

チュートリアル：光電デバイスの原理と評価

神谷利夫

東京工業大学
国際先駆研究機構
元素戦略MDX研究センター

チュートリアルの目的

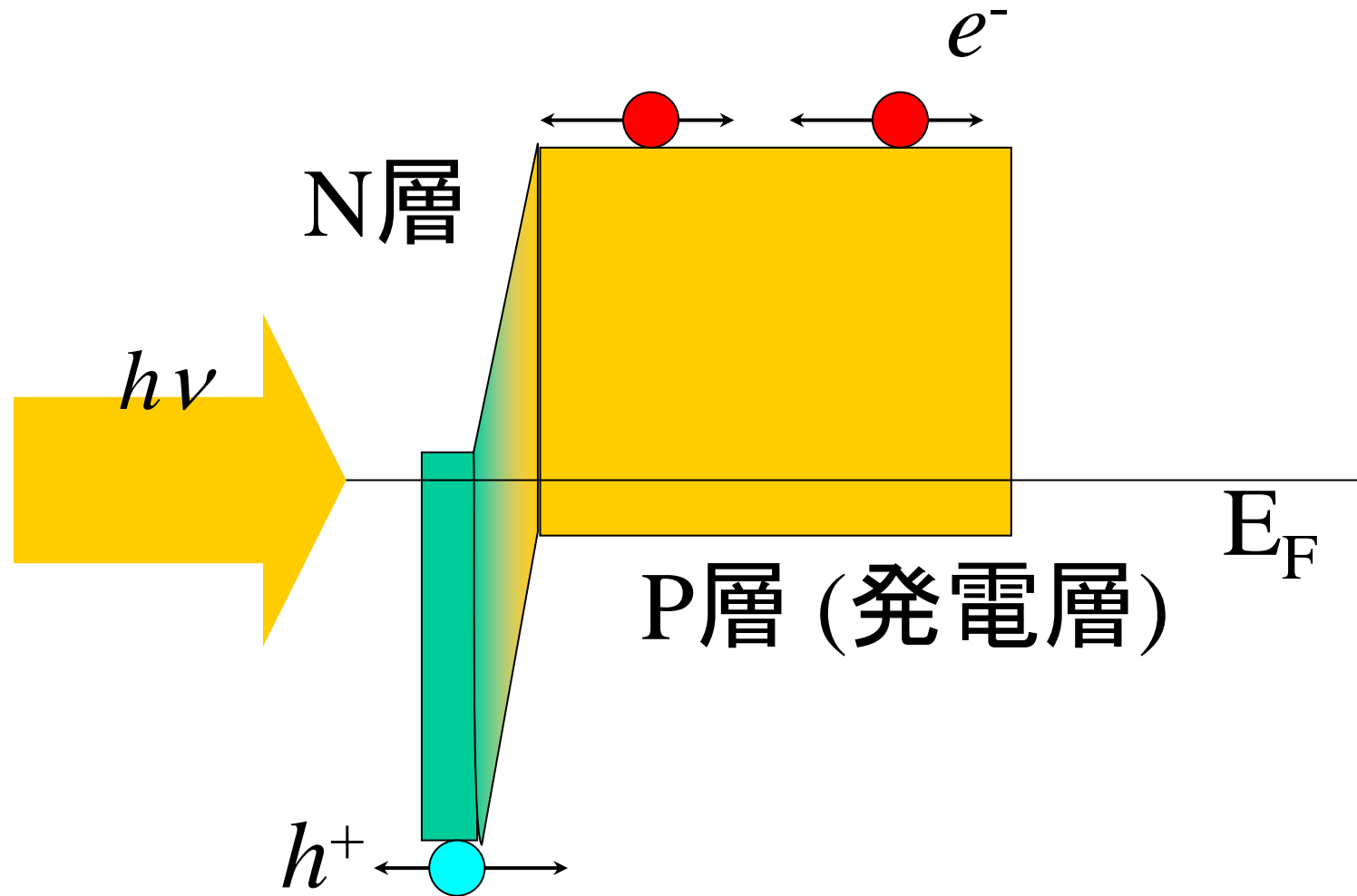
光電変換デバイス:

- ・ 太陽電池
- ・ 光センサー

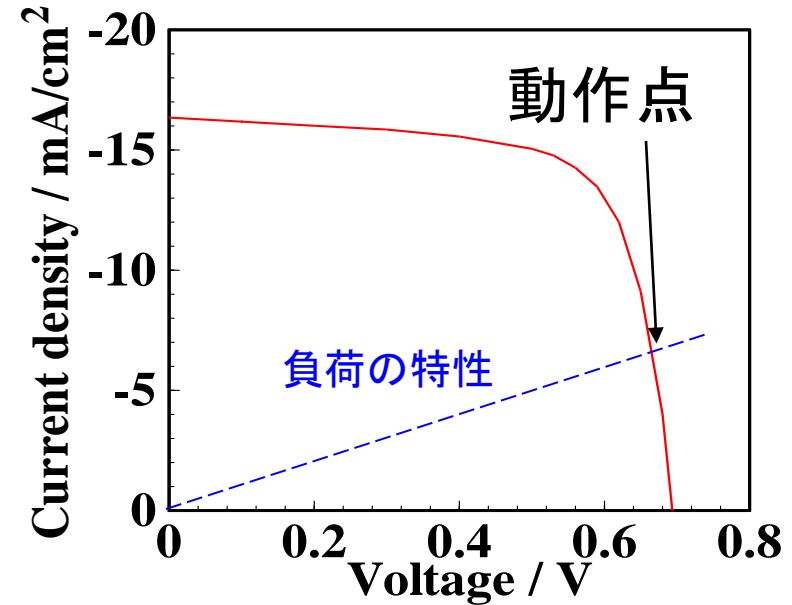
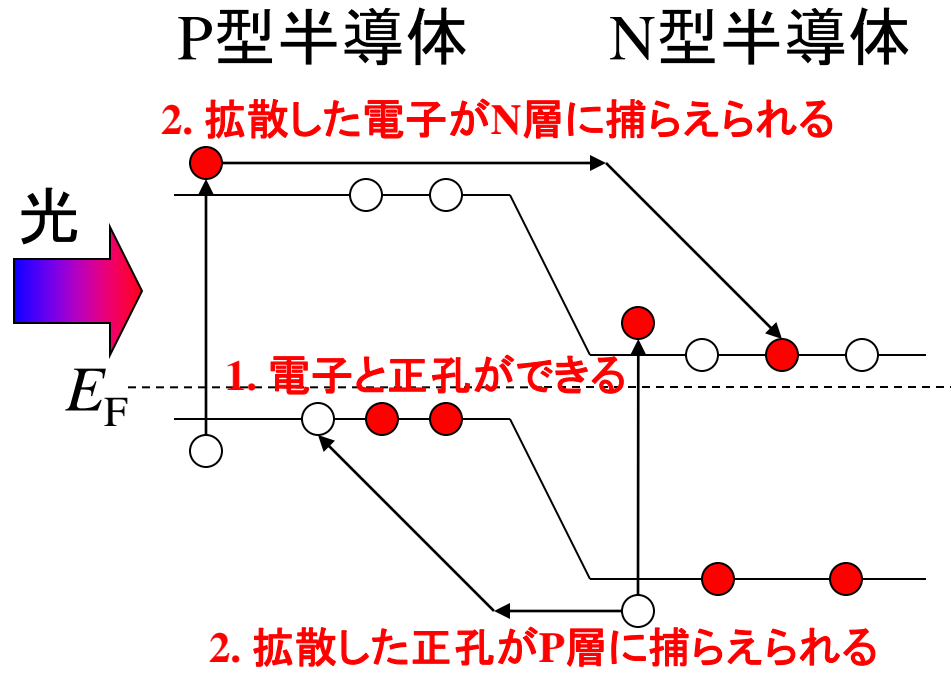
1. 光電変換の基本的な機構を理解する
2. 光電変換効率に重要な材料因子を理解する
注: デバイス構造の最適化などには触れない
3. 目的別に光電変換効率の評価指標を選べるようになる

太陽電池の構造

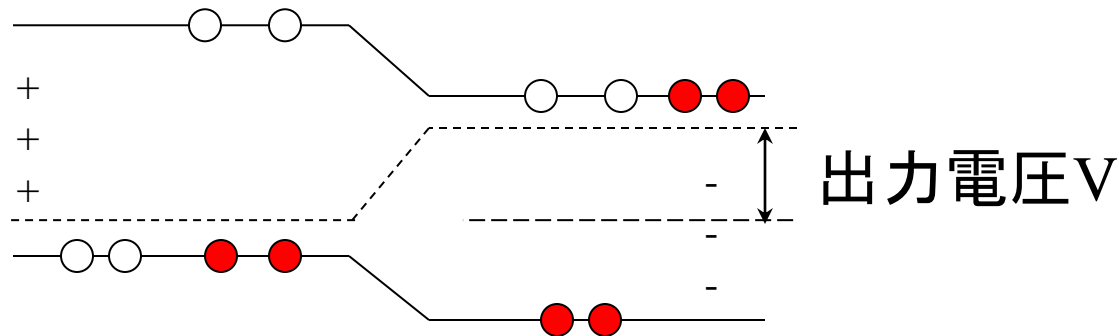
c-Si太陽電池の例



太陽電池の発電原理 (P/N接合)



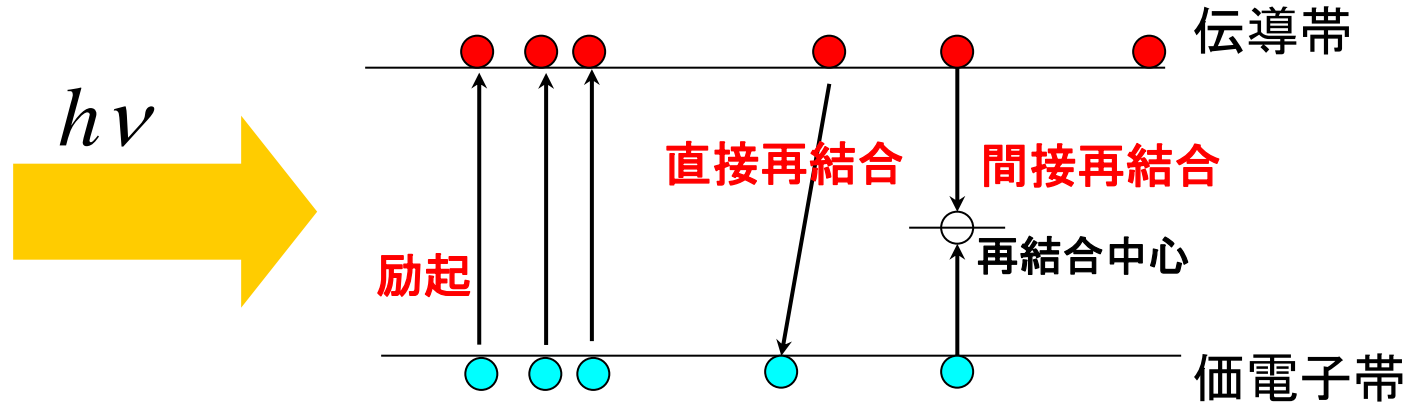
3. 電荷バランスが崩れる



光-電子機能デバイスにおける基礎過程

1. 光子を吸収して電子-正孔対を生成

光によるキャリアの生成と消滅



・ **光励起**: 電子-正孔対の生成: $\frac{d\Delta n}{dt}_g = \frac{d\Delta p}{dt}_g = F\eta$ (F : 入射光子流量、光生成キャリア濃度 $\Delta n = \Delta p$)

・ **再結合**: 再結合速度 $\frac{d\Delta n}{dt}_r$

電子-正孔対の**直接再結合**: 再結合速度 $\frac{d\Delta n}{dt}_r = C(n_0 + \Delta n)(p_0 + \Delta p)$

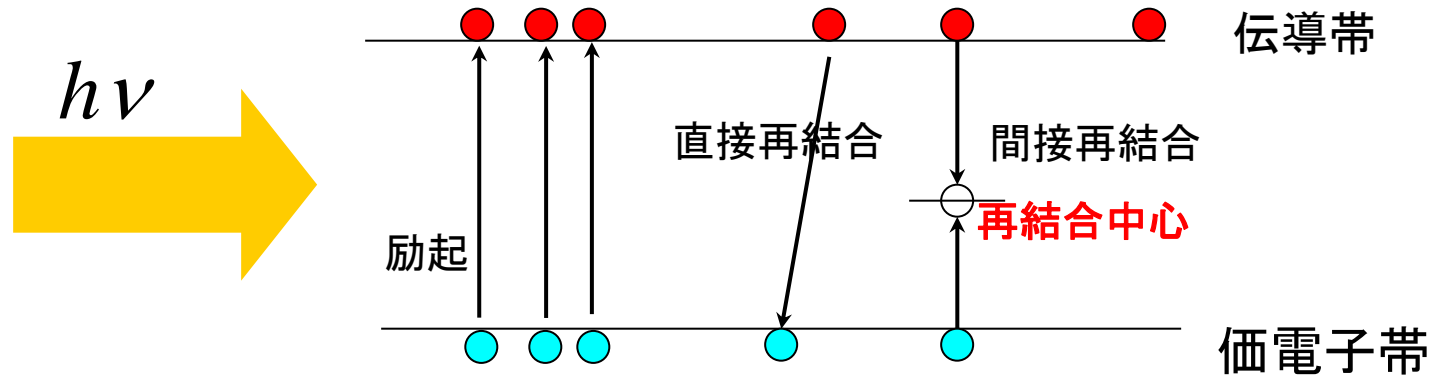
n_0, p_0 : n, p型層のキャリア濃度 (非光照射時)

発電層が真性半導体の場合: $\frac{d\Delta n}{dt}_r = C\Delta n\Delta p = C\Delta n^2$ (二次反応)

発電層がn型(p型)半導体の場合: $\frac{d\Delta n}{dt}_r \sim Cn_0\Delta p(Cp_0\Delta n)$ (一次反応)

再結合中心を介した**間接再結合**: $\frac{d\Delta n}{dt}_r \sim C'\Delta nN_t (C'\Delta pN_t)$ (一次反応)

光によるキャリアの生成と消滅



ここでは、再結合では一次反応過程を仮定

$$\frac{d\Delta n}{dt} = -\frac{\Delta n}{\tau} + F\eta \quad (\tau: \text{再結合時間})$$

定常状態における**光生成キャリア数** $\Delta n = F\eta\tau$

=> 量子効率と**寿命**で決定される

$$\frac{1}{\tau} = Cn_0 \quad (Cp_0)$$

$$\frac{1}{\tau} = C'N_t \quad (C'N_t)$$

光伝導体に必要とされる特性: 長い光キャリア寿命

- ・ 少ないドーピング量
- ・ 少ない再結合中心

材料の光電流特性は $\mu\tau$ 積で規格化できる

定常光生成キャリア密度: $\Delta n = F\eta\tau$

光伝導度: $\sigma_{ph} = e\Delta n\mu/d = eF\eta\mu\tau/d$

d : 光電層厚さ

$\sigma_{ph} = (\eta\mu\tau)eAF_0/d \Rightarrow \eta\mu\tau$ を評価

η : 量子効率 (簡単のため 1 とされることもある)

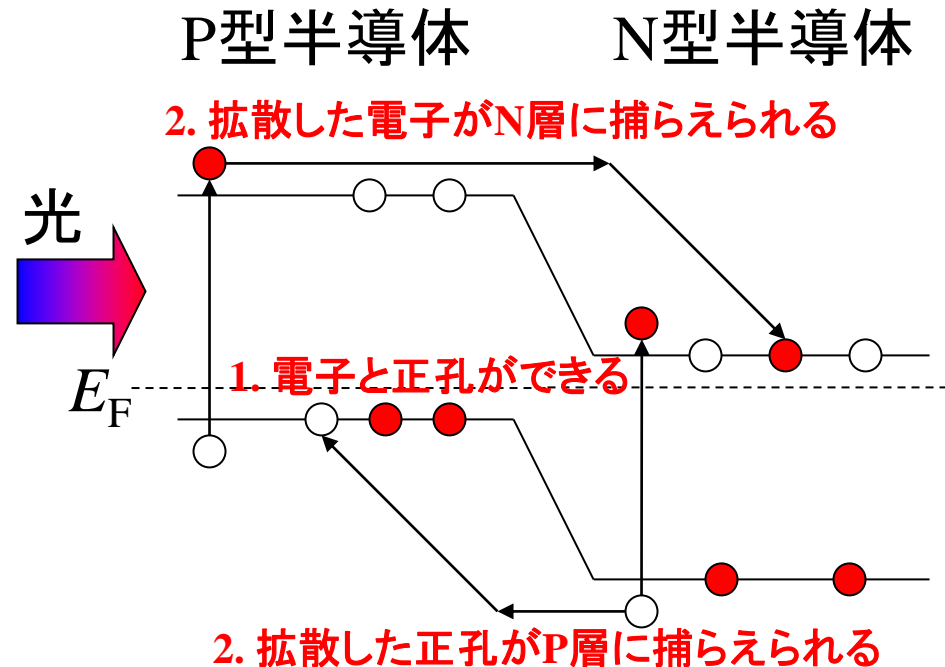
A : 光吸収率 ($1 - T - R$)

F_0 : 入射光子流量

$\mu\tau$: 移動度・寿命積

光-電子機能デバイスにおける 基礎過程

1. 光子を吸収して電子-正孔対を生成
2. 電子と正孔の分離: 荷電分離
3. 対向電極による電荷収集



光照射時にP/N接合に流れる電流

定常状態でのp型半導体中(空乏層外)の電子電流連続条件

$$-\frac{1}{e} \frac{dJ_n}{dx} = G_n(x) - \frac{n(x) - n_0}{\tau_n} \quad J_n = -eD_n \frac{dn}{dx} \quad n(\infty) = n_0$$

端面だけに光が当たっているとき

$$p(x) - p_0 = G_p \tau_p + [p(x_n) - p_0 - G_p \tau_p] \exp\left(\frac{x - x_p}{L_p}\right) \quad \text{n型半導体, } x_n < x$$

$$n(x) - n_0 = G_n \tau_n + [n(x_p) - n_0 - G_n \tau_n] \exp\left(\frac{x - x_p}{L_n}\right) \quad \text{p型半導体, } x < x_p$$

$$J = J_n + J_p = eD_n \left. \frac{dn}{dx} \right|_{x=x_p} - eD_p \left. \frac{dp}{dx} \right|_{x=x_n}$$

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right] - J_{PV}$$

光照射時にP/N接合に流れる電流

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nk_B T}\right) - 1 \right] - J_{PV} \quad n: \text{理想因子、ダイオード因子}$$

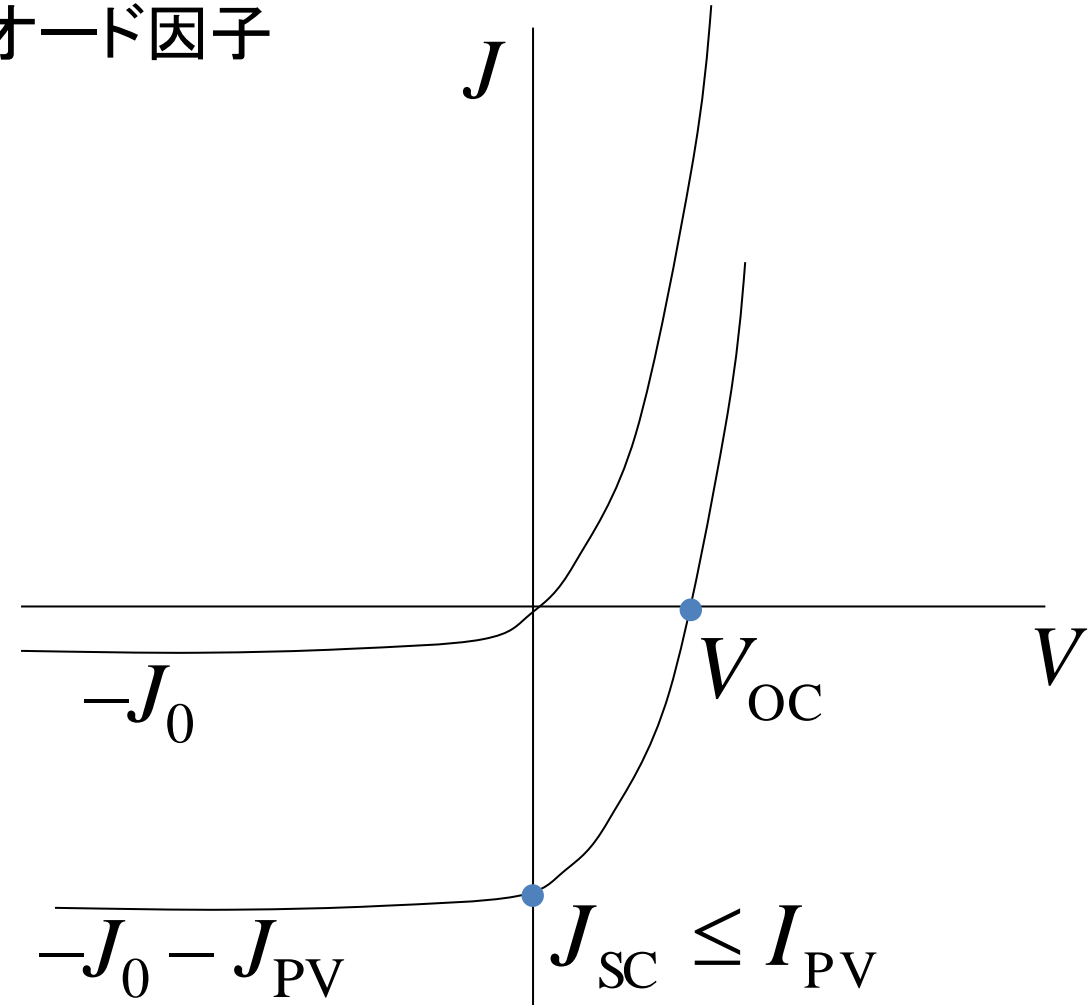
$$J_0 = e \left(\frac{n_p D_n}{L_n} + \frac{p_n D_p}{L_p} \right)$$

$$J_{PV} = e(G_n L_n + G_p L_p)$$

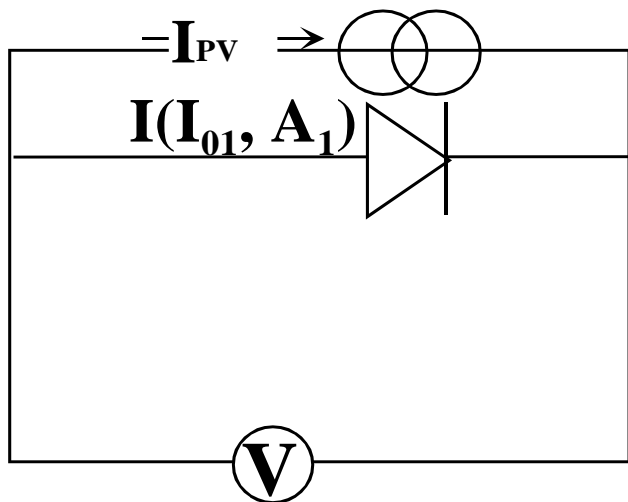
拡散係数 (Einsteinの関係式): $D = \frac{k_B T}{e} \mu$

拡散長 $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$ $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$

**光生成キャリア寿命 τ 、
移動度 μ 、拡散長 L が重要**



理想的なp/n接合による発電特性

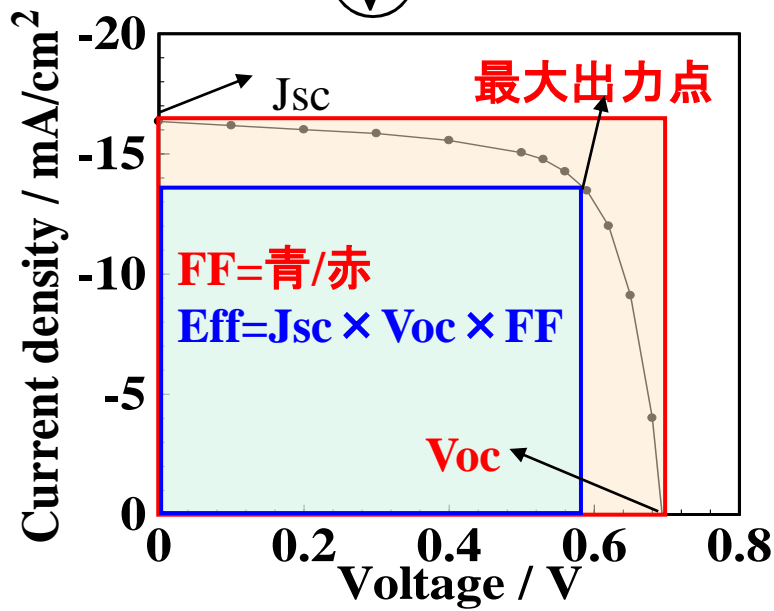


$$J = J_0 \left(\exp \left(\frac{eV}{nkT} \right) - 1 \right) - J_{PV}$$

デバイス中での
キャリアの再結合を無視

$$V_{OC} = \frac{nkT}{e} \ln \left(\frac{J_{PV}}{J_0} + 1 \right)$$

良い太陽電池デバイスの特性
• V_{OC} が大きい: J_0 が小さい



$$J_{SC} = J_{PV}$$

$$\exp \left(\frac{qV_{max}}{nkT} \right) \left(1 + \frac{qV_{max}}{nkT} \right) = \frac{J_{PV}}{J_0} + 1$$

$$J_{max} = \frac{(J_{PV} + J_0)qV_{max}/nkT}{1 + qV_{max}/nkT}$$

良い太陽電池デバイスの特性
• J_{PV} が大きい

$$FF \sim \frac{V_{OC} - \ln(V_{OC} + 0.72)}{V_{OC} + 1.0}$$

良い太陽電池デバイスの特性
• V_{OC} が大きい

理想的なp/n接合による発電特性

$$J = J_0 \left(\exp \left(\frac{eV}{nkT} \right) - 1 \right) - J_{PV}$$

良い太陽電池デバイスに必要な特性

$$V_{OC} = \frac{nkT}{e} \ln \left(\frac{J_{PV}}{J_0} + 1 \right)$$

V_{OC} が大きい: J_0 が小さい

$$J_{max} = \frac{(J_{PV} + J_0)qV_{max}/nkT}{1 + qV_{max}/nkT}$$

J_{PV} が大きい

$$\begin{aligned} J_0 &= e \left(\frac{n_p D_n}{L_n} + \frac{p_n D_p}{L_p} \right) \\ &= e \sqrt{\frac{k_B T}{e}} \left(n_p \sqrt{\mu_n} + p_n \sqrt{\mu_p} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} J_{PV} &= e (G_n L_n + G_p L_p) \\ &= e \sqrt{\frac{k_B T}{e}} \left(G_n \sqrt{\mu_n \tau_n} + G_p \sqrt{\mu_p \tau_p} \right) \end{aligned}$$

$$FF \sim \frac{V_{OC} - \ln(V_{OC} + 0.72)}{V_{OC} + 1.0}$$

V_{OC} が大きい

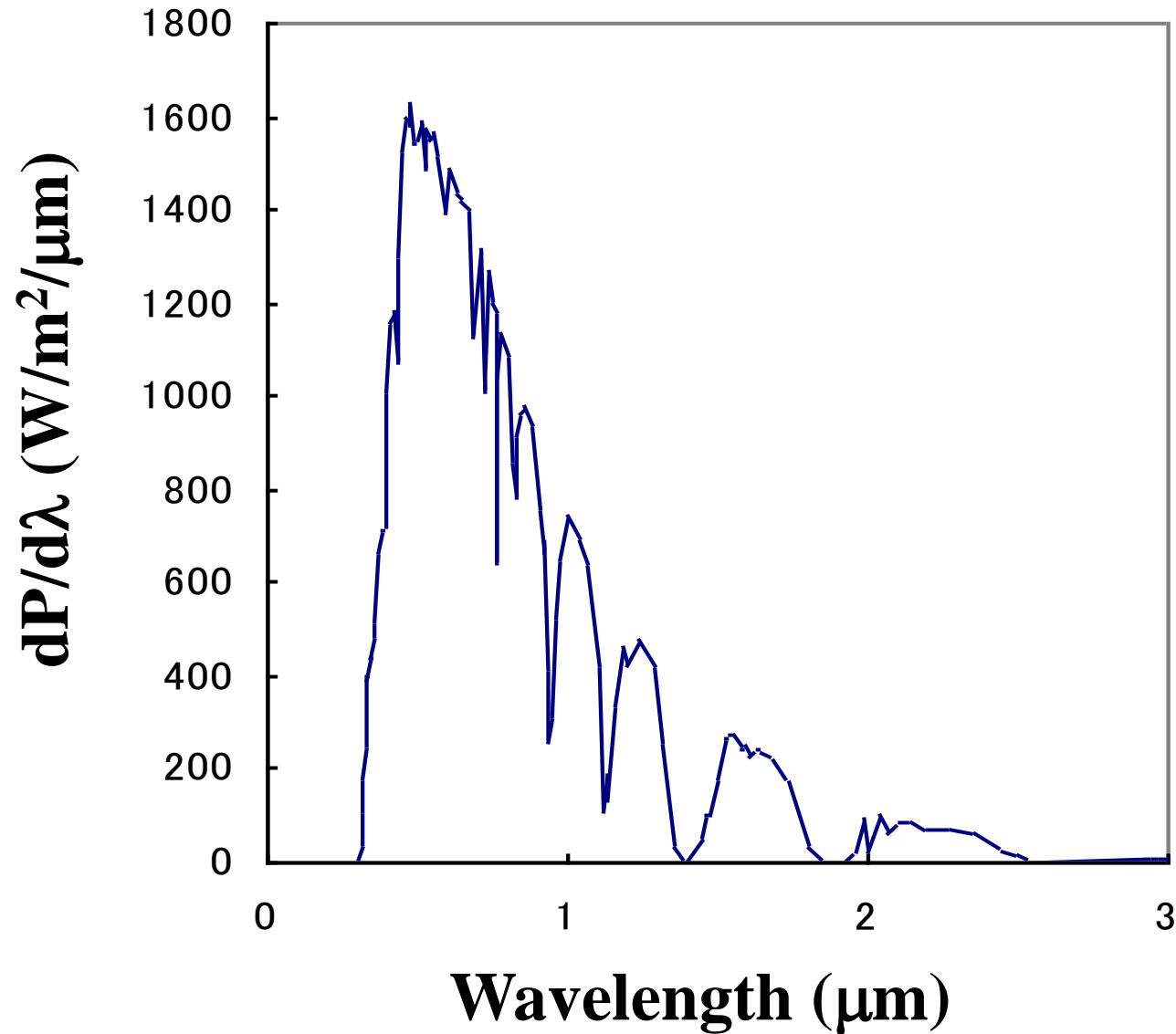
(この再結合を考慮していないが、 τ が重要)

重要: 光電デバイスでは

少数キャリア (n層の正孔、p層の電子)の特性が重要

太陽光と標準グローバルAM1.5スペクトル

「太陽電池の物理」



太陽光放射強度について

太陽光強度: 緯度、高度、天気によって変わる: 標準を規定

Air mass (大気通過量) 値

- AM-0 地球の公転軌道上での太陽光: 大気圏外
~140 mW/cm²
- AM-1 海拔 0 m、太陽が真上の場合
~100 mW/cm² (通常の蛍光灯の100倍以上)
- AM-1.5 天頂角48度
~75 mW/cm² (日本の平均に近い)
- AM-2 天頂角60度

太陽電池の発電効率: 一般的に 100 mW/cm^2 光源による測定値を公表

測定: 擬似太陽光を照射

ソーラーシミュレータ

条件例: AM-1 100 mW/cm^2

とりだせる最大出力

$$P_{\max} = J_{\max} V_{\max}$$

線形因子 (Fill Factor)

$$FF = \frac{J_{\max} V_{\max}}{J_{sc} V_{oc}}$$

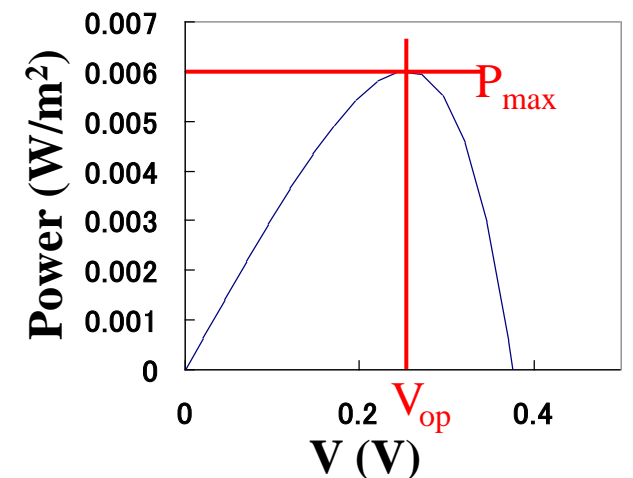
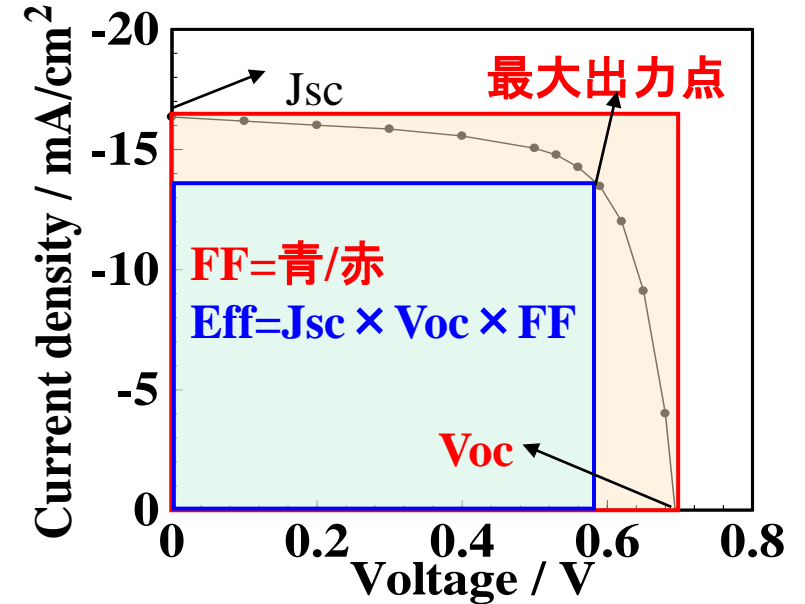
エネルギー変換効率

$$\begin{aligned} \text{Eff} (\%) &= P_{\max} [\text{mW/cm}^2] / 100 [\text{mW/cm}^2] \times 100 [\%] \\ &= J_{\max} \times V_{\max} \end{aligned}$$

$$\text{Eff} (\%) = FF \times J_{sc} \times V_{oc}$$

太陽電池の発電特性:

開放端電圧 V_{oc} 、短絡電流 J_{sc} 、曲線因子 FF だけで決まる



エネルギー変換効率の計算例

c-Si太陽電池

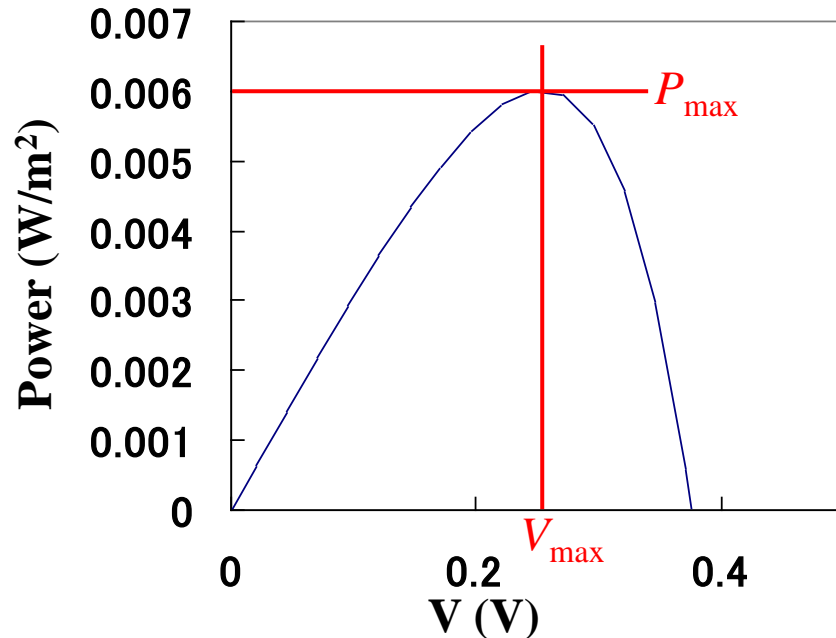
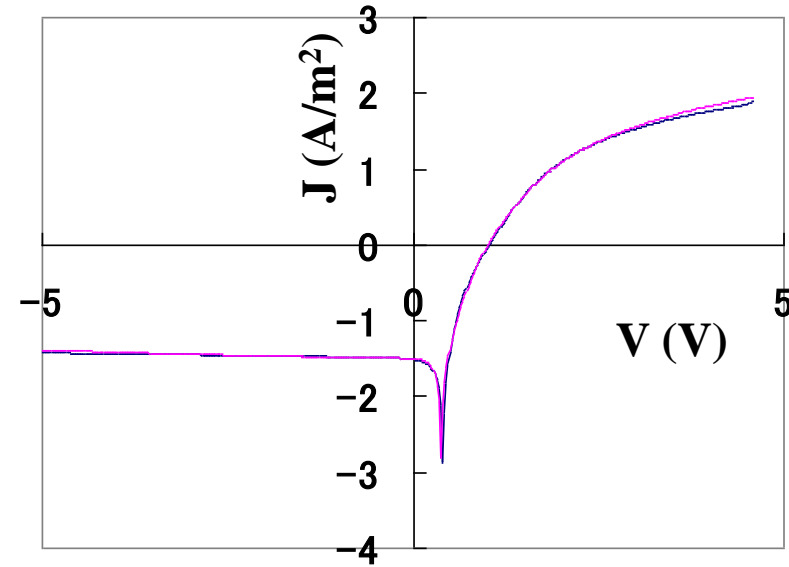
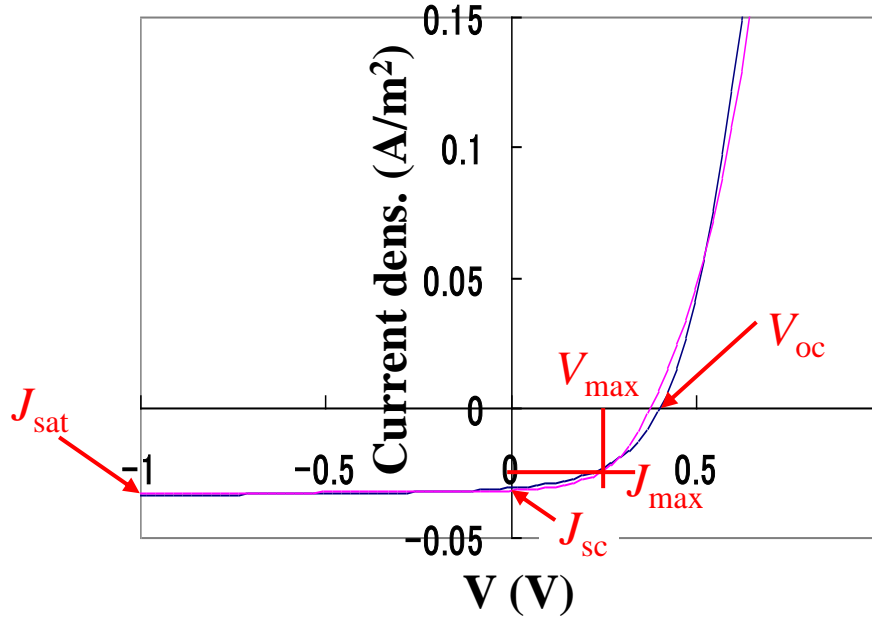
$$J_{\text{SC}} = 40 \text{ mA/cm}^2$$

$$V_{\text{OC}} = 0.8 \text{ V}$$

$$FF = 0.8$$

$$Eff (\%) = FF \times J_{\text{SC}} \times V_{\text{OC}} = 25.6 \%$$

a-IGZO/c-Si太陽電池のI-V特性



100mW/cm² solar simulator light

$$J_{sc} = 31.9 \text{ mA/cm}^2$$

$$J_{sat} = 41.1 \text{ mA/cm}^2$$

$$V_{oc} = 0.378 \text{ V}$$

$$FF = V_{op}J_{op}/(V_{oc}J_{sc}) = 0.507$$

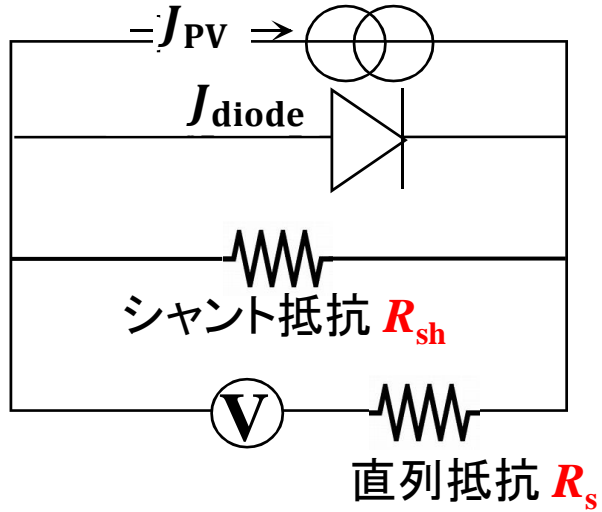
$$\eta = 6.1 \%$$

J01=	8.35E-05
n1=	2.866569
Rs1=	0.610617
J02=	0.001677
n2=	6.958675
Rs2=	0.040117
Rs=	0
Rsh=	961.5947
Jpv=	0.030792

I-V特性からわかること

$$J_{diode} = J_0 \left(\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right)$$

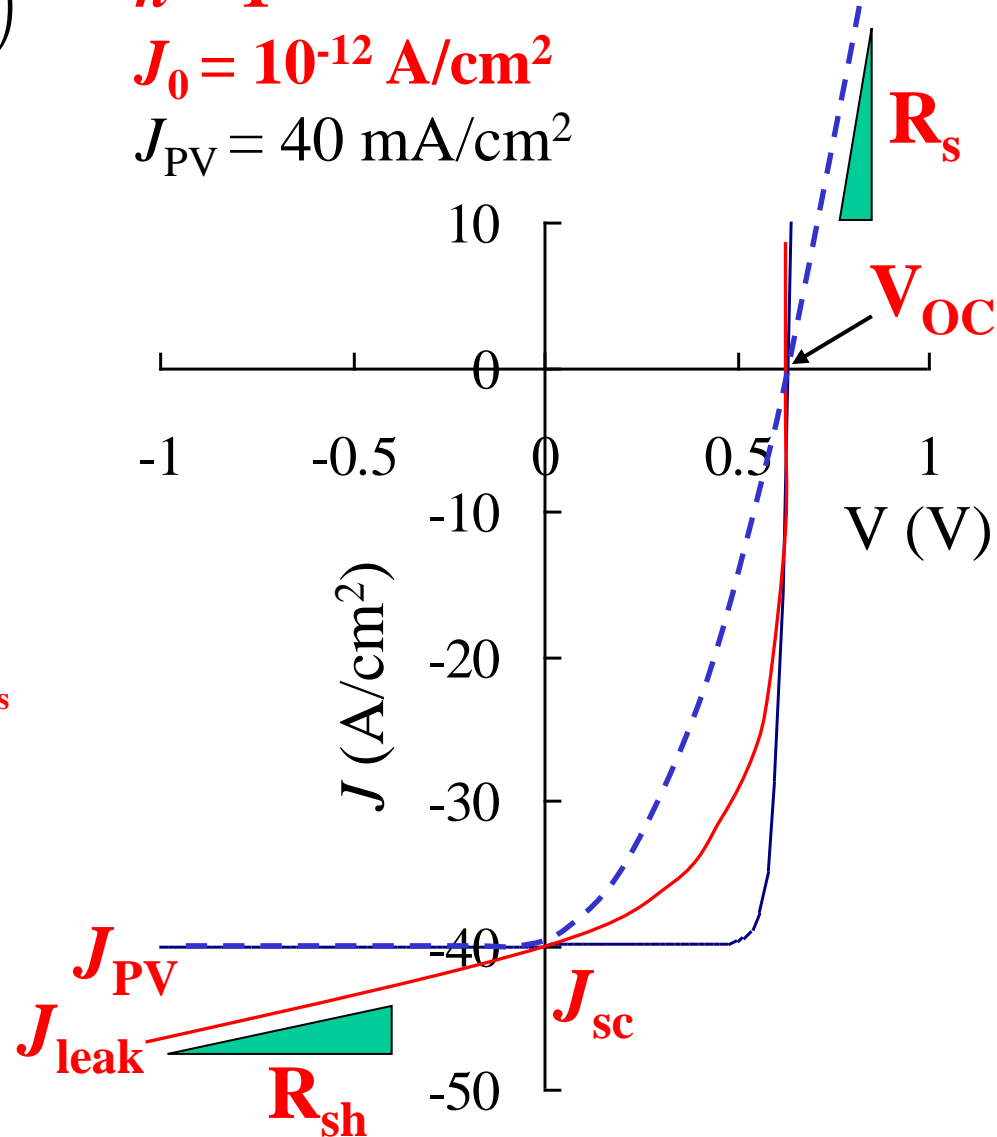
n : ダイオード因子
理想因子



$n = 1$

$$J_0 = 10^{-12} \text{ A/cm}^2$$

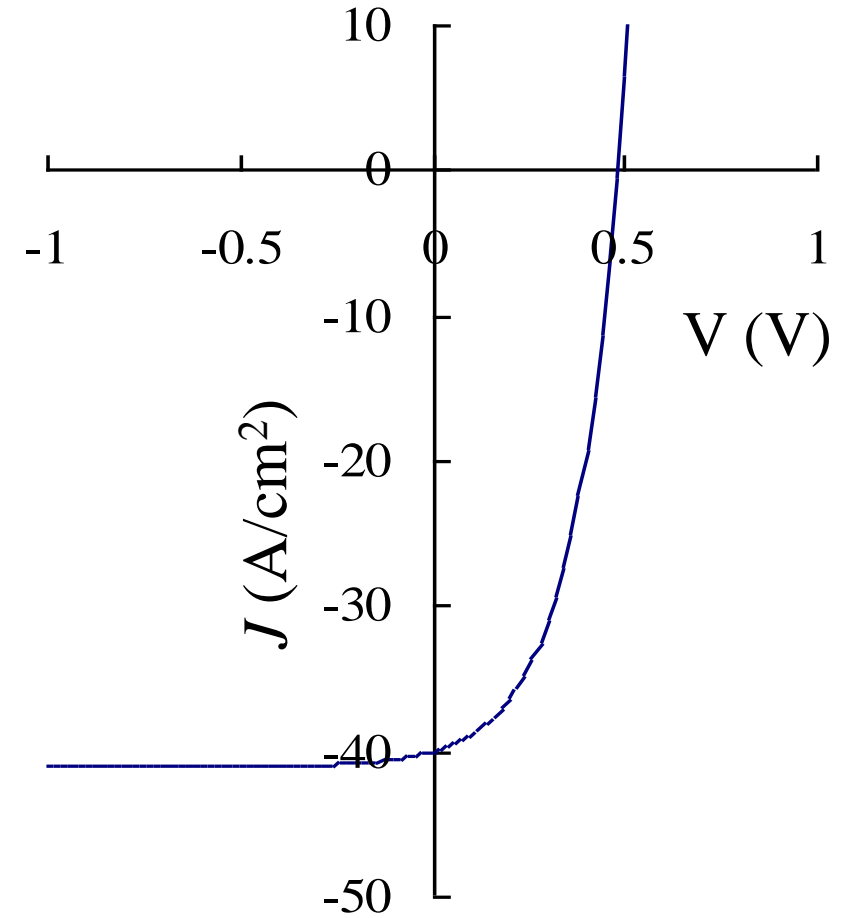
$$J_{PV} = 40 \text{ mA/cm}^2$$



$n = 5$

$$J_0 = 10^{-3} \text{ A/cm}^2$$

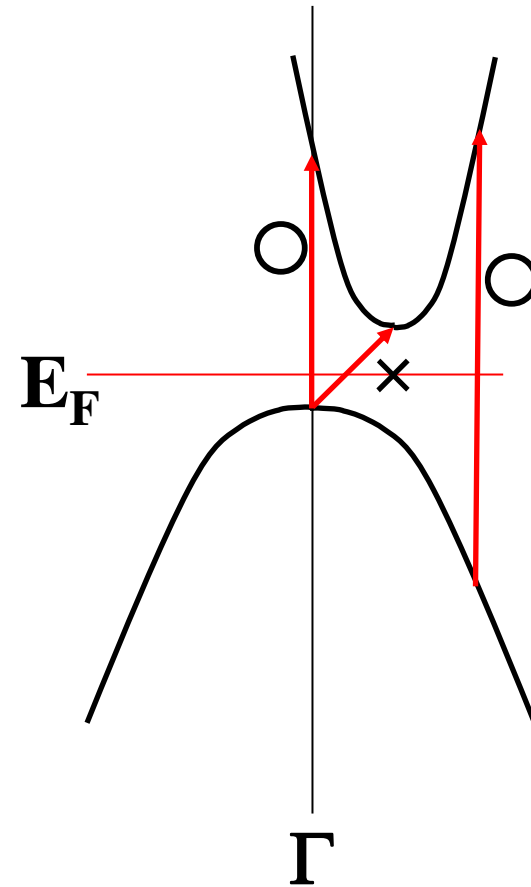
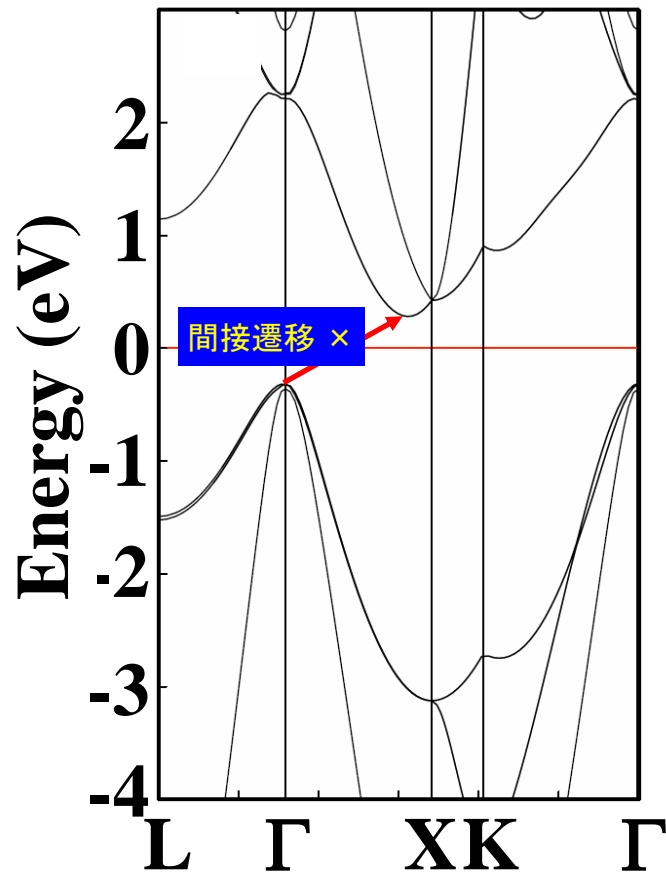
$$J_{PV} = 40 \text{ mA/cm}^2$$



バンド構造と光電デバイス特性

Si 間接遷移: 最小ギャップでの光吸収係数が小さい

(× 太陽電池 厚い光発電層が必要)



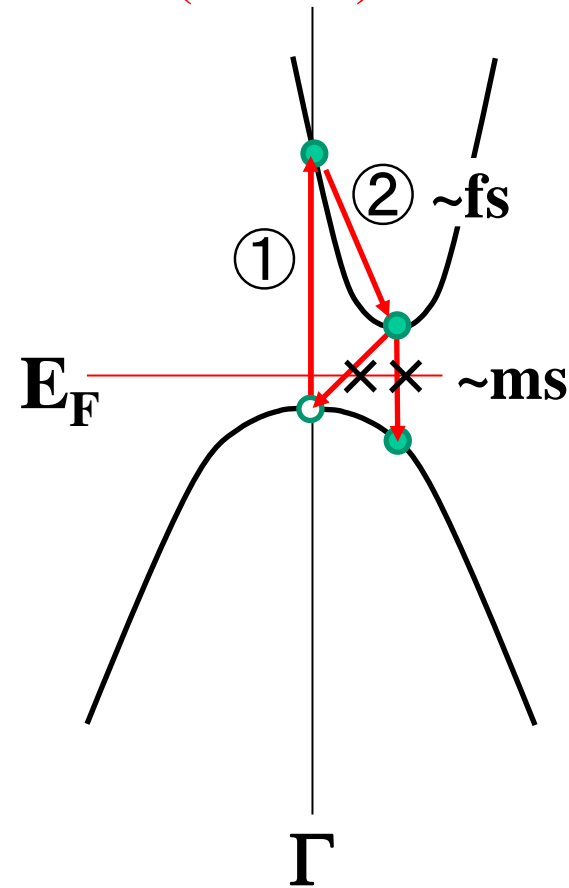
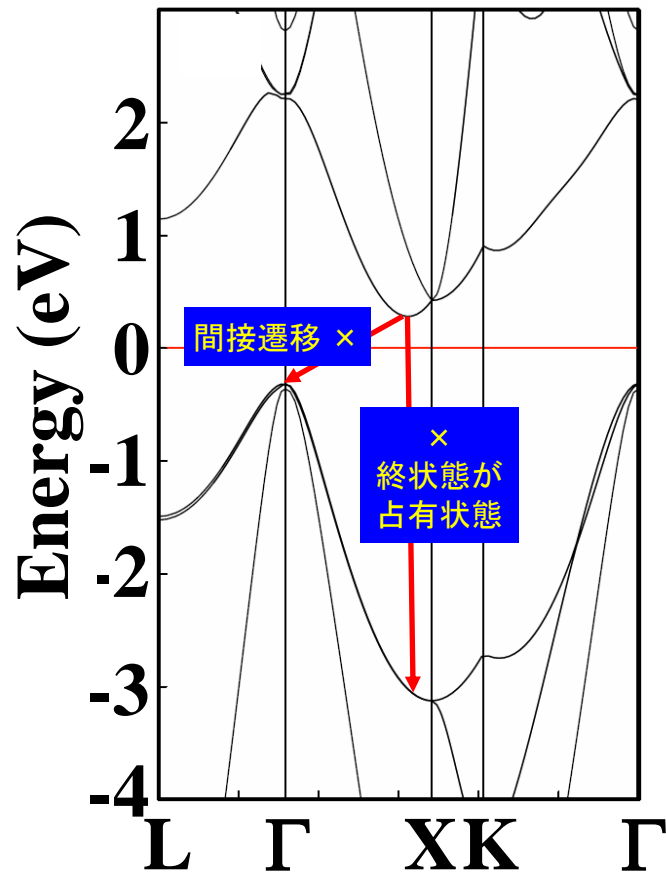
バンド構造と光電デバイス特性

Si 間接遷移: 吸収係数小さい (× 太陽電池 厚い光発電層が必要)

再結合も遅い (○ 太陽電池)

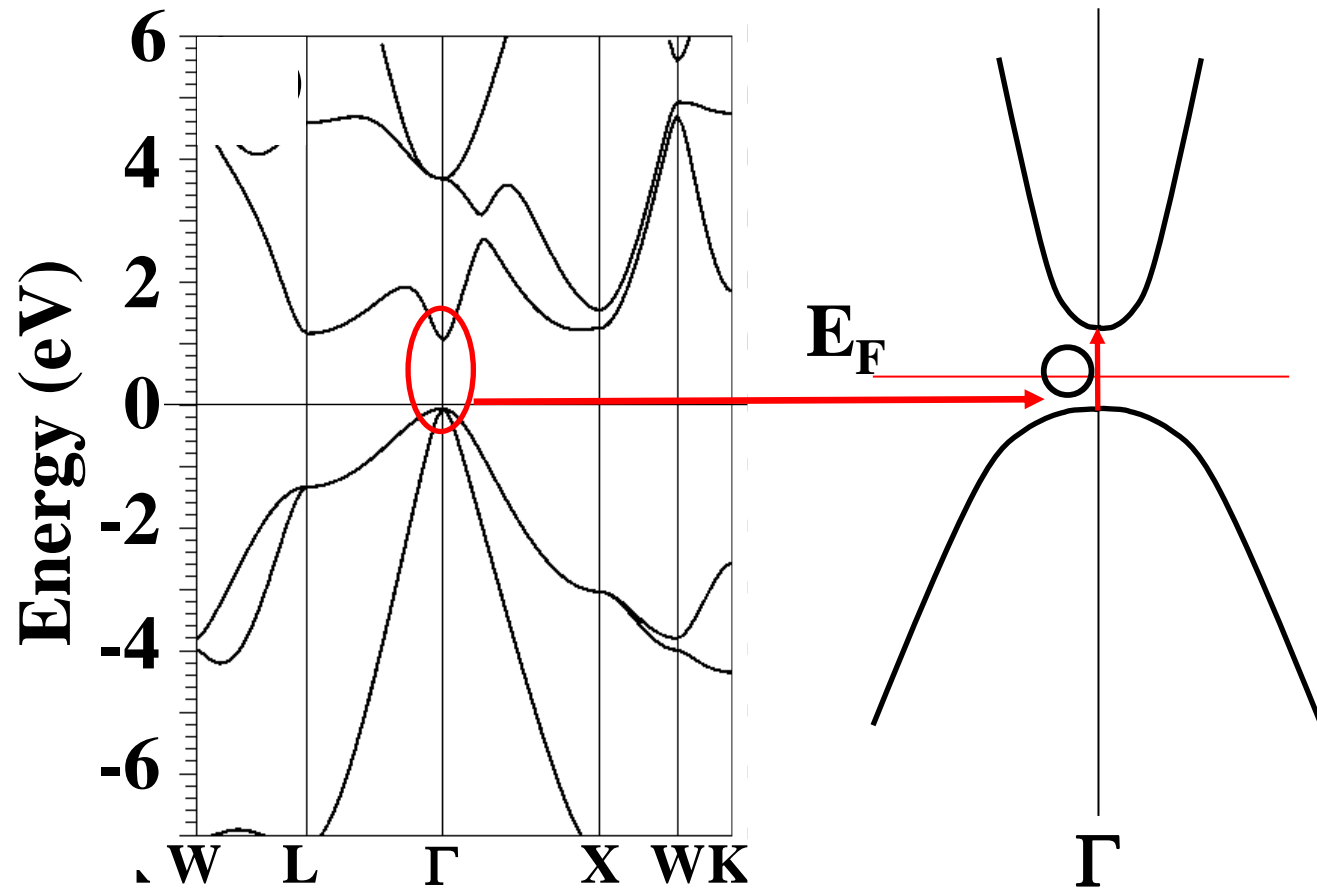
非輻射再結合が優勢になりやすい

(× LED)



バンド構造と光電デバイス特性

GaAs 直接遷移型: 吸収係数が大きい (○太陽電池向き)

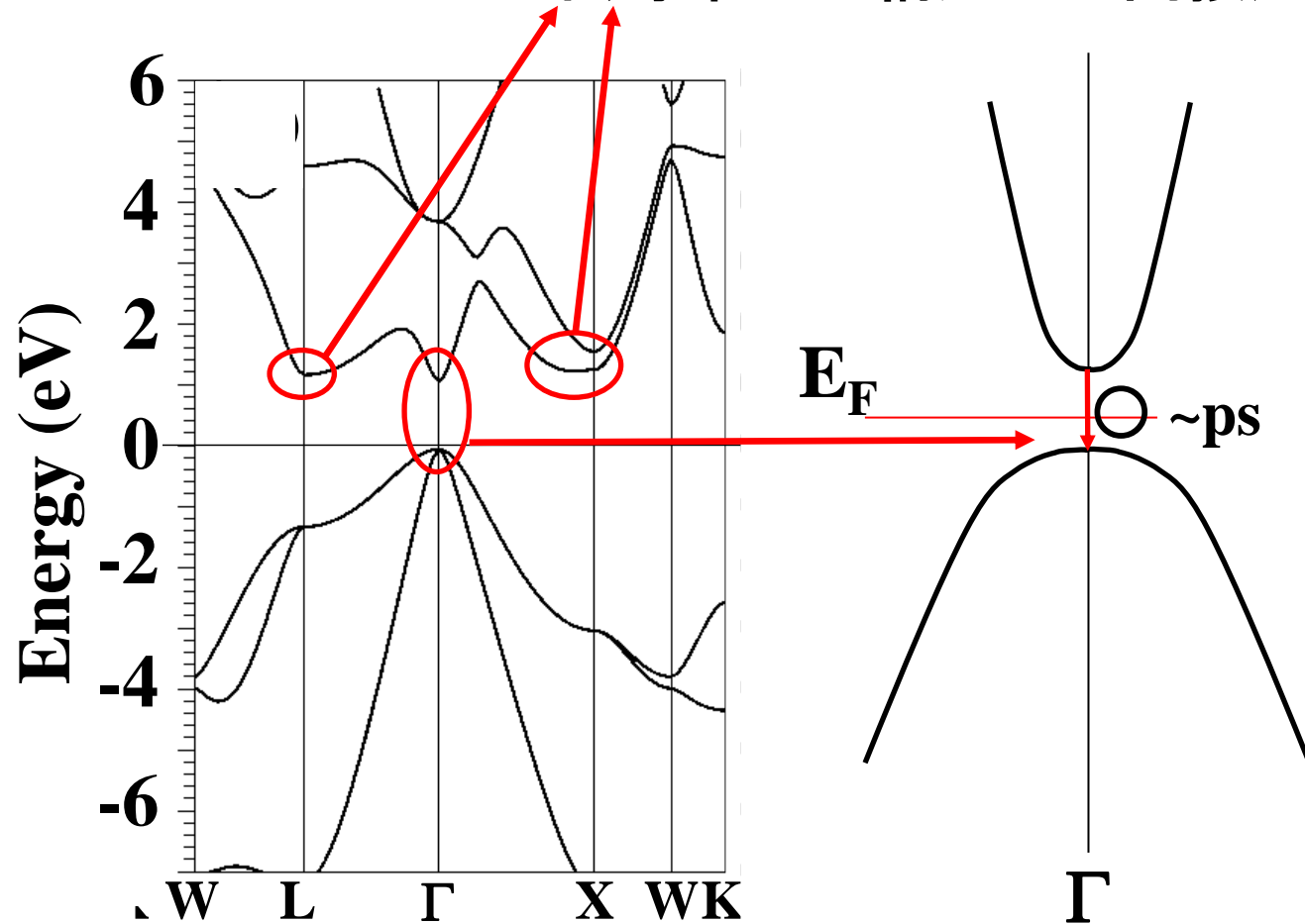


バンド構造と光電デバイス特性

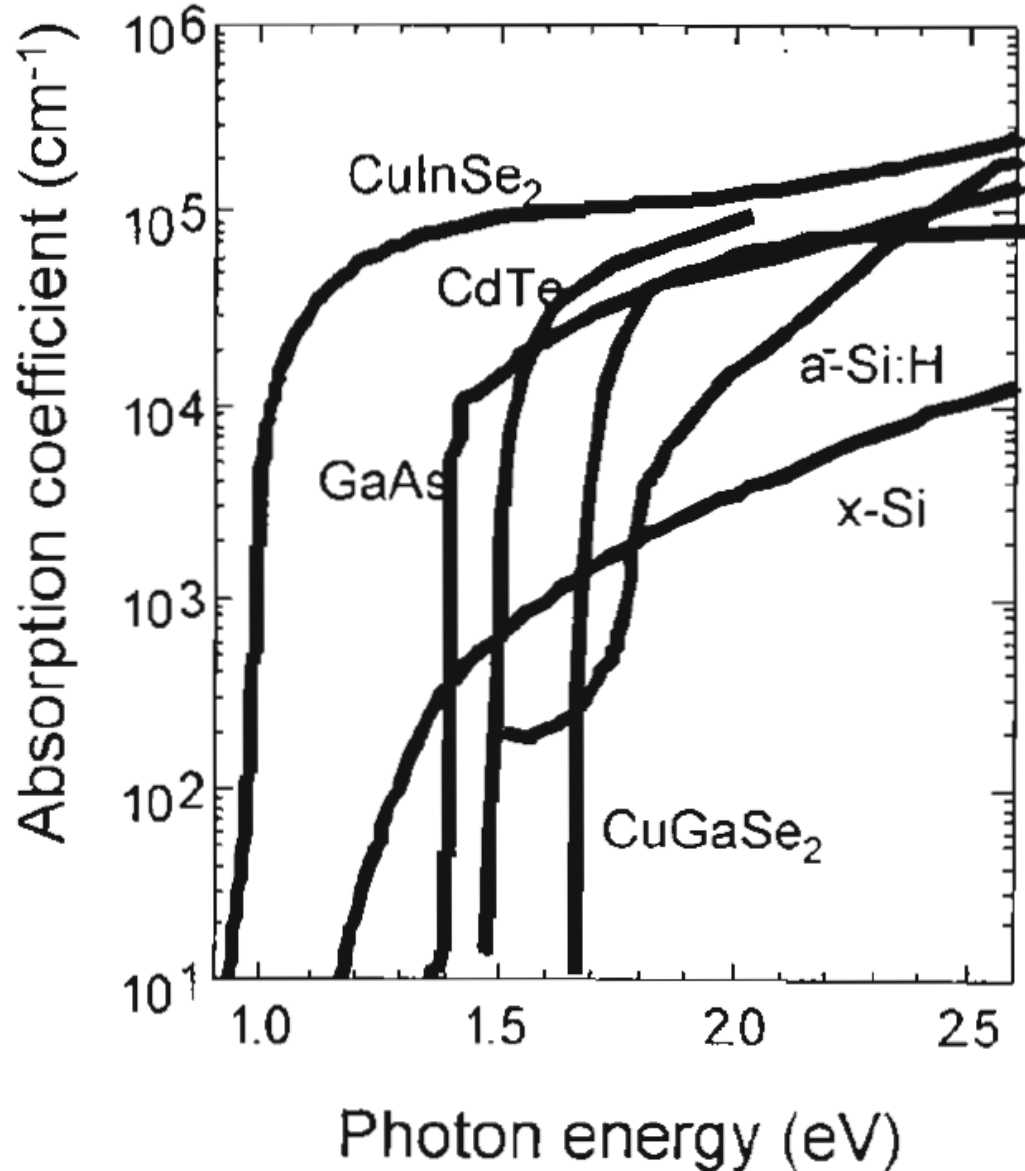
GaAs 直接遷移型: 再結合は速い

輻射再結合が優勢になりやすい (OLED)

伝導帯の谷構造では間接遷移 (太陽電池)



各種太陽電池の吸収係数



- 光の進入長
 - 吸収係数: $10^3 \sim 10^4 \text{cm}^{-1}$
 - 結晶Siに相当
 - 約 $10\mu\text{m} \sim 1\mu\text{m}$
 - 空乏層以外でもphoto-carrierが存在
 - 吸収係数: $5 \times 10^4 \text{cm}^{-1}$
 - a-Siに相当
 - 約 $0.2\mu\text{m}$
 - i-Si中の電界を使って、photo-carrierを収集
 - 吸収係数: 10^5cm^{-1}
 - Cu(InGa)Se₂に相当
 - 約 $0.1\mu\text{m}$
 - ほぼ空乏層内のphoto-carrierが光電流に寄与

必要な膜厚

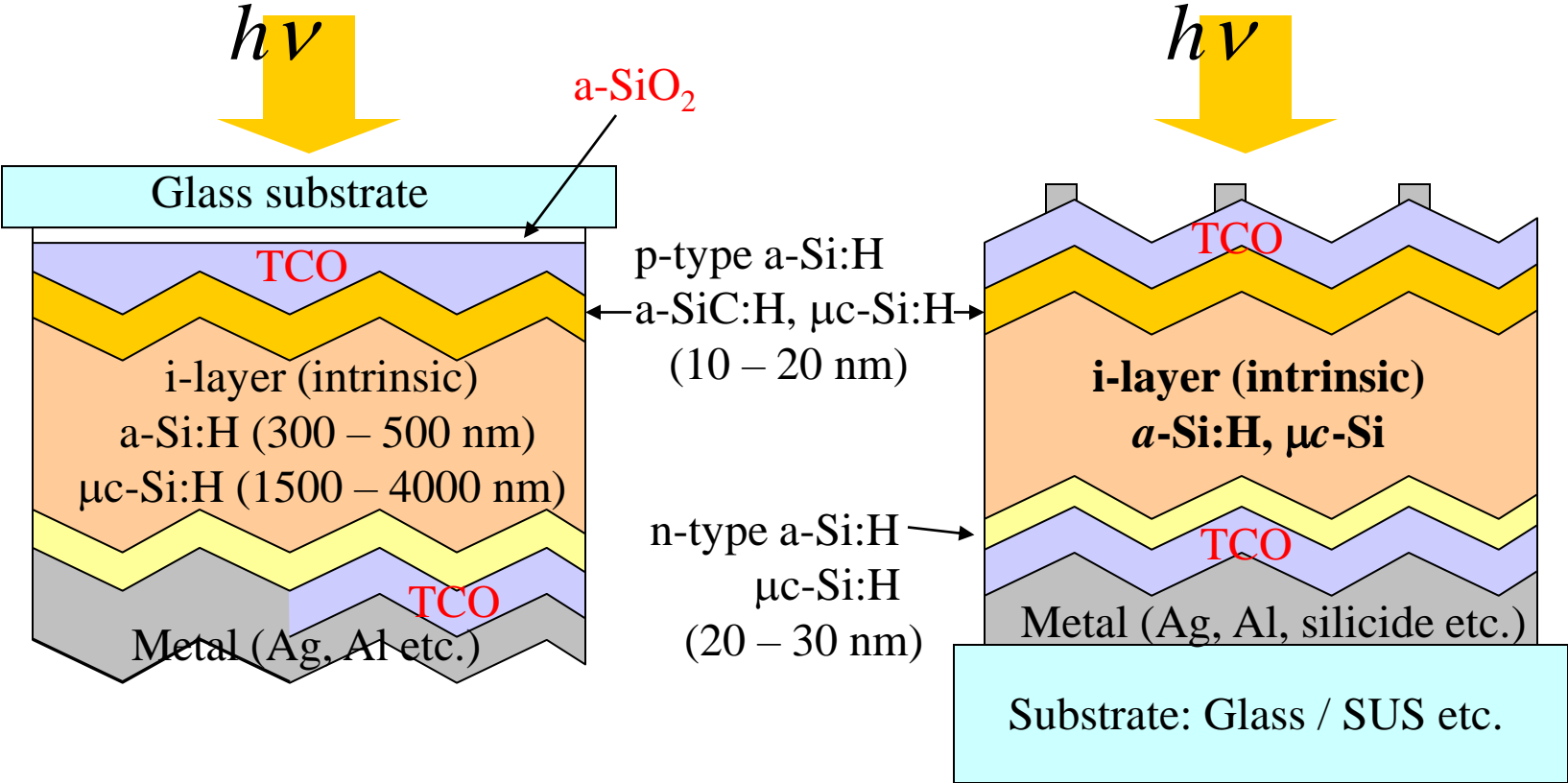
膜厚 d 、吸収係数 α で吸収される光子の割合

$$A = \int_0^d \alpha \exp(-\alpha x) dx$$
$$= 1 - \exp(-\alpha d)$$

α [/cm]	d [μm]	A
10^4	1.0	0.64
10^4	3.0	0.95
10^2	100.0	0.64

- 直接遷移型半導体の場合、数 μm でOK
- 間接遷移型半導体 (c-Si) では 0.数 mm の厚さが必要

Si薄膜太陽電池の構造



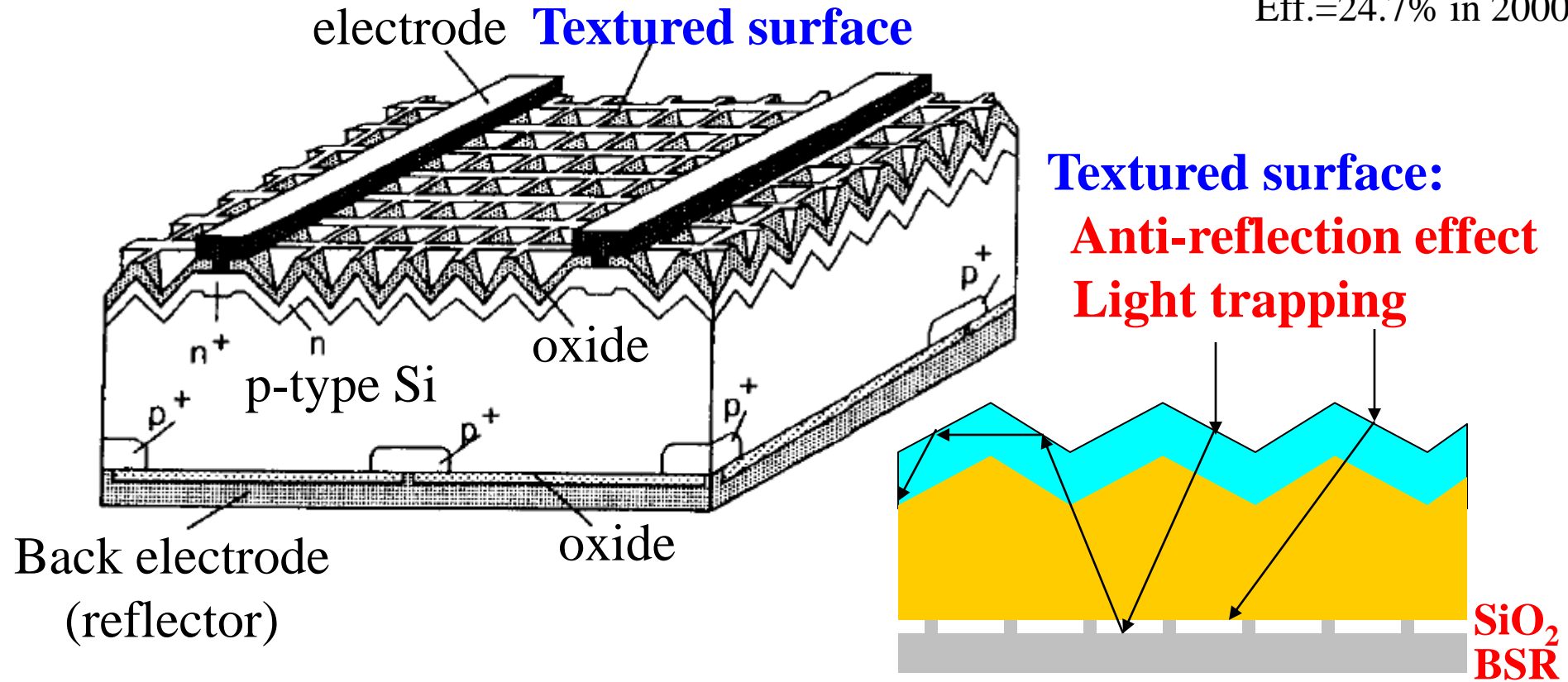
Texture構造
 光閉込 (light trapping) 構造
 ⇔ Specular (平坦) 構造

PERL太陽電池の構造

(passivated emitter, rear locally-diffused)

Green et al., New South Wales Univ., 1990

Eff.=24.7% in 2000

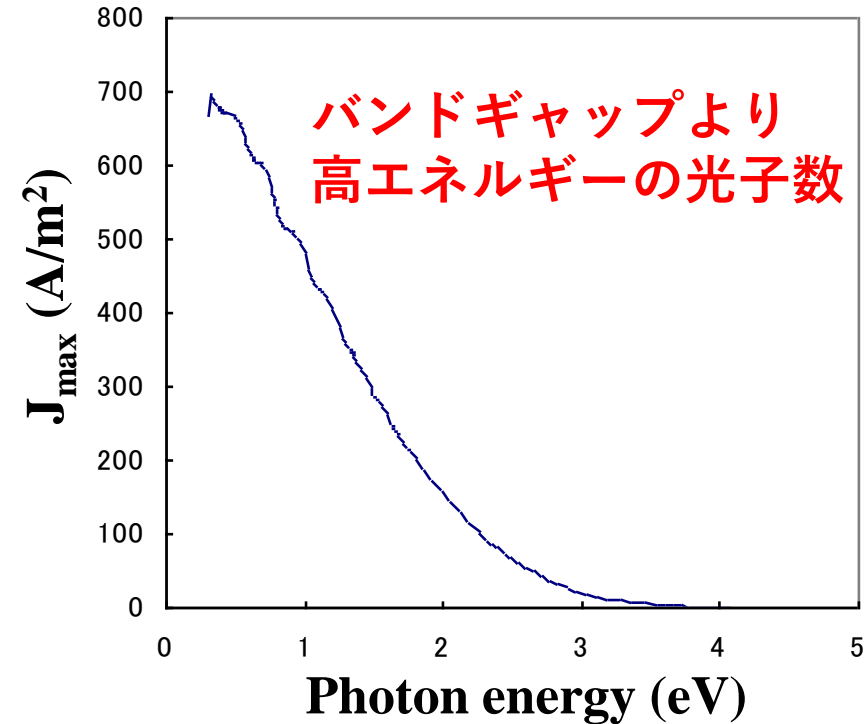
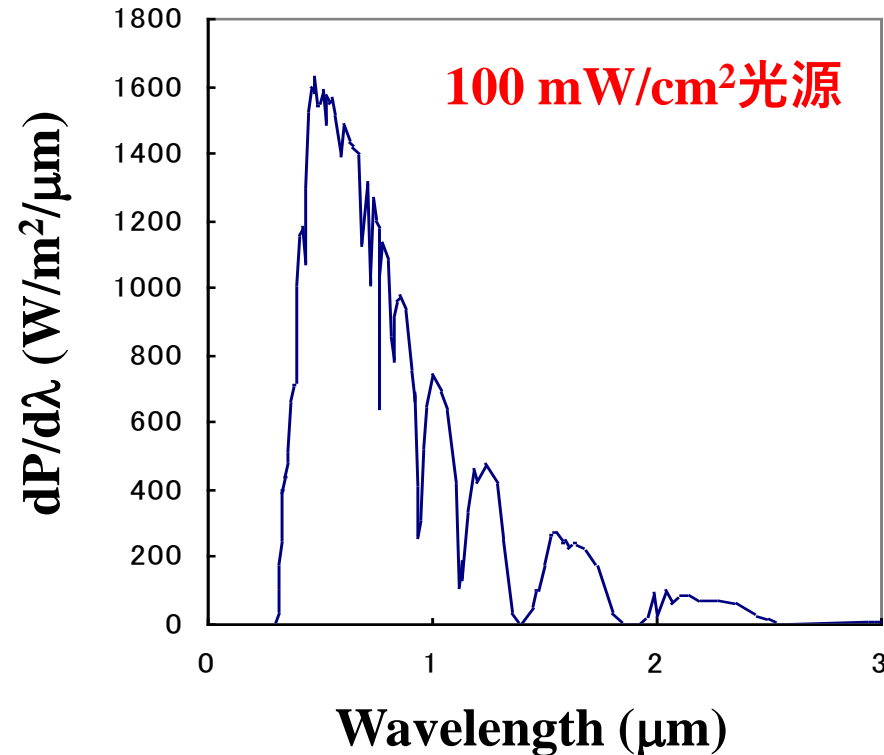


少数キャリアの**拡散長は大きい**:
電子では ~0.3mm (>1mm も得られる)

太陽光と標準グローバルAM1.5スペクトル

「太陽電池の物理」

AM: Air mass (大気通過量) AM0: 大気圏外 AM1: 赤道直下地表、垂直照射
AM1.5: 48度入射



J_{PV} / J_{max} : 発電に使われているフォトン数の割合

J_{sc} / J_{PV} : 発電されたキャリアが電極に収集される割合

J_{sat}, J_{sc} : J_{max} を超えない

各種太陽電池の 短絡電流と変換効率

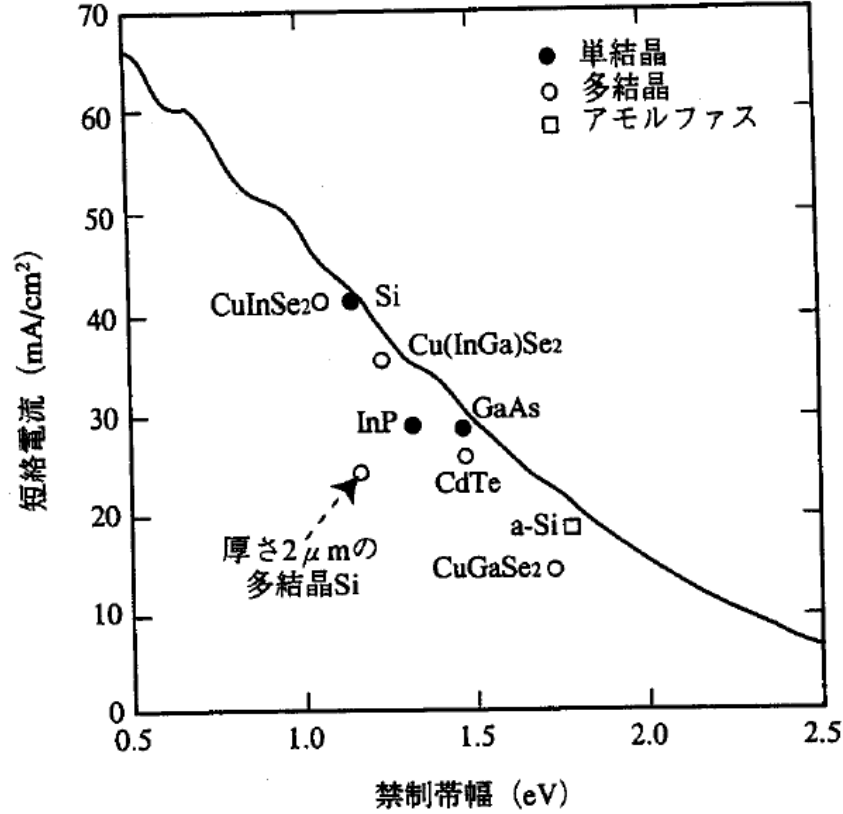


図1-10 太陽電池の短絡電流の理論限界と実測値

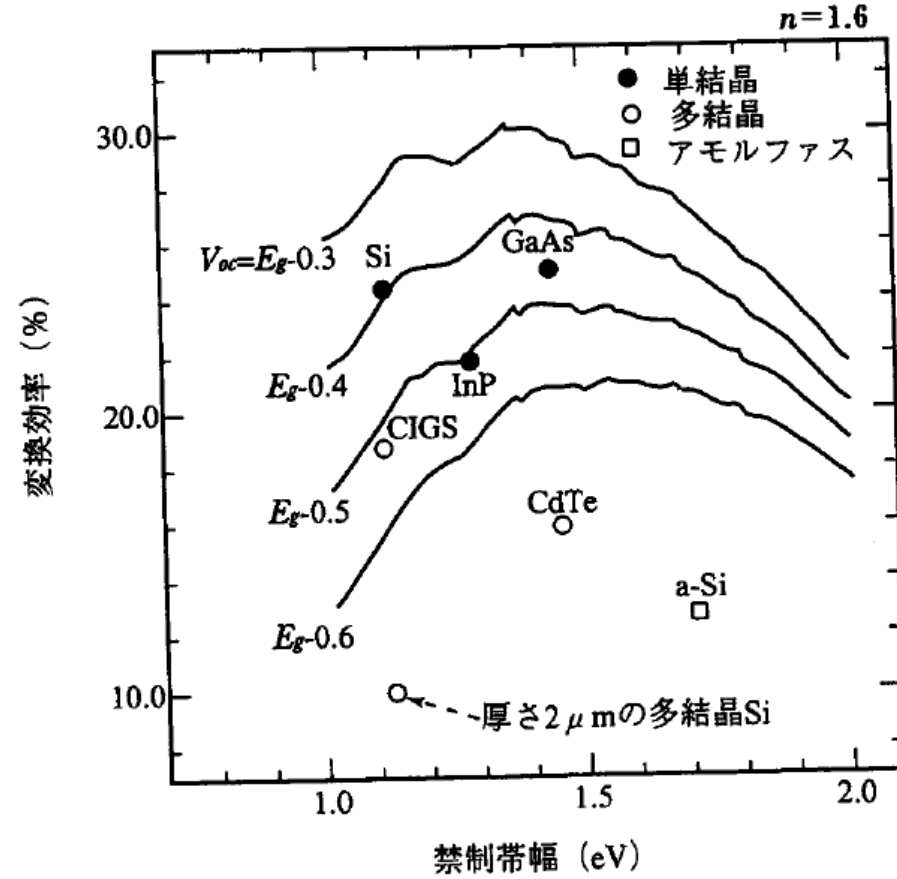


図1-13 太陽電池の理論効率と実測値

内蔵電位と開放端電圧

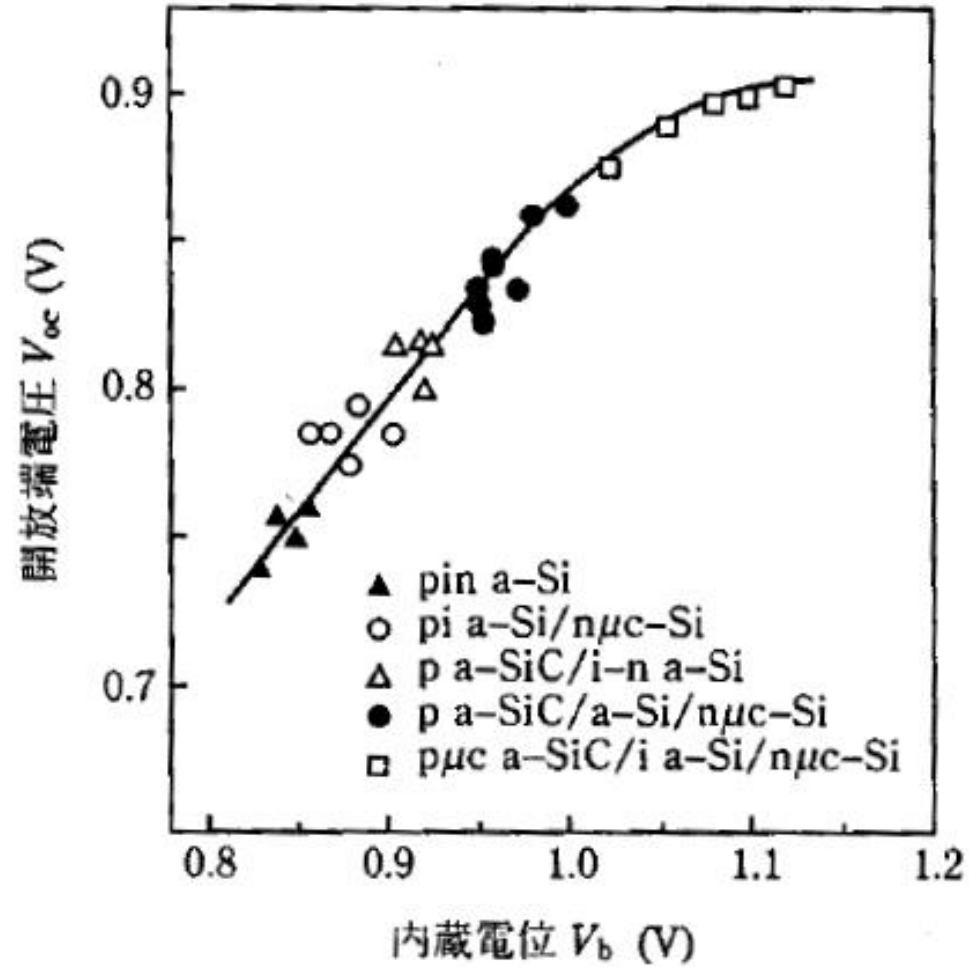


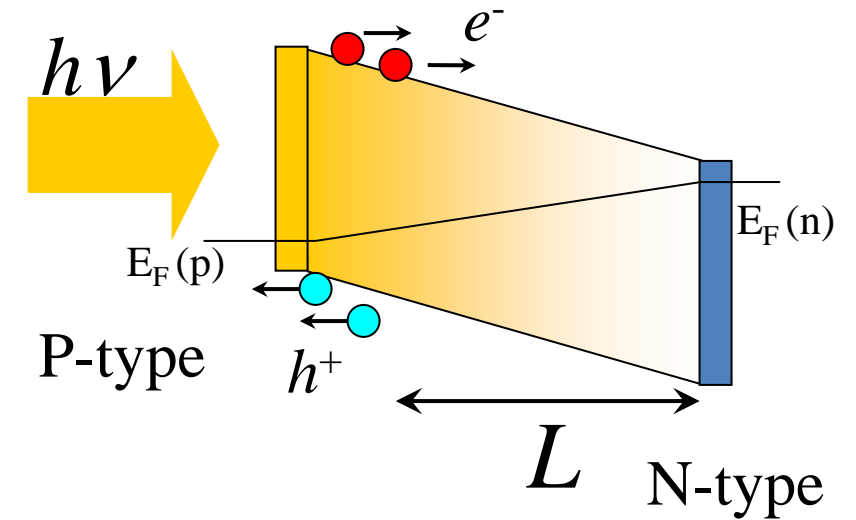
図 4.59 さまざまな接合構成において実測された内蔵電位と開放端電圧の関係

一次光伝導: ブロッキング電極

- **一次光電流**: p/i/n構造などを使い、**キャリアをブロック** (電子はp層、正孔はn層で再結合)
- 利得 K が1を超えることはない
- 高速応答: 応答速度は τ で制限されない

$$\Delta I = e\eta F \frac{\mu\tau(E - E_{bi})}{L} \left(1 - \exp\left(-\frac{L}{\mu\tau(E - E_{bi})}\right) \right)$$

プローブ光の侵入深さをi層の厚さより十分短くして測定すると、
移動度・寿命積が得られる

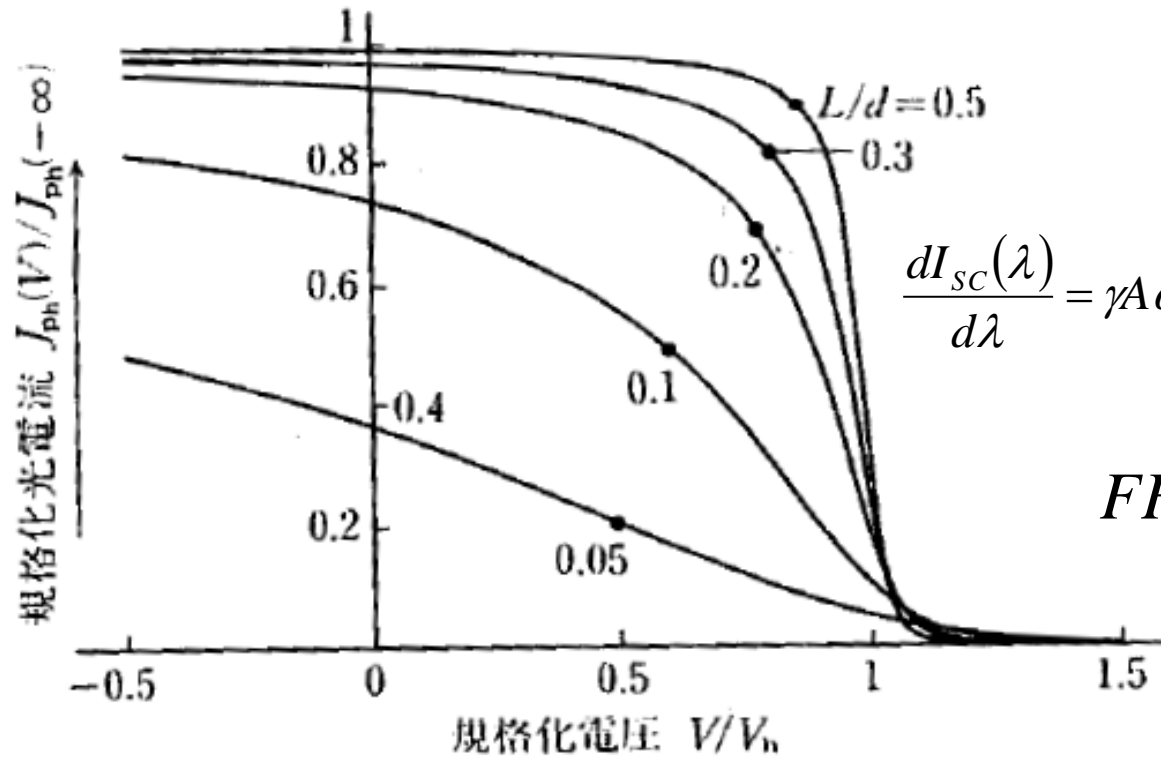


p/i/n太陽電池のi層に要求される特性

$$\text{ドリフト長 } \mu\tau E \gg L$$

$\mu\tau = 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{V}$ 、 $V(<V_{oc}) = 0.5\text{V}$ の場合、 $L < 0.7\mu\text{m}$
実際のa-Si:H太陽電池のi層の厚さ: $< 500\text{nm}$

pin型太陽電池のキャリアの拡散長と光電流: FF



$$\frac{dI_{sc}(\lambda)}{d\lambda} = \gamma A \alpha \lambda \left\{ \frac{L_p}{1 - \alpha L_p} \left[e^{-\alpha d} - e^{-d/L_p} \right] + \frac{L_n e^{-\alpha d}}{1 - \alpha L_n} \right\}$$

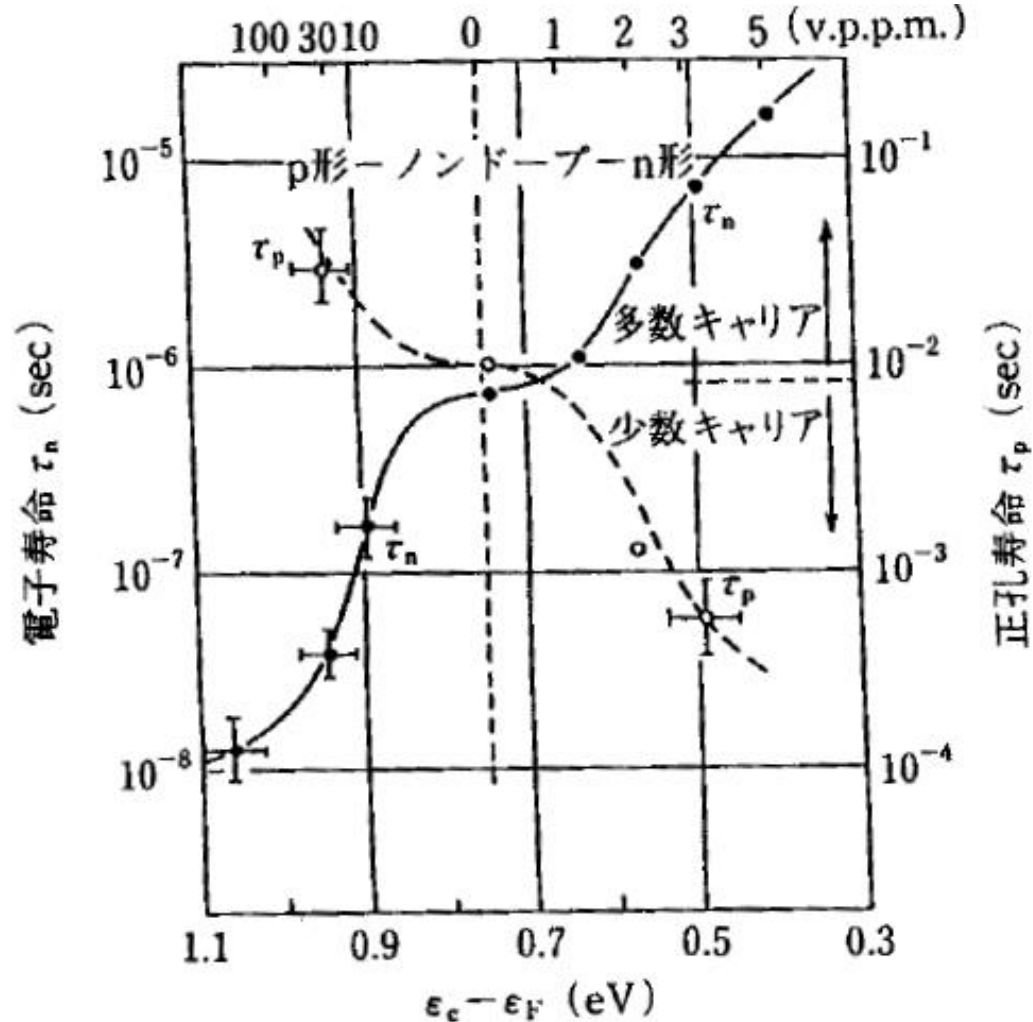
$$FF \sim C_1 - C_2 \frac{d}{L_n + L_p} \sqrt{\frac{kT}{qV_b}}$$

$$C_1 \sim 0.86$$

$$C_2 \sim 1.9$$

図 4.55 光電流の電圧依存性の計算例(キャリア拡散長を膜厚で規格化した量をパラメータとしている)

少数キャリア寿命のフェルミ準位依存性



a-Si:H

ドリフト移動度

電子 $\sim 0.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

正孔 $\sim 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$

移動端移動度

電子 $\sim 10 \text{ cm}^2/\text{Vs}?$

電子寿命 $< 10^{-5} \text{ s}$

自由キャリア寿命 $\sim 10^{-7} \text{ s}$

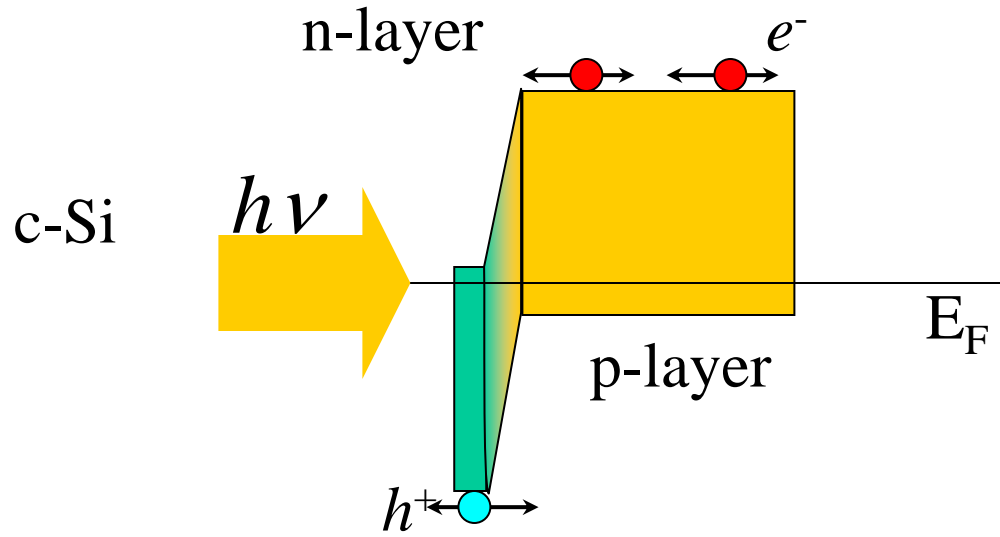
正孔寿命 $< 10^{-2} \text{ s}$

自由キャリア寿命 $\sim 10^{-8} \text{ s}$

図 4.47 a-Si における電子および正孔寿命のフェルミ準位依存性

c-Si太陽電池とa-Si:H太陽電池

少数キャリアの輸送特性が最も重要



拡散型デバイス

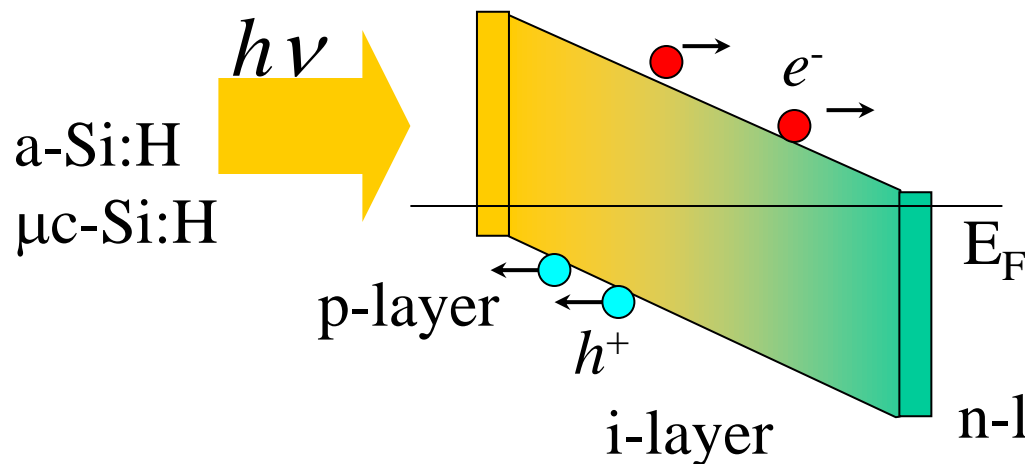
N層が窓

P層が光活性層: 電子を拡散で収集

拡散長 \gg 光吸収長

$$L = \sqrt{D\tau}$$

$$D = \frac{kT}{e} \mu = 0.026 \mu \text{cm}^2/\text{s}$$



ドリフトキャリアデバイス

i層が光活性層

ドリフトでキャリアを収集

キャリアは主に、p層側で生成

P層が窓

電子を拡散で収集

電子のドリフト長 \gg i層厚さ $L = \mu E \tau = \mu \tau E$

膜厚に対する必要な特性 (拡散長)

膜厚 d 、吸収係数 α で吸収される光子の割合

$$A = 1 - \exp(-\alpha d)$$

α [/cm]	d [μm]	A
10^4	1.0	0.64
10^4	3.0	0.95
10^2	100.0	0.64

吸収層は厚い方がいいが:

拡散キャリアデバイス: 拡散長 \gg 光吸収長

ドリフトキャリアデバイス: ドリフト長 \gg i層厚さ

$$L_{diff} = \sqrt{D\tau} = \sqrt{\frac{kT}{e} \mu\tau}$$

$$L_{drift} = \mu E \tau = \mu\tau E$$

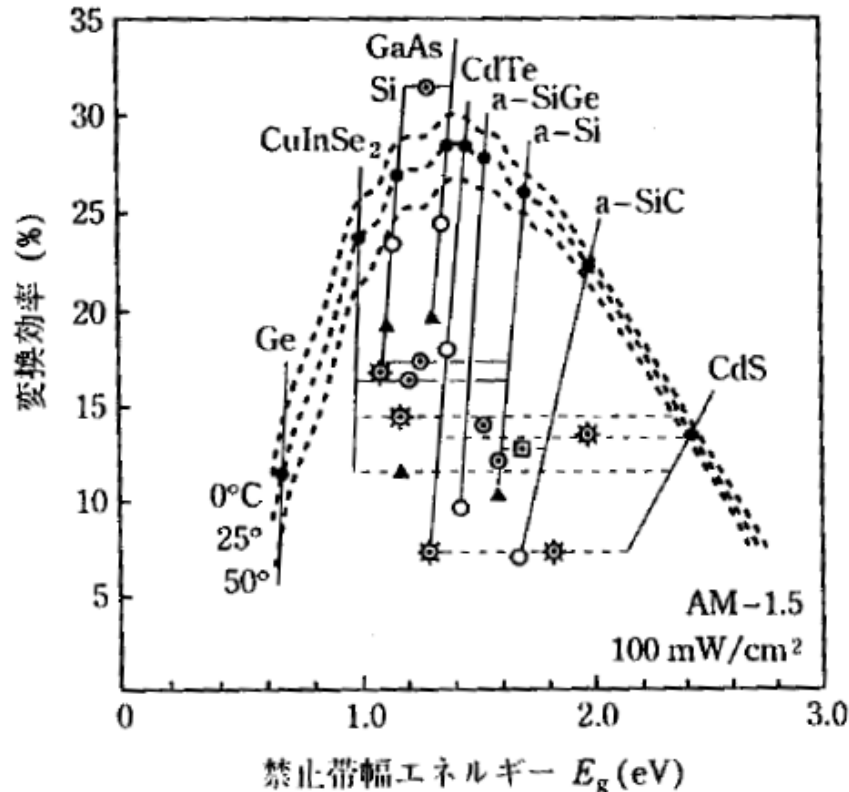
想定材料	μ [cm^2/Vs]	τ [s]	$\mu\tau$ [cm^2/V]	d [μm]	V [V]	L_{diff} [μm]	L_{drift} [μm]
sc-Si	1000	10^{-3}	1.0	100.0	1.0	1610	10^6
a-Si	1.0	10^{-8}	10^{-8}	0.5	0.5	0.161	1.0
$\mu\text{c-Si}$	10	10^{-6}	10^{-6}	1.0	1.0	1.61	10^6

太陽電池の理論変換効率

表1 各種太陽電池における変換効率の最高値
(測定条件AM1.5, 100mW/cm², 25°C)

構造	変換効率	面積	研究機関
c-Si	24.4%	4.0cm ²	UNSW* ¹ (豪州)
GaAs	25.1%	4.0cm ²	Kopin(米国)
InP	21.9%	4.0cm ²	Spire(米国)
GaInP/GaAs	30.3%	4.0cm ²	ジャパン・エナジー
GaAs/GaSb	35.6%* ²	0.23cm ²	ボーイング社(米国)
a-Si/a-SiGe	9.5%* ³	1200cm ²	三洋電機
a-Si/a-SiGe/a-SiGe	13.0%* ³	0.25cm ²	USSC(米国)

* 1 : ニューサウスウェールズ大学, * 2 : 100倍集光条件, * 3 : a-Si系は安定化後効率で表示(屋外暴露後1年相当の値).



a-Si:H太陽電池
pin ~13%、タンデム~15%
量産ベース
結晶シリコン 16-18%

図 2.15 各種太陽電池の室温における理論限界効率 (●), 研究開発段階の最高記録 (○) ならびに大量生産規模での最高記録効率 (▲)。2種類の材料をまたぐ⊙印はタンデム型太陽電池, ⊠印はヘテロ接合太陽電池, ⊛印は多結晶太陽電池, 他は多結晶のヘテロ接合太陽電池の効率を示す。

二次光電流: Ohmic電極の場合

- ・ **二次光電流**: 電子も正孔も自由に電極から半導体に注入できる場合
キャリアは回路を複数回廻って、光電流に寄与できる

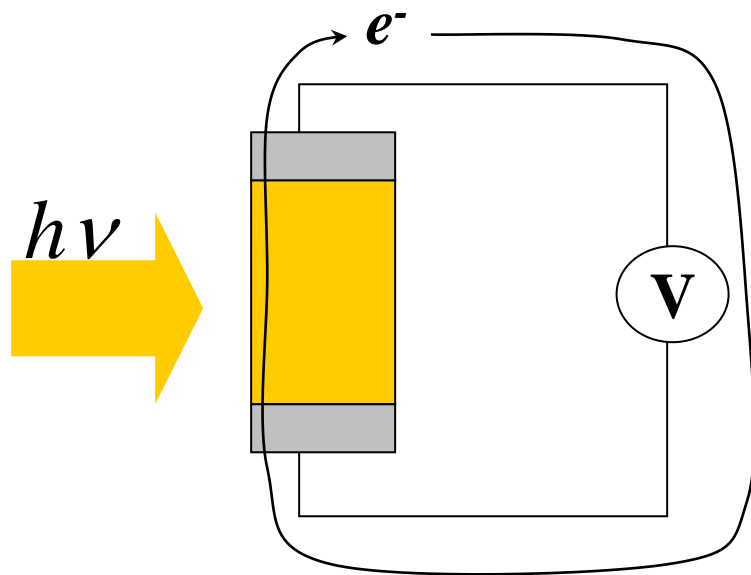
$$\Delta\sigma = e\Delta n\mu = eF\eta\mu\tau$$

$$\Delta I = \Delta\sigma \frac{S}{L} V = e \frac{\tau}{t_0} (\eta \cdot F \cdot L \cdot S)$$

τ : 光生成キャリアの寿命

$t_0 = L/(\mu E) = L^2/(\mu V)$: 通過時間

$$K = \frac{\tau}{t_0}: \text{利得係数}$$



高感度光センサー

- ・ 利得が大きく取れる
- ・ 動作速度が遅い $> \tau$

一次光電流・二次光電流の長所・短所

二次光電流: $K = \frac{\tau}{t_0}$: 利得係数

長所: 構造が単純 (オーミック電極)

電極間距離を小さくすれば利得を大きくとれる

短所: 応答速度は τ で決まる

一次光電流:

短所: 接合 (ブロッキング電極) を作る必要がある

利得は 1.0 が最大

長所: 応答速度は i 層中の走行時間で決まる

$$vt = d \Rightarrow t = \frac{d}{v} = \frac{d}{\mu E} = \frac{d^2}{\mu V}$$

$\mu = 100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $d = 1 \text{ }\mu\text{m}$, $V = 1 \text{ V}$ の場合: **0.1 ns**

太陽電池と光センサーの違い

	太陽電池	光センサー
デバイス構造 動作原理	類似	
大きさ	大面積 $\gg 1 \text{ m}^2$	小面積 $< 1 \text{ cm}^2$
外部電源補助	無し	あってもよい
効率・感度	効率が重要	感度は高いほうがいい 外部電源・アンプによる補助可能
スペクトル	光源は最大限 使う	用途次第で制限 特定の波長のみで効率が良い場合も 多い
コスト	安い必要	付加価値次第

光センサーの評価

- ・ 利得・応答時間

高速応答が必要な場合には利得は 1 以下に限られる
応答速度が問題でない場合は、デバイス構造・サイズで
利得をあげられる

- ・ 感度

光電流/暗電流比

悪い光電半導体であっても、暗電流を下げることであげられる
良い光電半導体であっても、暗電流が高いと見えなくなる

=> **光電流値**も重要

光電流/入射光エネルギー (強度) [A/W]

光電流/入射光流束 [A]

良い光電半導体でないと感じ度は上がらない

光起電力/入射光流束 [A]

V_{OC} は F に比例しない

荒い計算で具体的な数字で見ましょう

太陽光中の光子流量: $\max 70 \text{ mA/cm}^2 \Rightarrow 4.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

c-Si太陽電池から計算: $J_{sc} \sim 40 \text{ mA/cm}^2 \Rightarrow 2.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

100 mW/cm²の太陽光の平均格子エネルギーを 2 eVとして見積もる
 $\Rightarrow 3.1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

全スペクトルの光子を全て利用しても、 $F = 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ くらい

$\tau = 1 \text{ ms}$ と長くても、 $\Delta n = F\tau = 3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ くらい

移動度を $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ とすると、

光シート伝導度はせいぜい $\sigma_{ph} = eF\mu\tau = 0.48 \times 10^{-3} \text{ S}/\square$

半導体の残留キャリア濃度が $n_d = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さが $d = 1 \text{ }\mu\text{m}$ の場合、

暗時のシート伝導度は $1.6 \times 10^{-5} \text{ S}/\square$

※ マージンは2桁程度しかないので、

$n_d > 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ になると光伝導が見えなくなる (ないわけではない)

荒い計算で具体的な数字で見ましょう

分光光源での測定では: 分光器の分解能を 2 nm とすると、赤外から可視光の波長域
1500 ~ 400 nm のうち、1/550 しか使えない
100 mW/cm² 光源の場合、0.2 mW/cm²、 $F = 6 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

$\tau = 1 \text{ ms}$ と長くても、 $\Delta n = F\tau = 6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ くらい
移動度を $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ とすると、

光シート伝導度はせいぜい $\sigma_{ph} = eF\mu\tau = 9.6 \times 10^{-7} \text{ S}/\square$

半導体の残留キャリア濃度が $n_d = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 、厚さが $d = 1 \text{ }\mu\text{m}$ の場合で、
暗時のシート伝導度は $1.6 \times 10^{-7} \text{ S}/\square$

※ 多くの場合、Lock-in検出するか、
レーザー光源、集光光源を使わないと分光測定は難しい

新材料の評価: Step 1

- 暗伝導度、残留キャリア濃度、移動度の評価:
 - どんなに悪くても、残留キャリア濃度は 10^{17} cm^{-3} より十分に小さいこと
 - 少数キャリア寿命が短い
 - 暗伝導度が高く on/off比が取れない
 - 移動度は大きいほど良い
- 光伝導度の評価: $\mu\tau$ 積
 - とりあえず強い白色光を当てて光伝導度を測る
 - => 平均光子エネルギーを仮定して $\mu\tau$ 積、 τ を荒く評価
 - 分光光源で測定ができるかどうかを評価
 - 分光光源の光子流速 F から、光キャリアシート密度 $\Delta n = F\tau$ を評価
 - 残留キャリアのシート密度と比較し、測定可能な条件を確認する
 - 光源強度
 - Lock-in検出が必要かどうか

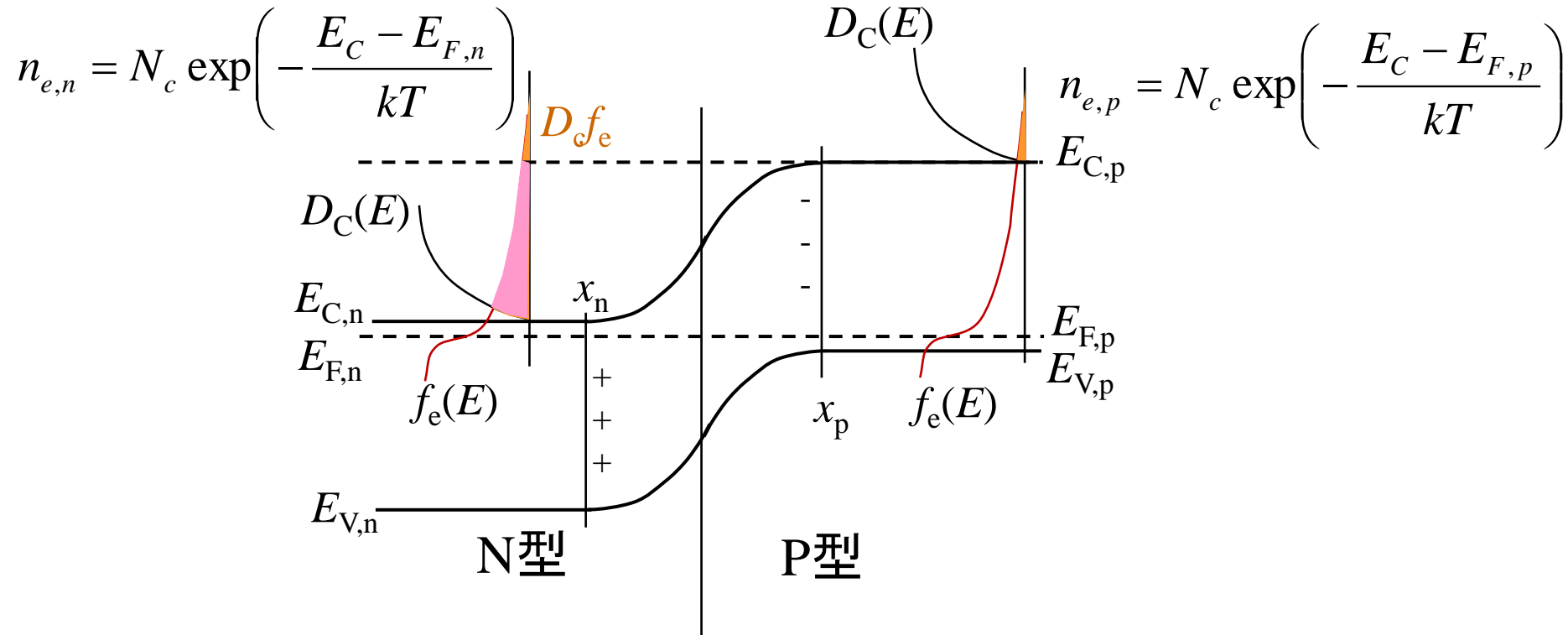
新材料の評価: Step 2 接合デバイス

- 接合デバイスを作って光発電特性を評価
 - Schottkyデバイス
 - 作るのが簡単
 - p/n接合
 - p/i/n接合
 - 作るのに設備、技術が必要 (各界面の欠陥が特に重要)

など

透明電極を使えない場合、半透明金属電極やメッシュ電極を作って、光を入射

p/n接合の電子分布: $V = 0$

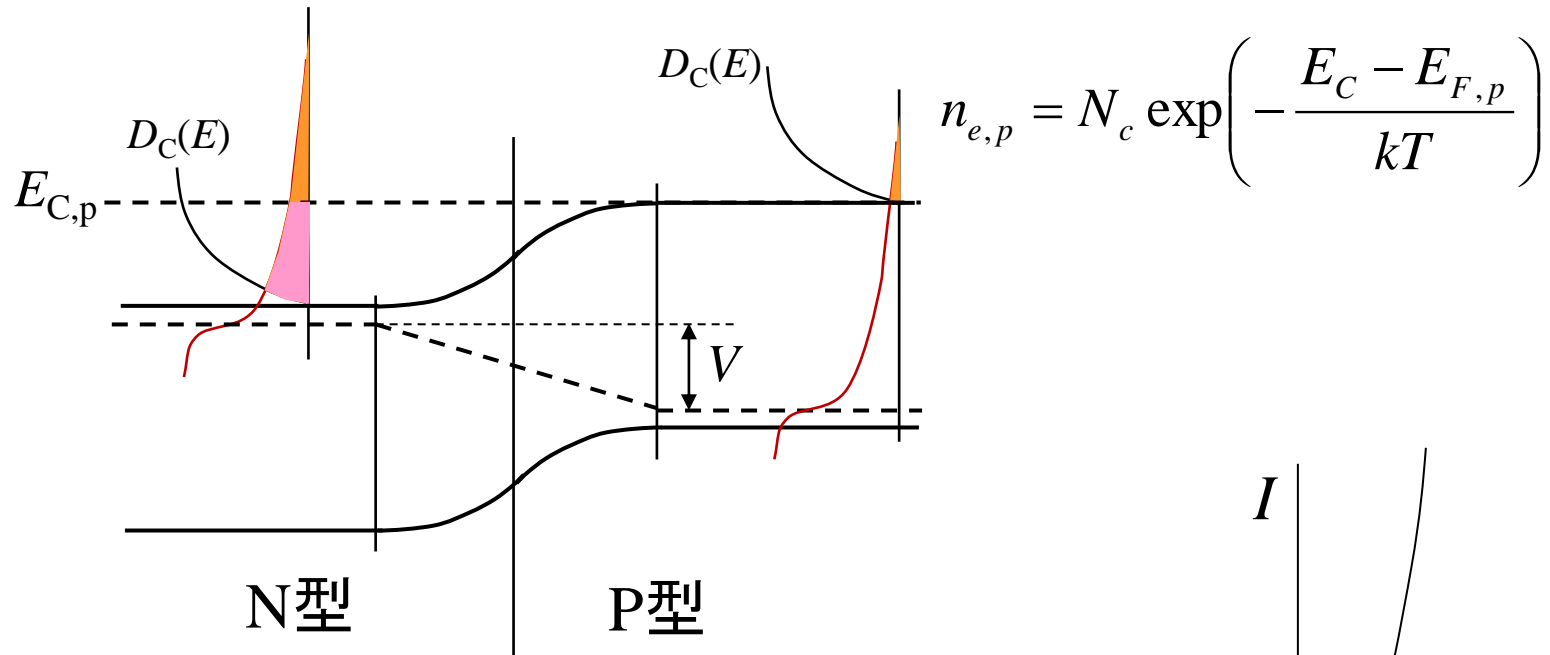


$$n_{e,n}(E > E_{C,p}) = N_c \exp\left(-\frac{eV_{bi} + E_C - E_{F,n}}{kT}\right) = N_c \exp\left(-\frac{E_C - E_{F,p}}{kT}\right) = n_{e,p}$$

$n_{e,n}(E > E_{C,p}) \sim n_{e,p}$, しかし正確な $n_{e,n}(E > E_{C,p})$ は $n_{e,p}$ より少し多い
 拡散電流の過剰分は空乏層中のドリフト電流で相殺されている。

p/n接合の電子分布: 順方向 V

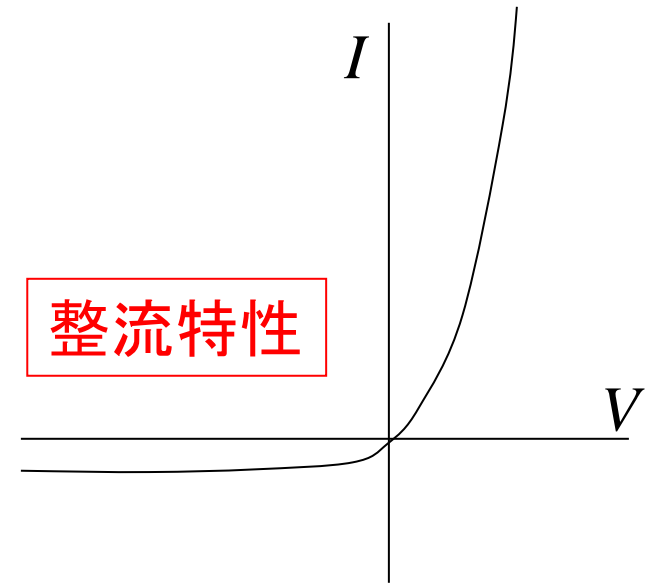
$$n_{e,n}(E > E_{C,p}) = N_c \exp\left(-\frac{eV_{bi} - eV + E_C - E_{F,n}}{kT}\right) = n_{e,p} \exp\left(\frac{eV}{kT}\right)$$



$$J_e(V) \propto n_{e,n} - n_{e,p} = n_{e,p} \left(\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right)$$

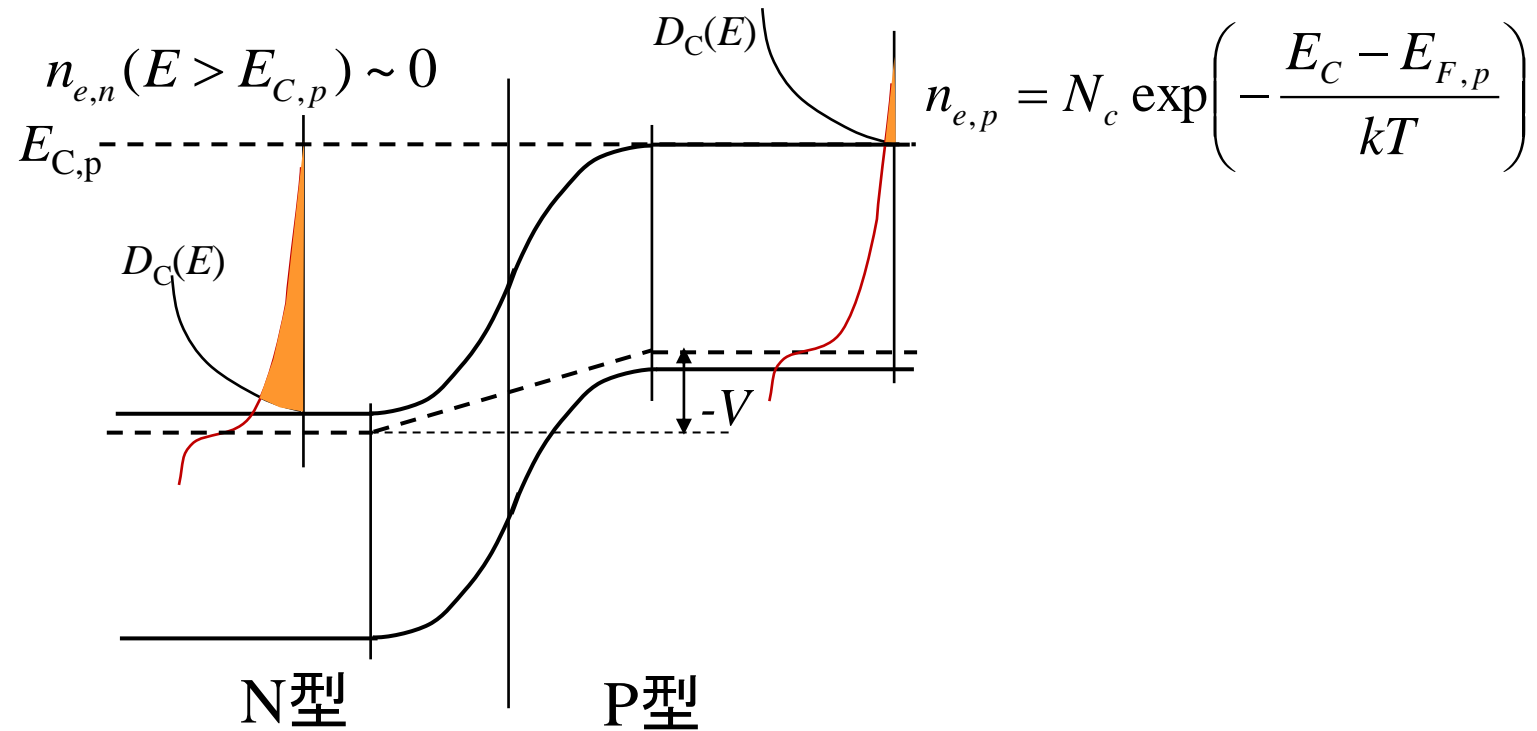
$$J(V) = J_e(V) + J_h(V)$$

整流特性



解:
$$J = e \left(n_{e,p} D_n / L_n + n_{h,n} D_p / L_p \right) \left[\exp(eV / k_B T) - 1 \right]$$

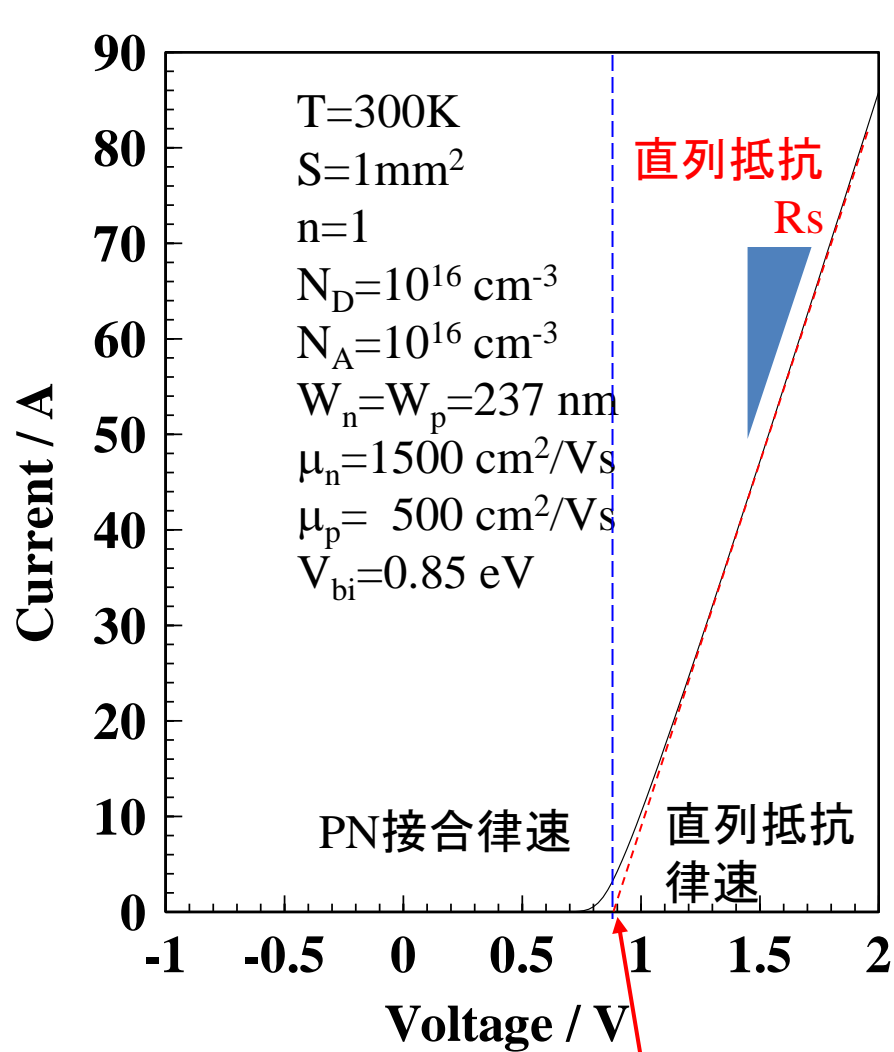
p/n接合の電子分布: 逆方向 V



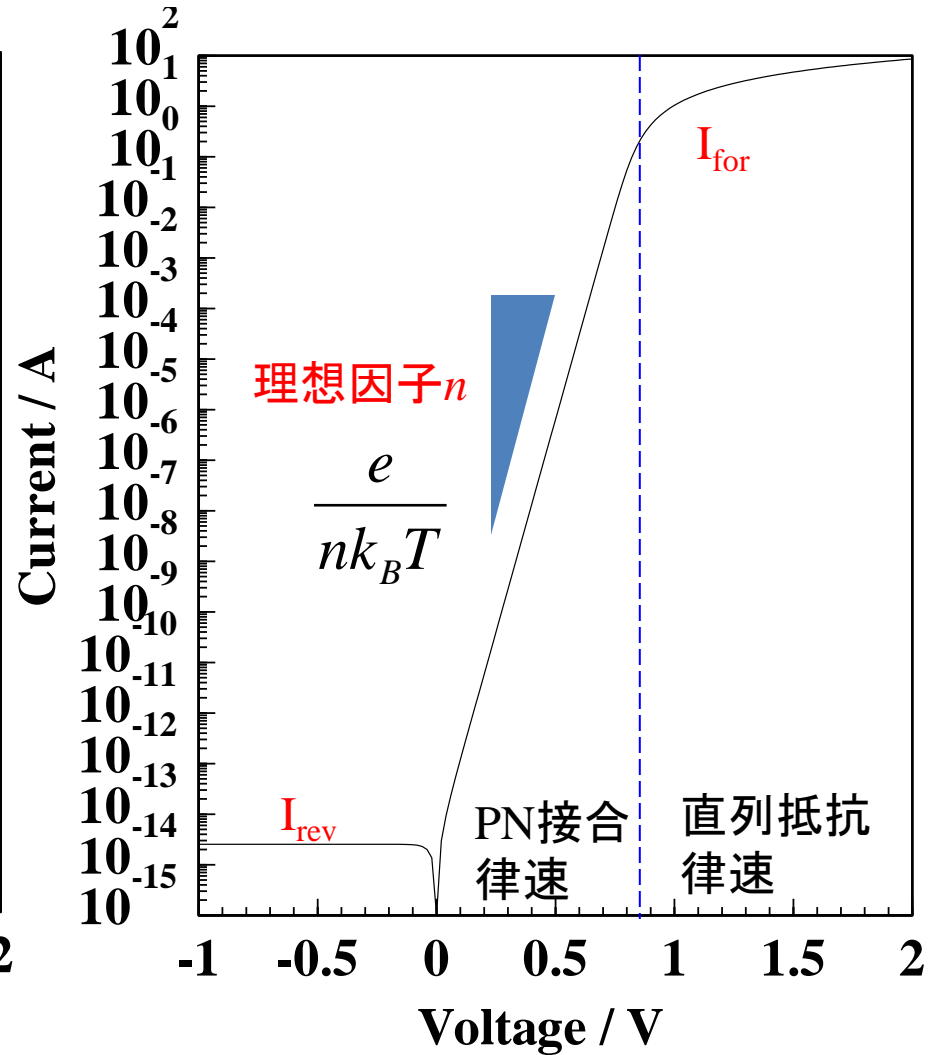
$$J_e(-V) \propto -n_{e,p}$$

大きな逆方向バイアスでは、電流値は飽和 (hard saturation) する

PN接合の電気特性



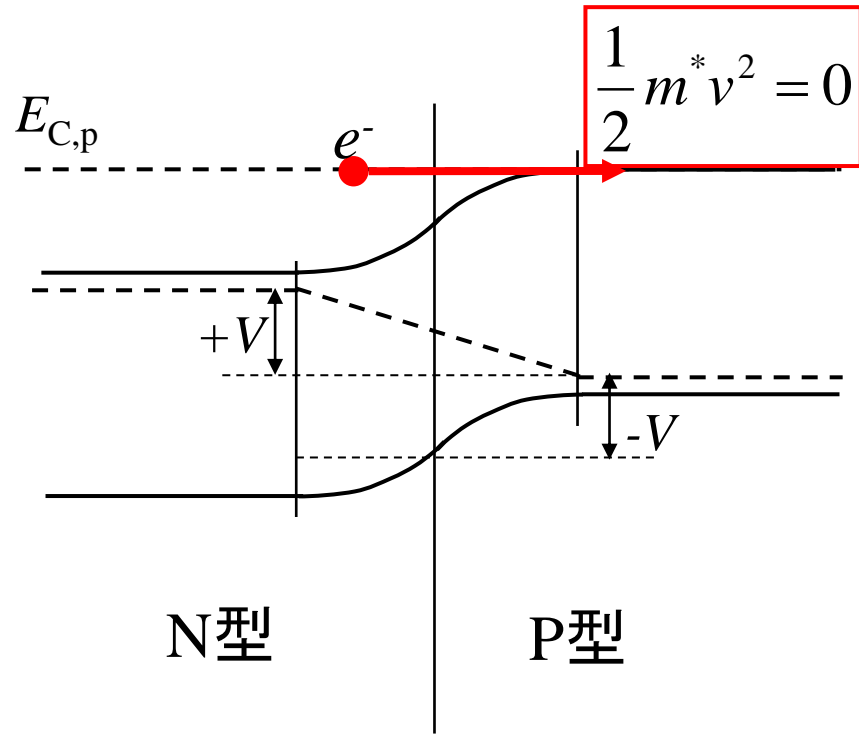
立ち上がり電圧: 直列抵抗 R_s が小さい場合は内蔵電位 V_{bi} によく対応する



I_{rev} : 逆方向電流 — 通常リーク電流
 整流比 I_{for} / I_{rev}

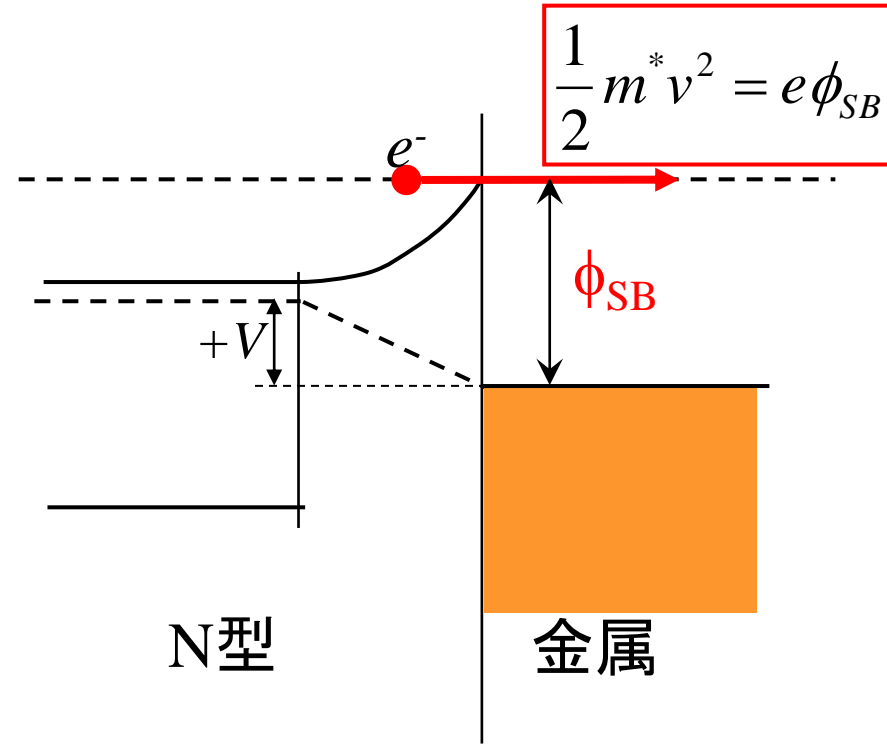
順方向電流: p/n接合 vs Schottky接合

p/n接合



拡散型デバイス

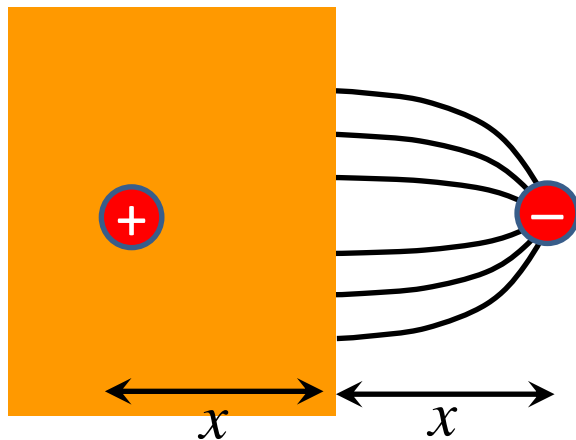
Schottky接合



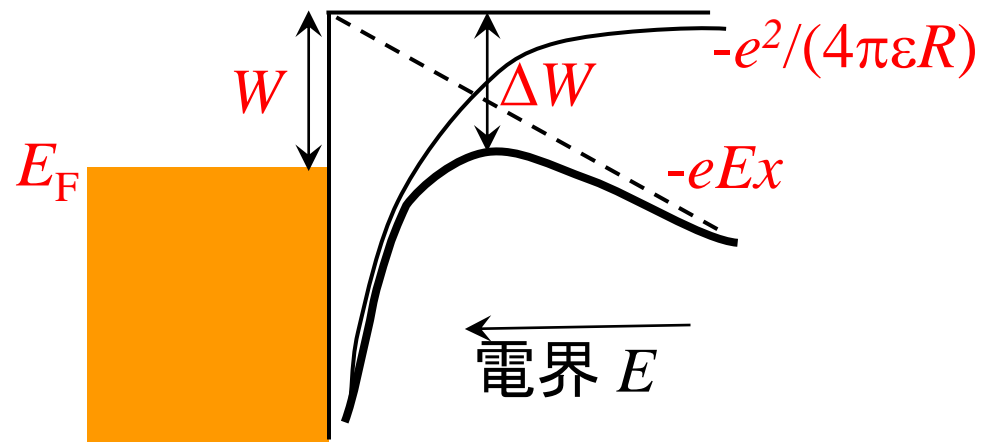
ホットエレクトロンデバイス
(高速動作可能)

鏡像力による有効仕事関数の減少: Schottky効果

金属表面の
電気力線と鏡像電荷



金属から引き出された
電子が感じるポテンシャル



$$V(x) = W - eEx - \frac{e^2}{4\pi\epsilon(2x)}$$

$$x_m = \sqrt{\frac{e}{16\pi\epsilon E}} \quad \Delta W = -e\sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon}}$$

Schottky接合の順方向J-V特性

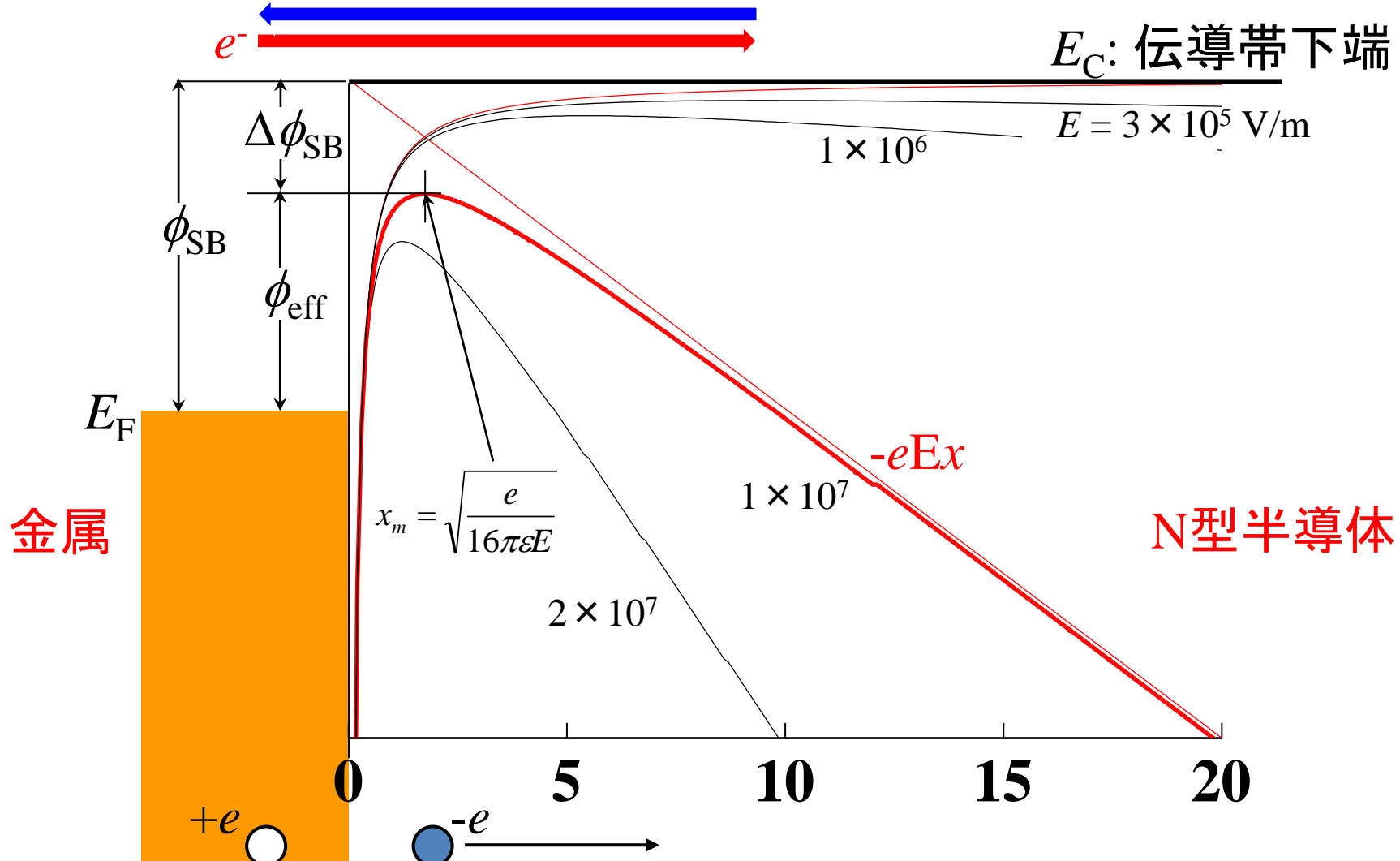
$$I = A^* T^2 \exp\left(-\frac{\phi_{SB}}{nkT}\right) \left\{ \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right\}$$

$$A^* = 4\pi e m^* k_B^2 / h^3 = 119.6 m^* / m_e \text{ [A/(cm}^2\text{K}^2\text{)]}$$

A^* : Effective Richardson constant

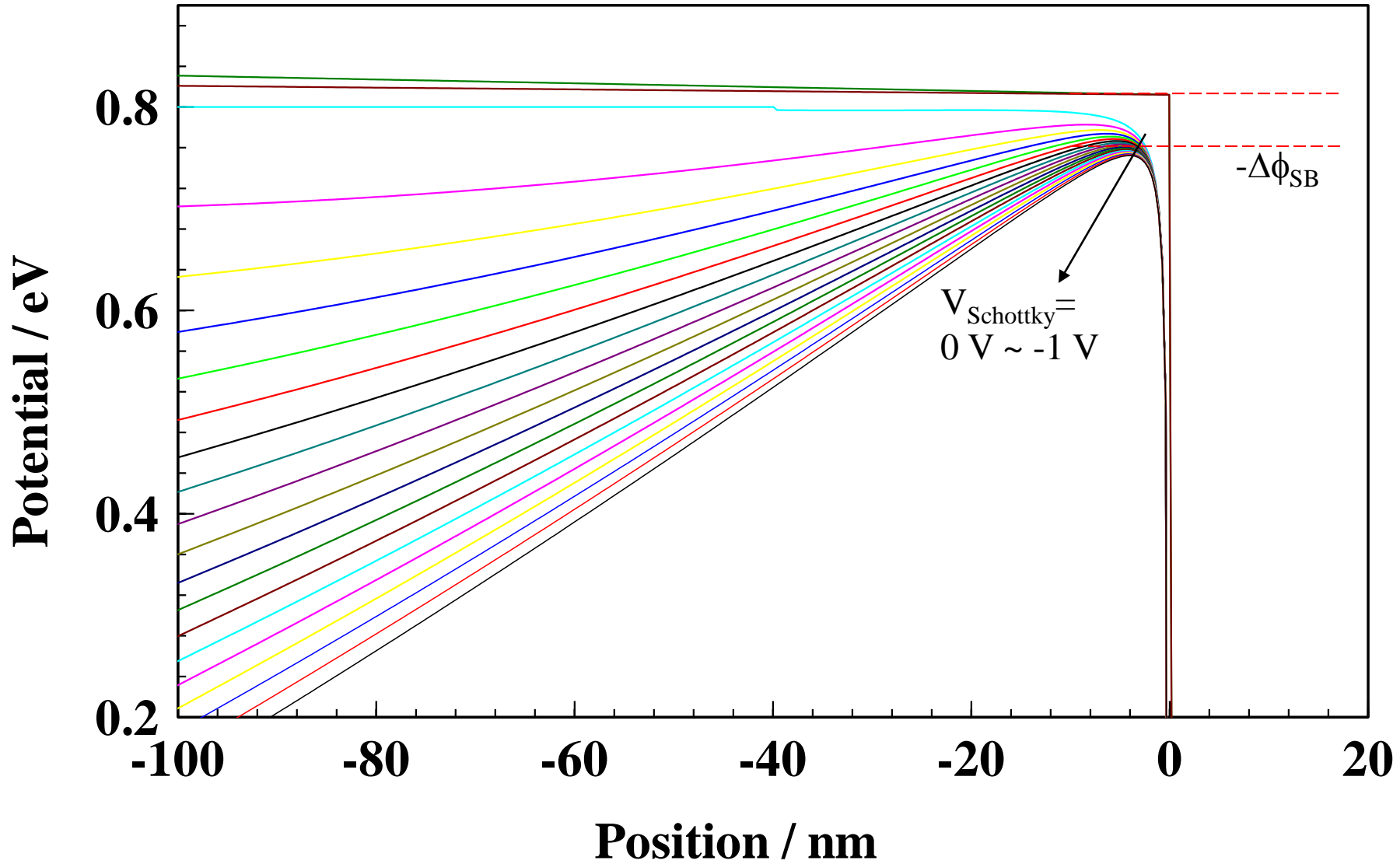
Schottky接合の内部熱電子放出電流

$$|j_x| = AT^2 e^{-\frac{\phi_{SB}}{k_B T}} e^{\frac{e}{k_B T} \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon}}}$$



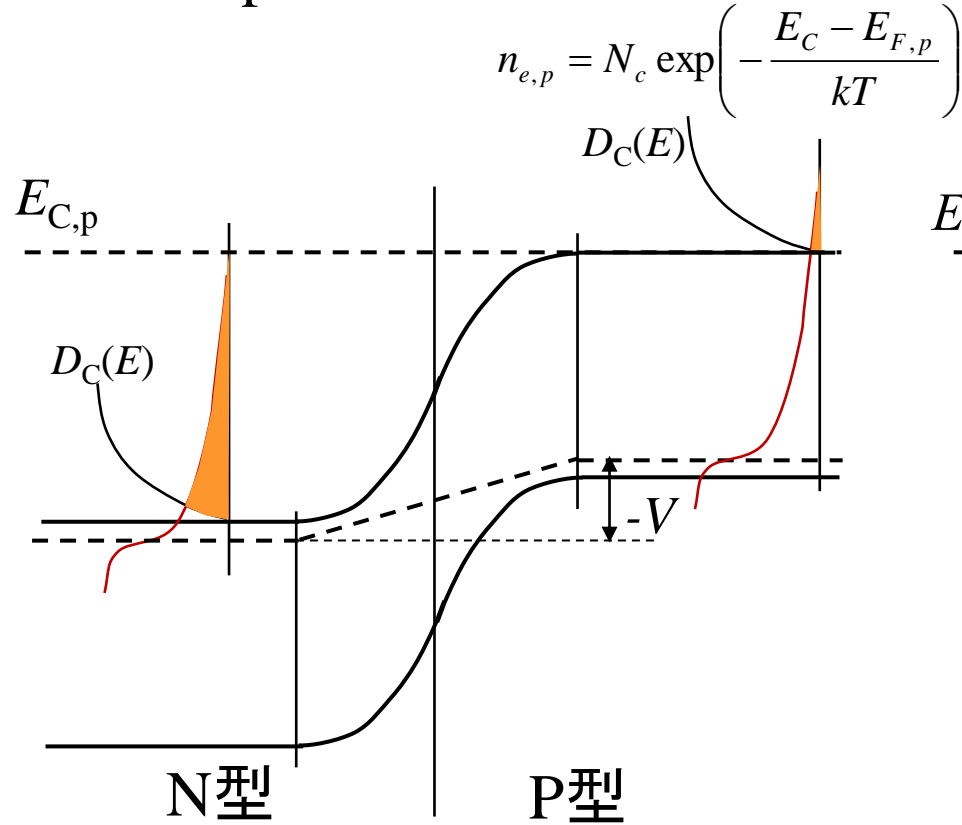
導体表面の電位が一定になる条件から、鏡像電荷を考える

逆バイアスにおけるSchottky効果



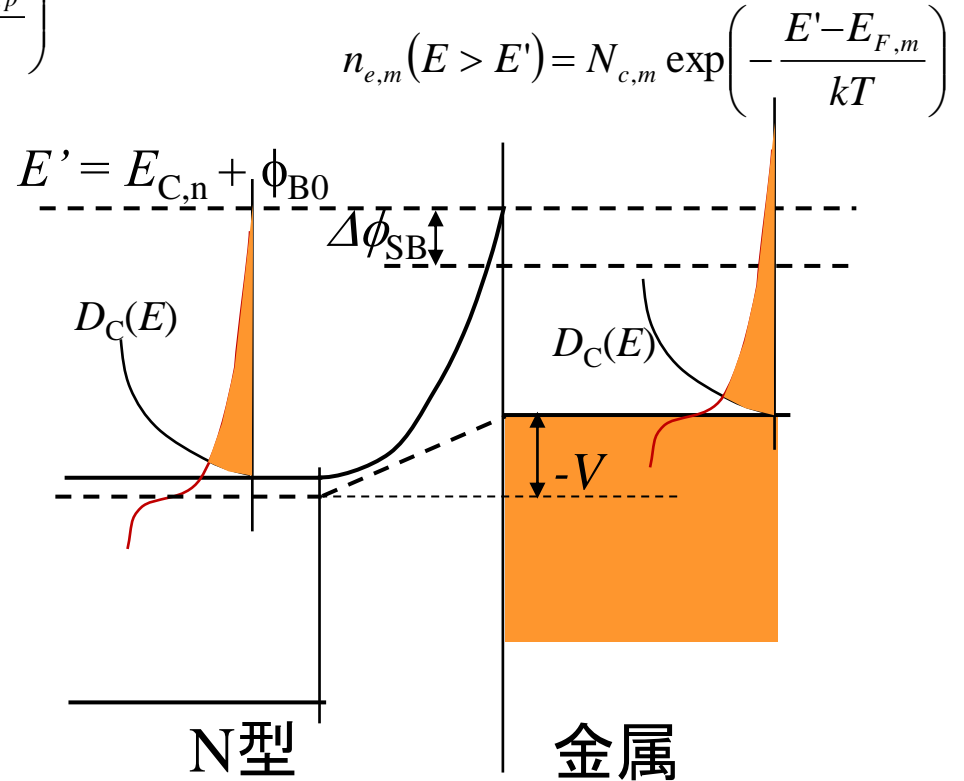
逆方向電流: p/n接合 vs Schottky接合

p/n接合



$$J_e(-V) \propto -n_{e,p}$$

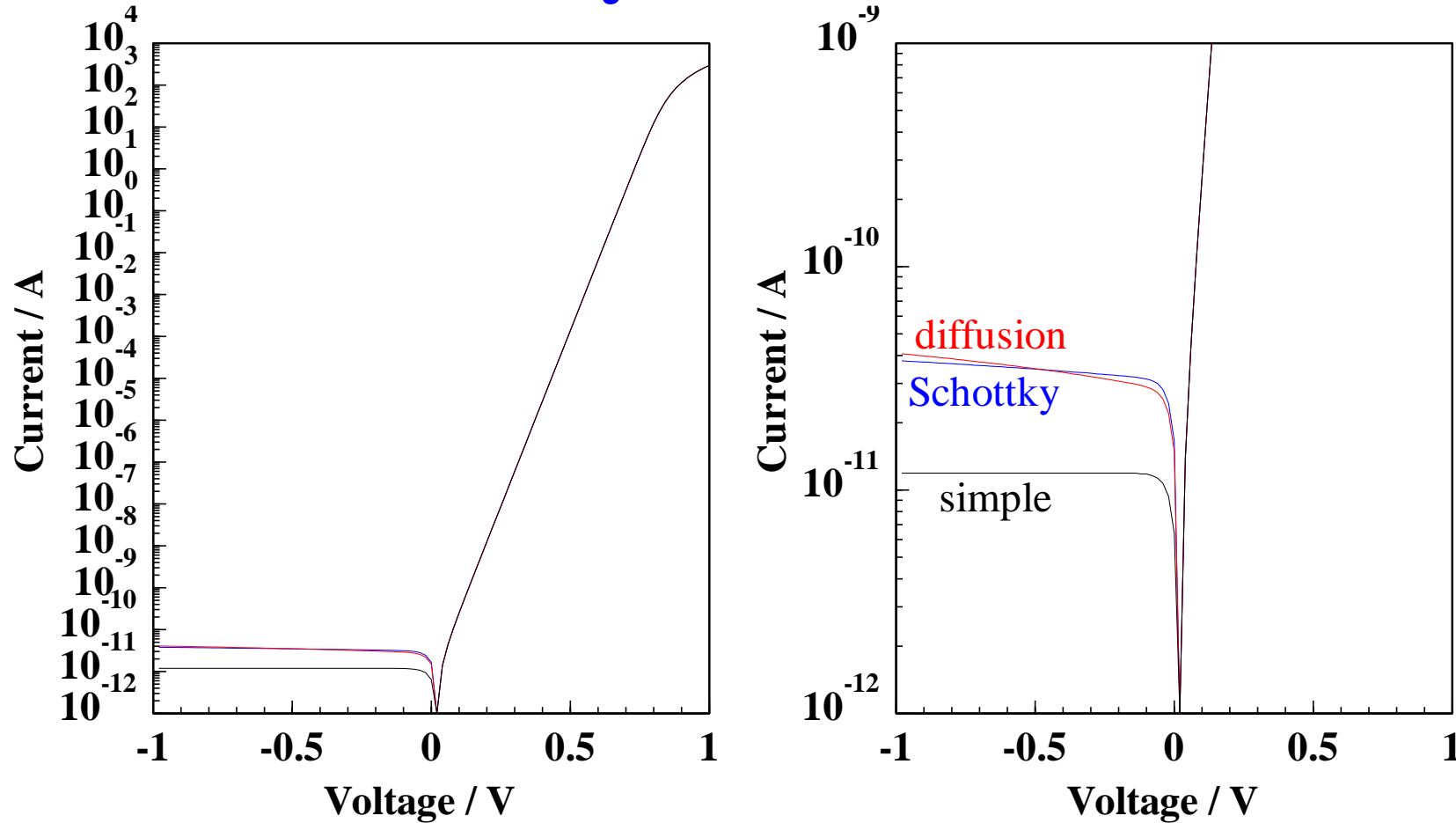
Schottky接合



$$J_e(-V) \propto -n_{e,m} \exp\left(-e \frac{\phi_{SB} - \Delta\phi_{SB}}{kT}\right)$$

$$= -n_{e,m} \exp\left(e \frac{\Delta\phi_{SB}}{kT}\right)$$

Schottky接合の電気特性



注: p/n接合では逆方向電流が完全飽和する

=> J_{dark} が無視できれば J_{sc} は光子量に比例する

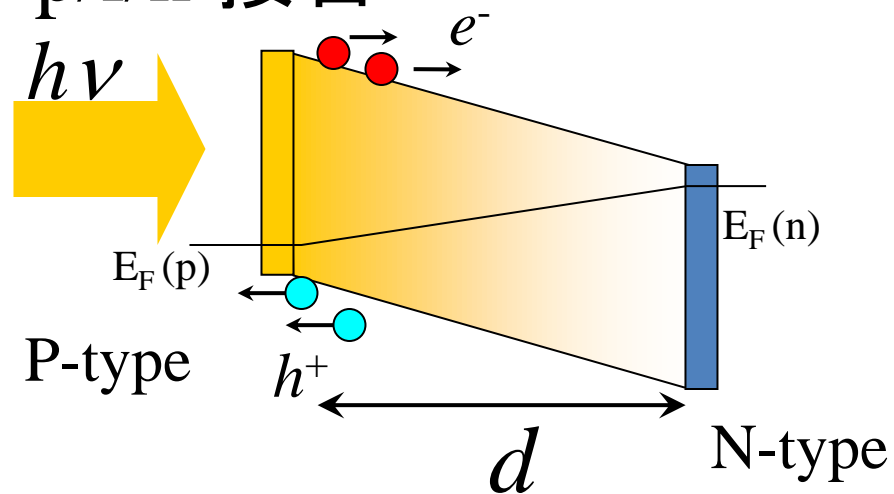
=> 光センサーに使う場合、適当な負バイアスをかけて安定化させて使える

Schottky接合: 負バイアスの大きさにより J_{sc} が変わる

p/n接合、Schottky接合の応答速度

- ・ 発電層中のは電界はない
少数キャリアが**拡散**により電極に収集される時間で決まる
=> 少数キャリア寿命 τ = 応答速度
- ・ 高速応答させるには、発電層に内蔵電界・外部電界をかける
少数キャリアの**走行時間 (transit time)** が応答時間になる

=> p/i/n 接合



$$\text{ドリフト速度 } v_d = \mu E$$

$$\text{走行時間 } t_i = \frac{d}{v_d} = \frac{d^2}{\mu V}$$

$$d = 1 \mu\text{m}, \mu = 10 \text{ cm}^2/\text{Vs}, V = -1 \text{ V}$$

$$t_i = 1 \text{ ns}$$

まとめ: 光センサーの評価

- ・ 利得・応答時間

高速応答が必要な場合には利得は 1 以下に限られる
応答速度が問題でない場合は、デバイス構造・サイズで利得をあげられる
高速応答が必要な場合、p/i/n 接合を採用

- ・ 感度

光電流/暗電流比

悪い光電半導体であっても、暗電流を下げることであげられる
良い光電半導体であっても、暗電流が高いと見えなくなる

=> **光電流値**も重要

光電流/入射光エネルギー (強度) [A/W]

光電流/入射光流束 [A]

良い光電半導体でないと感じ度は上がらない

光起電力/入射光流束 [A]

V_{OC} は F に比例しない