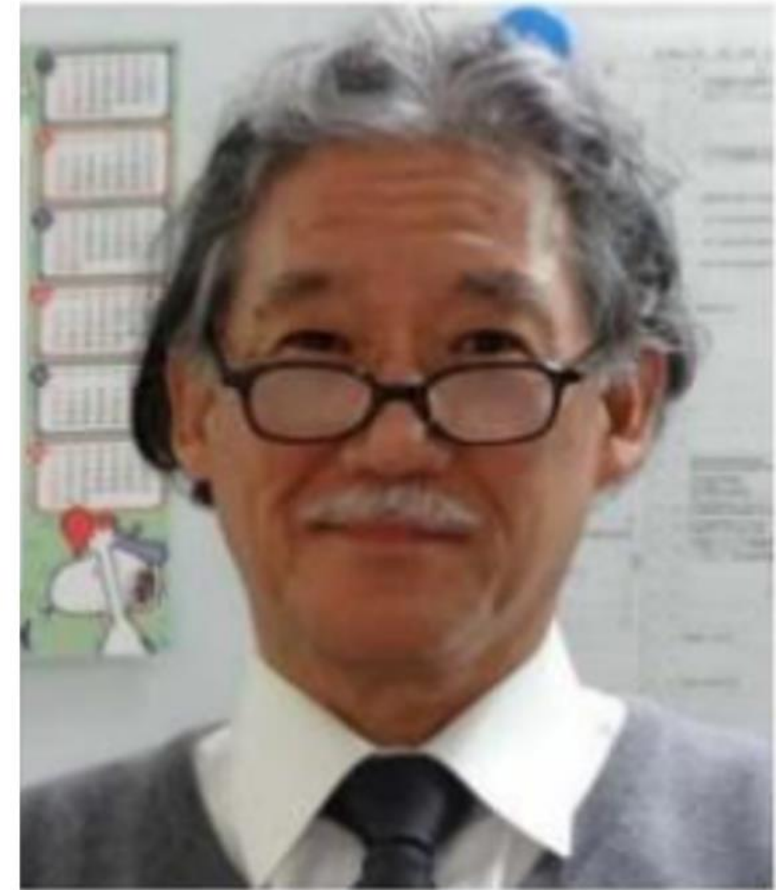


受光表面P+層と裏面のP+層の両面がピン留め接地された、P+PNPP+接合型新型太陽電池の提案

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

(3) single接合型のダイオードの整流特性

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

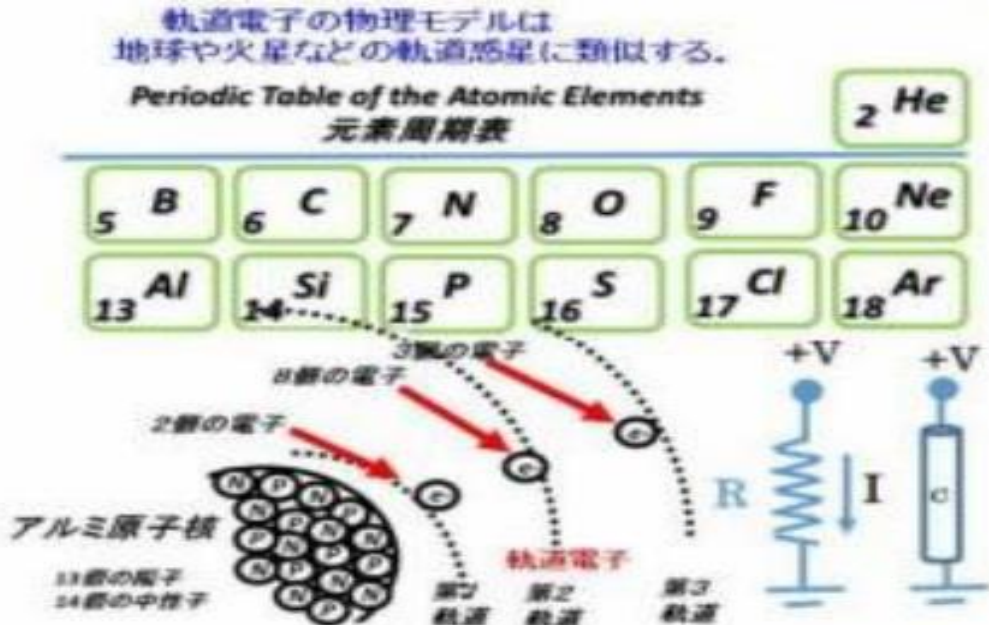
ISBN978-4-88359-339-2 B5判 上製 475頁

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。

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

(3) single接合型のダイオードの整流特性

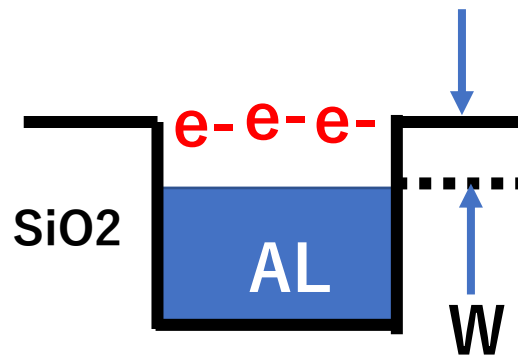


2個、8個、8個の軌道電子

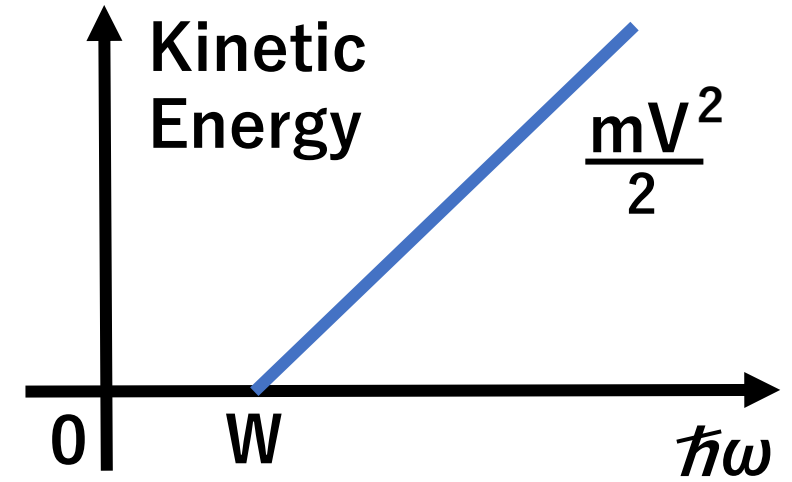
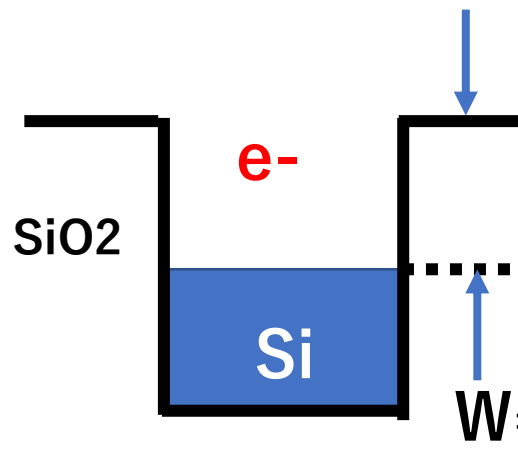
●自由電子は当然空間を自由に浮遊し移動する。しかし、結晶体の中でも、結晶体の原子核の引力圏の外では自由に電子は浮遊することができる。

●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。



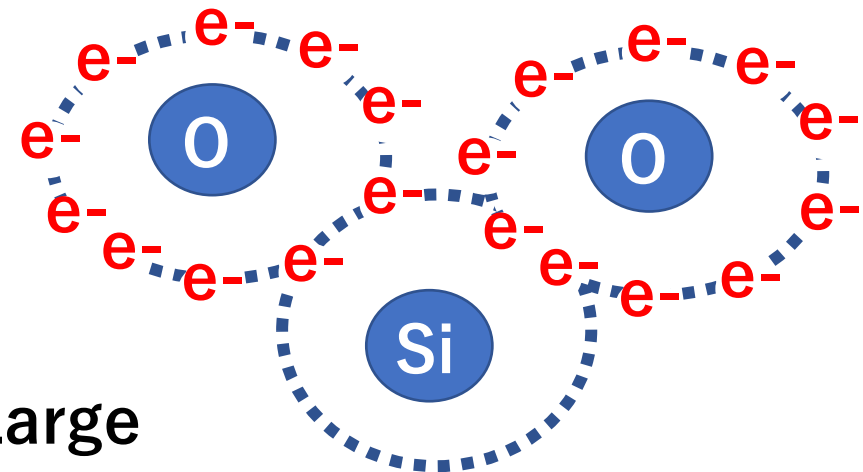
シリコン結晶体の中では自由電子が大変少ない。抵抗値Rが大きい。



絶縁体(SiO2)となると自由電子はゼロとなる。抵抗値Rは無量大となる。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)

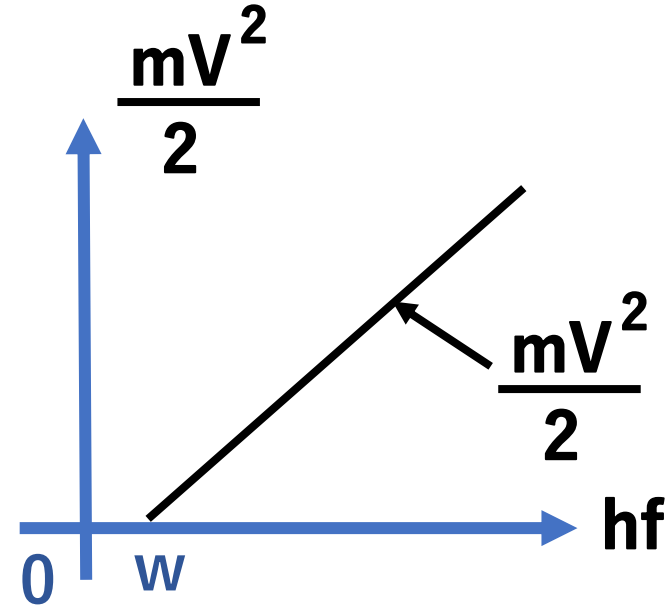
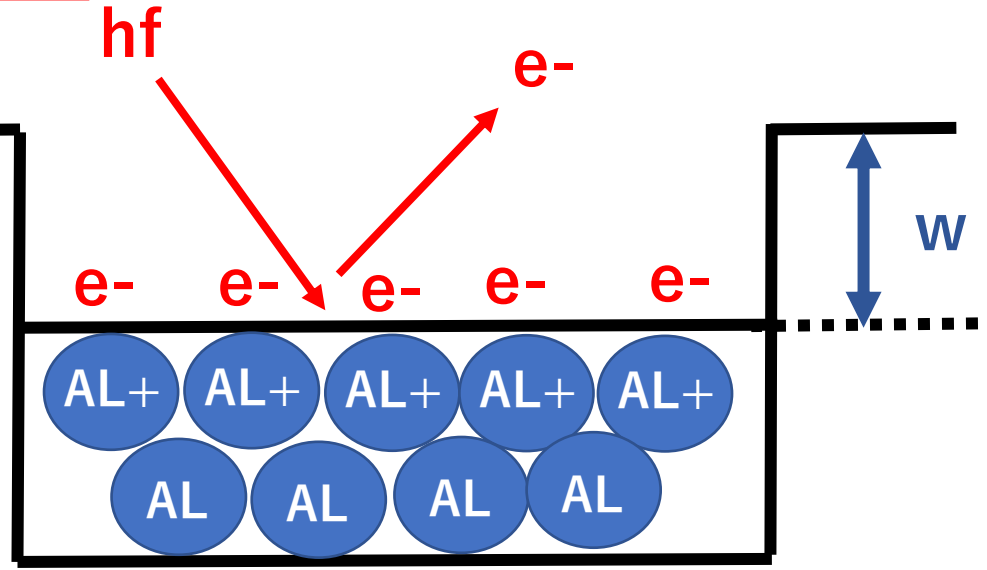


4個の軌道電子(Si)

(3) single接合型のダイオードの整流特性

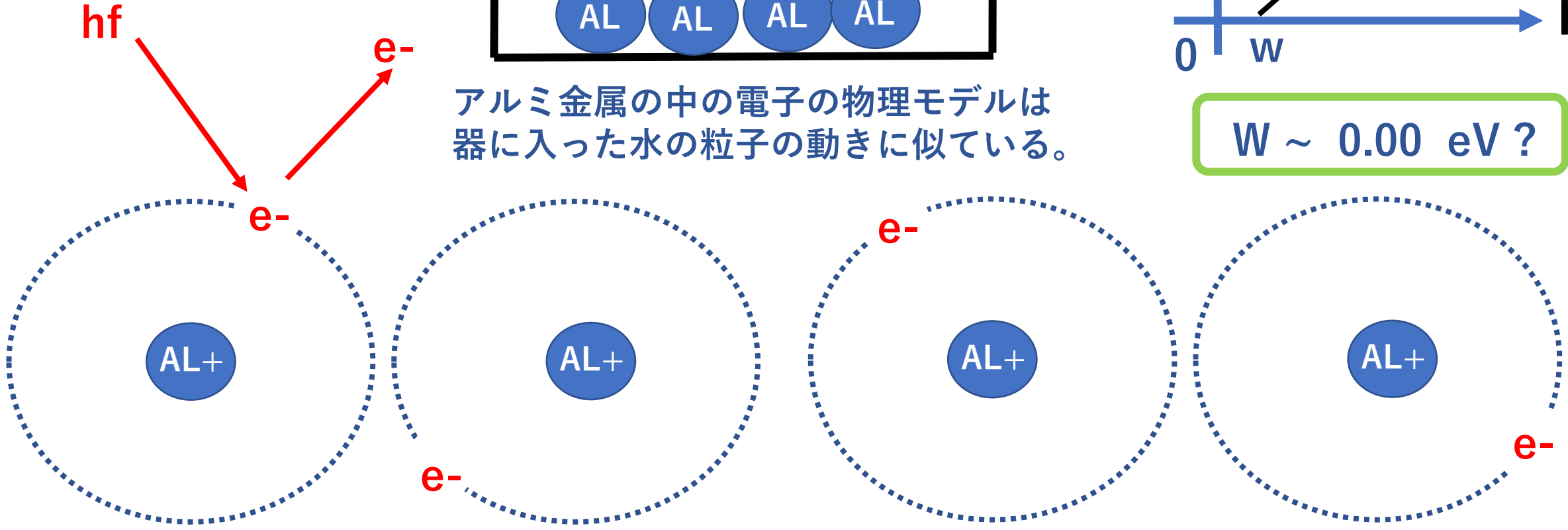
アルミ原子の物理モデル

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。

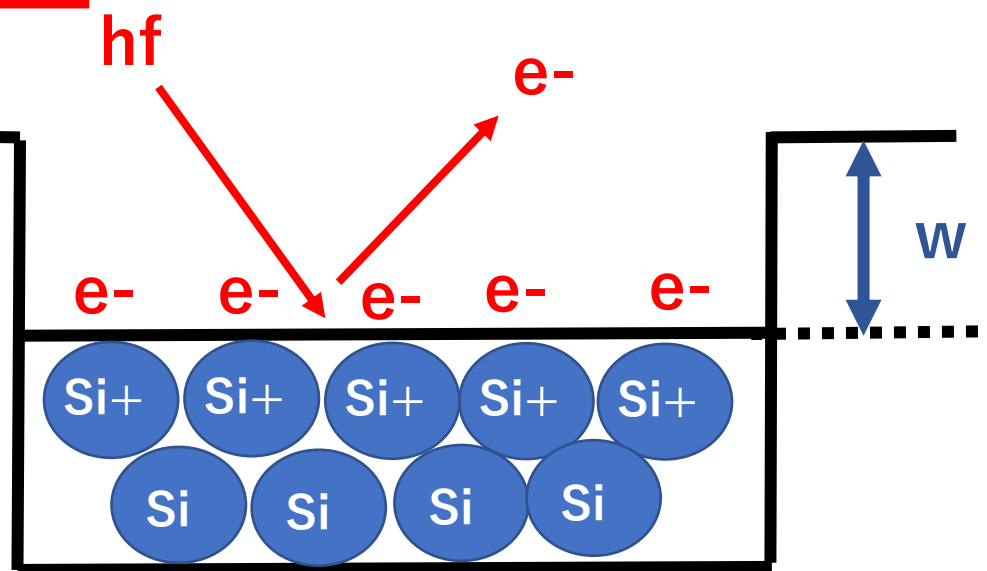
$W \sim 0.00 \text{ eV} ?$



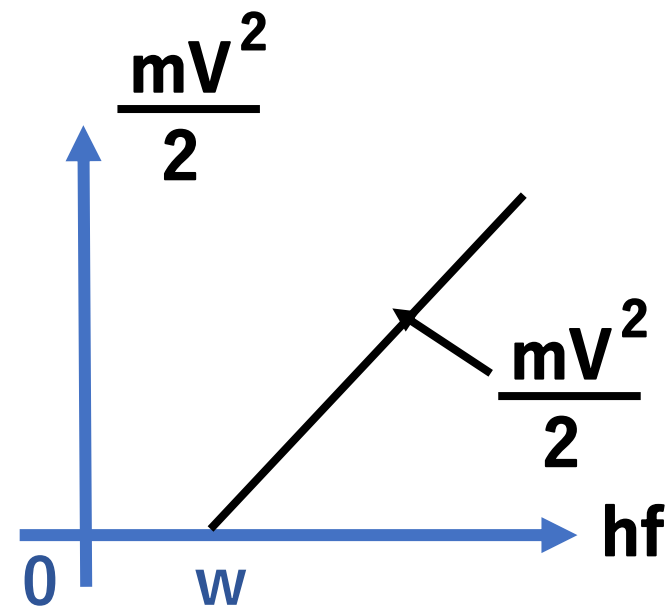
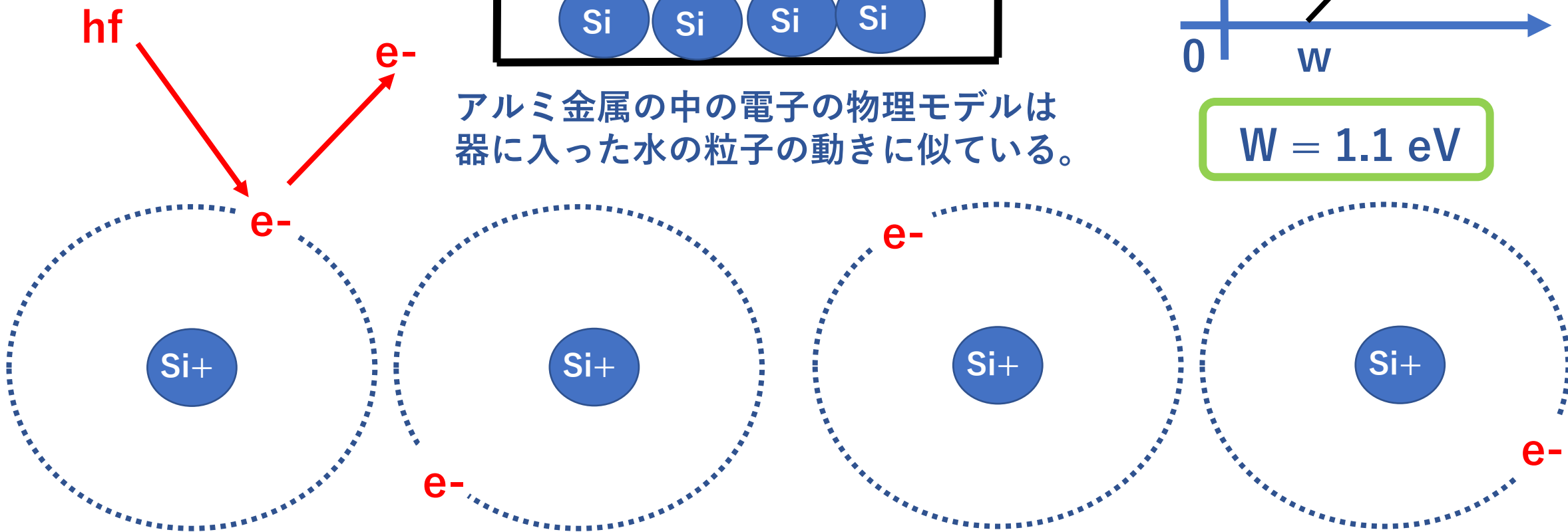
(3) single接合型のダイオードの整流特性

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⁻)

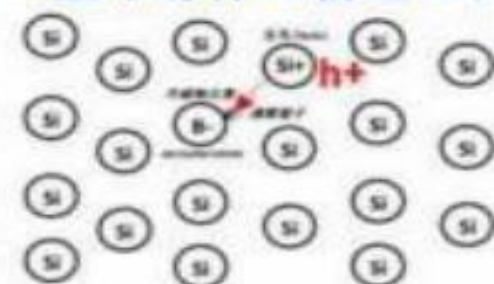
りん原子(中性)₁₅ = りんイオン (P⁺)₁₄ + 自由電子 (e⁻)

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

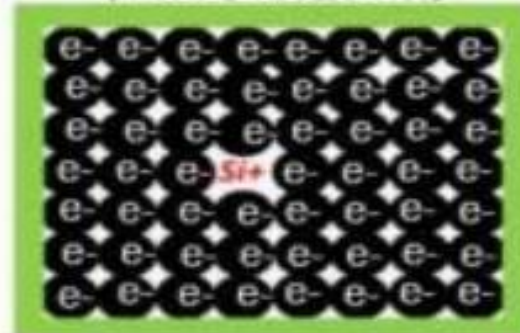
●自由電子は当然空間を自由に浮遊し移動する。しかし、結晶体の中でも、結晶体の原子核の引力圏の外では自由に電子は浮遊することができる。

●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

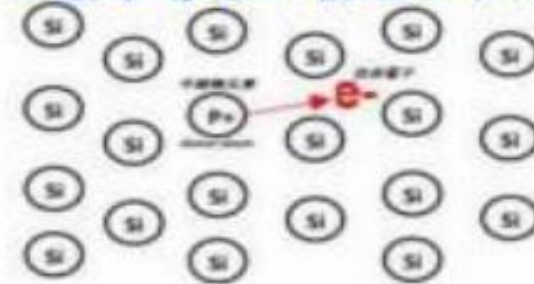


ホールがずっしり移った跡



Holeが主役

N型半導体の物理モデル

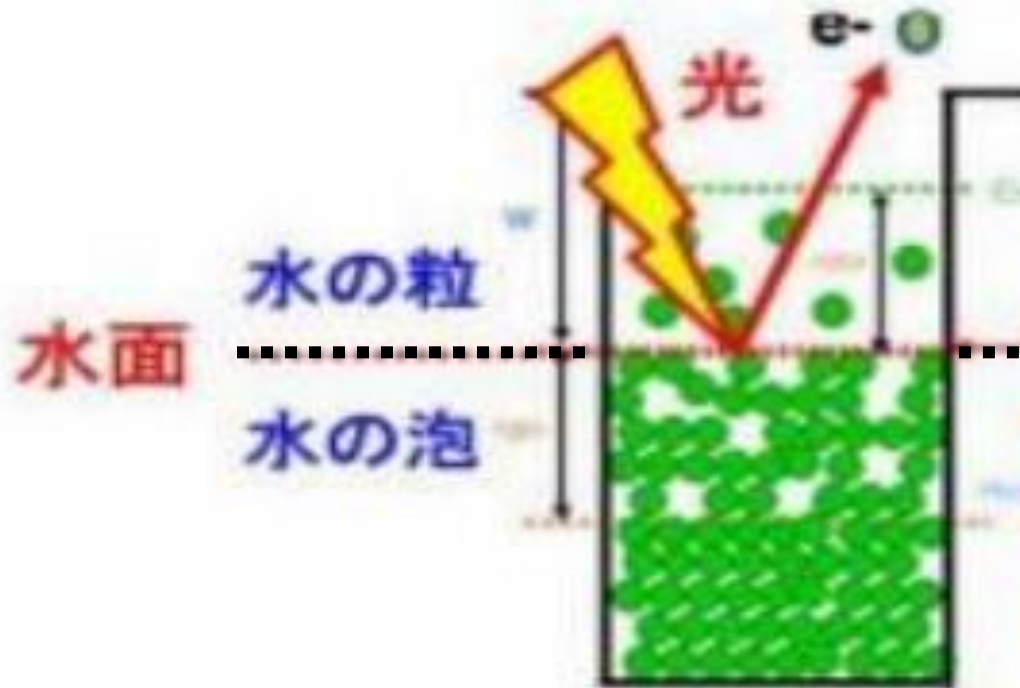


ぎっぎの跡

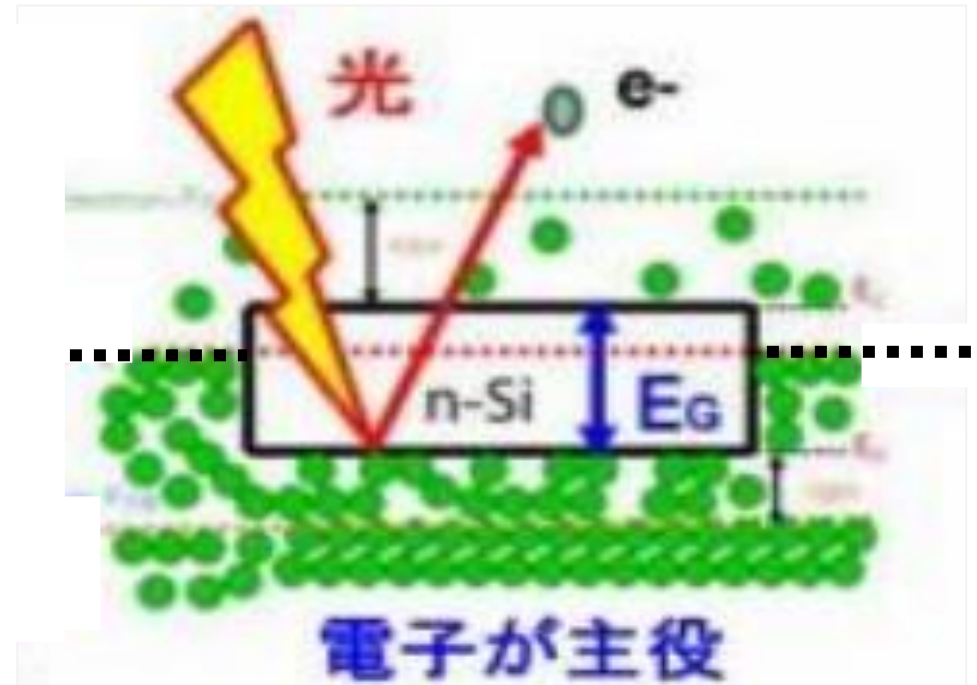


電子が主役

(3) single接合型のダイオードの整流特性

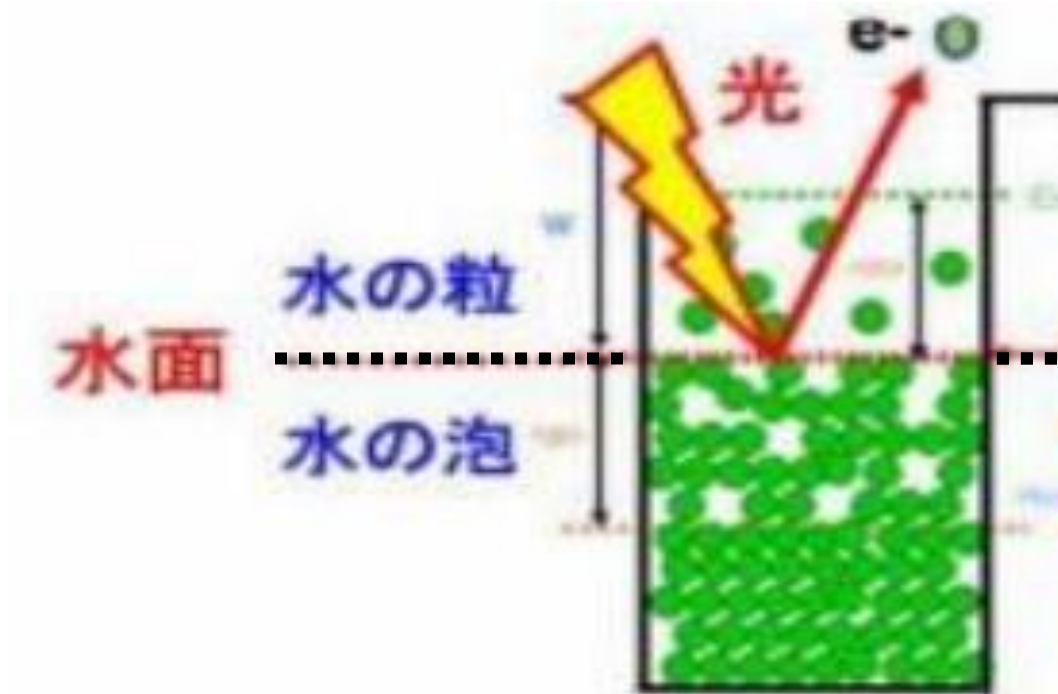


金属の物理モデル
(水が入った器)

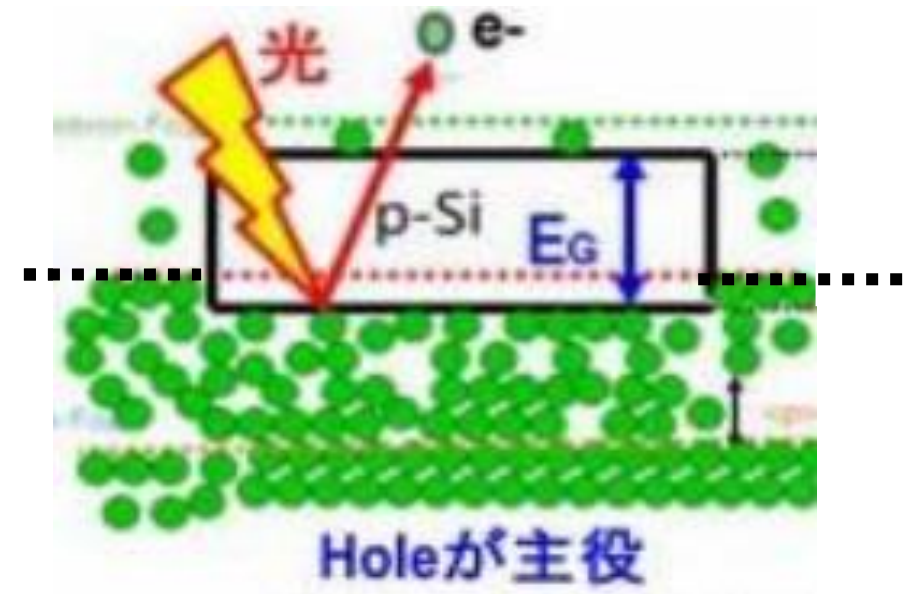


N型半導体の物理モデル
(満タンの石油タンカー)

(3) single接合型のダイオードの整流特性



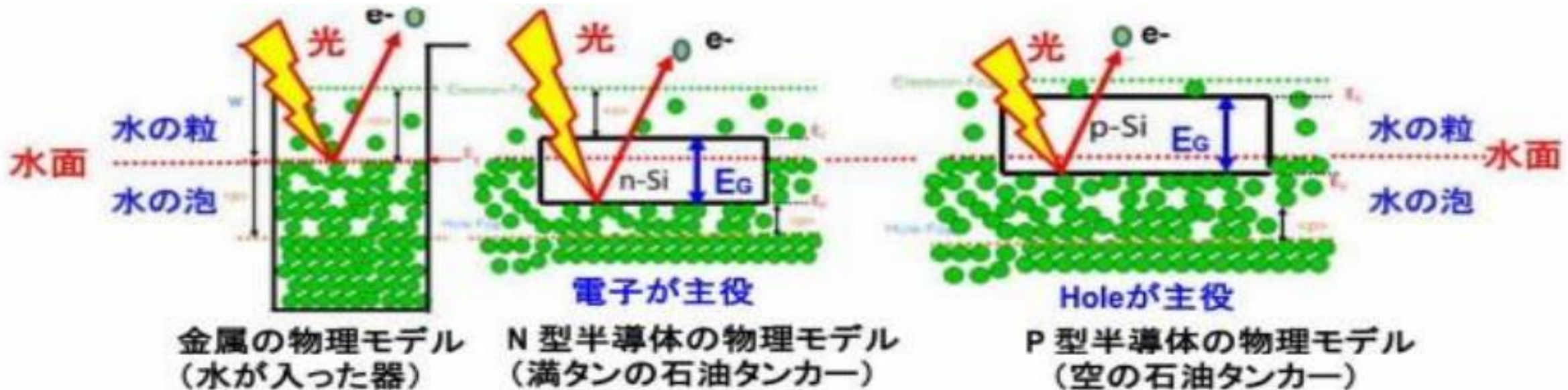
金属の物理モデル
(水が入った器)



P型半導体の物理モデル
(空の石油タンカー)

(3) single接合型のダイオードの整流特性

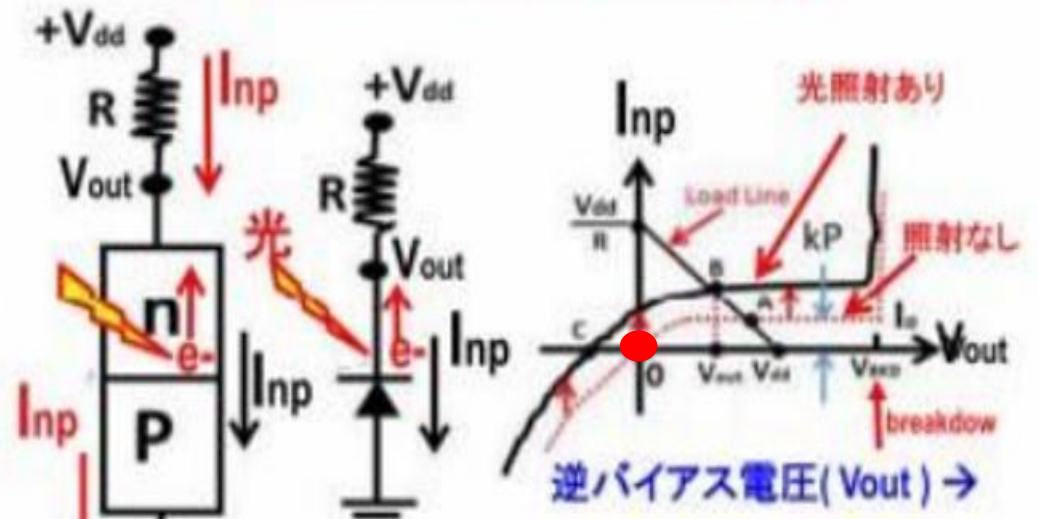
- 金属の物理モデルは、器に入った水にたとえる事が可能。
- N型半導体の物理モデルは満タンの石油タンカー船に、
- P型半導体の物理モデルは空の石油タンカー船に似ている。



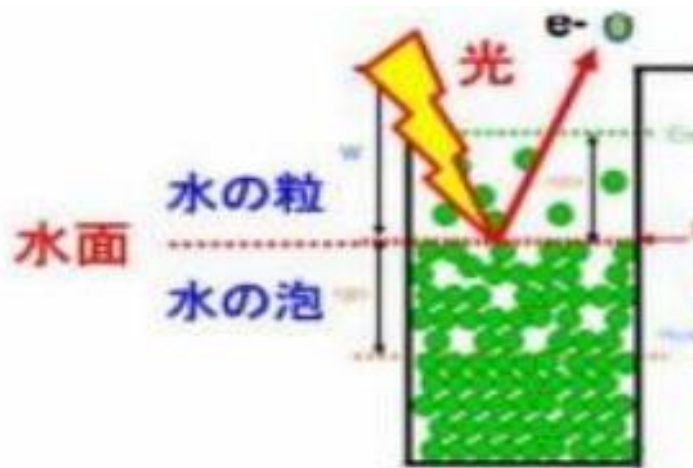
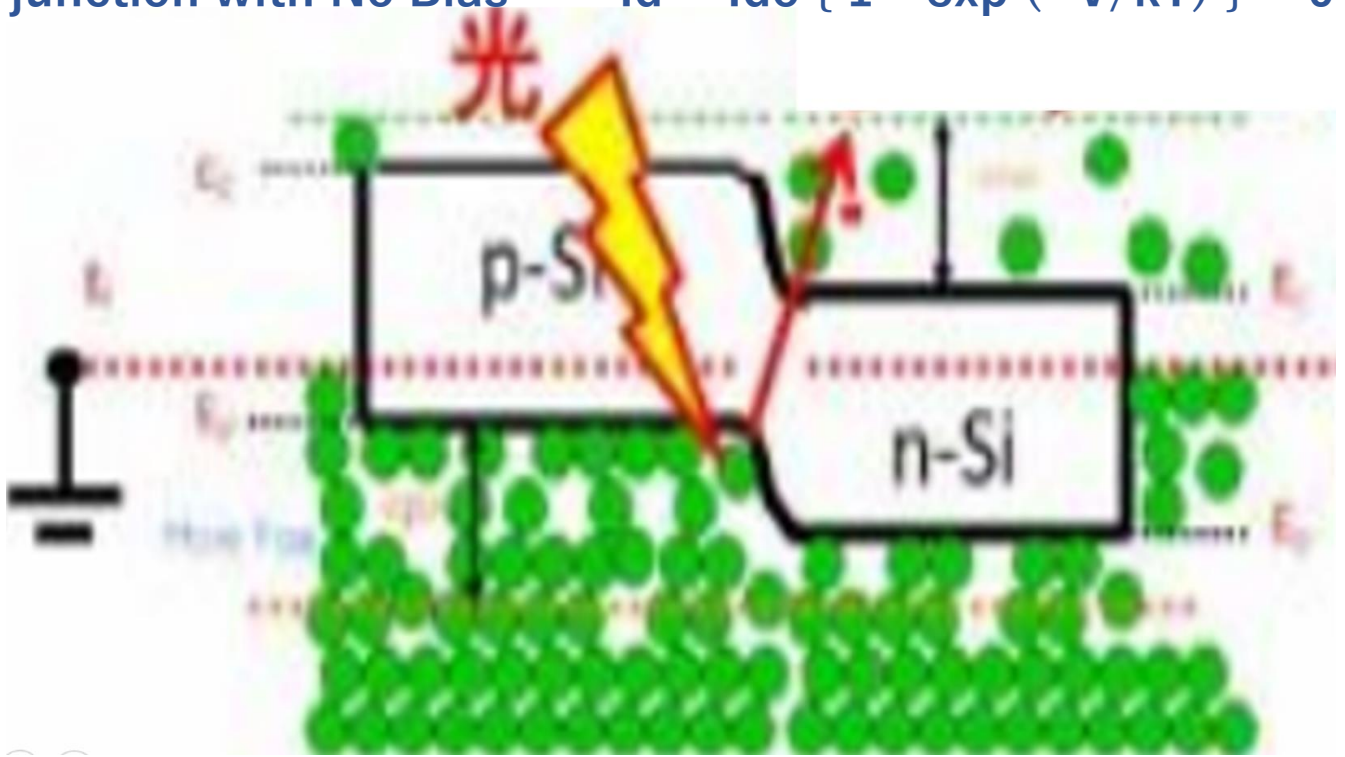
(3) single接合型のダイオードの整流特性

(2) PN junction with No Bias

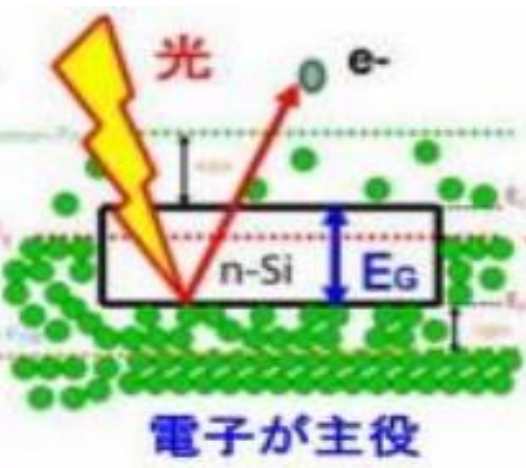
$$I_d = I_{do} \{ 1 - \exp(-V/kT) \} = 0$$



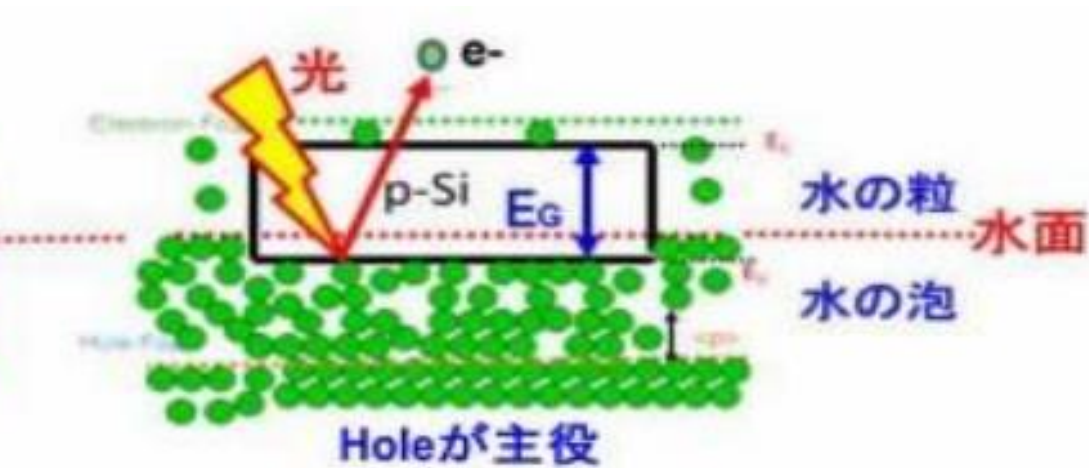
光が照射されると逆バイアス・リークが増加する。
順方向電流は減少する！



金属の物理モデル
(水が入った器)



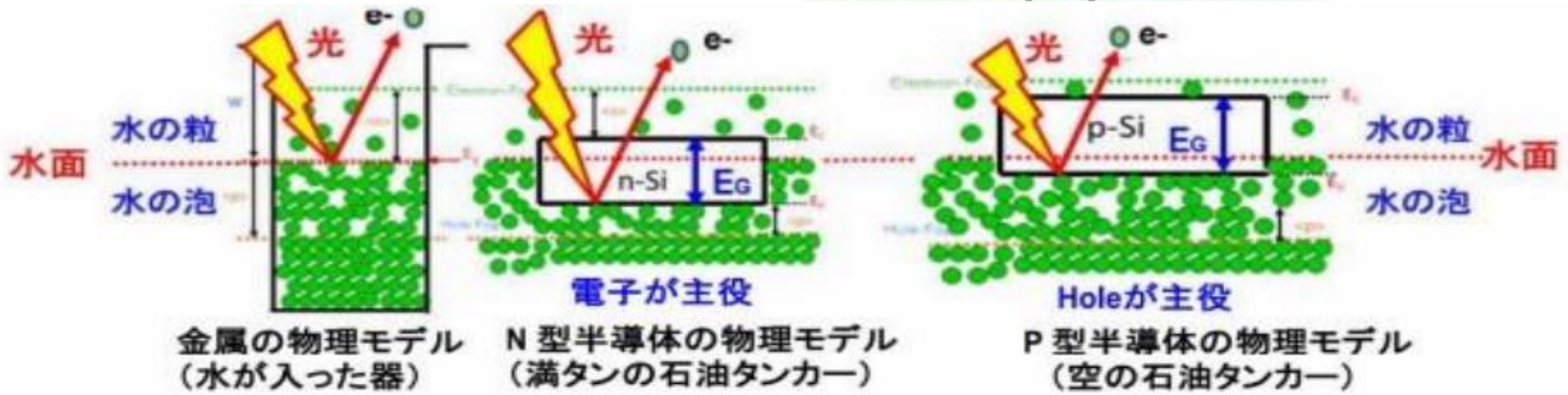
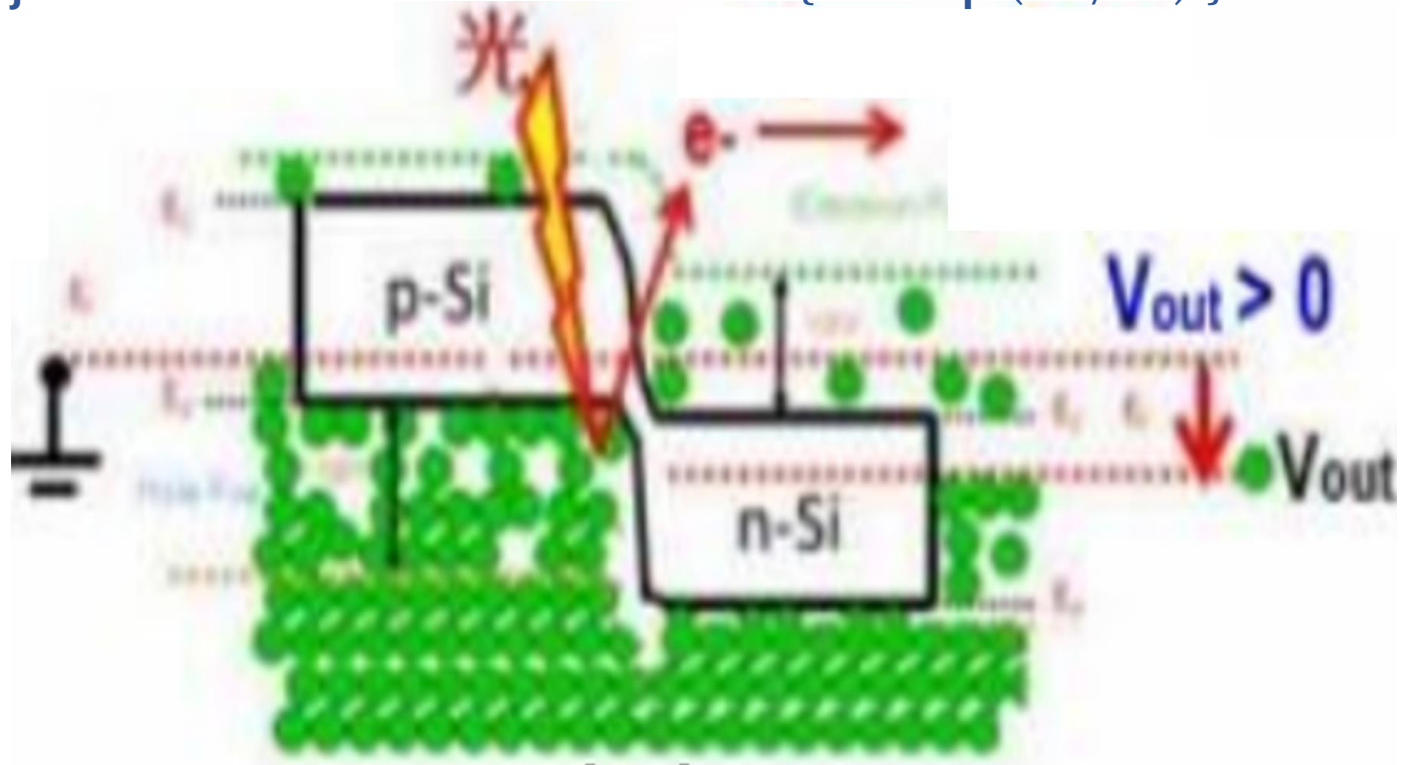
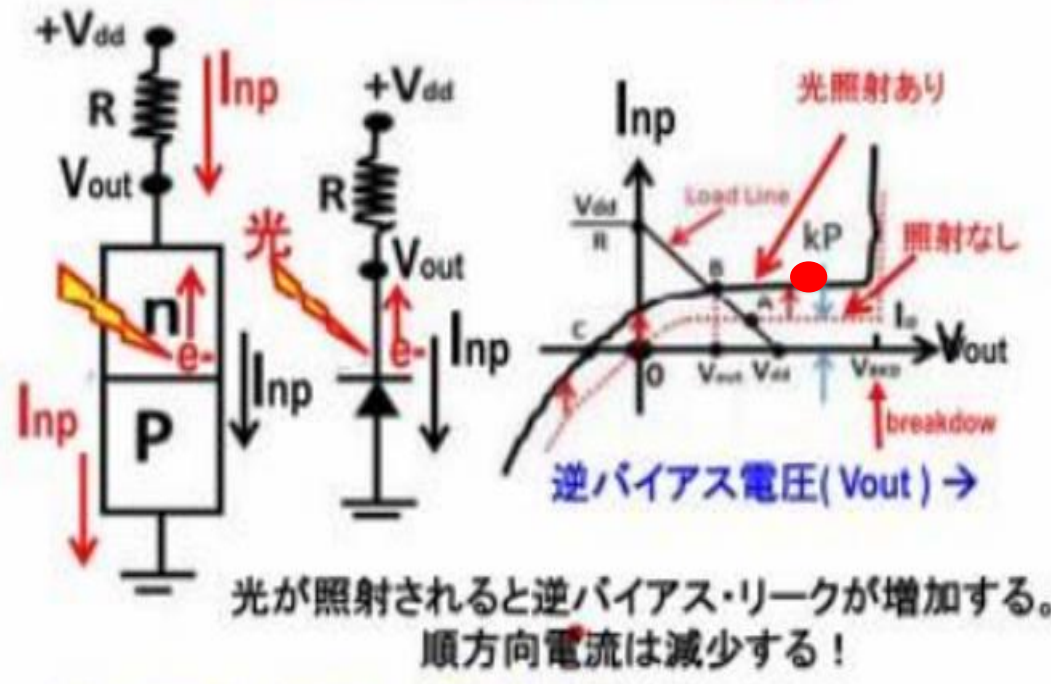
N型半導体の物理モデル
(満タンの石油タンカー)



P型半導体の物理モデル
(空の石油タンカー)

(3) single接合型のダイオードの整流特性

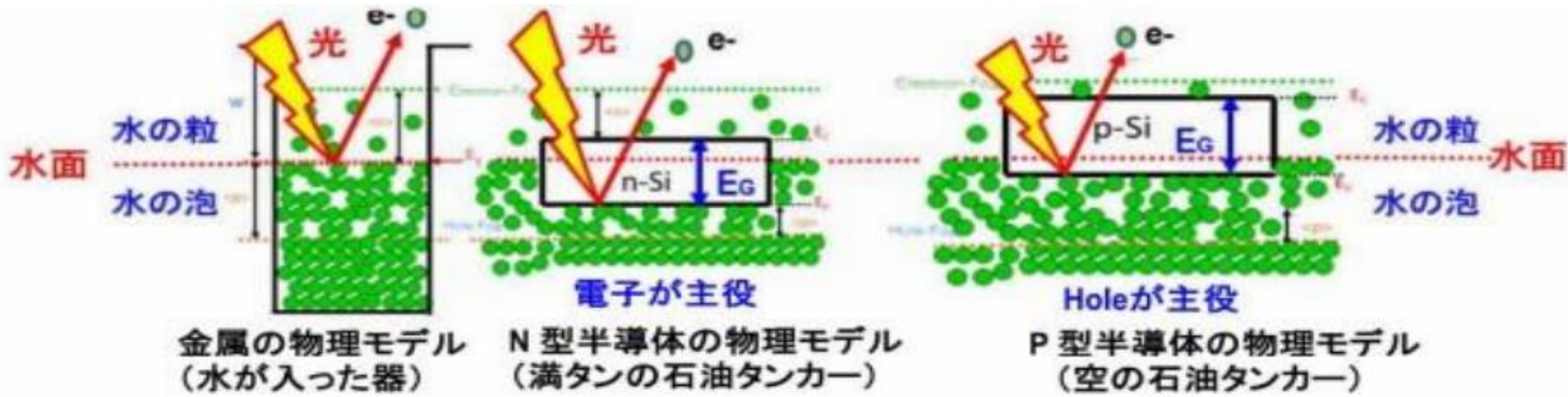
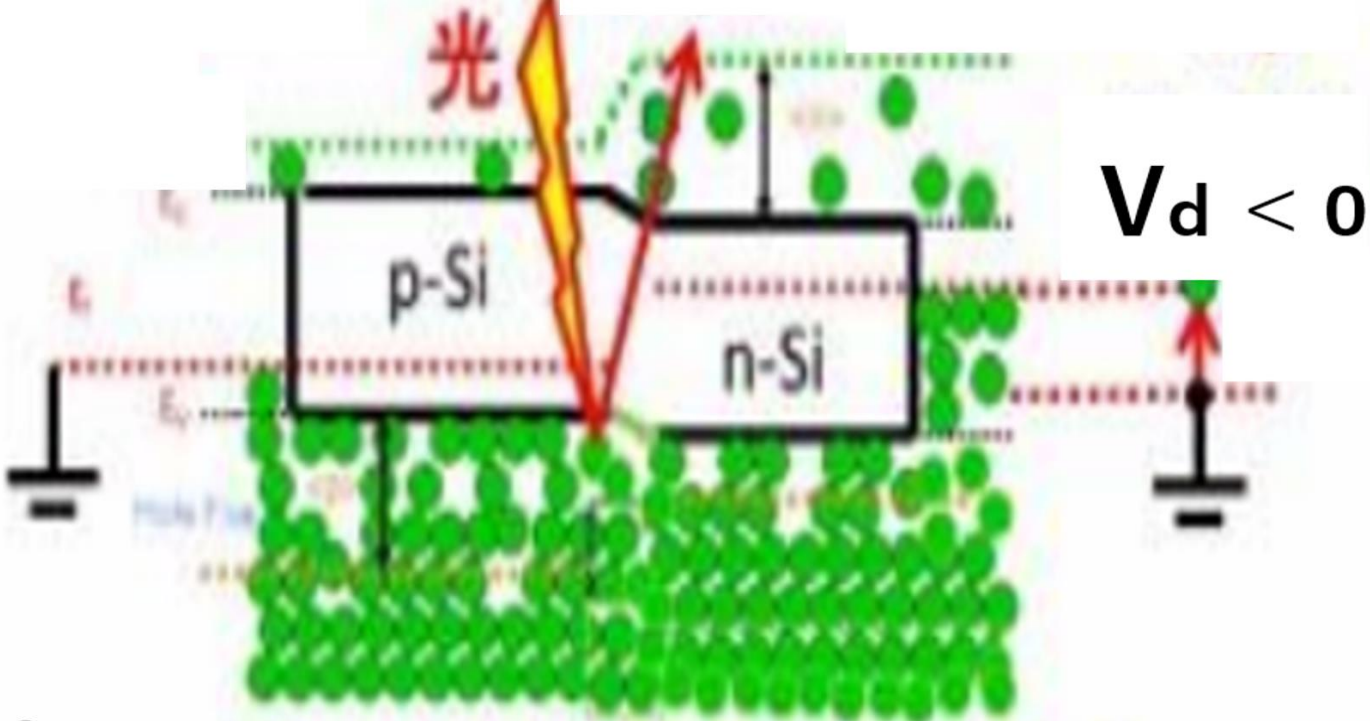
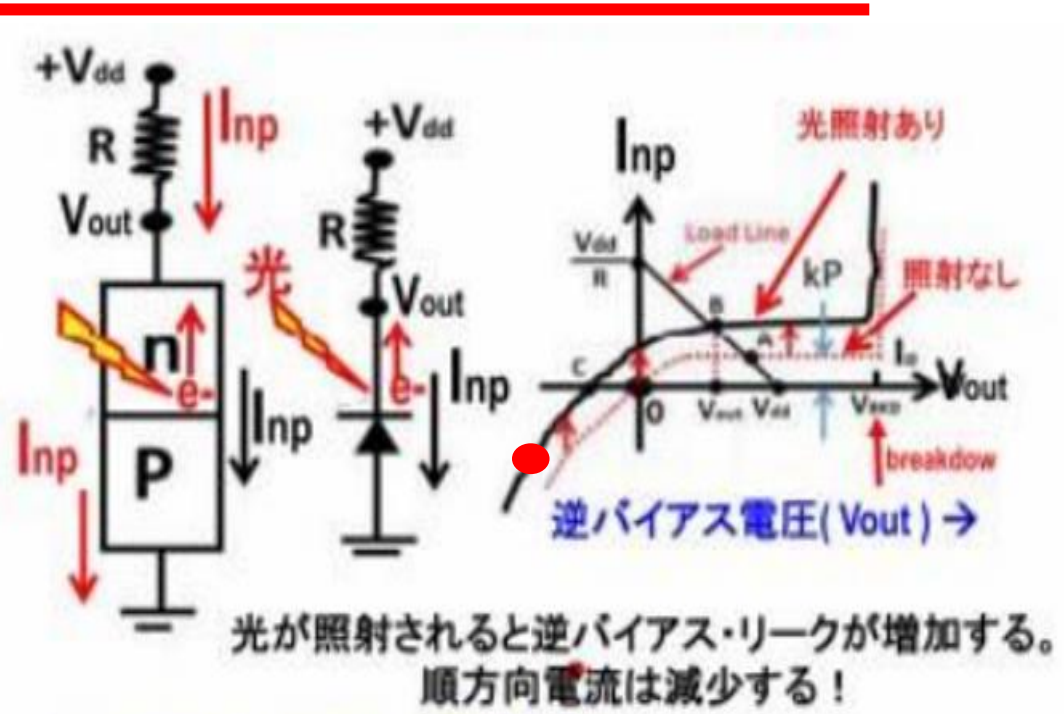
(2) PN junction with Back Bias $I_d = I_{do} \{ 1 - \exp(-V/kT) \} = I_{do}$

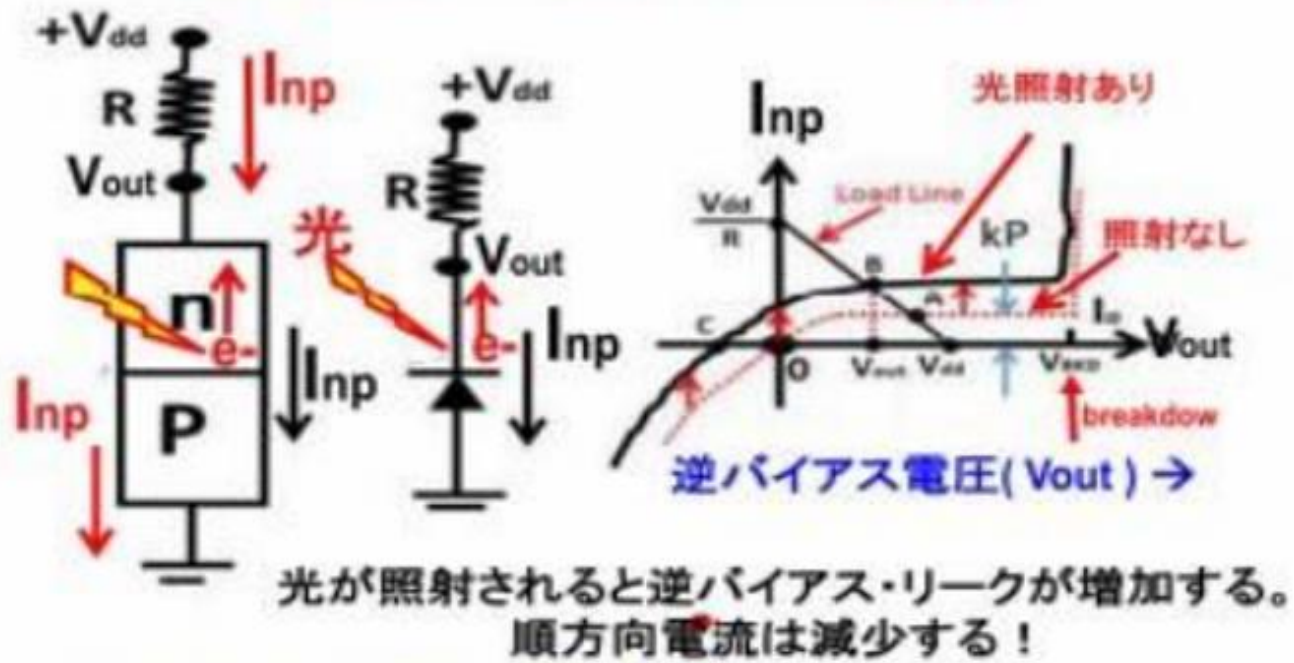


(3) single接合型のダイオードの整流特性

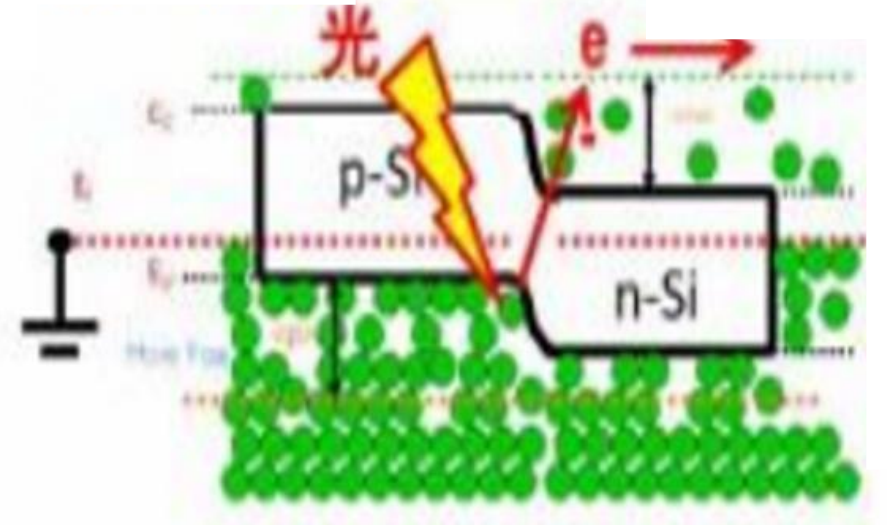
(3) PN junction with Forward Bias

$$I_d = I_{do} \{ 1 - \exp(-V/kT) \}$$

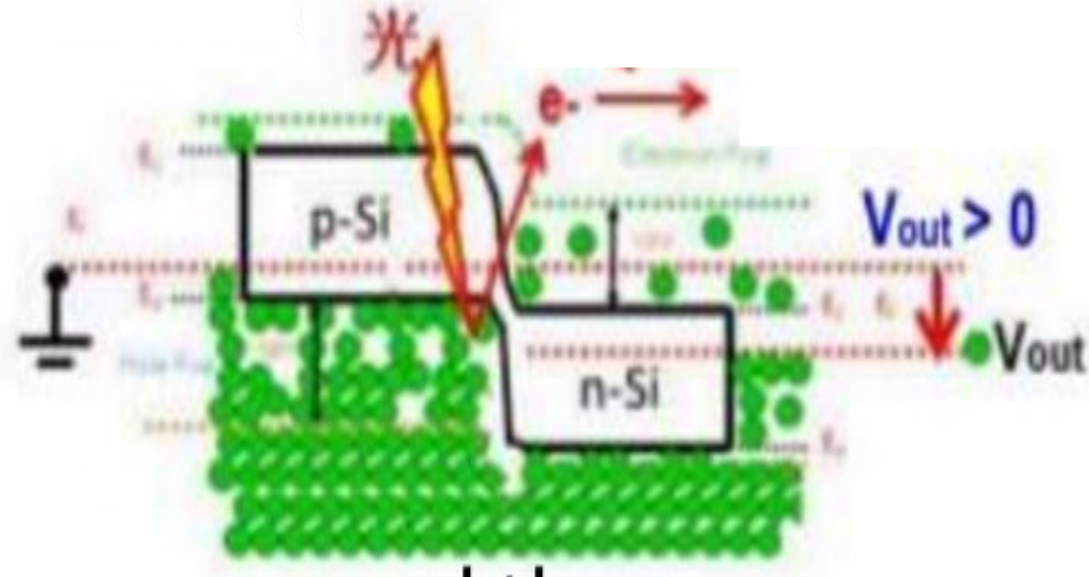




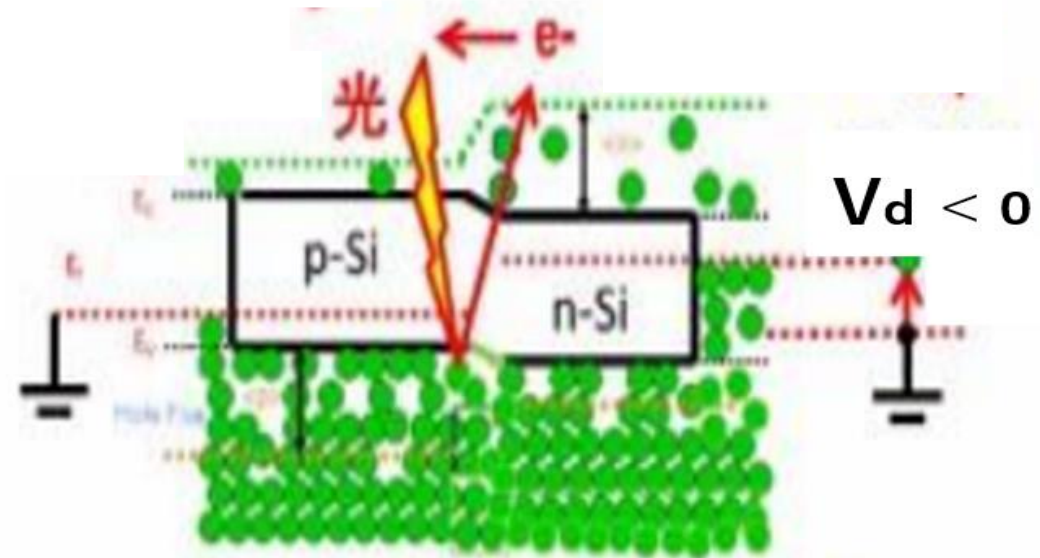
(1) PN junction with No Bias



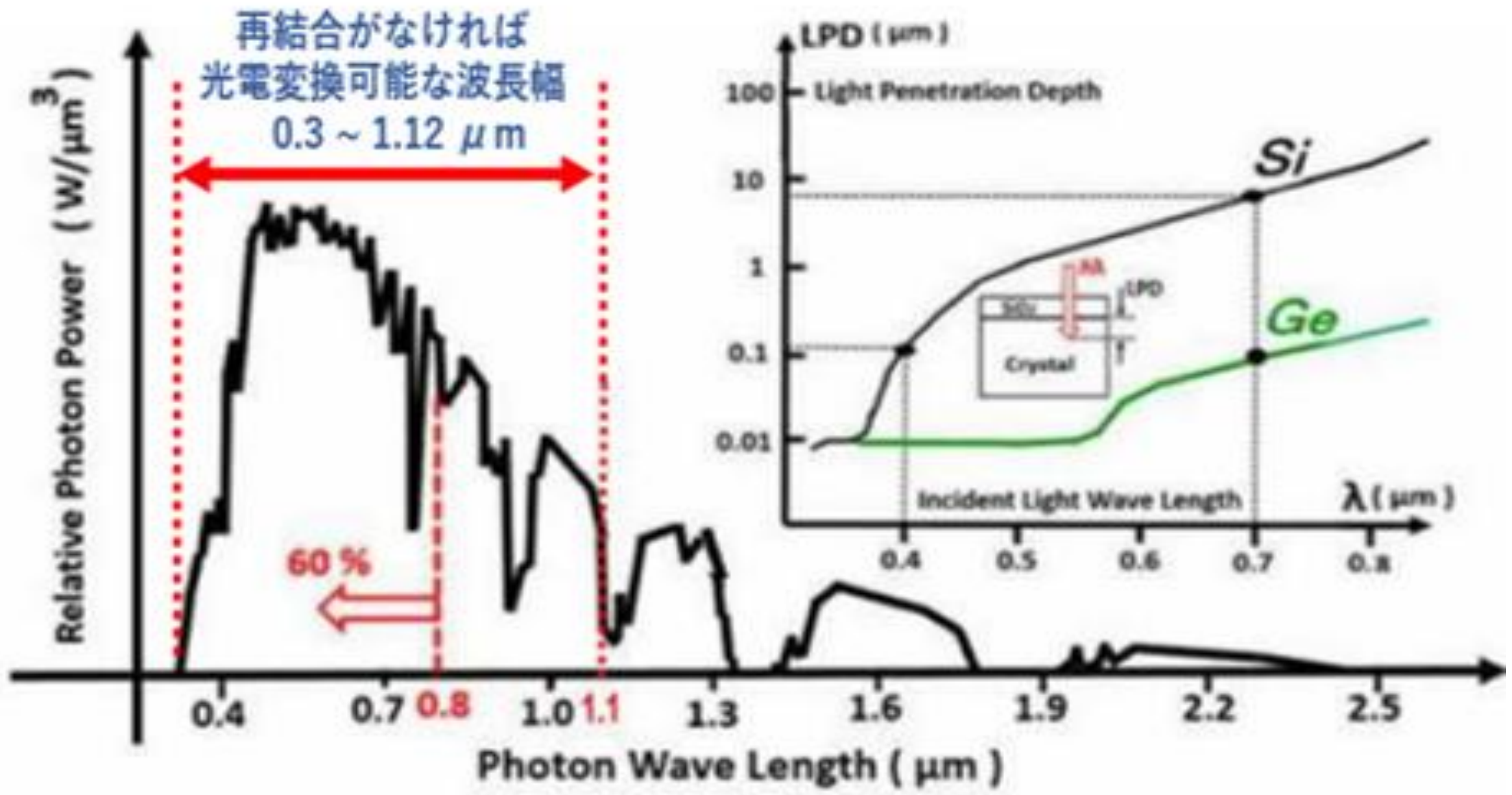
(2) PN junction with Back Bias

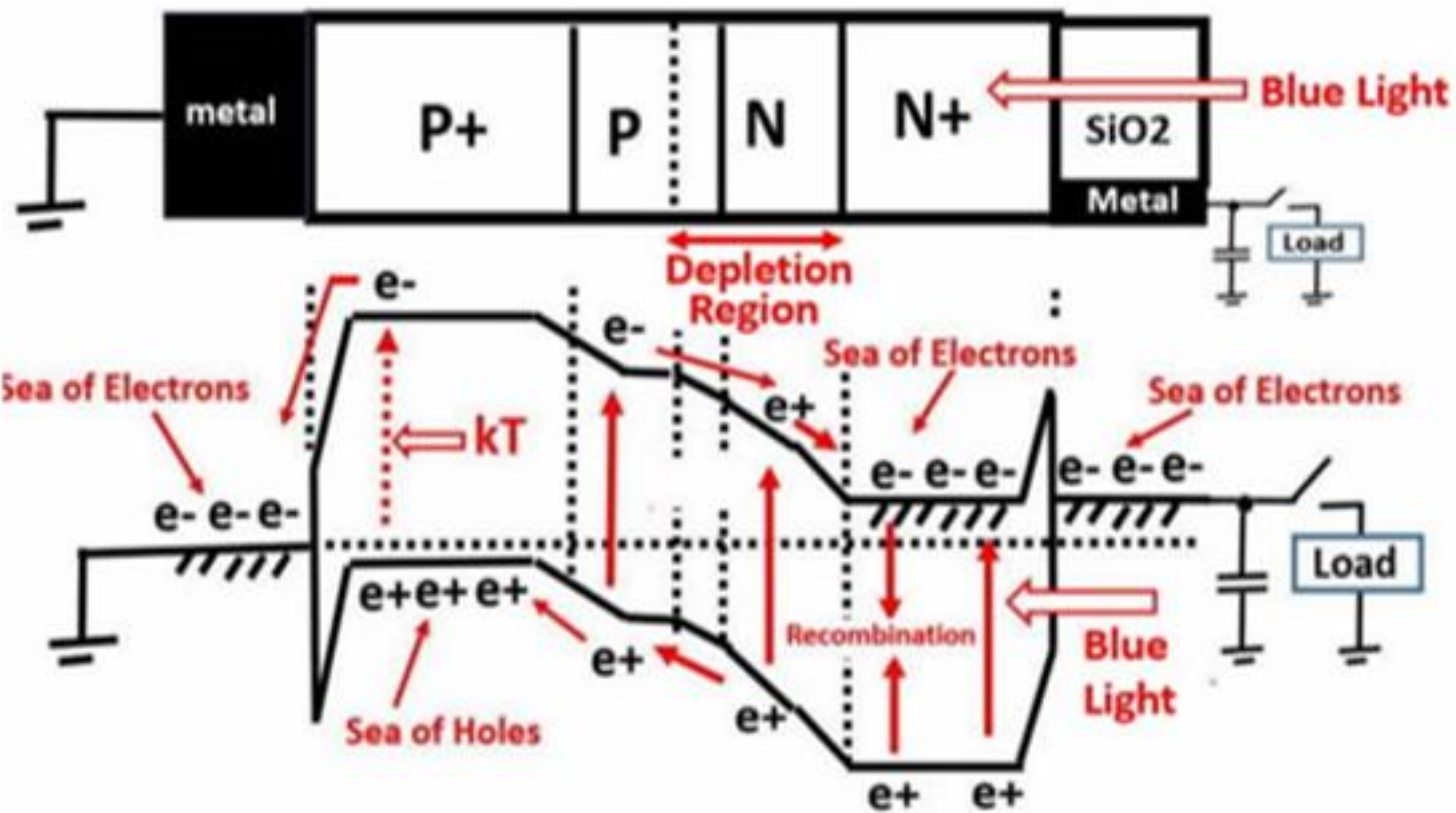


(3) PN junction with Forward Bias



(3) single接合型のダイオードの整流特性

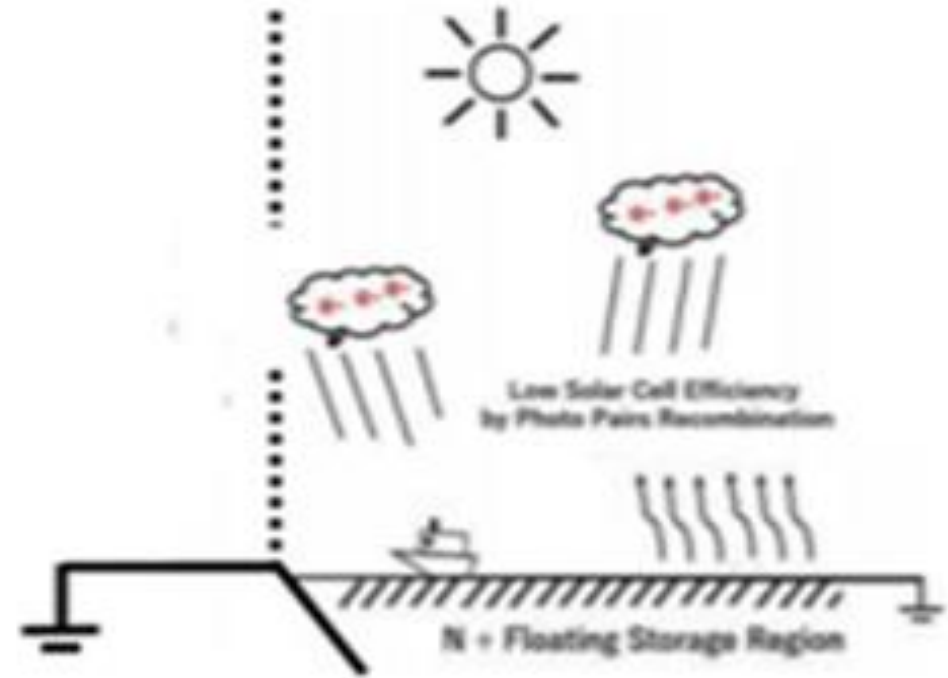
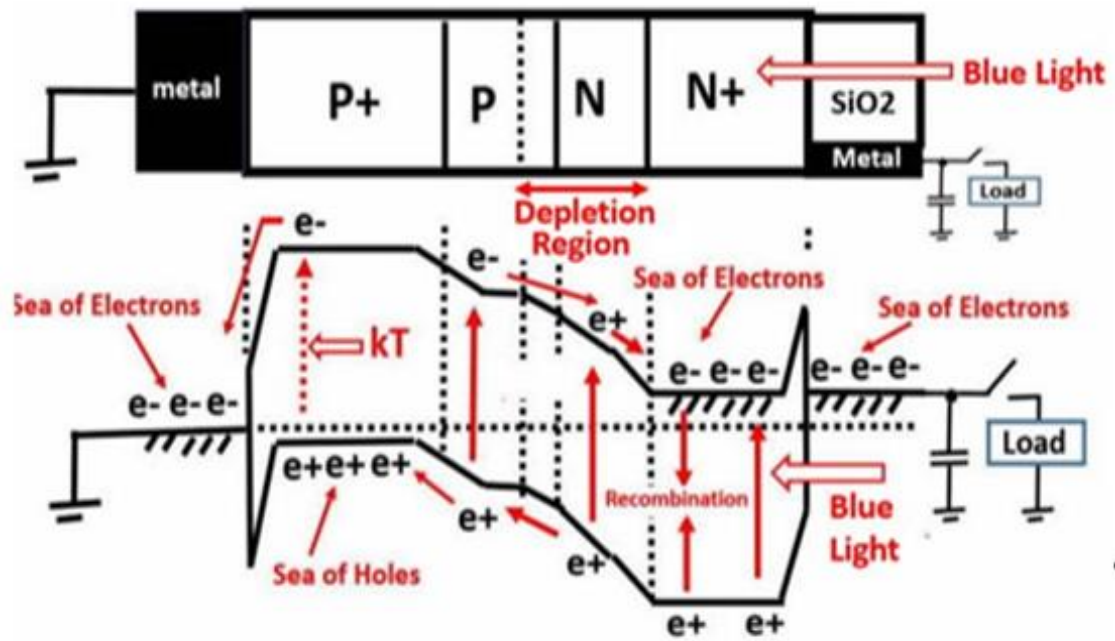
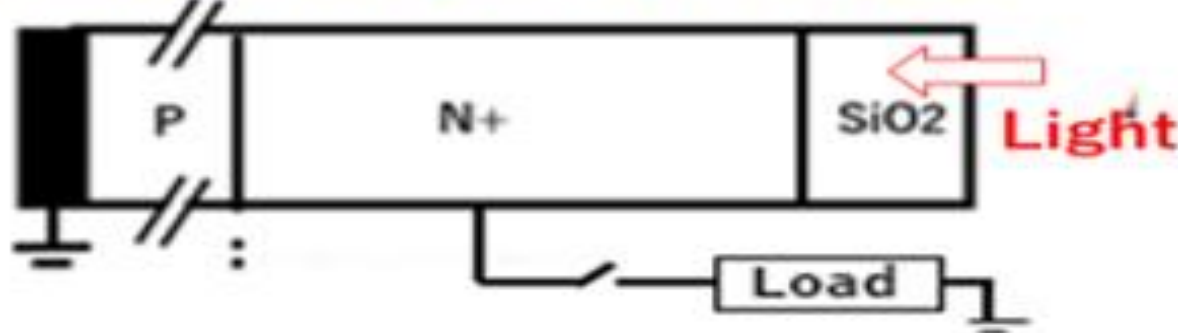
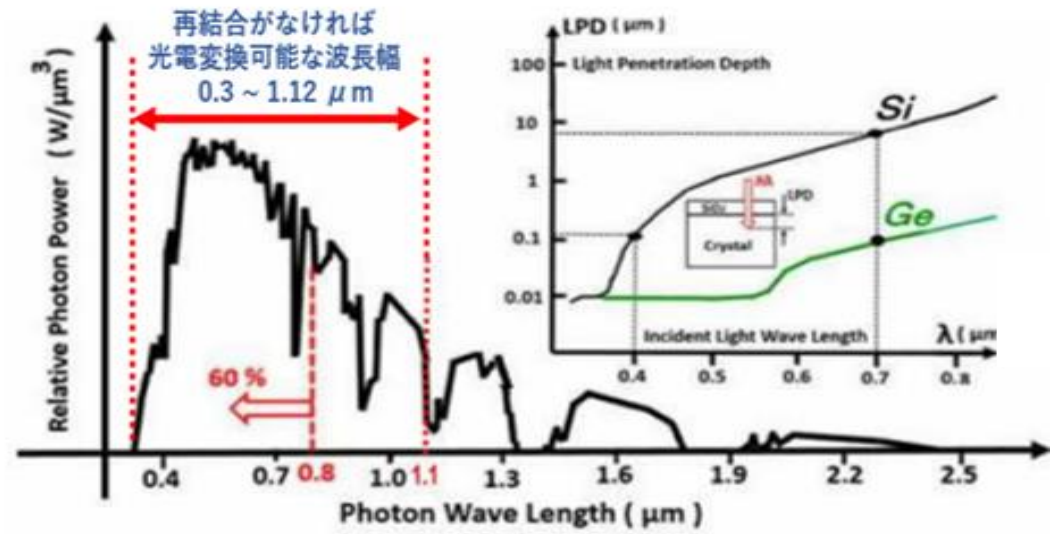




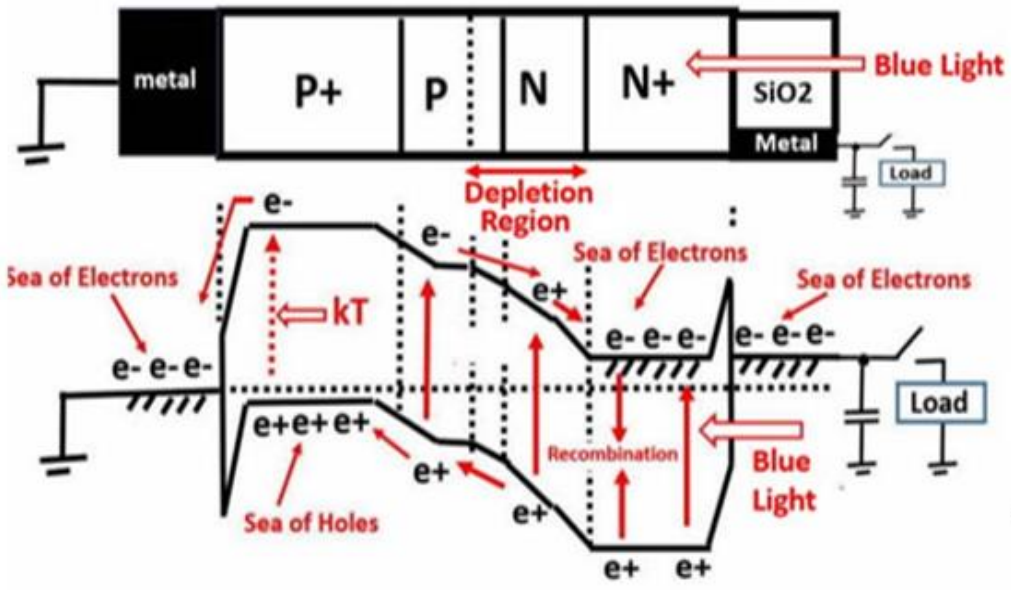
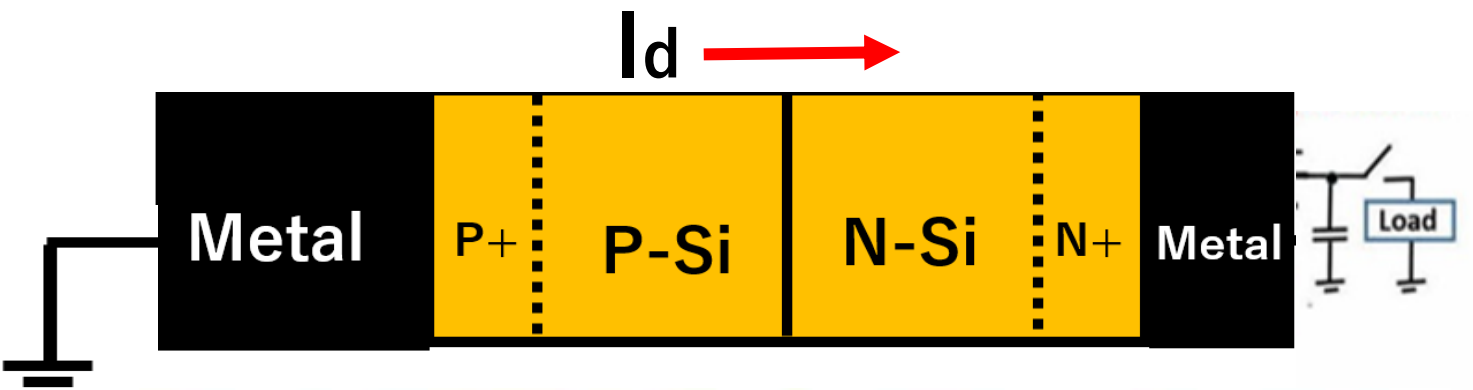
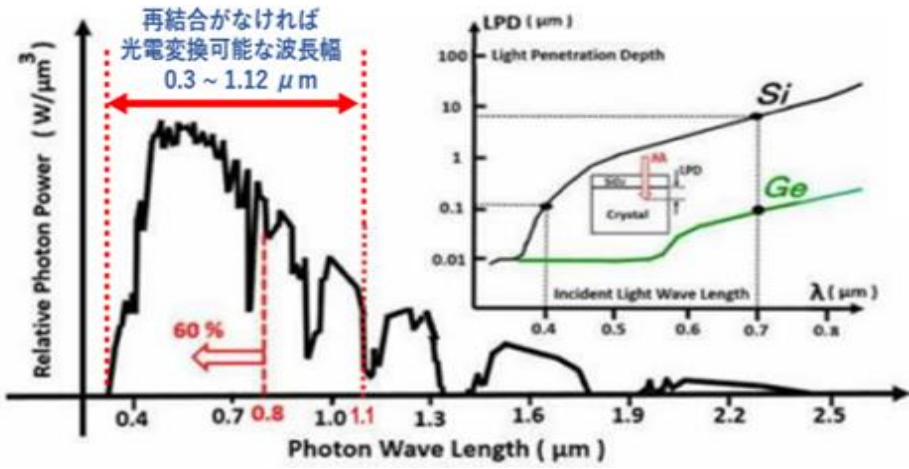
(3) single接合型のダイオードの整流特性

電池（でんち）は、光や熱、化学反応などのエネルギーを、電気に変換する装置（電子部品）である。化学反応によって電気を作る、乾電池などの「化学電池」と、熱や光といった物理エネルギーから電気を作る「物理電池」の2種類がある。太陽光エネルギーから電気を作る電子部品を太陽電池という。

従来のN+P single 接合太陽電池



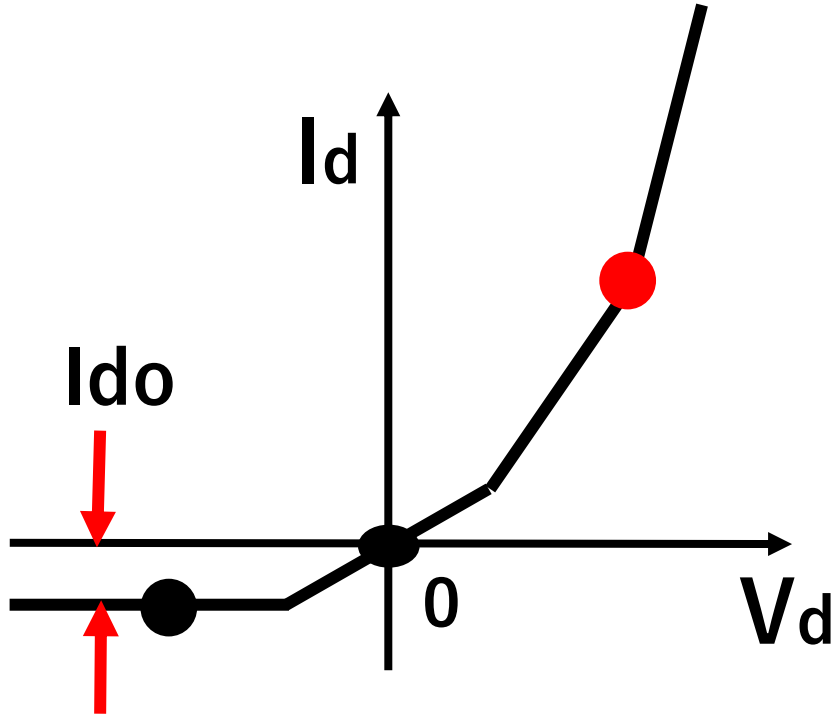
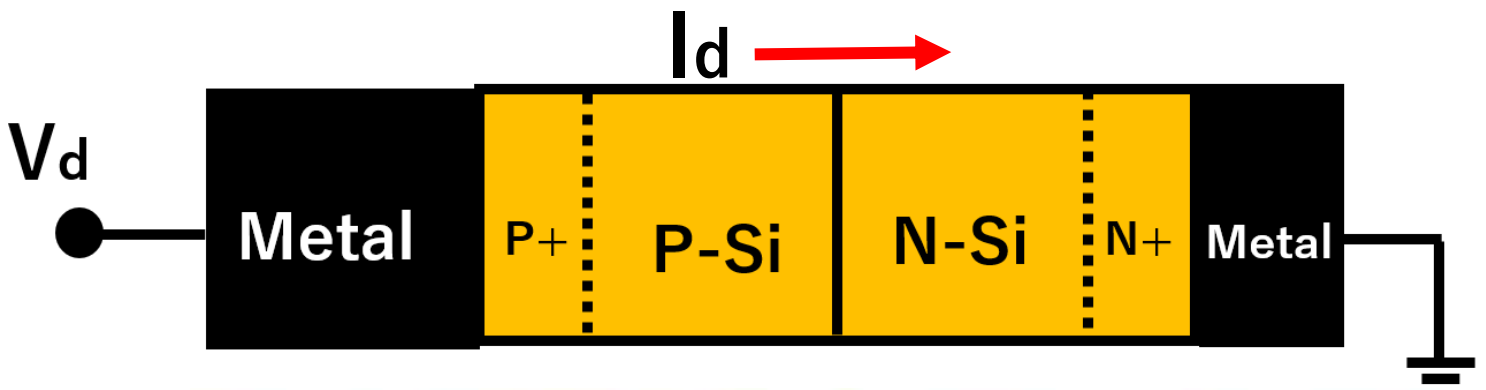
(3) single接合型のダイオードの整流特性



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。単純なPN接合でも外部の金属端子との接続するための金属コンタクトが必要となり必ず両端はP+領域とN+領域でPN接合を挟む必要がある。真ん中のPN接合の接合領域には空乏層領域が生じ、電界バリアが生まれ、その電界を利用して、熱や光エネルギーにより生じる電子と正孔(ホール=Si+イオン)は瞬間的に電界分離が可能である。しかし、空乏層以外のほとんどのP領域とN領域には電界が存在せず、電位はFlat、水平となり、せっかく生まれた電子とホールはその場に漂い、いずれは再結合し熱になって無駄になる。それがSingle接合型太陽電池の性能限界となる。

(3) single接合型のダイオードの整流特性

PN junction Diode with Forward Bias

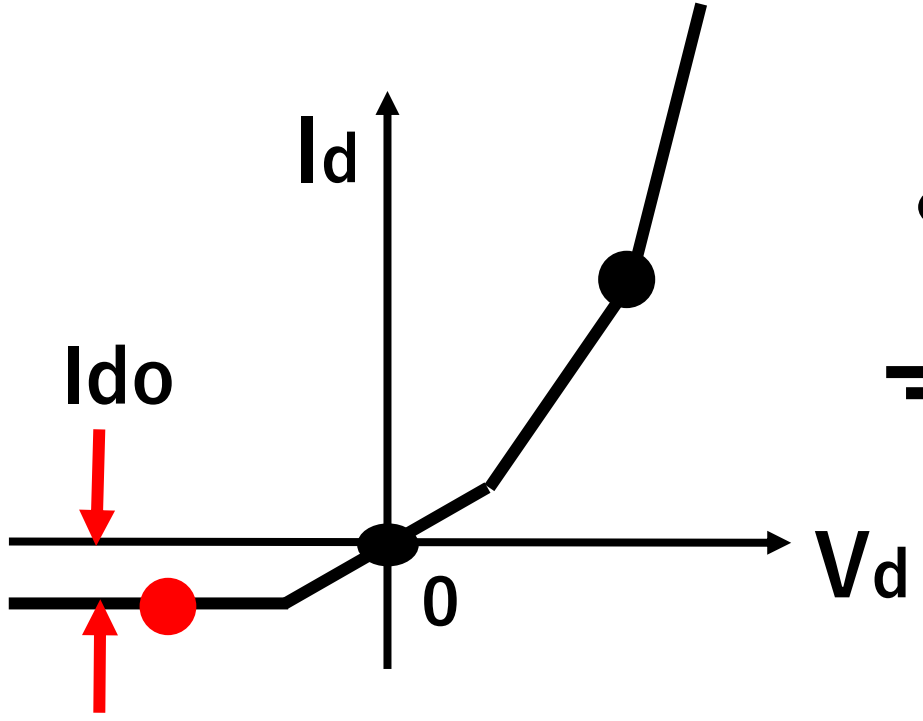
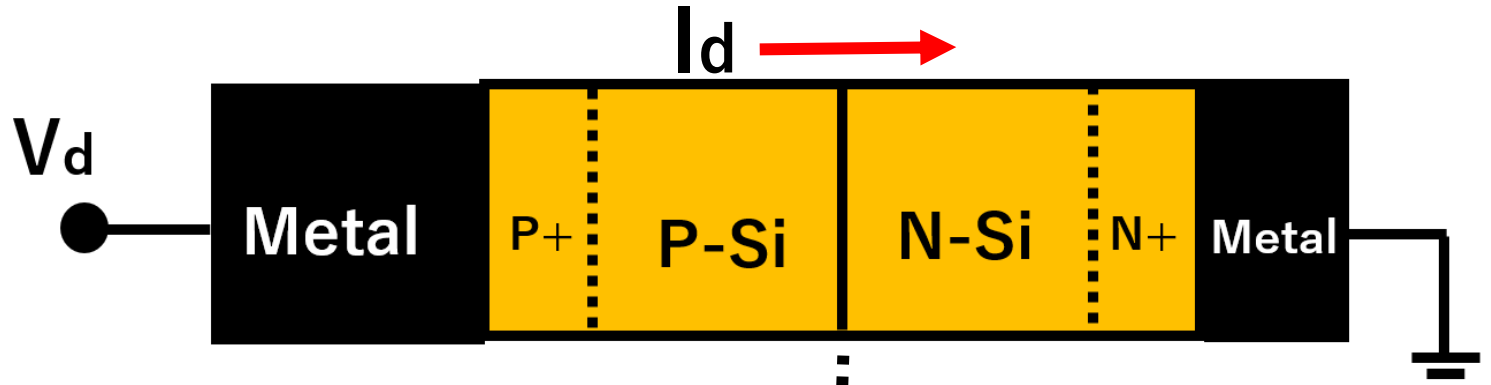


$$I_d = I_{do} \{ \exp (V/kT) - 1 \}$$

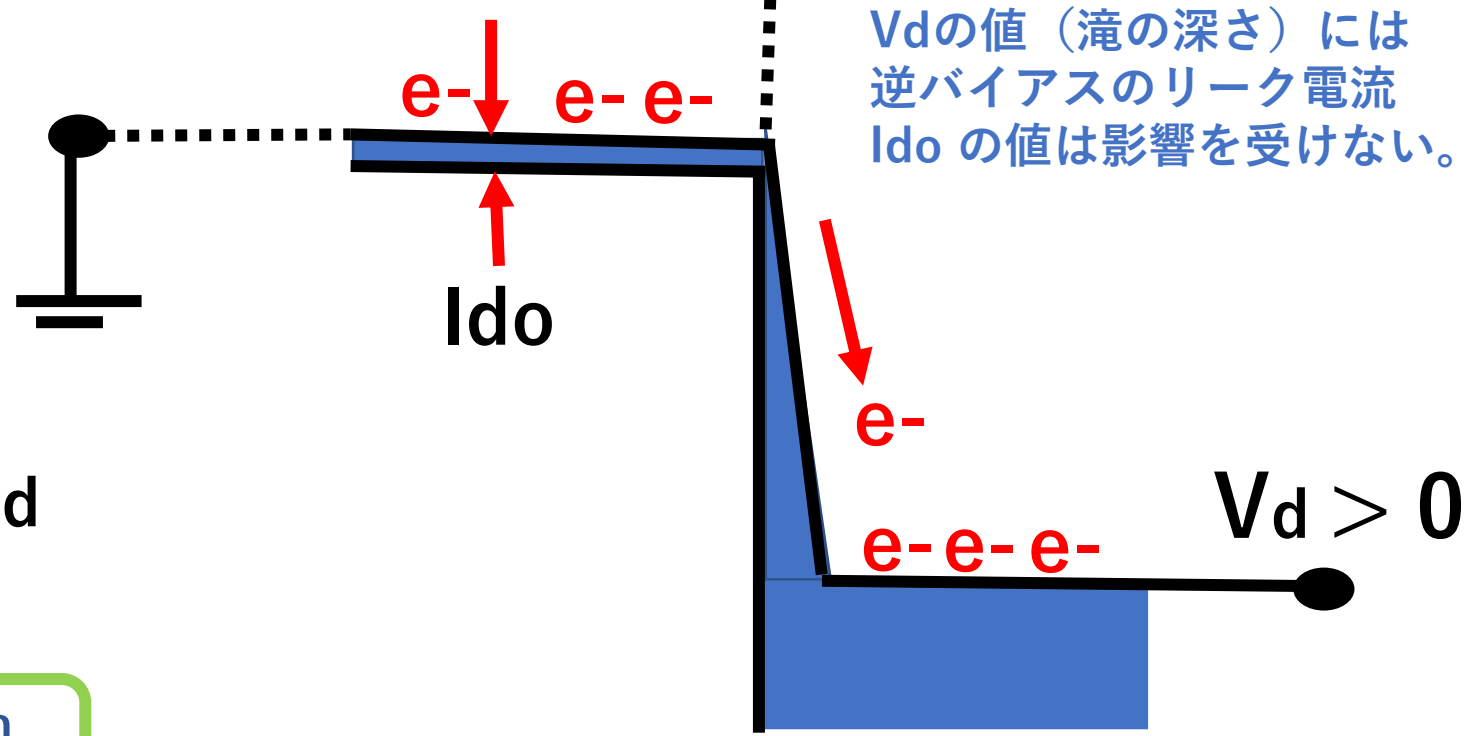
純粹の半導体結晶は非常に高い抵抗値 (R)を持つ抵抗体でオームの法則(V=IR)に従う。N型不純物を混ぜると自由電子の数が増加して抵抗値がさがる。P型不純物を混ぜると自由正孔(ホール)が増加して抵抗値がさがる。不純物濃度をどんどん増加すると半導体は金属の性質に近づき、金属との半導体の接合面はトンネル現象で抵抗ゼロの状態(オーミック接合)となる。単純なPN接合でも外部の金属端子との接続するための金属コンタクトが必要となり必ず両端はP+領域とN+領域でPN接合を挟む必要がある。真ん中のPN接合の接合領域には空乏層領域が生じ、電界バリアが生まれ、その電界を利用して、熱や光エネルギーにより生じる電子と正孔(ホール=Si+イオン)は瞬間的に電界分離が可能である。しかし、空乏層以外のほとんどのP領域とN領域には電界が存在せず、電位はFlat、水平となり、せっかく生まれた電子とホールはその場に漂い、いずれは再結合し熱になって無駄になる。それがSingle接合型太陽電池の性能限界となる。

(3) single接合型のダイオードの整流特性

PN junction Diode with Back Bias



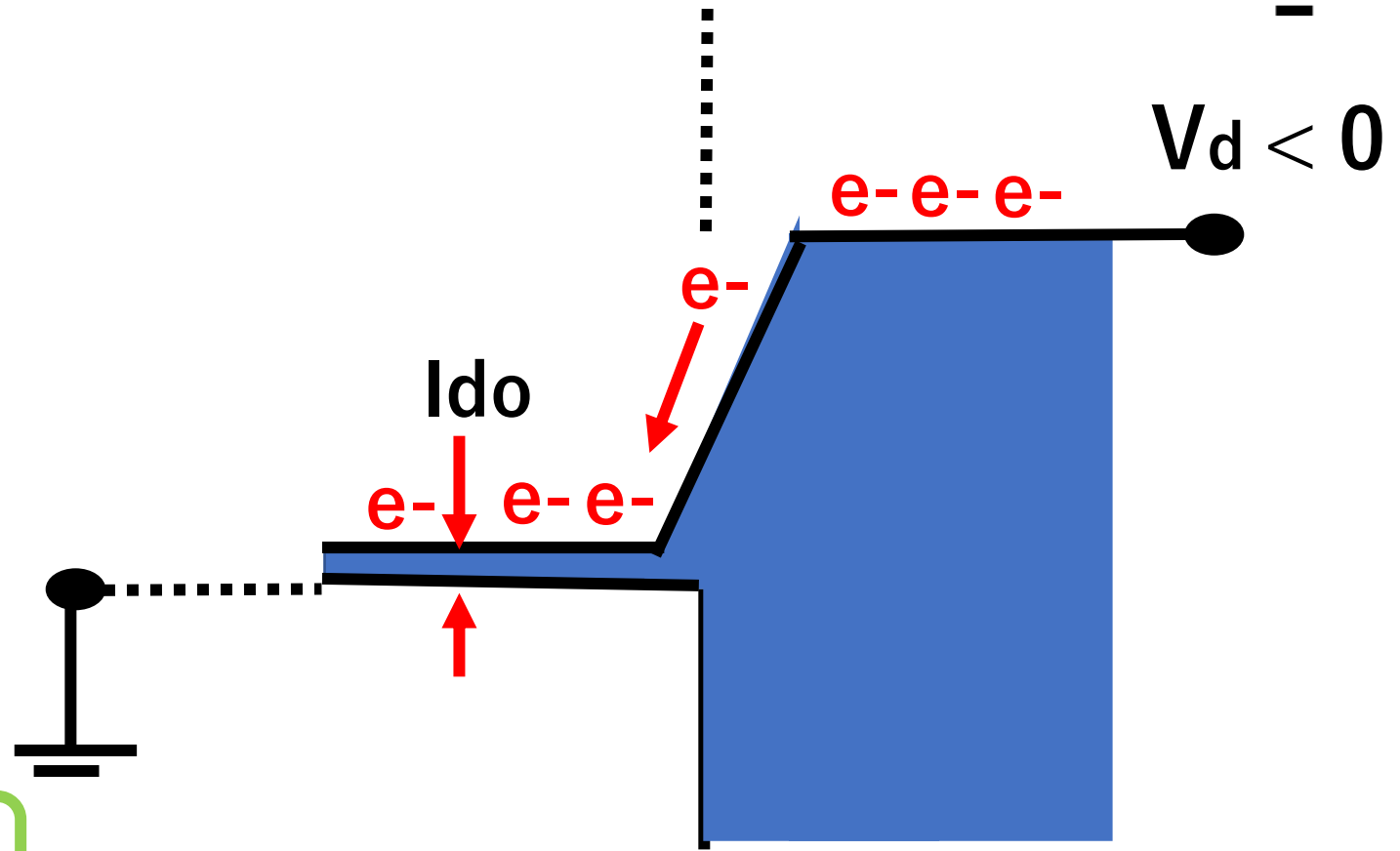
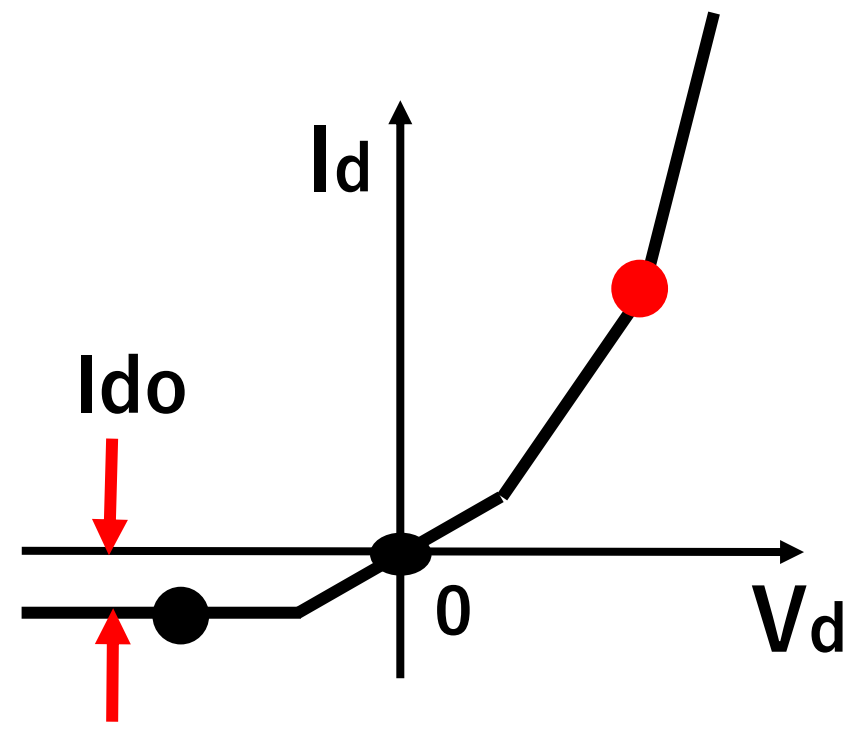
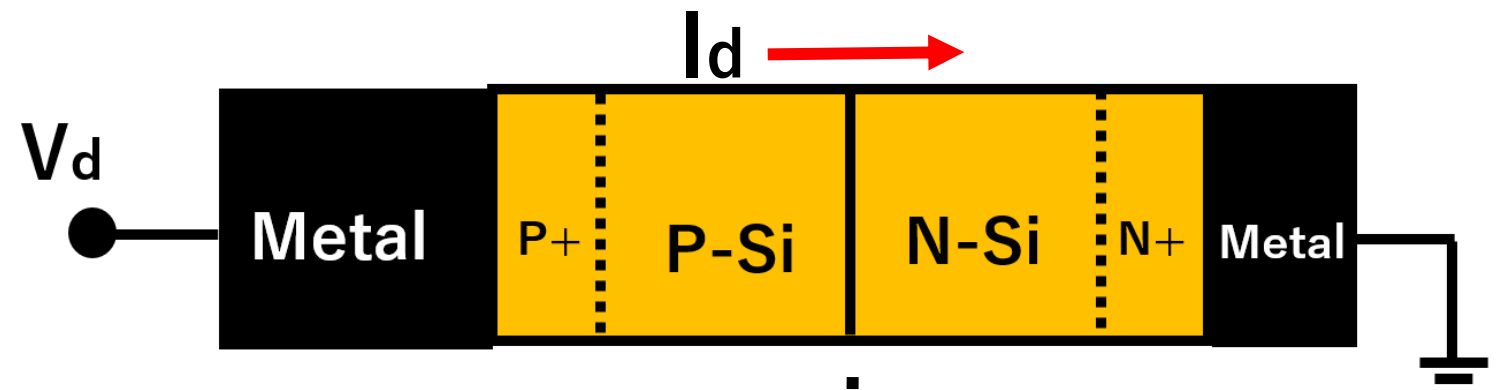
$$I_d = I_{d0} \{ \exp (V/kT) - 1 \}$$



Vdの値（滝の深さ）には逆バイアスのリーク電流 Id0 の値は影響を受けない。

(3) single接合型のダイオードの整流特性

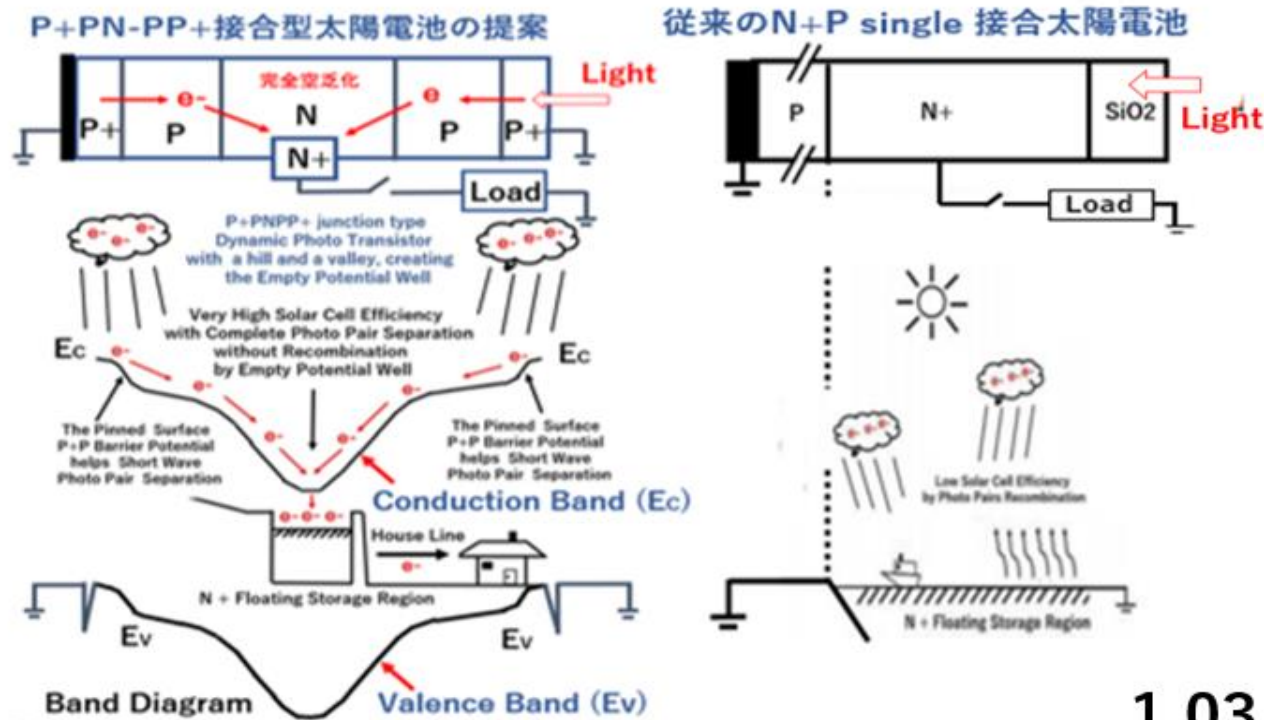
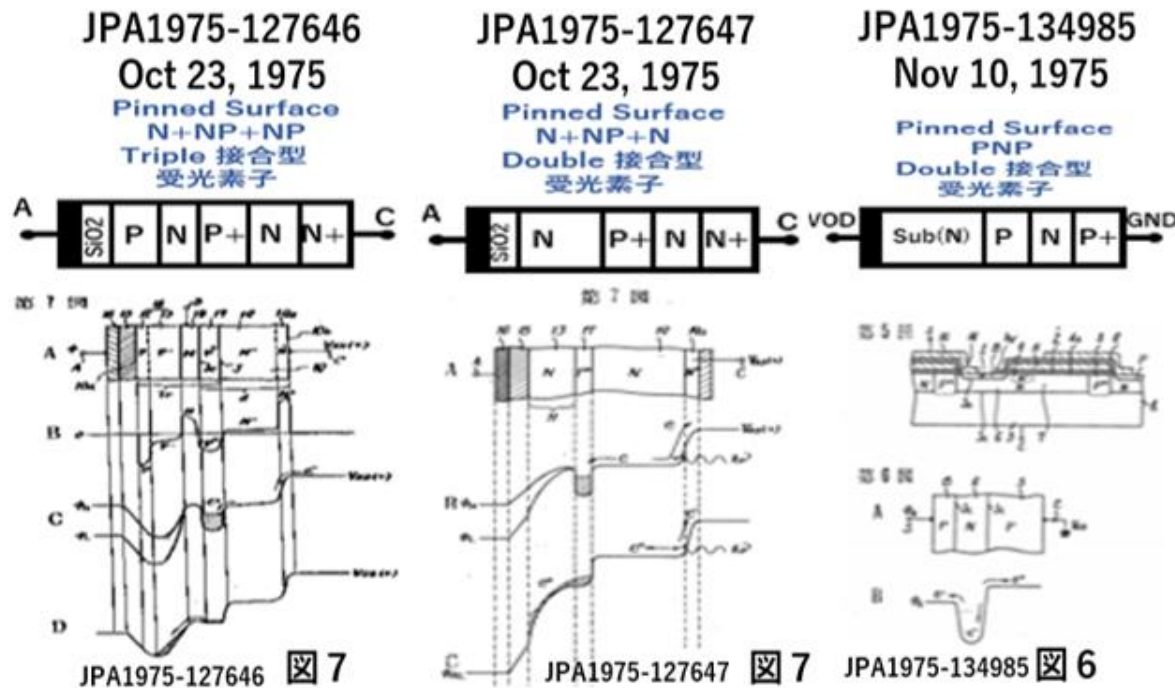
PN junction Diode with Forward Bias



$$I_d = I_{do} \{ \exp (V/kT) - 1 \}$$

新型電池はぜひ一般の人にも関心をもっていたきたいです。

政府も企業も自治体も動かして、この萩原が提案する新型の太陽電池を含めて、半導体電子デバイス国の戦略製品として産業のコメとして政府の支援で国産化を推進してほしいです。

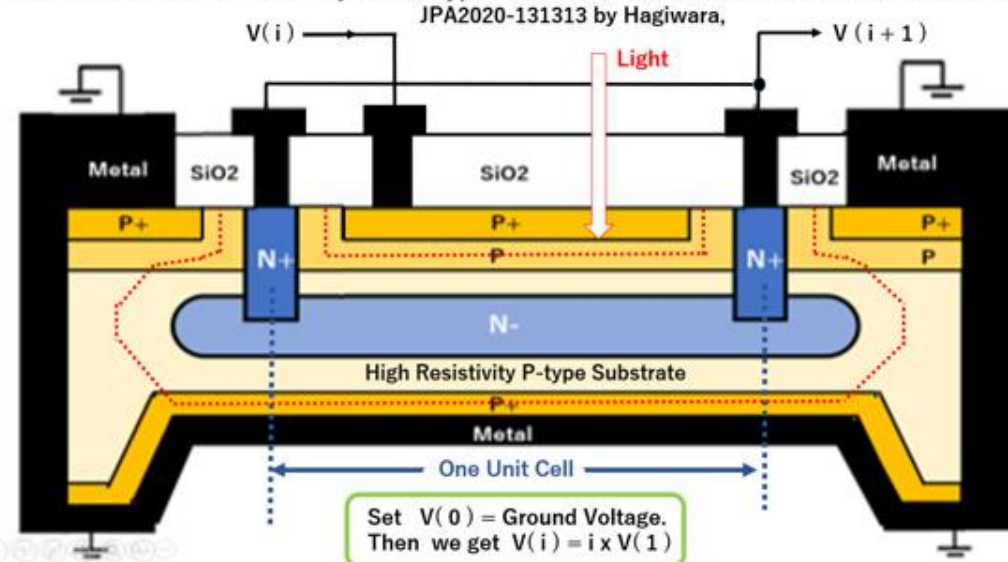


題目： 人工知能ロボットを支える、超光感度の賢い電子の目を太陽電池に応用する

概要

まず超光感度イメージセンサーの発明と歴史的な開発努力について解説する。半導体の集積化技術の進歩により賢い電子の目を持つ AI ROBOT が実現し身近にスマホやコンピュータが多数存在し多くの半導体部品がその原動力となる電気エネルギーを必要とする時代となったが、石油エネルギーから脱却しよりクリーンな水力、風力、地熱エネルギーや太陽光エネルギーを必要とする。超光感度のイメージセンサーも、太陽電池もその動作原理は同じものである。

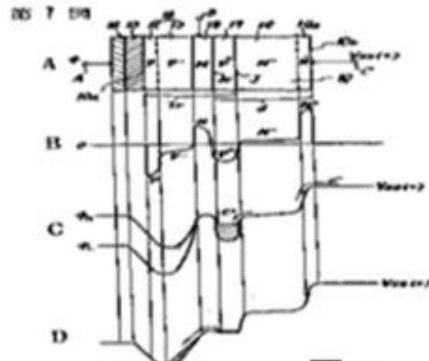
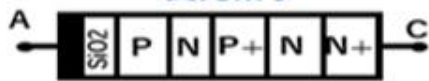
One Unit Cell of P+PN-PP+ junction type Solar Cell, which can be connected in series.



JPA1975-127646

Oct 23, 1975

Pinned Surface
N+NP+NP
Triple 接合型
受光素子

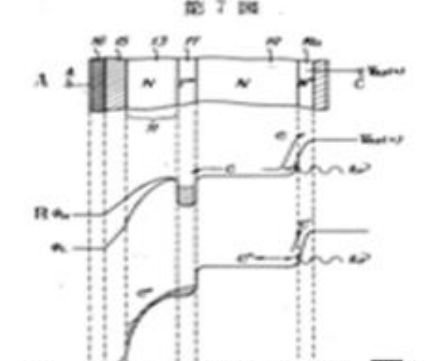
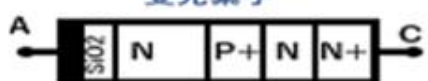


JPA1975-127646 図 7

JPA1975-127647

Oct 23, 1975

Pinned Surface
N+NP+NP
Double 接合型
受光素子

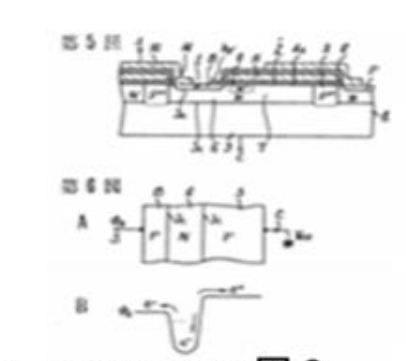
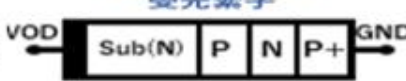


JPA1975-127647 図 7

JPA1975-134985

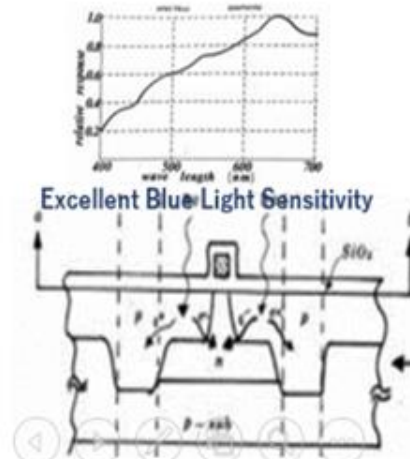
Nov 10, 1975

Pinned Surface
PNP
Double 接合型
受光素子

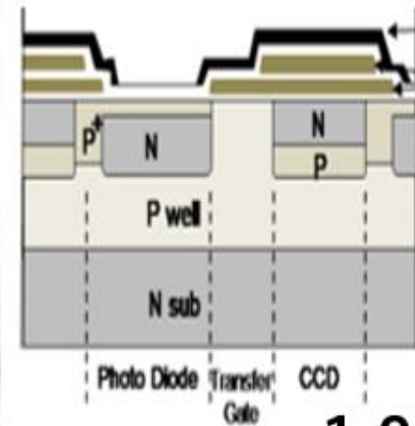
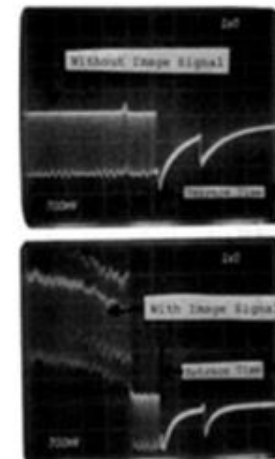


JPA1975-134985 図 6

SSDM1978 Paper



SSIS Semiconductor History Museum

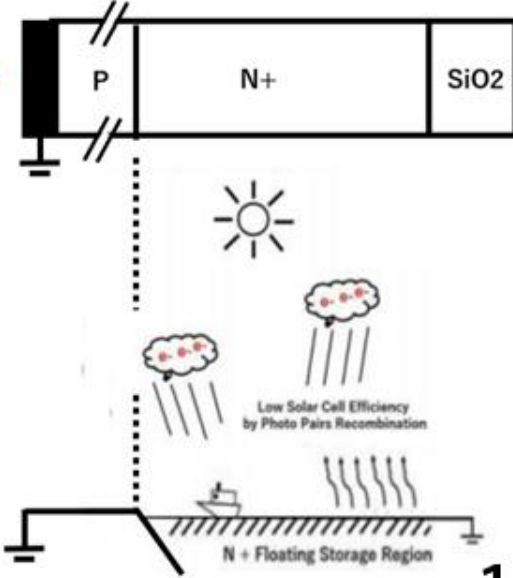
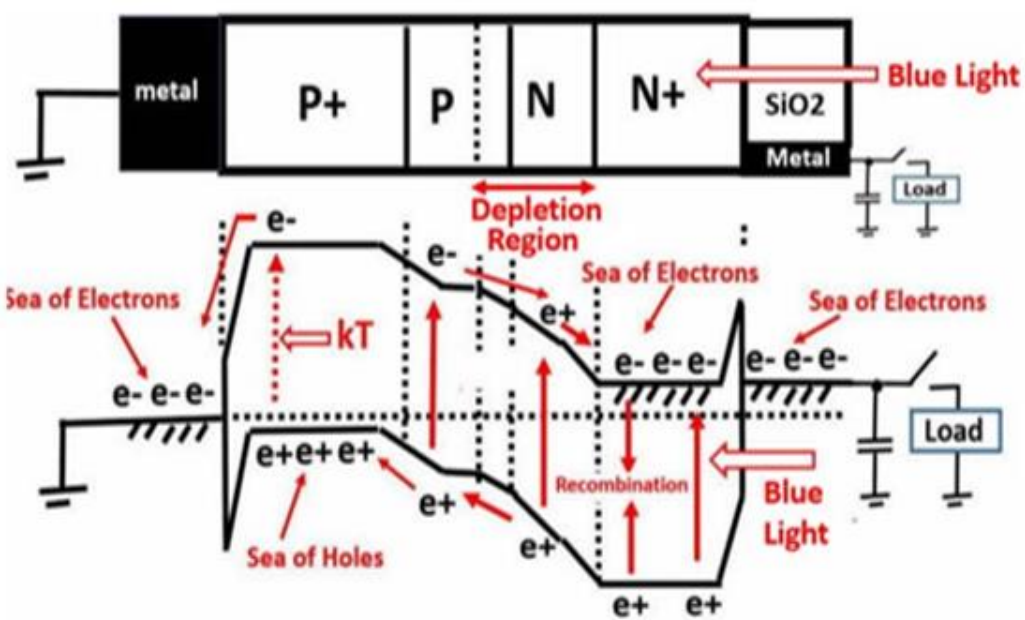
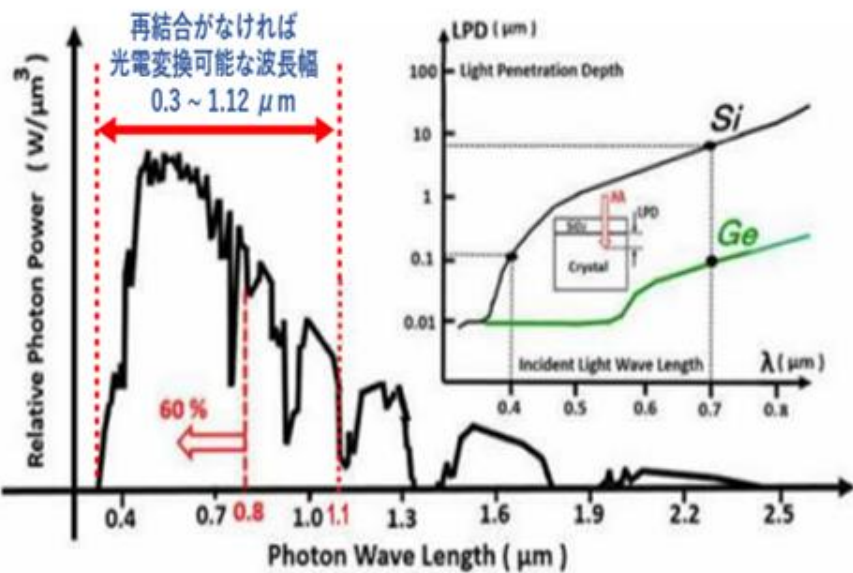
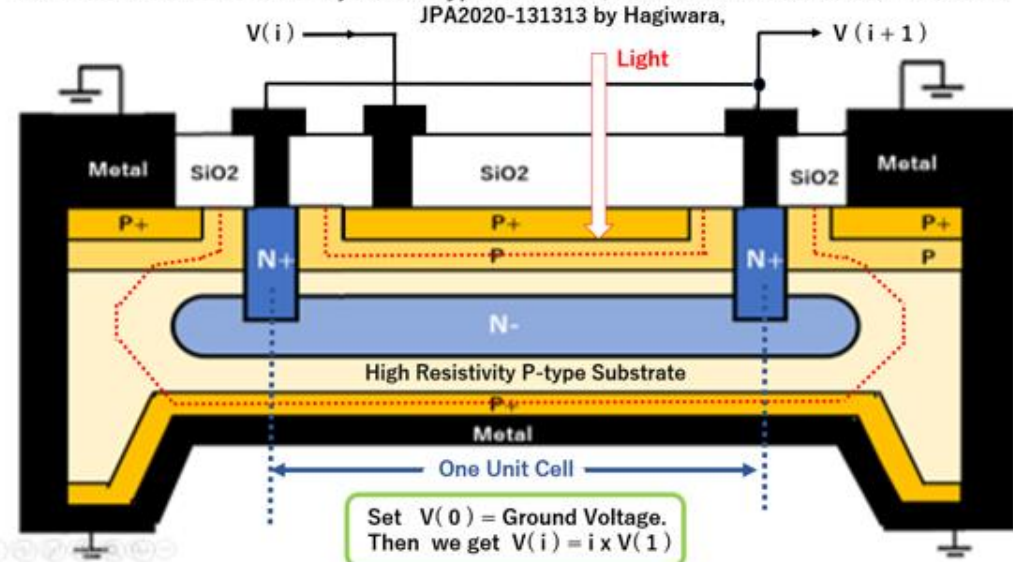


題目： 人工知能ロボットを支える、超光感度の賢い電子の目を太陽電池に応用する

概要

両者とも光エネルギー（情報）を電気エネルギー（情報）に変換する半導体素子である。一方、色再現豊かな映像の実現の為に短波長青色感度特性は不可欠である。また太陽光には短波長エネルギー成分が豊富である。しかし短波長青色光は半導体結晶体内を透過する深度が非常に浅い。従来構造の受光面（N+）が浮遊状態にあるN+P接合型の受光素子では受光表面の近傍の電位は平坦となる。従って、受光表面には電界がない。半導体結晶体の表面近傍では、せっかく光電変換して生じた光電子とホールペアであるが電界が不在である為に、光電子とホールペアは分離移動することができない。その場にとどまり遂は再結合して熱となり無駄になっているのが現状である。

One Unit Cell of P+PN-PP+ junction type Solar Cell, which can be connected in series.

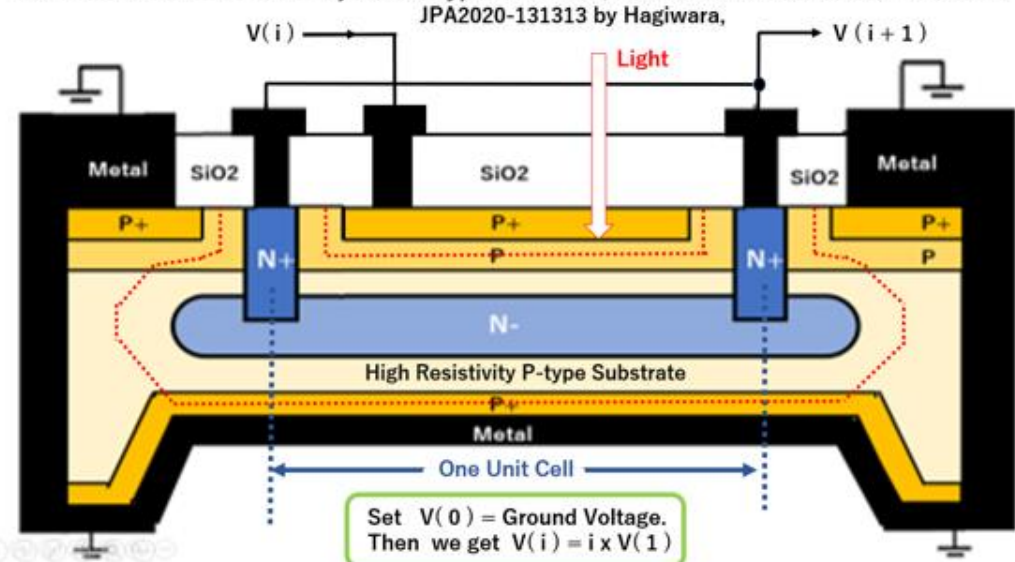


題目： 人工知能ロボットを支える、超光感度の賢い電子の目を太陽電池に応用する

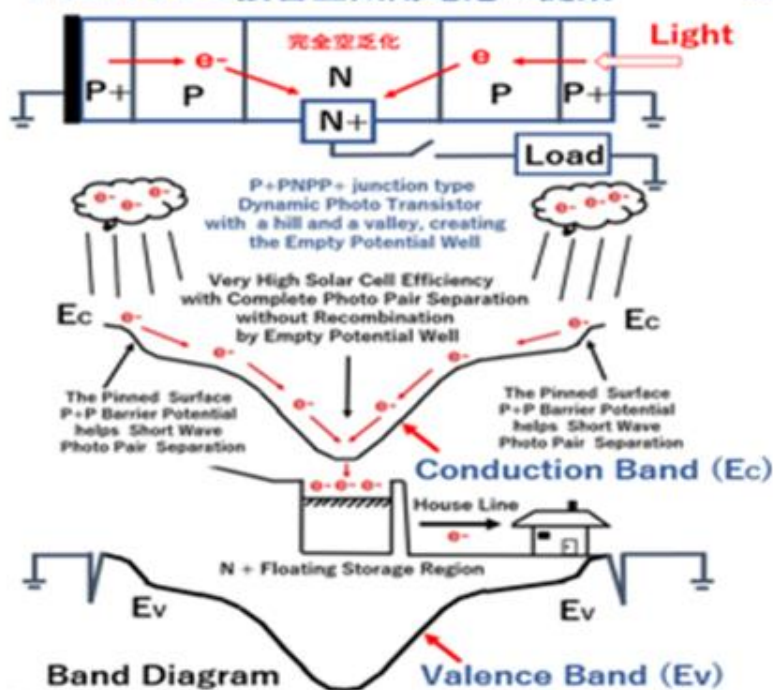
概要

1975年に萩原良昭が発明(JPA1975-127646, JPA1975-127647, JPA1975-134985)考案した超光感度のイメージセンサーの受光素子構造は、Double 接合型の受光素子である。通称、Pinned Photodiodeと呼ばれる受光素子である。短波長青色光に対する感度特性が優れている事が知られているが、その受光素子構造を太陽電池の光電変換効率向上のために採用することを提案する。

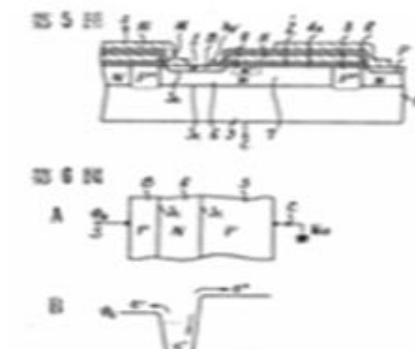
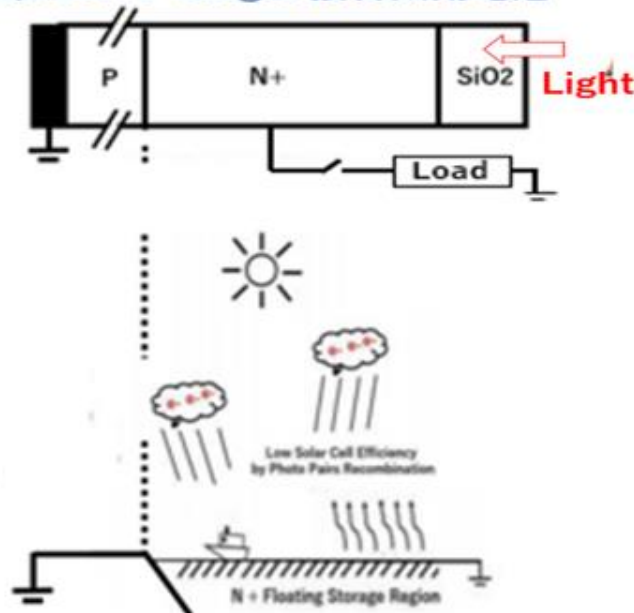
One Unit Cell of P+PN-PP+ junction type Solar Cell, which can be connected in series.



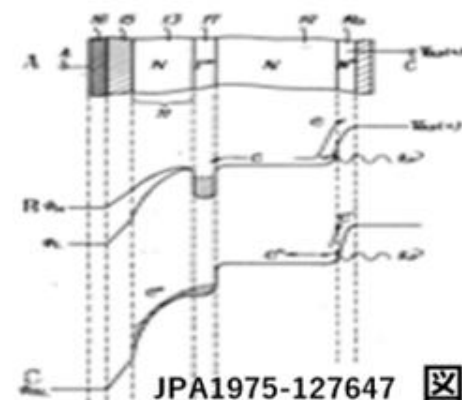
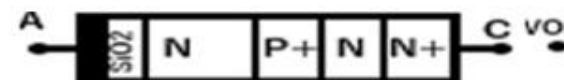
P+PN-PP+接合型太陽電池の提案



従来のN+P single 接合太陽電池



JPA1975-134985 図 6



JPA1975-127647 図 7

38万画素に達した固体撮像素子

最低照度5lxの高感度 インターライン型CCD

基板に余剰電荷を掃き出し、可変電子シャッタを実現

ソニー 半導体事業本部 CCD 事業部

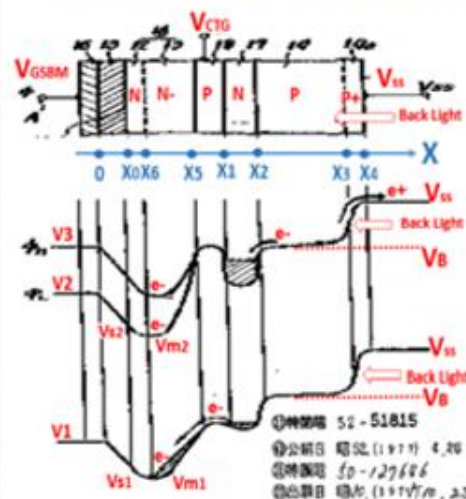
浜崎 正治
鈴木 智行
賀川 能明
石川 貴久枝
宮田 克郎

ソニー国分セミコンダクタ CCD 製造部

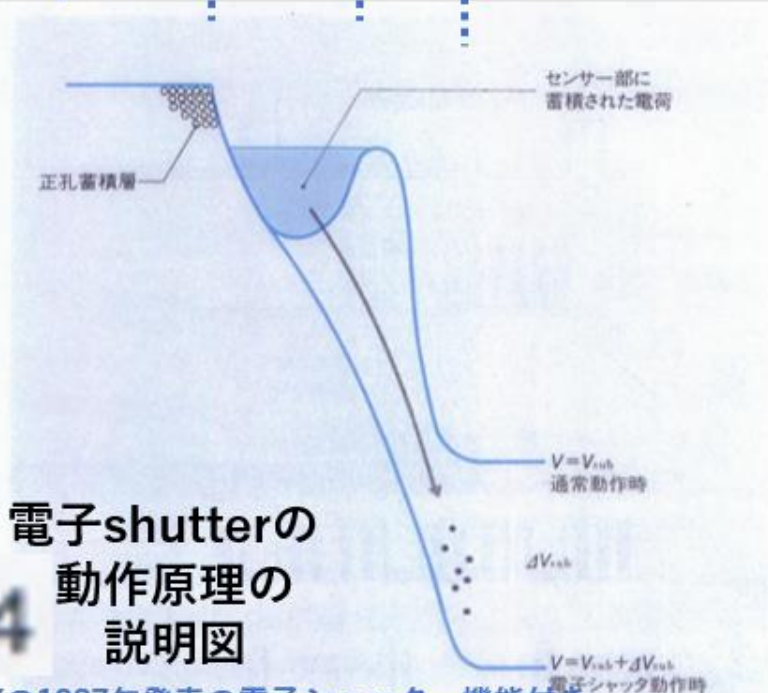
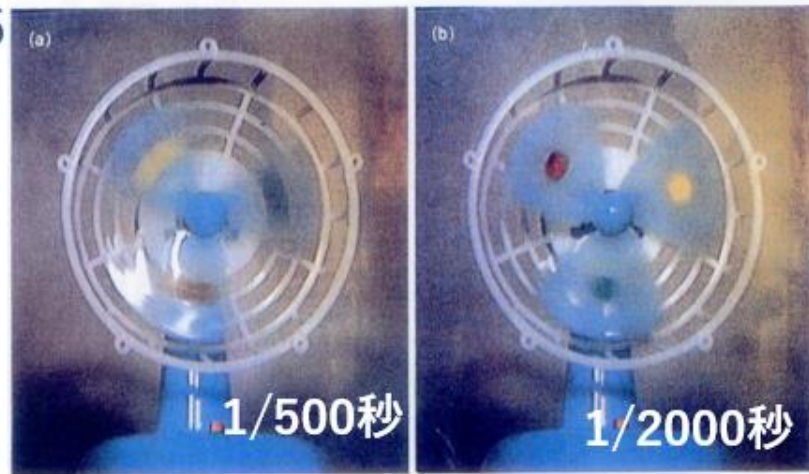
神戸 秀夫

最も一般的な固体撮像素子であるインターライン型CCDで、2/3インチで38万と大規模な画素数を持つ素子をソニーが製品化した。画素面積が小さくなることで減少する信号量を確保するため、縦型オーバーフロー・ドレインを採用して開口率を上げ、補色フィルタで光の利用効率を上げた。さらに界面準位からの暗電流を抑えている。この結果、81dBのダイナミック・レンジが得られた。

JPA1975-127646



JPA1975-127646の図7と同一受光構造である。受光表面はGNDにピン留めされた、P+NPNsub 接合型、すなわち Triple 接合型の Pinned Photodiode.

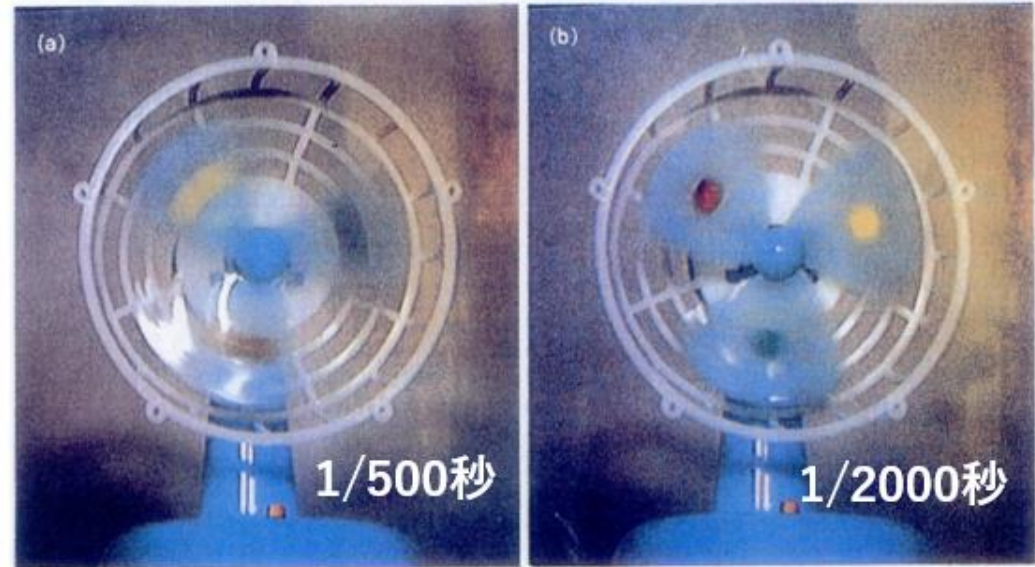


電子shutterの動作原理の説明図

題目： 人工知能ロボットを支える、超光感度の賢い電子の目を太陽電池に応用する

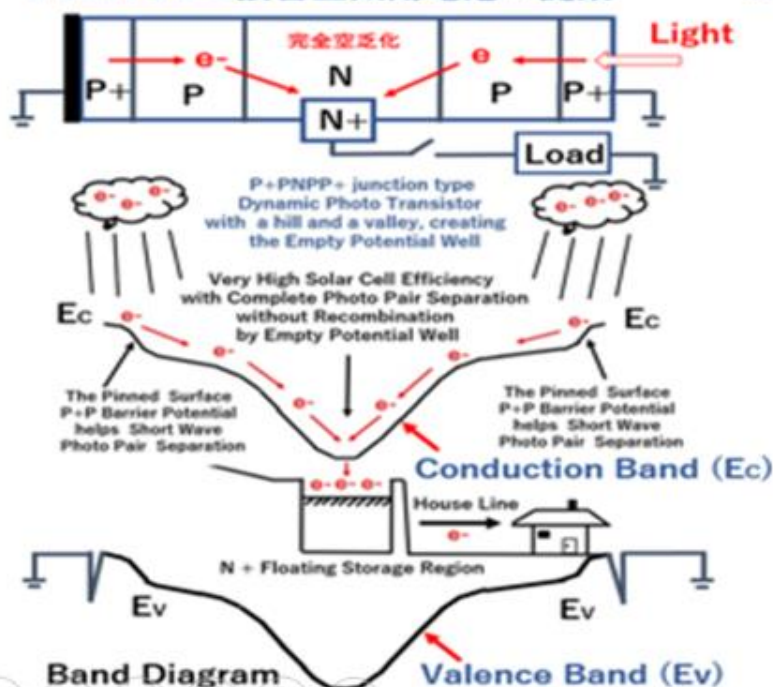
概要

1975年に萩原良昭が発明(JPA1975-127646, JPA1975-127647, JPA1975-134985)考案した超光感度のイメージセンサーの受光素子構造は、Double 接合型の受光素子である。通称、Pinned Photodiodeと呼ばれる受光素子である。短波長青色光に対する感度特性が優れている事が知られているが、その受光素子構造を太陽電池の光電変換効率向上のために採用することを提案する。

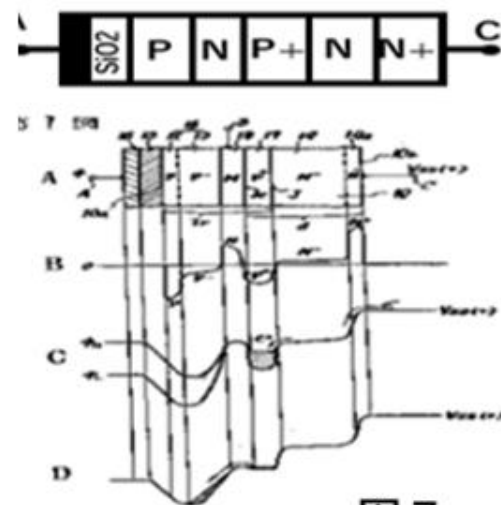
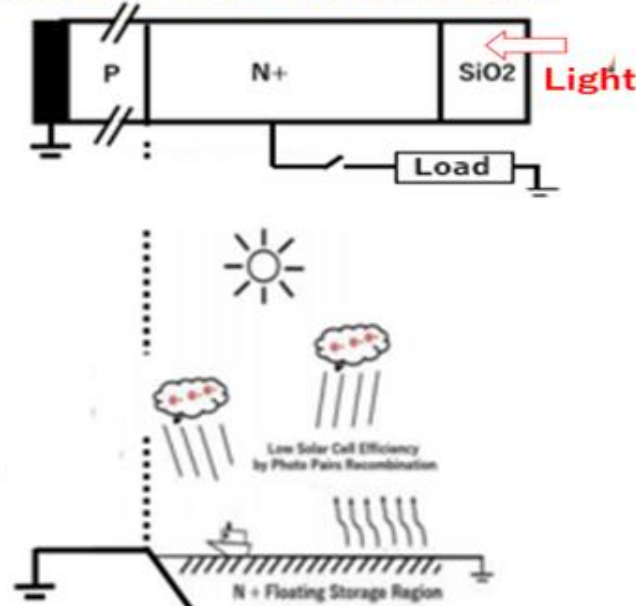


電子シャッター機能付きビデオカメラ Sony 1987

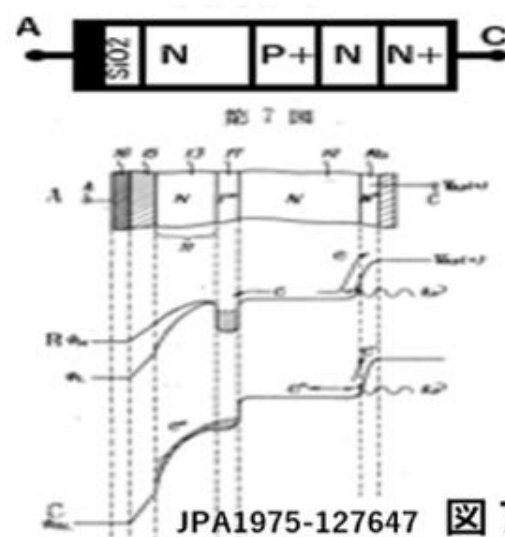
P+PN-PP+接合型太陽電池の提案



従来のN+P single 接合太陽電池



JPA1975-127646 図7



JPA1975-127647 図7

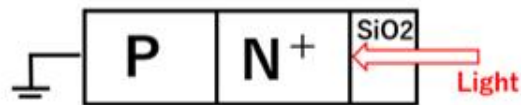
題目： 人工知能ロボットを支える、超光感度の賢い電子の目を太陽電池に応用する

概要

1975年に萩原良昭が発明(JPA1975-127646, JPA1975-127647, JPA1975-134985)考案した超光感度のイメージセンサーの受光素子構造は、Double 接合型の受光素子である。通称、Pinned Photodiodeと呼ばれる受光素子である。短波長青色光に対する感度特性が優れている事が知られているが、その受光素子構造を太陽電池の光電変換効率向上のために採用することを提案する。

Pinned Photodiodeの発明と開発努力

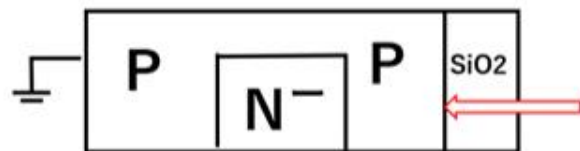
(1) Before 1970



(2) CCD Bell Lab, USA 1970

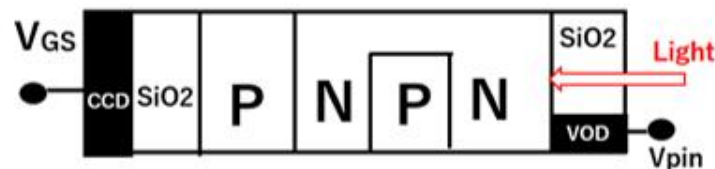


(3) Philips Netherland, June 9, 1975

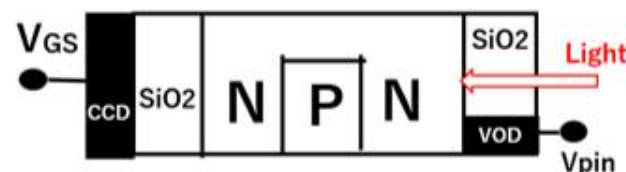


Netherland Patent 7506795 (JPA1976-65705)

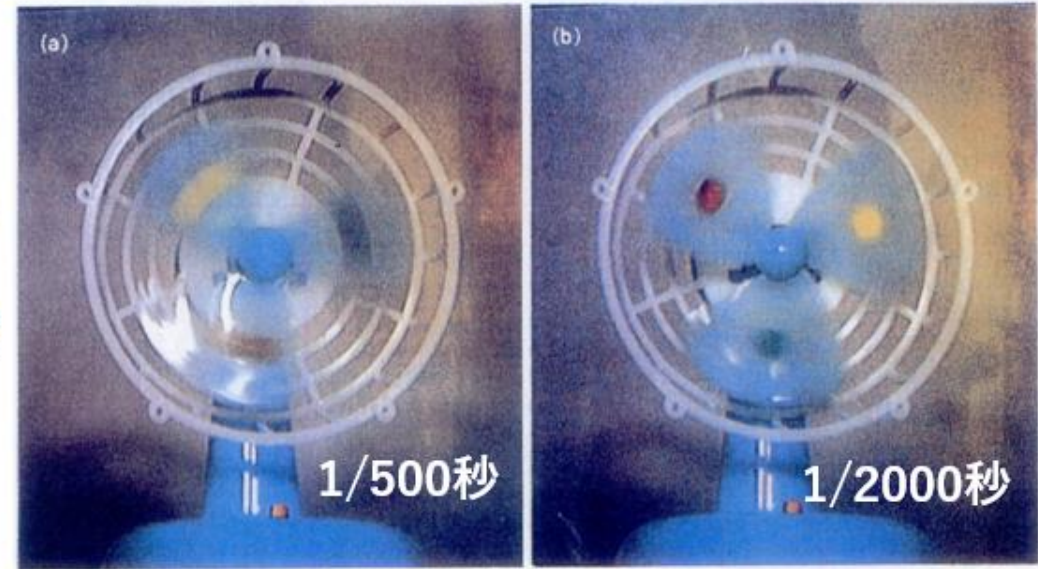
(4a) Sony (Hagiwara) Oct 23, 1975 JPA1975-127646



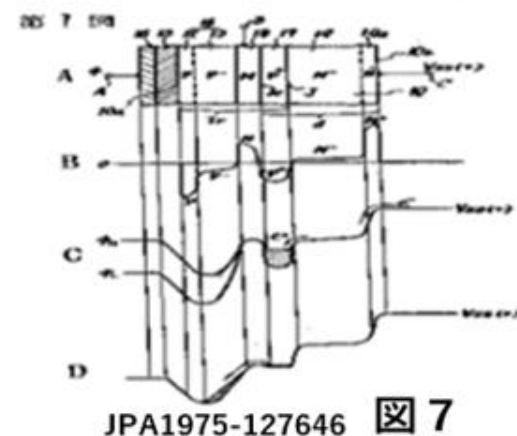
(4b) Sony (Hagiwara) Oct 23, 1975 JPA1975-127647



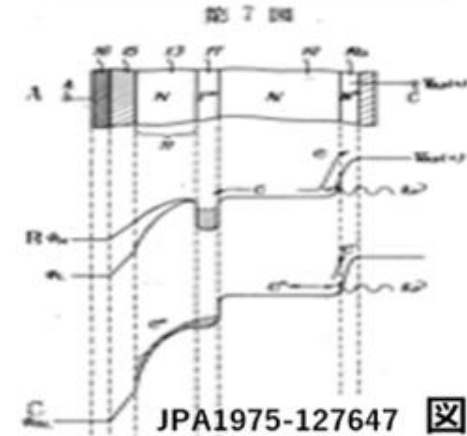
(5) Sony (Hagiwara) Nov 10, 1975 JPA1975-134985



電子シャッター機能付きビデオカメラ Sony 1987

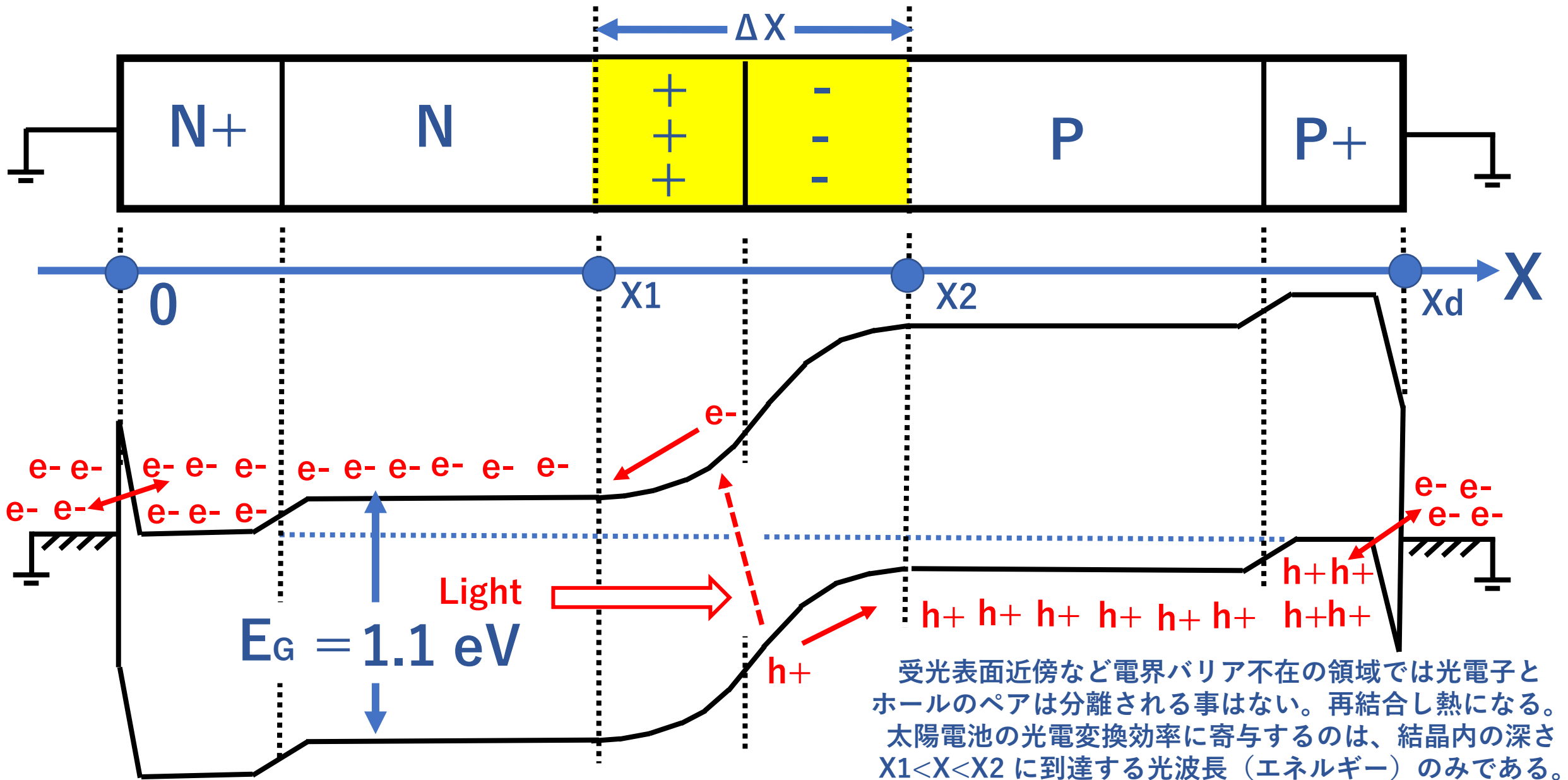


JPA1975-127646 図 7



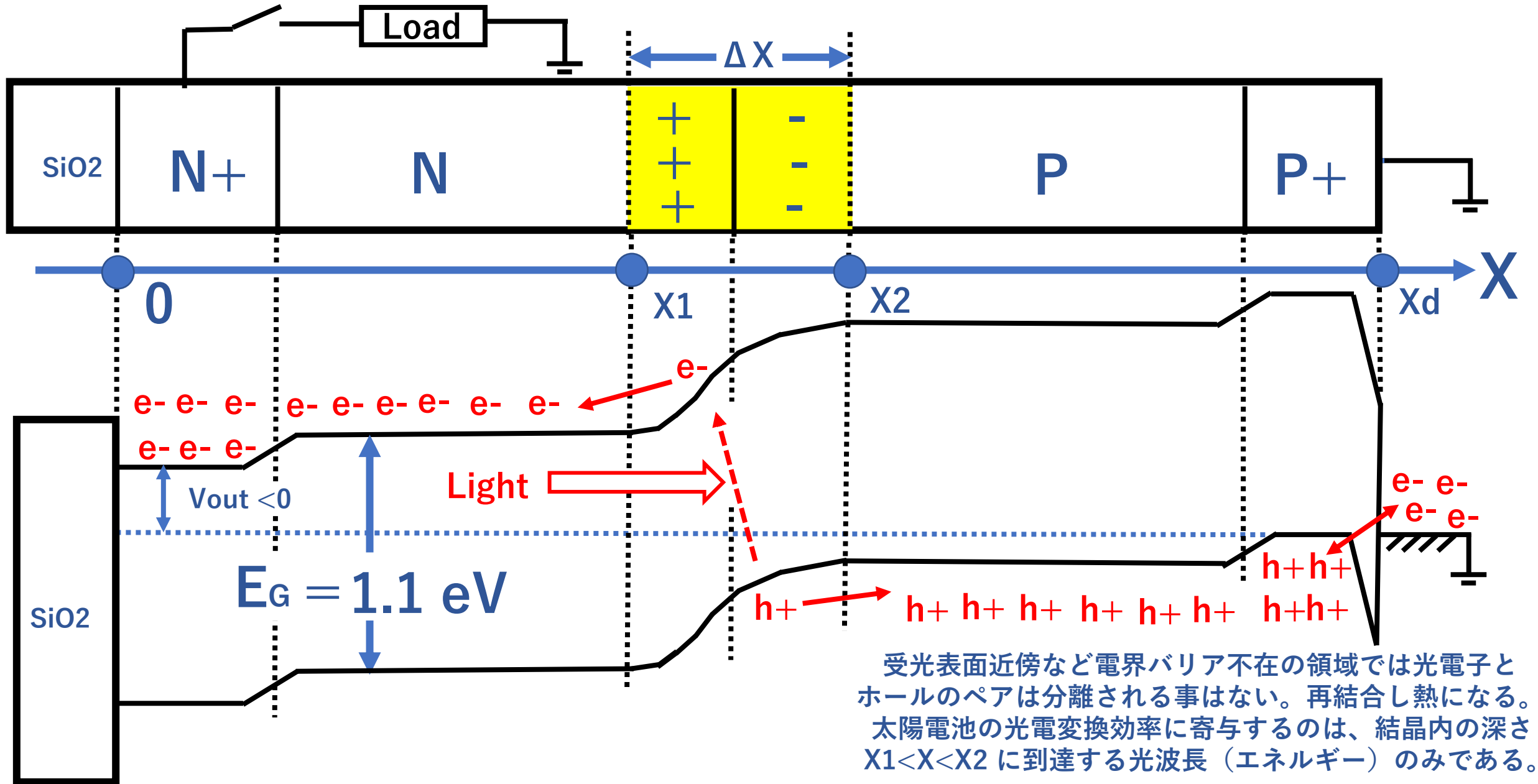
JPA1975-127647 図 7

Single 接合のダイオードの基本構造と動作原理

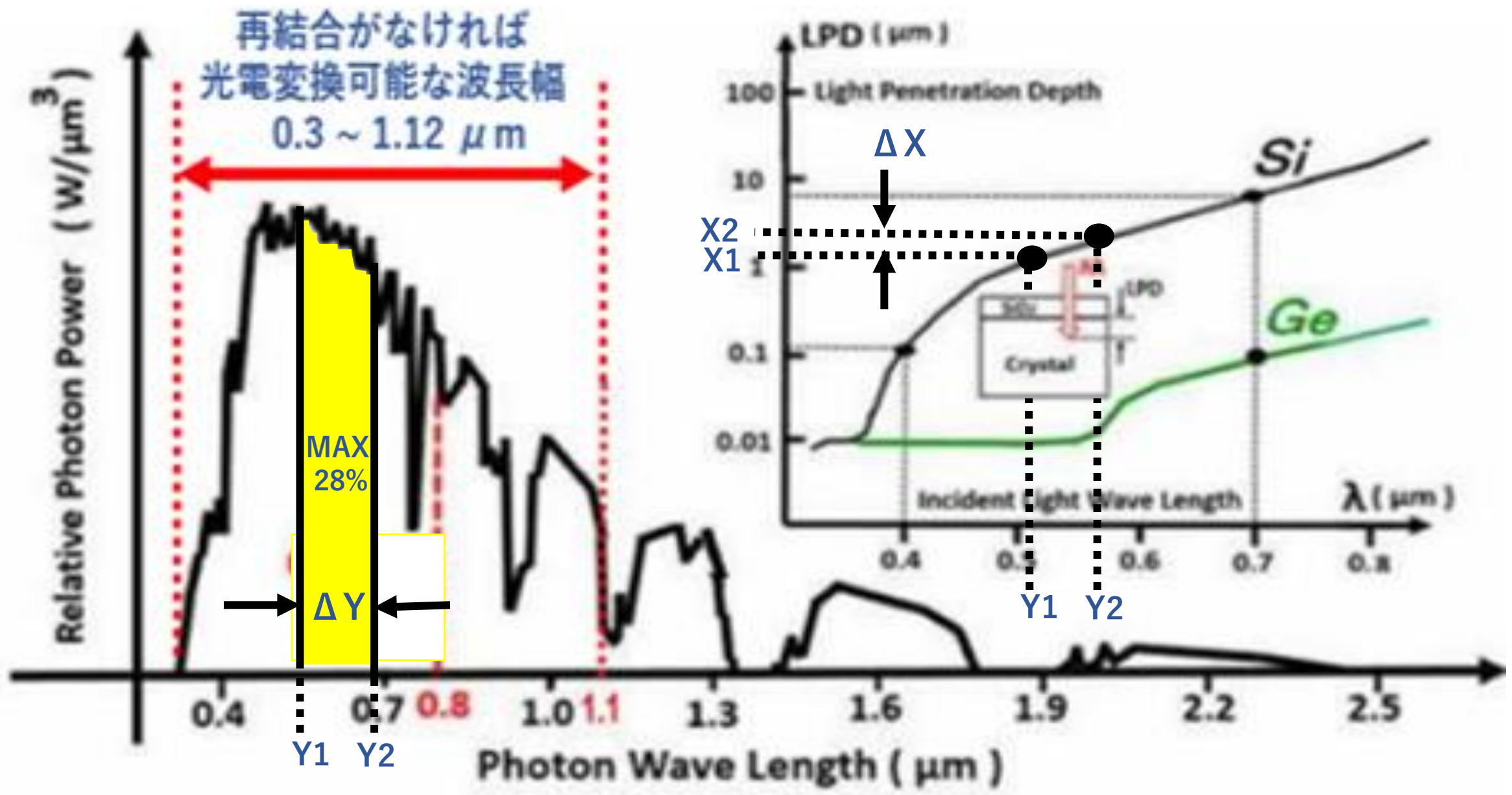


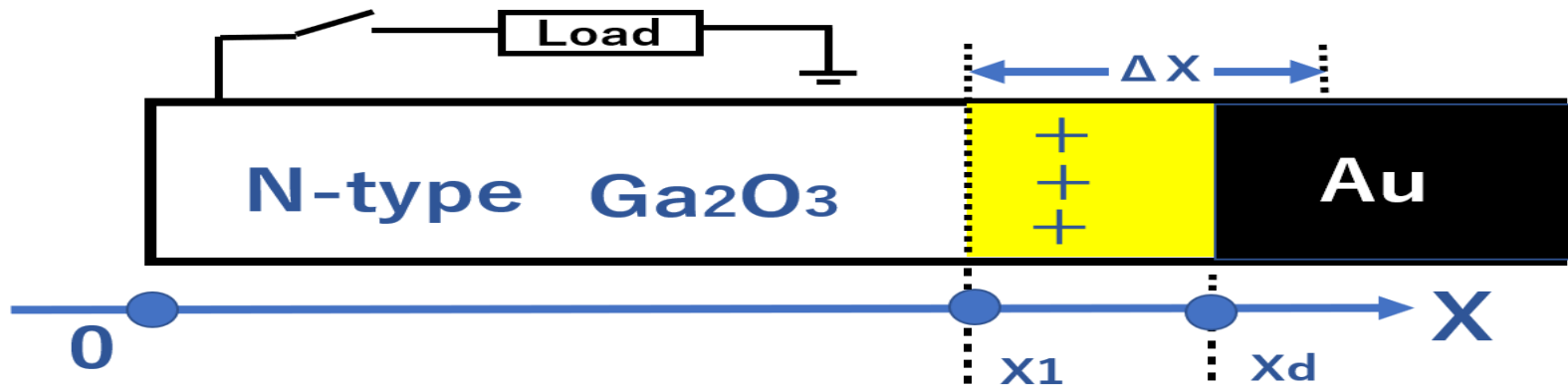
受光表面近傍など電界バリア不在の領域では光電子とホールは分離される事はない。再結合し熱になる。太陽電池の光電変換効率に寄与するのは、結晶内の深さ $X_1 < X < X_2$ に到達する光波長（エネルギー）のみである。

Single 接合型太陽電池の基本構造と動作原理



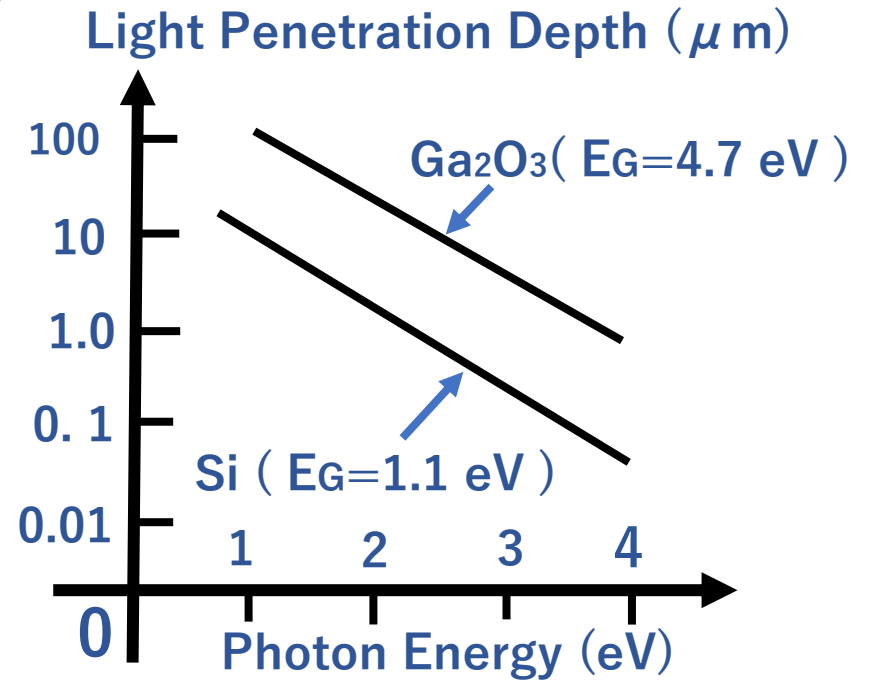
(3) single接合型のダイオードの整流特性



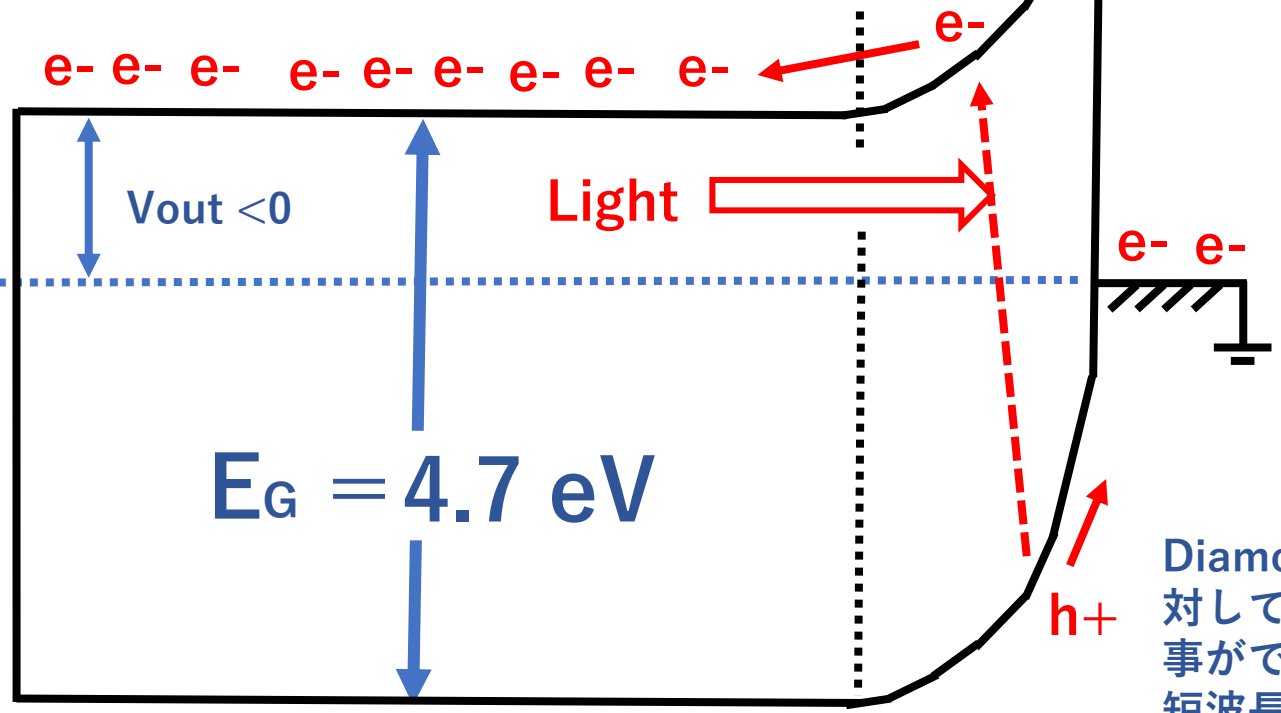


$$(\text{Photon Energy}) = \frac{1.24 \text{ (eV/}\mu\text{m)}}{(\text{Wave Length})}$$

シリコン結晶 (1.1 eV) は黒光りしている。可視光線を吸収する。一方のWide Band Gap のGa₂O₃ は透明な結晶体である。短波長青色光は光電変換に寄与するが低エネルギーの赤外線は光電変換効率には寄与しない。



概念図 (Exact Data Not Available)



赤外線は結晶奥深く迄透過するが一方の紫外線はシリコンの結晶表面近傍で吸収されて熱になる。

Diamond (EG ~ 5 eV) や Ga₂O₃ (EG ~ 4.7 eV) などは可視光線に対して透明である。結晶内の奥深く迄短波長青色光を透過する事ができる。PN接合の空乏層領域 X1 < X < X2 迄、奥深く迄、短波長青色光を導く事が可能で太陽電池の効率向上に寄与する。

太陽電池の変換効率の限界

変換効率は、使用される半導体材料が吸収できる太陽光の波長領域と、PN接合の空乏層領域での吸収量で求められます。シリコン結晶では、波長が $0.29\mu\text{m}$ から $1.20\mu\text{m}$ までの太陽光を吸収できます。Single PN 接合型での変換効率の限界理論値は 28% です。実際には20%程度です。その理由は(1)受光面での反射や(2)受光表面再結合や(3)PN接合の空乏層内での結晶欠陥による再結合や(4)裏面再結合などが生じ、光電変換された光電子とホールペアが再結合し無駄になる為です。

Silicon のBand Gap は 1.1 eV

InP のBand Gap は 1.34 eV

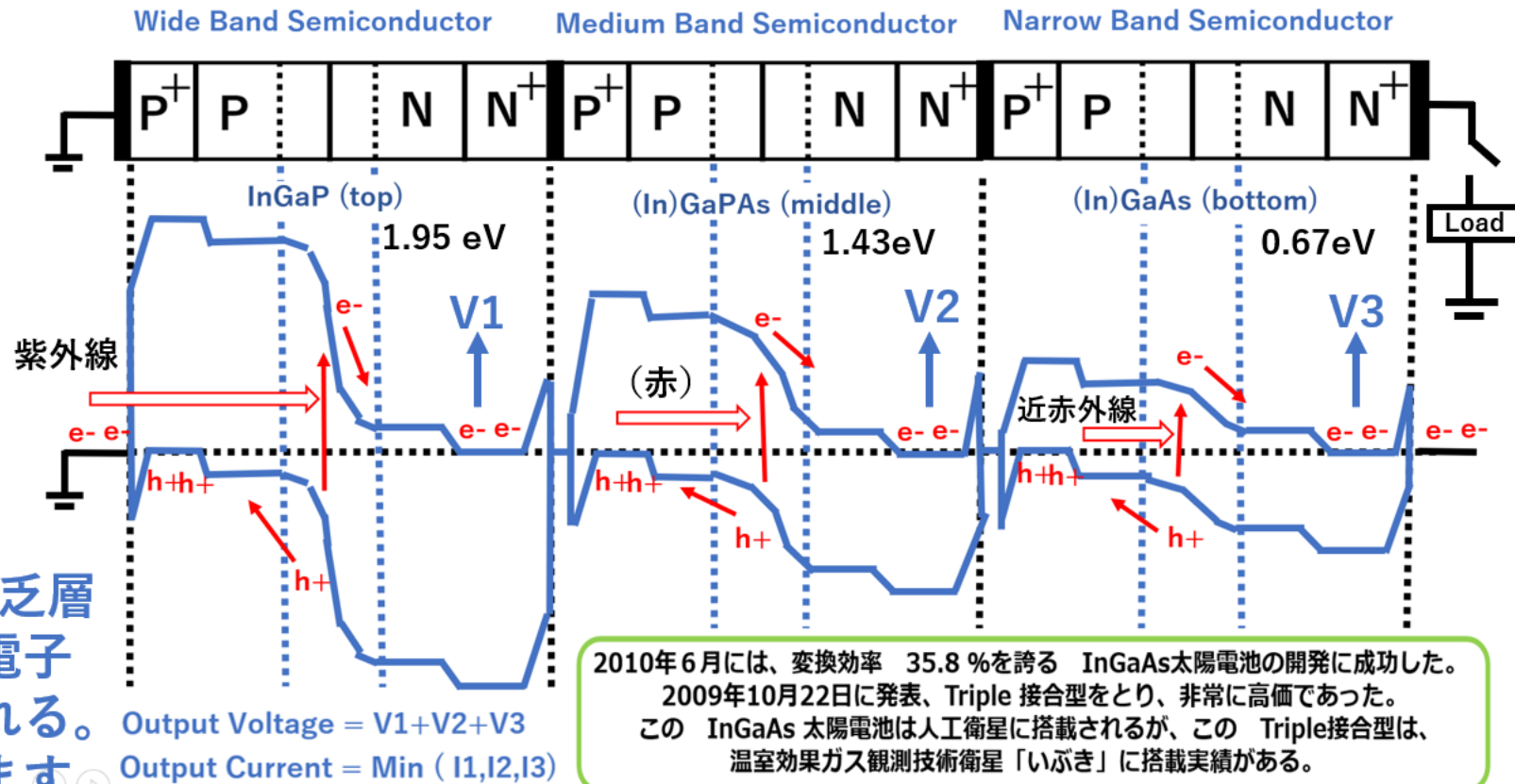
GaAs のBand Gap は 1.42 eV

CdTe のBand Gap は 1.48 eV

GaN のBand Gap は 3.4 eV

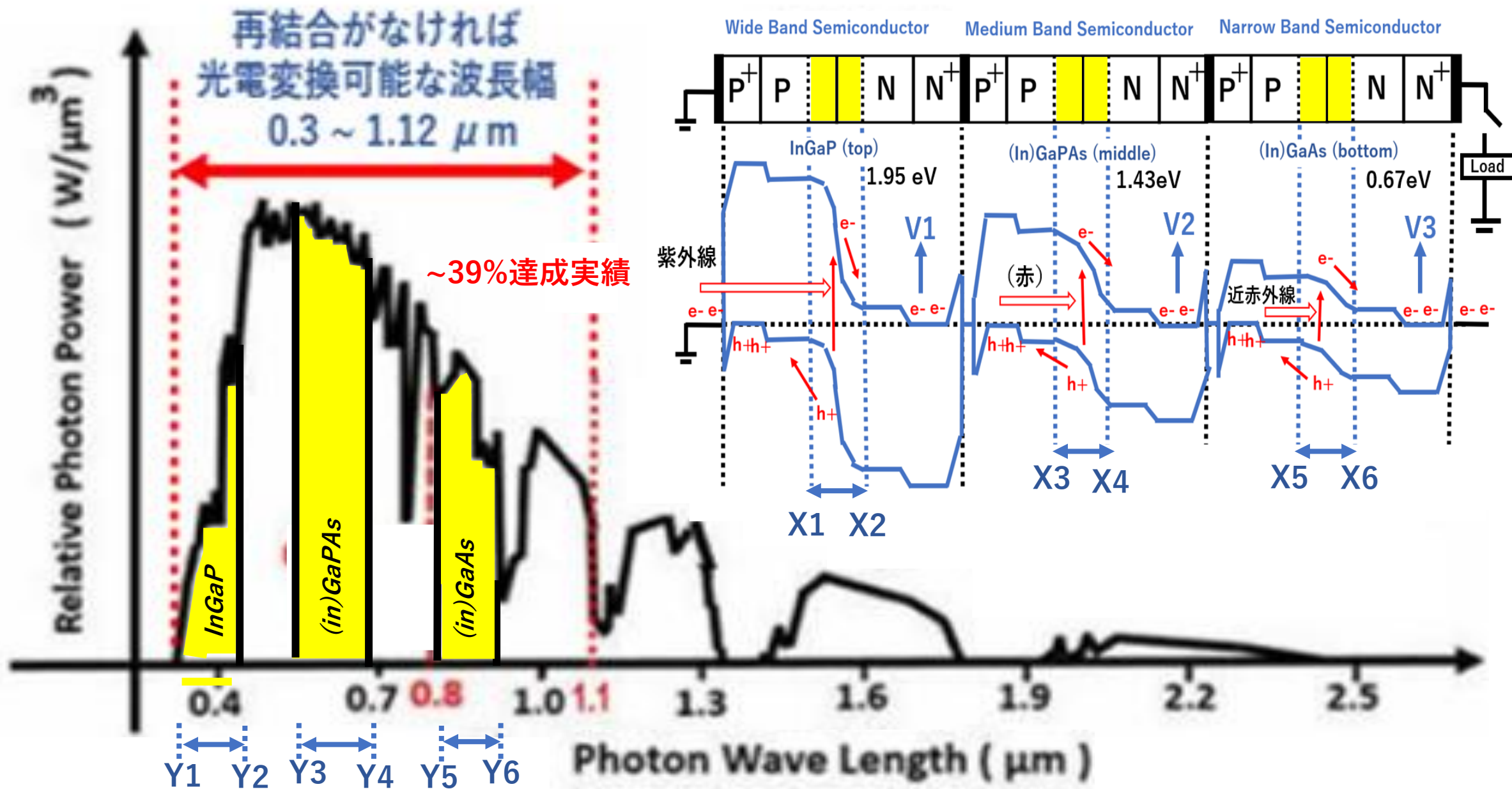
$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のBand Gap は 4.5 eV

バリア電界が存在するPN接合の空乏層領域内でのみ、光電変換による光電子とホールペアは効率良く分離される。と言う事が、今の常識となっています。



2010年6月には、変換効率 35.8%を誇る InGaAs太陽電池の開発に成功した。
2009年10月22日に発表、Triple 接合型をとり、非常に高価であった。
この InGaAs 太陽電池は人工衛星に搭載されるが、この Triple接合型は、
温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」に搭載実績がある。

Triple 接合型のWide Band Gap 化合物半導体の太陽電池への応用で光電変換効率MAX~39%達成実績がある



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

(3) single接合型のダイオードの整流特性

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 !