

鉄腕アトムは半導体部品で構成され創られています。
鉄腕アトムの賢い電子の目は太陽の光を吸収して
光エネルギーを電気エネルギーに変換します。
鉄腕アトムの賢い電子の目は太陽電池でもあります。
賢い電子の目は半導体で造られます。

半導体とは？

Smart AI Robot Vision Image Sensor also works as Solar Cell Yoshiaki Hagiwara 01.mp4

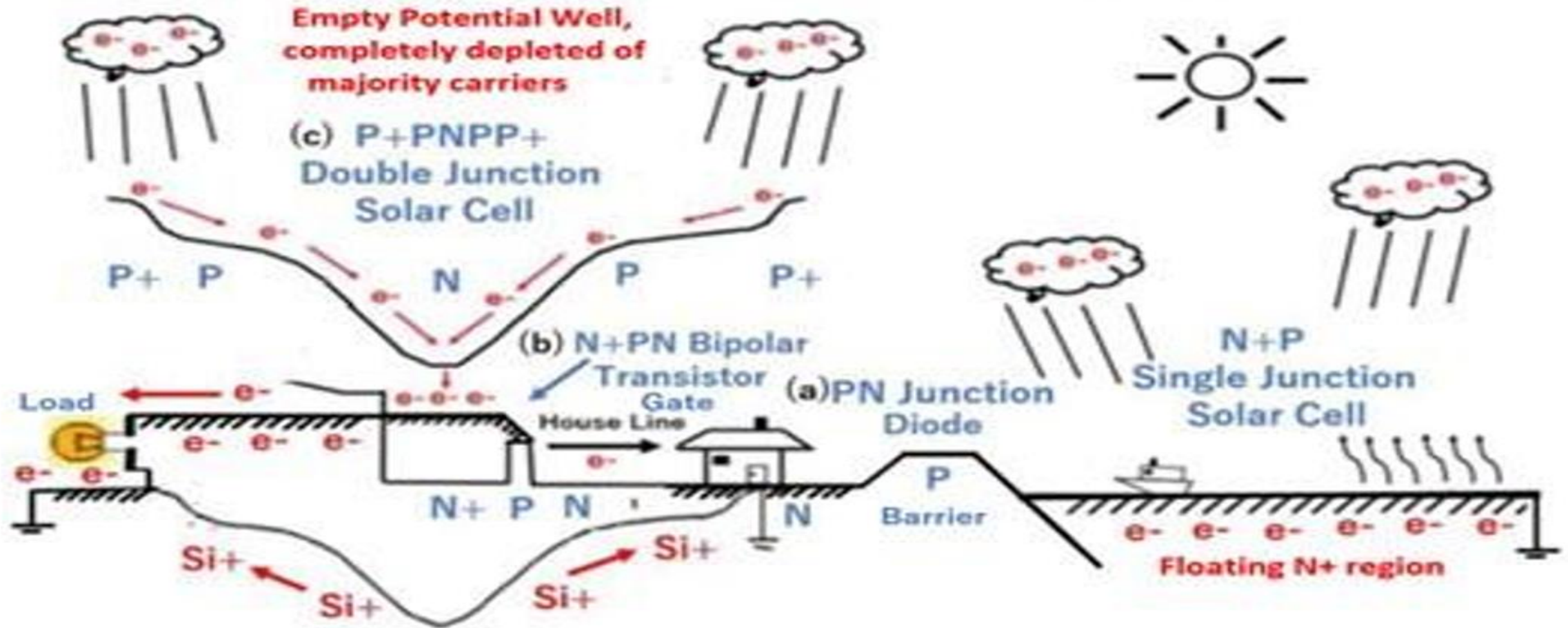
<http://www.aiplab.com>

<https://locomtec.jp/>萩原aips研究所



半導体とは？

講師 萩原aips研究所 萩原良昭

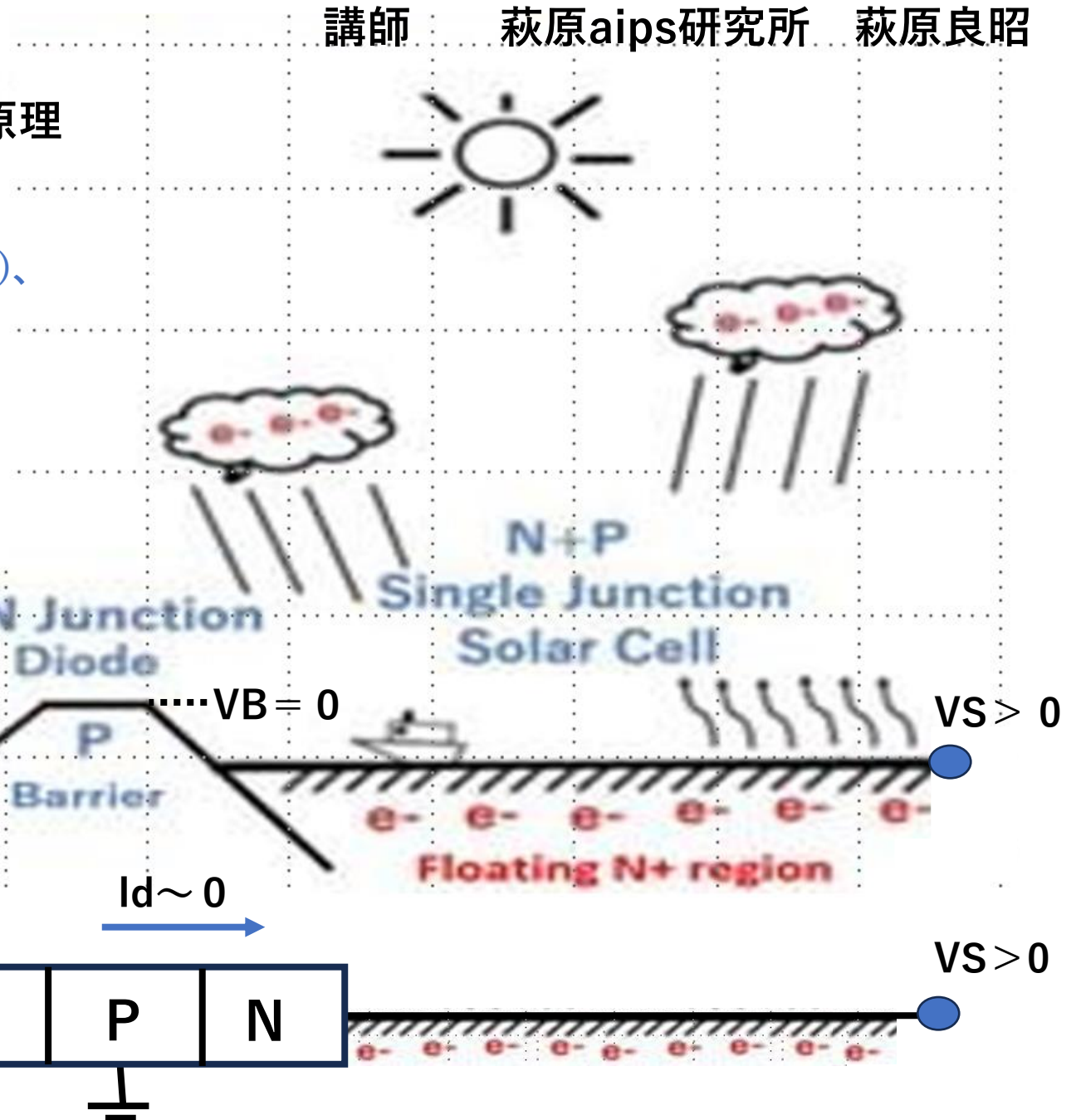
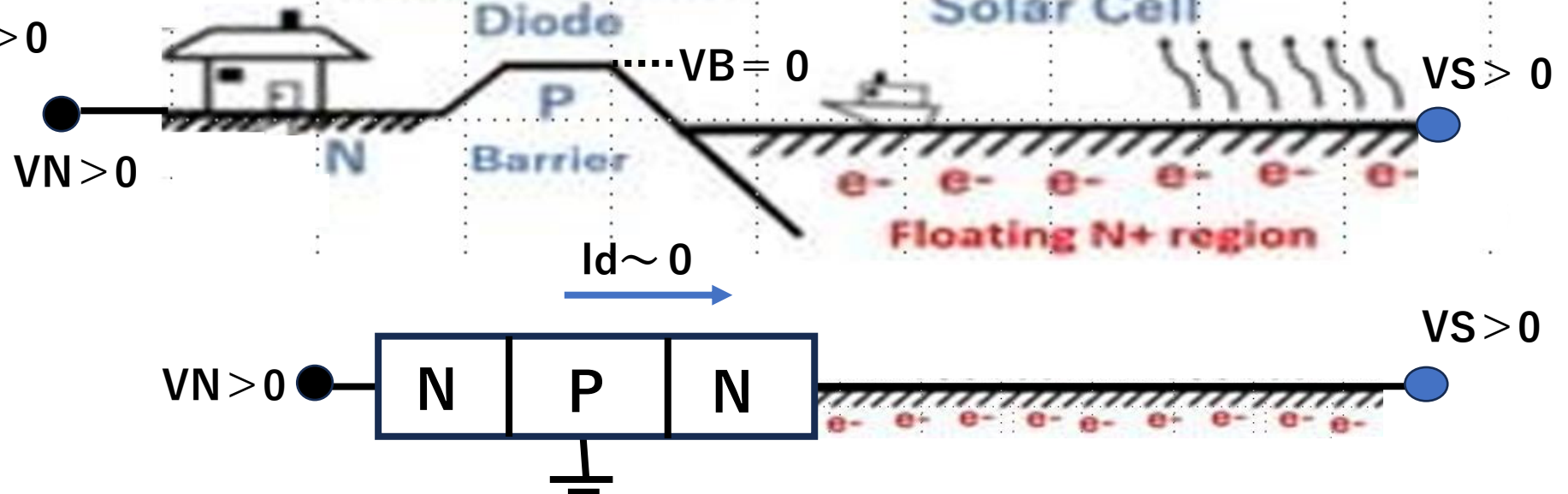
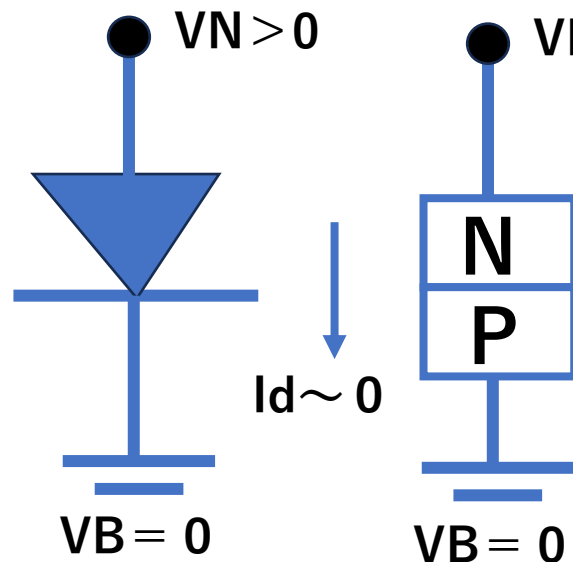


半導体とは？

講師 萩原aips研究所 萩原良昭

逆バイアス状態のPN接合ダイオードの動作原理

防波堤となる堤防の高さ ($V_B = 0$) に対して
海の水面がそれより低いと、マイナスだと、($V_S < 0$)、
海の水は堤防を越えれない。人は安全に生活できる。
海水面以下に、住宅や田畑の地面 ($V_N < 0$)があるが、
海水面以下の土地でも安全に人々は生活でき暮らせる。
オランダでは、国土の30%以上は海面下である。



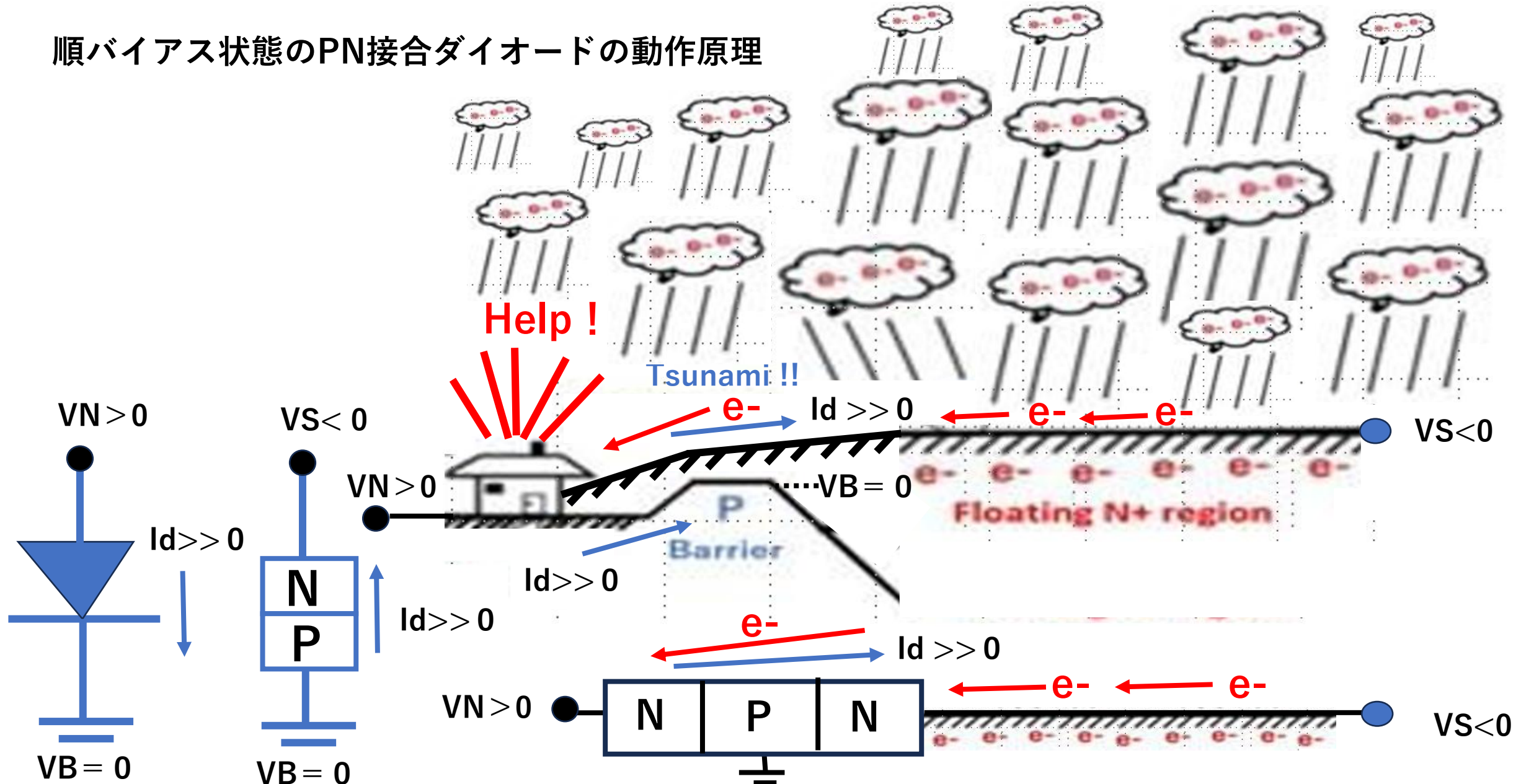
半導体とは？

講師

萩原aips研究所

萩原良昭

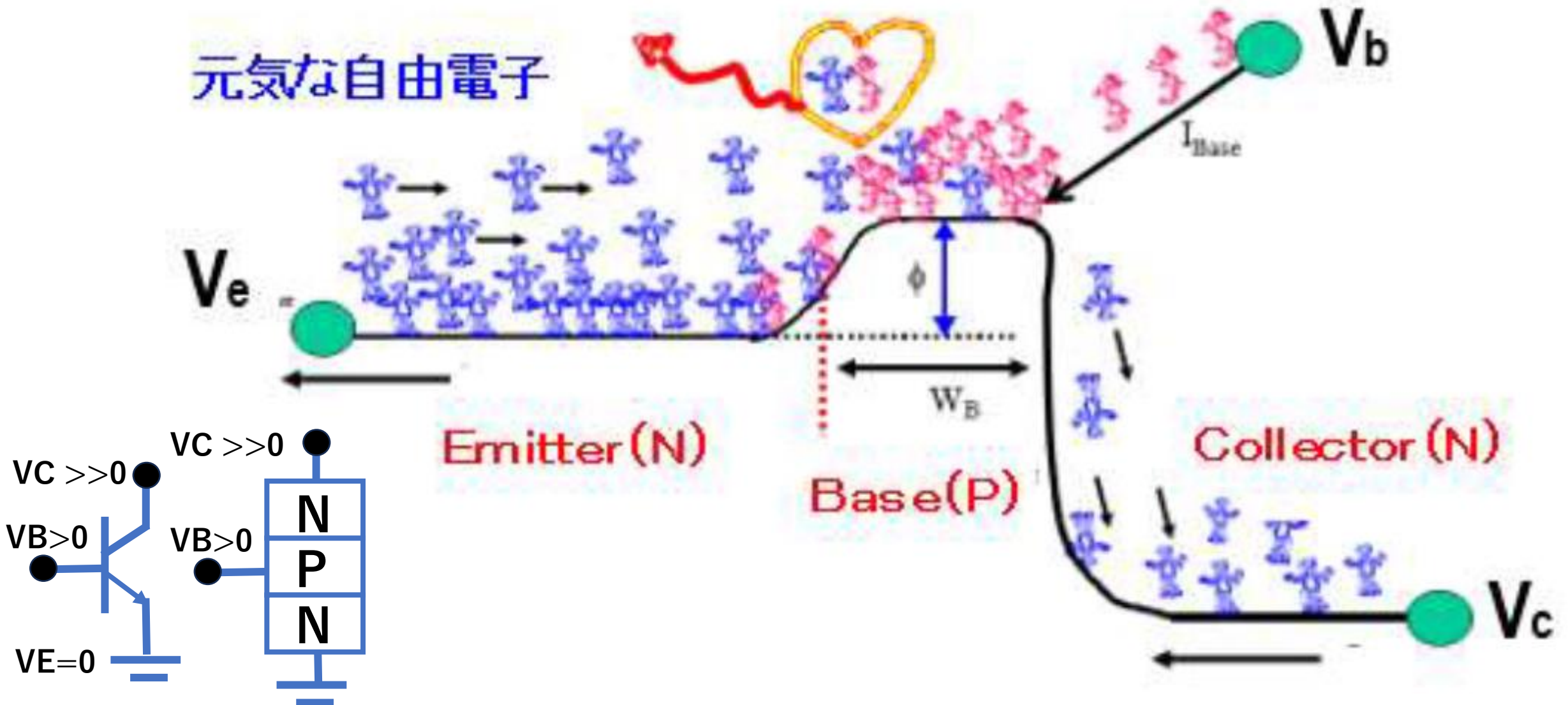
順バイアス状態のPN接合ダイオードの動作原理



半導体とは？

講師 萩原aips研究所 萩原良昭

NPN 接合型 Bipolar Transistor とは？



Herbet Kroemer は BASE に P+P 領域をもうけて高周波数 Bipolar Transistor を発明してノーベル賞を授賞。

https://en.wikipedia.org/wiki/Herbert_Kroemer

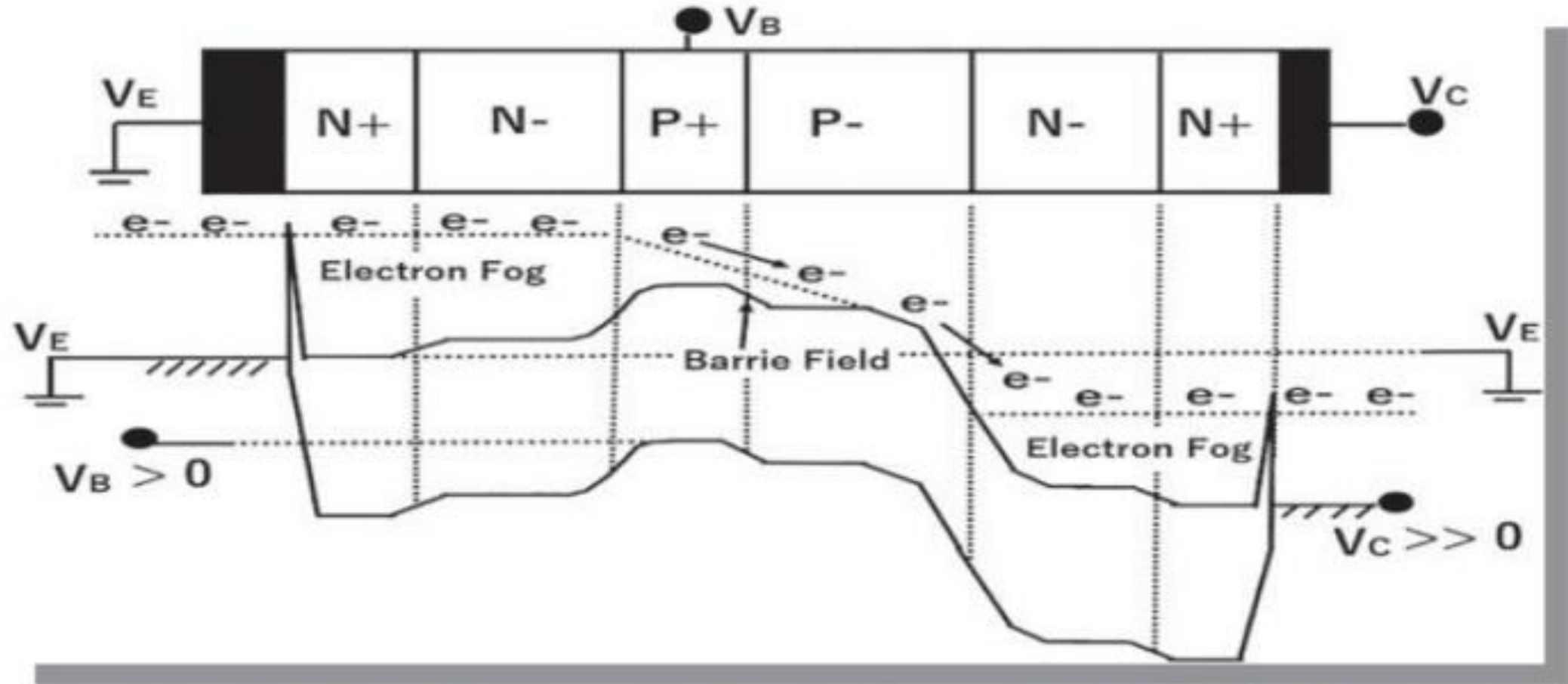


Figure 1: The drift-field transistor for high frequency operations, invented by Herbert

[Chronology of Silicon based Image Sensor Development](#)

Sony は1960年代に入り表面をKOH液エッチングして基板抵抗値を下げ、EmitterをN+N+として、N+NP+P-N-N+接合型 Bip Tr 技術を完成させた。

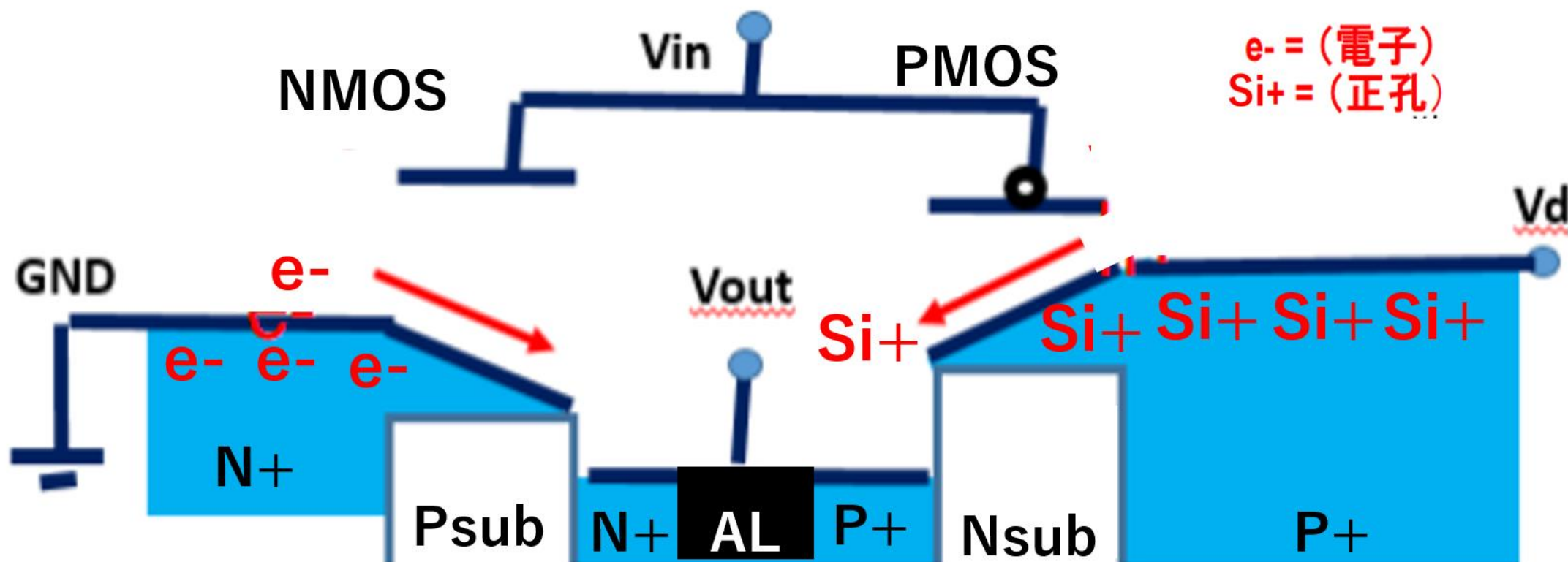
もとSonyの江崎玲於奈はP+N+ 接合ダイオードのトンネル現象の理論解析でノーベル賞を授賞した。

半導体とは？

講師 萩原aips研究所 萩原良昭

CMOS Transistor とは？

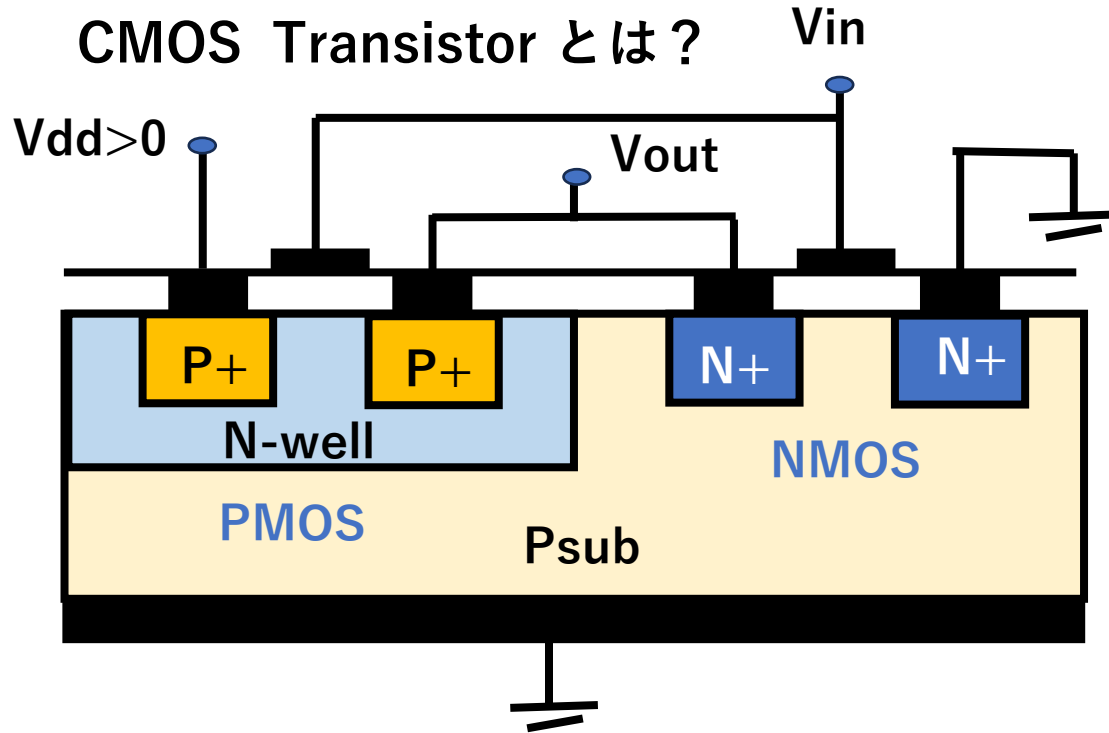
●CMOS inverter回路の水門モデル



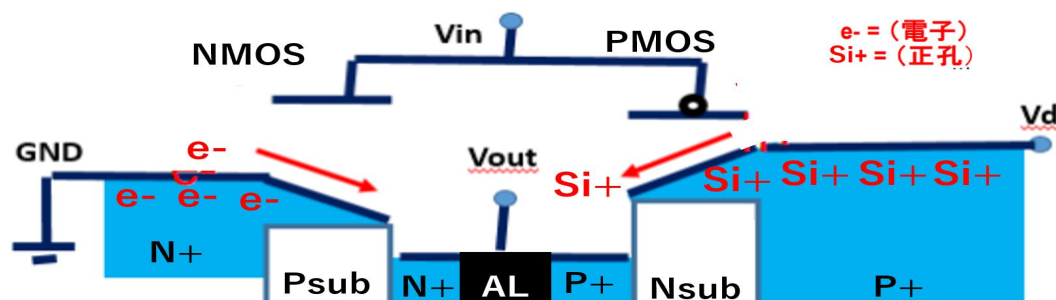
半導体とは？

講師 萩原aips研究所 萩原良昭

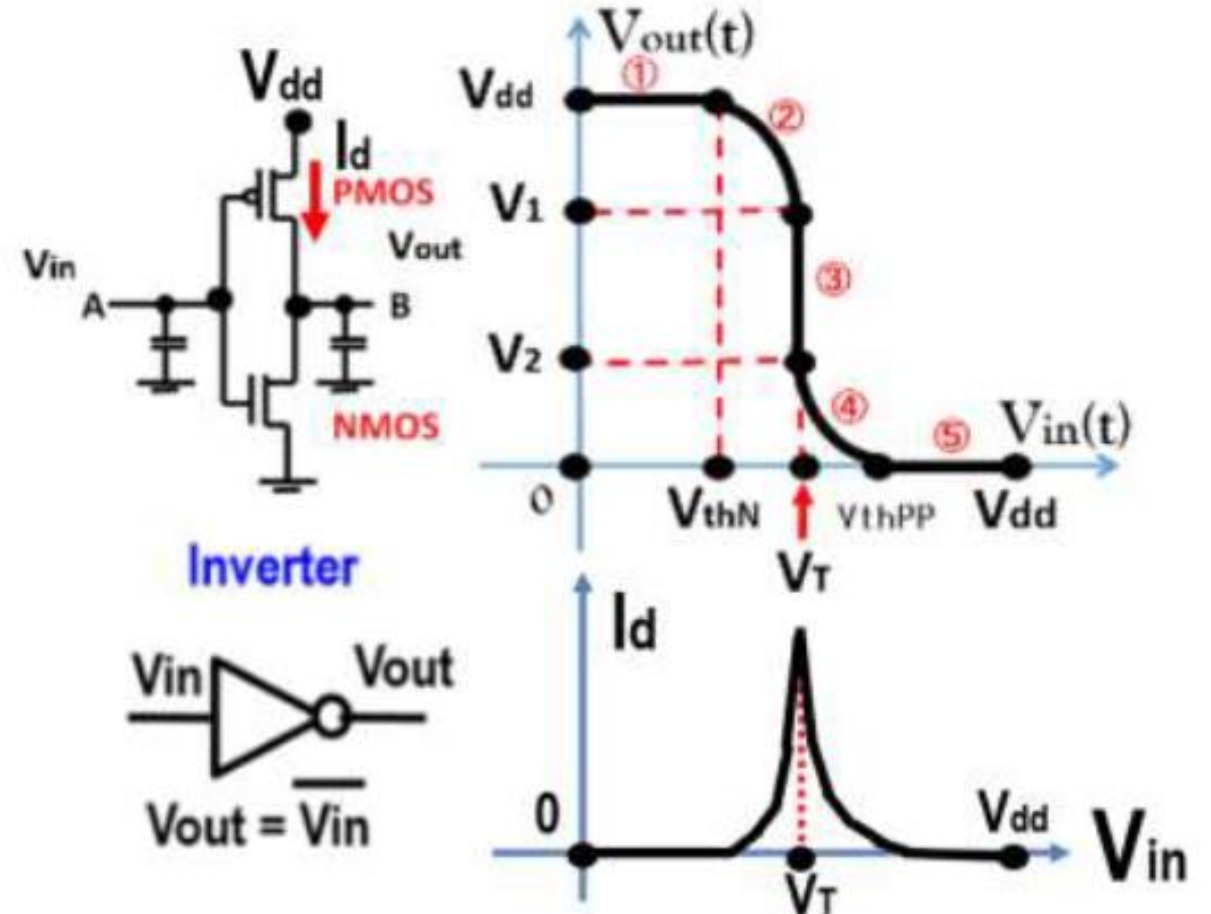
CMOS Transistor とは？



● CMOS inverter回路の水門モデル

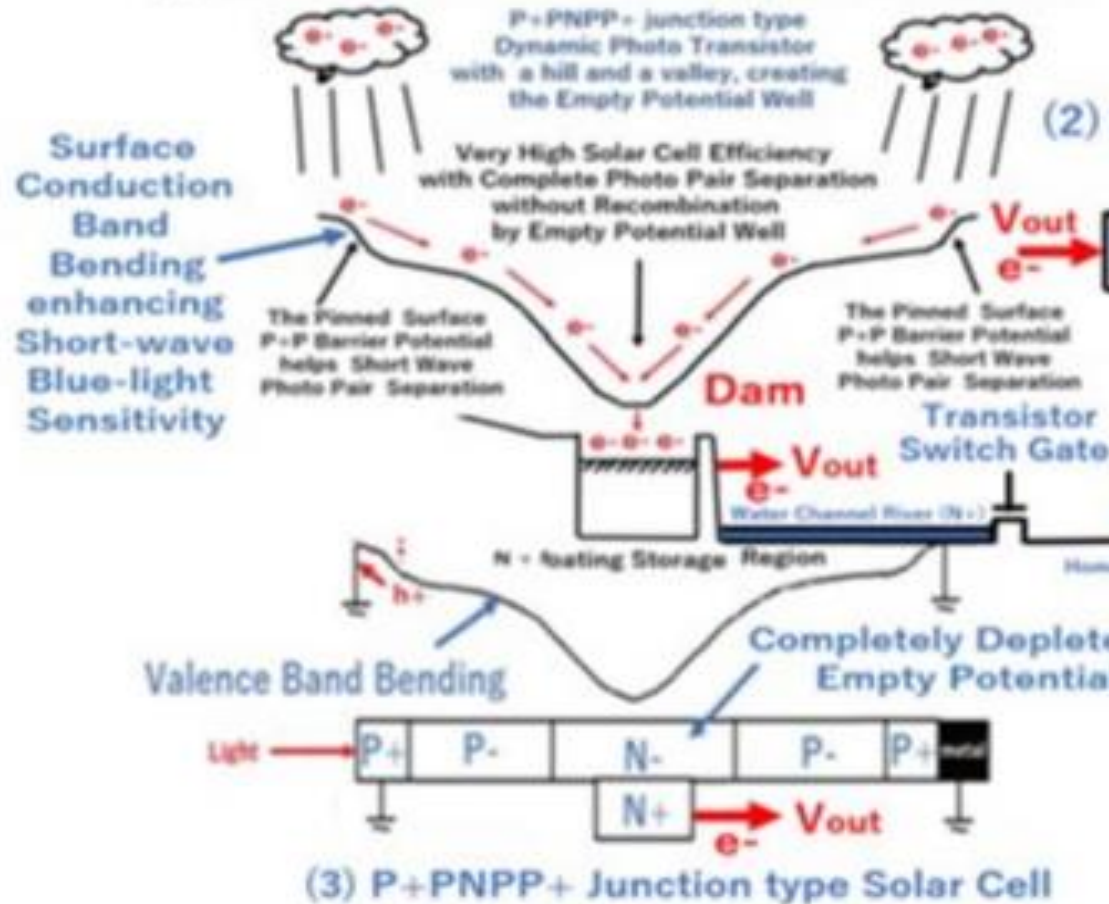


● CMOS inverter回路の入出力特性



Water Barrier, Water Gate and Water Dam Analogy

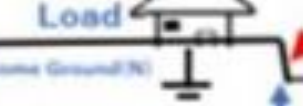
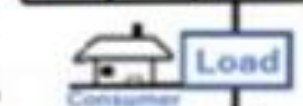
(3) P+PNPP+ Junction type Solar Cell



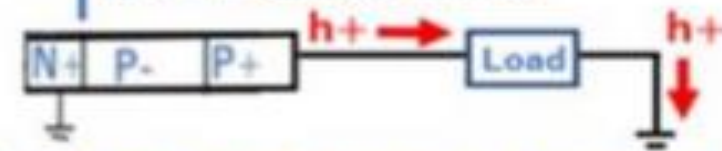
(1) N+P-P+ Junction type Solar Cell

(2) N+PN Transistor

Switch Gate



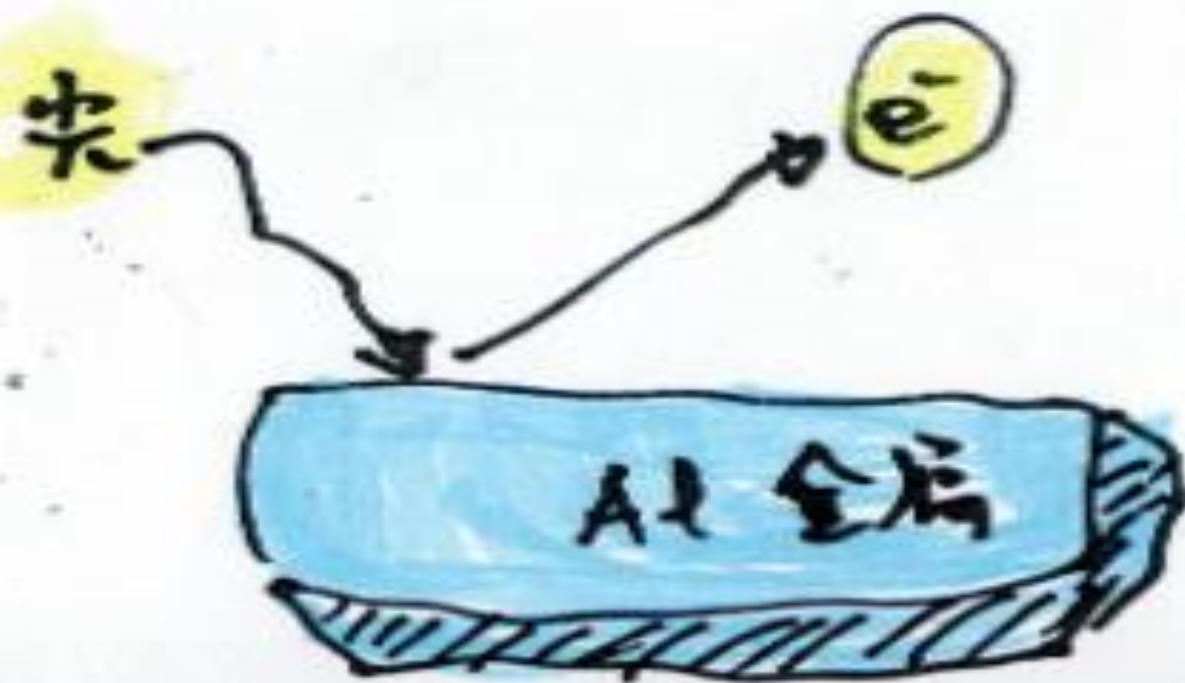
(1) N+P-P+ Single Junction Solar Cell



偉大な我々の祖先は堤防と水門とダムを発明し水を利用した。
ベル研の科学者は1947年12月23日に電子の水門を発明した。
SONYの萩原は1975年3月5日に電子のダムを発明した。

[Chronology of Silicon based Image Sensor Development](#)

金属の物理モデル



金属に光を照射すると
電子(e^-)が飛び出ます!!



金属の物理モデル

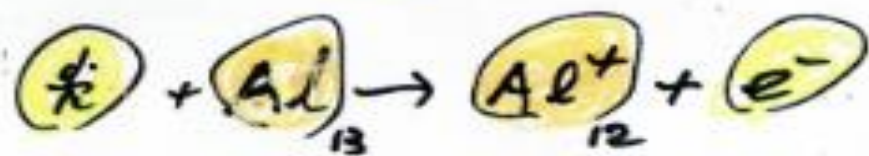
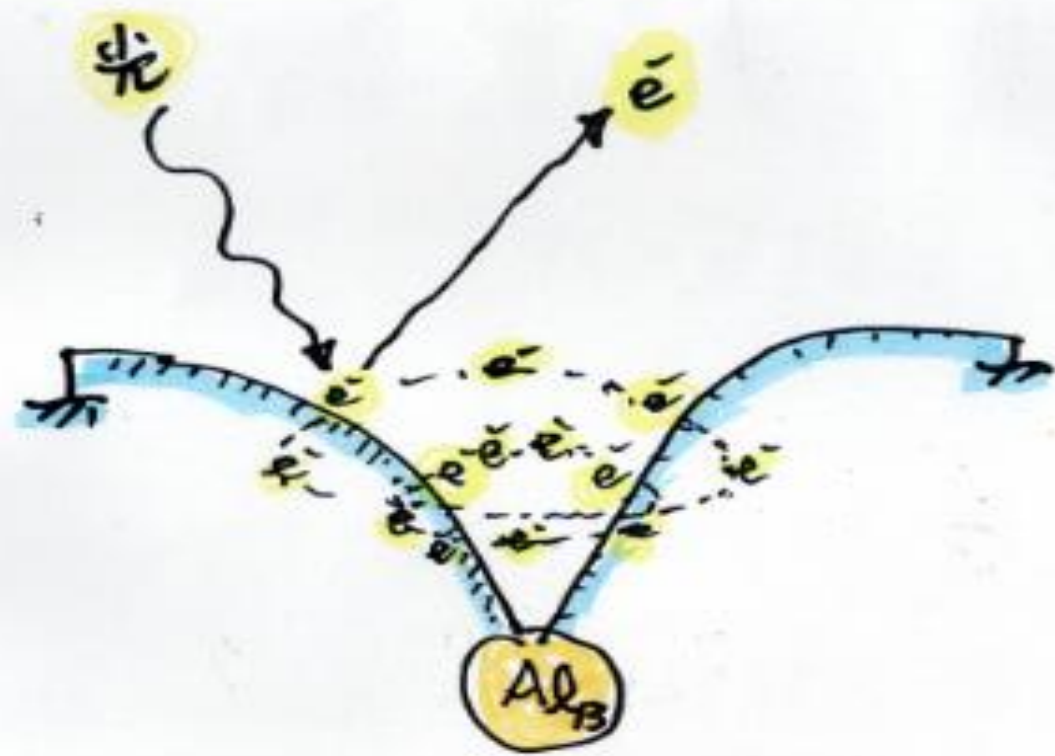


Alの原子番号(13)

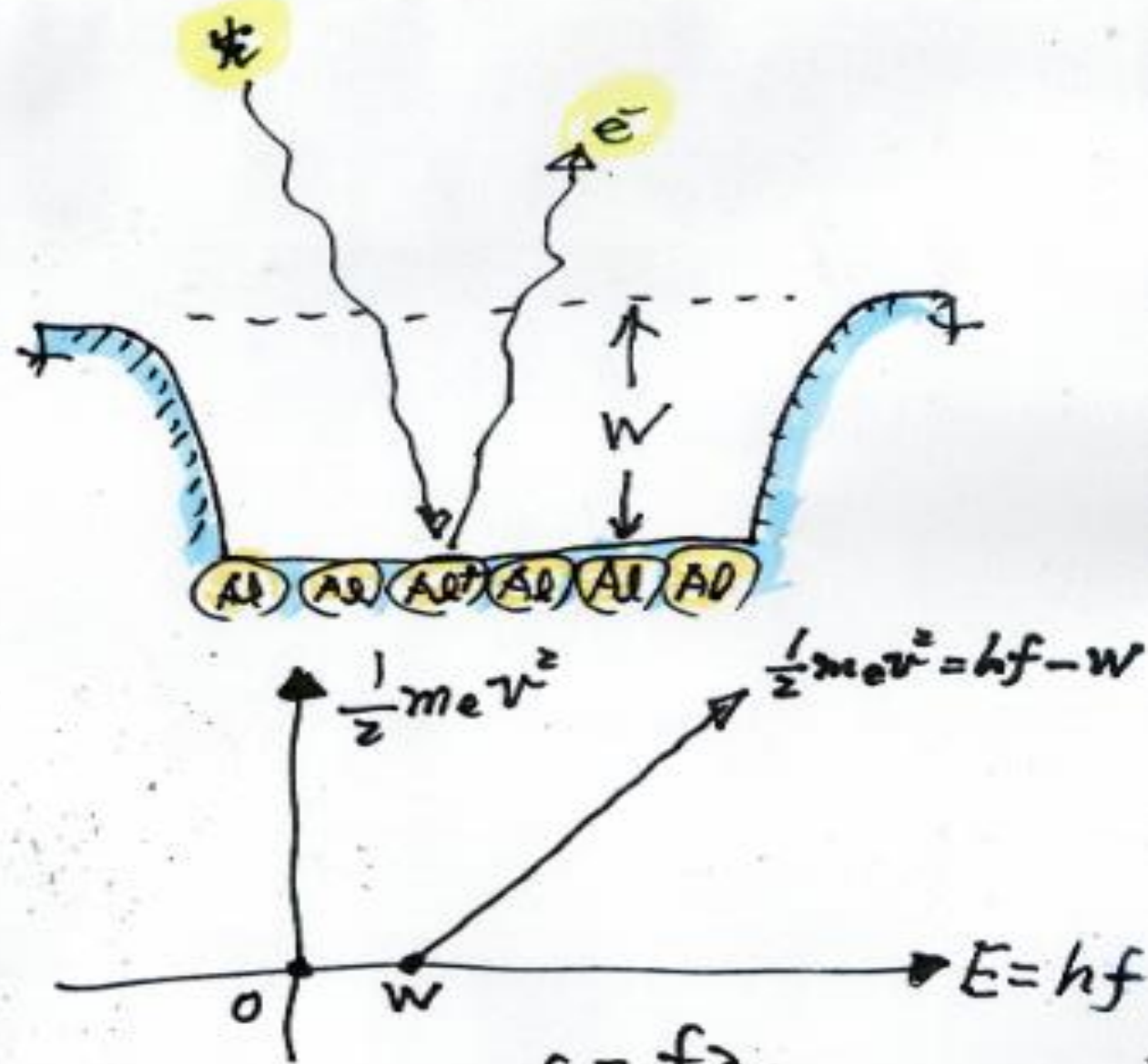
((光はエネルギーの粒である。))

金属に光を照射すると

電子(e^-)が飛び出す!!



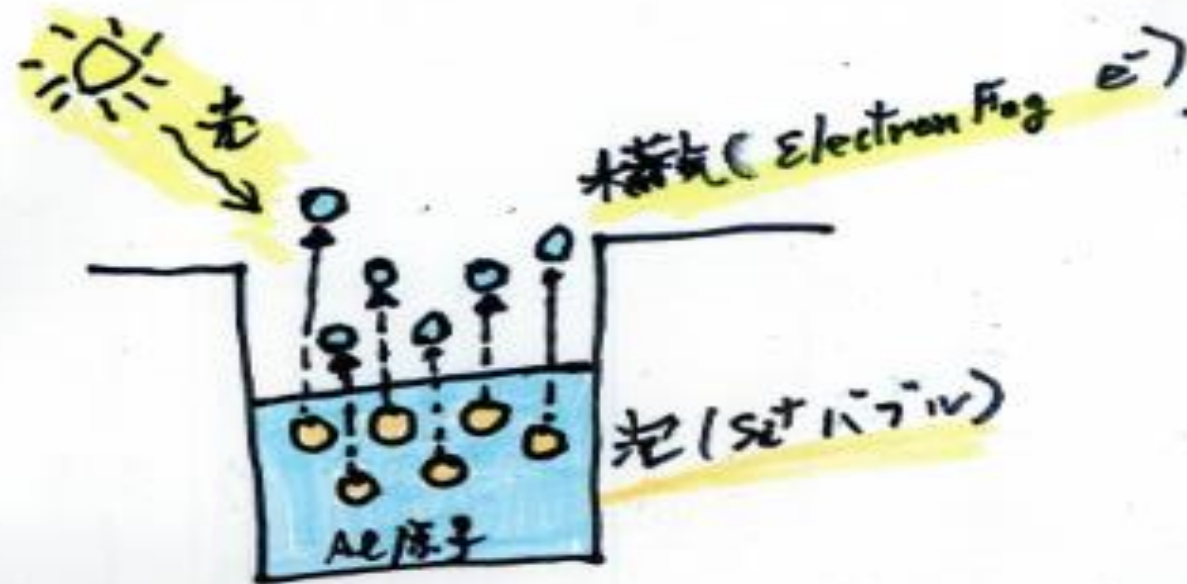
金属の物理モデル



$$c = f\lambda$$

$$E(\text{eV}) = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda(\mu\text{m})}$$

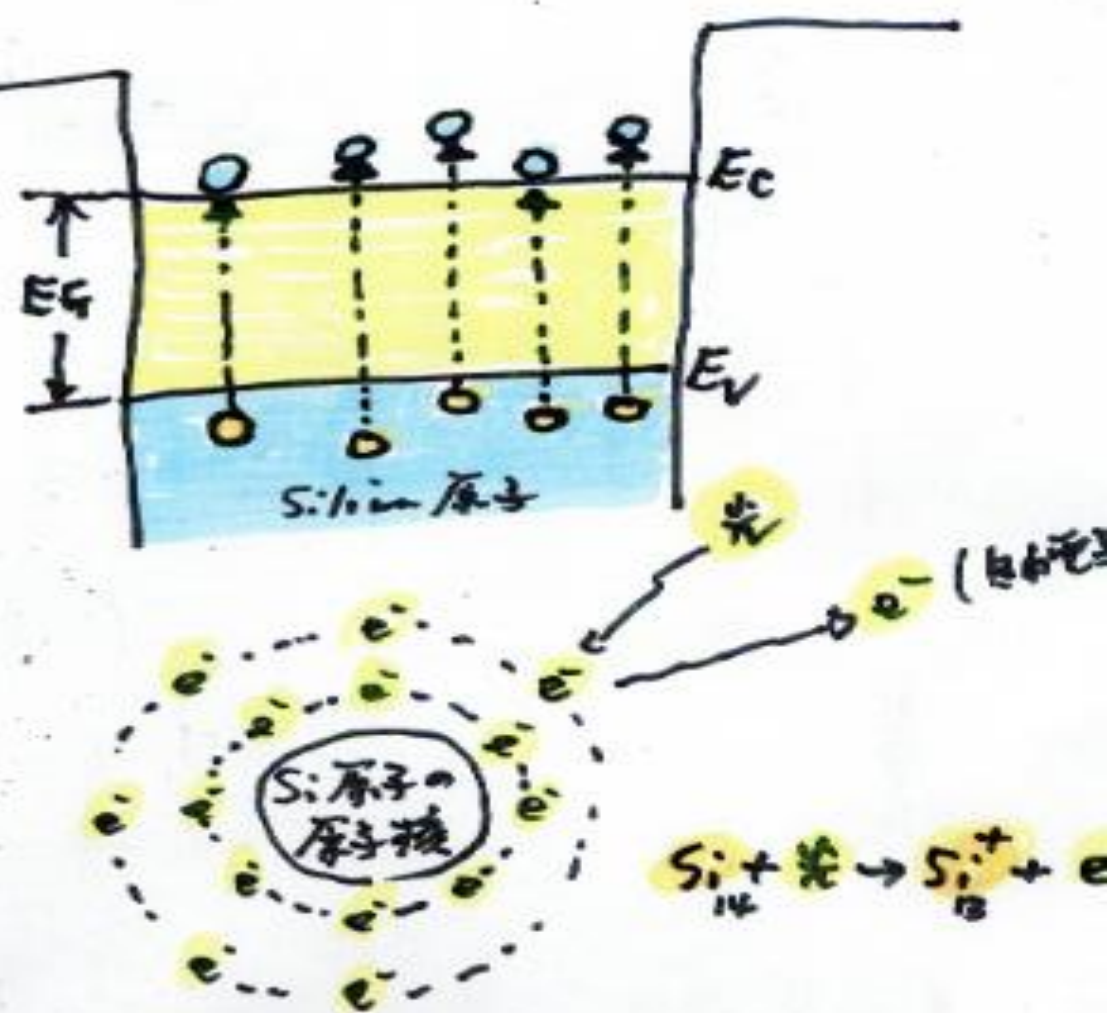
金属の物理モデル



(器に入った水) モデル

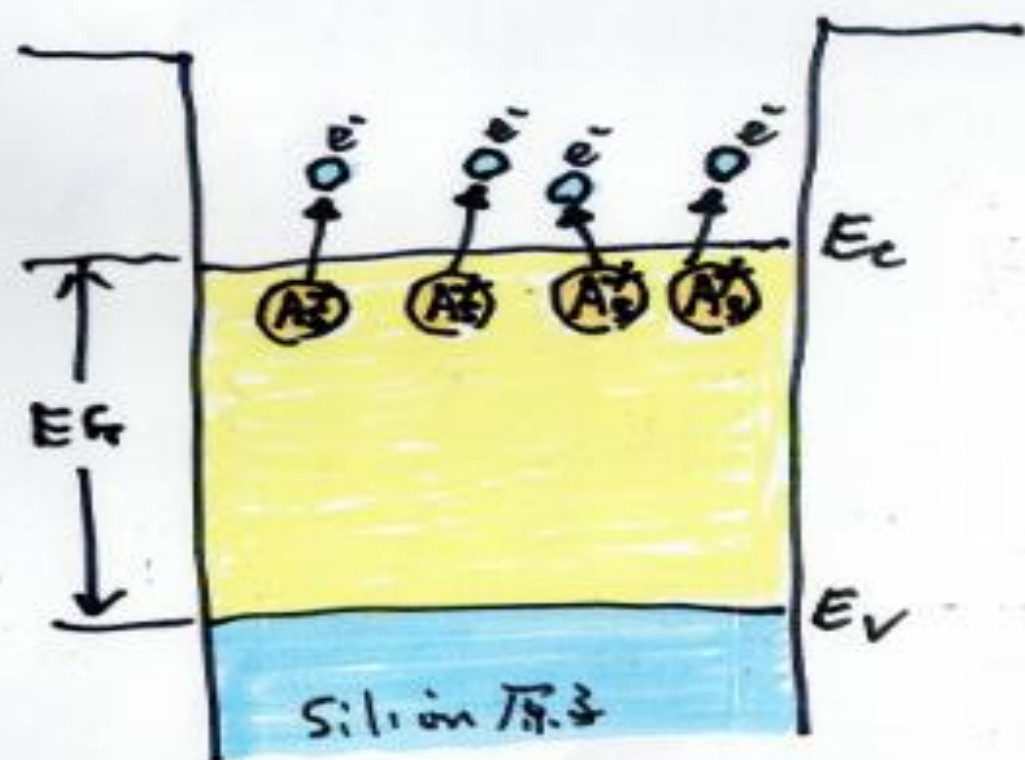
- 水素気の粒 (自由電子)
- バブル泡 (Si+のホール)

半導体の物理モデル

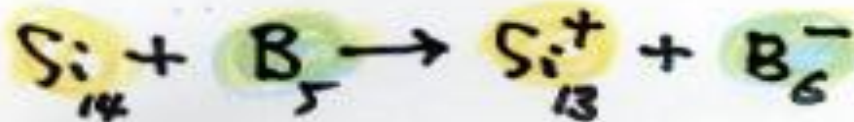
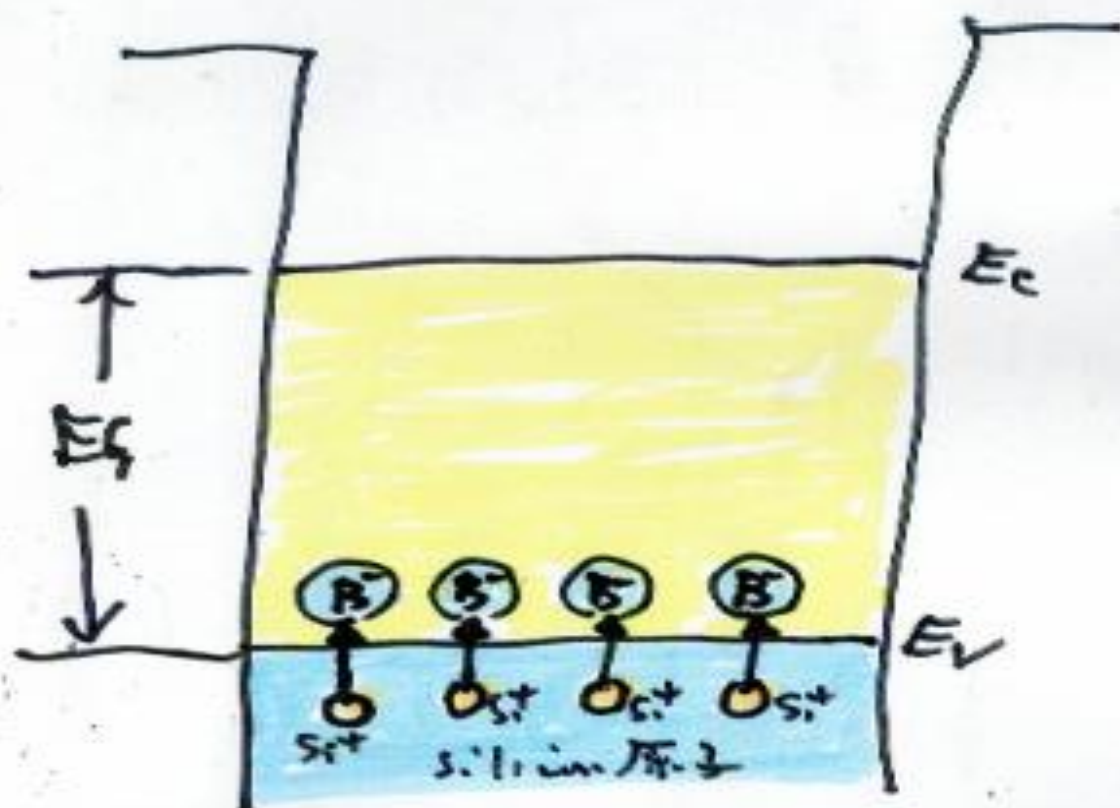


Silicon 原子番号 (14)

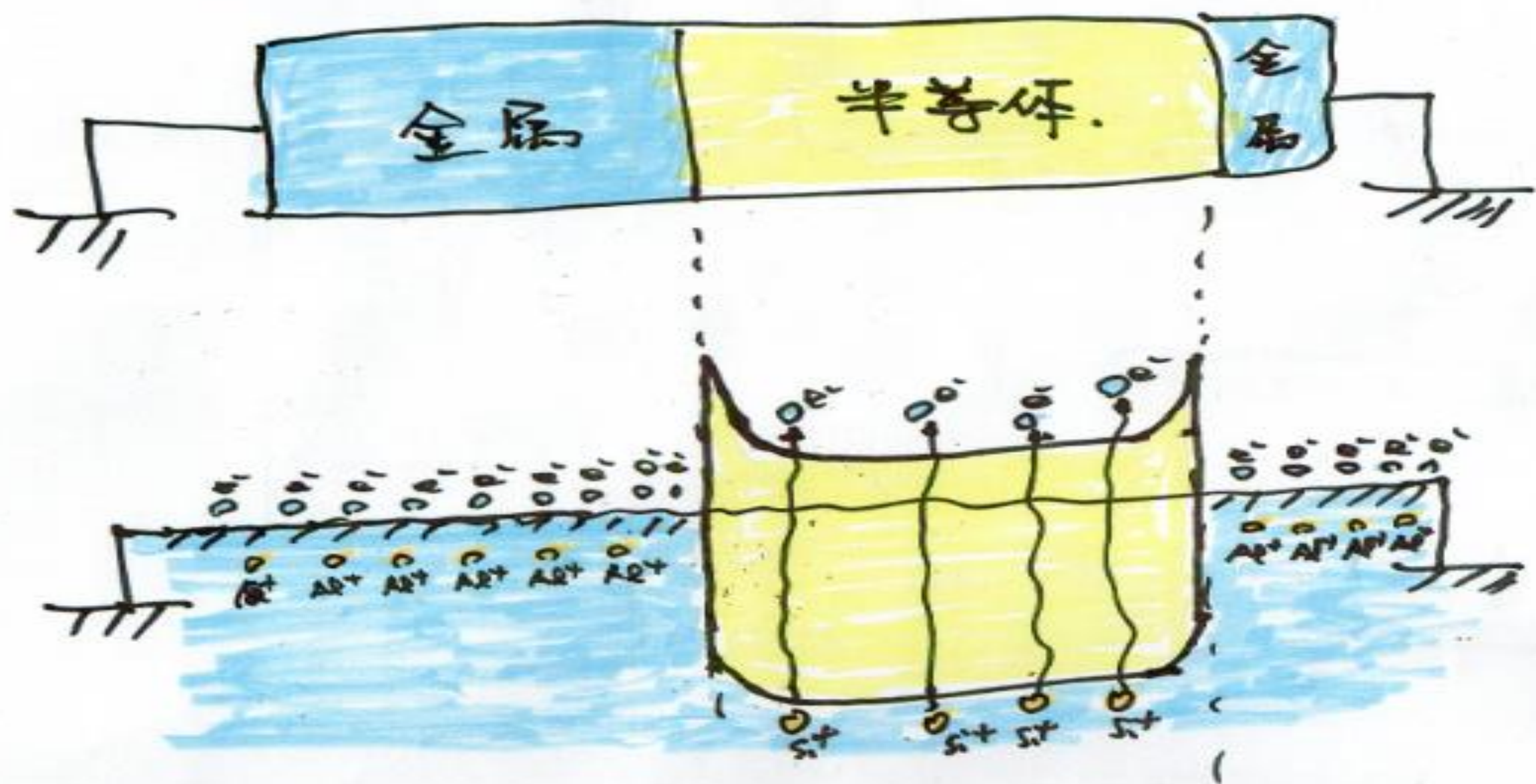
N type 半導体の物理モデル
(自由電子(e^-)が電流とする.)



P type 半導体の物理モデル
(ホール(Si^{+})が電流とする.)



金属と半導体の接合の物理モデル

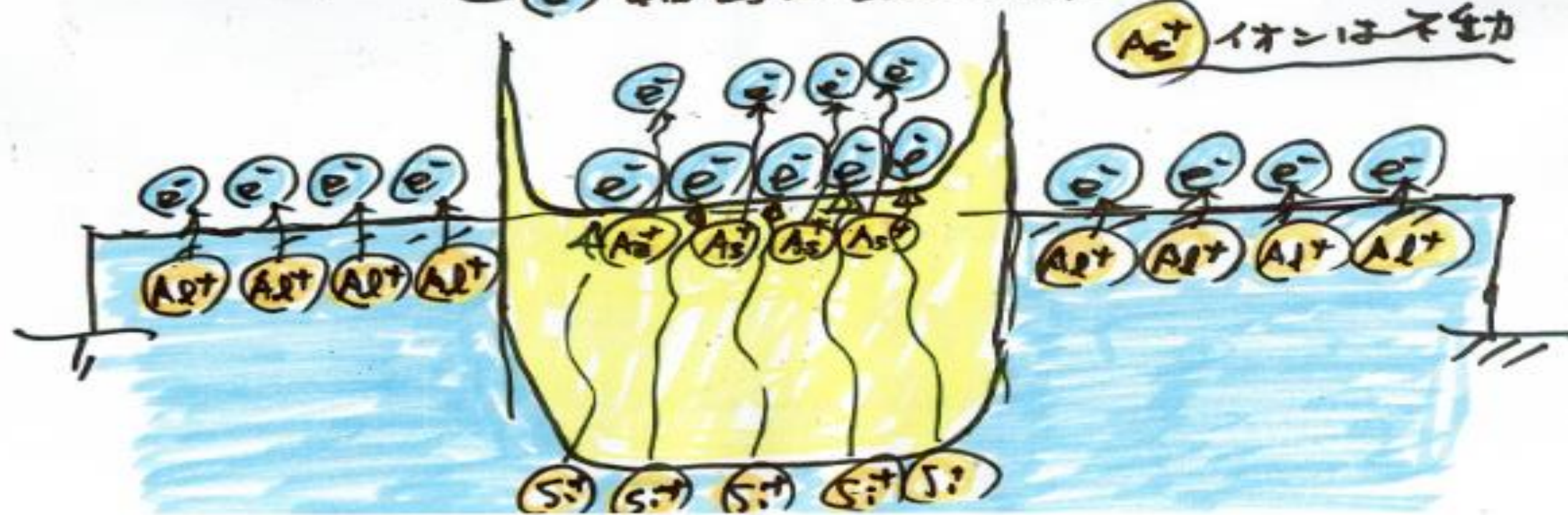


金属と N^+ 半導体の接合の物理モデル

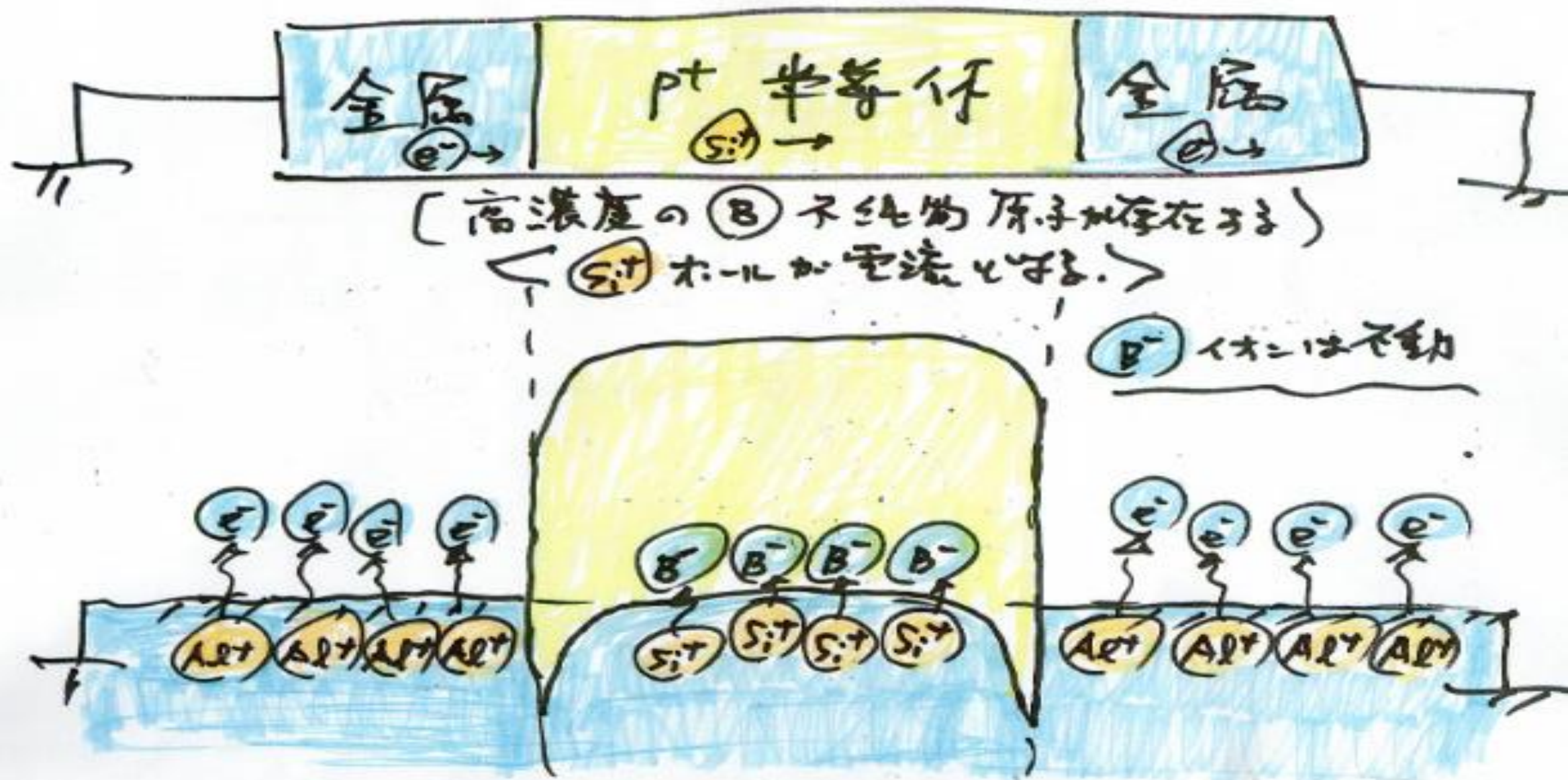


(高濃度の As 不純物原子が存在する。
 e^- 自由電子が電流を流す。)

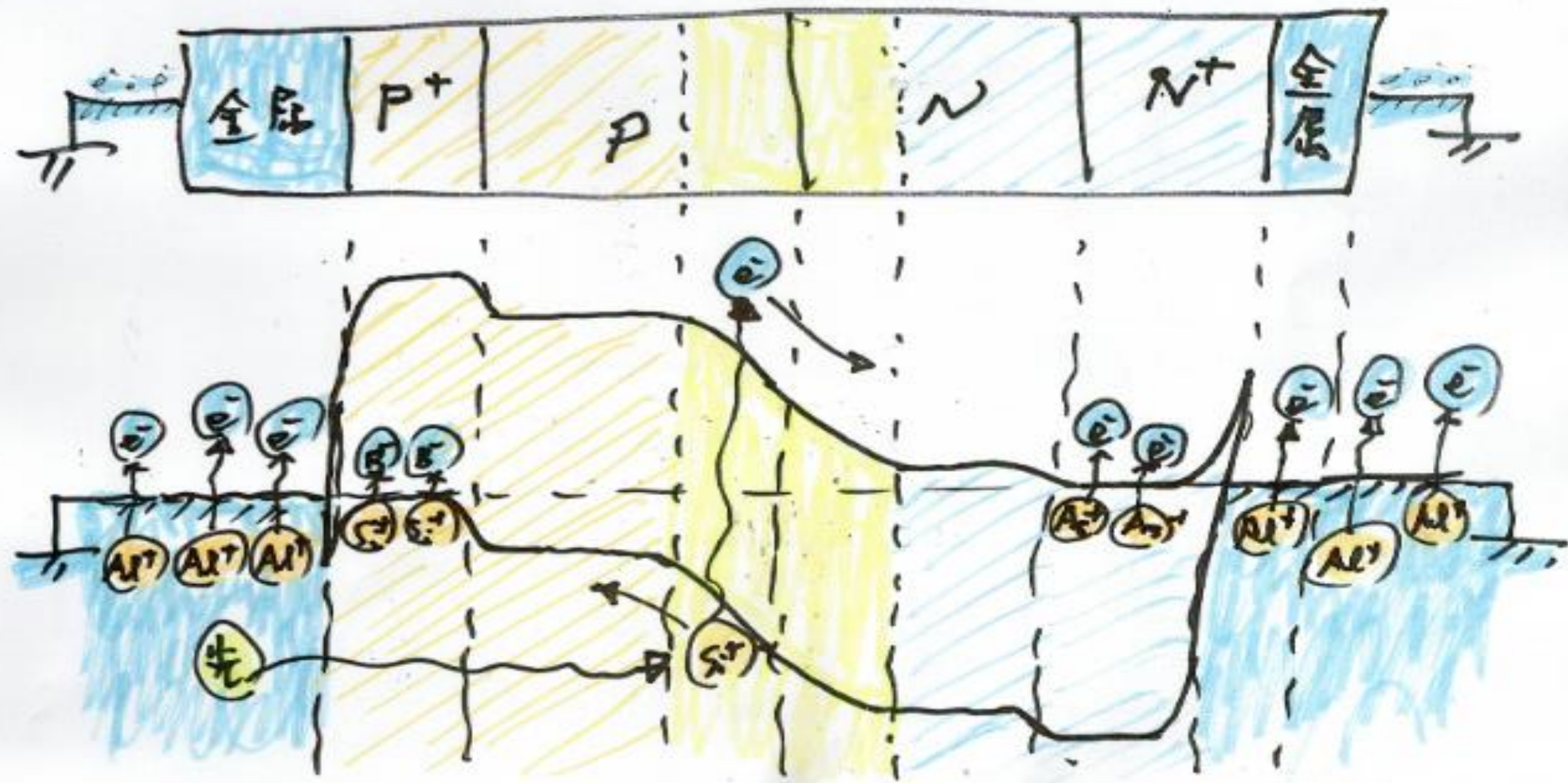
As^+ イオンは不活性

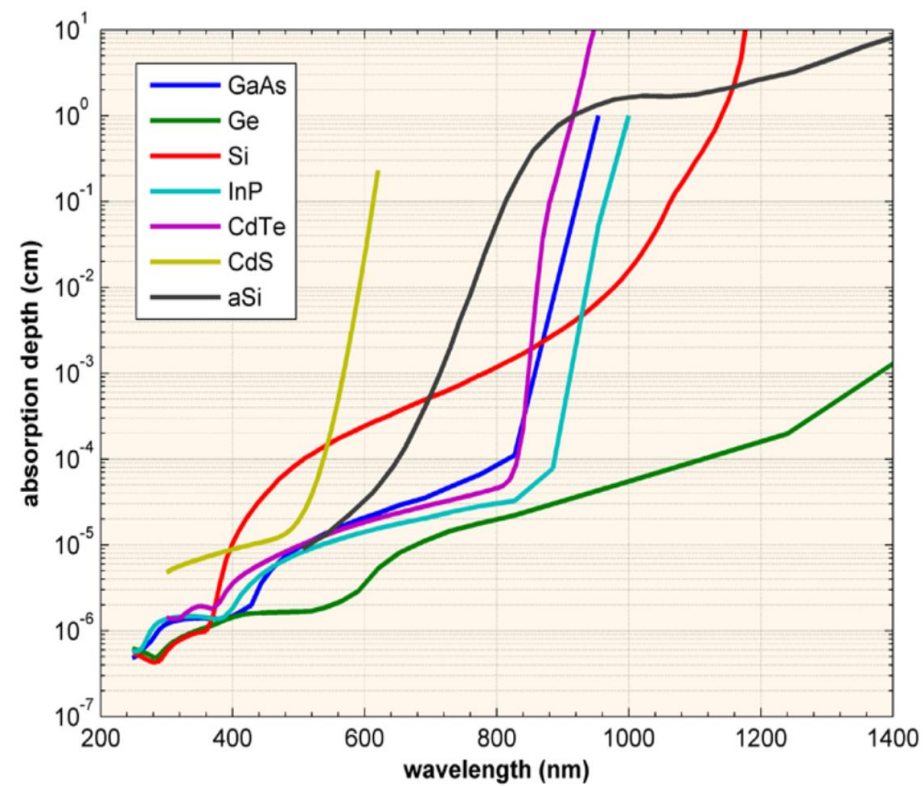
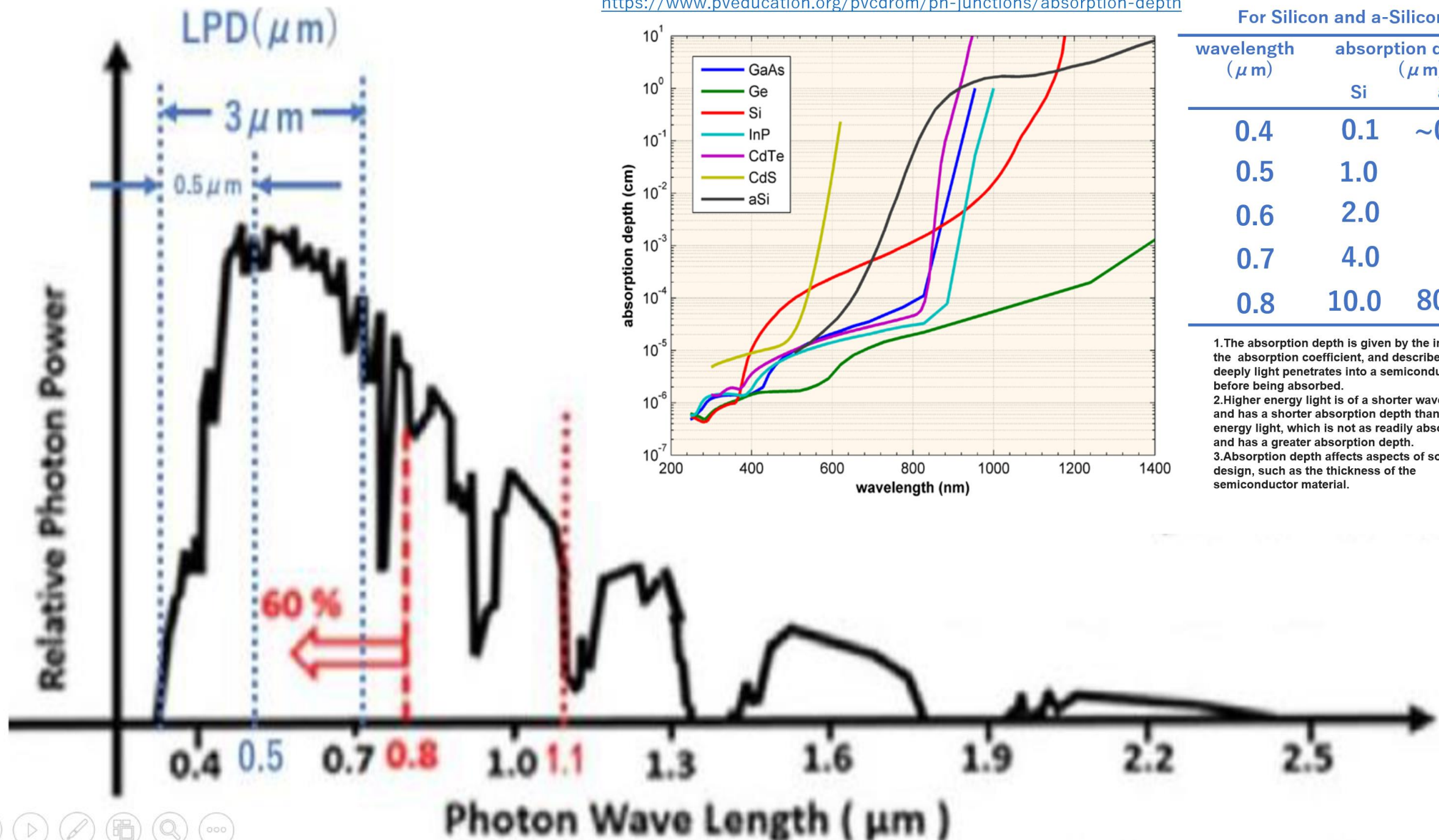


金属と p^+ 半導体の接合の物理モデル



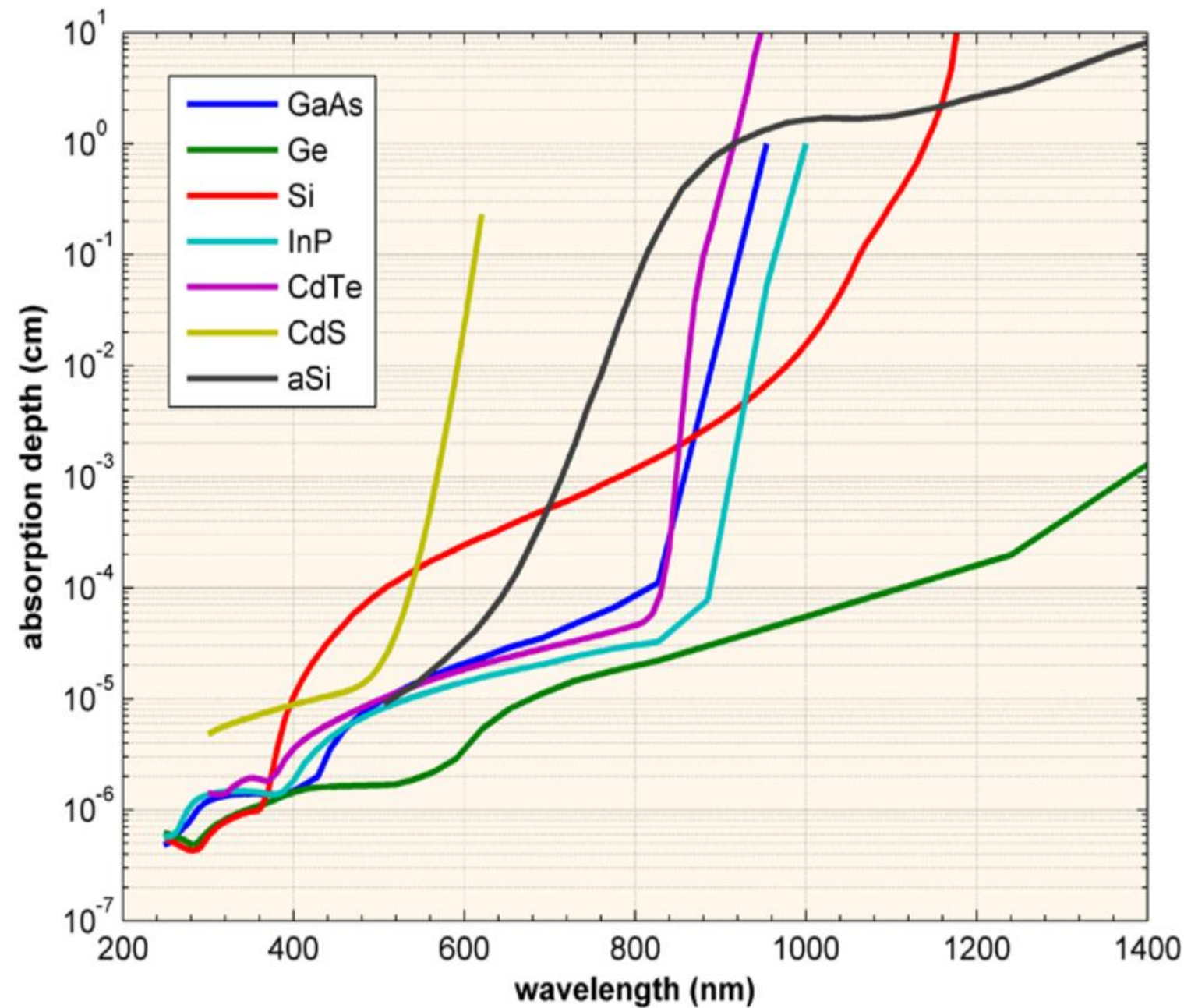
NタイプとPタイプの半導体の接合の物理モデル





For Silicon and a-Silicon		
wavelength (μm)	absorption depth (μm)	
	Si	a-Si
0.4	0.1	~0.04
0.5	1.0	0.1
0.6	2.0	0.2
0.7	4.0	4.0
0.8	10.0	800.0

- 1. The absorption depth is given by the inverse of the absorption coefficient, and describes how deeply light penetrates into a semiconductor before being absorbed.
- 2. Higher energy light is of a shorter wavelength and has a shorter absorption depth than lower energy light, which is not as readily absorbed, and has a greater absorption depth.
- 3. Absorption depth affects aspects of solar cell design, such as the thickness of the semiconductor material.

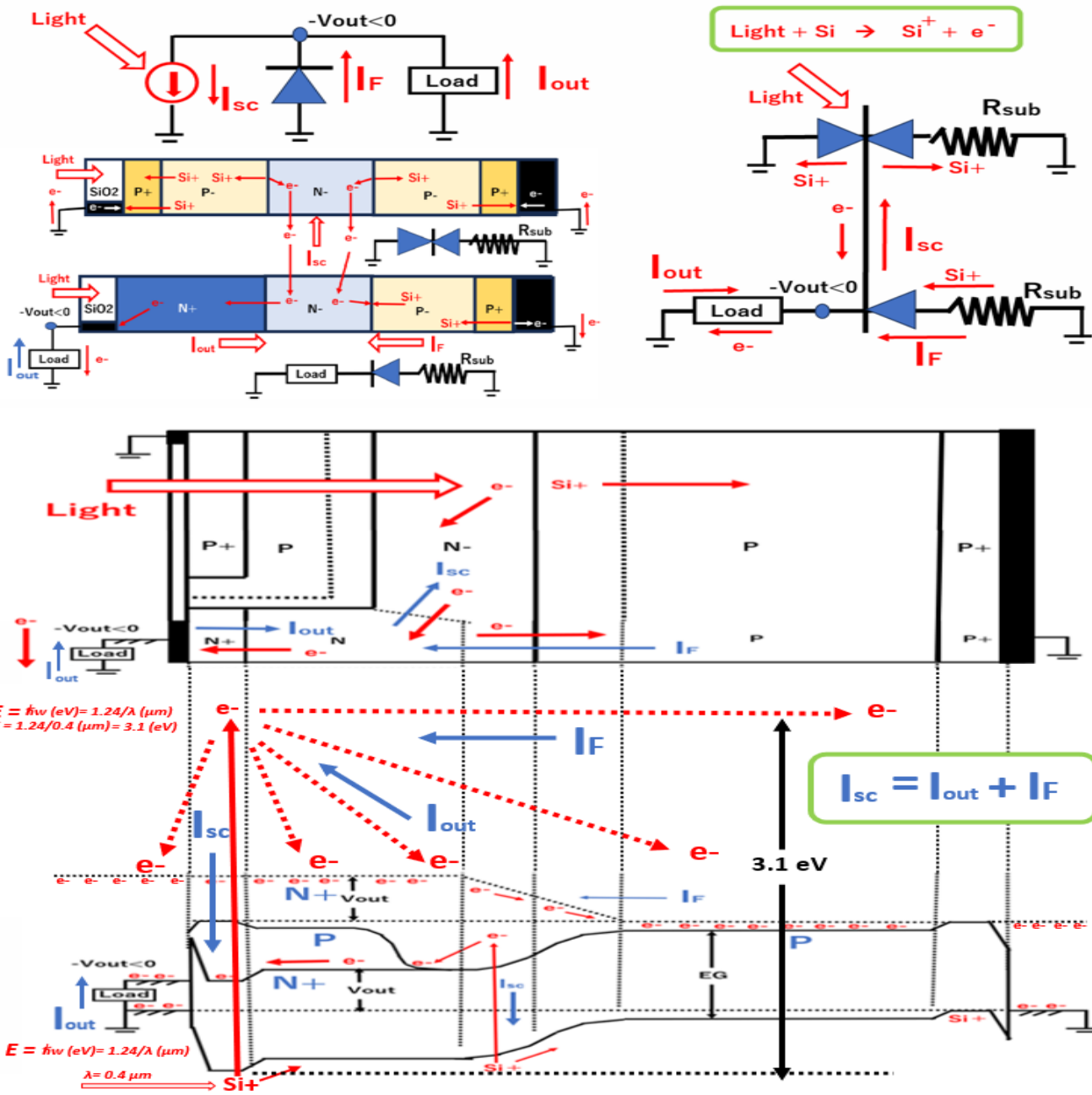


For Silicon and a-Silicon

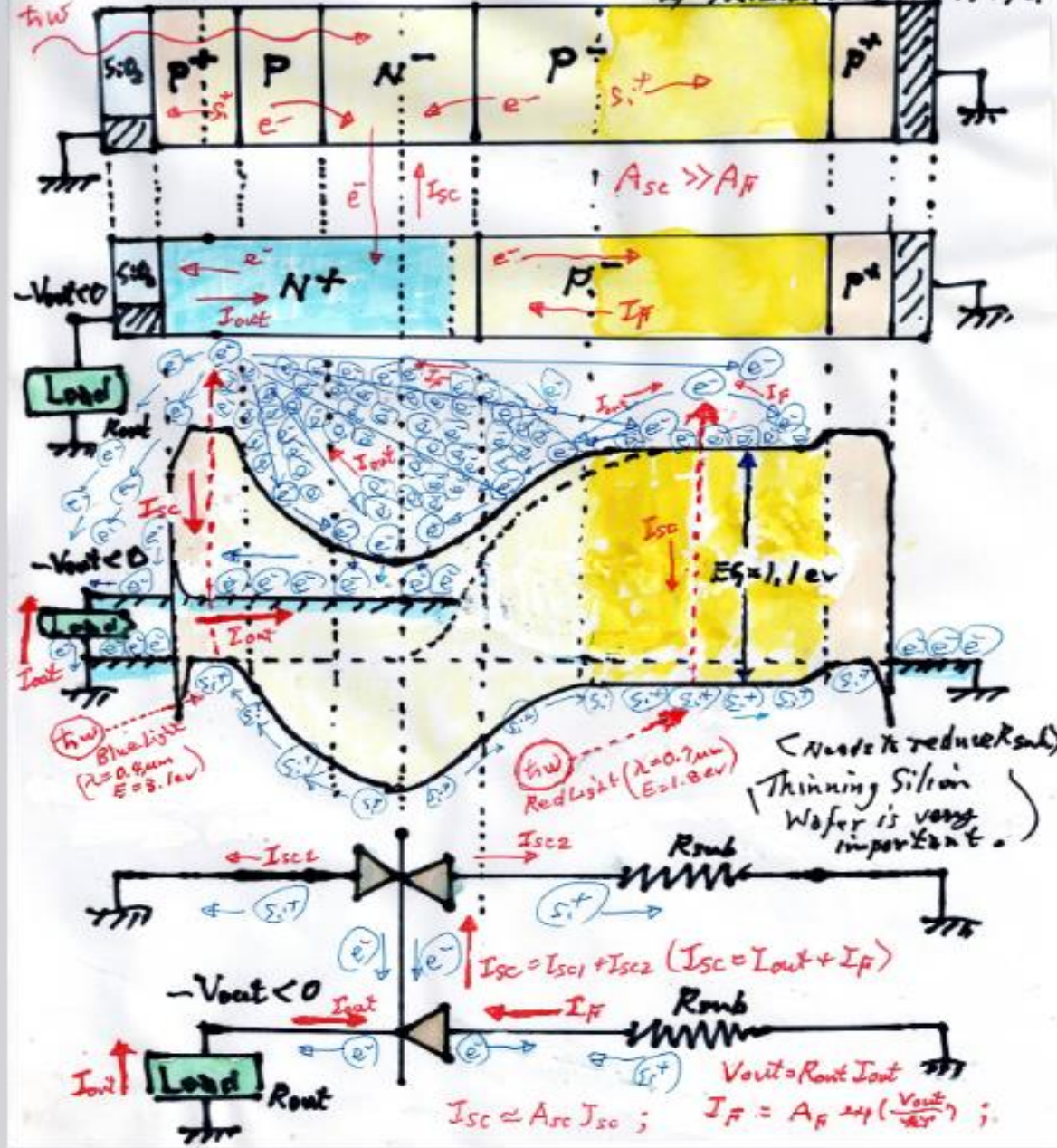
wavelength (μ m)	absorption depth (μ m)	
	Si	a-Si
0.4	0.1	~0.04
0.5	1.0	0.1
0.6	2.0	0.2
0.7	4.0	4.0
0.8	10.0	800.0

- 1.The absorption depth is given by the inverse of the absorption coefficient, and describes how deeply light penetrates into a semiconductor before being absorbed.
- 2.Higher energy light is of a shorter wavelength and has a shorter absorption depth than lower energy light, which is not as readily absorbed, and has a greater absorption depth.
- 3.Absorption depth affects aspects of solar cell design, such as the thickness of the semiconductor material.

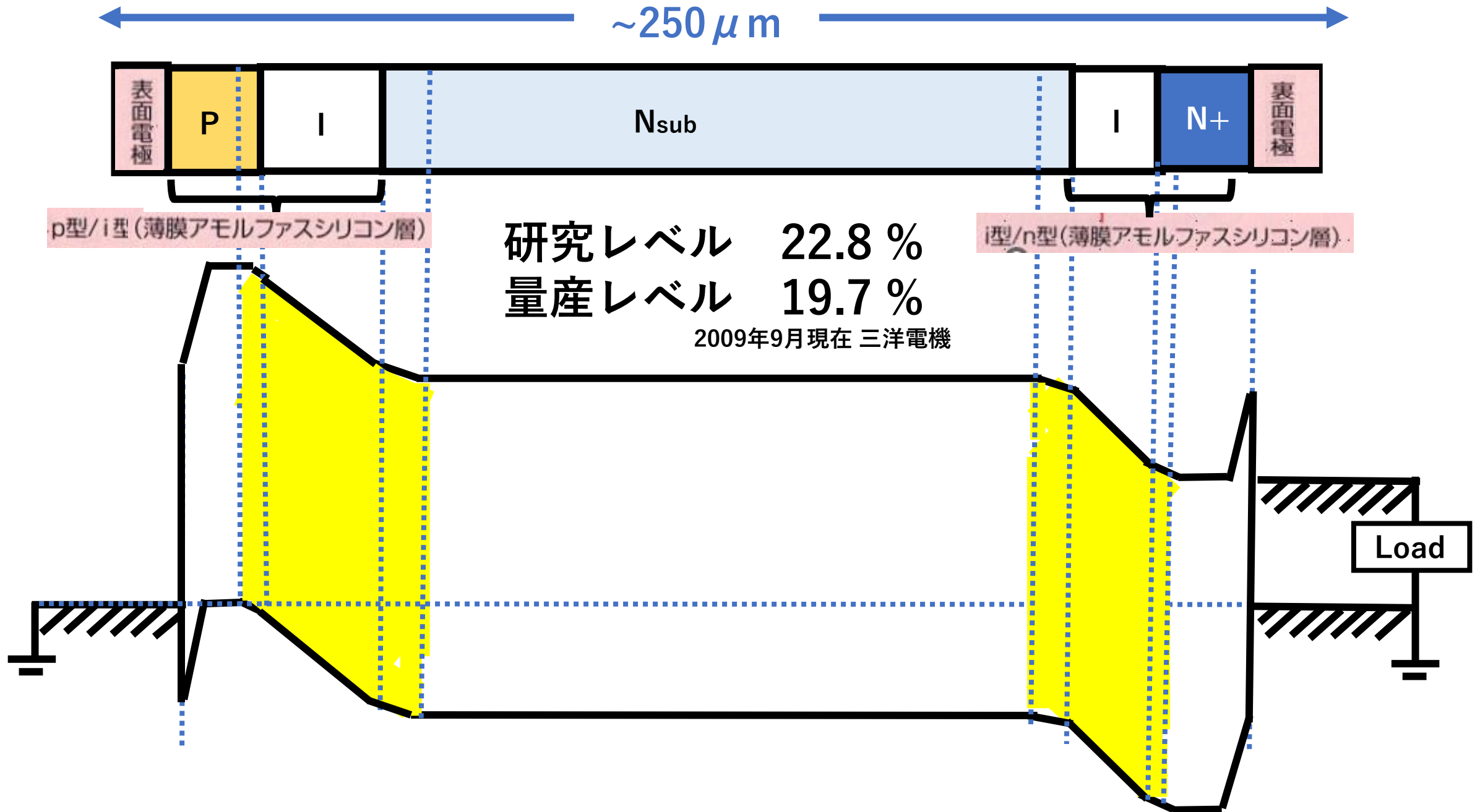
P+P-N-P-P+ Double Junction Pinned Photodiode Type Solar Cell defined in JPA2020-131313 (JP6810828) by Yoshiaki Hagiwara



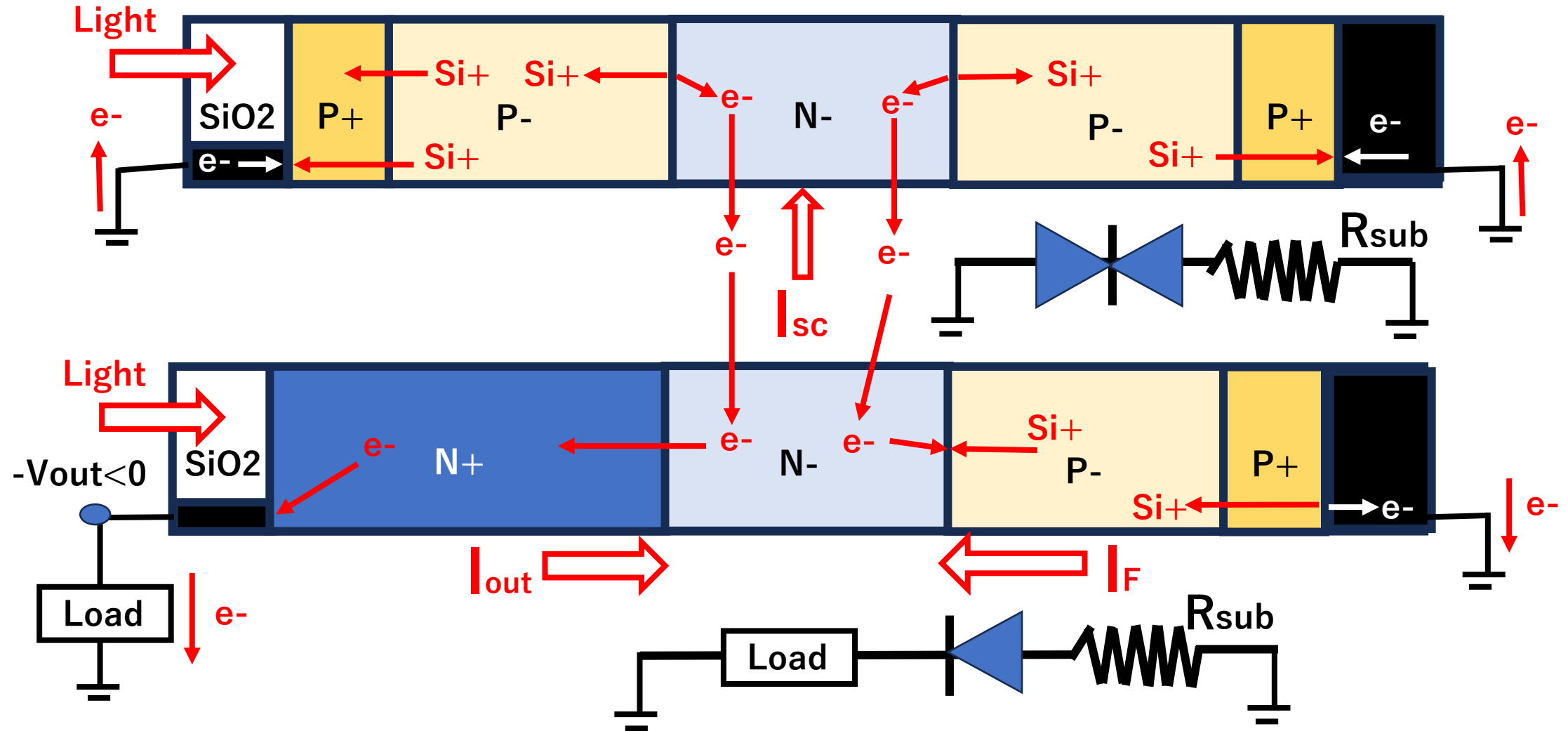
The p⁺p⁻n⁻p⁺ Double Junction Pinned Photodiode Solar Cell defined in JAP 131313 (JP6810828) on Aug 1, 2020, by Yoshiaki Hagiwara, APOS.



Hetero-junction with Intrinsic Thin-layer Solar Cell

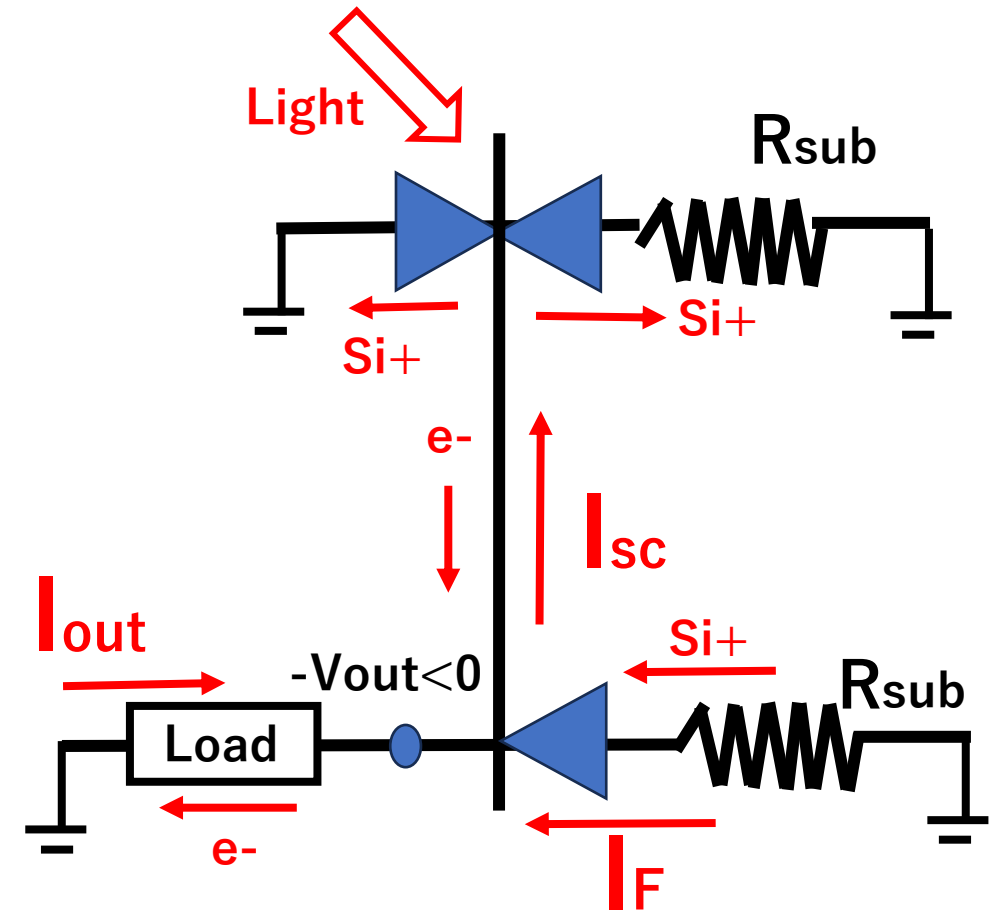
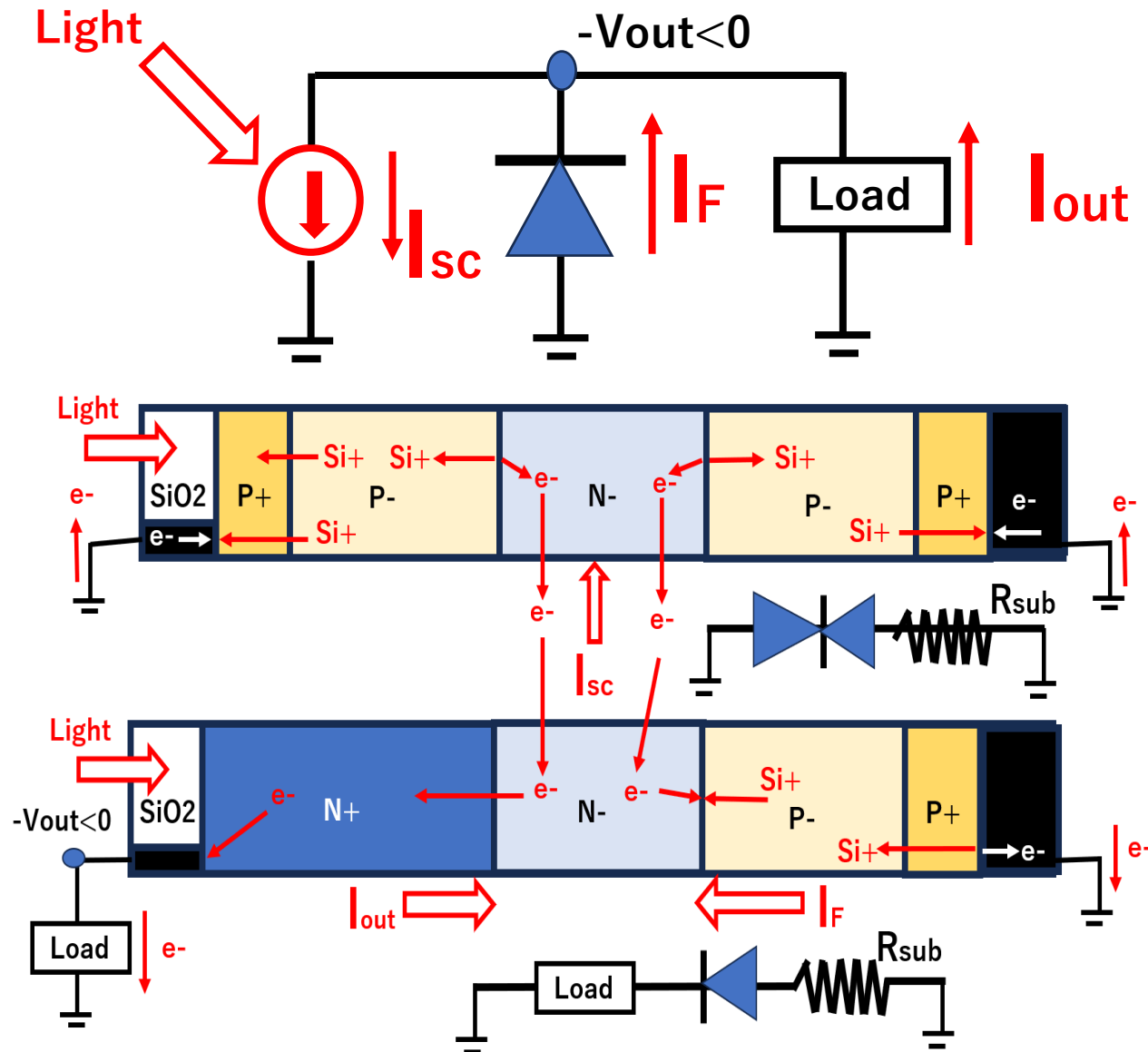


P+P-N-P-P+ Double Junction Pinned Photodiode Type Solar Cell defined in JPA2020-131313 (JP6810828) by Yoshiaki Hagiwara

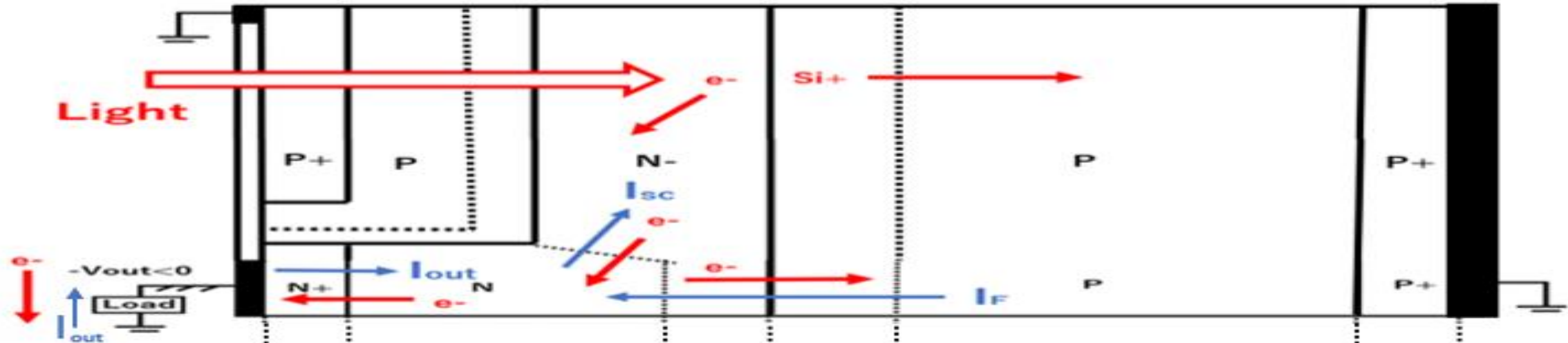


$$I_{sc} = I_{out} + I_F ; I_F = I_o \exp(V_{out}/kT) ; I_{out} = V_{out}/R_{out} ;$$

P+P-N-P-P+ Double Junction Pinned Photodiode Type Solar Cell defined in JPA2020-131313 (JP6810828) by Yoshiaki Hagiwara

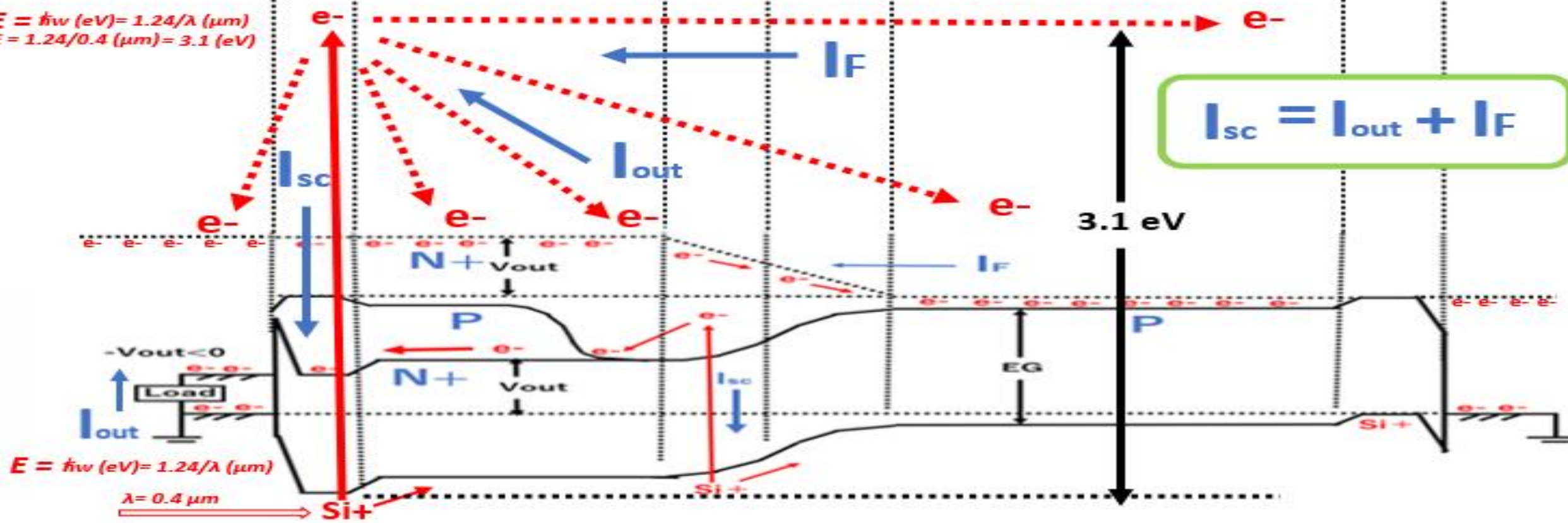


Light



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

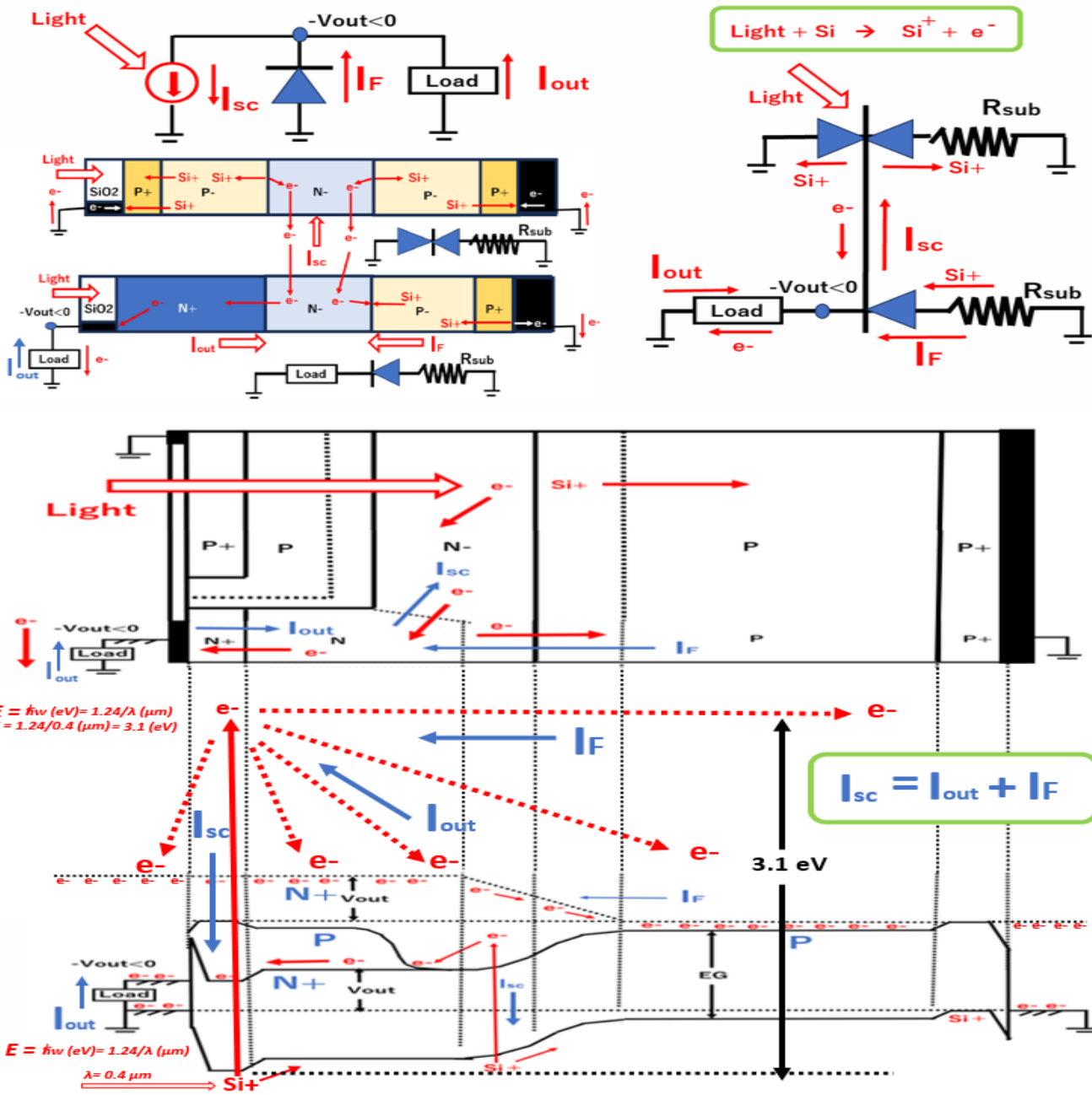
$$= 1.24/0.4 \text{ (\mu m)} = 3.1 \text{ (eV)}$$



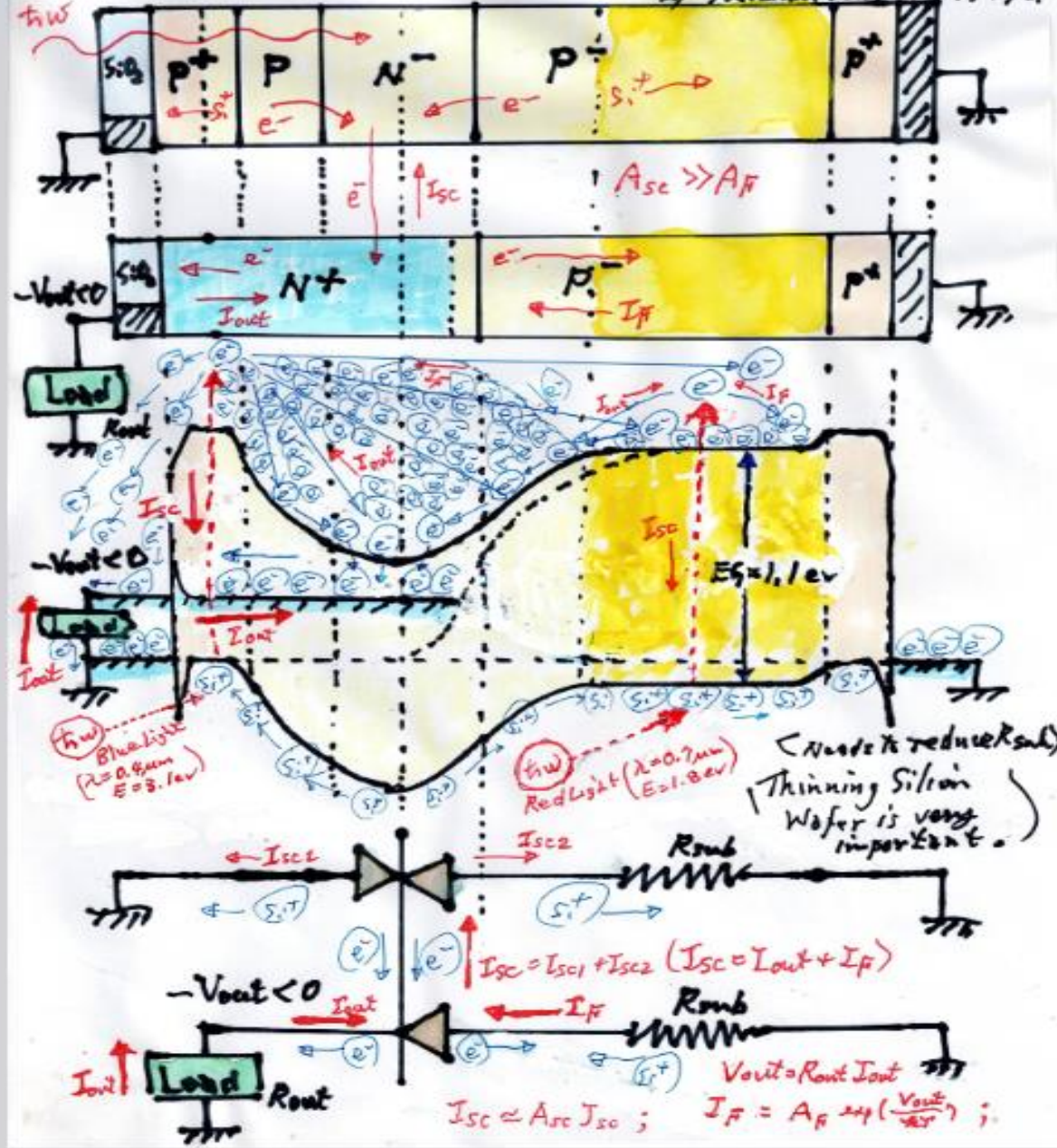
$$E = \hbar\omega \text{ (eV)} = 1.24/\lambda \text{ (\mu m)}$$

$$\lambda = 0.4 \text{ \mu m}$$

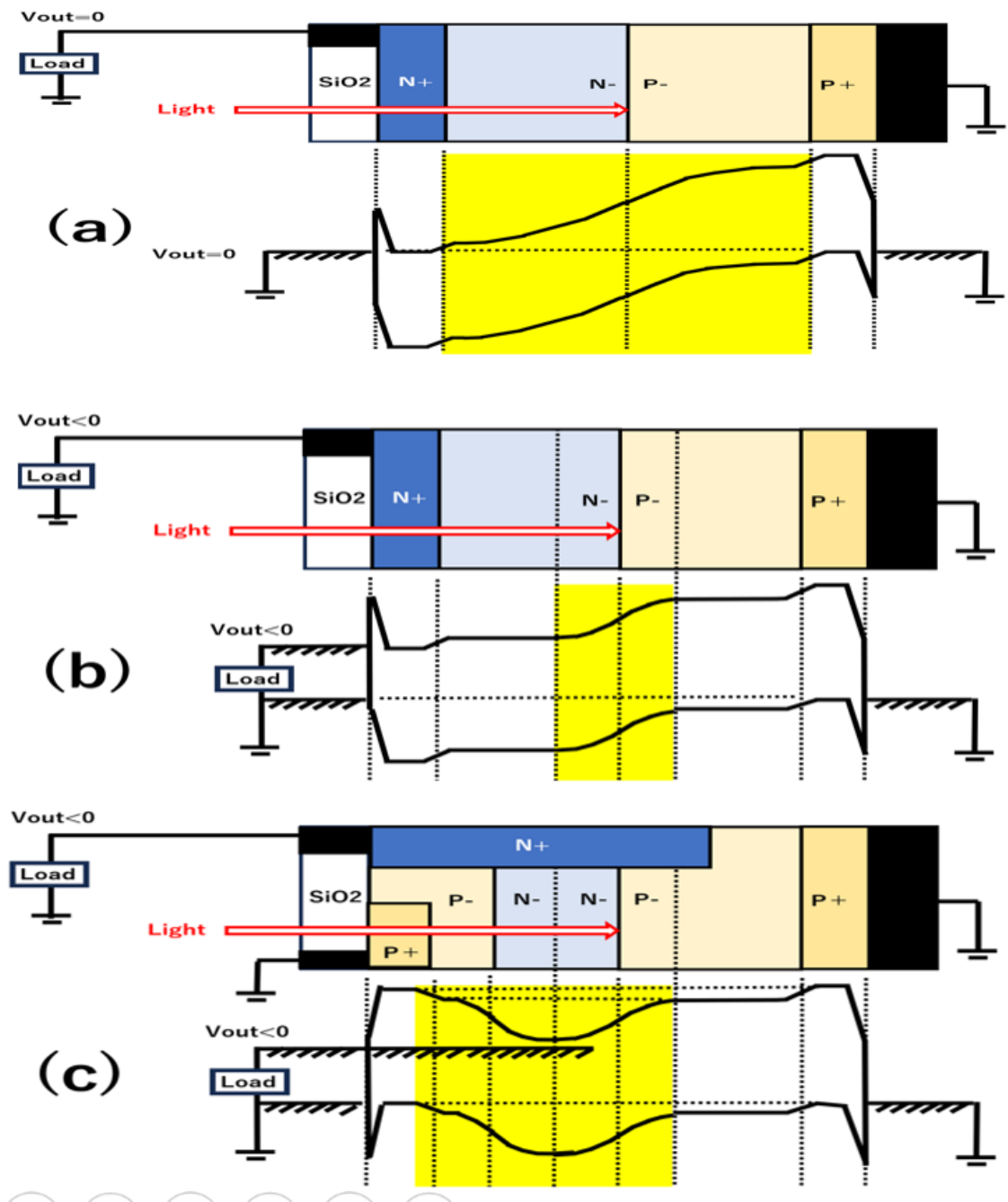
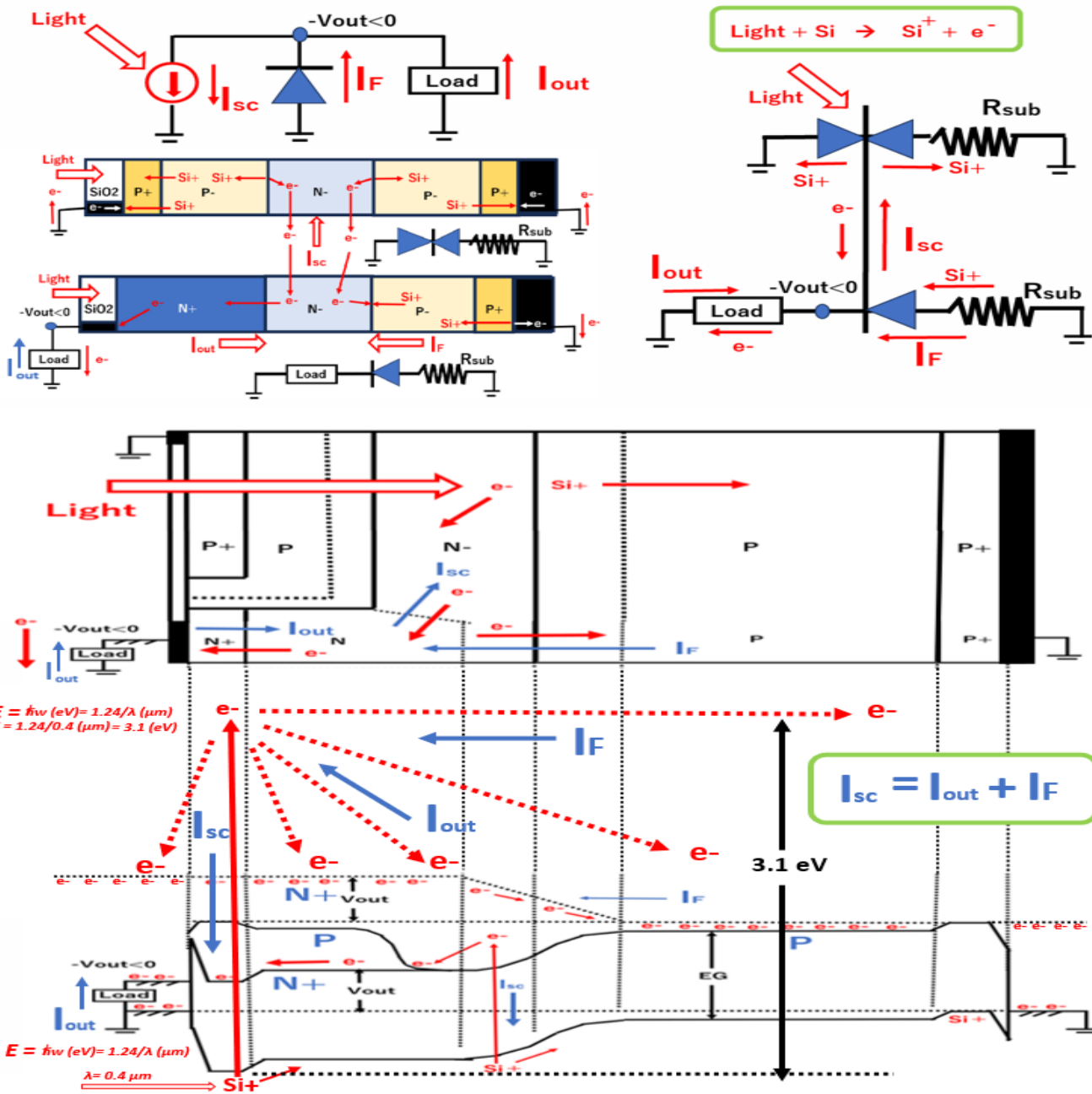
P+P-N-P-P+ Double Junction Pinned Photodiode Type Solar Cell defined in JPA2020-131313 (JP6810828) by Yoshiaki Hagiwara



The p⁺p⁻n⁻p⁺ Double Junction Pinned Photodiode Solar Cell defined in JAP 131313 (JP6810208) on Aug 1, 2020, by Yoshiaki Hagiwara, APOS.



P+P-N-P-P+ Double Junction Pinned Photodiode Type Solar Cell
defined in JPA2020-131313 (JP6810828) by Yoshiaki Hagiwara

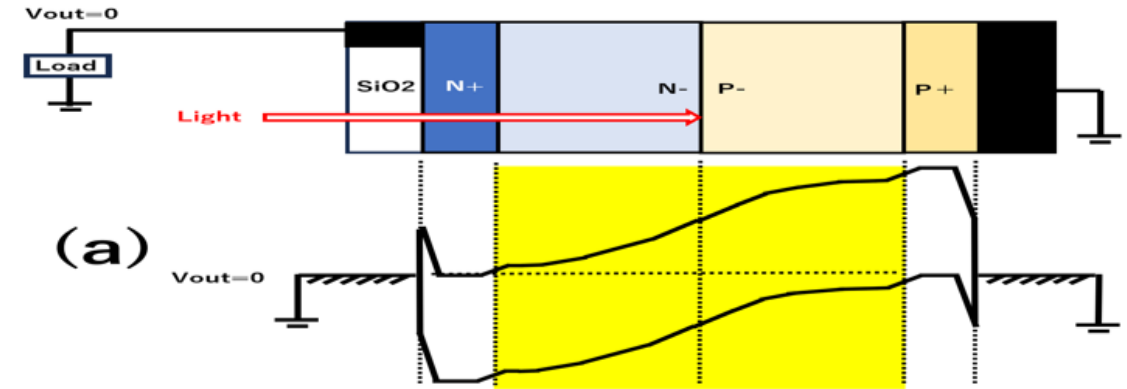


ダブル接合Pinned Photodiode 型太陽電池

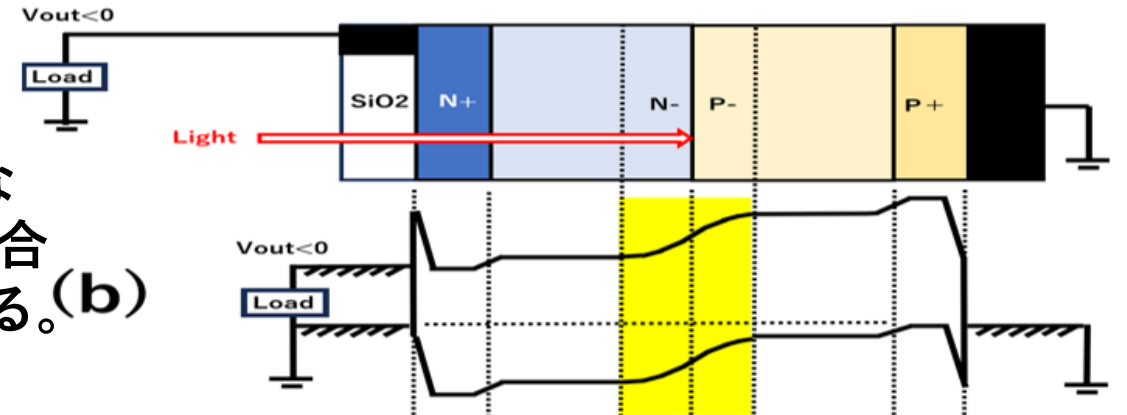
JPA2020-131313 (JP6828108) filed on Aug 1, 2020
by Yoshiaki Daimon Hagiwara, AIPS.

Japanese Patent Application JPA2020-131313

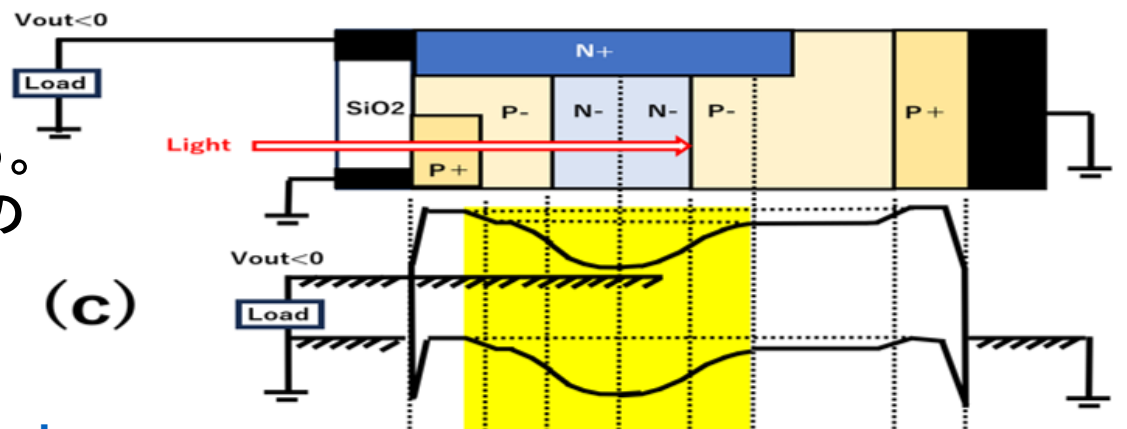
(a) N+N-P-P+シングル接合型太陽電池の場合、
出力電圧 $V_{out} = 0$ の場合、有効な
光電変換（空乏層）領域は最大となるが、
出力パワー $Power = (I_{out})(V_{out})$ はゼロである。



(b) N+N-P-P+シングル接合型太陽電池の場合、
最大パワー出力時の電圧が $V_{out} \sim -EG/2$ の場合有効な
光電変換（空乏層）領域が減少し、順方向電流がN+P接合
表面積と出力電圧に比例し急増し光電変換効率が劣化する。(b)



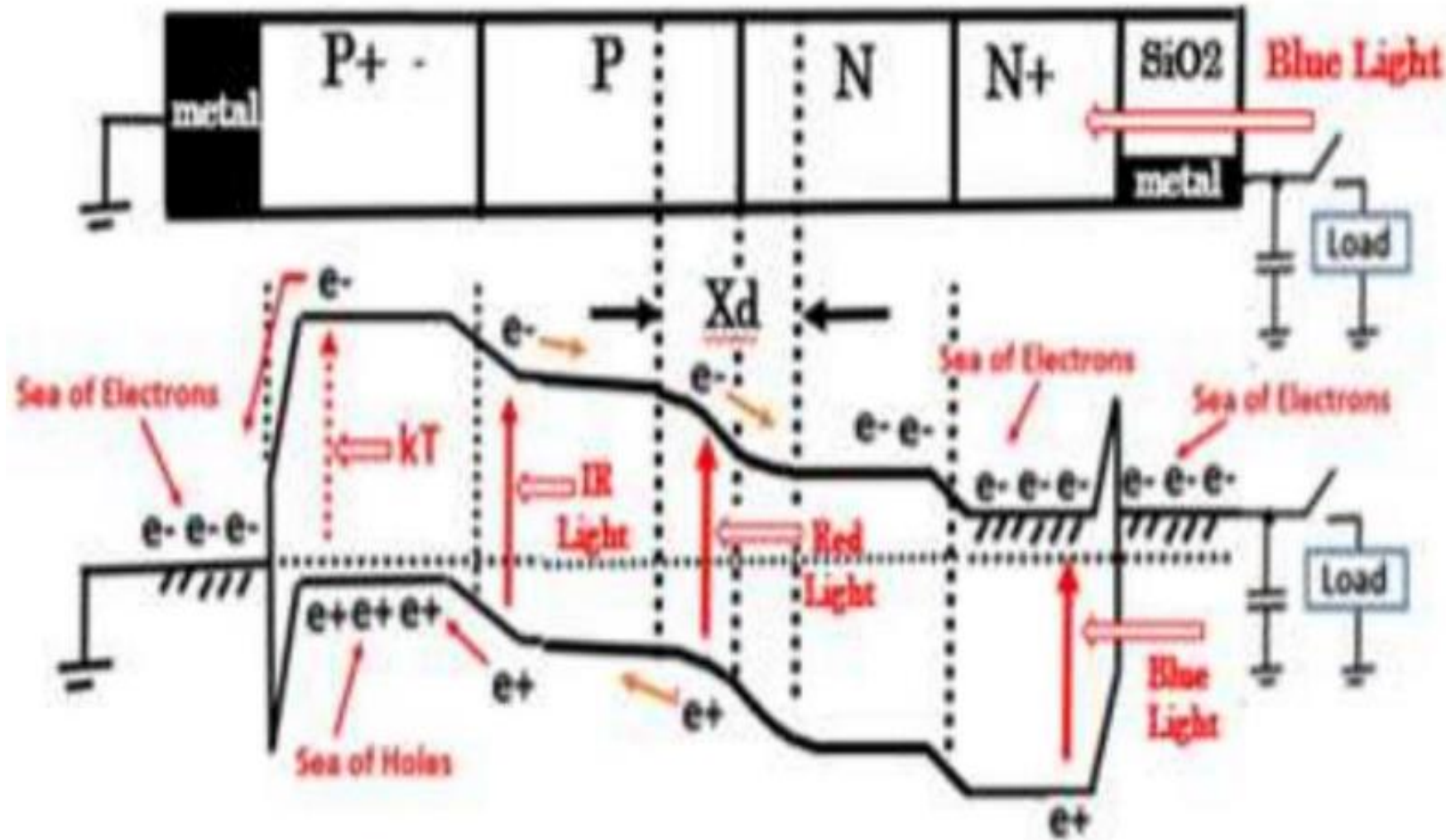
(c) P+P-N-N-P-P+ダブル接合型太陽電池の場合、
最大出力電圧 $V_{out} \sim -EG/2$ の場合でも有効な
光電変換（空乏層）領域は2倍以上である。さらに
受光表面のP+P濃度勾配によるバリア電界も貢献する。
 $V_B = kT \ln(P+/P-)$ も有効光電変換に寄与、出力端子の
N+P接合面積に比例する順方向電流も非常に小さい。



<http://www.aiplab.com/>

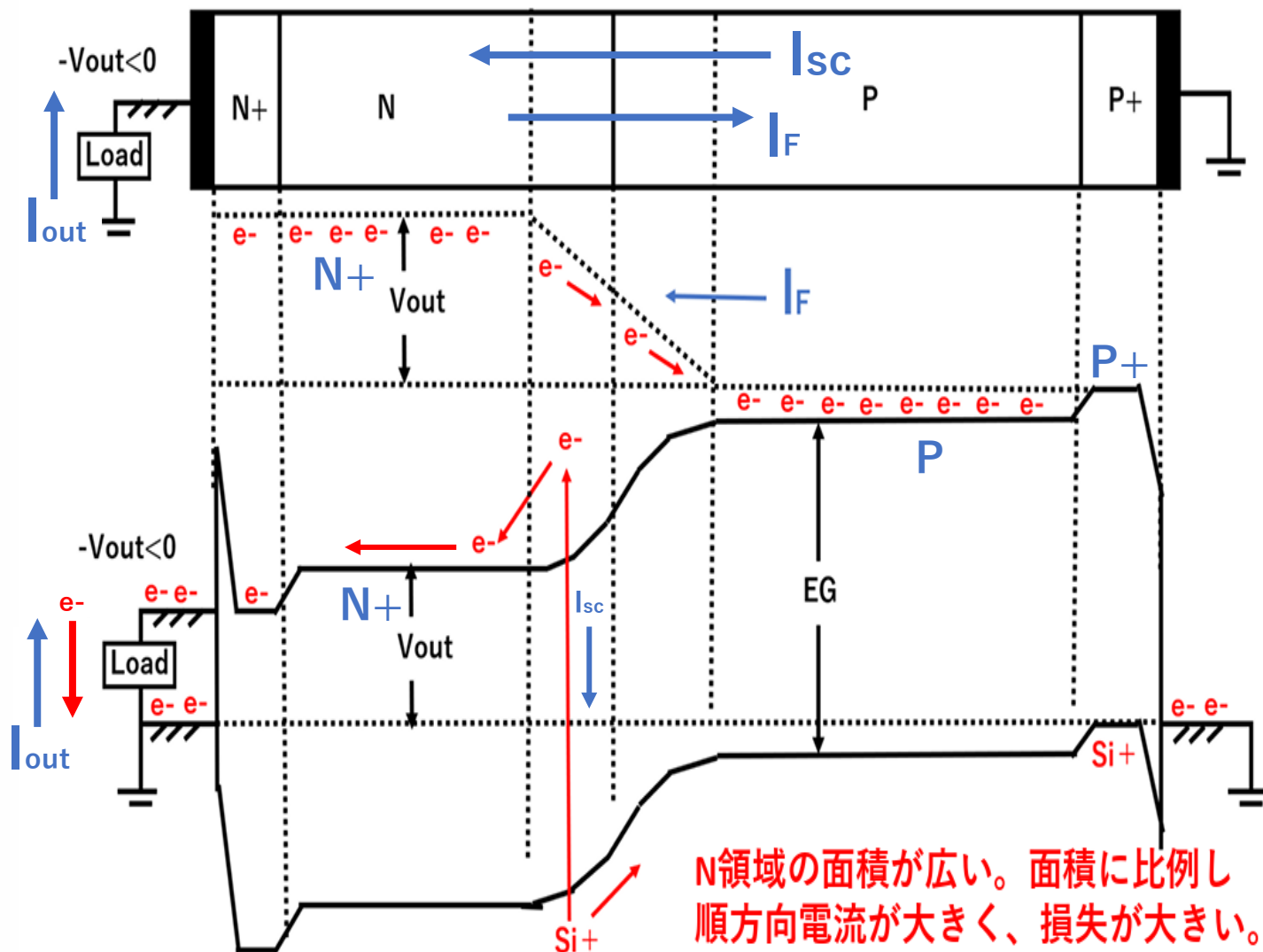
従来のN+NPP+接合型太陽電池では、受光表のN+層の電位がFLATでFloating状態にあり電界が存在しない。

従来の太陽電池が量子効率（光電変換効率）が悪いのは再結合領域の存在が大きな部分を占める事が原因である。



従来のN+NPP+接合型太陽電池は、受光表面積に比例した順方向大電流 I_F が流れて変換効率の損失を招く。

N+NPP+シングル接合型Solar Cellの順方向電流 I_F



従来のN+NPP+シングル接合型太陽電池

$$I_{sc} = I_{out} + I_F$$

$$I_{out} = V_{out} / R_{Load}$$

$$I_F = A_{N+} \exp(V_{out}/kT)$$

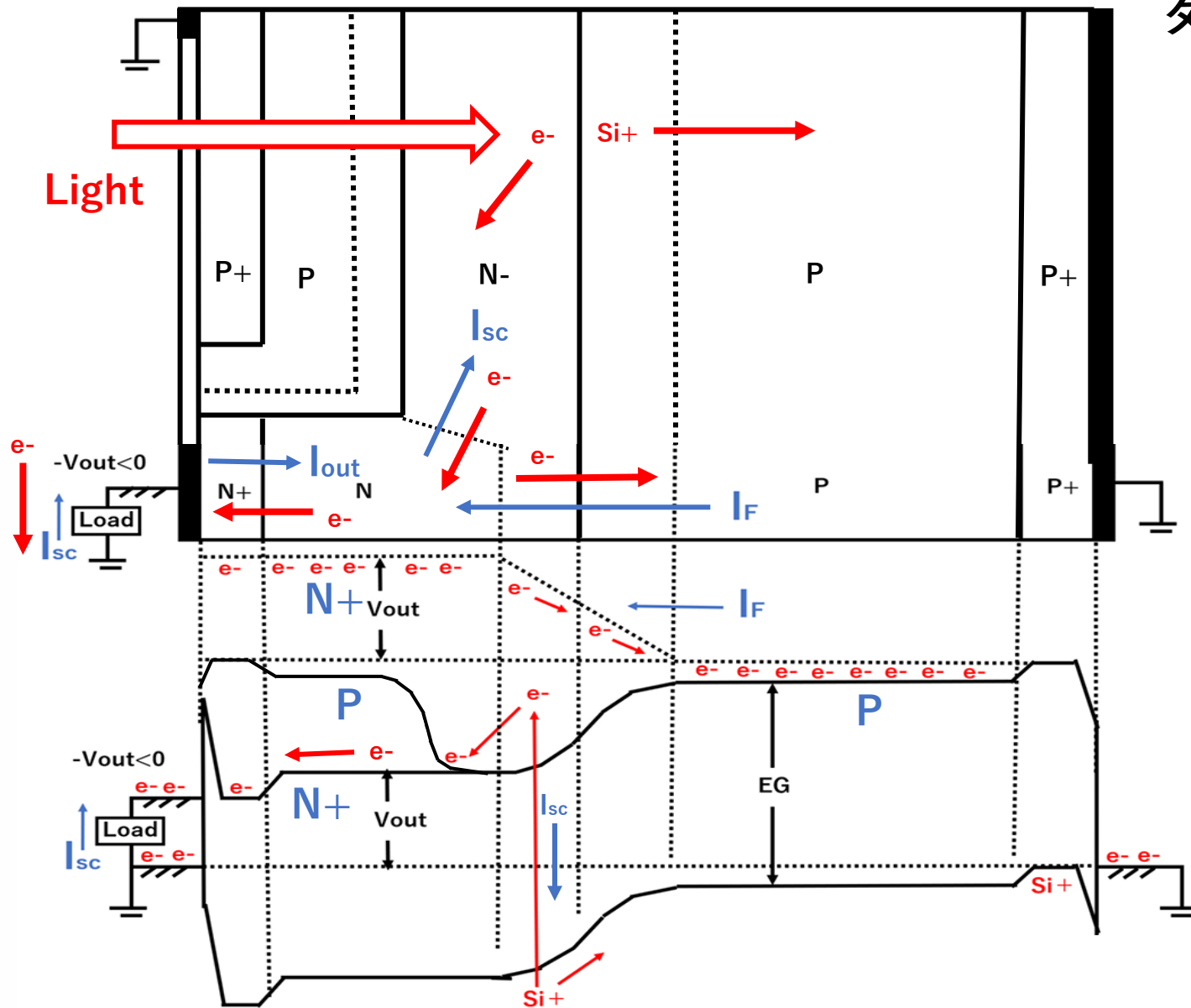
$$I_{sc} = A_{sc} J_{sc}$$

$$A_{sc} \sim A_{N+}$$

従来のN+NPP+シングル接合型太陽電池も、広い受光表面積 A_{sc} に比例して光電流出力 I_{sc} を得るが再結合も大きい。

従来のN+NPP+接合型太陽電池は、広いN+N領域 A_{N+} に比例した順方向大電流 I_F が流れて変換効率の損失を招く。

ダブル接合Pinned Photodiode 型太陽電池



$$I_{sc} = I_{out} + I_F$$

$$I_{out} = V_{out} / R_{Load}$$

$$I_F = A_{N+} \exp(V_{out}/kT)$$

$$I_{sc} = A_{sc} J_{sc}$$

$$A_{sc} \gg A_{N+}$$

See JPA2020-131313 (JP6828108)

P+PN-PP+ダブル接合Pinned Photodiode型太陽電池も、広い受光表面積 A_{sc} に比例して光大電流出力 I_{sc} を得る。一方、出力電流 I_{out} が流れ出る N+N-PP+領域の表面積 A_{N+} は小さく、それに比例する順方向大電流 I_F も小さい。

Numerical Analysis of Double Junction Pinned Photodiode type Solar Cell

[C2024_03_18_a.c](#)

[C2024_03_18_Z1.txt](#)

[C2024_03_18_G1.html](#)

[C2024_03_18_A1.txt](#)

[C2024_03_18_Z2.txt](#)

[C2024_03_18_G2.html](#)

[C2024_03_18_A2.txt](#)

[C2024_03_18_Z3.txt](#)

[C2024_03_18_G3.html](#)

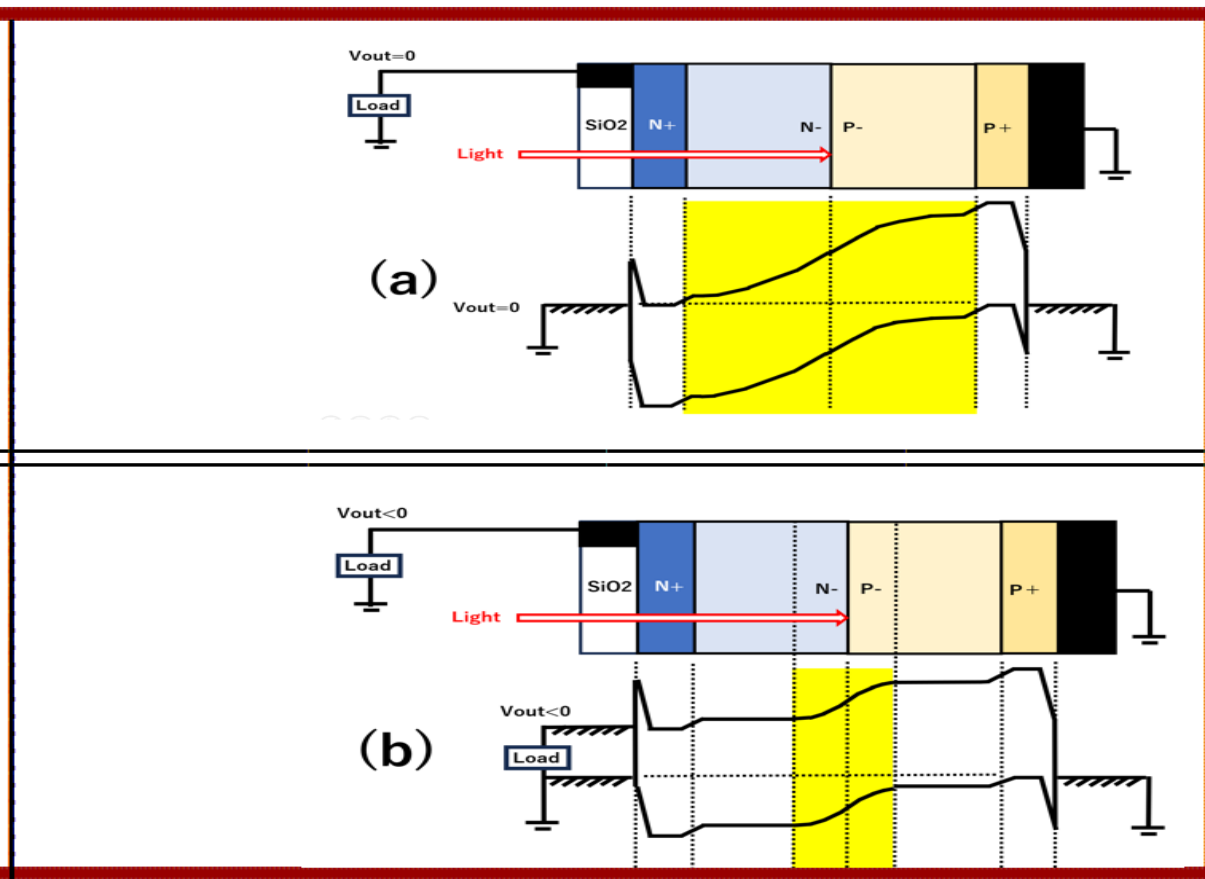
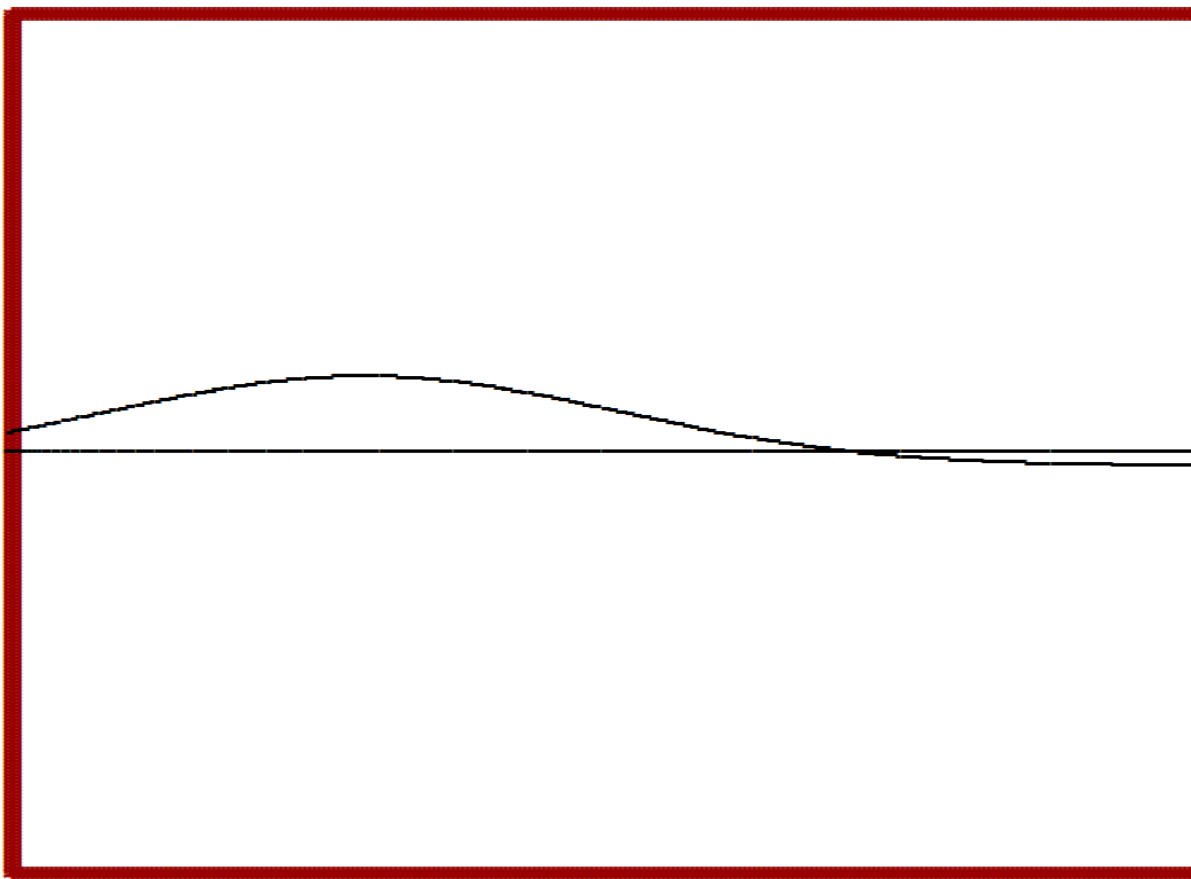
[C2024_03_18_A3.txt](#)

***** G1.html, March 17, 2024 by Yoshiaki Hagiwara, AIPS *****
XYPLOT Normalized Dope(X) { xmin=0,xmax=2,Dmin=-1,Dmax=1;} for Single Junction Solar Cell

```
double Dsub=1000,NV=100000000;
```

```
double DNNS=6000, XNN=0.3,RNN=0.3;
```

NP Single Junction Solar Cell



Numerical Analysis of Double Junction Pinned Photodiode type Solar Cell

[C2024 03 18 a.c](#)

[C2024 03 18 Z1.txt](#)

[C2024 03 18 G1.html](#)

[C2024 03 18 A1.txt](#)

[C2024 03 18 Z2.txt](#)

[C2024 03 18 G2.html](#)

[C2024 03 18 A2.txt](#)

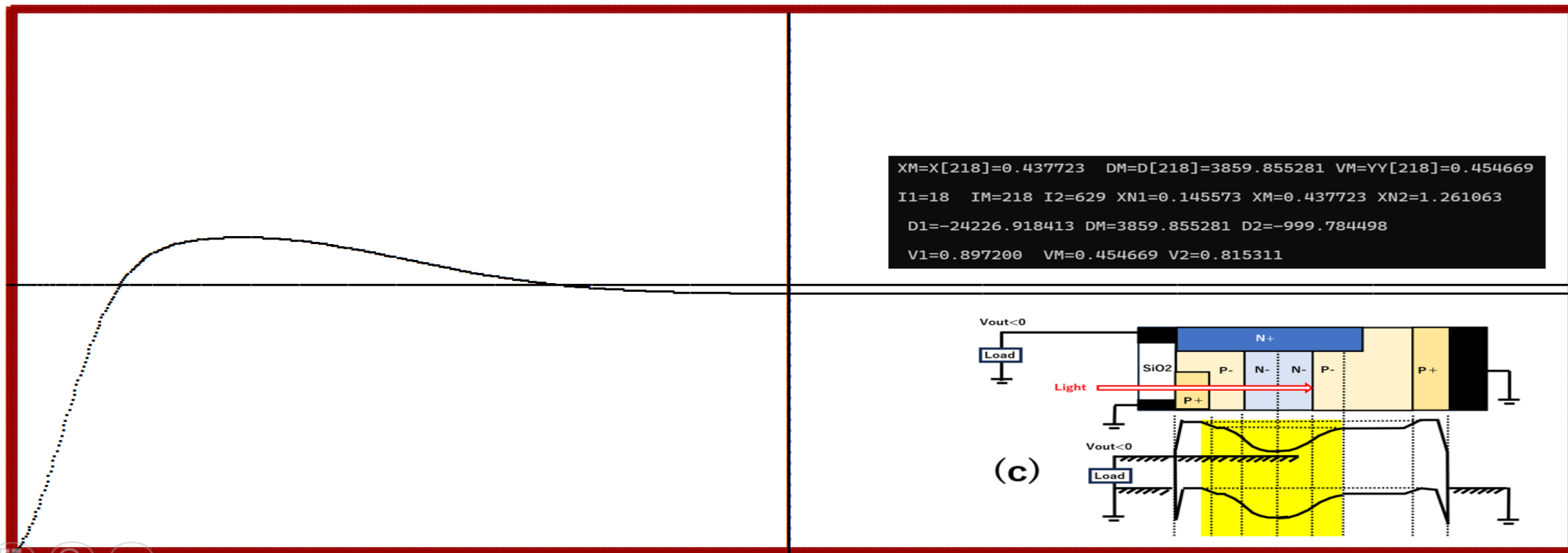
[C2024 03 18 Z3.txt](#)

[C2024 03 18 G3.html](#)

[C2024 03 18 A3.txt](#)

```
***** G2.html, March 17, 2024 by Yoshiaki Hagiwara, AIPS *****
XYPLOT Normalized Dope(X) { xmin=0,xmax=2,Dmin=-1,Dmax=1;} for Double Junction Solar Cell
*****
double Dsub=1000,NV=100000000;
double DPPS=30000,XPP=0.0,RPP=0.1;
double DNNS=6000,XNN=0.3,RNN=0.3;
```

PNP Double Junction Solar Cell



Numerical Analysis of Double Junction Pinned Photodiode type Solar Cell

[C2024_03_18_a.c](#)

[C2024_03_18_Z1.txt](#)

[C2024_03_18_G1.html](#)

[C2024_03_18_A1.txt](#)

[C2024_03_18_Z2.txt](#)

[C2024_03_18_G2.html](#)

[C2024_03_18_A2.txt](#)

[C2024_03_18_Z3.txt](#)

[C2024_03_18_G3.html](#)

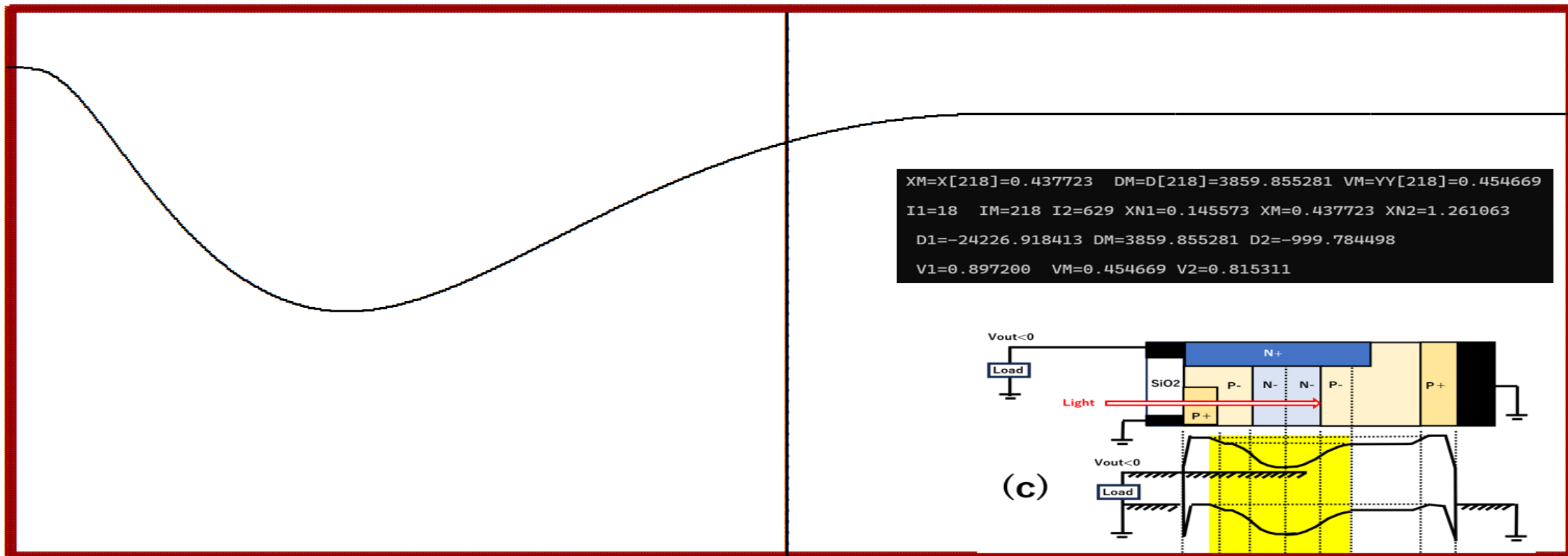
[C2024_03_18_A3.txt](#)

***** G3.html, March 17, 2024 by Yoshiaki Hagiwara, AIPS *****

XYPLOT Normalized { xmin=0,xmax=2,Vmin=0,Vmax=1; } of Electron Potential Profile V(X) ;

```
double Dsub=1000,NV=100000000;  
double DPPS=30000,XPP=0.0,RPP=0.1;  
double DNNS=6000, XNN=0.3,RNN=0.3;
```

PNP Double Junction Solar Cell

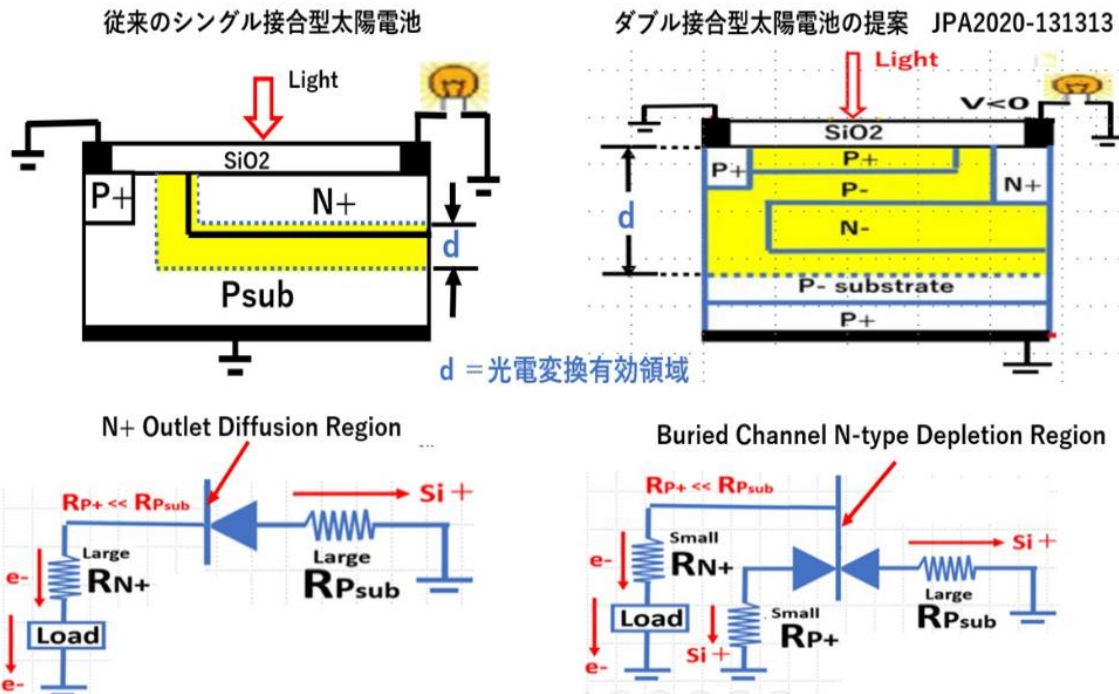


ダブル接合Pinned Photodiode 型太陽電池

JPA2020-131313 (JP6828108) filed on Aug 1, 2020
by Yoshiaki Daimon Hagiwara, AIPS.

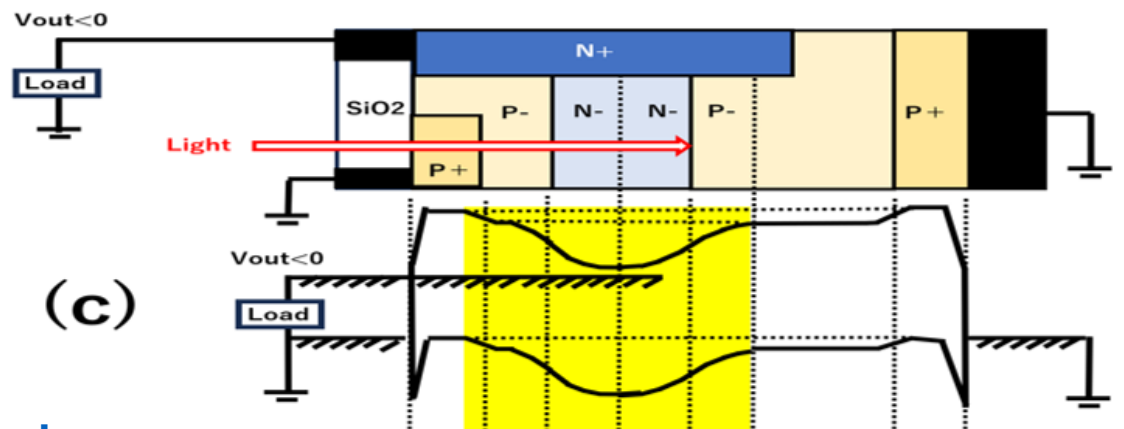
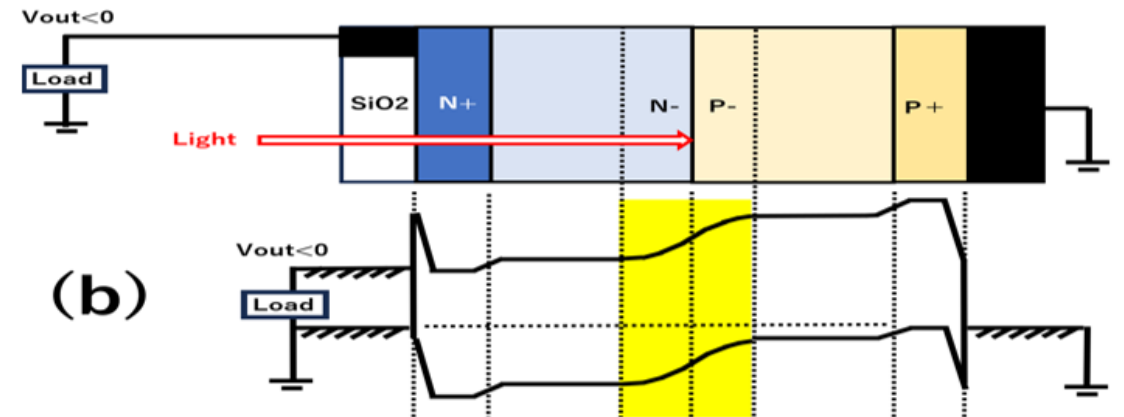
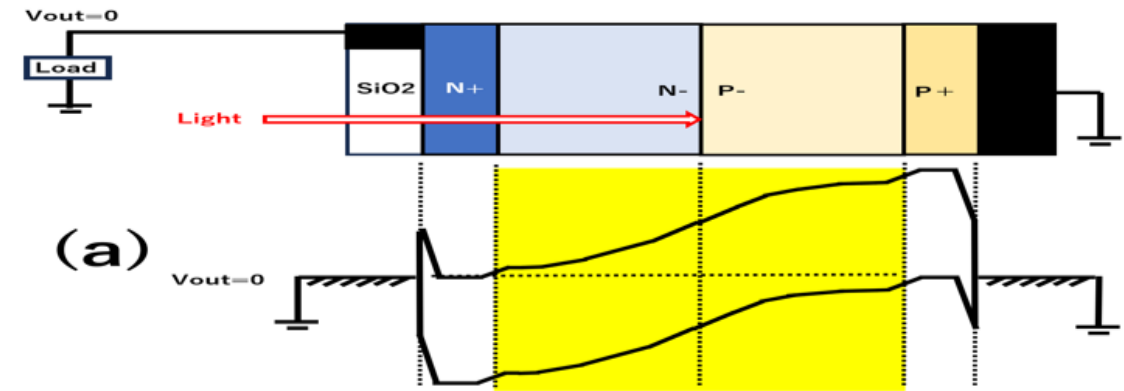
Japanese Patent Application JPA2020-131313

従来型太陽電池との比較



<http://www.aiplab.com/>

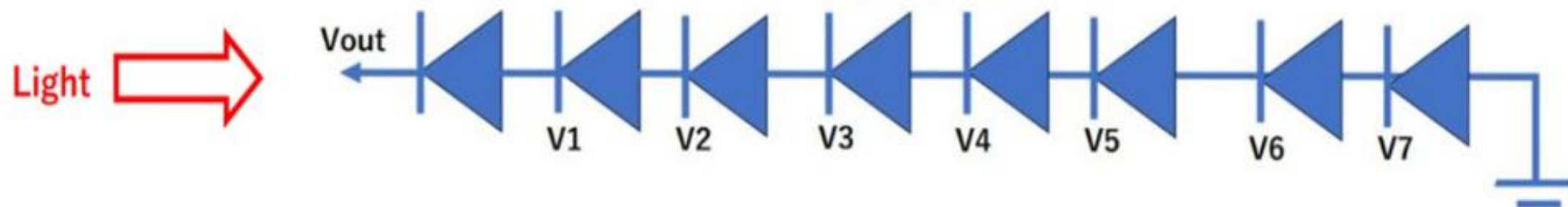
[Chronology of Silicon based Image Sensor Development](#)



V1,V2,V3,V4,V5,V6, V7の端子がすべて浮遊状態(Floating)になり再結合領域が生まれ量子効率が劣化する。

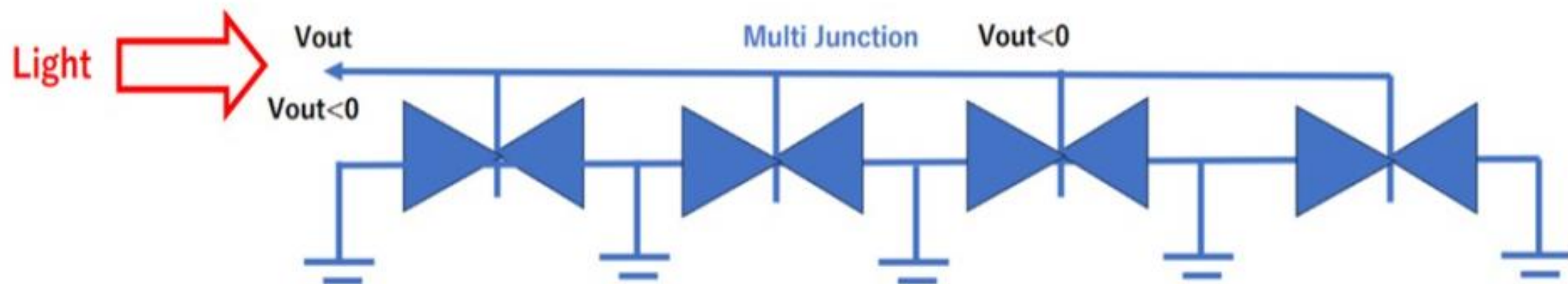
$$V_{out} < V_1 < V_2 < V_3 < V_4 < V_5 < V_6 < V_7 < 0$$

Multi Junction



萩原提案のダブル接合型太陽電池の実施例

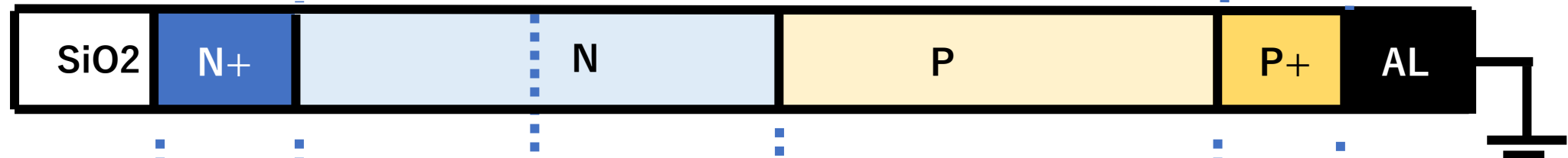
See JPA2020-131313 (JP6818208)



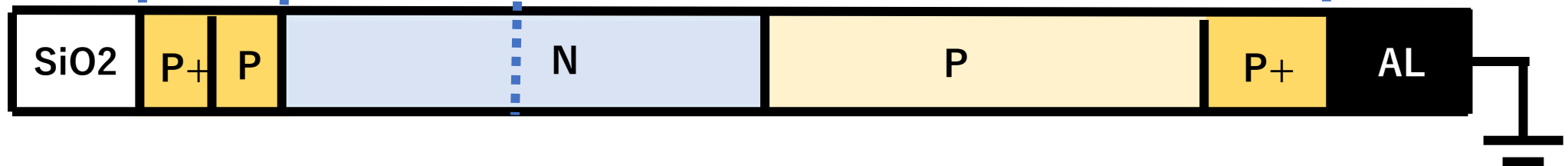
(a) Floating-Surface P-I-N Single Junction type Solar Cell



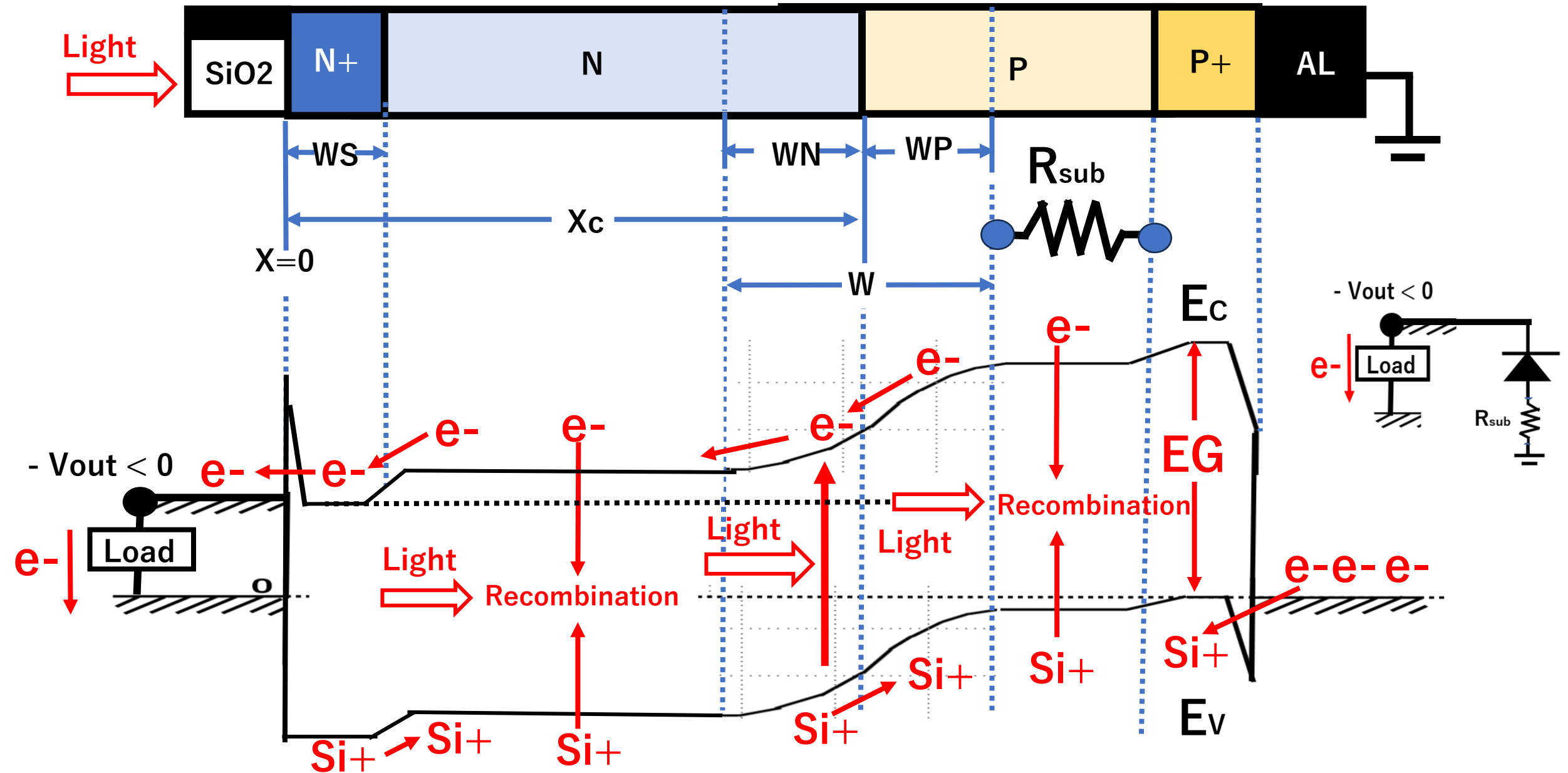
(b) Floating-Surface PN Single Junction type Solar Cell



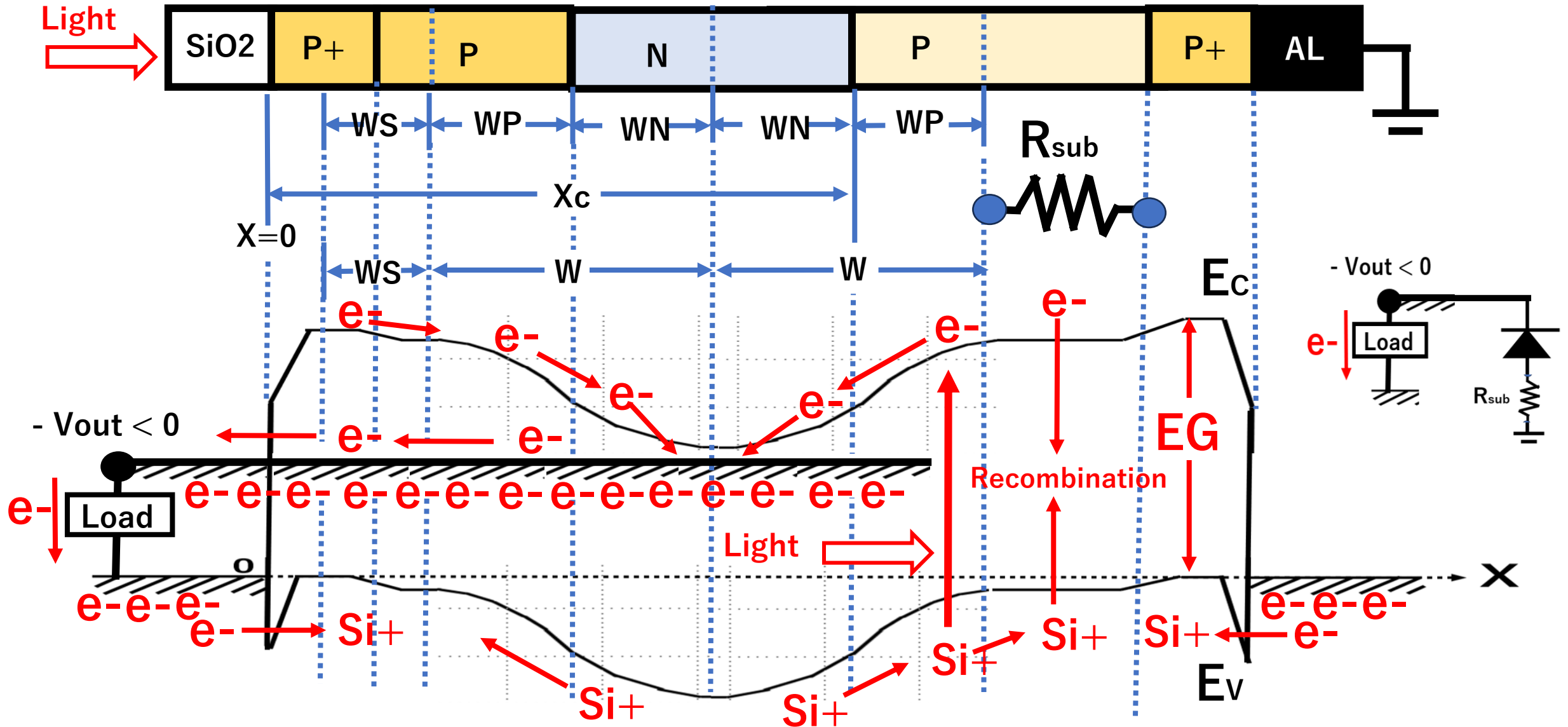
(c) Pinned-Surface P⁺PNPP⁺ Double Junction Pinned Photodiode type Solar Cell



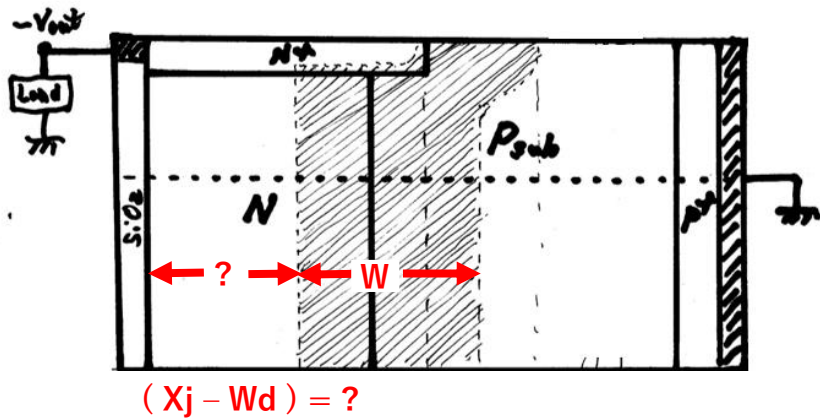
● Conventional NP Single Junction Photodiode type Solar Cell



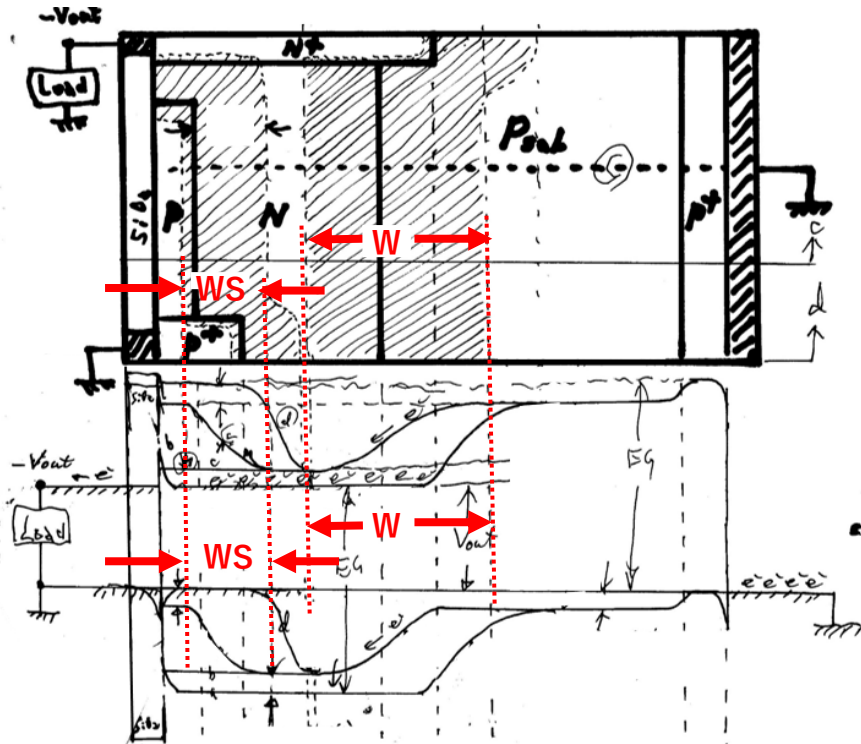
●P+PNPP+ Double Junction Pinned Photodiode type Solar Cell JPA2020-131313 by Yoshiaki Hagiwara



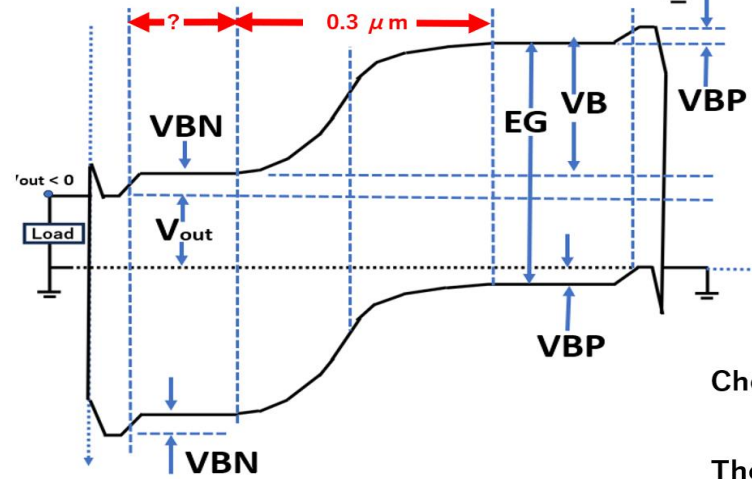
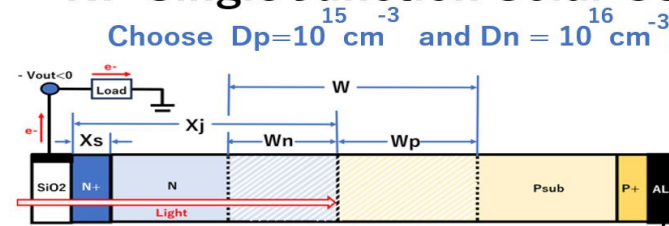
NP Single Junction type Solar Cell



PNP Double Junction type Solar Cell defined in JPA1975-131313



NP Single Junction Solar Cell



$$V_{out} = EG - V_B - V_{BP} - V_{BN};$$

$$V_{BN} = kT \ln(D_{n+}/D_n);$$

$$V_{BP} = kT \ln(D_{p+}/D_p);$$

$$EG = 1.1 \text{ v}; kT = 0.0256 \text{ v};$$

$$\epsilon_{Si} = 648 / (v \cdot \mu\text{m});$$

● NP接合バリア 電圧 $V_B = (D_n W_n^2 + D_p W_p^2) / (2 \epsilon_{Si})$;

$$W = W_n + W_p; D_n W_n = D_p W_p;$$

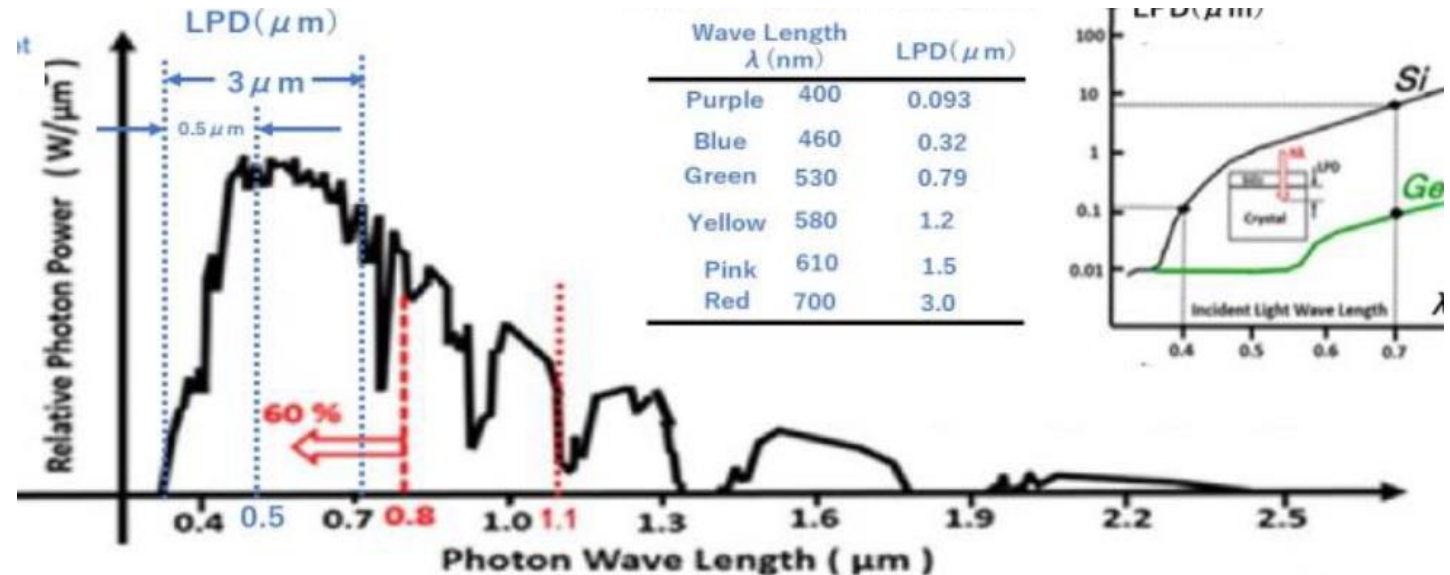
$$(2 \epsilon_{Si}) V_B = D_n W_n^2 (1 + W_p^2 / W_n^2) = D_n W_n^2 (1 + D_n^2 / D_p^2);$$

$$W_n = \sqrt{\frac{\epsilon_{Si} EG}{D_n (1 + D_n^2 / D_p^2)}};$$

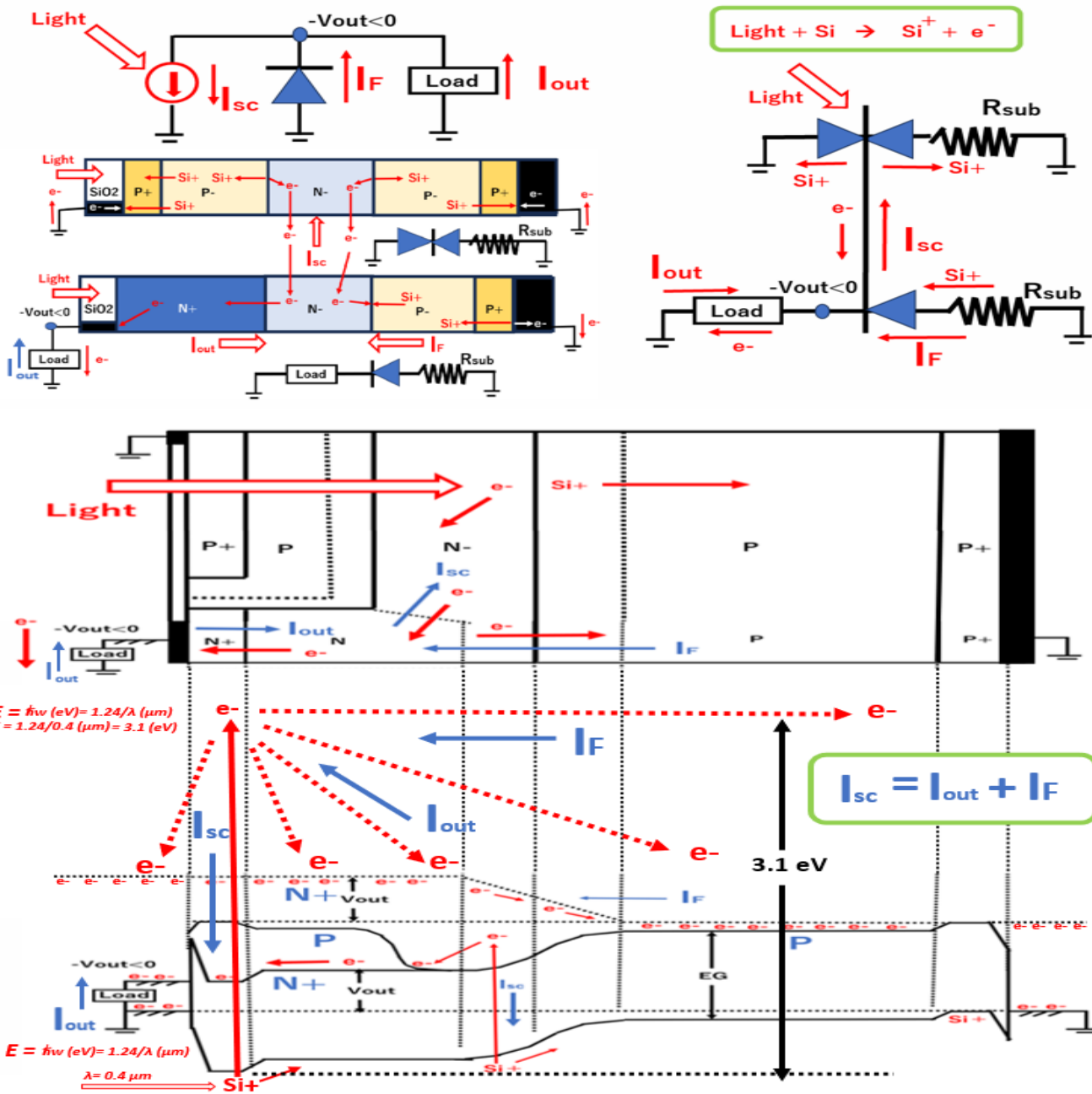
Choose $D_p = 1000 \mu\text{m}^{-3}$ and $D_n = 10000 \mu\text{m}^{-3}$,

then we have $W_n = 0.027 \mu\text{m}$ and $W_p = 0.266 \mu\text{m}$;

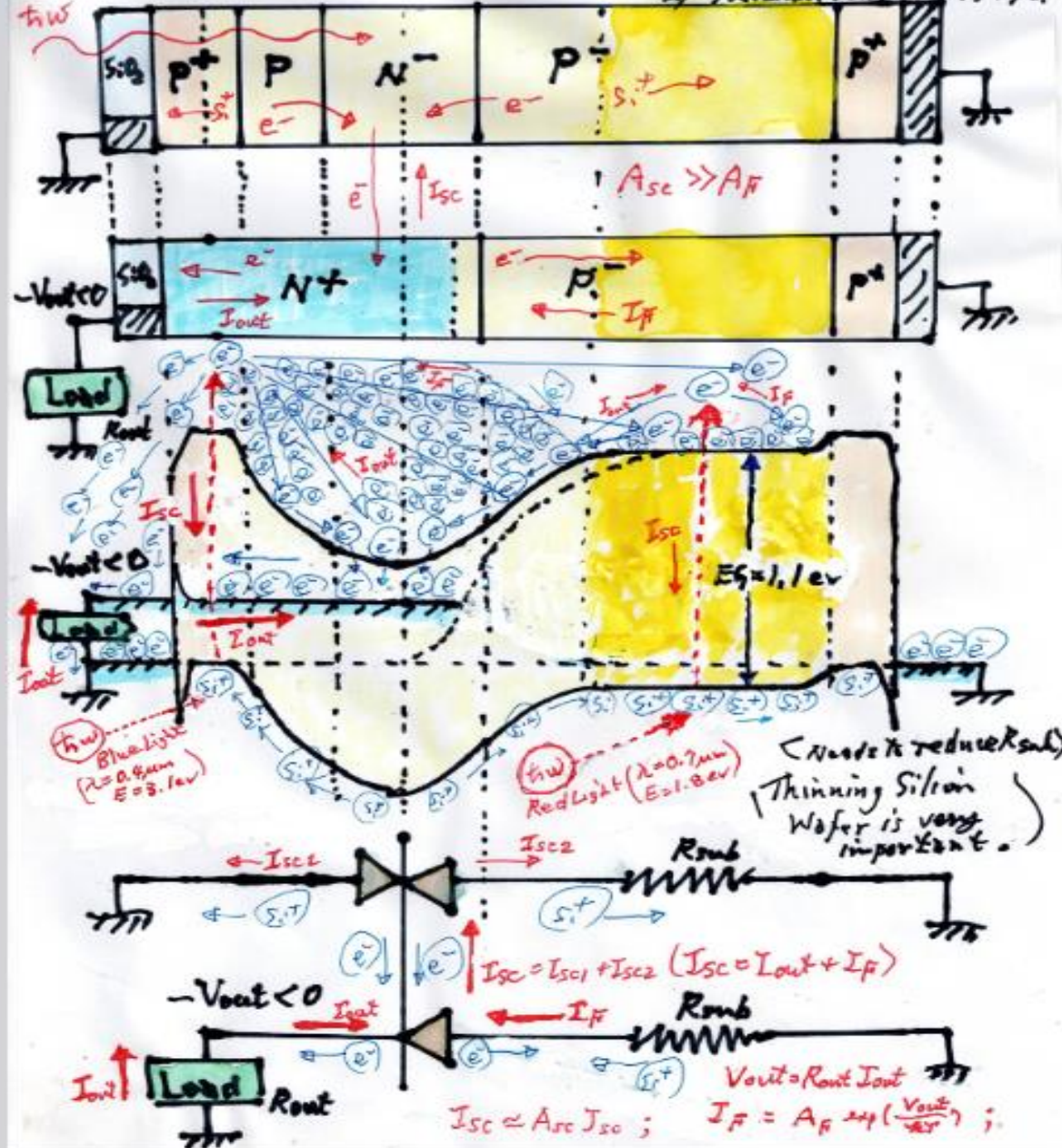
The total depletion width $W = W_n + W_p = 0.293 \mu\text{m}$;

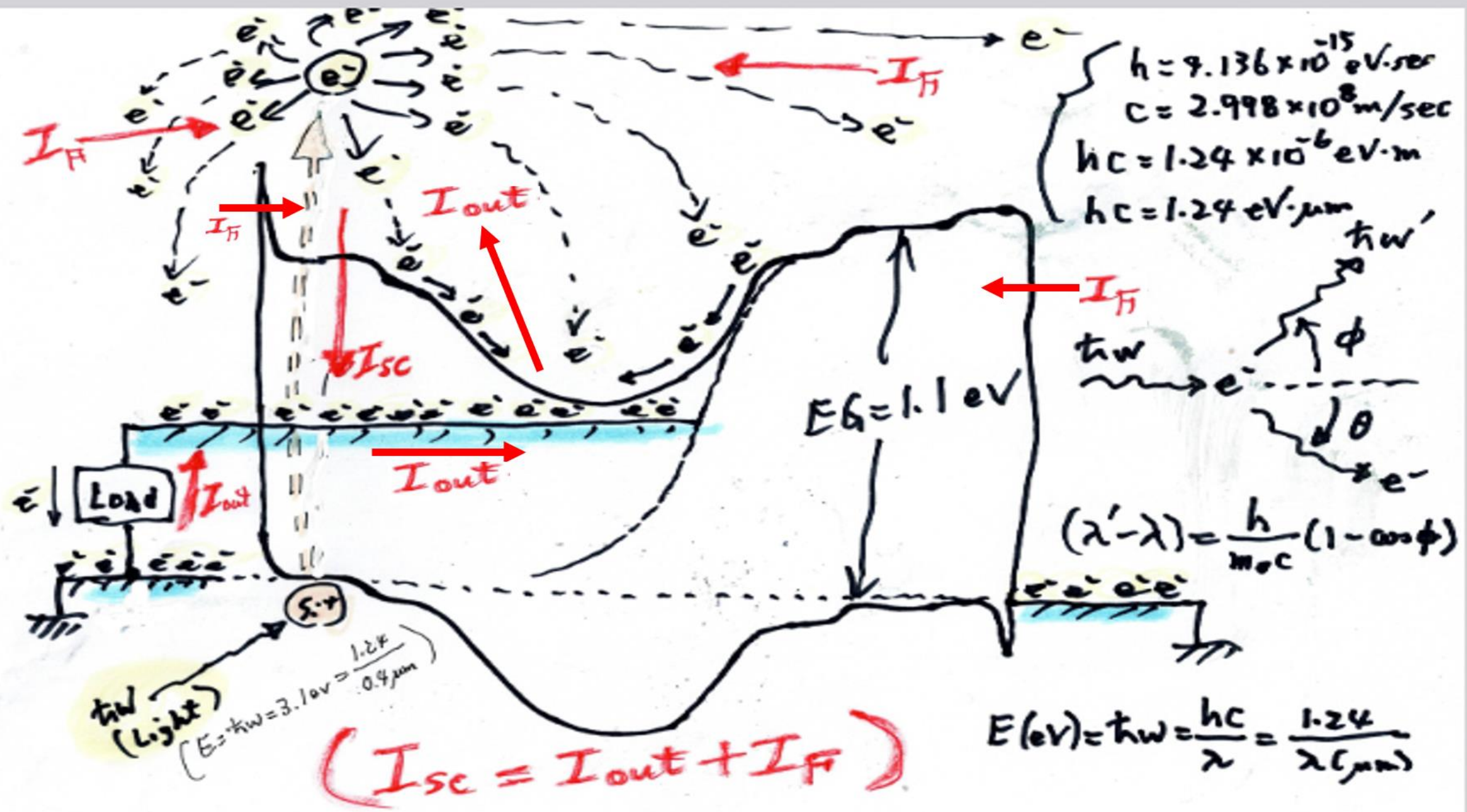


P+P-N-P-P+ Double Junction Pinned Photodiode Type Solar Cell defined in JPA2020-131313 (JP6810828) by Yoshiaki Hagiwara



The p⁺p⁻n⁻p⁺ Double Junction Pinned Photodiode Solar Cell defined in JAP 131313 (JP6810208) on Aug 1, 2020, by Yoshiaki Hagiwara, APOS.





わたしの古里
宮ヶ瀬



鉄腕アトムは半導体部品で構成され創られています。
鉄腕アトムの賢い電子の目は太陽の光を吸収して
光エネルギーを電気エネルギーに変換します。
鉄腕アトムの賢い電子の目は太陽電池でもあります。
賢い電子の目は半導体で造られます。

半導体とは？

2024 02 01 半導体とは？萩原良昭.pdf

2024 02 01 半導体とは？萩原良昭.mp4

<http://www.aiplab.com>

<https://locomtec.jp/>萩原aips研究所

