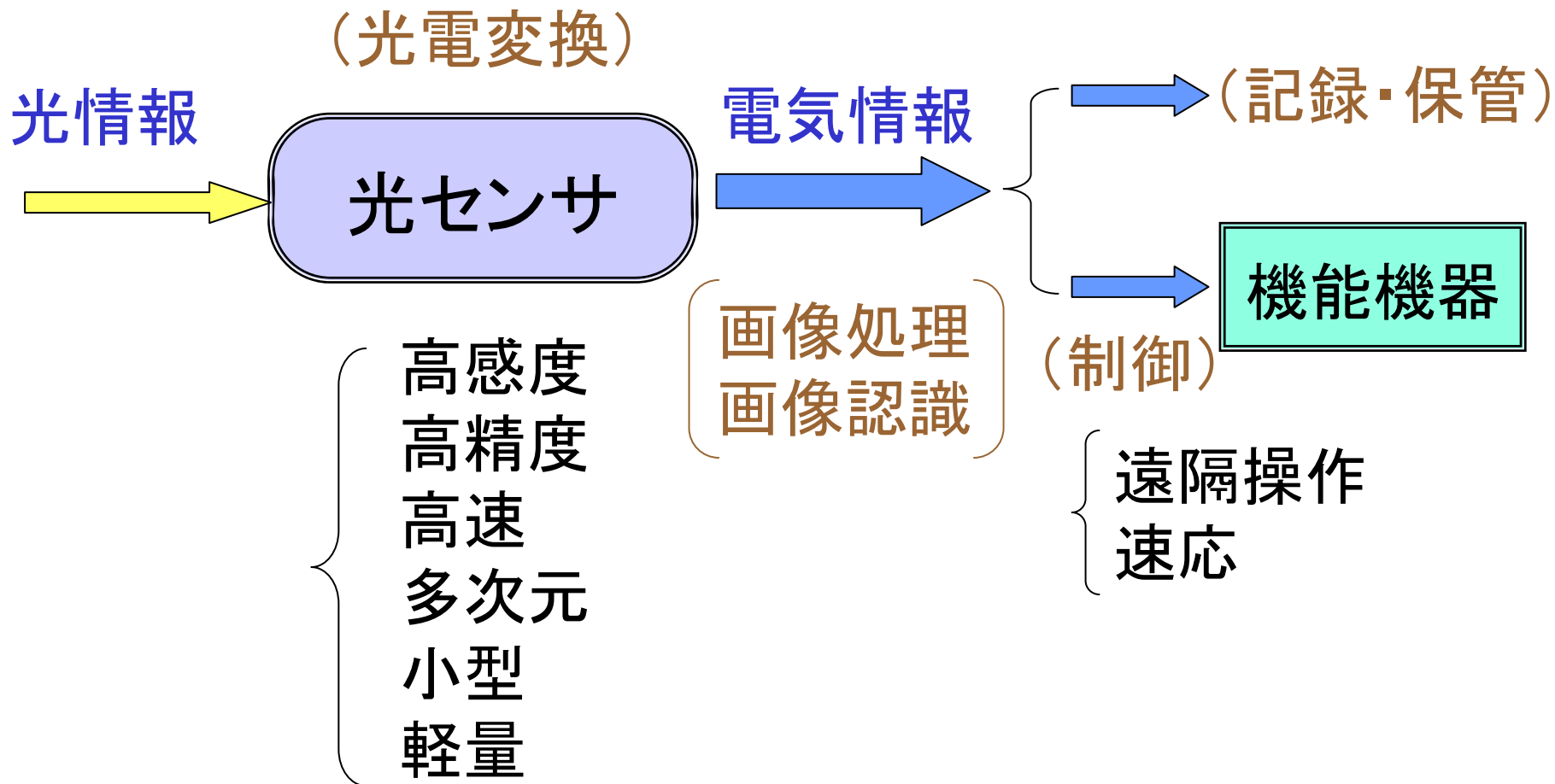
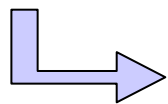


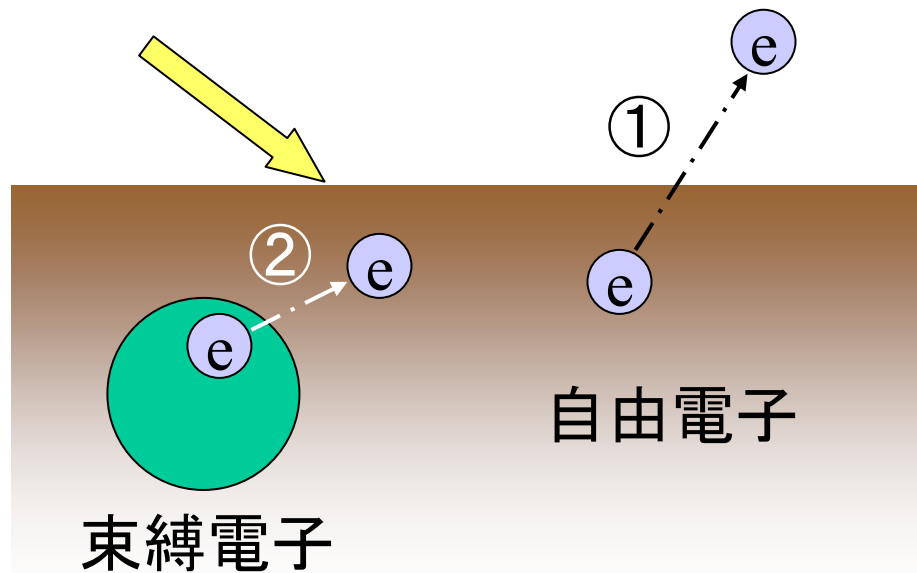
光センサ



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

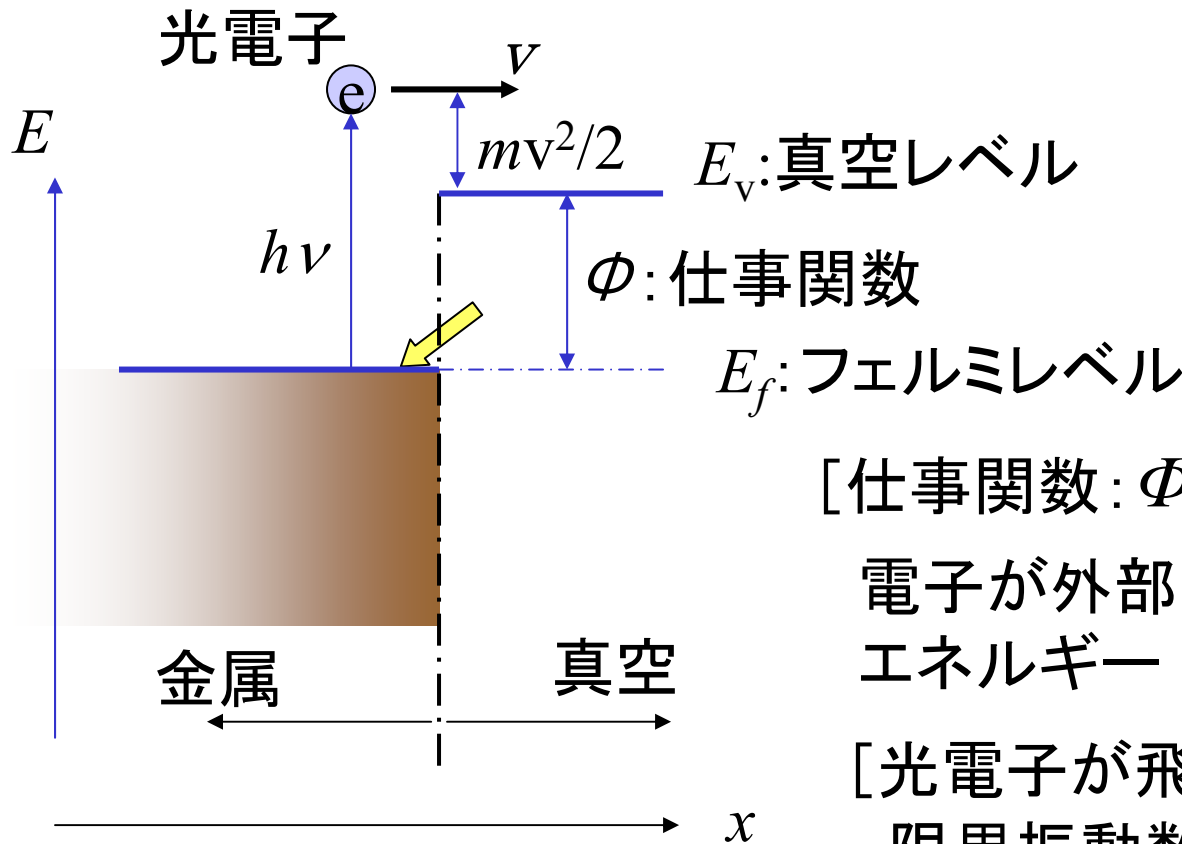
Einsteinの式: $E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} = chk$

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: Φ]

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: ν_0

限界波長: λ_0 $\lambda_0(\text{nm}) = \frac{1,240}{\Phi(\text{eV})}$

金属光電面

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

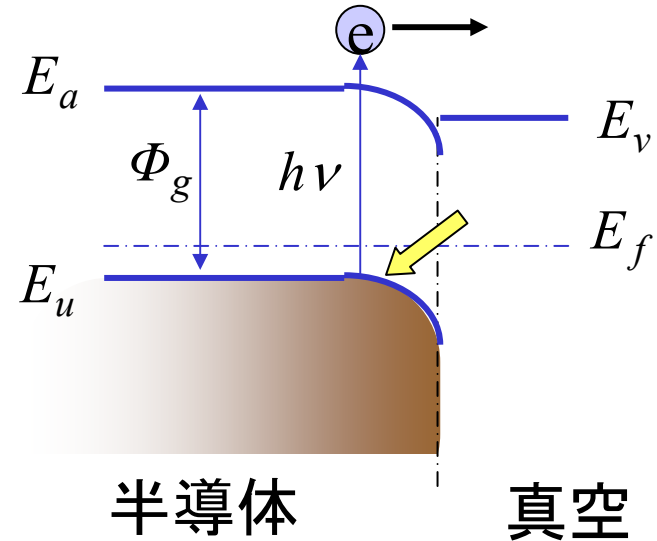
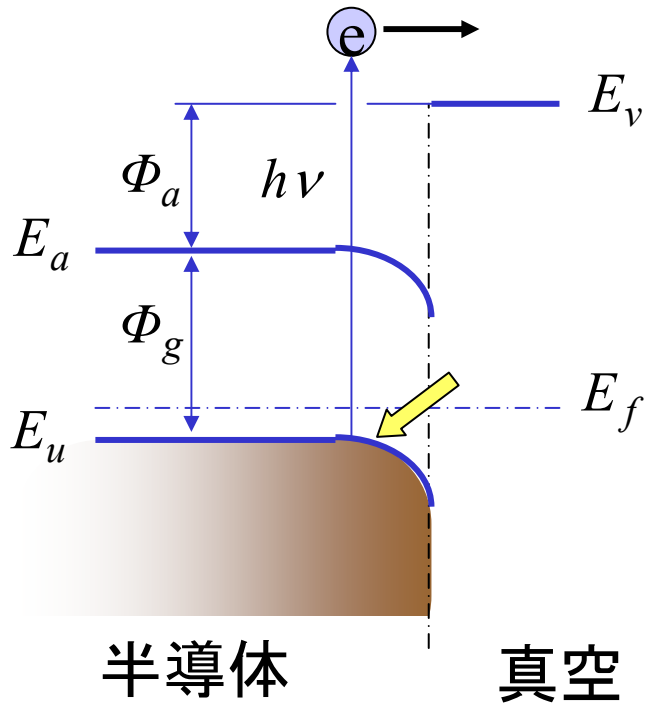
半導体

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

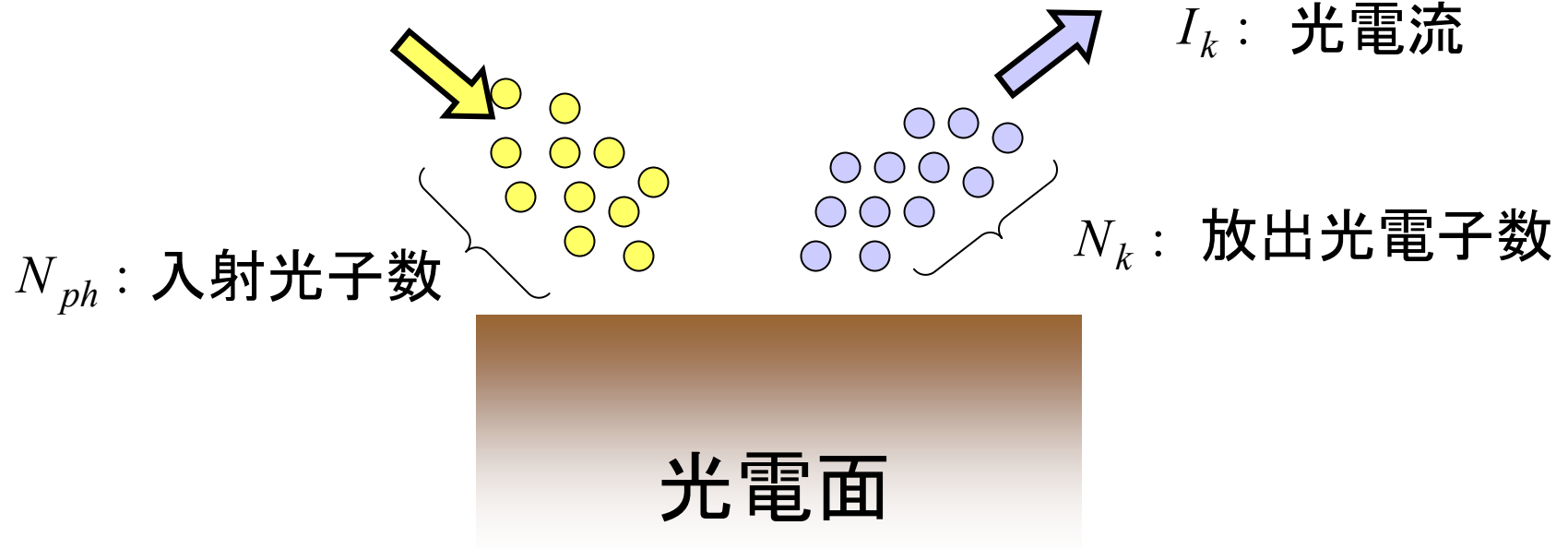
半導体光電面 (親和力が正)

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

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: η]

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

[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

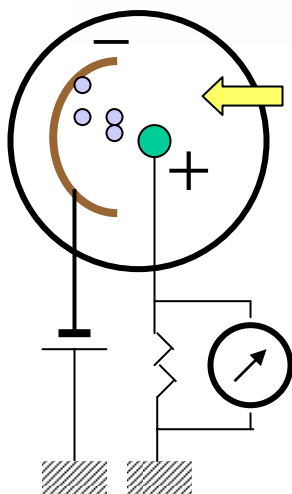
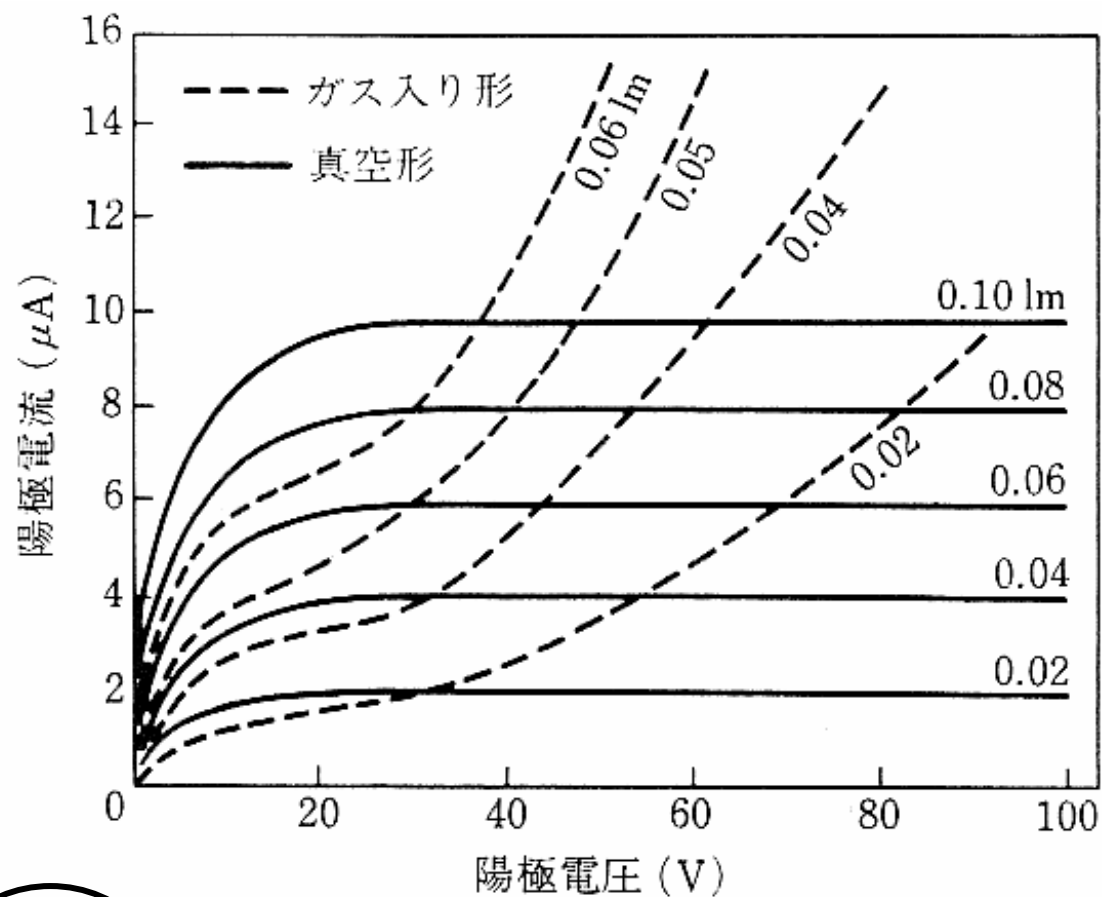
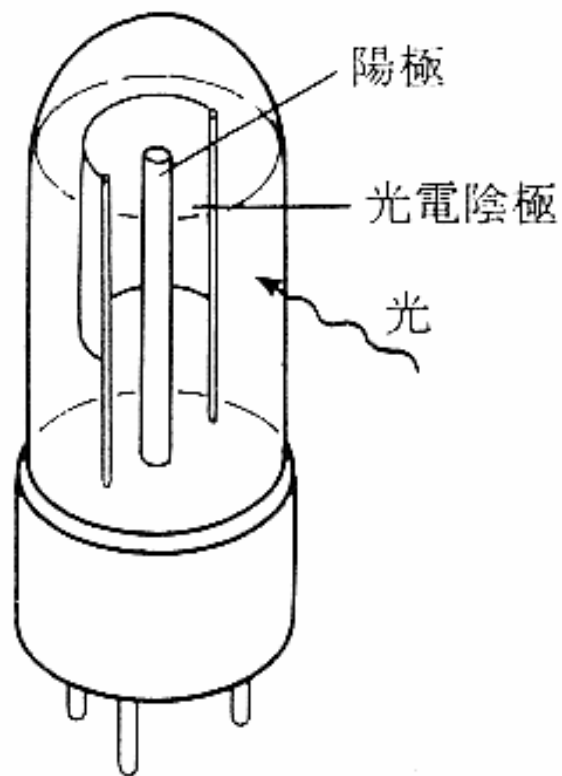
暗電流 $I_n = AT^2 e^{-\Phi/kT}$, $A = 120 \text{ (Acm}^{-2}\text{K}^{-2}\text{)}$

[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

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

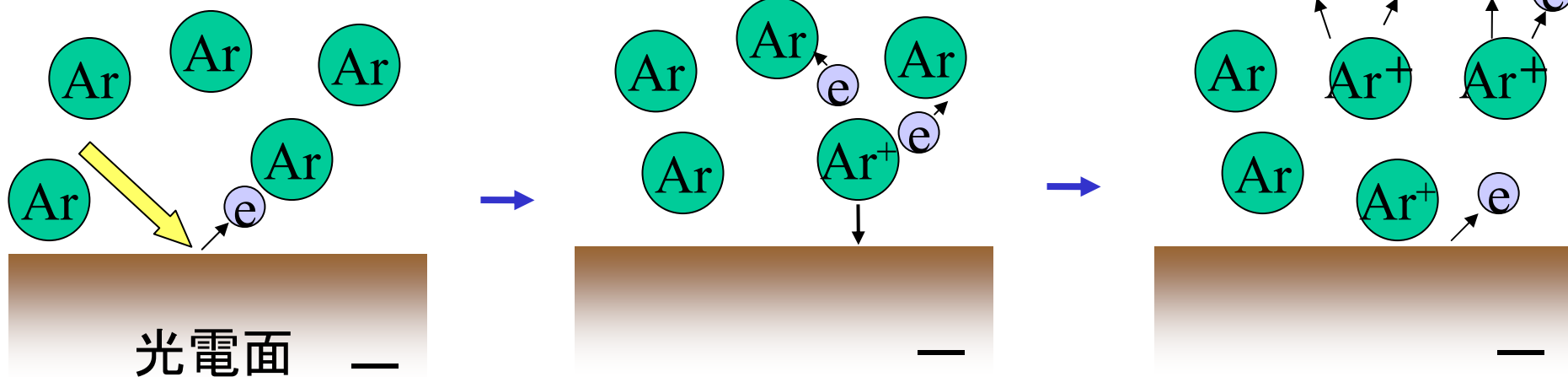
[ガス封入形光電管]

管内増幅=5~50倍の増倍

$$I = \alpha L^n$$

高印可電圧

数十Torr

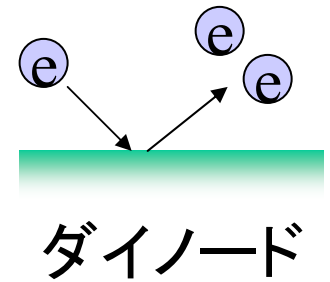
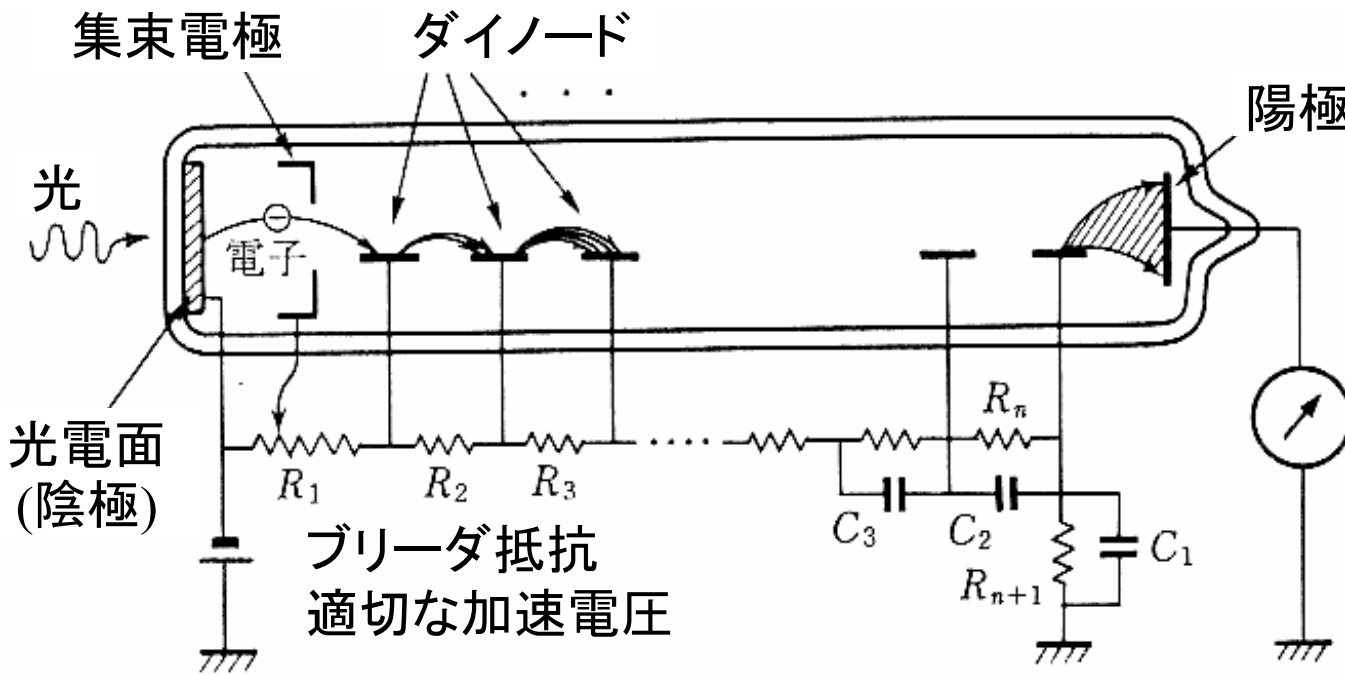


光電子増倍管 (photomultiplier)

微弱光測定

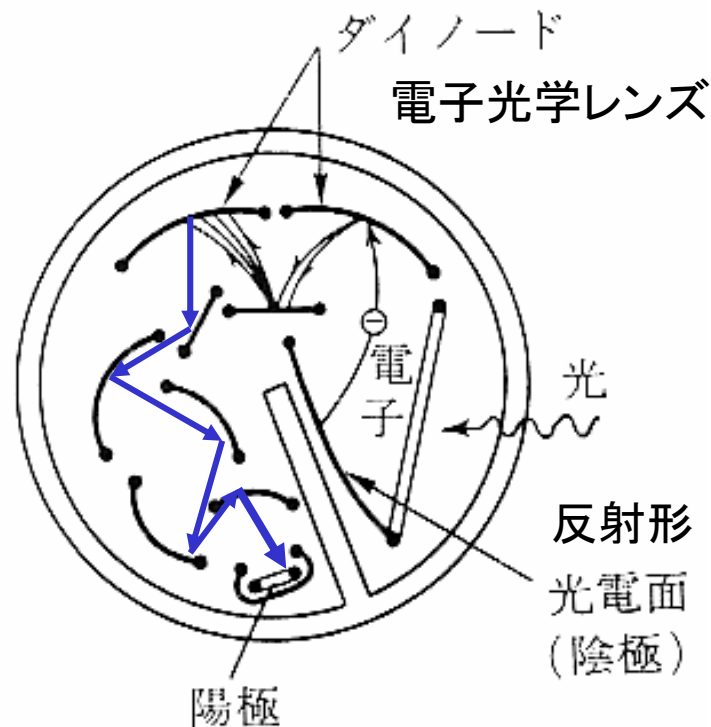
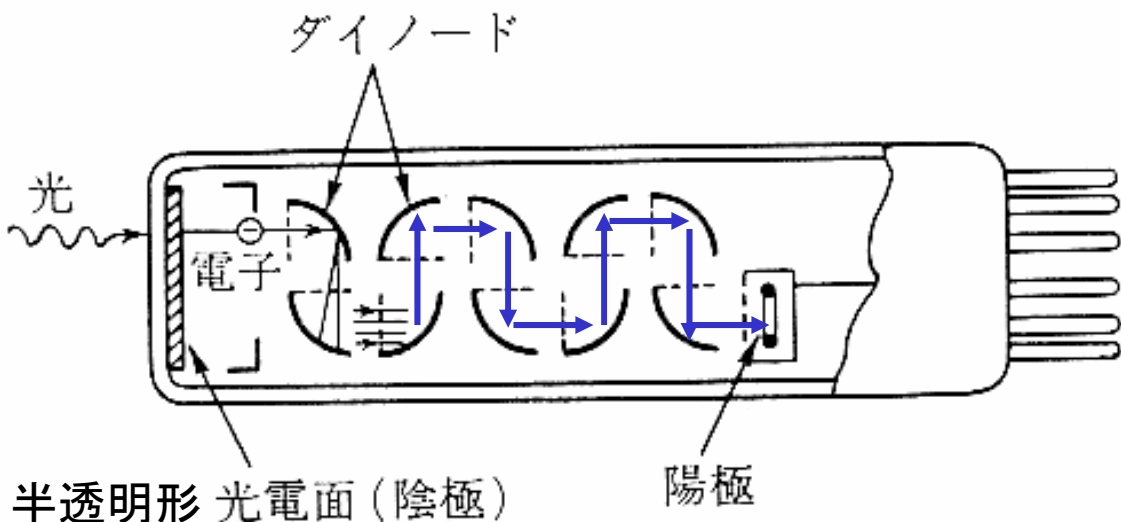
↳ × 外部回路による増幅 ∴ 低い時間応答性, ショット雑音

↳ 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]



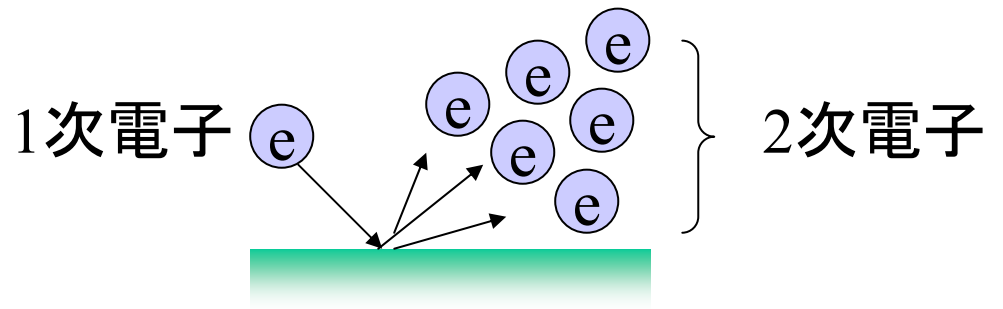
側窓フォーカス形

効率良く増倍
時間応答性高い

ヘッドオンボックス形

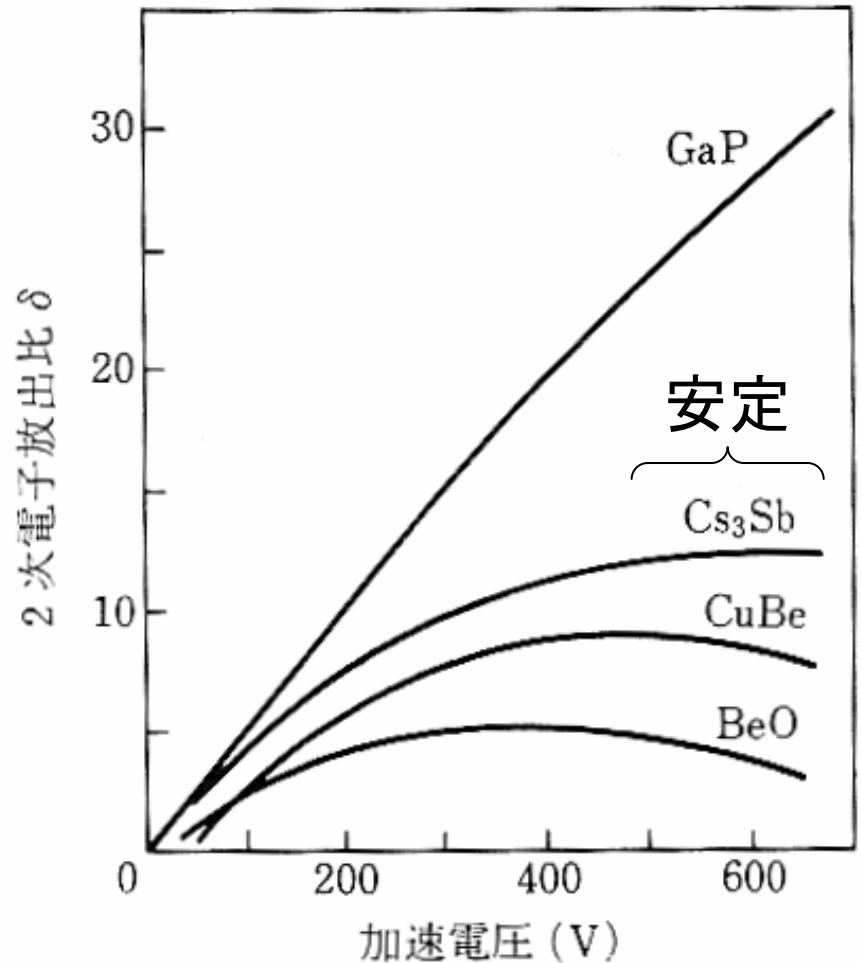
電極配置簡明
微妙な調節を必要としない

[2次電子放出効果]



物質	δ_{\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

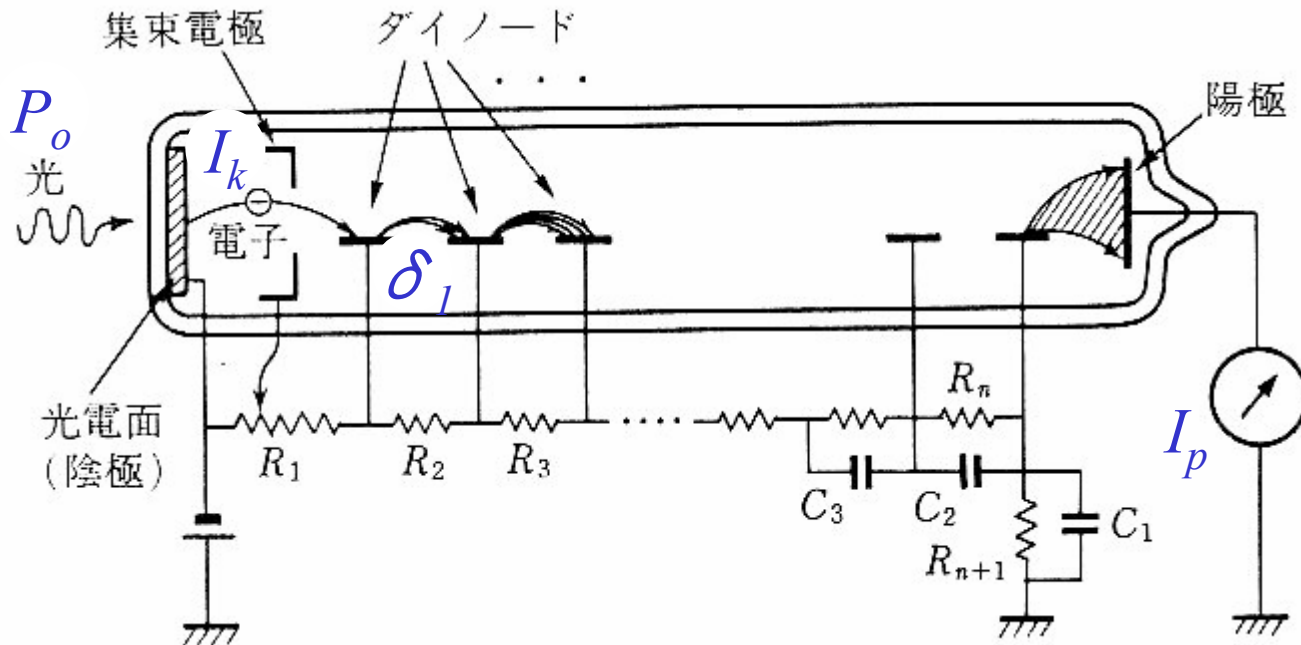
暗電流少ない



[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,
 δ_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

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

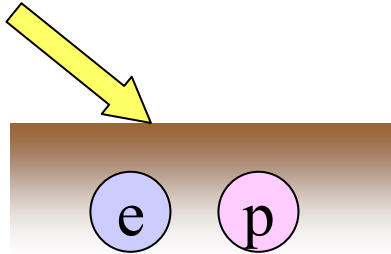
1段あたりの電圧 $V = E_{tot} / (n+1)$

感度 = $10^{-5} \sim 10^{-16}$ lm

雑音極めて少なく, 高利得, 広帯域

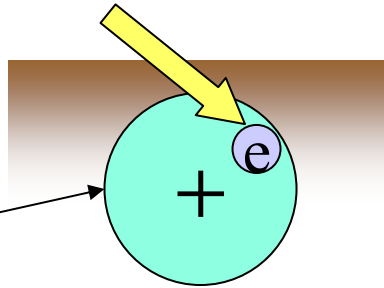
内部量子効果 (internal photon effect)

入射光子

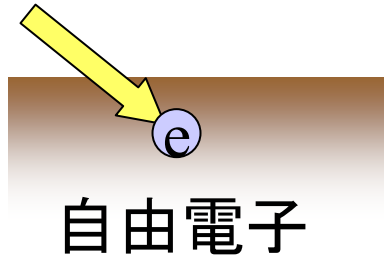


キャリア(電子, 正孔)の励起
物質内にとどまる.

格子原子
不純物原子



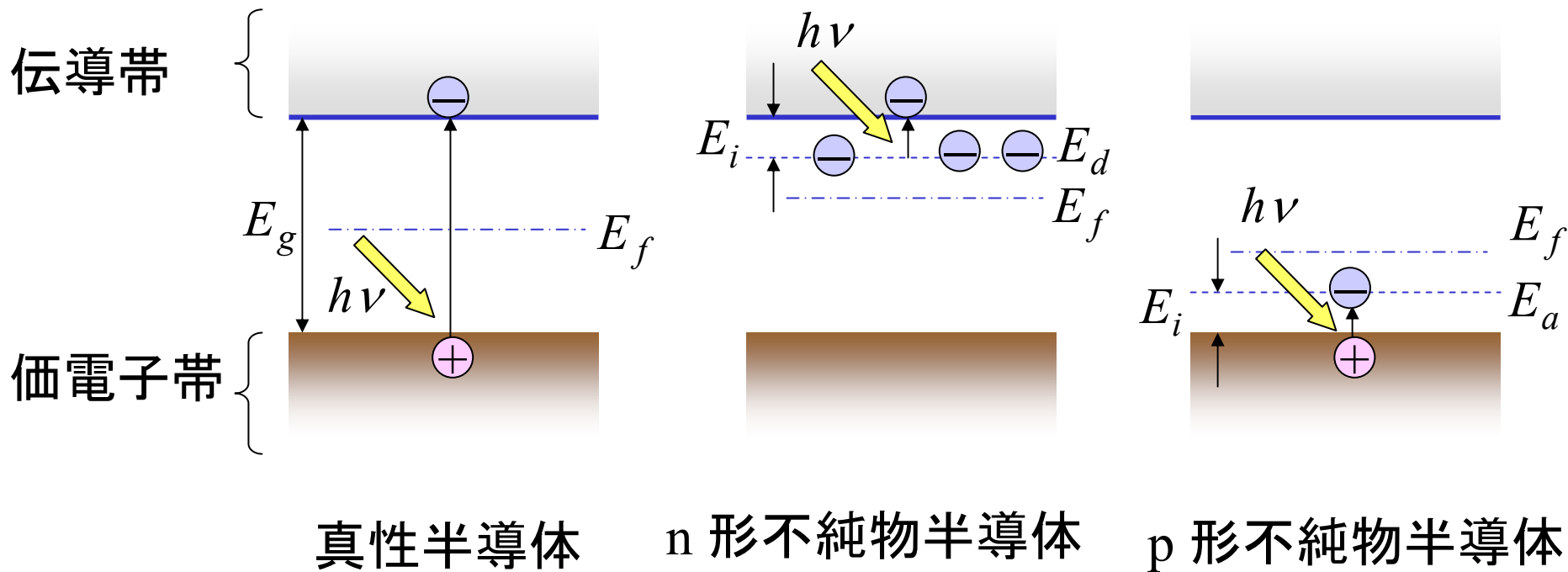
光伝導効果, 光起電効果
光電磁効果



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 λ_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



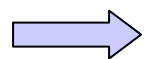
光電子放出効果では不可能

[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

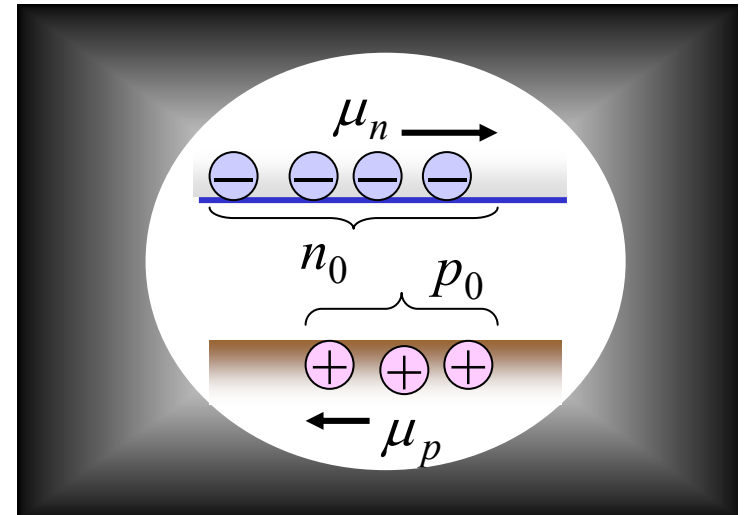
[光を照射しないとき]

導電率 σ_0

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

n_0, μ_n : 電子の濃度, 移動度

p_0, μ_p : 正孔の濃度, 移動度



[光を照射したとき]

導電率の変化 $\Delta\sigma$

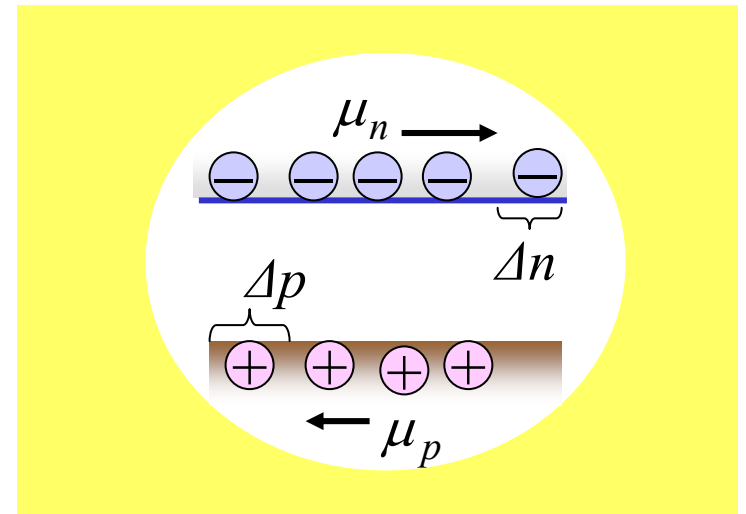
$$\Delta\sigma = e(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p)$$

$\Delta n, \Delta p$: 電子, 正孔の濃度変化

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

τ_n, τ_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

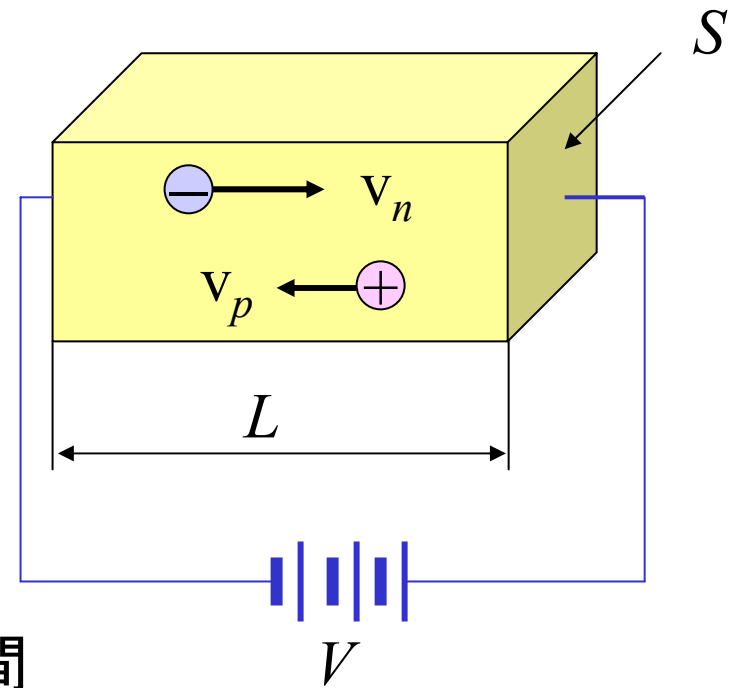
V : 印可電圧

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 (10lx) 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

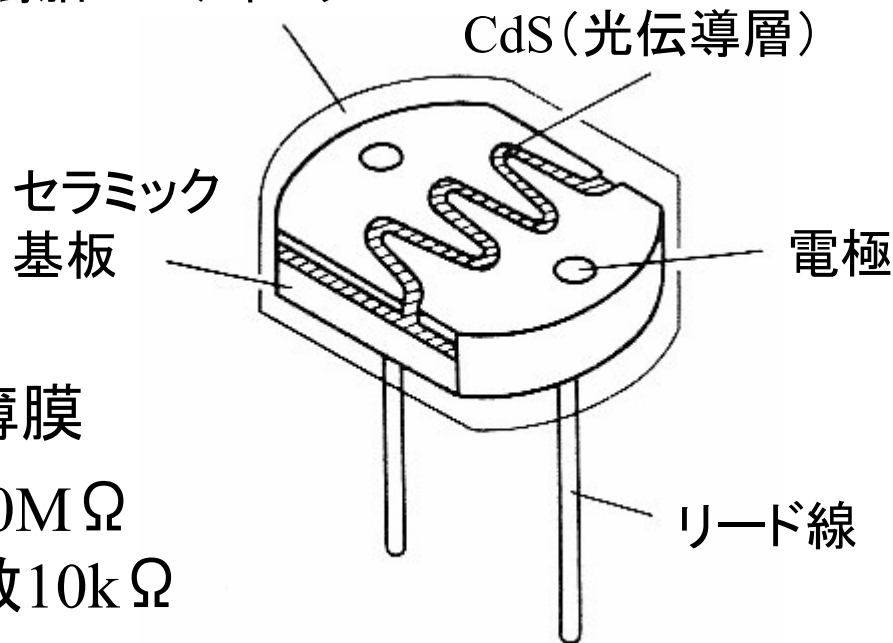
⇒ 精密な定量測光には不向き

☆ 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



[赤外域光伝導形センサ]

☆ PbS

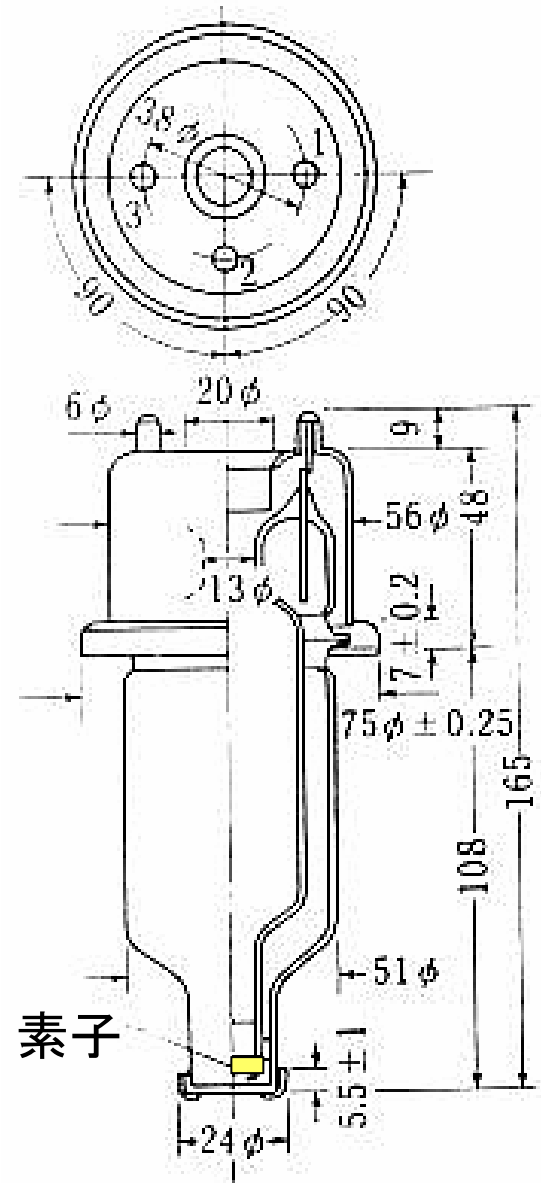
波長	温度
2.5~3 μm	常温
3.3 μm	195K (ドライアイス温度)
3.7 μm	77K (液体窒素温度)

☆ さらに長波長

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

液体窒素で冷却

不純物半導体 GeにCu, Znをドーブ
2~40 μm ,
液体ヘリウム (4.2K) で冷却

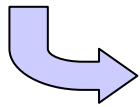


液体窒素で素子を冷却
する赤外センサ

[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



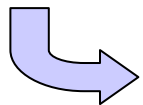
街路灯の自動点滅器, 火災報知器

応答 = 10kHz

☆ 冷却型赤外線センサ

速い応答 (0.01μ) ⇒ 測温点を高速走査

⇒ 温度分布の時間的变化

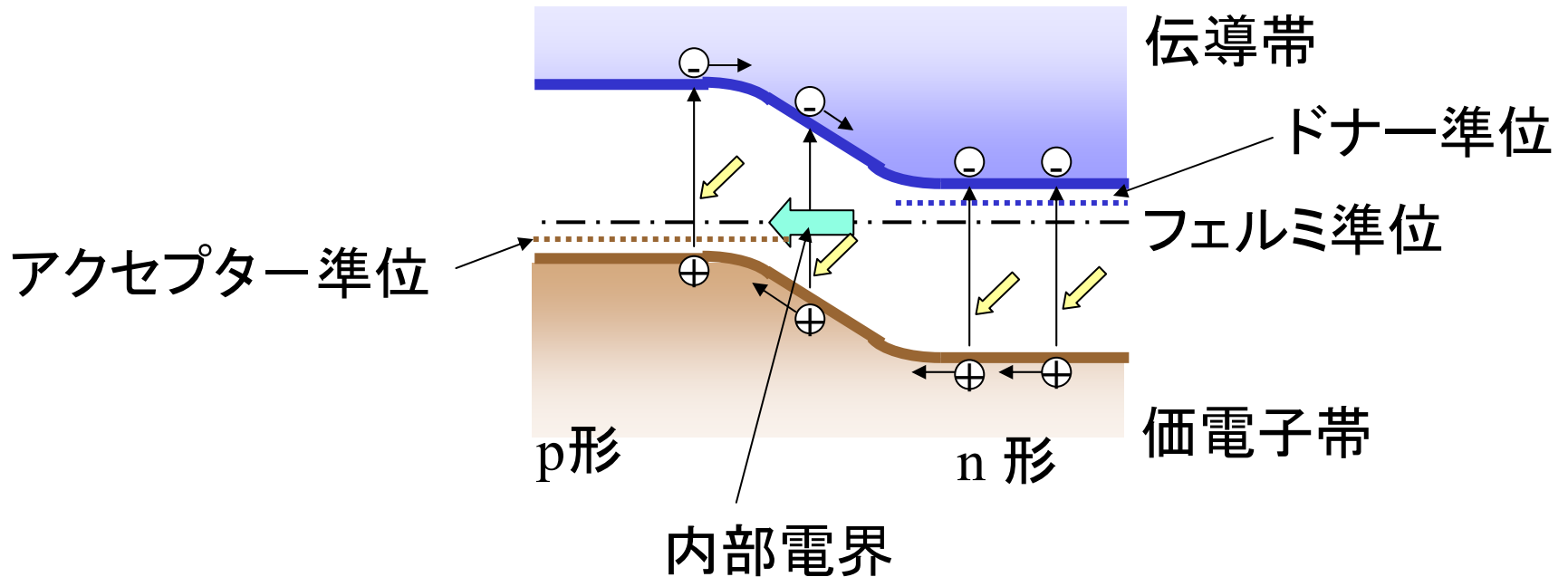


サーモグラフ(医用機器): 外から精密な人体の温度分布

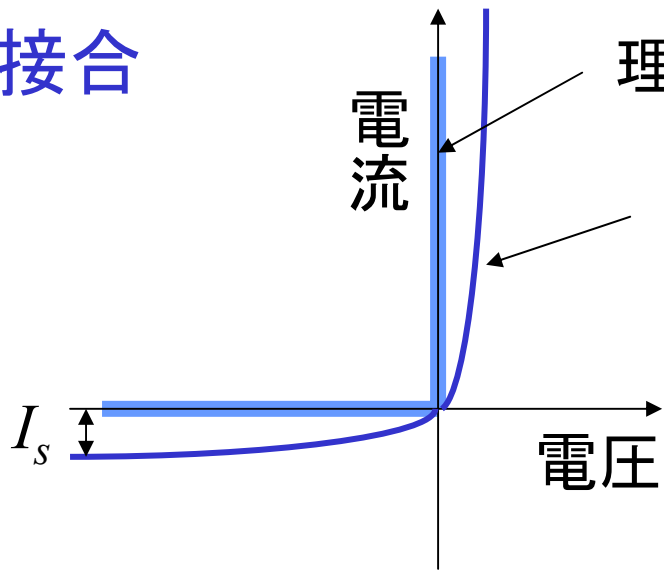
[光起電効果 (photovoltaic effect)]

$h\nu > E_g \rightarrow$ 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

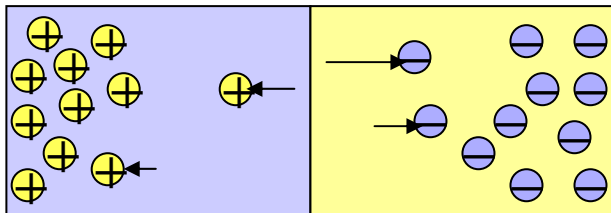
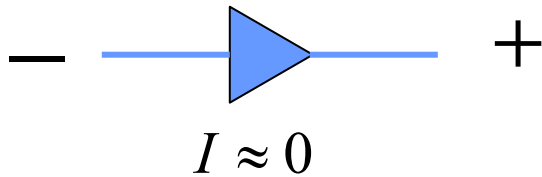


pn 接合



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

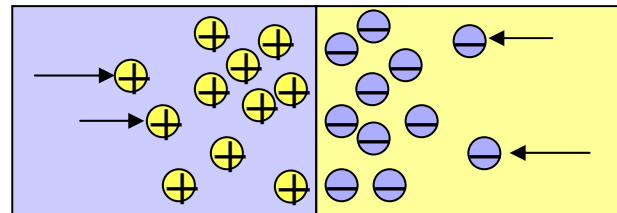
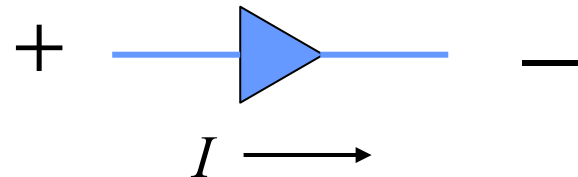
逆バイアス



p形

n形

順バイアス



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 η ,
波長 λ , 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 ($I = 0$)

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

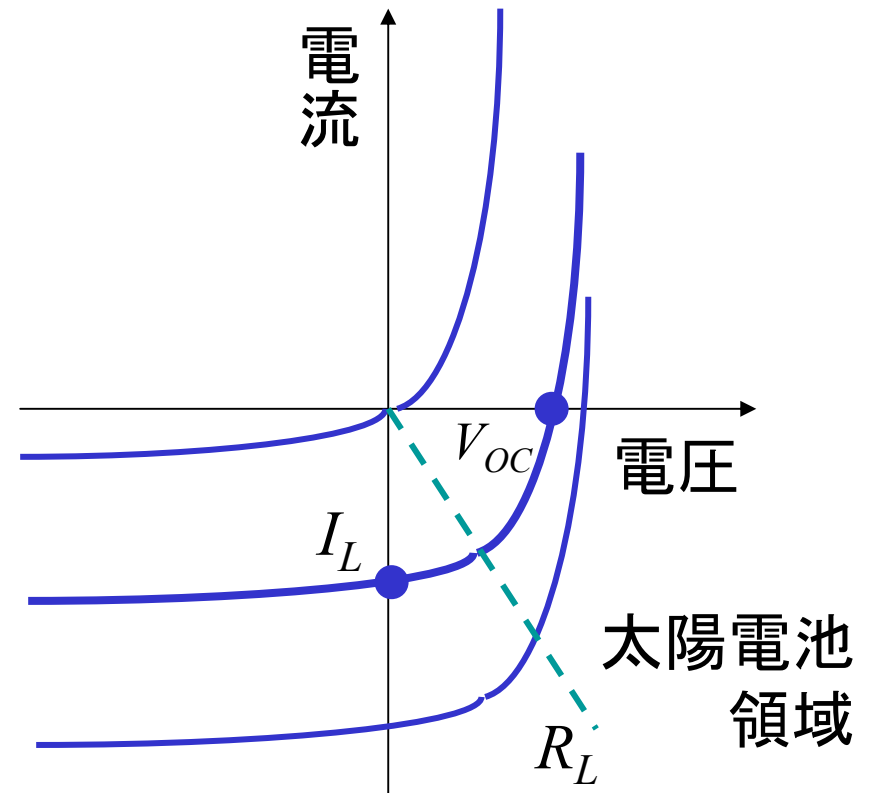
拡散
エピタキシャル成長



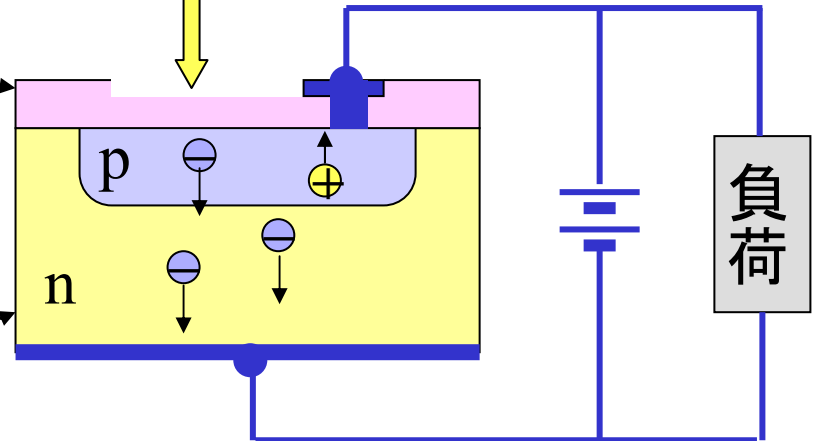
SiO₂

数μm

n形Si



$h\nu$



ホットダイオードの等価回路

精密測定

リーク電流 $i_d, i_r \doteq 0$

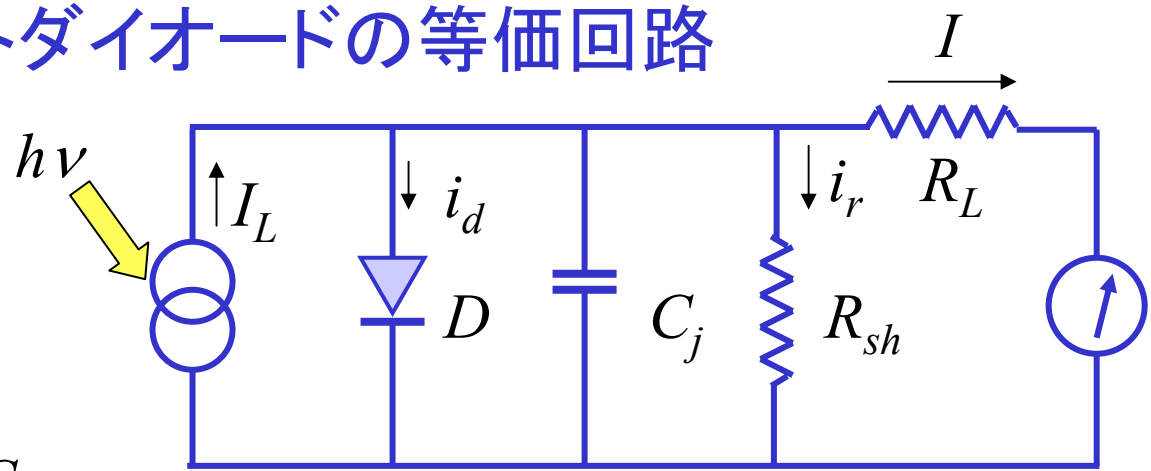
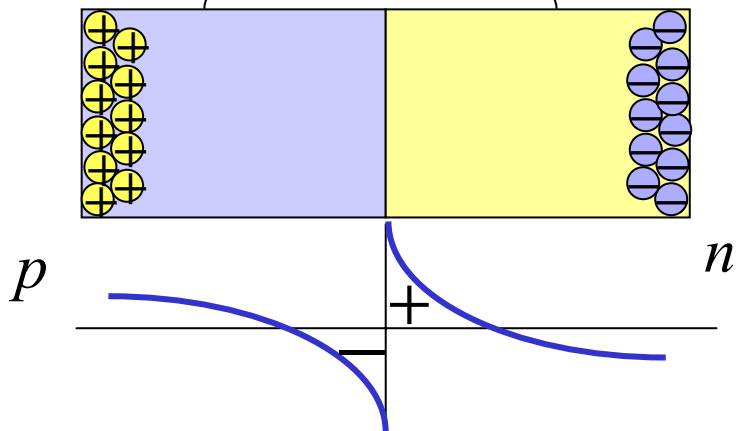
$$R_{sh} \gg R_L$$

応答の時定数 $\longleftarrow R_L C_j$

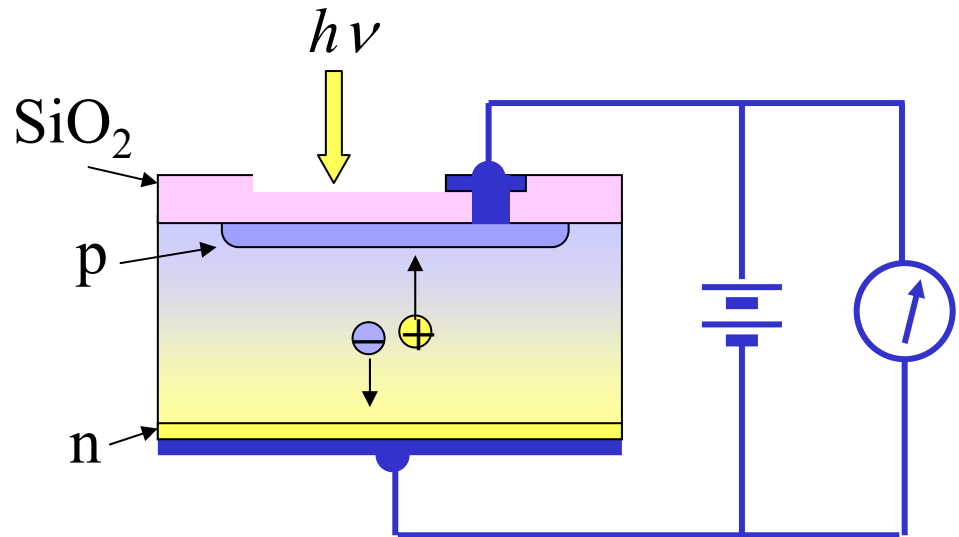
$$C_j = \frac{1.9 \times 10^2}{\sqrt{\rho(V_i + V_B)}}$$

V_B : 逆バイアス $- \rightarrow +$

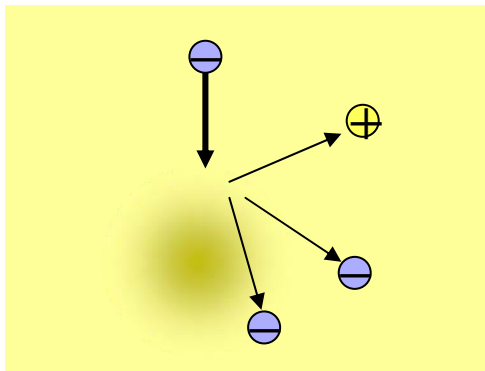
空乏層 i



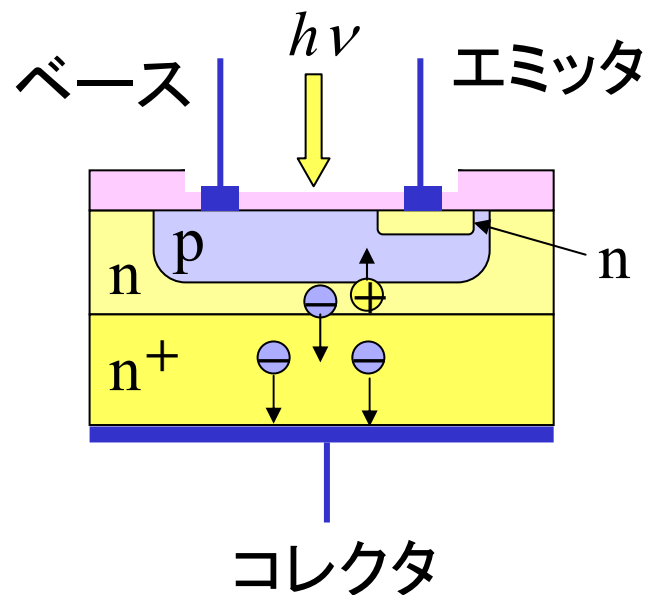
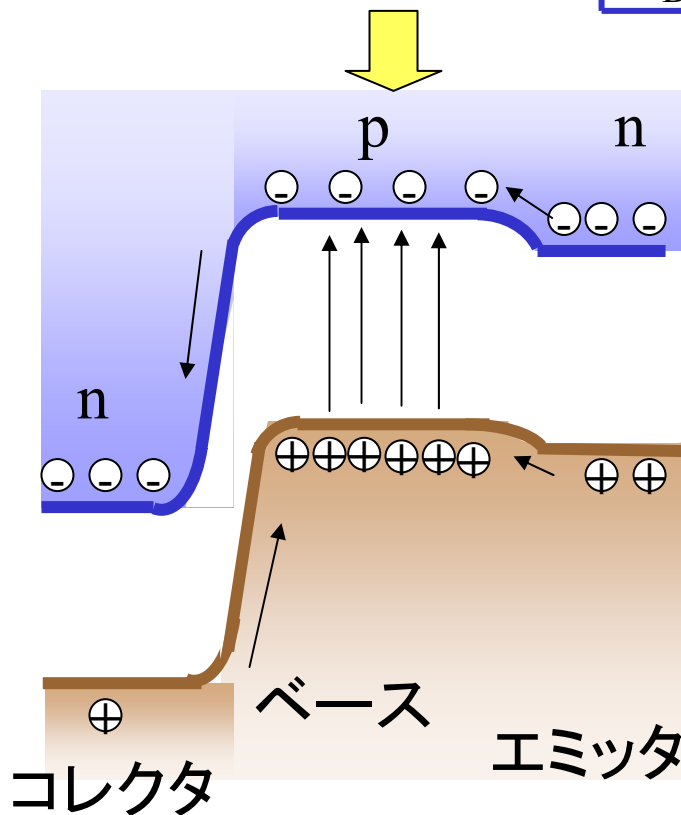
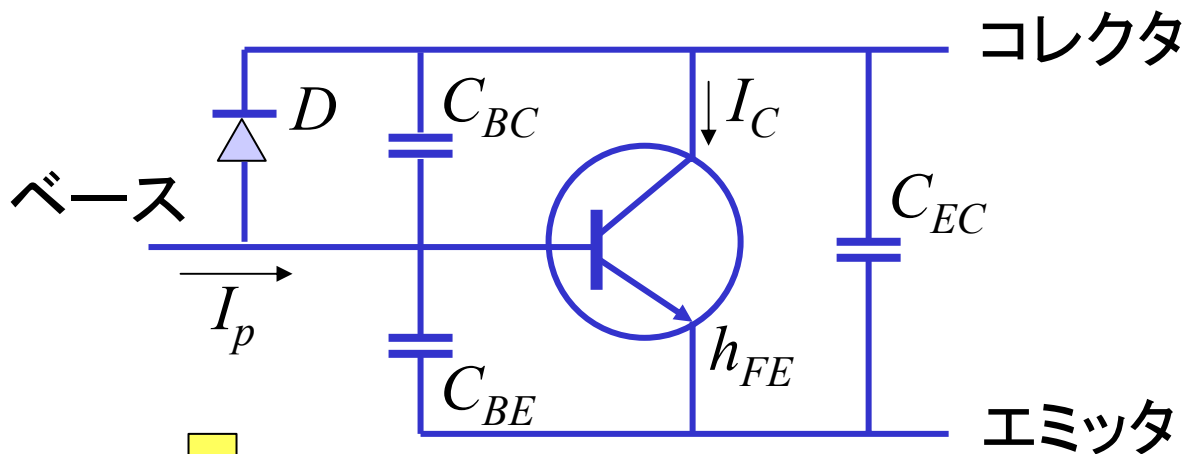
pin ホットダイオード



アバランシェ ホトダイオード (APD)



ホトトランジスタ



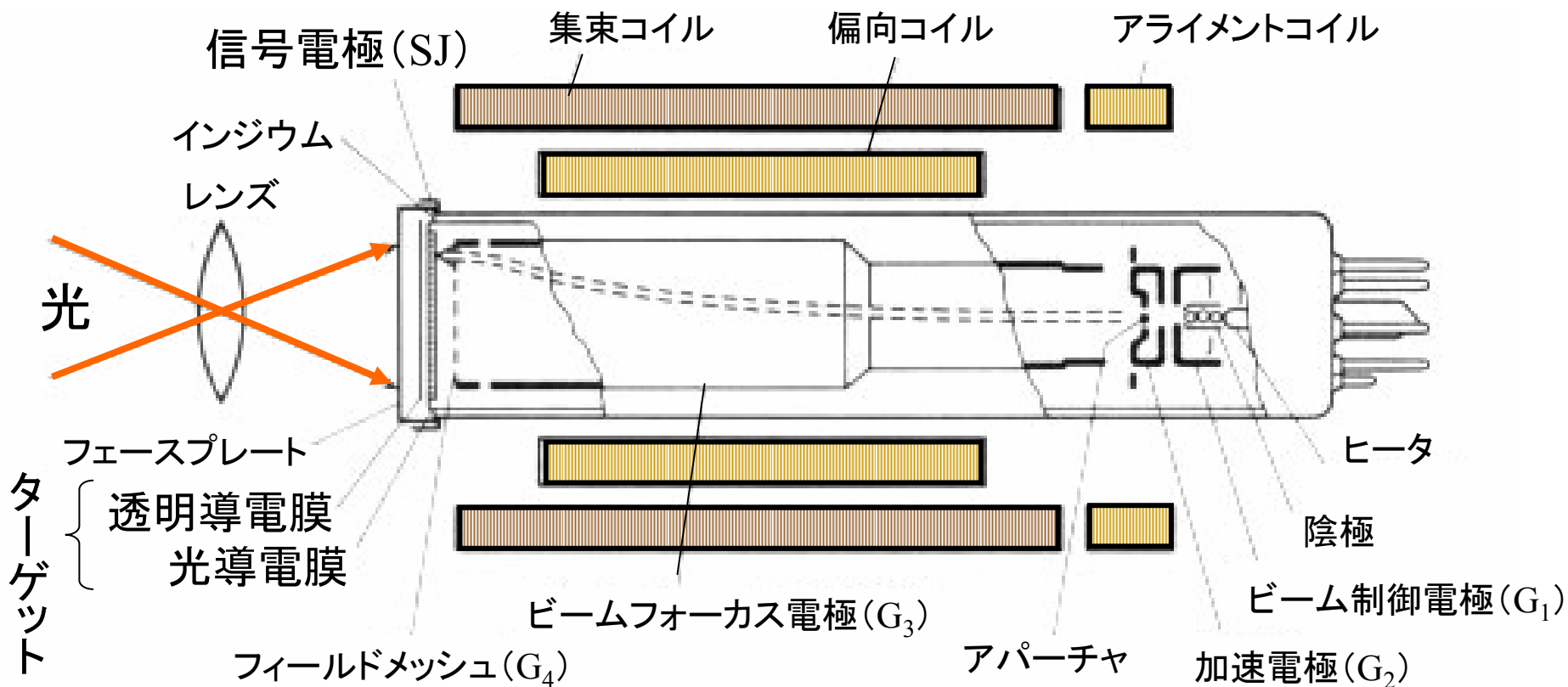
$$I_C = (1 + h_{FE}) I_P \approx h_{FE} I_P$$

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



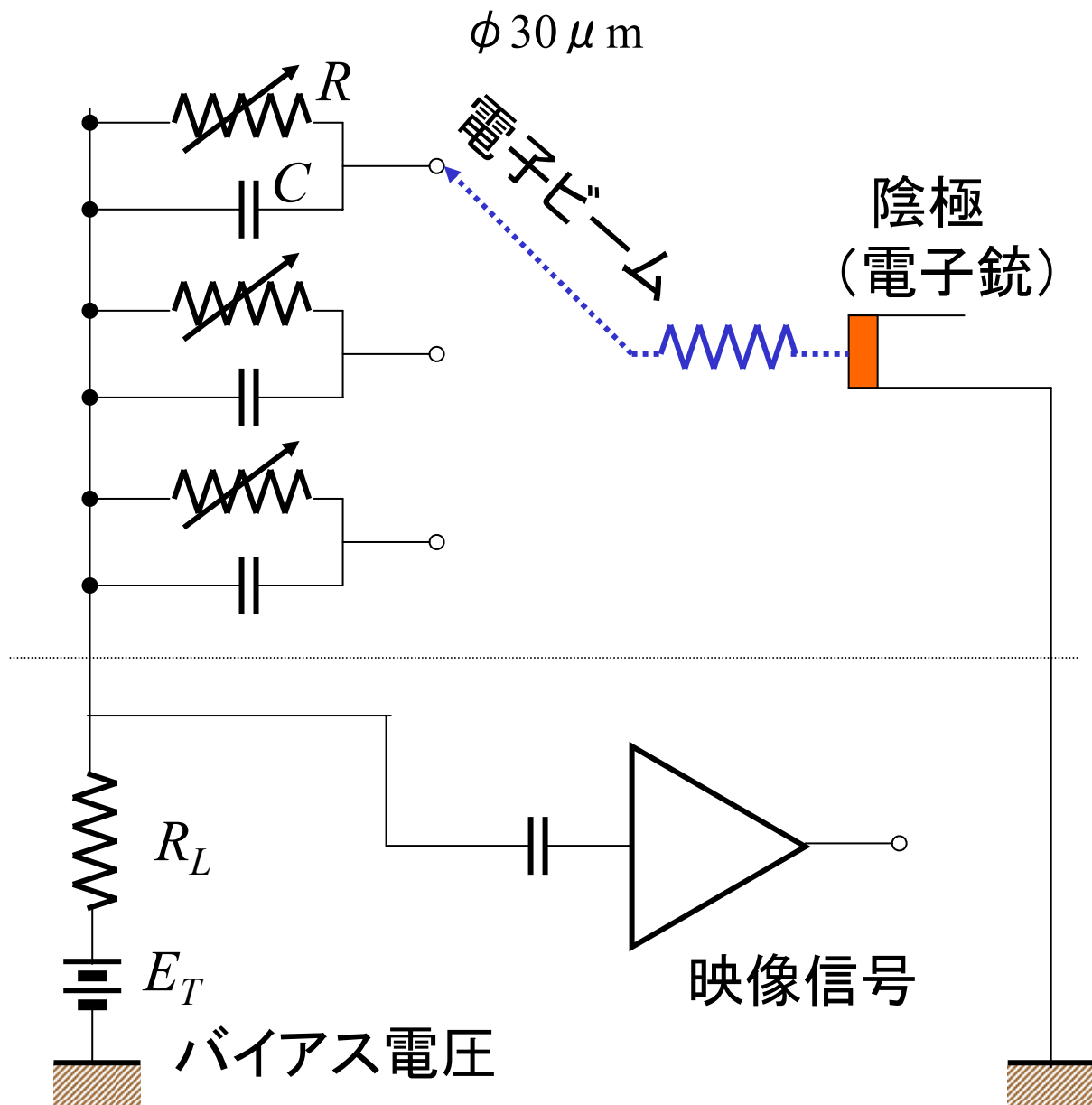
放電

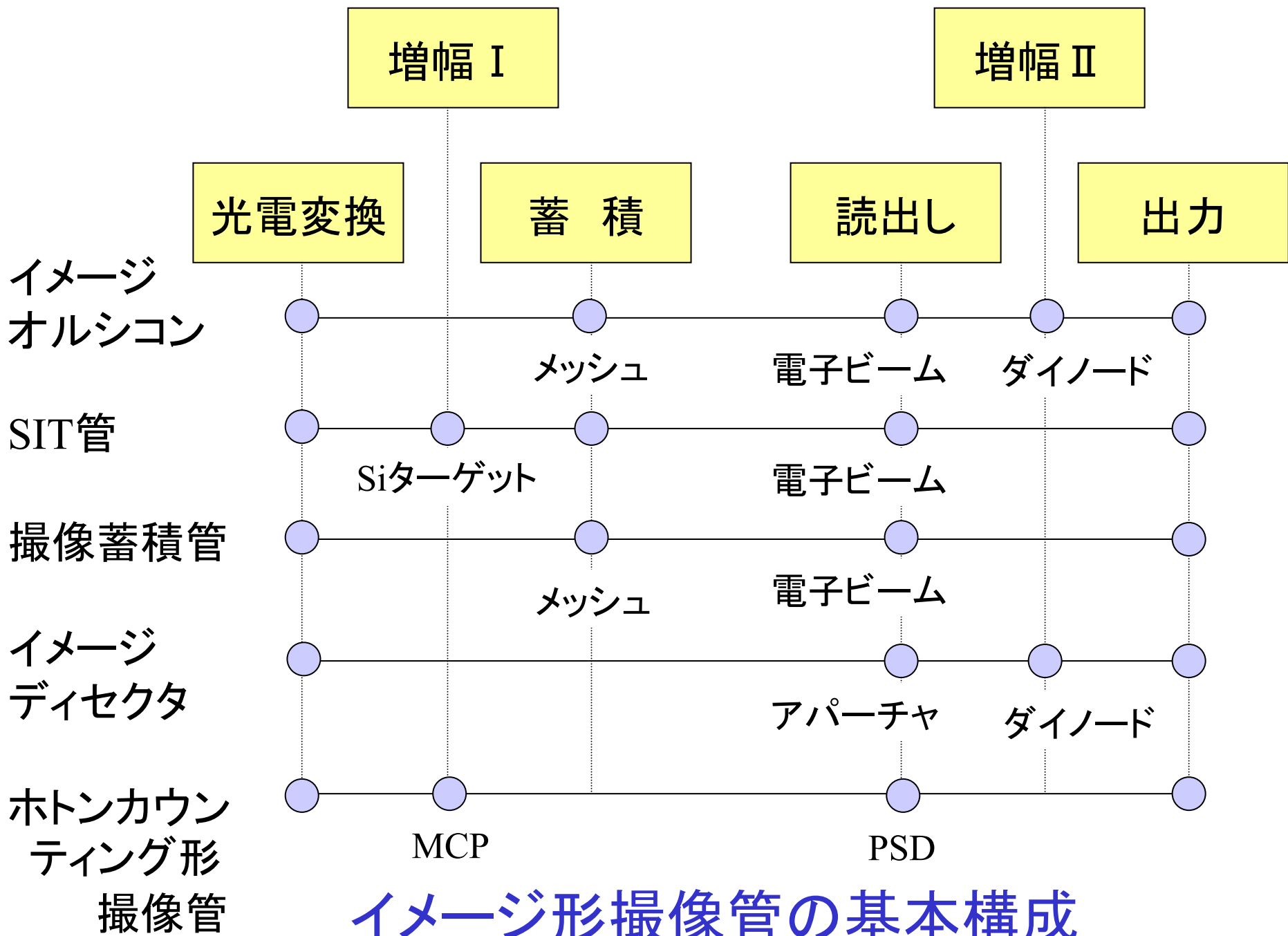


電子ビーム

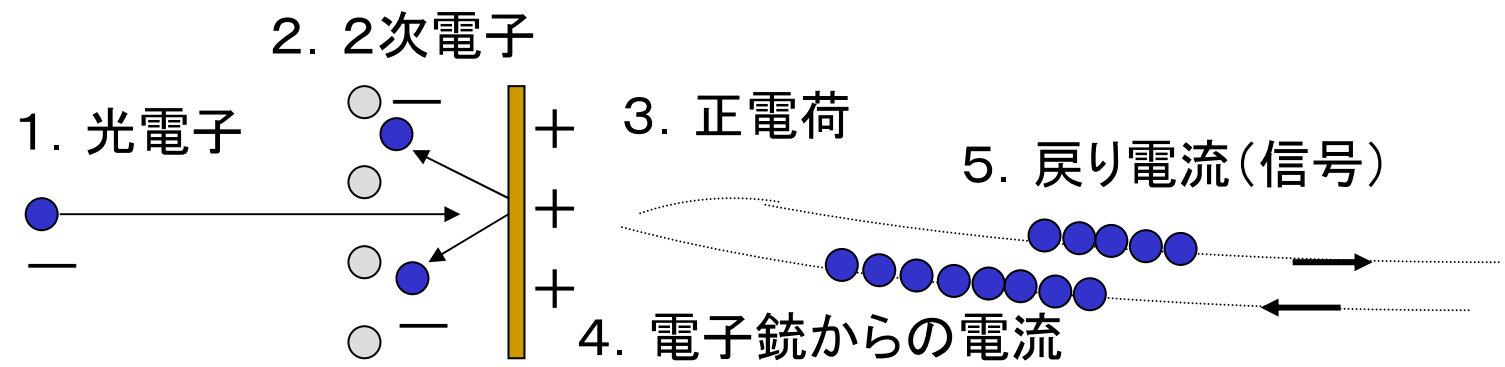
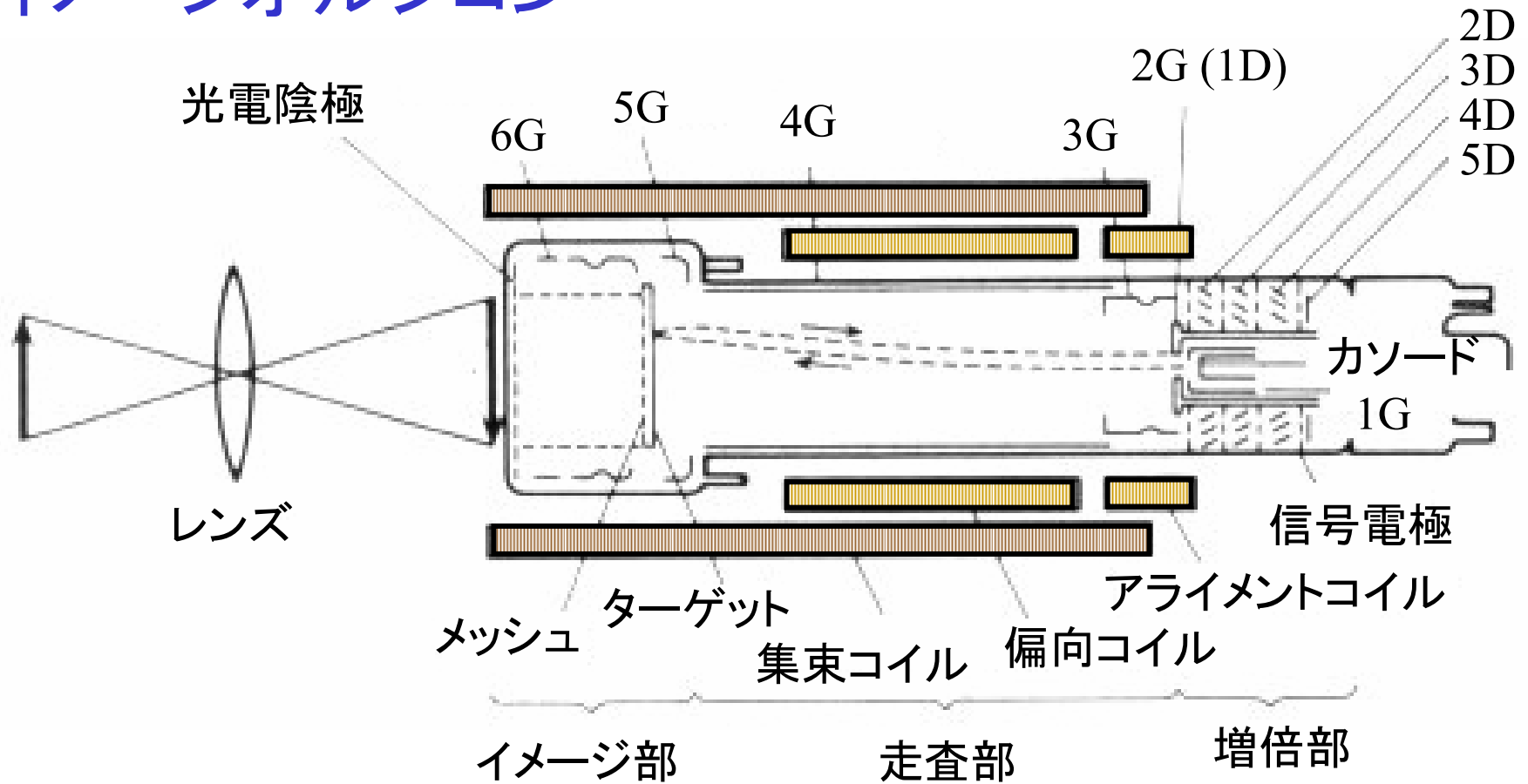


充電=映像信号





イメージオルシコン



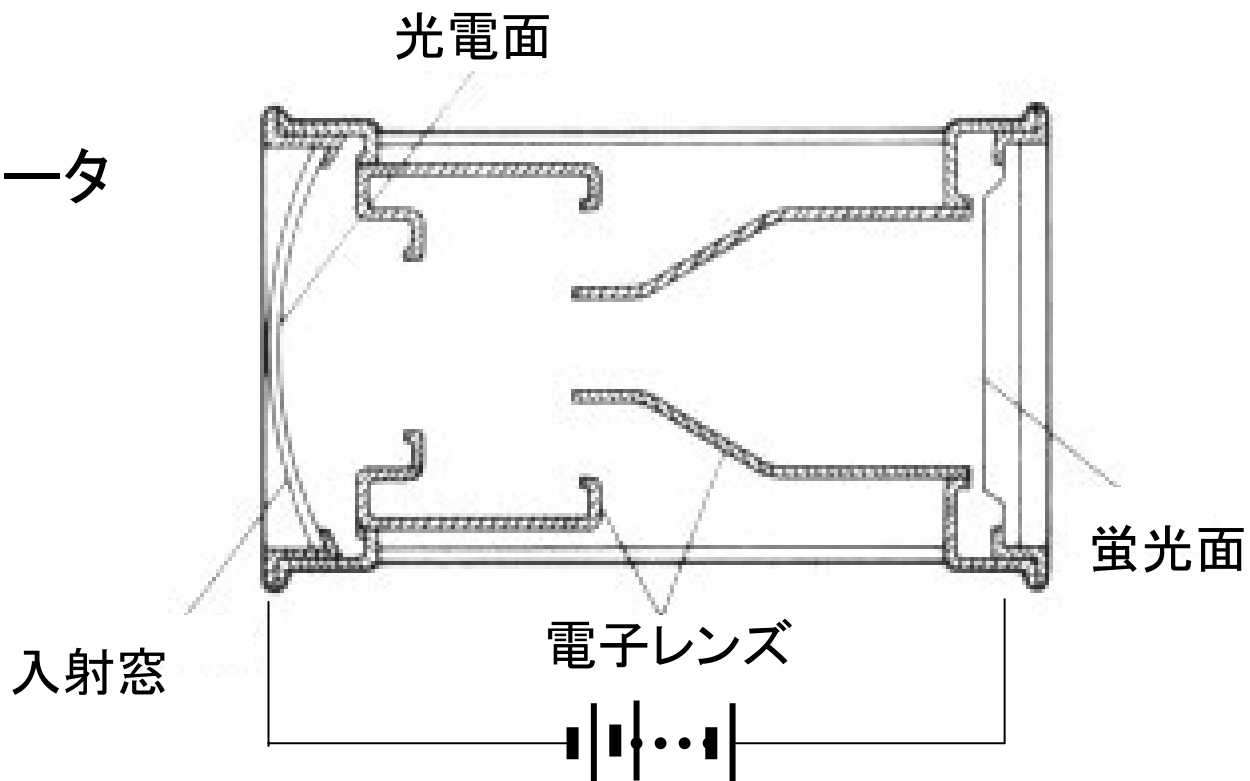
イメージ管

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

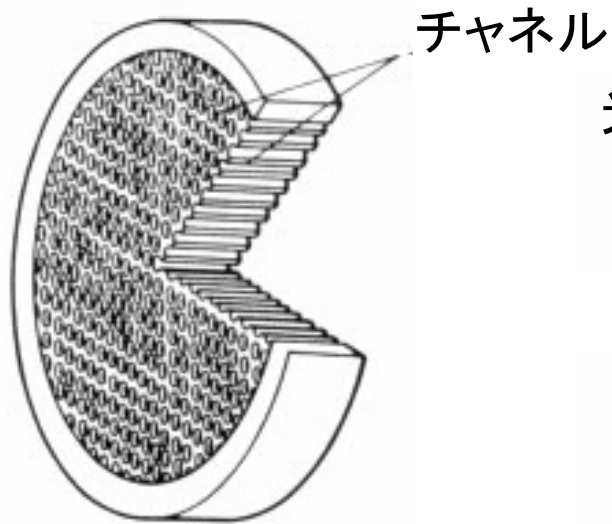
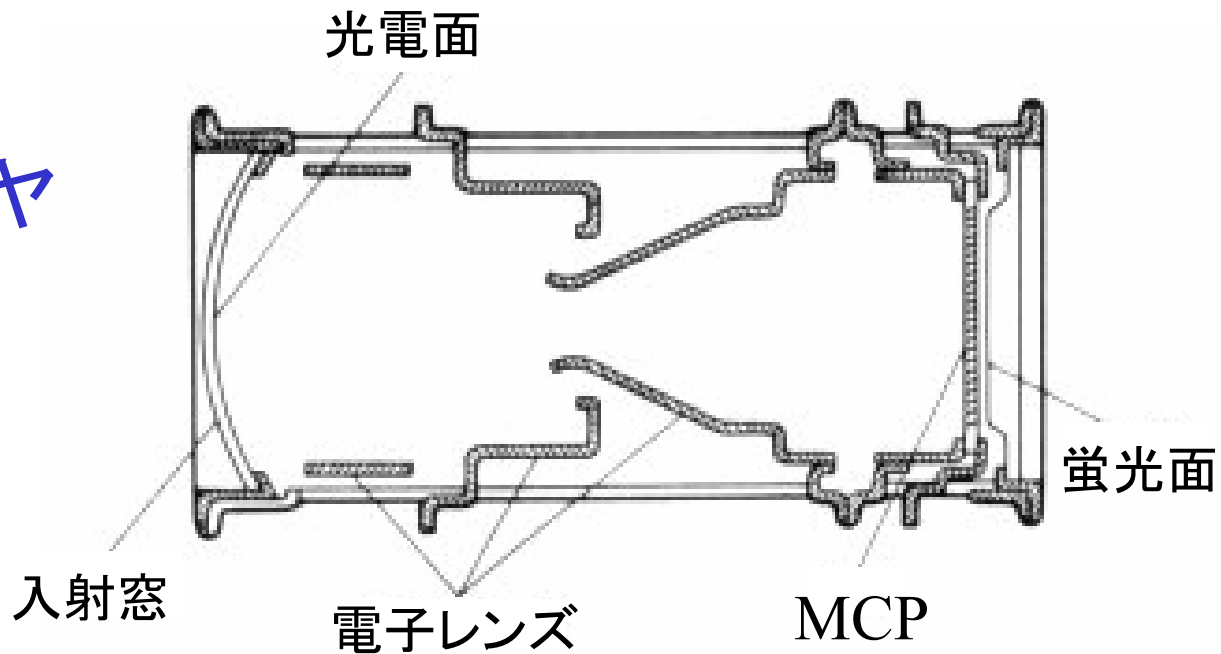
イメージコンバータ：不可視光像を明るい可視光像に変換

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

