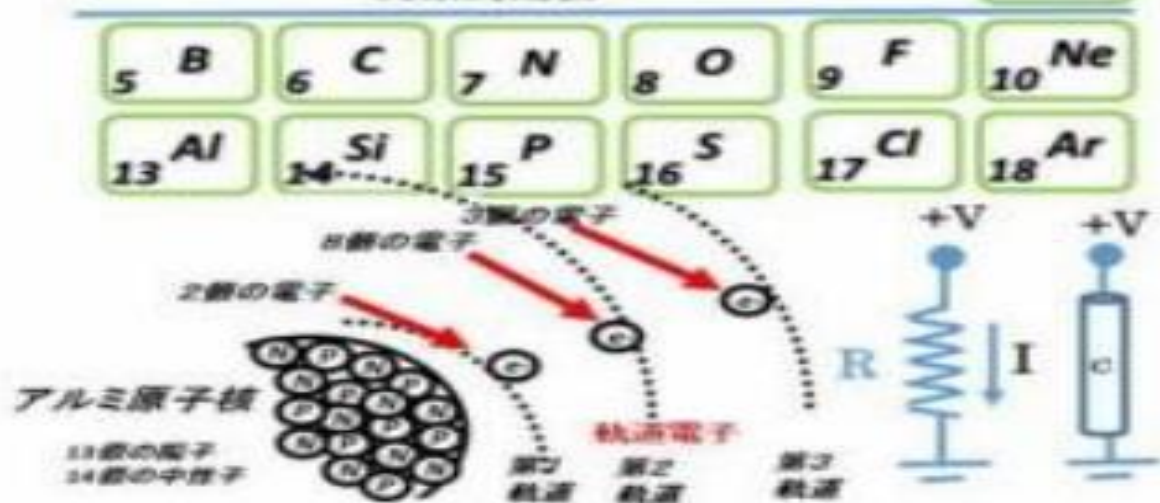
ぎっぎの跡



電子が主役

軌道電子の物理モデルは地球や火星などの軌道惑星に類似する。

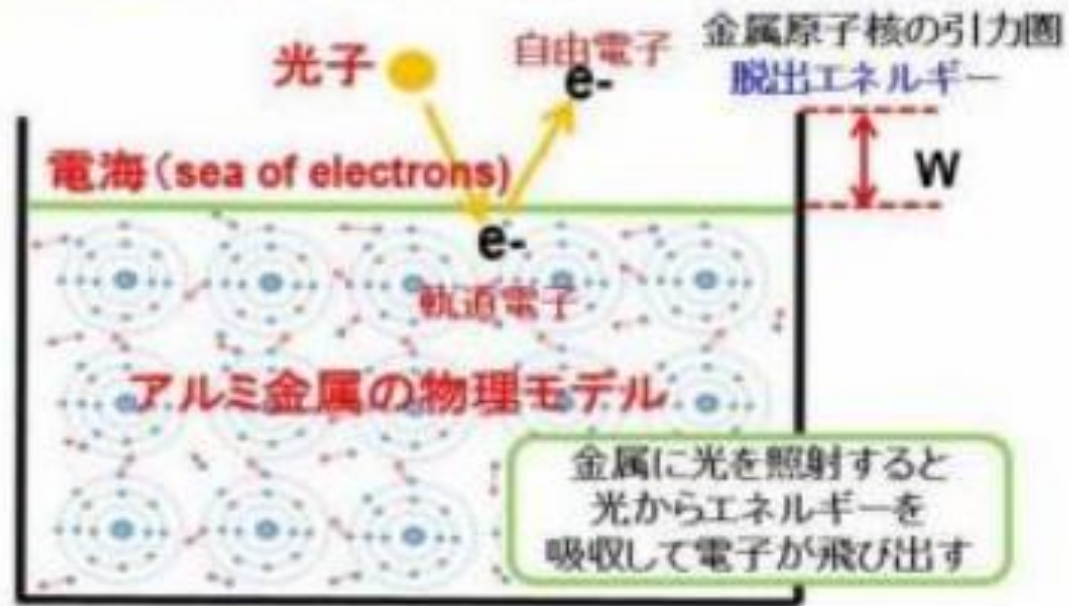
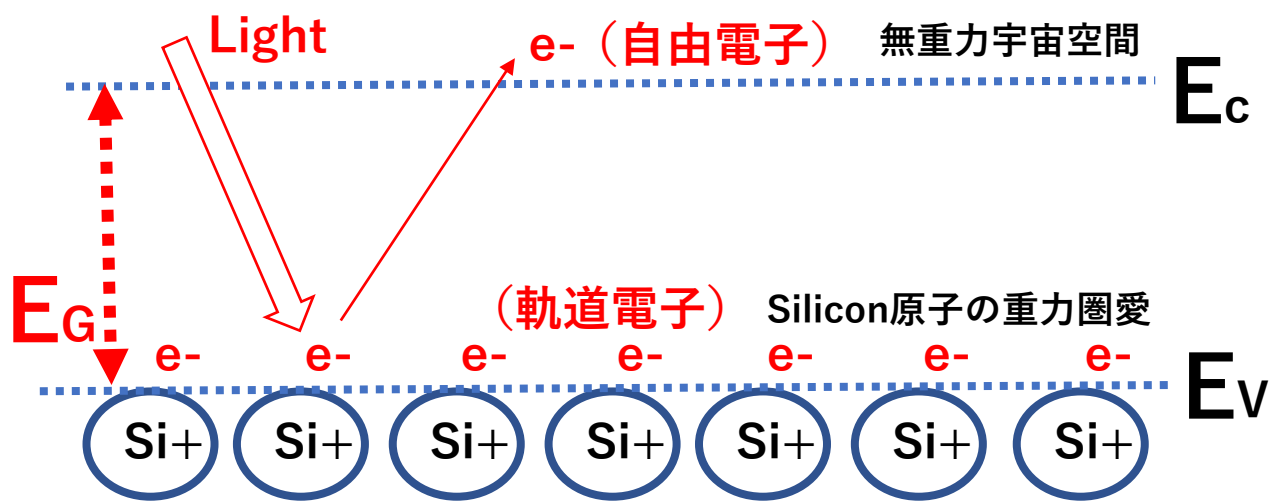
Periodic Table of the Atomic Elements
元素周期表



(脱出エネルギー) = 半導体のEnergy Gap
For Silicon, $E_g = 1.10 \text{ eV}$ and $\lambda = 1.12 \mu\text{m}$

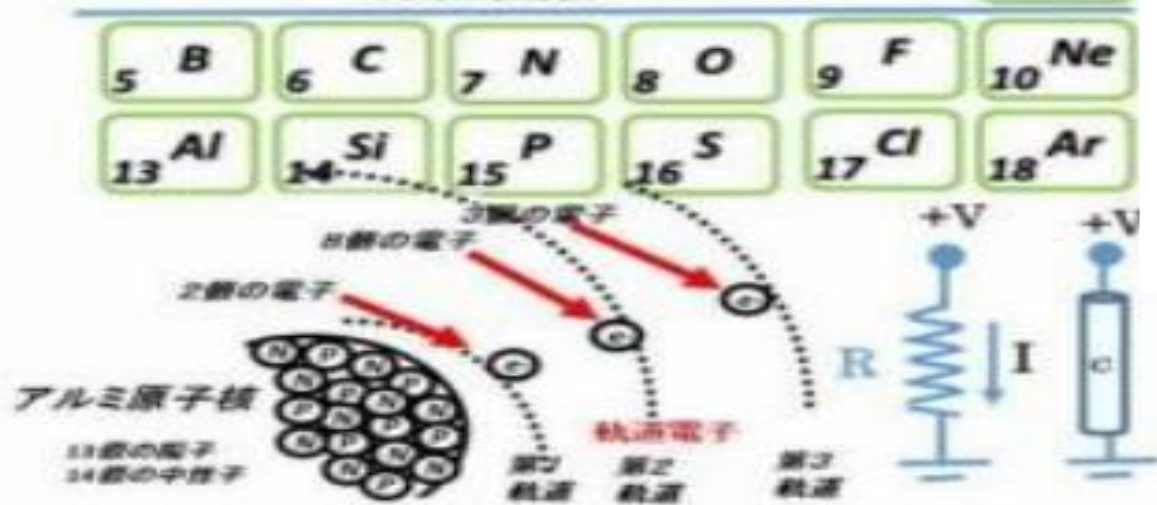
●金属の物理モデル(器の中に入った水モデル)

Silicon 半導体の Band 理論のイメージ図

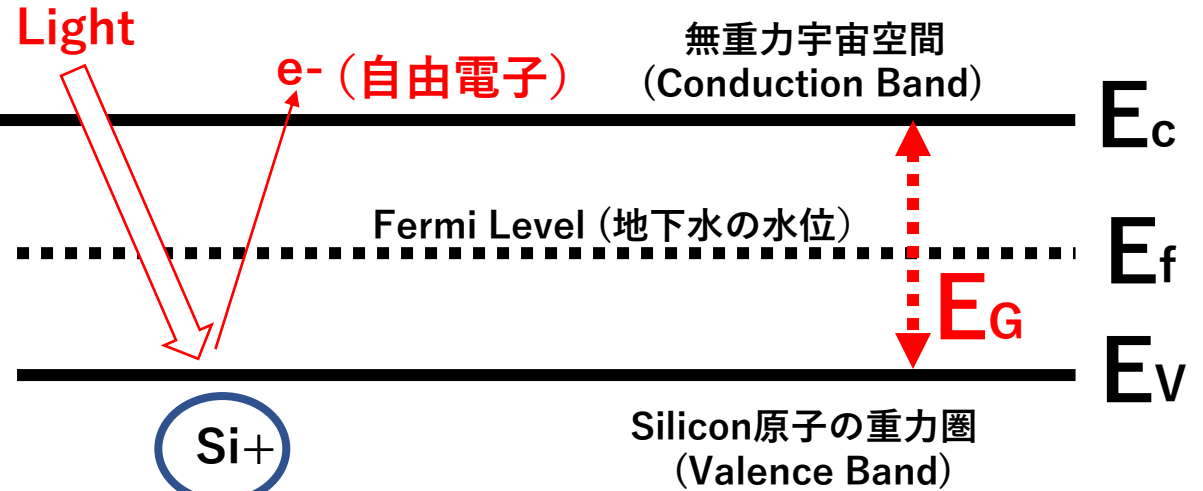


軌道電子の物理モデルは地球や火星などの軌道惑星に類似する。

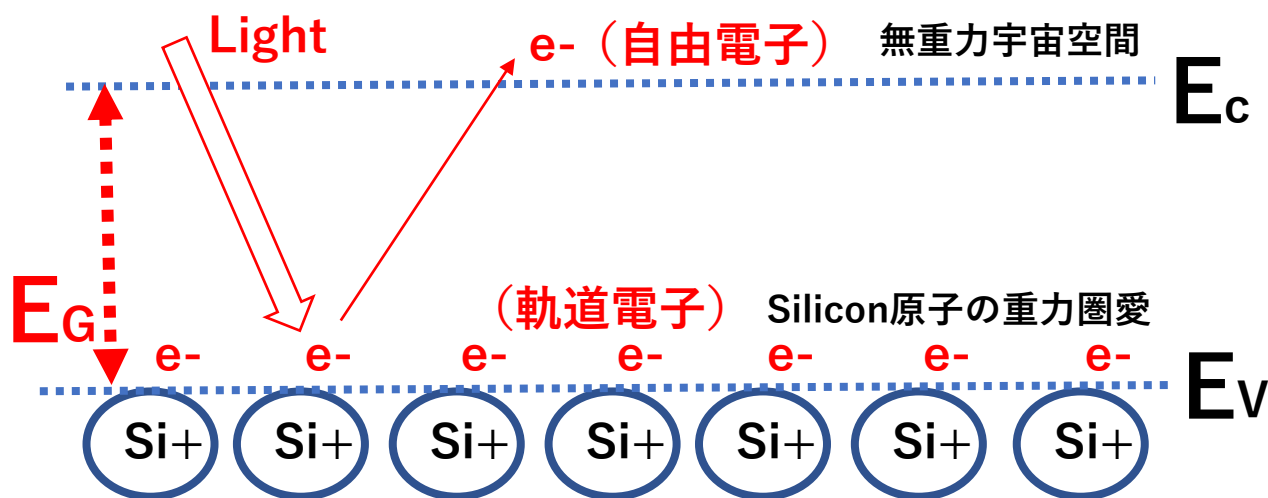
Periodic Table of the Atomic Elements
元素周期表



光のエネルギーで光電子 (e^-) とホール (Si^+) が発生する。



Silicon 半導体の Band 理論のイメージ図



Total Charge Density in Silicon Crystal

$$\rho(x) = P(x) - N(x) + D(X)$$

Hole Density

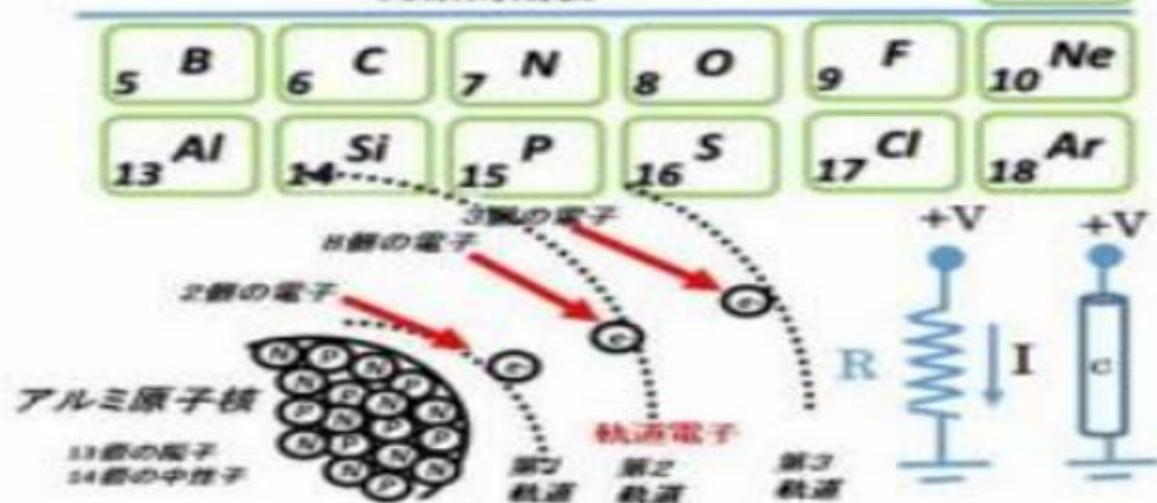
$$P(x) = N_v \exp\left(\frac{E_f - E_v(x)}{kT}\right)$$

Electron Density

$$N(x) = N_c \exp\left(\frac{E_c(x) - E_f}{kT}\right)$$

軌道電子の物理モデルは地球や火星などの軌道惑星に類似する。

Periodic Table of the Atomic Elements
元素周期表



Silicon 原子のBAND GAP 理論

$$E_G = E_v(x) - E_c(v) = 1.1 \text{ eV}$$

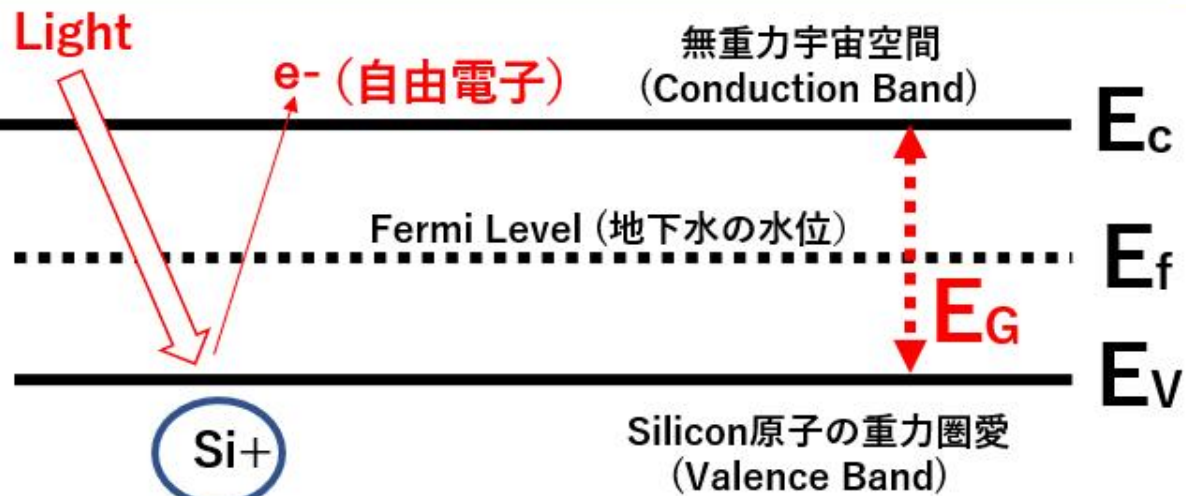
$$P(x)N(x) = N_v N_c \exp\left(-\frac{E_G}{kT}\right)$$

ガウスの法則

ポアソンの方程式

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_{si}} \quad \frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_{si}}$$

光のエネルギーで光電子 (e-) とホール (Si+) が発生する。



Total Charge Density in Silicon Crystal

$$\rho(x) = P(x) - N(x) + D(x)$$

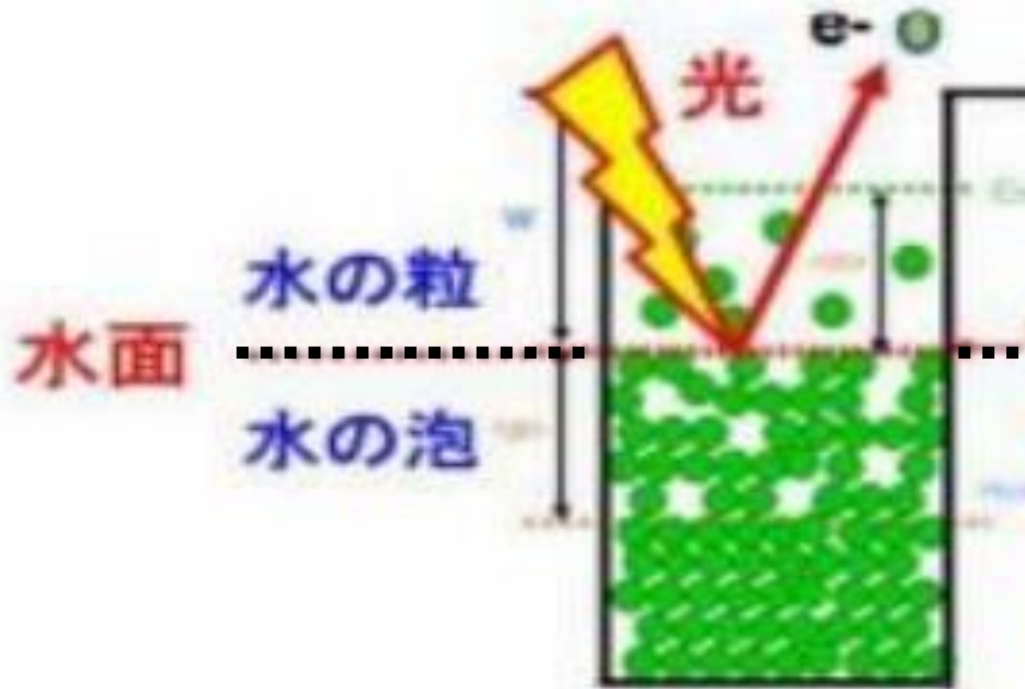
Hole Density

$$P(x) = N_v \exp\left(\frac{E_f - E_v(x)}{kT}\right)$$

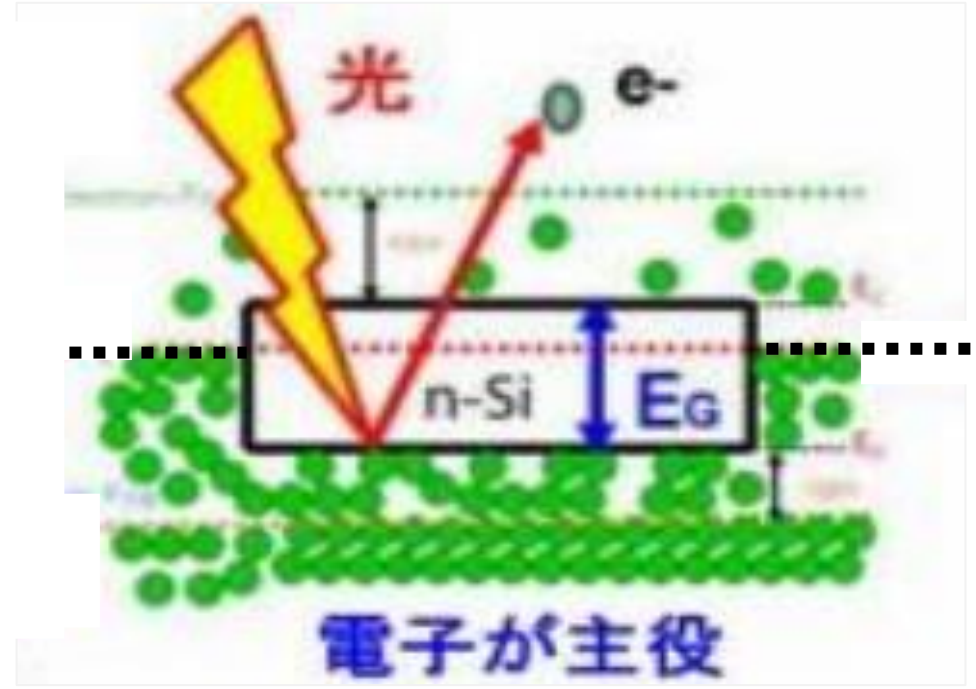
Electron Density

$$N(x) = N_c \exp\left(\frac{E_c(x) - E_f}{kT}\right)$$

(2)半導体の基本特性



金属の物理モデル
(水が入った器)



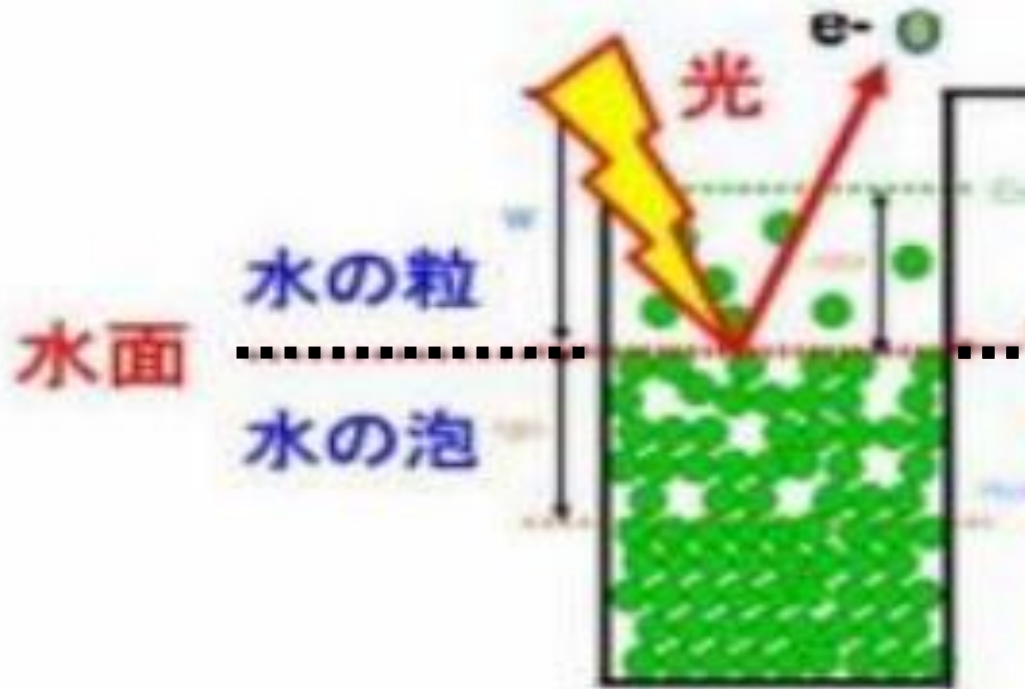
N型半導体の物理モデル
(満タンの石油タンカー)

$$E = \hbar \omega = h f = h c / \lambda$$
$$E \text{ (eV)} = 1.24 / \lambda \text{ (\mu m)}$$

For Silicon, $E_g = 1.10 \text{ eV}$ and $\lambda = 1.12 \text{ \mu m}$

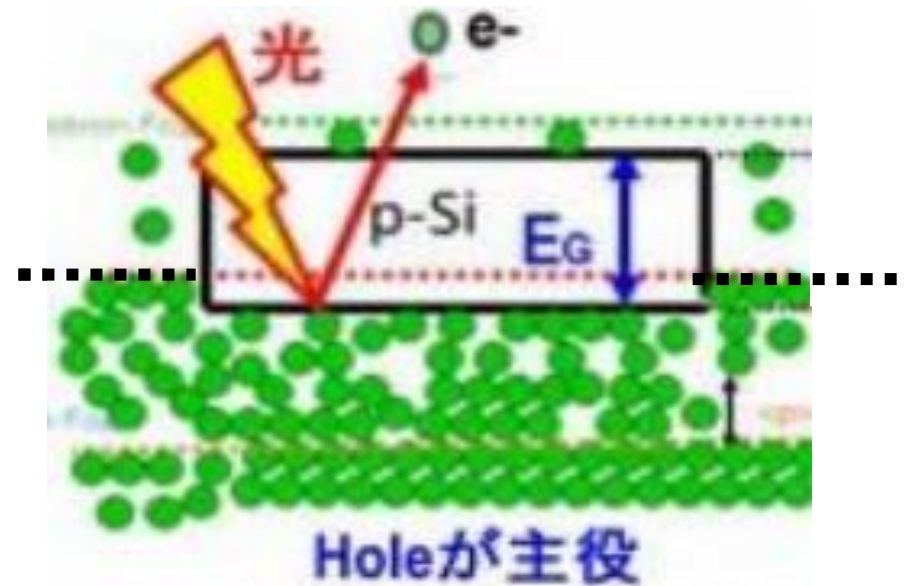
光のエネルギー (E) は周波数 (f) に比例し
 $c = f\lambda$ より、光の波長 (λ) に反比例する。

(2)半導体の基本特性



金属の物理モデル
(水が入った器)

$$E = \hbar \omega = h f = h c / \lambda$$
$$E \text{ (eV)} = 1.24 / \lambda \text{ (\mu m)}$$

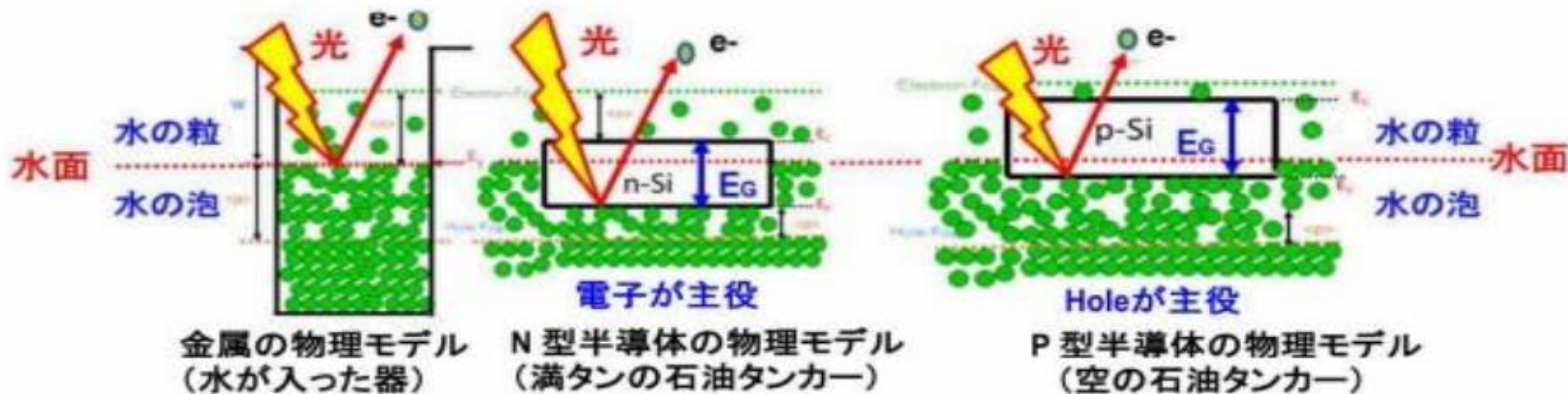


P型半導体の物理モデル
(空の石油タンカー)

For Silicon, $E_g = 1.10 \text{ eV}$ and $\lambda = 1.12 \text{ }\mu\text{m}$

光のエネルギー (E) は周波数 (f) に比例し
 $c = f\lambda$ より、光の波長 (λ) に反比例する。

- 金属の物理モデルは、器に入った水にたとえる事が可能。
- N型半導体の物理モデルは満タンの石油タンカー船に、
- P型半導体の物理モデルは空の石油タンカー船に似ている。



$$E = \hbar \omega = h f = h c / \lambda$$

$$E \text{ (eV)} = 1.24 / \lambda \text{ (\mu m)}$$

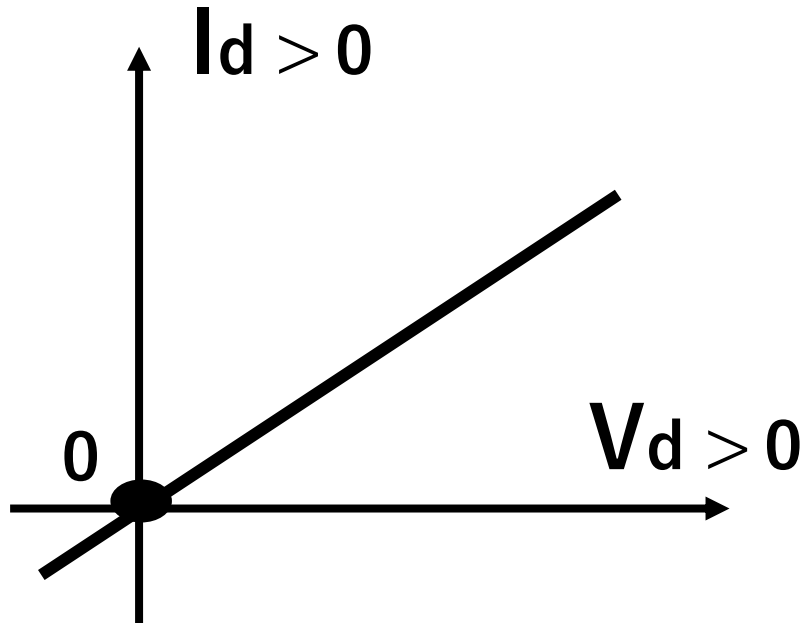
For Silicon, $E_g = 1.10 \text{ eV}$ and $\lambda = 1.12 \text{ \mu m}$

光のエネルギー (E) は周波数 (f) に比例し
 $c = f \lambda$ より、光の波長 (λ) に反比例する。

(2)半導体の基本特性

半導体とは？

$$I_d = \frac{V_d}{R} \quad (\text{Ohmの法則})$$



導体・半導体・絶縁体

金属などの電気を通すものを導体、ビニールなどの電気を通さないものを絶縁体と呼び、その中間の性質を持つものを半導体と呼びます。導体の中で抵抗率の高いものが抵抗体の材料となります。

低い 電気を通しやすい		抵抗率		高い 電気を通さない	
導体		半導体		絶縁体	
銀 銅 金 アルミ	タングステン	ニッケル クロム 合金	ゲルマニウム シリコン	ガラス	ゴム プラスチック

●P-type 半導体とは？

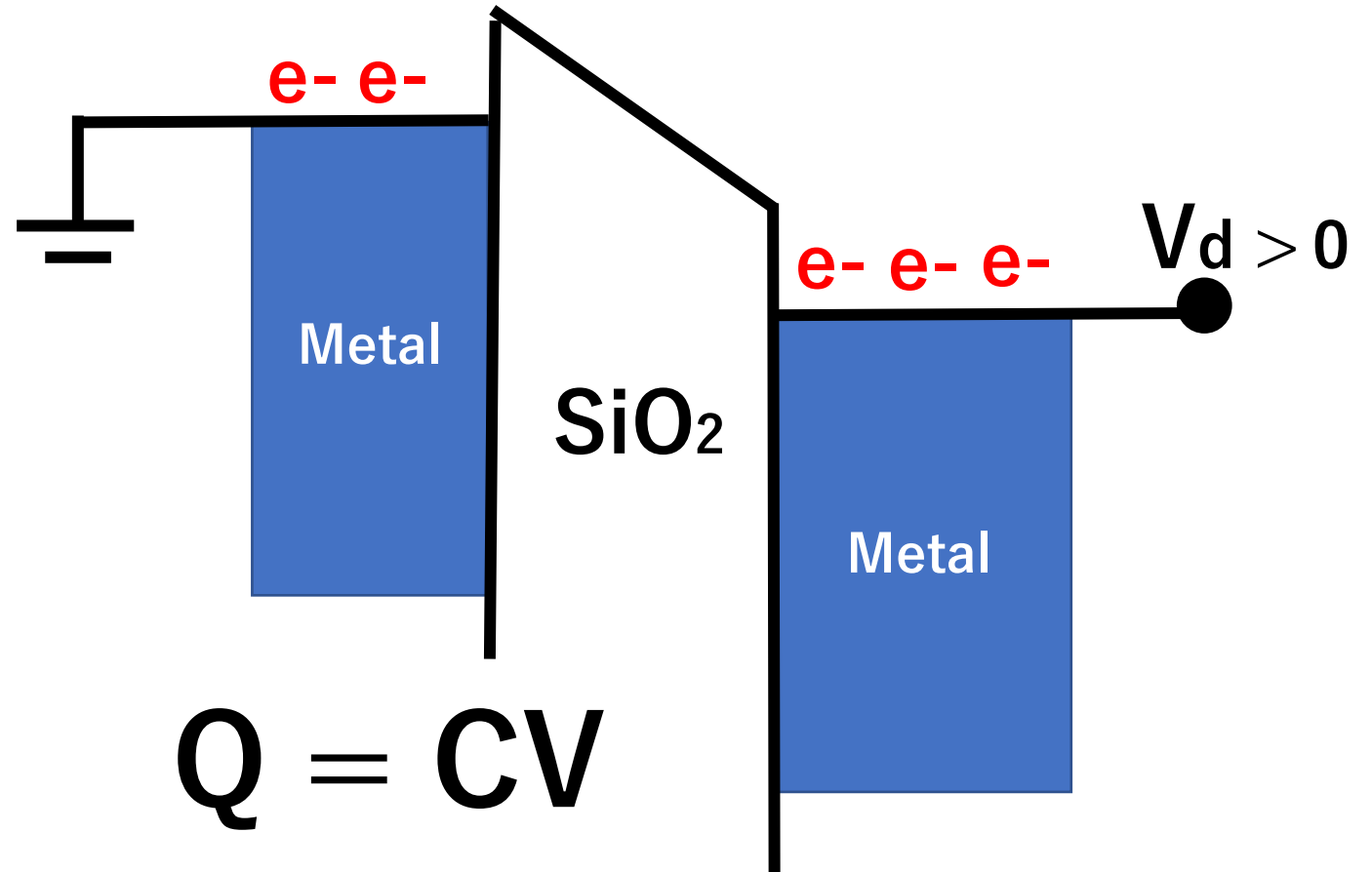
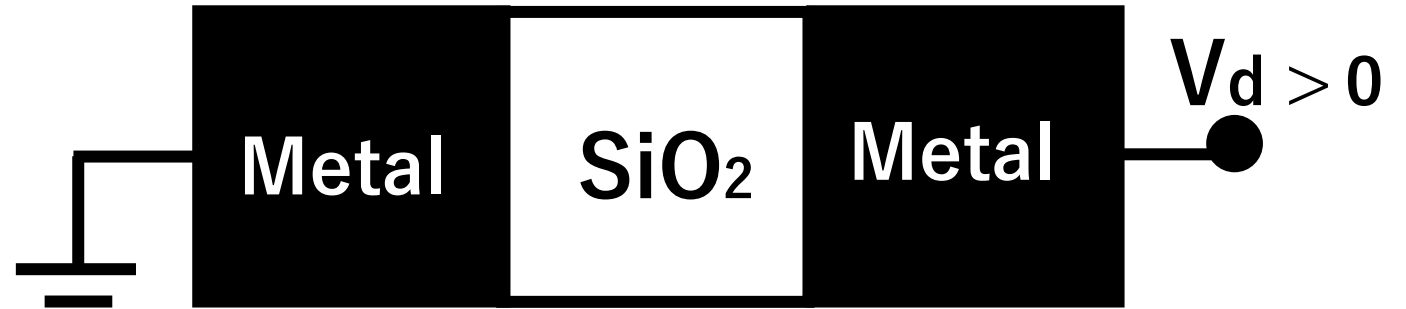
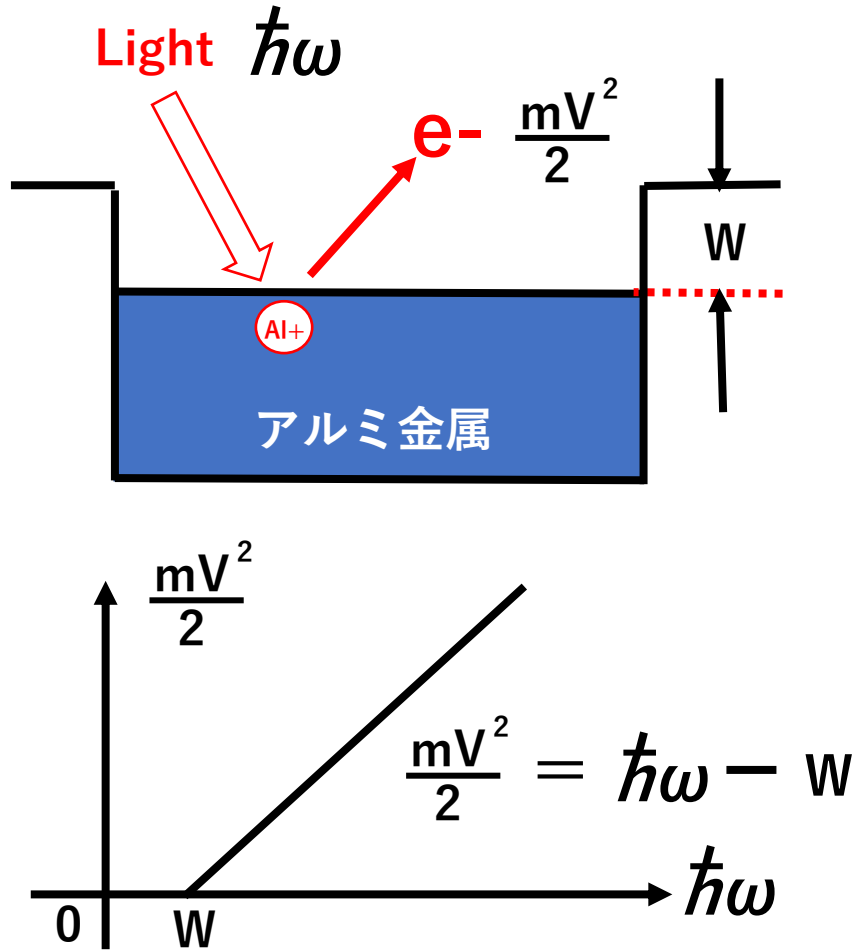
ボロン原子(B)を少量混ぜて、Silicon結晶を造ると抵抗値が下がる。電流の正体は、正 (Positive)の電荷を持った粒子である。

●N-type 半導体とは？

リン原子 (P)を少量混ぜて、Silicon結晶を造ると抵抗値が下がる。電流の正体は、負 (Negative)の電荷を持った粒子(電子) である。

(2)半導体の基本特性

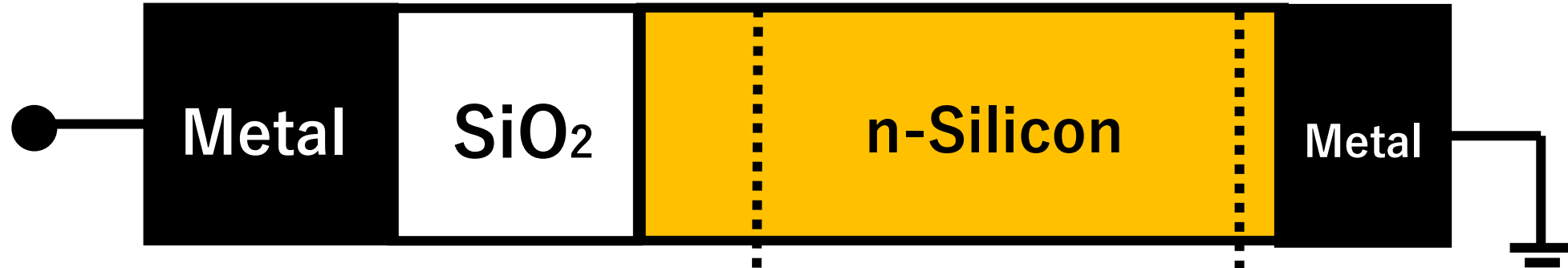
電気容量とは？



受光表面P+層と裏面のP+層の両面がピン留め接地された、P+PNPP+接合型新型太陽電池の提案

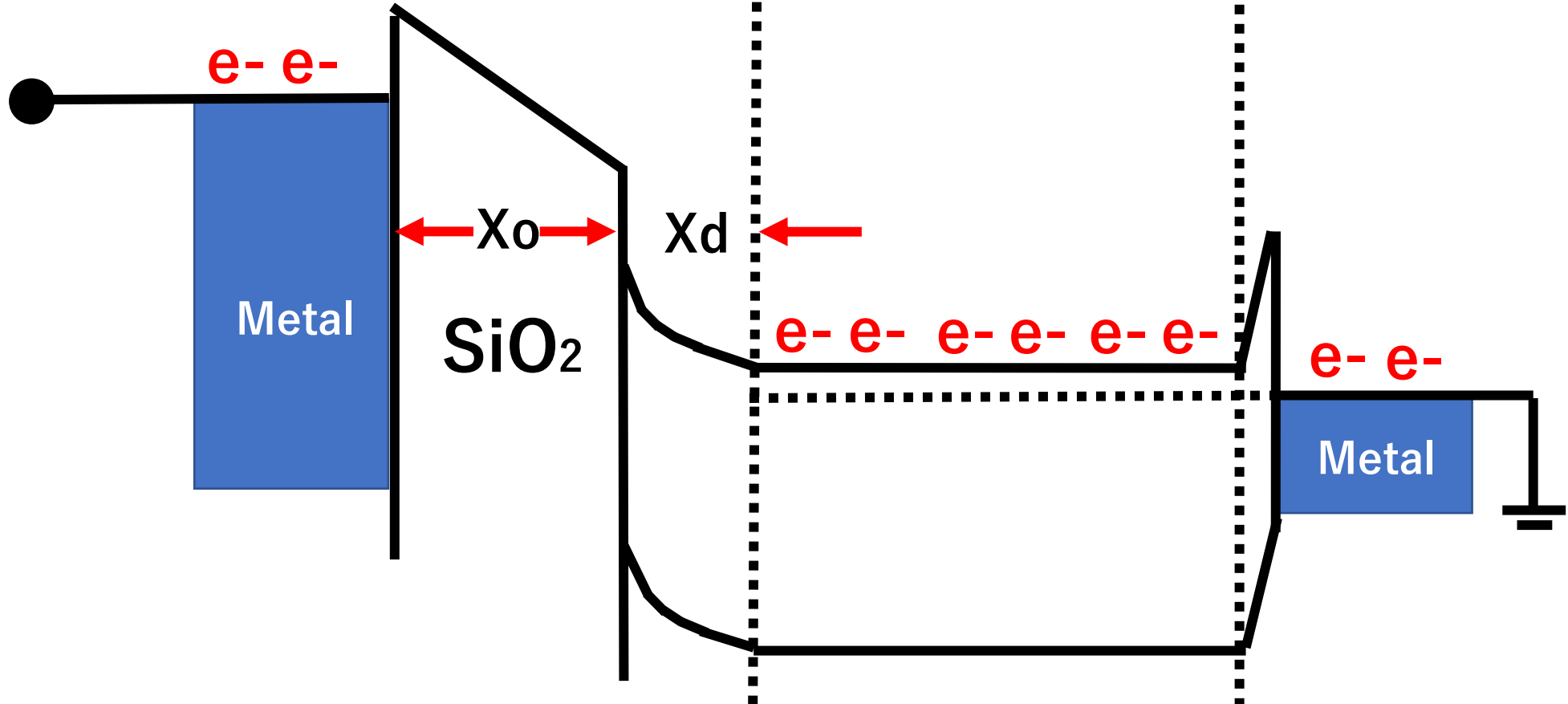
(2)半導体の基本特性

$V_G < 0$



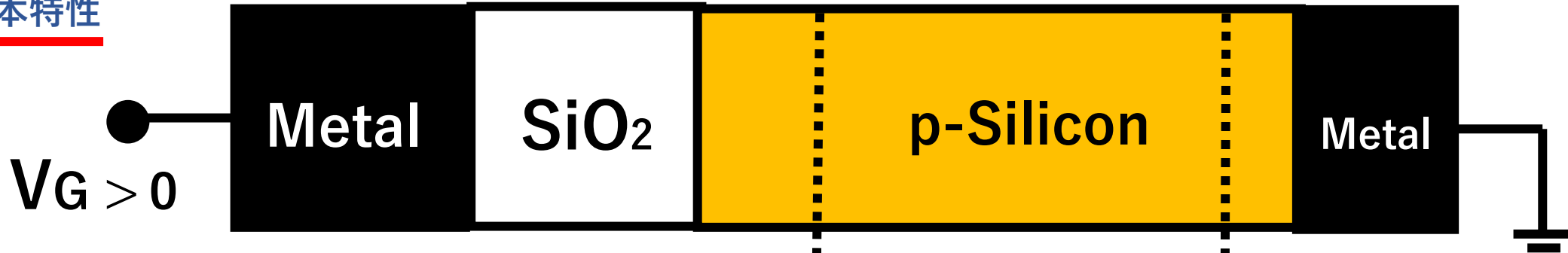
$V_G < 0$

$$Q = CV$$

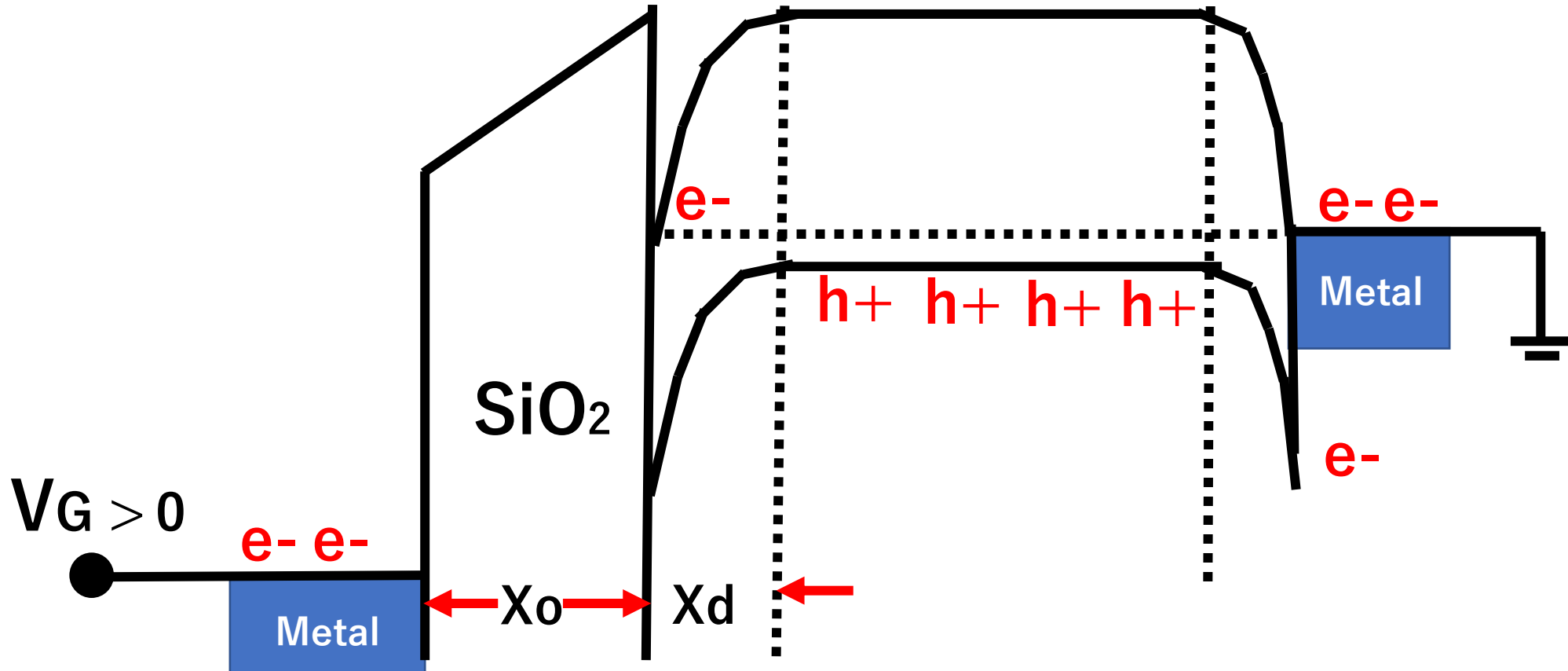


受光表面P+層と裏面のP+層の両面がピン留め接地された、P+PNPP+接合型新型太陽電池の提案

(2)半導体の基本特性



$$Q = CV$$

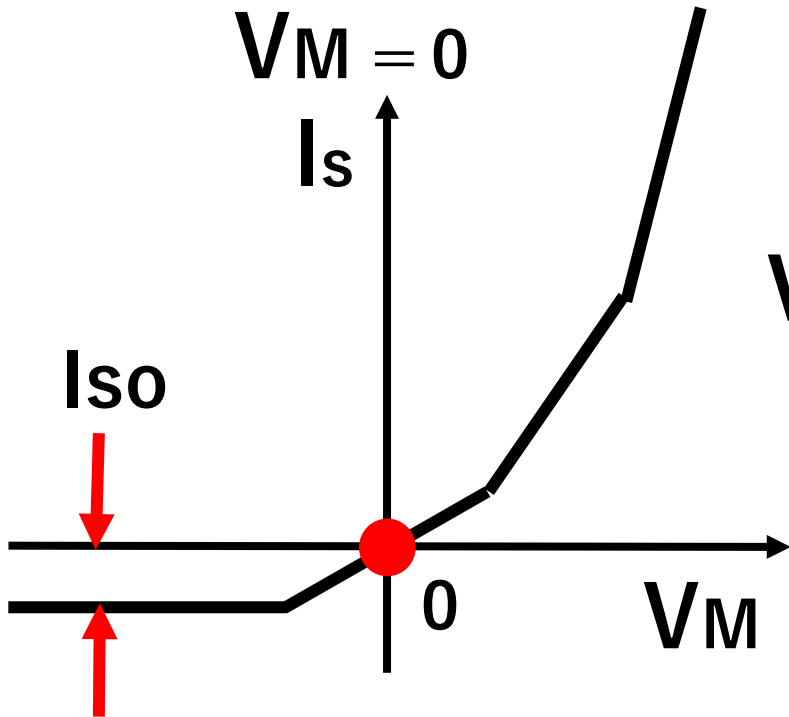


(2)半導体の基本特性

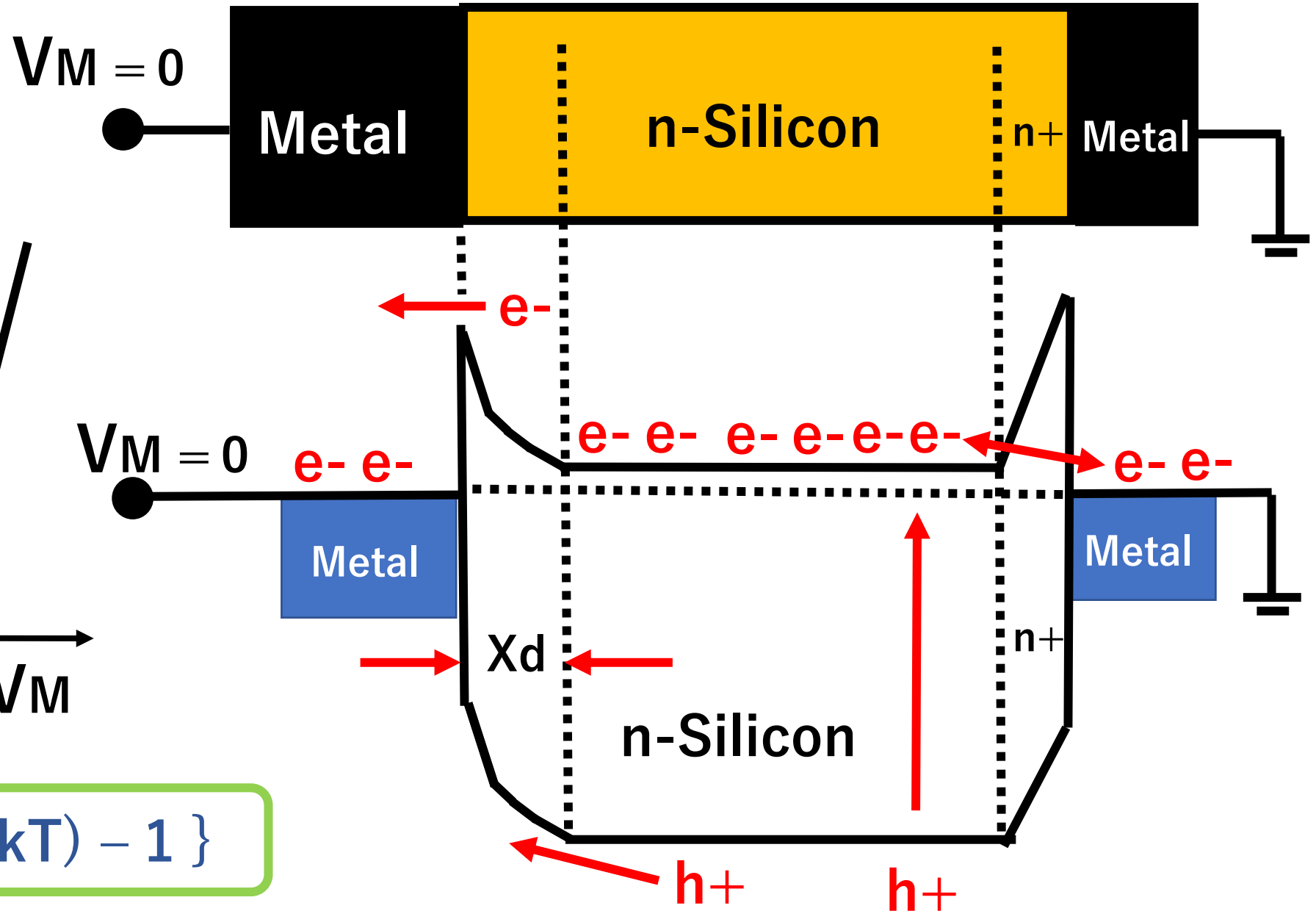
Schottky Diode

@No Bias

$V_M = 0$
 I_s



$$I_s = I_{s0} \{ \exp (V/kT) - 1 \}$$



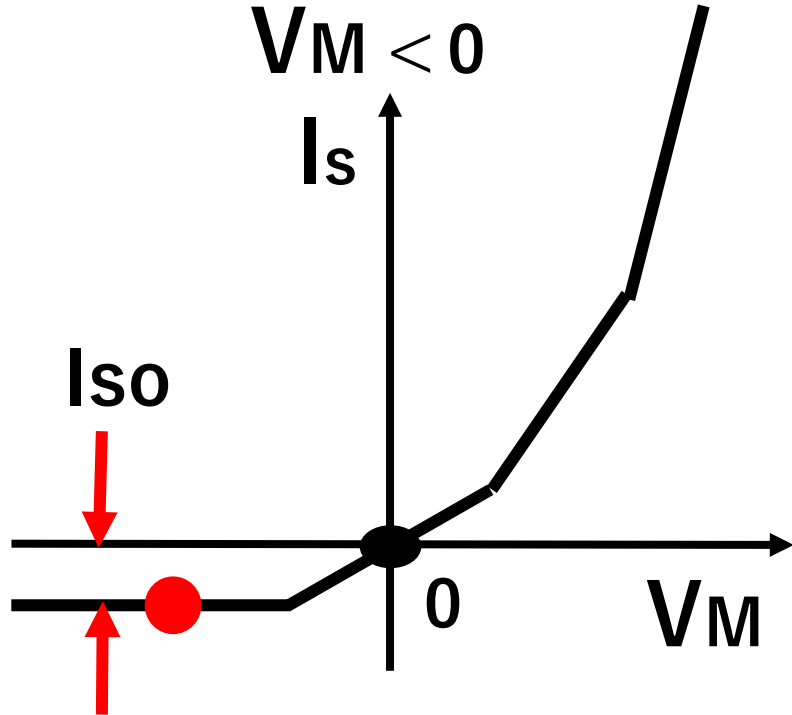
(2)半導体の基本特性

Schotttky Diode

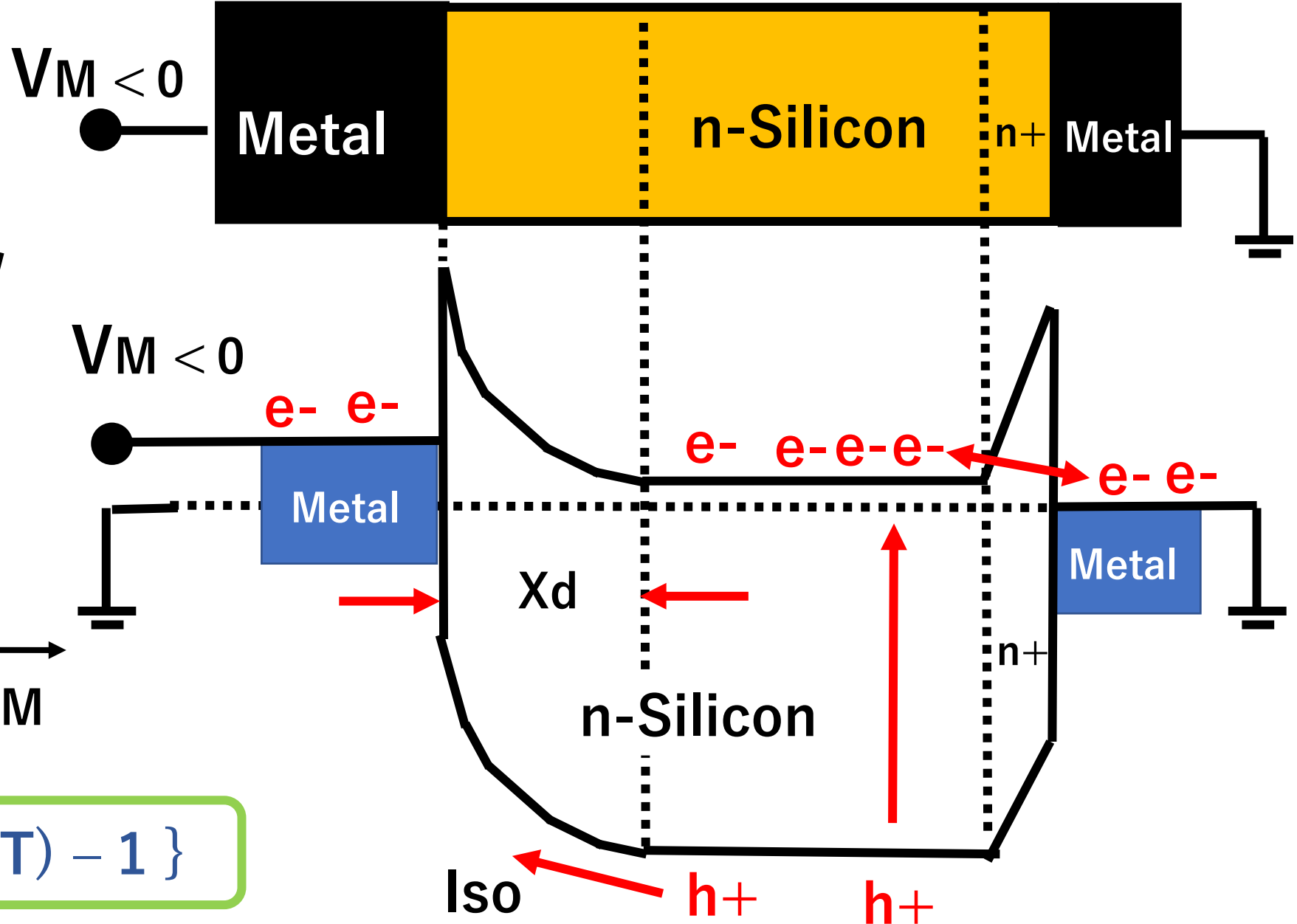
@Back Bias

$V_M < 0$

I_s

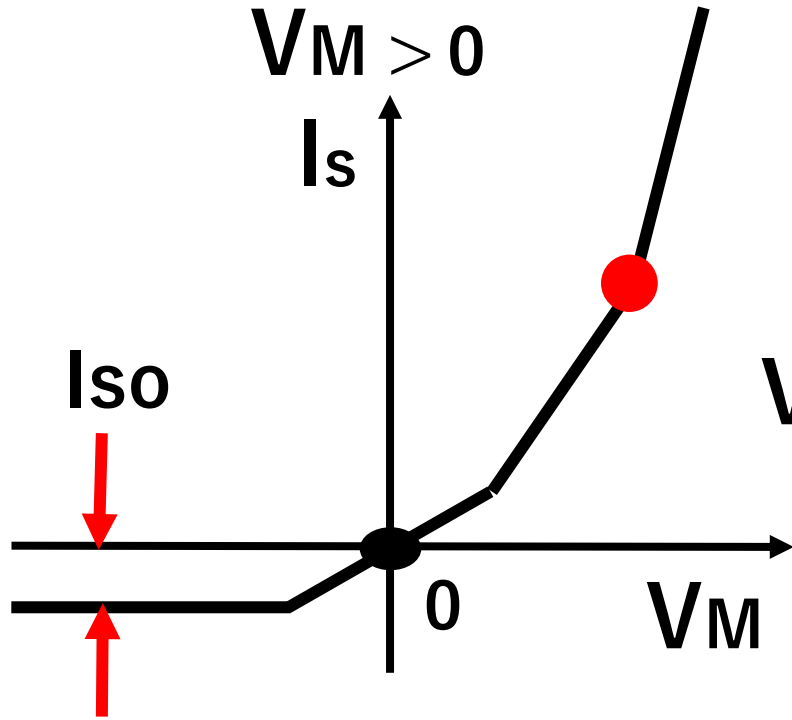


$$I_s = I_{s0} \{ \exp(V/kT) - 1 \}$$

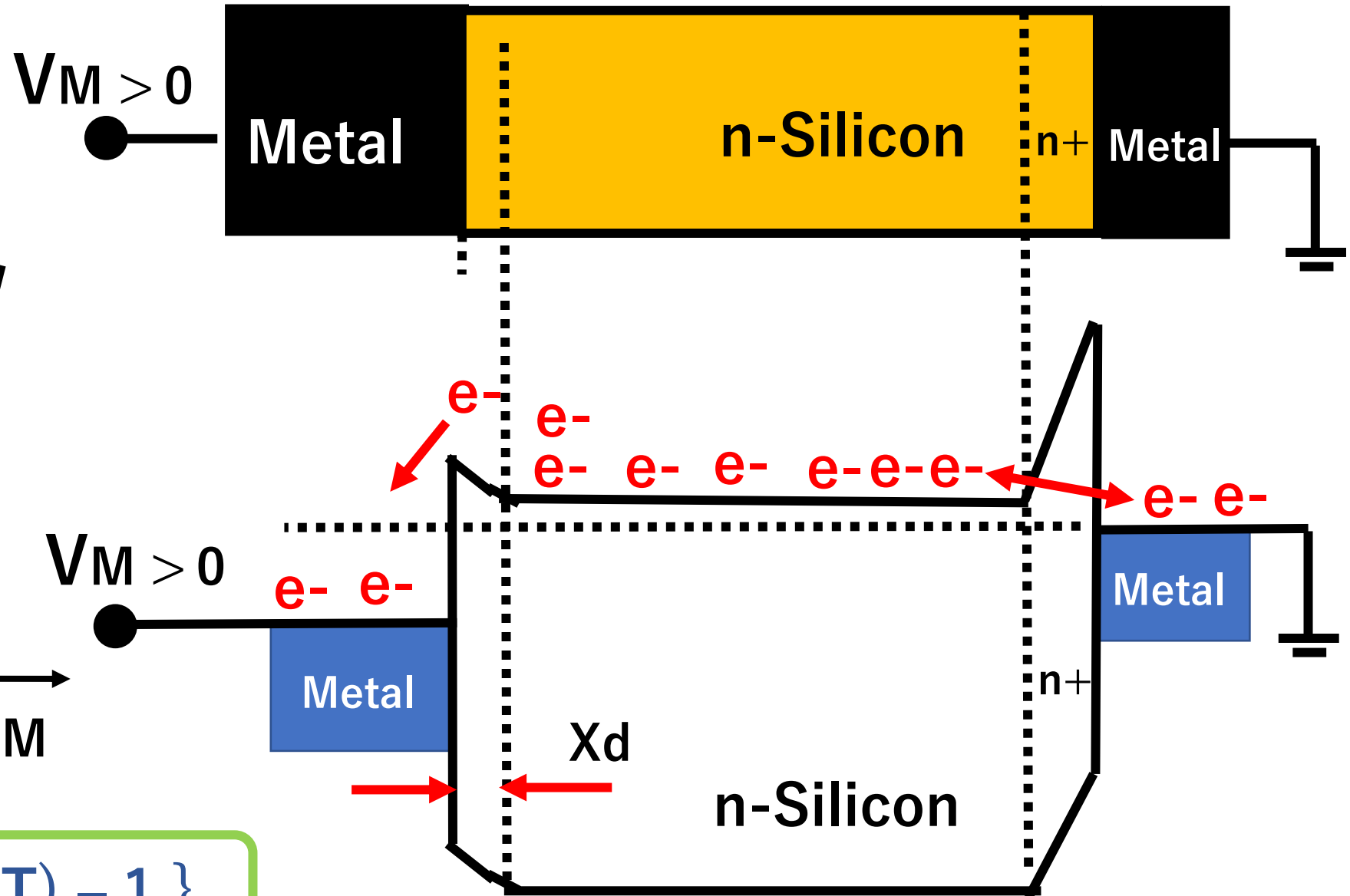


(2)半導体の基本特性

Schottky Diode
@Forward Bias

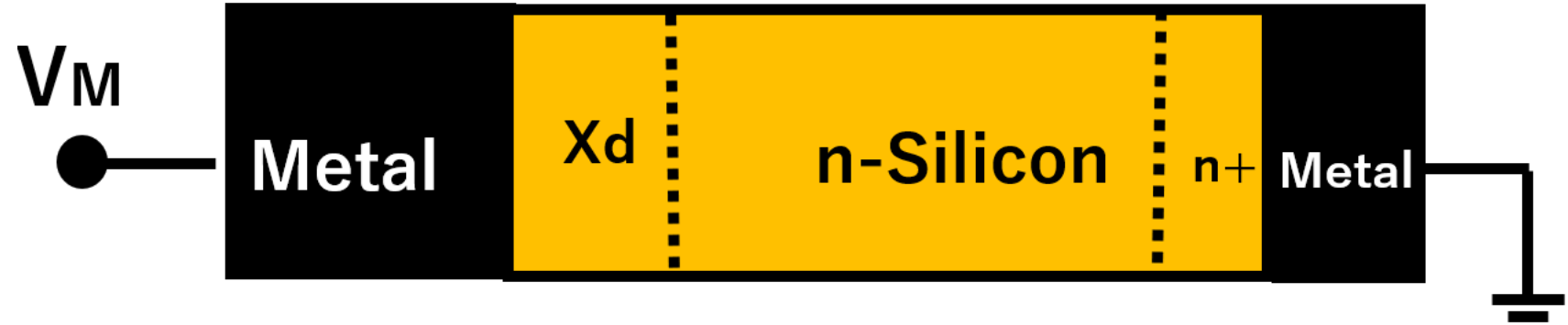


$$I_s = I_{s0} \{ \exp (V/kT) - 1 \}$$

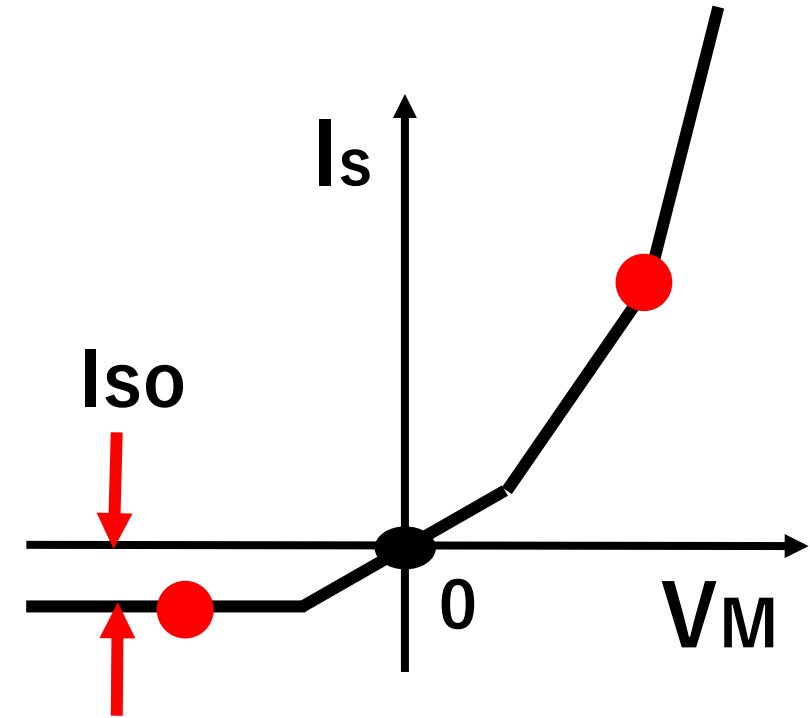


(2)半導体の基本特性

Schottky Diode



純粹の半導体結晶は非常に高い抵抗値 (R)を持つ抵抗体でオームの法則($V=IR$)に従う。N型不純物を混ぜると自由電子の数が増加して抵抗値がさがる。P型不純物を混ぜると自由正孔 (ホール)が増加して抵抗値がさがる。不純物濃度をどんどん増加すると半導体は金属の性質に近づき、金属との半導体の接合面はトンネル現象で抵抗ゼロの状態 (オーミック接合)となる。しかし、純粹の半導体や不純物濃度の薄い半導体と金属の接触面には電圧バリア (Schottky Barrier)が生じて整流特性を示す。いろいろな Band Gapを持つ半導体結晶材料の開発研究が1950年から70年以上も継続されています。GeやSi結晶から、GaAs結晶や、GaNやGa₂O₃結晶などwide band gapの結晶の研究は青色発光ダイオードの発明や今は超光感度の高い光電変換率を持つ新型の太陽電池の実用化研究へと展開されている。



$$I_s = I_{s0} \{ \exp(V/kT) - 1 \}$$

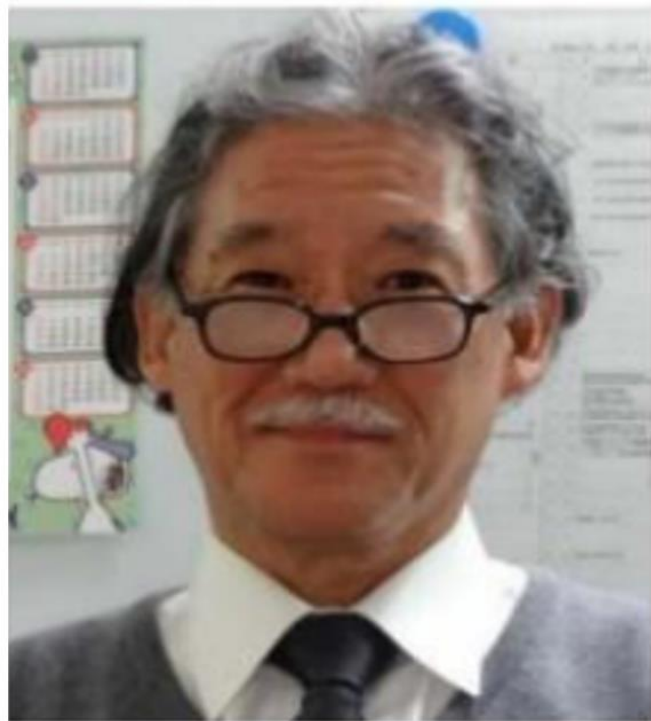
受光表面P+層と裏面のP+層の両面がピン留め接地された、P+PNPP+接合型新型太陽電池の提案

(2) 半導体の基本特性

詳細は青山社出版の人工知能パートナーシステム(AIPS)を支える「デジタル回路の世界」に記載。

<https://www.seizansha.co.jp/ISBN/ISBN978-4-88359-339-2.html>

<https://www.seizansha.co.jp/>



崇城大学 理事長付き 特任教授
IEEE Life Fellow, Ph.D., 工学博士

仕様:B5判上製

475ページ

ISBN978-4-88359-339-2

発行日:2016/03/01



人工知能パートナーシステム(AIPS)を支える
デジタル回路の世界

IEEE Life Fellow, Ph.D.

萩原 良昭 著

ISBN978-4-88359-339-2 B5判 上製 475頁

定価(本体9,000円+税)

未来の人間社会には人工知能パートナーシステム(AIPS)とも言える人間にやさしい支援システムが出現すると期待している。AIPS搭載の自動走行車や老人介護システム、人間型歩行ロボットやロボット・ハウスなどである。そこで本書では、そのAIPSを支える「デジタル回路の世界」と題し、ハードとソフトの両面で、人とコンピュータをつなぐデジタル技術について紹介している。図や絵をたくさん用意して、基礎からやさしく解説している。

Thank You !