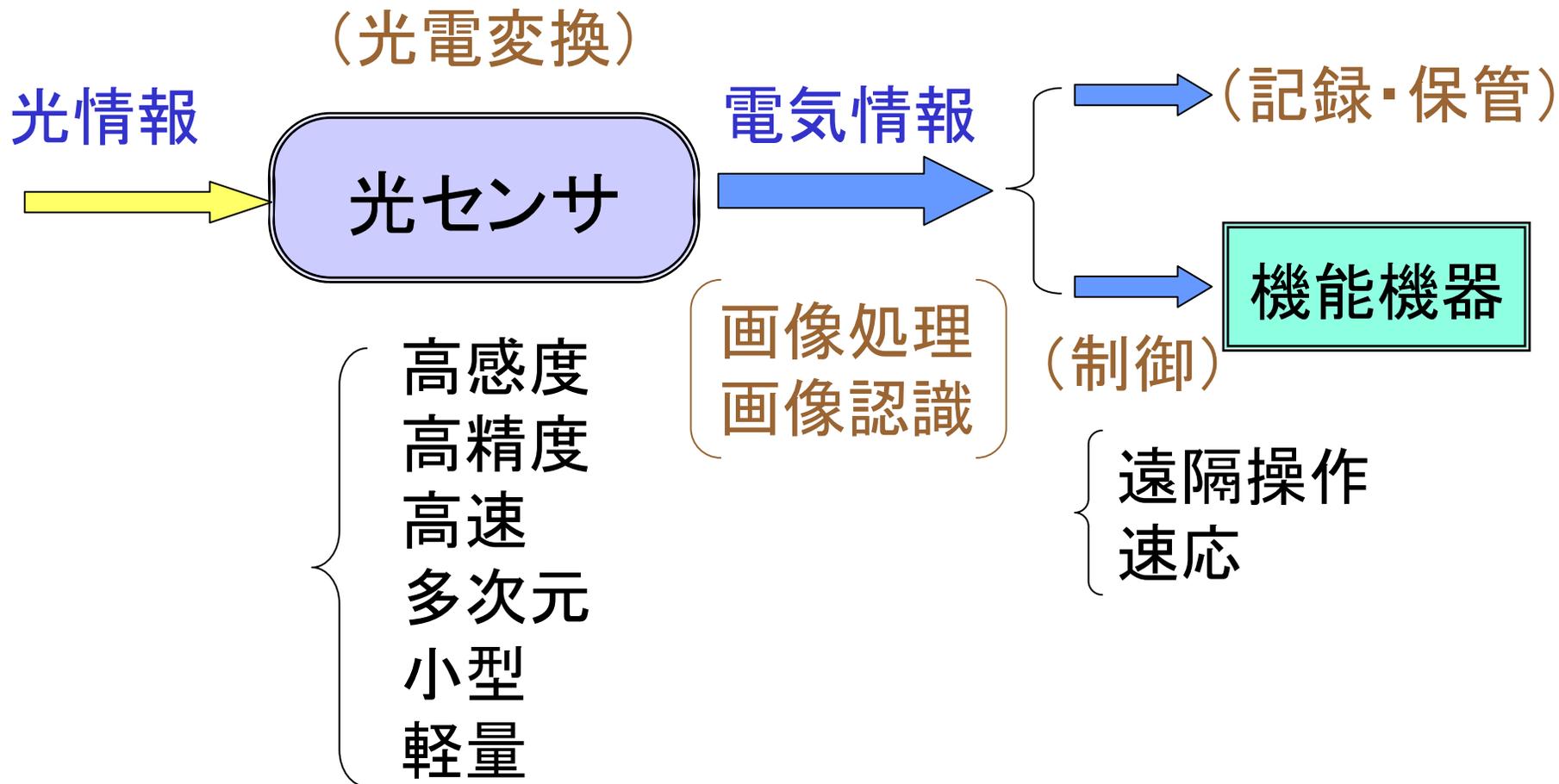
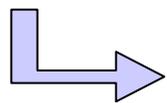


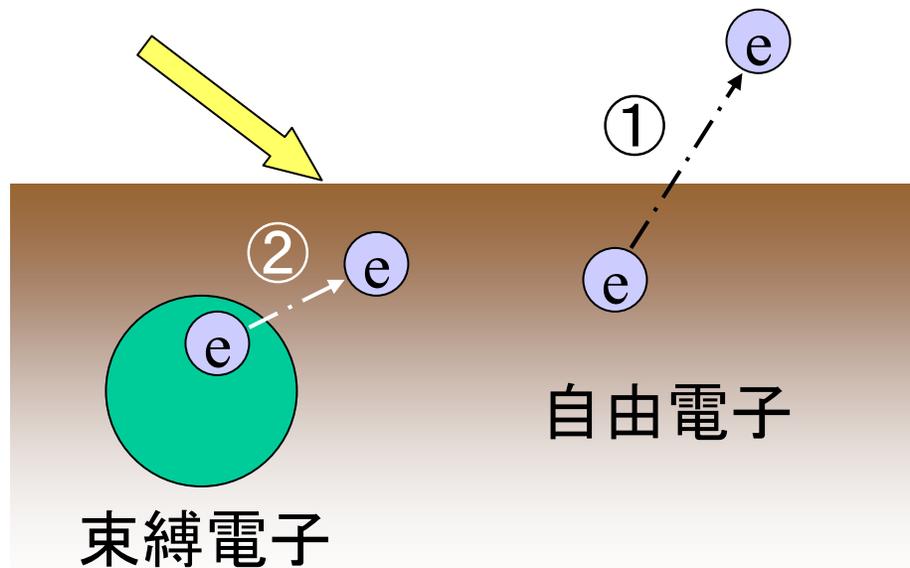
# 光センサ



# 光電変換に関する物理現象



## 光子と電子の相互作用



- ① 外部量子効果
- ② 内部量子効果

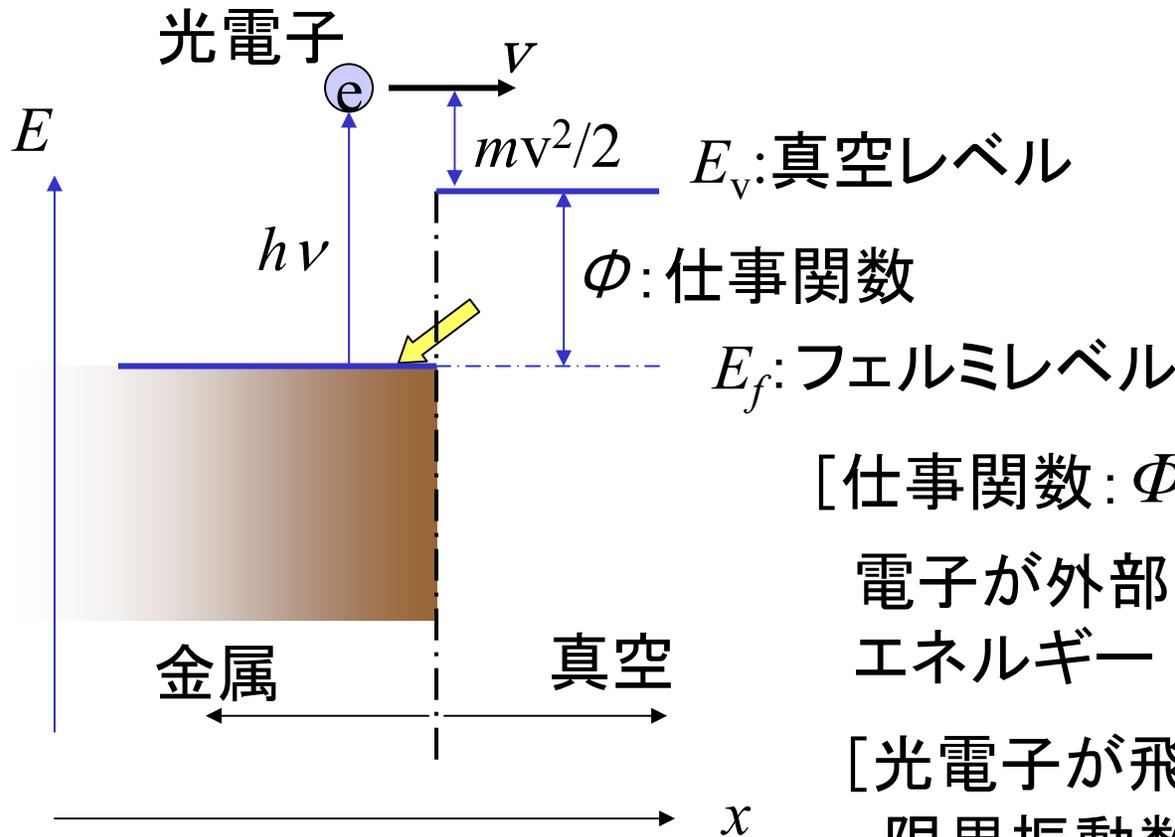
Einsteinの式:  $E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = chk$

$h, c$  の値を代入して,

$$E \text{ (eV)} = \frac{1,240}{\lambda \text{ (nm)}} = \frac{k \text{ (cm}^{-1}\text{)}}{8,060}$$

# 外部量子効果

(external photon effect, photoemission effect)



[光電子速度]

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - \Phi$$

[仕事関数:  $\Phi$ ]

電子が外部に出る必要最小限のエネルギー

[光電子が飛び出す限界 ( $v=0$ )]

限界振動数:  $\nu_0$

限界波長:  $\lambda_0$

$$\lambda_0(\text{nm}) = \frac{1,240}{\Phi(\text{eV})}$$

金属光電面

$$\Phi = 2 \sim 4 (\text{eV}) \rightarrow \lambda_0 = 300 \sim 600 (\text{nm})$$

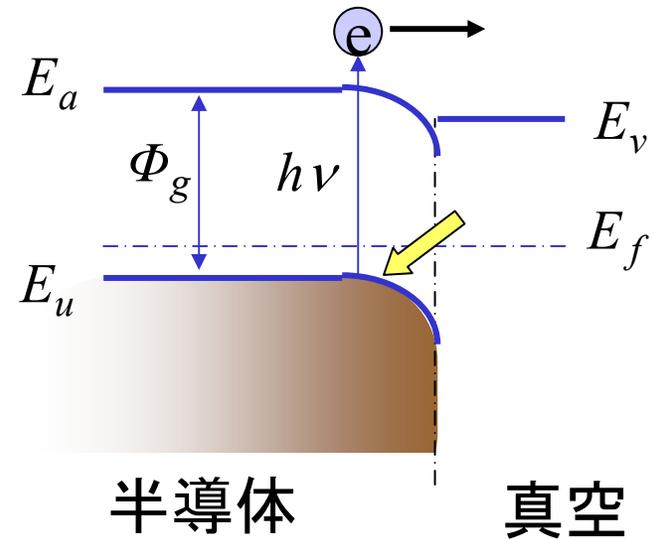
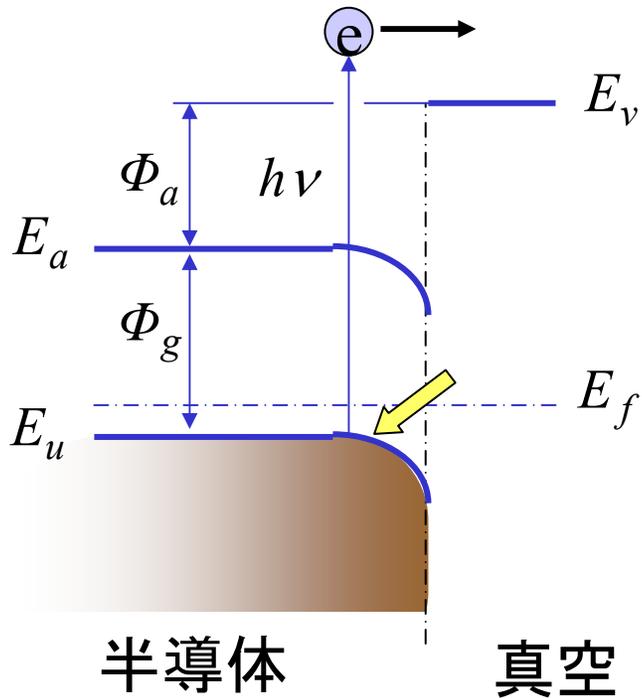
# 半導体

$E_u$  : 価電子帯上端レベル

$E_a$  : 伝導帯底レベル

$\Phi_g = E_a - E_u$  : バンドギャップ

$\Phi_a = E_v - E_a$  : 電子親和力



半導体光電面 (親和力が正)

$$\Phi = E_v - E_u = \Phi_g + \Phi_a$$

紫外光のみ

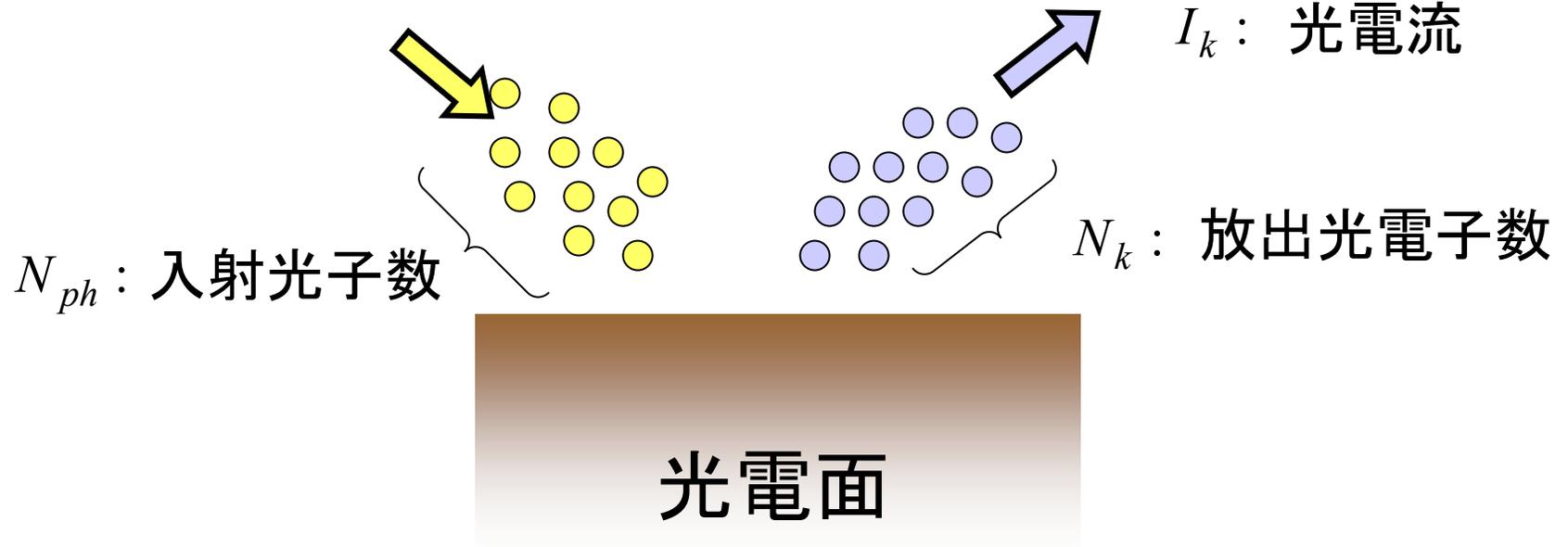
半導体光電面 (親和力が正)

$$\Phi = E_a - E_u = \Phi_g$$

低仕事関数のアルカリ金属 (Csなど) を表面に吸着

# 光電変換感度(量子効率, 放射感度)

$P_0$ : 入射光エネルギー



[量子効率:  $\eta$ ]

$$\eta = \frac{N_k}{N_{ph}} \times 100 (\%)$$

[放射感度:  $S_k$ ]

$$S_k = \frac{I_k}{P_0} = \frac{N_k \cdot e}{N_{ph} \cdot h\nu} = \frac{\lambda\mu}{1,240} (\text{A/W})$$

## 雑音＝熱電子放射

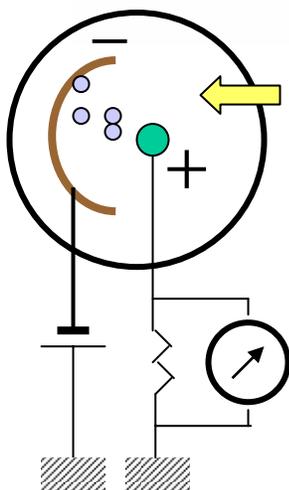
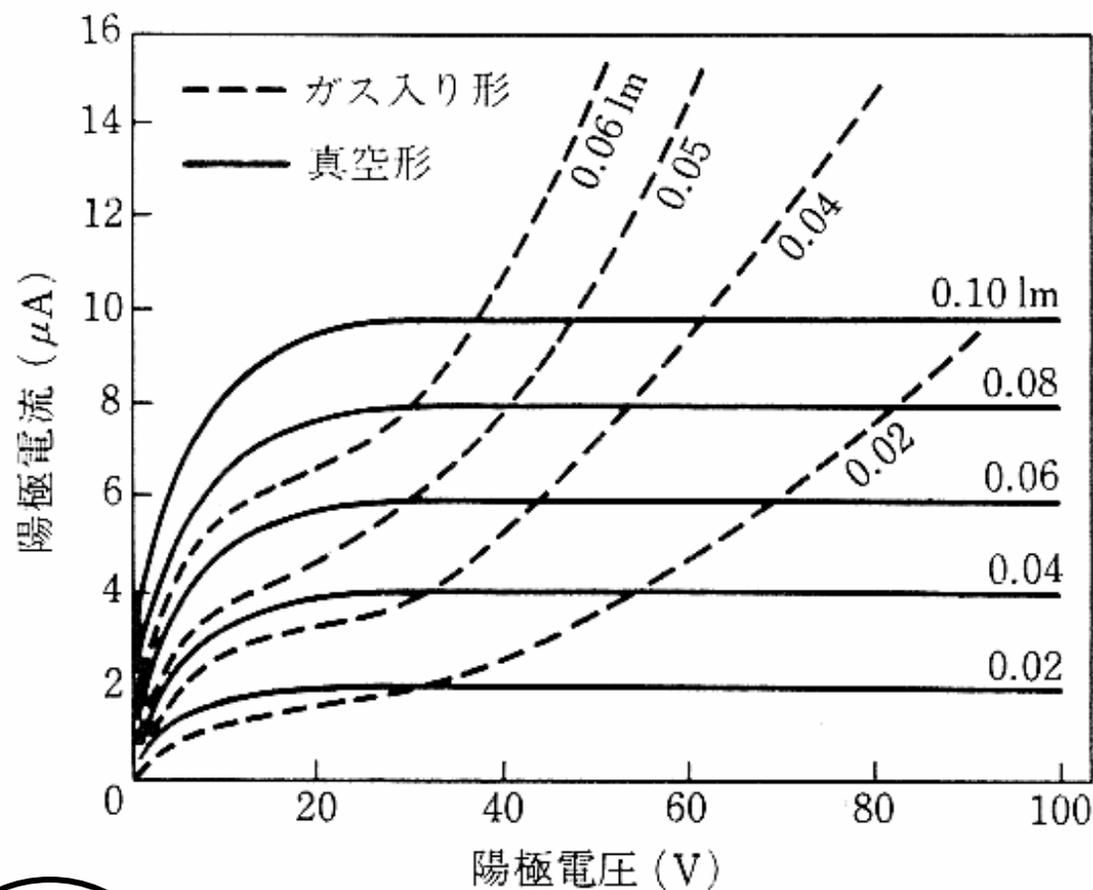
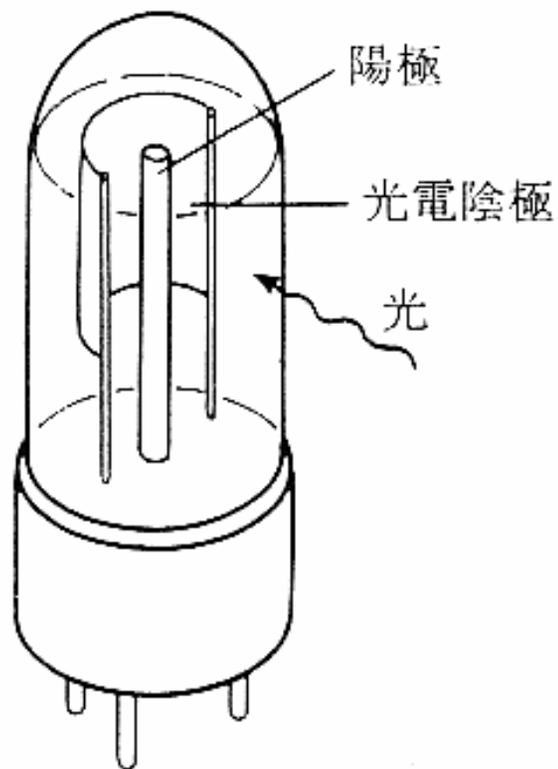
暗電流  $I_n = AT^2 e^{-\Phi/kT}$ ,  $A = 120 \text{ (Acm}^{-2}\text{K}^{-2}\text{)}$

## [外部量子効果を利用した光センサ]

☆ 光電管, 光電子増倍管

{ 速い応答時間 → 高速測光  
紫外～可視 の精密測定

# 光電管 (phototube, photoelectric tube)



## [真空型光電管]

出力電流＝一定値(飽和電圧以上)

$$I = \alpha L \quad L: \text{入射光量}, \quad I: \text{飽和電流}$$

優れた応答性

光子から光電子への変換時間  $< 10^{-12}$  秒

↳ 律速過程＝光電子の陰極から陽極までの走行時間

電極間走行時間  $\tau = 3.37 \times 10^{-8} \frac{d}{\sqrt{V}} \text{ (sec)}$

$d$ : 平行平板状電極間距離,  $V$ : 印可電圧

$$d = 2.5 \text{ cm}, \quad V = 100 \text{ V} \quad \rightarrow \quad \tau = 10^{-8} \text{ sec}$$

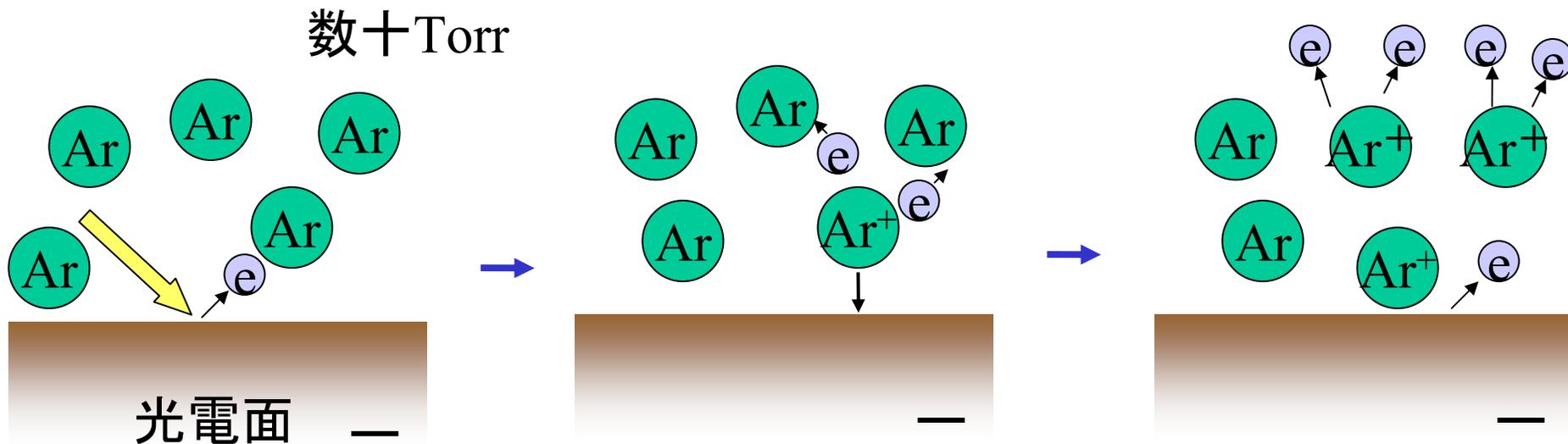
# [ガス封入形光電管]

管内増幅=5~50倍の増倍

$$I = \alpha L^n$$

高印可電圧

数十Torr

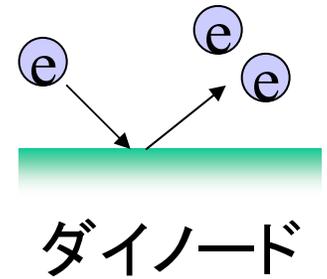
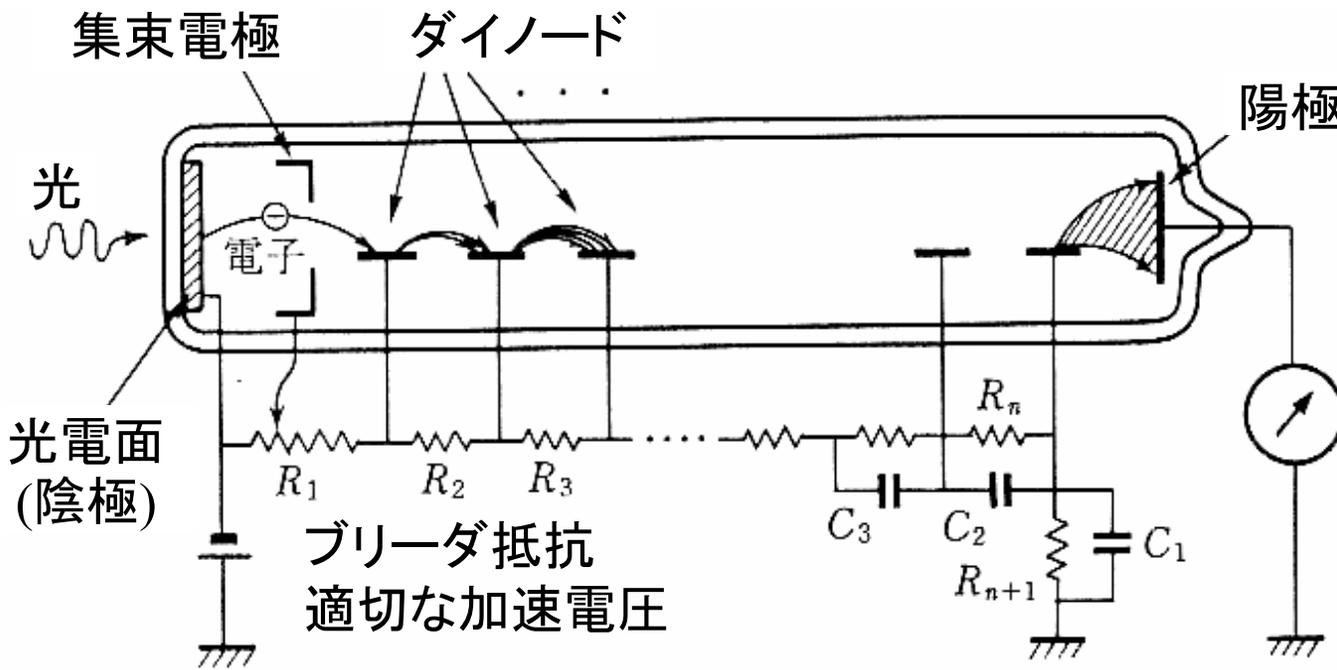


# 光電子増倍管 (photomultiplier)

## 微弱光測定

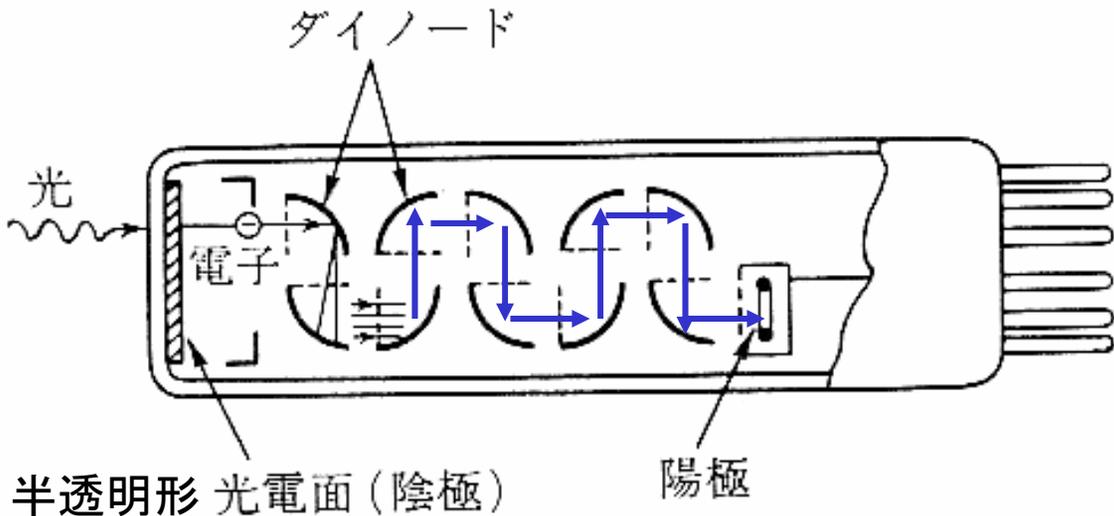
↳ × 外部回路による増幅 ∴ 低い時間応答性, ショット雑音

↳ 管内増幅 = 2次電子放出効果の利用  
(高利得, 低雑音, 高速, 広帯域)



デカップリングコンデンサ  
瞬時電位変化への対応

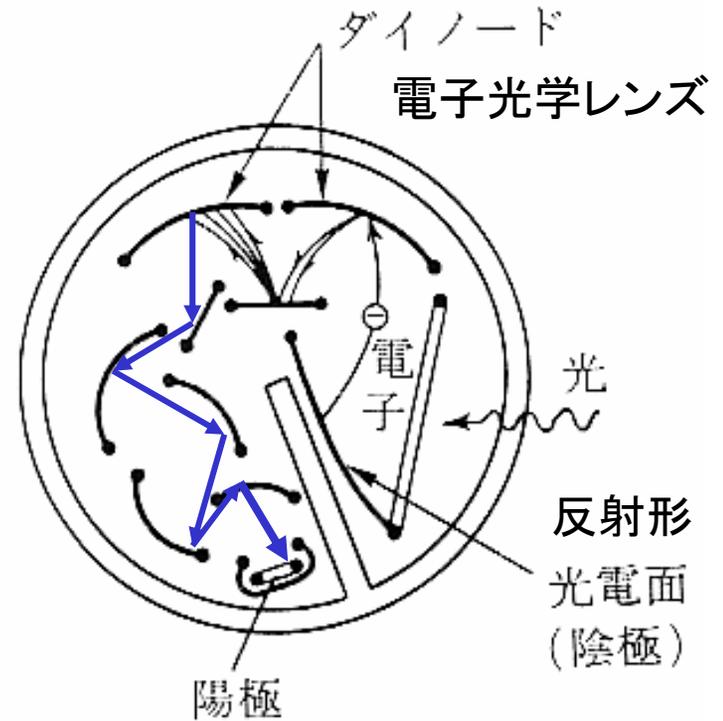
# [代表的な光電子増倍管の形式]



## ヘッドオンボックス形

電極配置簡明

微妙な調節を必要としない

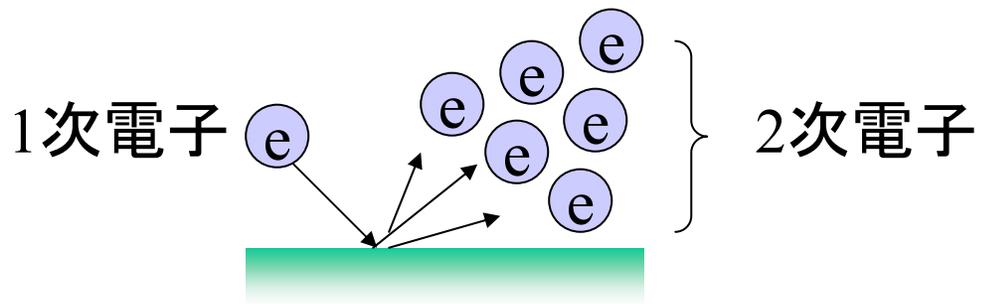


## 側窓フォーカス形

効率良く増倍

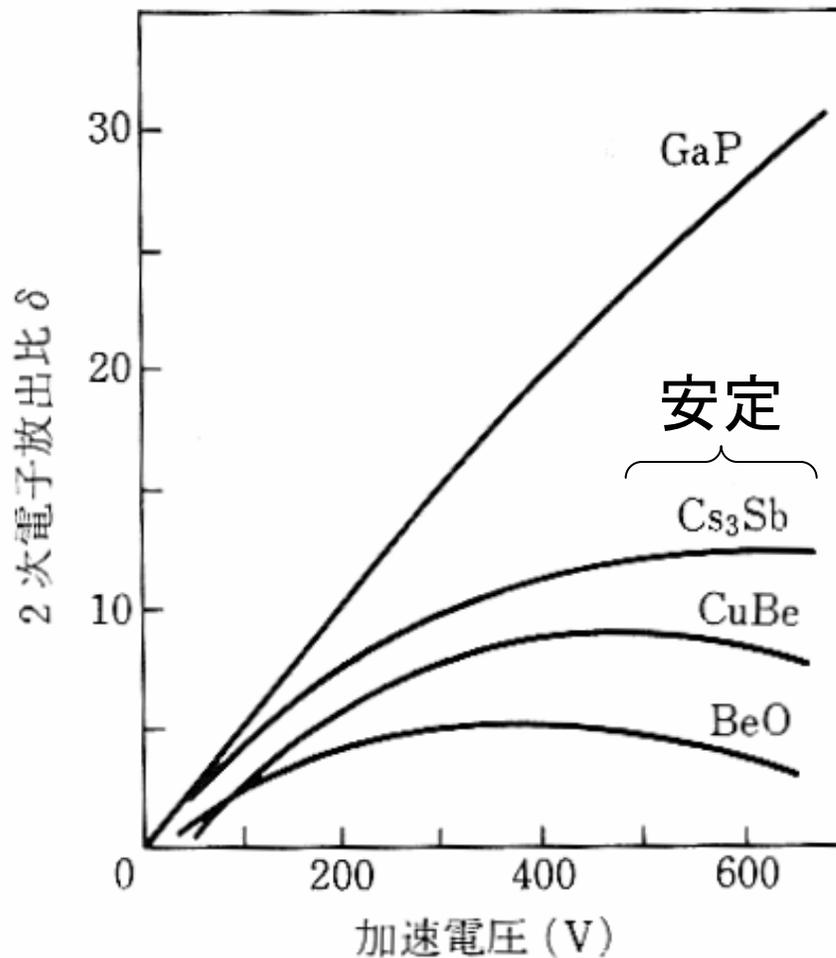
時間応答性高い

# [2次電子放出効果]



物質	$\delta_{\max}$
Fe	1.32
Ni	1.27
Cu	1.35
Au	1.47
BaO	5
Cu-BeO	6.2
Ag-MgO-Cs	9.2
Cs-Sb	10
GaP-Cs	20 ~ 40

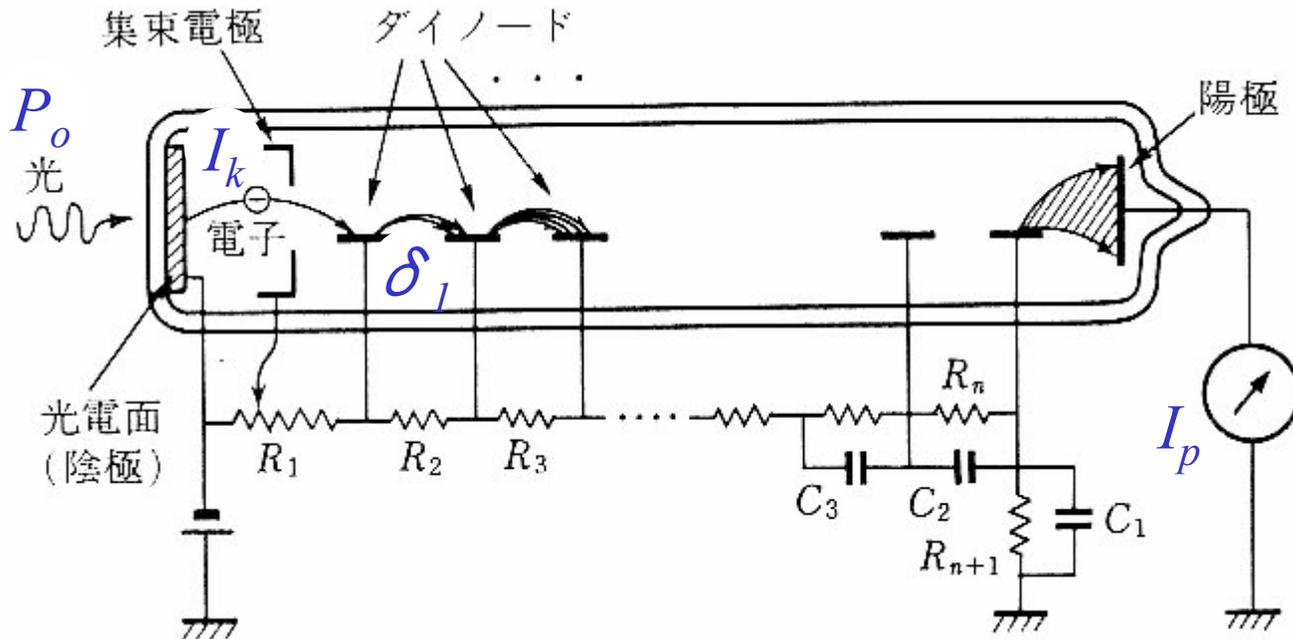
暗電流少ない



# [陽極放射感度, 電流増倍率]

$P_o$ : 光電面への入射光パワー,  $I_k$ : 光電面からの光電流,  
 $\delta_i$ : 各段の2次電子放出比

$\left\{ \begin{array}{l} \text{電流増倍率} \quad \mu = I_p / I_k = S_p / S_k = \delta_1 \delta_2 \cdots \delta_n \\ \text{陽極電流} \quad I_p = \mu I_k = (\delta_1 \delta_2 \cdots \delta_n) \cdot I_k, \quad I_k = P_o S_k \\ \text{陽極放射感度} \quad S_p = I_p / P_o = \mu S_k \end{array} \right.$



$$\delta = 4, \text{ ダイノード10段} \longrightarrow \mu = 4^{10} = 10^6$$

☆ 低印可電圧

$$\delta = \alpha V^a$$

全印可電圧  $E_{tot}$ ,  $n$  段のダイノード

$$\mu = (\alpha V^a)^n = \frac{\alpha^n}{(n+1)^{an}} (E_{tot})^{an}$$

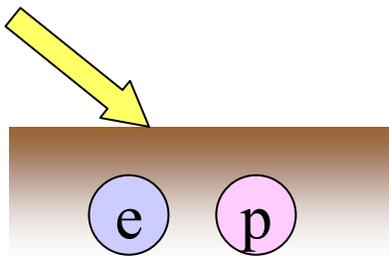
1段あたりの電圧  $V = E_{tot} / (n+1)$

感度 =  $10^{-5} \sim 10^{-16}$  lm

雑音極めて少なく, 高利得, 広帯域

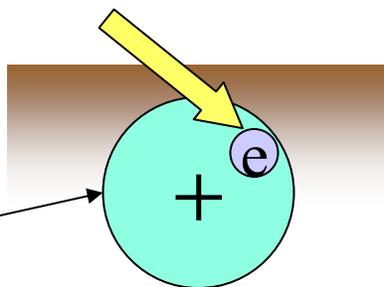
# 内部量子効果 (internal photon effect)

入射光子

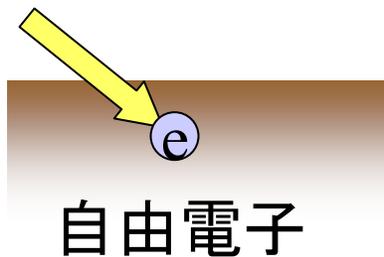


キャリア(電子, 正孔)の励起  
物質内にとどまる.

格子原子  
不純物原子



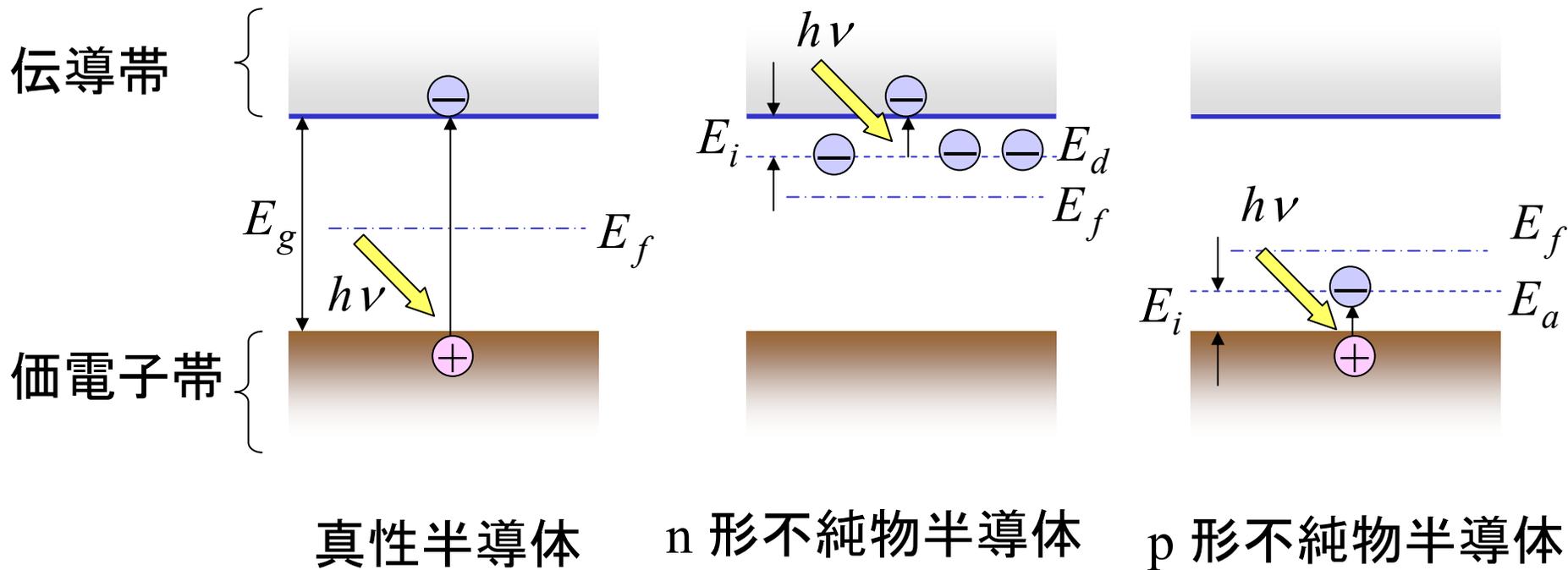
光伝導効果, 光起電効果  
光電磁効果



自由電子

ホトンドラッグ  
ホトエレクトロン

# 光伝導効果 (photon conductive effect)



$E_f$ : フェルミ準位,  $E_g$ : エネルギーギャップ,  $E_d$ : ドナー準位  
 $E_i$ : 不純物イオン化ポテンシャル,  $E_a$ : アクセプタ準位

## 限界波長 $\lambda_0$

$$\lambda_0(\text{nm}) = 1,240/E_g(\text{eV}) \quad : \text{真性半導体}$$

$$\lambda_0(\text{nm}) = 1,240/E_i(\text{eV}) \quad : \text{不純物半導体}$$

### [真性半導体]

$$\text{Si: } E_g = 1.12 \text{ eV} \Rightarrow \lambda_0 = 1.1 \mu\text{m}$$

$$\text{Ge: } E_g = 0.67 \text{ eV} \Rightarrow \lambda_0 = 1.8 \mu\text{m}$$

赤外域



光電子放出効果では不可能

### [不純物半導体]

GeにBをドーブ:

$$E_i = 0.0104 \text{ eV} \Rightarrow \lambda_0 = 120 \mu\text{m} \quad \text{遠赤外域}$$

$$T \geq E_i/k \Rightarrow \text{熱励起による電子} = \text{雑音}$$



液体窒素, 液体ヘリウムによる冷却

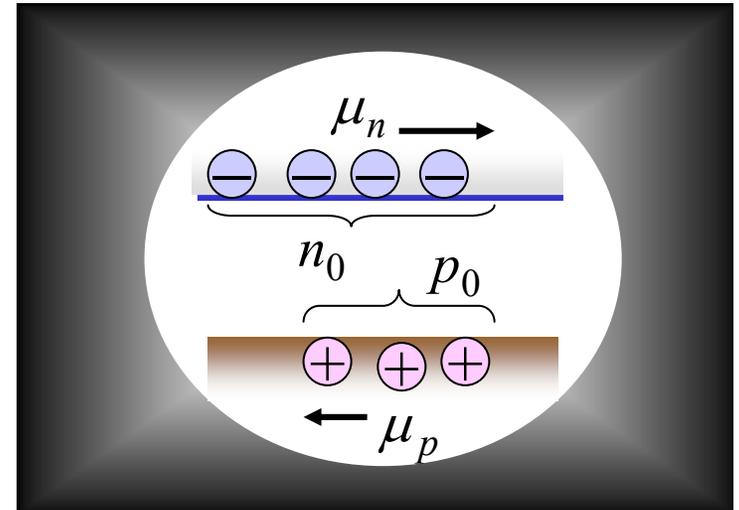
[光を照射しないとき]

導電率  $\sigma_0$

$$\sigma_0 = e(n_0\mu_n + p_0\mu_p)$$

$n_0, \mu_n$  : 電子の濃度, 移動度

$p_0, \mu_p$  : 正孔の濃度, 移動度



[光を照射したとき]

導電率の変化  $\Delta\sigma$

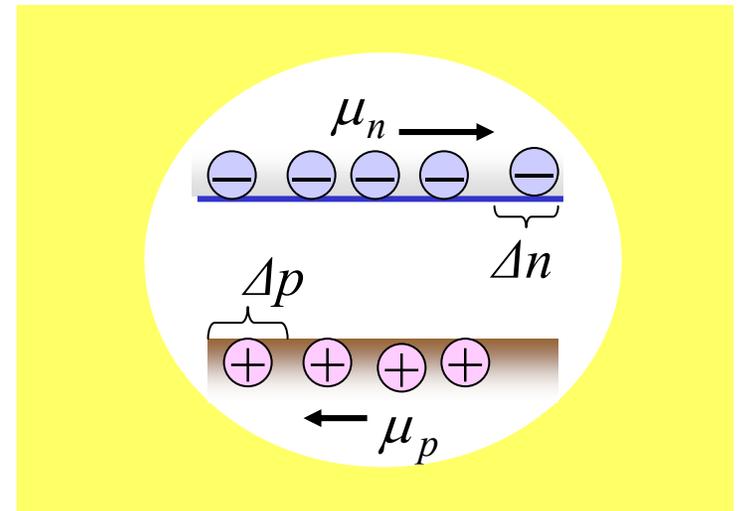
$$\Delta\sigma = e(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p)$$

$\Delta n, \Delta p$  : 電子, 正孔の濃度変化

$$\Delta n = f\tau_n, \quad \Delta p = f\tau_p$$

$\tau_n, \tau_p$  : 電子, 正孔の寿命

$f$  : 単位体積, 毎秒の電子-正孔対の発生個数



# [電流の増加分]

$$\Delta I = \underbrace{\Delta \sigma \frac{V}{L}}_{\text{電流密度}} \cdot \underbrace{S}_{\text{断面積}} = e f L S (\tau_n \mu_n + \tau_p \mu_p) \frac{V}{L^2} = e F \underbrace{\left( \frac{\tau_n}{t_n} + \frac{\tau_p}{t_p} \right)}_{\text{G: 光伝導内部利得}} = e F G$$

電流密度

$F$ : 毎秒発生する電子  
- 正孔対の総数

$G$ : 光伝導内部利得

$L$ : 電極間距離

$S$ : 断面積

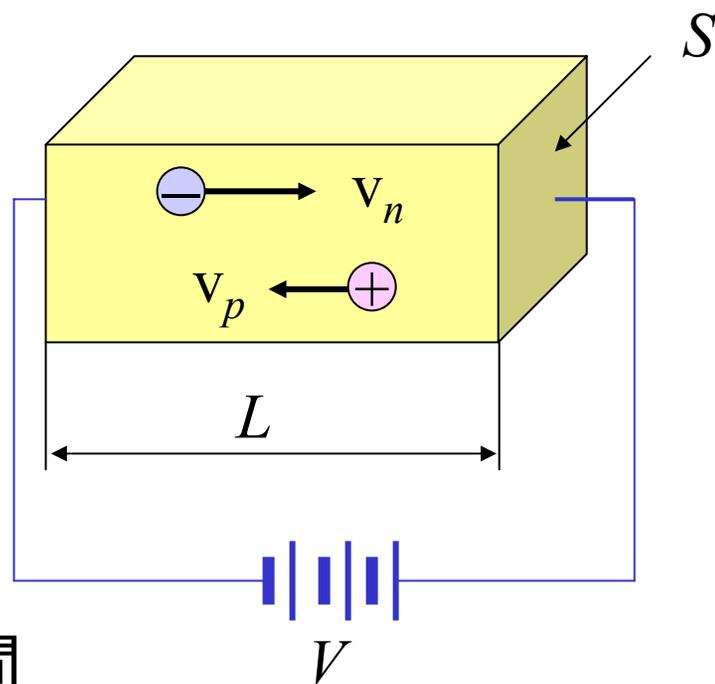
$V$ : 印可電圧

$v_n, v_p$ : 電子, 正孔の速度

$$v_n = \mu_n \frac{V}{L}, \quad v_p = \mu_p \frac{V}{L}$$

$t_n, t_p$ : 電子, 正孔の電極間走行時間

$$t_n = \frac{L}{v_n} = \frac{L^2}{\mu_n V}, \quad t_p = \frac{L^2}{\mu_p V}$$





# [光伝導形センサセル]

光伝導部:

光の無照射 ⇒ 絶縁

光照射 ⇒ 短絡

☆ 真性半導体 (CdS, CdSe) の薄膜

光の無照射 ⇒  $1\text{M}\Omega \sim \text{数}10\text{M}\Omega$

光 ( $10\text{ lx}$ ) 照射 ⇒  $\text{数k}\Omega \sim \text{数}10\text{k}\Omega$

入射光と抵抗値の間に比例性がない

⇒ 精密な定量測光には不向き

☆ CdSセンサ = 内部利得 G 大

⇒ 大電力容量 ( $\text{数}10\text{mW} \sim \text{数}100\text{mW}$ ) ⇒ 制御用センサ

ただし, 長いキャリア寿命 ⇒ 長い応答時間 ( $10\text{msec} \sim 1\text{sec}$ )

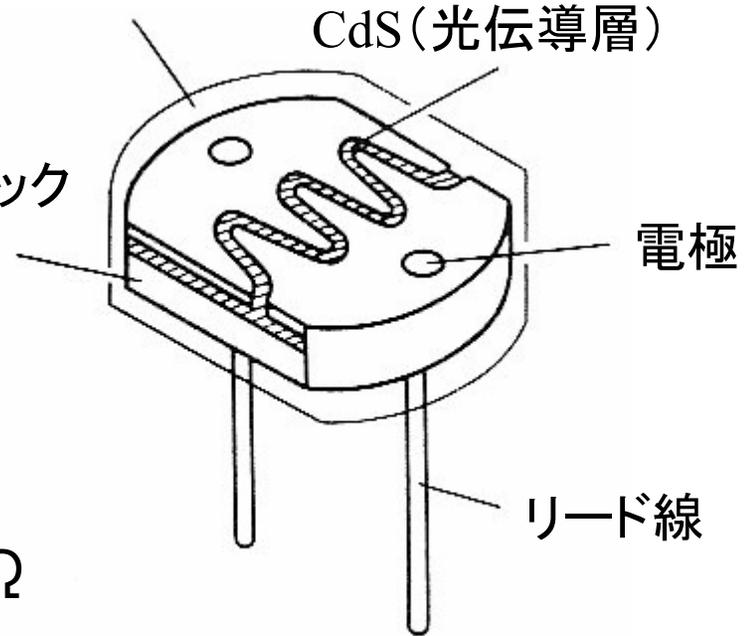
樹脂コーティング

セラミック  
基板

CdS (光伝導層)

電極

リード線



# [赤外域光伝導形センサ]

☆ PbS

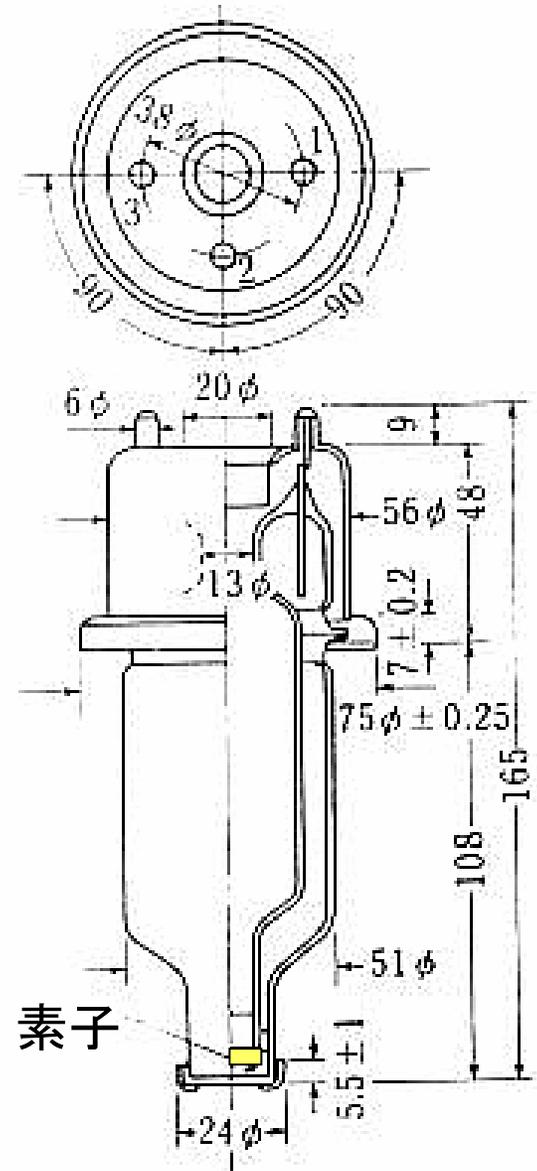
波長	温度
2.5~3 $\mu\text{m}$	常温
3.3 $\mu\text{m}$	195K (ドライアイス温度)
3.7 $\mu\text{m}$	77K (液体窒素温度)

☆ さらに長波長

真性半導体 InSb 7  $\mu\text{m}$   
混晶形  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  10~20  $\mu\text{m}$

液体窒素で冷却

不純物半導体 GeにCu, Znをドーブ  
2~40  $\mu\text{m}$ ,  
液体ヘリウム (4.2K) で冷却

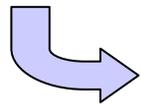


液体窒素で素子を冷却する赤外センサ

## [光伝導形センサの用途]

### ☆ CdS

大きな受光面 ⇒ 大出力電流 ⇒ 電磁リレー直接作動



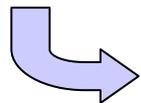
街路灯の自動点滅器, 火災報知器

応答 = 10kHz

### ☆ 冷却型赤外線センサ

速い応答 ( $0.01 \mu$ ) ⇒ 測温点を高速走査

⇒ 温度分布の時間的变化

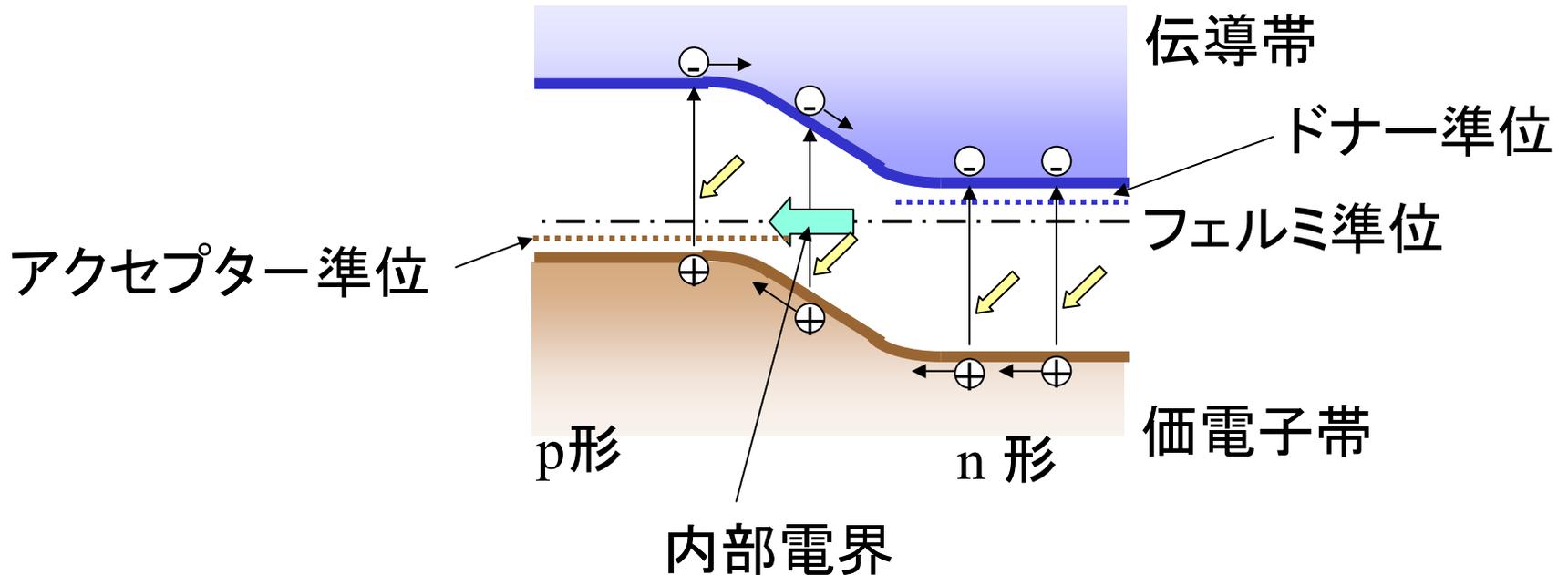


サーモグラフ(医用機器): 外から精密な人体の温度分布

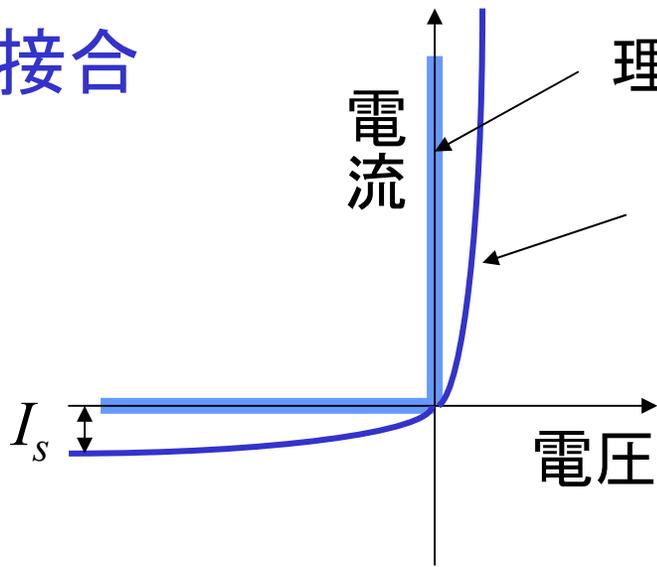
# [光起電効果 (photovoltaic effect)]

$h\nu > E_g \rightarrow$  電子-正孔対の生成  $\rightarrow$  電子, 正孔は分離,  
逆方向に移動  
内部電界  $\rightarrow$   
= 起電力

内部電界: pn接合, ショットキー障壁



# pn 接合



理想的整流曲線

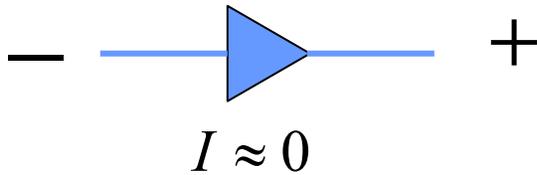
$$I = I_s \left( e^{eV/kT} - 1 \right) \approx I_s e^{eV/kT}$$

$I_s$ : 逆バイアス時の飽和暗電流

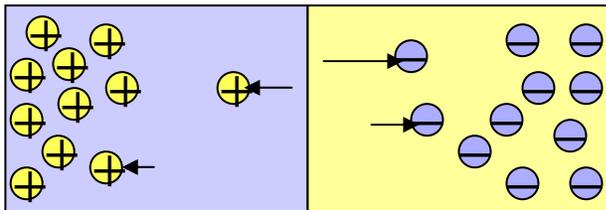
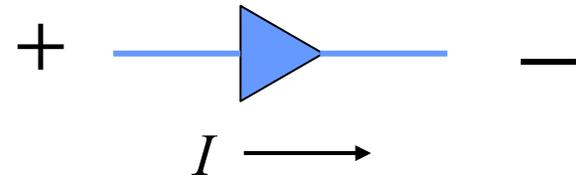
$k$ : ボルツマン定数

$T$ : 絶対温度

逆バイアス

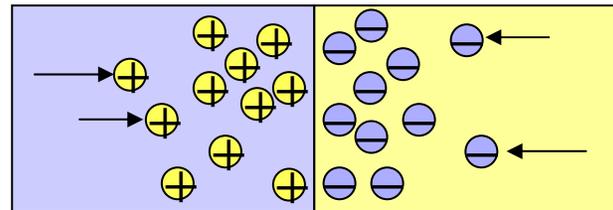


順バイアス



p形

n形



p形

n形

# 短絡光電流

$$I_L = \frac{\eta P e \lambda}{hc}$$

光子パワー  $P$ , 量子効率  $\eta$ ,  
波長  $\lambda$ , プランク定数  $h$

接合部を流れる全電流

$$I = I_s \left( e^{eV/kT} - 1 \right) - I_L$$

開放光起電力 ( $I = 0$ )

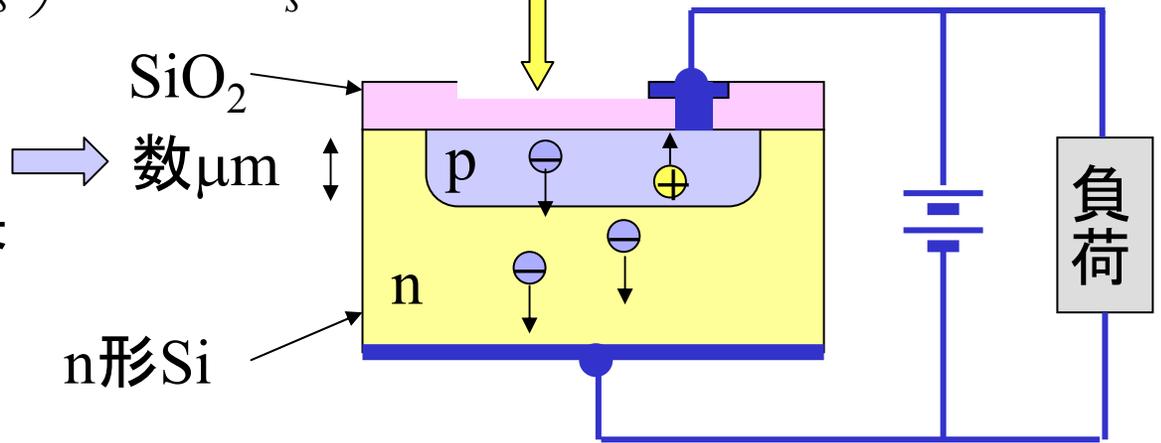
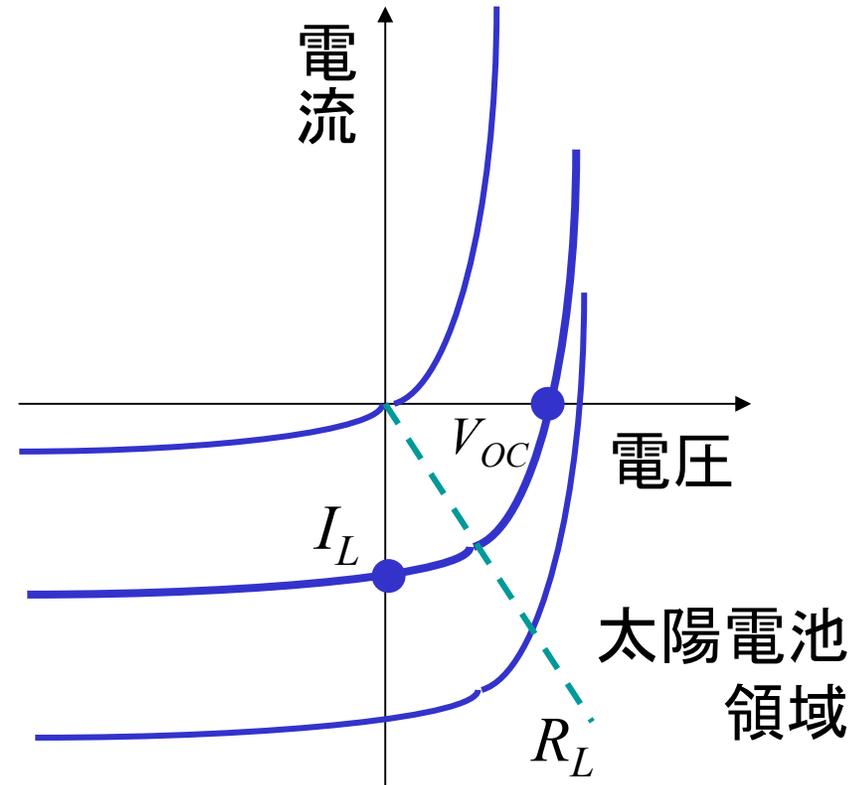
$$V_{OC} = \frac{kT}{e} \ln \left( 1 + \frac{I_L}{I_s} \right) \approx \frac{kT}{e} \ln \frac{I_L}{I_s}$$

拡散  
エピタキシャル成長



数 $\mu\text{m}$

n形Si



# ホットダイオードの等価回路

精密測定

リーク電流  $i_d, i_r \doteq 0$

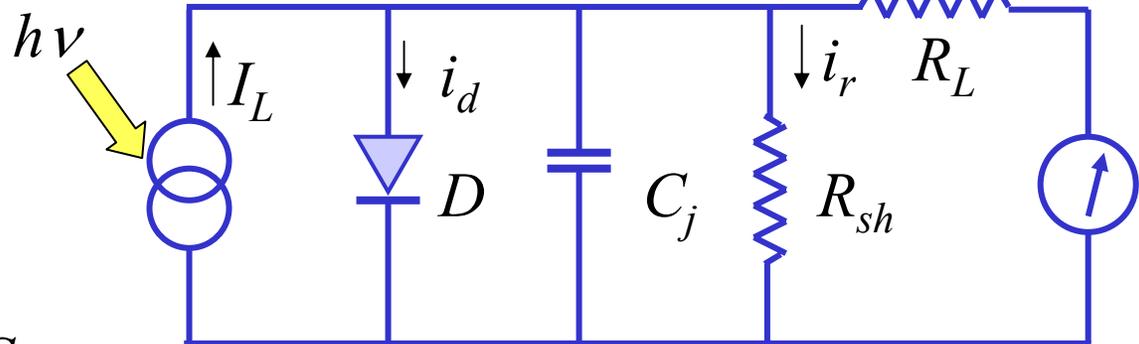
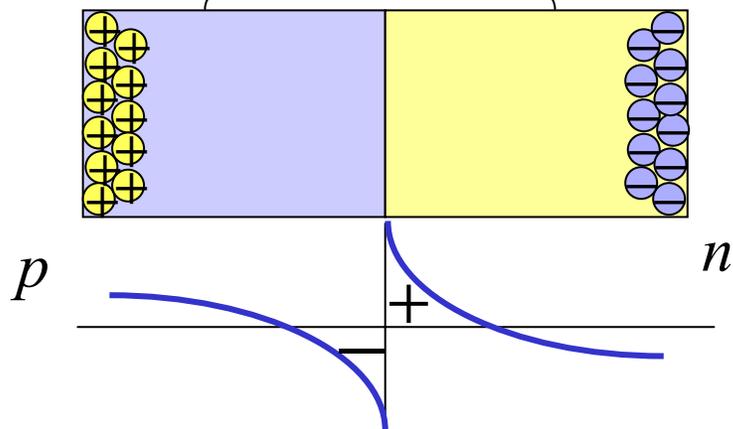
$$R_{sh} \gg R_L$$

応答の時定数  $\longleftarrow R_L C_j$

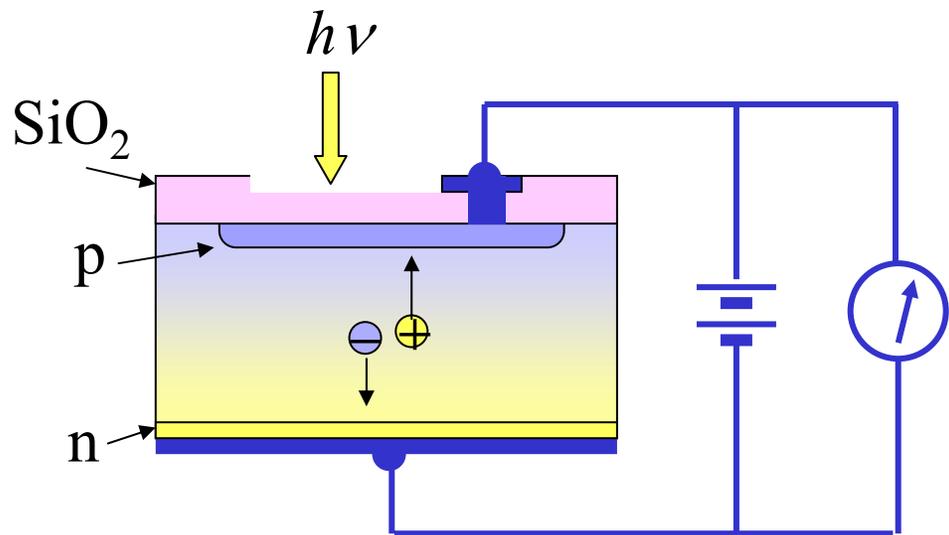
$$C_j = \frac{1.9 \times 10^2}{\sqrt{\rho(V_i + V_B)}}$$

$V_B$ : 逆バイアス  $- \rightarrow +$

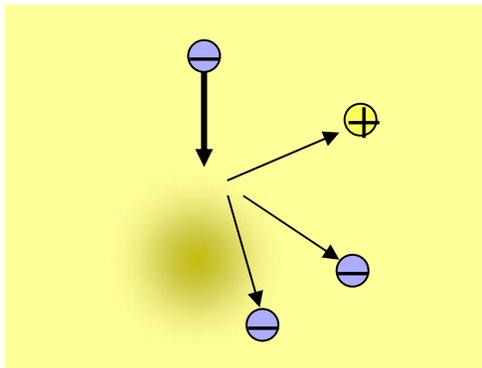
空乏層  $i$



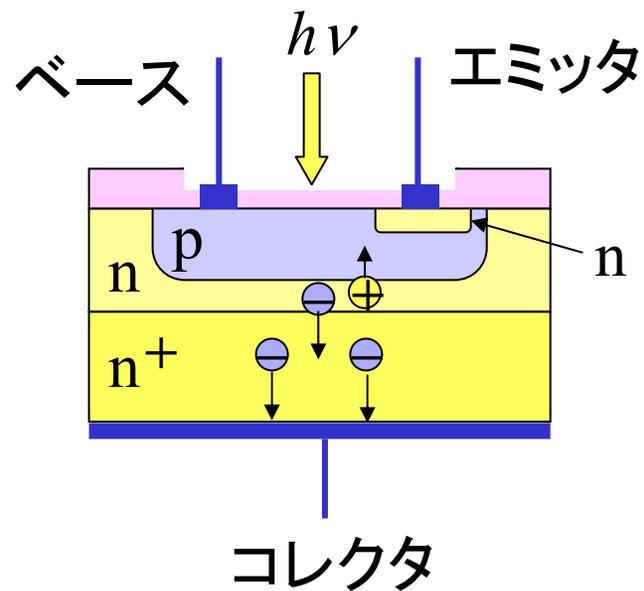
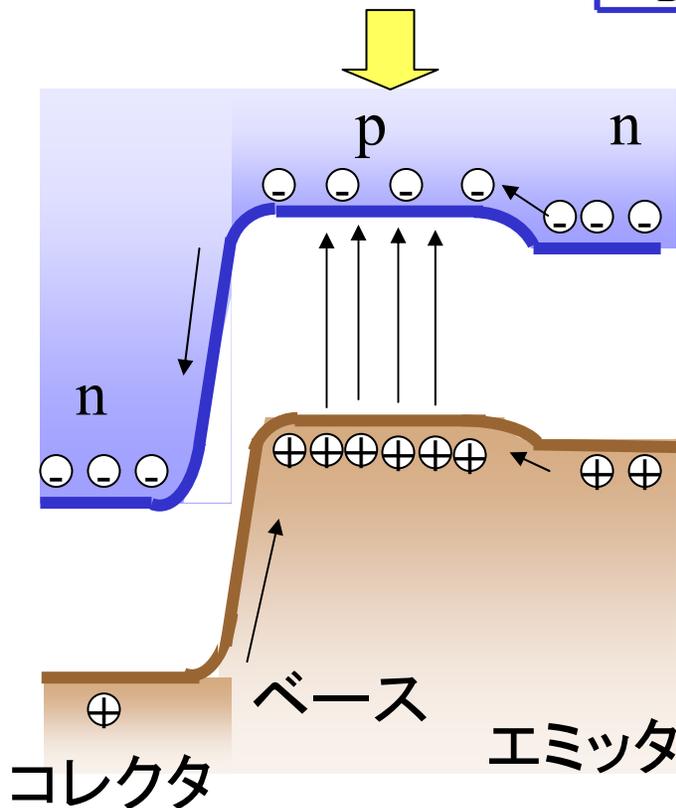
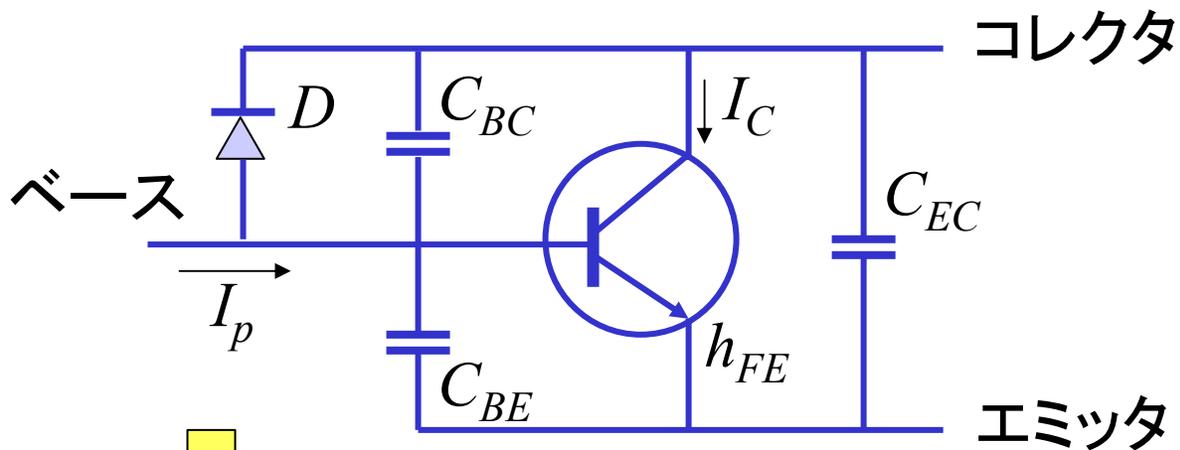
# pin ホットダイオード



# アバランシェ ホトダイオード (APD)



# ホトトランジスタ



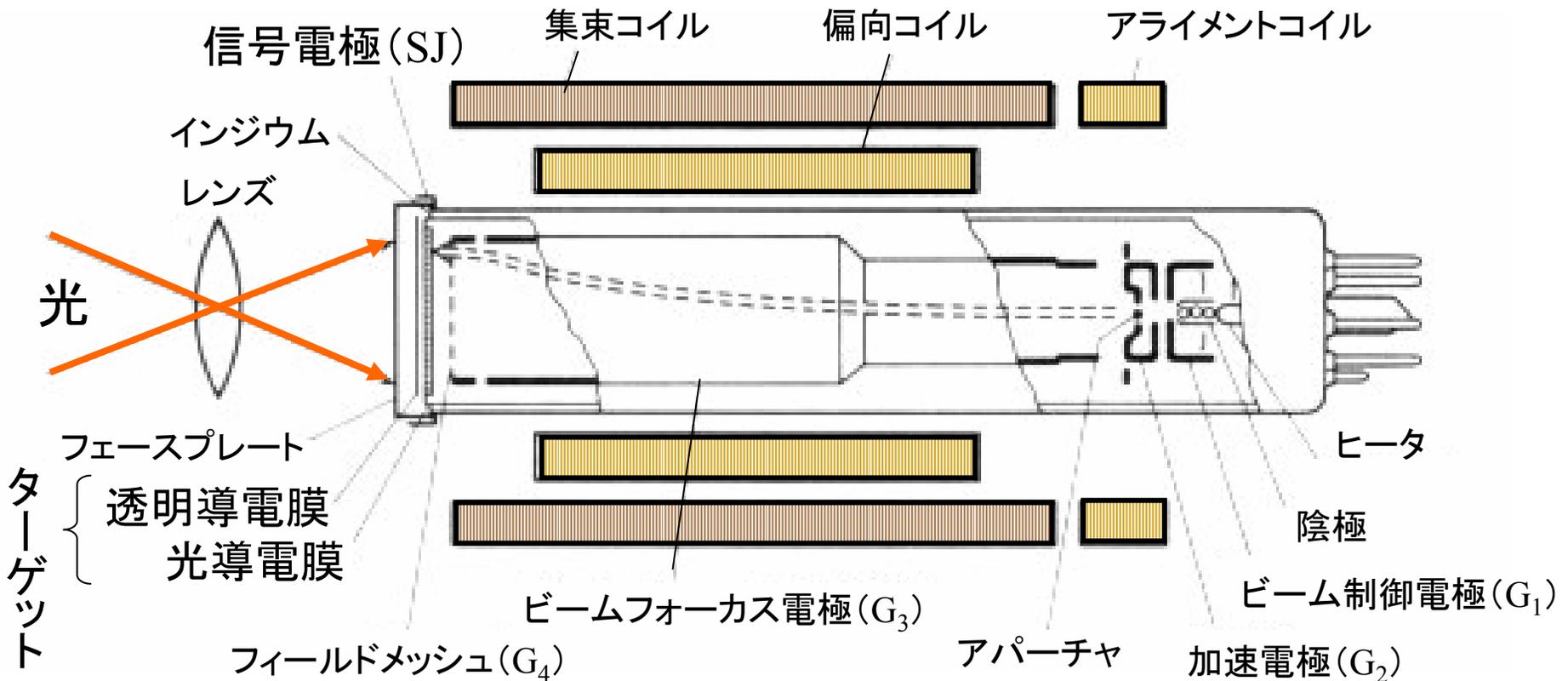
$$I_C = (1 + h_{FE}) I_P \approx h_{FE} I_P$$

# 撮像管

光電変換 { 光伝導効果 ———— ビジコン形  
光電子放出効果 ———— イメージ形

蓄積形(積分形): 感度高い ⇔ 非蓄積形(比例形): 少ない

## ビジコン



# 光導電形撮像管の動作原理

(当初)

走査電子ビーム  
= 光導体膜上に  
一様負電荷

光照射



R減少



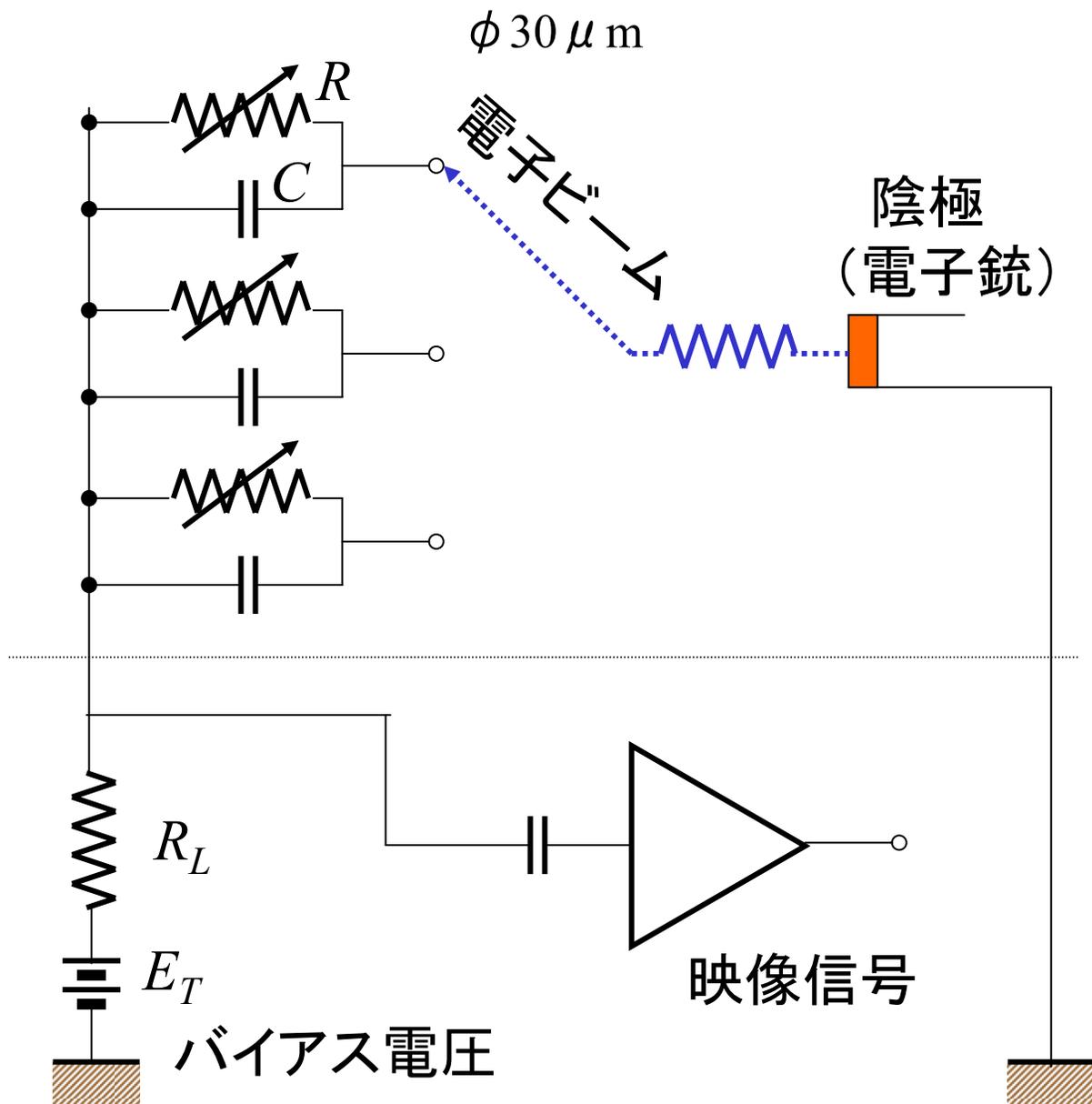
放電

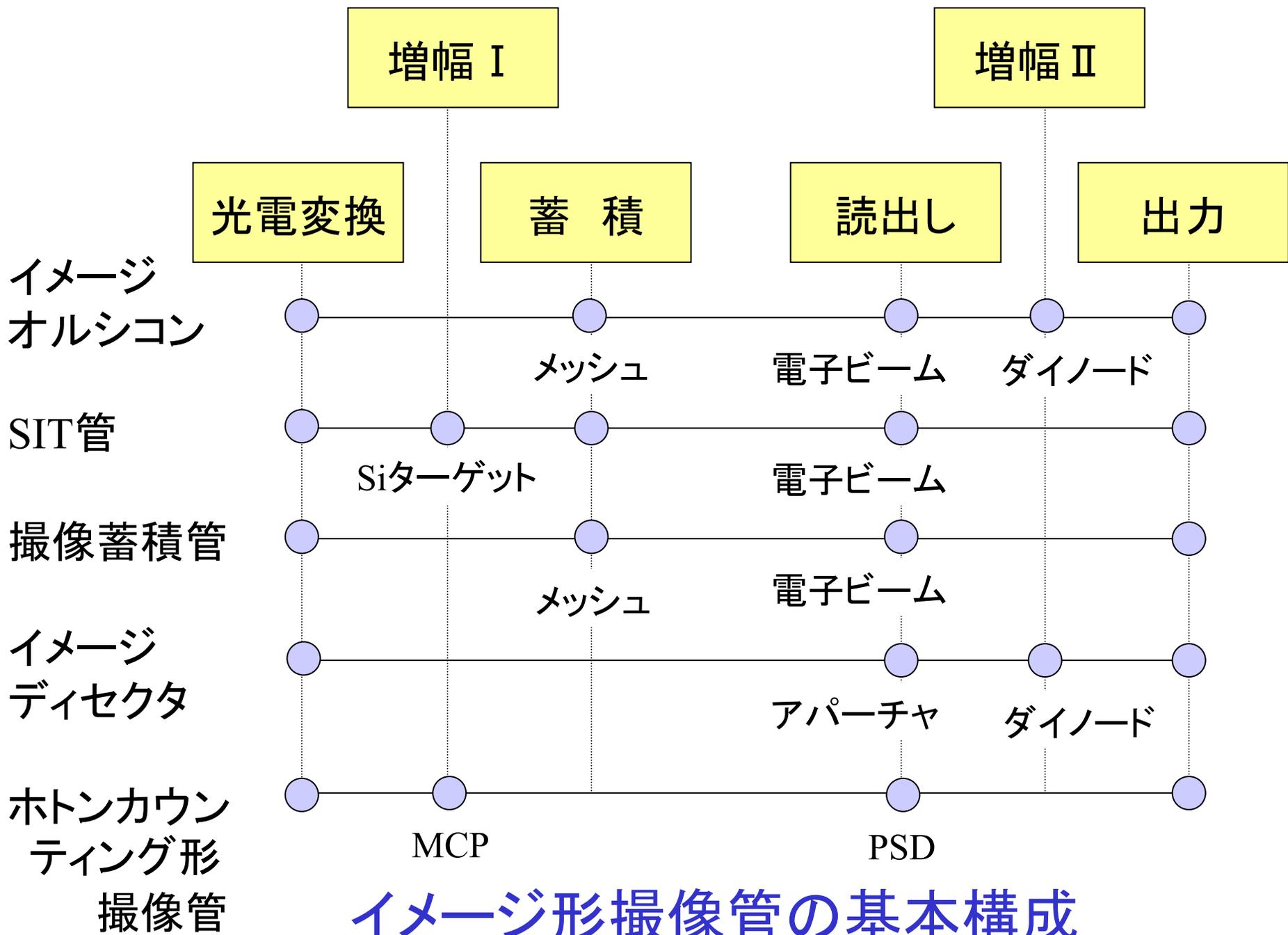


電子ビーム

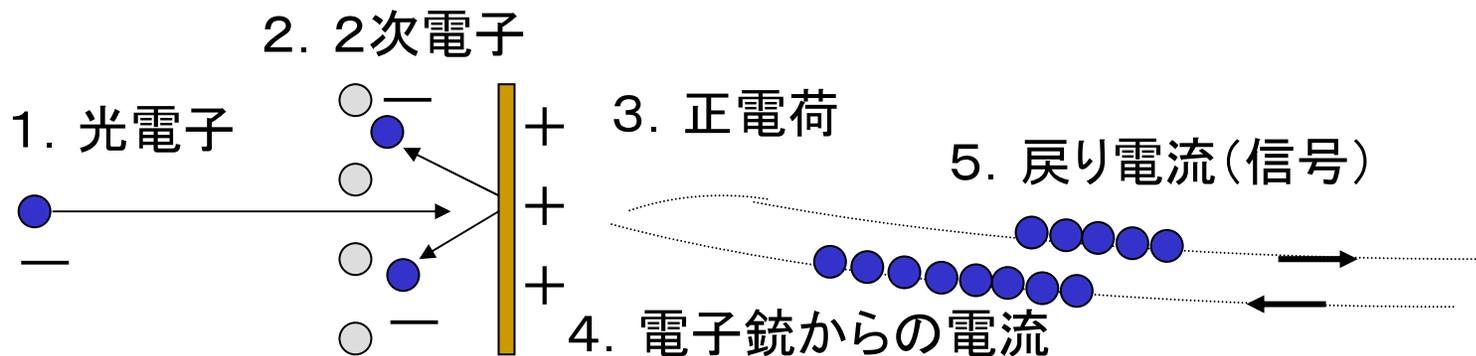
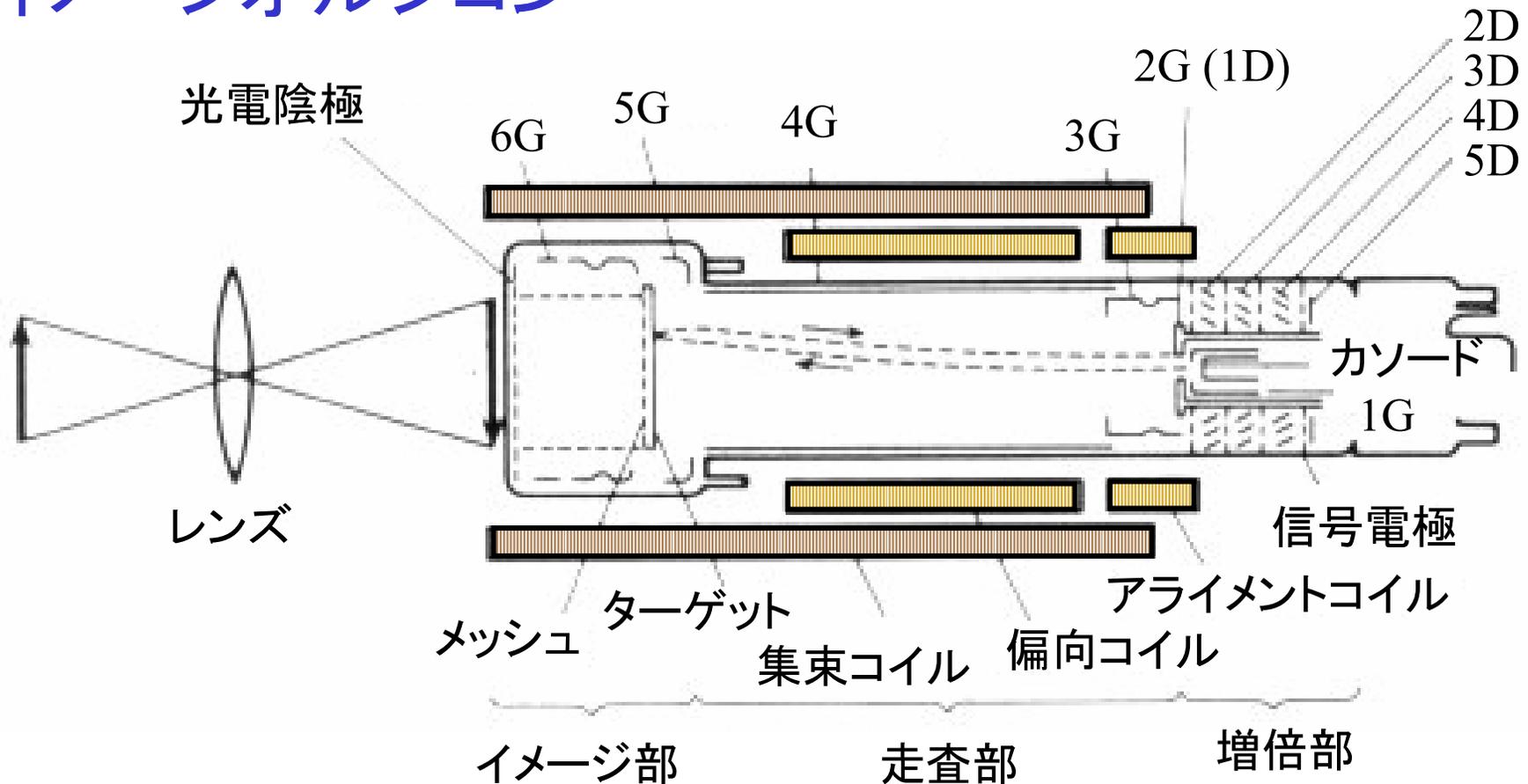


充電=映像信号





# イメージオルシコン



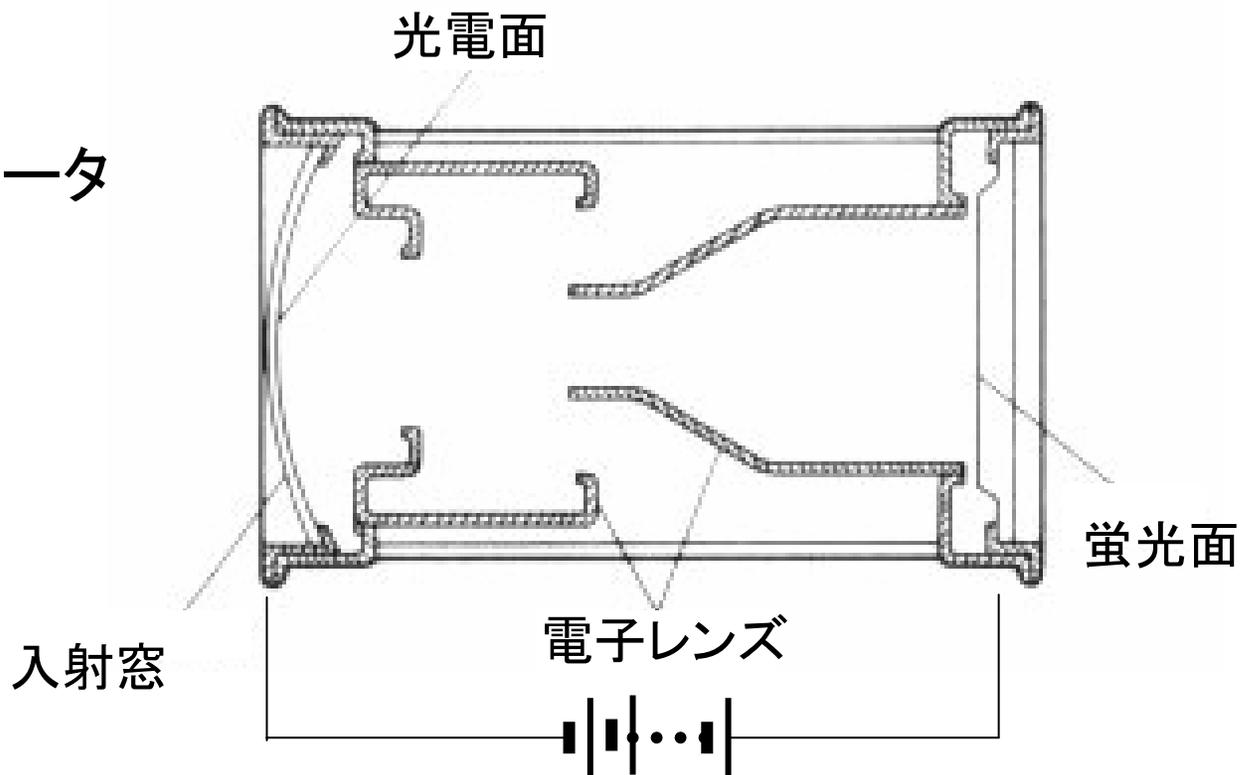
# イメージ管

イメージ管：不可視光線（紫外線，赤外線），非常に微弱光線の像を見る光電変換デバイス

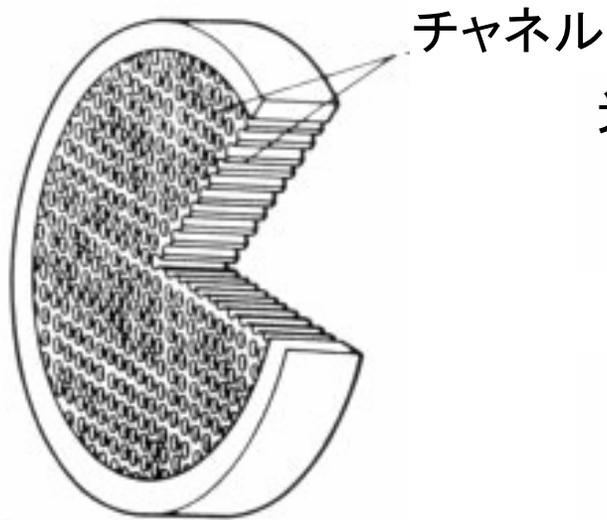
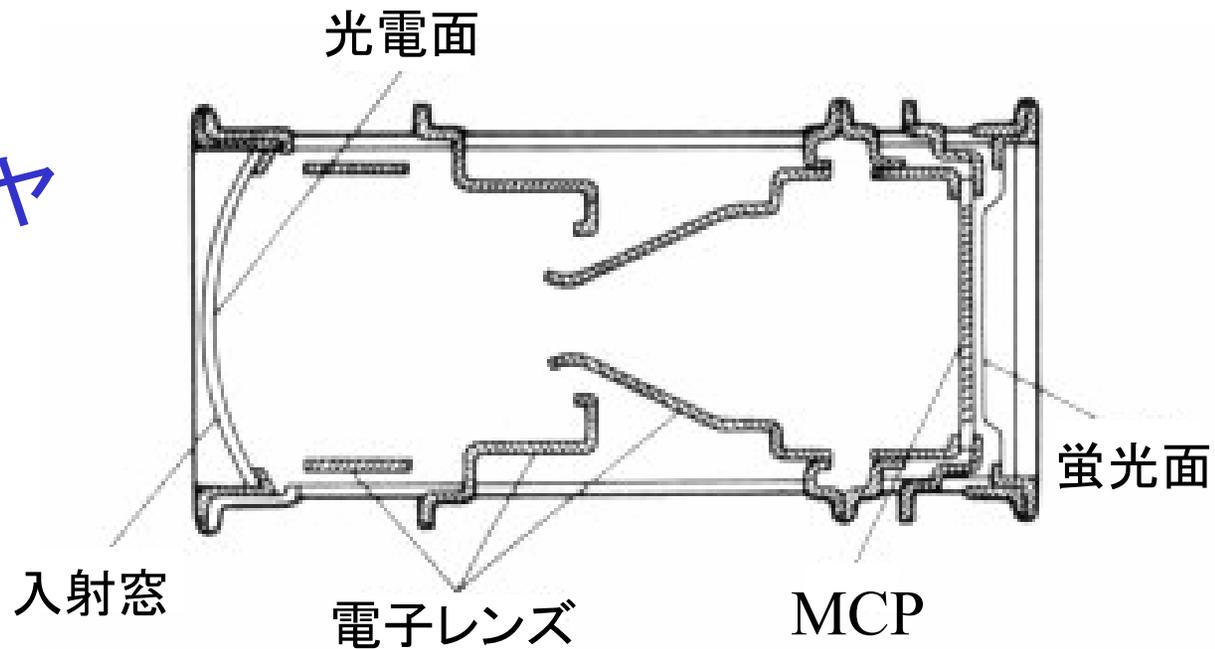
イメージコンバータ：不可視光像を明るい可視光像に変換

イメージインテンシファイヤ：微弱な可視光像を明るい可視光像に変換する像増倍管

イメージコンバータ



# イメージ インテンシファイヤ



MCP  
マイクロチャンネルプレート

