

**オプトエレクトロニクス Optoelectronics**

教科書：「光エレクトロニクスの基礎」 宮尾亘、平田仁 著 日本理工出版会 (1999)
第1章 光とエレクトロニクス
1-1 光の性質 1-2 物質による光の放射と吸収
第2章 半導体の基礎
2-1 半導体とは 2-2Si の結晶と電気伝導 2-3pn 接合ダイオード
第3章 発光デバイス
3-1 ルミネセンス 3-2 発光ダイオード 3-3 レーザ
第4章 光センサ
4-1 光とは 4-2 可視光の測定 4-3 赤外線 の測定 4-4 可視光センサ 4-5 赤外線センサ
第5章 表示デバイス
5-2 プラズマディスプレイ 5-3 エレクトロルミネセンス素子 5-4 液晶表示素子

「光エレクトロニクス」とは？

光電子工学：電子工学と光学を融合する学問（技術）

光と電波の境界領域（赤外線～マイクロ波領域）の科学技術の融合

→ 現在では、ラジオ波～X線までの広い電磁波全般を含む科学技術

例えば、光を演算や通信に利用する、電子と光子を変換する素子（フォトダイオード、レーザ、発光ダイオードなど）

**周波数スペクトル**

周波数 Hz	波長	名称	応用分野
～30k		超長波(VLF)	
300k～30M	1km～10m	中波、短波(HF)	AM ラジオ
30M～300M	10m～1m	超短波(VHF)	FM ラジオ、テレビ
300M～3G	1m～10cm	極超短波(UHF)	テレビ
3G～30G	10cm～1cm	センチ波(SHF)	電子レンジ、衛星放送
30G～300G	1cm～1mm	ミリ波(EHF)	自動車レーダ
300G～3T	1mm～100μm	サブミリ波	
	:		
	～20μm	極端遠赤外	
	～6μm	遠赤外(FIR)	
	～3μm	中赤外	
	～0.8μm	近赤外(NIR)	光通信
	0.75(0.77)～0.38μm	可視光	
	～10nm	紫外線	
	～10pm	X線	
	10pm～	γ線	

通信に利用する電磁波として、主に電波が利用されてきた。しかし、周波数が低く、通信速度に限界 → 高周波数の光を通信に利用することで、高速な通信を実現

1960年 レーザ(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)の発明

1980年代 光ファイバー伝送の実現…大容量通信、光海底ケーブル

1982年 CD (コンパクトディスク) の商品化 → MD (ミニディスク)、DVD (デジタルビデオディスク) などの光ディスクの商品化

光エレクトロニクス(Optical Electronics)あるいはオプトエレクトロニクス(Optoelectronics)

……レーザを中心として電子工学(electronics)と光学(optics)に及ぶ学際的技術分野

「光電効果」：光によって材料の電氣的性質が変化…（狭義の）オプトエレクトロニクス

「電気光学効果」：電界によって材料の光学的性質が変化…（狭義の）エレクトロオプティクス

- ・ オプトエレクトロニクス
  - 1873 年 セレンの光電導効果の発見
  - 1888 年 外部光電効果（光電子放出）
- ・ エレクトロオプティクス
  - 1845 年 ファラデー効果（磁気旋光）
  - 1875 年 カー効果（電気光学カー効果、磁気光学カー効果）
- ・ 量子エレクトロニクス
  - 1954 年 メーザ Maser(Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)の発明
  - 1960 年 メイマン(T. H. Maiman) ルビーレーザーの発明

### 波としての光の性質

電磁波の周波数  $f$ [Hz]、波長  $\lambda$ [m]、光速  $c$ [m/s] の関係  $f \cdot \lambda = c$

真空中の電磁波の速度  $c_0$   $c_0 = 2.99792458 \times 10^8$  [m/s]

物質中での電磁波の速度を  $v$  とし、 $c_0$  と  $v$  の比をとる  $n = \frac{c_0}{v}$

$n$  はその物質の屈折率 (refractive index) という。  $n$  は電磁波の周波数によって異なる値をとる場合があり、これを分散性 (dispersion) と呼ぶ。

物質中での電磁波の波長  $\lambda_g$  は、真空中での波長  $\lambda_0$  の  $\frac{1}{n}$  倍となる。  $\lambda_g = \frac{\lambda_0}{n}$

### 光学の歴史

年	人名	事項
BC.280 頃	Euclid	直進性、反射の法則の記述
1000 頃		ピンホールカメラの原理
1609	G. Galileo	屈折望遠鏡の製作 (1610 年木星の衛星発見)
1621	W. Snell	屈折の法則の発見
1657	P. Fermat	フェルマーの原理
1668	I. Newton	反射望遠鏡の製作
1690	C. Huygens	ホイヘンスの原理
1704	I. Newton	光の粒子性
1802	T. Young	干渉の説明
1873	C. Maxwell	電磁波の予言
1882	G. Kirchhoff	キルヒホッフの回折理論
1887	A. A. Michelson, E. W. Morley	光速度の測定
1887	H. Hertz	光電効果の発見
1888	H. Hertz	電磁波の実在証明
1900	M. Planck	黒体輻射の式、量子論
1905	A. Einstein	光量子説、特殊相対性理論
1913	N. Bohr	量子論による水素原子のスペクトル説明
1926	E. Schödinger	波動力学
1954	C. Townes	アンモニアメーザの発明
1960	T. Maiman	ルビーレーザーの発振
1960		ガスレーザーの発振
1962		半導体レーザーの発振
1975		光ディスクの実用化
1980		光ファイバ通信の実用化
1990		ハッブル宇宙望遠鏡
1994	S. Nakamura	青色半導体レーザーの常温連続発振

### Maxwell 方程式

#### ・電場におけるガウスの法則

クーロンの法則 
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ee'}{r^2}$$

点電荷  $e$  による電界  $E$  
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e}{r^2} \quad \rightarrow \quad E \cdot 4\pi r^2 = \frac{e}{\epsilon_0}$$

電荷  $e$  を中心とする半径  $r$  の球体積  $V$  の空間電荷密度を  $\rho$  とすると

$$\int_S E \cdot ds = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho \cdot dv$$

ガウスの発散の定理より

$$\int_V \text{div} E \cdot dv = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho \cdot dv$$

任意の  $V$  について成立  $\rightarrow \quad \text{div} E - \frac{\rho}{\epsilon_0} = 0$

$$\text{div} \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

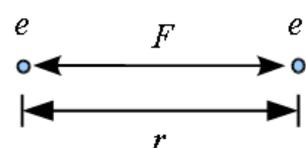


Fig.1 クーロン力  $F$

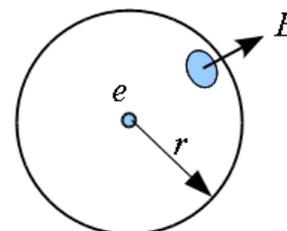


Fig.2 球体積による電界  $E$

#### ・磁場におけるガウスの法則

磁荷 (単磁極) は存在しないので 
$$\text{div} \mathbf{B} = 0$$

#### ・アンペールの法則

電流  $I$  によって生ずる磁束密度  $B$

$$\int_C B(r) \cdot dr = \mu_0 \int_S J \cdot ds$$

ストークスの定理より

$$\int_S \text{rot} B \cdot ds = \mu_0 \int_S J \cdot ds$$

任意の  $S$  について成立  $\rightarrow \quad \text{rot} B = \mu_0 J$

$$\text{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

電荷密度が時間的に変化する系では変位電流の項が付く

$$\text{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

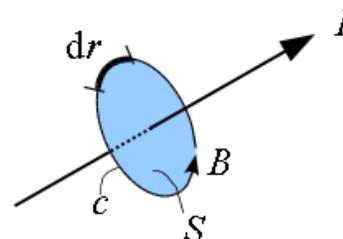


Fig.3 電流による磁場

#### ・ファラデーの電磁誘導

磁束  $\Phi$  の時間変化によって電圧  $V$  が生ずる

$$V = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (\Phi = \int_S B \cdot ds)$$

$$\int_C E \cdot dr = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S B \cdot ds$$

ストークスの定理より

$$\int_S \text{rot} E \cdot ds = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S B \cdot ds$$

任意の  $S$  について成立

$$\text{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

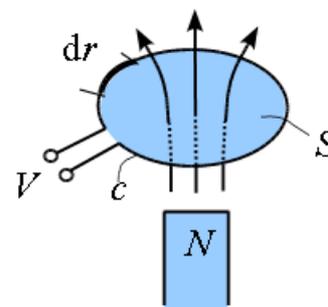


Fig.4 電磁誘導

## 波動方程式

Maxwell 方程式

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} & \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \operatorname{div} \mathbf{B} &= 0 & \operatorname{div} \mathbf{D} &= \rho \end{aligned}$$

電磁波の波動方程式は上記の Maxwell の方程式より

$$\begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{E} &= \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \\ \nabla^2 \mathbf{H} &= \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \end{aligned}$$

と求められる。z 方向に伝搬する平面波を考えると、解は

$$\mathbf{E} = E_0 \exp\{j(kx - \omega t)\}$$

と表すことができる。ここで、 $k$  は波数、 $\omega$  は角周波数である。また、位相速度は  $v = \omega/k$  で表される。解を波動方程式に代入して速度  $v$  を求めると

$$\frac{\omega^2}{k^2} = \frac{1}{\varepsilon \mu} = v^2 \quad \text{より} \quad v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}}$$

となる。物質中の位相速度は

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} = \frac{c_0}{n}$$

と表される。ここで、 $n$  は物質の屈折率である。

いま、 $E_z = H_z = 0$ 、 $\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} = 0$  であるので、 $E_x = E_0 \exp\{j(kx - \omega t)\}$  とすると

$$\frac{dE_x}{dz} = -j\omega\mu H_y$$

これより、物質の固有インピーダンス  $\xi$  は次のようになる。

$$\xi = \frac{E_x}{H_y} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$$

## 電磁波のエネルギー

平面波の伝搬する方向は  $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$  の方向であるので、 $\operatorname{div}(\mathbf{E} \times \mathbf{H})$  を考えると、

$$\operatorname{div}(\mathbf{E} \times \mathbf{H}) = -\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{1}{2} \mu \mathbf{H}^2 + \frac{1}{2} \varepsilon \mathbf{E}^2 \right) - \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial w}{\partial t} - \mathbf{E} \cdot \mathbf{J}$$

となる。 $w$  は磁気エネルギー密度と電気エネルギー密度の和である。ある体積  $V$  について積分すると次のようになる。

$$-\int_V \frac{\partial w}{\partial t} dv = \int_S (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) ds + \int_V \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} dv$$

上式の左辺は体積  $V$  内で単位時間に生じるエネルギーの減少分、右辺第 1 項は単位時間に  $V$  の表面  $S$  を通って外部に放射されるエネルギー、第 2 項は単位時間に熱となって失われるエネルギーを示す。

また、単位面積を通して単位時間に流動するエネルギーを示すポインティングベクトル (Poynting vector)  $\mathbf{P}$  は

$$\mathbf{P} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$$

で表される。

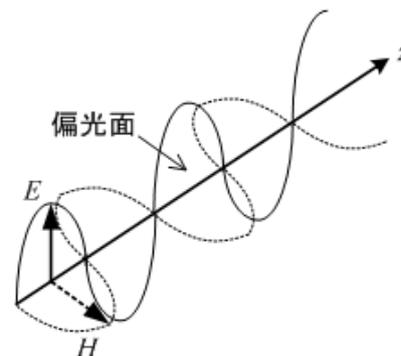


Fig.5 電磁波の伝搬

光の粒子性

1887 年 ヘルツ(Hertz) : 光電効果の発見

1905 年 アインシュタイン(Einstein) : 光量子(light quantum)

光子 1 個あたりのエネルギー :  $E = h\nu$  ( $h$  : プランク定数、 $\nu$  : 振動数)

光電子放出 : 光を金属に当てた時、金属から放出される電子のエネルギー  $E_e$

$E_e = h\nu - \phi$  ( $\phi$  : 金属の仕事関数)

コンプトン効果 Compton effect

X 線を物質に照射すると、一部は透過・吸収し、残りは散乱する。

- ・トムソン散乱(Thomson Scattering) : 同じ波長の電磁波が放射される。
- ・コンプトン散乱(Compton Scattering) : 照射 X 線より長い波長の X 線が放射される。

コンプトン散乱

静止している電子に振動数  $\nu_0$  (波長  $\lambda_0$ ) の光を照射する。

## ・ 散乱前

入射光

エネルギー  $h\nu_0$       運動量  $\frac{h\nu_0}{c}$

静止している電子 (質量  $m_0$ )

エネルギー  $m_0c^2$       運動量 0

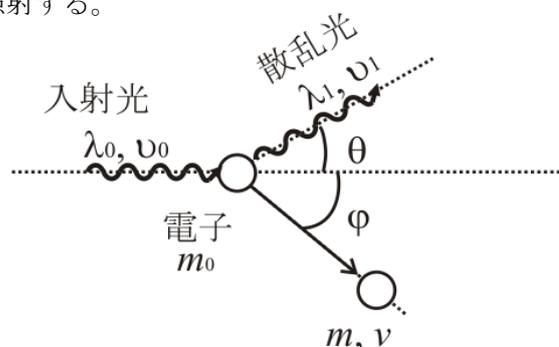
## ・ 散乱後

散乱光

エネルギー  $h\nu_1$       運動量  $\frac{h\nu_1}{c}$

速度  $v$  で運動している電子 (質量  $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ )

エネルギー  $mc^2$       運動量  $mv$



散乱前後の運動量保存則より、左辺を散乱前、右辺を散乱後とすると

$$(\text{水平成分}) \quad \frac{h\nu_0}{c} = \frac{h\nu_1}{c} \cos \theta + mv \cos \varphi \quad \dots(1)$$

$$(\text{垂直成分}) \quad 0 = \frac{h\nu_1}{c} \sin \theta + mv \sin \varphi \quad \dots(2)$$

(1)、(2)式から  $\varphi$  を消去すると

$$m^2 v^2 = \frac{h^2}{\lambda_0^2} + \frac{h^2}{\lambda_1^2} - 2 \frac{h^2}{\lambda_0 \lambda_1} \cos \theta \quad \dots(3)$$

散乱前後のエネルギーの保存則より、左辺を散乱前、右辺を散乱後とすると

$$h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu_1 + mc^2$$

$$\text{この式を波長で表すと} \quad \frac{h}{\lambda_0} + m_0c - \frac{h}{\lambda_1} = mc \quad \dots(4)$$

一方、電子の質量は相対論より  $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$  であるので、両辺を二乗して  $m^2 v^2 =$  の式を作ると、

$$m^2 v^2 = m^2 c^2 - m_0^2 c^2 \quad \dots(5)$$

(5)式に(3)式の  $m^2 v^2$  と(4)式の  $mc$  を代入すると

$$\frac{2h^2}{\lambda_0 \lambda_1} \cos \theta = \frac{2h^2}{\lambda_0 \lambda_1} + 2m_0 c \left( \frac{h}{\lambda_1} - \frac{h}{\lambda_0} \right) \quad \dots(6)$$

が得られる。両辺に  $\frac{\lambda_0 \lambda_1}{2hm_0 c}$  を掛けて、入射光と散乱光の波長の波長差  $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_0$  として  $\Delta\lambda$  について整理すると

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \theta) \quad \dots(7)$$

と求められる。ここで、 $\frac{h}{m_0 c} = 2.426 \times 10^{-12} \text{ m}$  は (電子の) コンプトン波長と呼ばれる。

## 光の放射

- 熱放射(thermal radiation) : 物体が熱を電磁波として放射する現象  
例) 高温で熱した金属
- ルミネセンス(luminescence) : 物体が外部からエネルギーを吸収して励起状態となり、基底状態に戻る時に熱を伴わずに発光する現象  
励起源) 光、X線、電子線、電界、電流など
- 高速運動する荷電粒子からの放射
  - 制動輻射(bremsstrahlung) : 荷電粒子が加速(減速)される時に放射される電磁波  
特徴) 指向性がよい、白色光に近い、放射強度が大きい
  - シンクロトロン輻射(synchrotron radiation) : 荷電粒子を磁場によって円運動させた時に放射される電磁波  
特徴) 指向性が非常に鋭い
  - チェレンコフ輻射(Cherenkov radiation) : 物質中の光速よりも速い速度で荷電粒子が物質内を運動した時に放射される電磁波

物質からの光の放射

- 熱放射(thermal radiation)
- ルミネセンス(luminescence)
- 高速運動する荷電粒子からの放射
  - 制動輻射(bremsstrahlung)
  - シンクロトロン輻射(Synchrotron radiation)
  - チェレンコフ輻射(Cherenkov radiation)

- 熱放射(thermal radiation)

黒体(Blackbody)放射

黒体 (完全放射体) : 外部から入射する光を全て吸収する物質。

温度  $T$  [K] で光を放射する (黒体放射または空洞放射)。

放射強度  $\rho$  と波長  $\lambda$  の関係 (放射スペクトル)

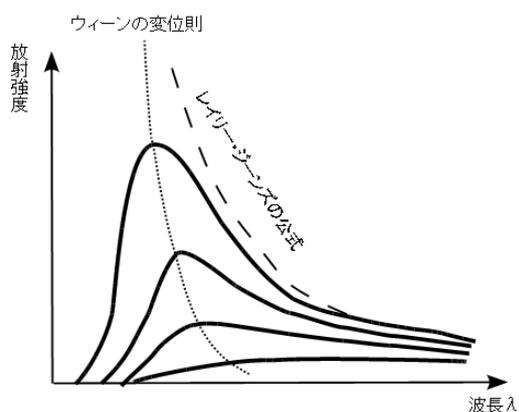


Fig.1 黒体放射スペクトル

- Rayleigh Jeans Law of Radiation (レイリー・ジーンズの公式)

$$\rho(\lambda) = \frac{8\pi kT}{\lambda^4} \quad (\text{長波長側で実験結果と一致})$$

- Wien's displacement law (ウィーンの変位則)

$$\rho(\lambda) = \frac{C_1}{\lambda^5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} \quad (\text{短波長側で実験結果と一致})$$

- Planck's law of black-body radiation (プランクの公式)

$$\rho(\lambda) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1} \quad (\text{上記の両公式をつなぐ公式})$$

…波長  $\lambda$  が大きい領域では、レイリー・ジーンズの公式と一致

…波長  $\lambda$  が小さい領域では、ウィーンの公式と一致

$h$  はプランク定数  $h = 6.6261 \times 10^{-34} \text{ Js}$  と呼び、光のエネルギーは  $h\nu$  の整数倍となる (量子仮説)。

## 光の吸収

半導体での光の吸収

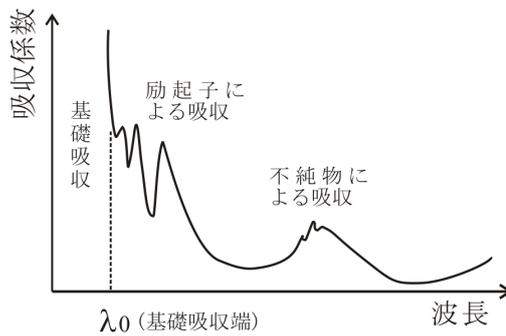


Fig.2 吸収スペクトル

- ・内殻電子による光吸収： 基底準位からの電子の遷移
- ・基礎吸収（固有吸収）： 価電子帯から伝導帯への電子の遷移
- ・不純物励起： 不純物準位を介しての電子の遷移
- ・励起子： 励起子準位への電子の励起（正孔と対になって移動）

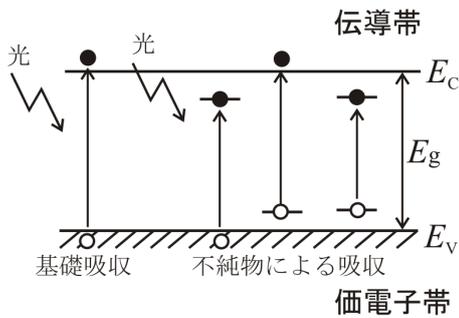


Fig.3 基礎吸収と不純物による吸収

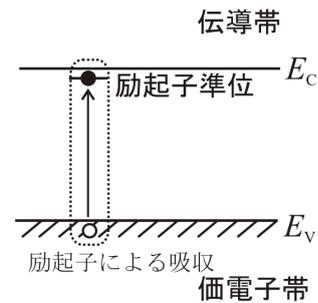


Fig.4 励起子

### Si 結晶の共有結合とキャリア

Fig.1 は Si(シリコン)の殻構造を示す。一番外側の軌道を**最外殻**といい、そこに存在している電子を**価電子(valence electron)**と呼ぶ。Si の場合、価電子は4個であり、最外殻の電子が8個のとき価電子配置が安定するため、隣り合う4つの他の Si 原子と互いに電子を1個共有しあって結合する。これを**共有結合(covalent bond)**と呼び、強い結合力を持っている。

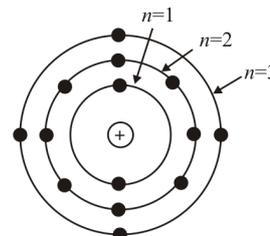


Fig.1 Siの原子モデル

Fig.2 に示すように、半導体に光や熱などの外部エネルギーが与えられると、価電子はそのエネルギーを得て容易に原子核の束縛から離れて自由電子となり得る。電子は負電荷を持っているので、離れた電子の空席は正の電荷を持った穴(孔)と考え、正の電荷を持つ粒子—**正孔(hole)**—のように振る舞う。隣接する価電子がこの孔を埋めるように移動したとき、正孔はそれとは逆に移動すると考える。半導体中の電子と正孔を、電気伝導の担い手(電荷を運ぶもの)という意味で**キャリア(carrier)**と呼ぶ。真性半導体では、正孔の数は自由電子の数と等しくなる ( $n = p = n_i$ )。

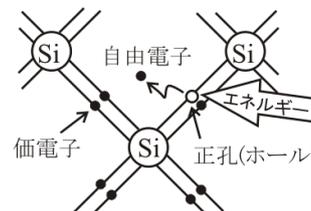


Fig.2 電子正孔対の生成

### エネルギー帯

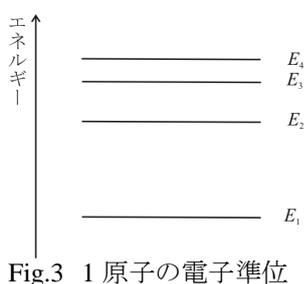


Fig.3 1原子の電子準位

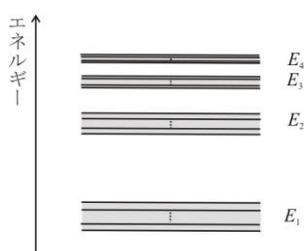


Fig.4 固体中の準位

Fig.3 に一つの原子が孤立した状態での電子のエネルギー状態を示す。このとき、電子はとびとびのエネルギー状態しか取り得ない。この孤立状態の原子にもう一つ原子を近づけてみると原子核を周回する電子は、隣の原子核からの影響を受け、電子のエネルギー準位は分裂する。固体中の原子の様に  $10^{28} \sim 10^{29}$  個/ $m^3$  の原子が密集している場合は、エネルギー準位は原子の数だけ分裂するため、個々の準位も密集するので、これを1つの領域として考える(Fig.4)。この帯状となったエネルギー領域を「**エネルギー帯 energy band**」と呼び、特に電子の入り得る帯域を「**許容帯 allowed band**」、許容帯間の電子の存在できない帯域を「**禁制帯 forbidden band**」という。このようにエネルギー状態を帯状の状態とする考え方を「**エネルギー帯理論 band theory**」という。

電子が存在できる**許容帯**のうち、電子が完全に詰まっている許容帯を**充満帯(filled band)**という。その中で最もエネルギーの高い充満帯を**価電子帯(valence band)**という。充満帯の中の電子は完全に電子が詰まっている状態なので、電子が動き得る空席がないため自由に動くことができない。また、電子が空または一部詰まっている許容帯を**伝導帯(conduction band)**という。この伝導帯にある電子あるいは伝導帯に励起した電子は周りに空席が存在するので自由に動き回ることができ、電気伝導に寄与することができる。このような電子を**伝導電子(conduction electron)**あるいは**自由電子(free electron)**と呼ばれる。

### 導体のエネルギー帯

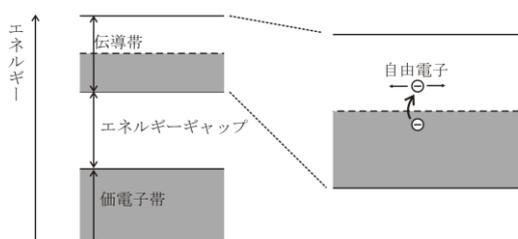


Fig.5 導体のバンド構造

導体(金属)のエネルギーバンド図は Fig.5 に示すように空きがある構造となっている。伝導帯の中の電子は少しのエネルギー(例えば熱)を得て周りより高いエネルギー状態となり、周りには移動できる空席が多いので自由に動くことができる。この状態に電界を加えると電子は容易に移動するので電流として寄与ことができ、良好な導体となる。

### 絶縁体のエネルギー帯

絶縁体では Fig.6 に示すように、電子が完全に詰まった価電子帯の上に大きなエネルギーギャップを隔てて完全に電子が空の状態の伝導帯が存在している。そのため、自由に動くことができる伝導帯に電子が励起するにはエネルギーギャップ以上のエネルギーが必要となるが、絶縁体のエネルギーギャップは大きく簡単には電子が励起できないため（室温程度では励起できない）、伝導電子が存在しないことになり絶縁体となる。

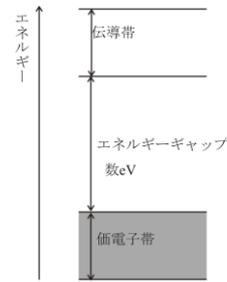


Fig.6 絶縁体のバンド構造

### 真性半導体のエネルギー帯

半導体のエネルギーバンド構造は絶縁体と同じ構造である。ただし、絶縁体と比べてエネルギーギャップが 1eV 程度と小さく、室温程度の熱エネルギーにより容易に伝導帯に電子が励起することができる (Fig.7)。この伝導帯に励起した電子 (数は少ない) が伝導電子として振る舞うため、電気伝導に寄与することになる。半導体のバンド構造を図示する時は、価電子帯の上部から伝導帯の下部 (底) までを表示することが多い。

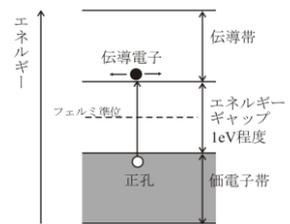


Fig.7 真性半導体のバンド構造

### n 形半導体 (IV族+V族)

V族原子の5個の価電子のうち1個がフリーとなって電気伝導に寄与する (残りの4個は共有結合に使う)。このフリーになった電子がキャリアとなる。また、V族元素をドナーと呼ぶ。室温での n 形半導体のフェルミ準位  $E_{Fn}$  は伝導帯下端  $E_C$  の直ぐ下に位置する。

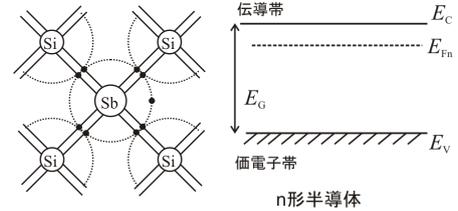


Fig.8 n 形半導体のモデルとフェルミ準位

### p 形半導体 (IV族+III族)

母体IV族原子の価電子をIII族原子が奪って共有結合する。電子の抜けた穴が正孔となって電気伝導に寄与する。この正孔がキャリアとなる。また、III族元素をアクセプタと呼ぶ。室温での p 形半導体のフェルミ準位  $E_{Fp}$  の位置は価電子帯上端  $E_V$  の直ぐ上にある。

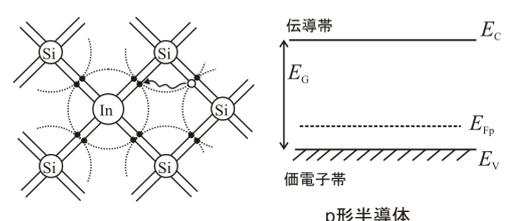


Fig.9 p 形半導体のモデルとフェルミ準位

### 半導体中を流れる電流

**移動度 mobility** : キャリアの動きやすさの度合いを示すパラメータ。  $\mu = \frac{e\tau}{m^*} \left[ \frac{m^2}{Vs} \right]$

#### (1)電界による電流：ドリフト電流

半導体に外部から電圧を掛けた時、電子 (正孔) が外部電界と反対方向 (同方向) へ移動していく運動は**ドリフト運動**と呼ばれる。このドリフト運動する電子または正孔によって流れる電流を**ドリフト電流**という。

$$J = J_e + J_h = e(n\mu_e + p\mu_h)E = \sigma E$$

#### (2)キャリアの拡散による電流：拡散電流

キャリア分布に不均一がある場合、キャリアは濃度が高い方から低い方へと均一になるように移動する。この現象を**拡散(diffusion)現象**という。(電荷を持ったキャリアの時間的な変化) = (電流が流れる) になり、この拡散によって流れる電流を**拡散電流**と呼ぶ。

$$J = J_e + J_h = -e \left( -D_e \frac{dn}{dx} \right) + e \left( -D_h \frac{dp}{dx} \right)$$

移動度  $\mu$  と拡散定数  $D$  を結ぶ関係式を**アインシュタインの関係**という。  $\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{e}$

半導体に流れる電流はドリフト電流と拡散電流を足しあわせたものになる。

## 発光デバイス

### 3.1 ルミネセンス(luminescence)

エネルギー準位間の遷移に基づく発光

#### 3.1.1 ルミネセンスの種類

- (1) フォトルミネセンス：光、紫外線、X 線等で励起 (ex) 蛍光灯
- (2) カソードルミネセンス：電子線励起 (ex) CRT (ブラウン管)
- (3) ガス放電による励起： (ex) ガスレーザ、プラズマディスプレイ
- (4) 真性エレクトロルミネセンス (固有電界励起)：電界による励起 (ex) 無機 EL、有機 EL
- (5) 注入型エレクトロルミネセンス：キャリア注入による励起 (ex) LED、半導体レーザ(LD)
- (6) シンチレーション：放射線による励起
- (7) 化学ルミネセンス：化学反応、分子間エネルギー遷移による励起
- (8) 生物発光：生物が行う化学反応

- ・ 蛍光(fluorescence)：発光寿命が短いもの
- ・ 燐光(phosphorescence)：発光寿命が長いもの

#### 3.1.2 半導体の発光機構

励起状態から電子・正孔の再結合によって発光する。

- ・ 放射再結合：フォトン放出する (発光する)
- ・ 非放射再結合：フォノンを放射する (発光しない)

(1) バンド間遷移 (教科書 p.33 図 3.4)

- a) 直接遷移型 (価電子帯頂上と伝導帯の底の  $k$  値が同じ。発光確率大きい)：GaAs, AlSb, InSb, ZnO
- b) 間接遷移型 (価電子帯頂上と伝導帯の底の  $k$  値が異なる。発光確率小さい)：Si, Ge, GaP

(2) 不純物準位による遷移

(3) 励起子 (エキシトン) による遷移

## 3.2 発光ダイオード

### 3.2.1 発光の仕組み

LED(Light Emitting Diode)：構造は pn 接合で、順バイアスを印加することで、それぞれの領域に少数キャリアを注入して、キャリア (電子と正孔) が再結合することによって発光する。

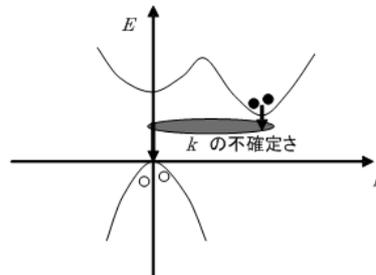
GaAs (直接遷移型)： $E_g = 1.43\text{eV}$  (発光波長 910nm)

GaP (間接遷移型)： $E_g = 2.26\text{eV}$  → 発光効率低い

GaAsP (混晶)：混晶の割合により  $E_g$  を制御

### 3.2.2 等電子 (アイソエレクトロニック) トラップの形成による発光効率の改善

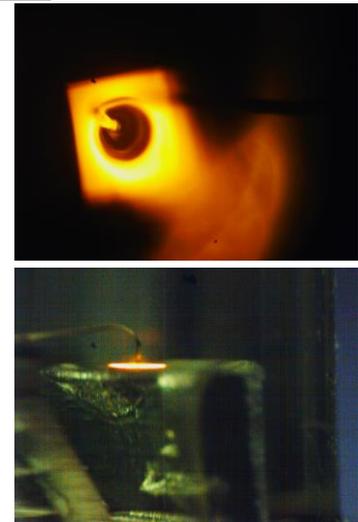
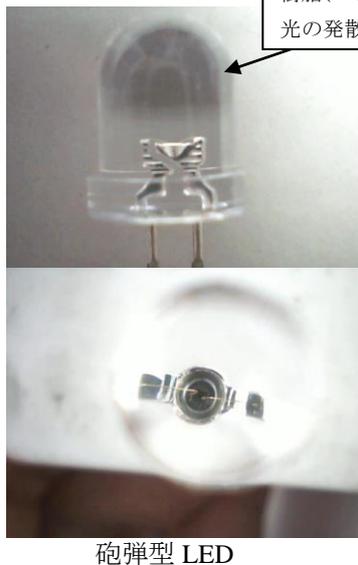
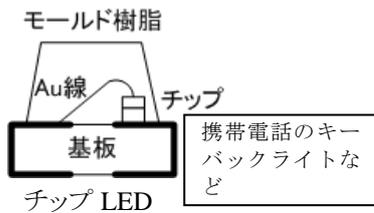
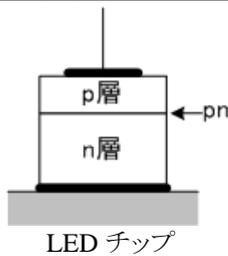
電子を引きつけやすい窒素 N を半導体 GaP に添加することで、電子を N 原子に捕捉させ、電子の存在位置を (おおよそ) 確定させる。ハイゼンベルグの不確定性原理により、位置が確定されると運動量  $p$  (すなわち波数  $k$ ) が不確定になるので、波数はどんな  $k$  値でも持てるようになる。このように考えると、間接遷移型の GaP でも、直接遷移型と同じように再結合が行われる (発光効率が大きくなる)。



### 3.2.3 ダブルヘテロ接合による発光効率の改善

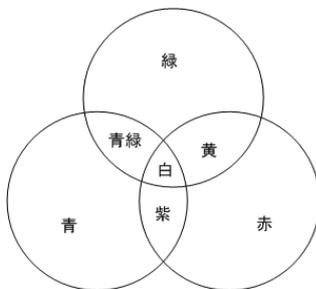
ヘテロ接合とは、バンドギャップ  $E_g$  が異なる (小さい) 材料を間に挟んだ pn 接合で、真ん中の発光層にキャリアを閉じ込めることによって再結合の確率を大きくして発光効率を上げる。

### 3.2.4 発光ダイオードの構造



### 3.2.5 発光ダイオードの応用

光の三原色



1960~70 年 赤色 LED の実用化

1993 年 青色 LED の発明

1996 年 青 LED + 黄色蛍光体による白色 LED の開発

現在、ほとんどの LED は III-V 族化合物半導体が使われている。

II	III	IV	V	VI
	B	C	N	O
	Al	Si	P	S
Zn	Ga	Ge	As	Se
Cd	In	Sn	Sb	Te
Hg	Tl	Pb	Bi	Po

短波長  
↑  
↓  
長波長

#### 短波長 LED

青 : InGaN

発光層に In をドーブ

紫 : AlInGaN

短波長化 → Al を増

長波長化 → In を増

#### 応用、用途

赤外 LED : リモコン

信号機

大型ディスプレイ

液晶ディスプレイのバックライト

植物育成照明 (光合成)

医療用照明光源 (内視鏡、手術用照明など)

紫外 LED : 殺菌、光硬化樹脂やマニキュアの硬化、光触媒(酸化チタン触媒)

#### 表示用 LED

7 セグメント (小数点を含めて 8 セグメント)

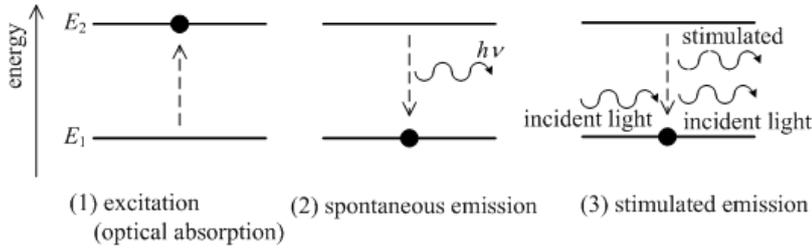
16 セグメント (アルファベット表示)

ドットマトリックス (漢字、1 文字あたり 256 ドット 16×16)

### 3.3 レーザ

#### Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (誘導放出による光の増幅作用)

コヒーレンス (可干渉性) : 振動数、位相が揃った波がかなり長く保たれている光



#### 3.3.1 半導体レーザ

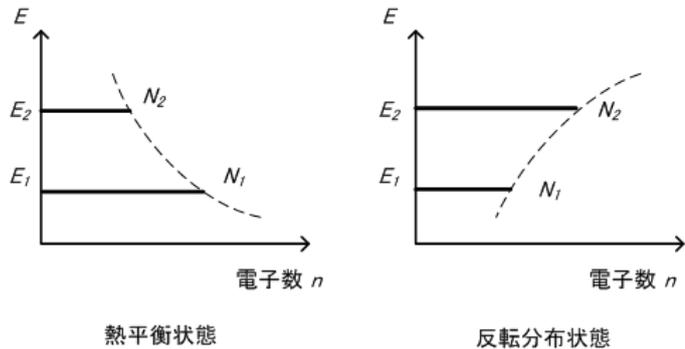
##### 反転分布 population inversion

・熱平衡時

$$N_2 = N_1 \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right)$$

・分布反転時

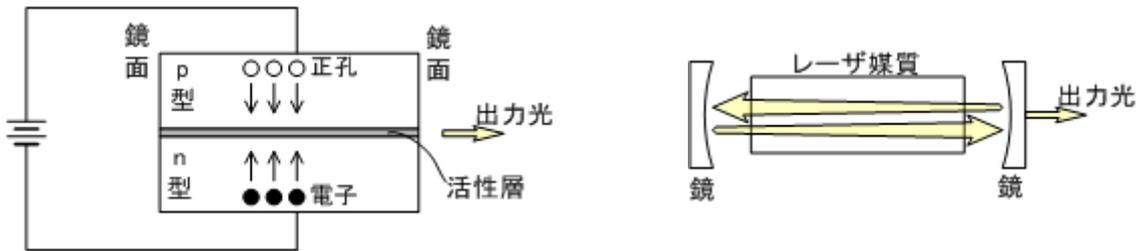
$$N_2 = N_1 \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{k(-T)}\right)$$



##### 発振条件

電子分布を  $N_2 > N_1$  とする。反転分布状態にすることを「ポンピング pumping」という。

##### レーザの構造



##### ダブルヘテロ接合

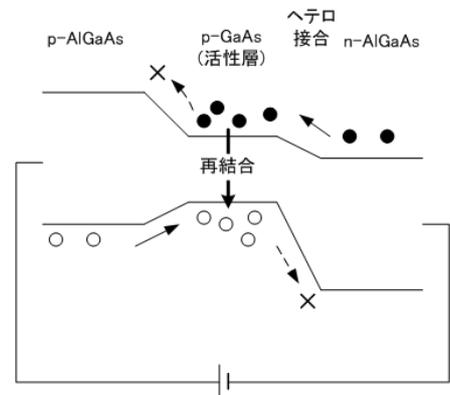
・キャリアの閉じ込め

ヘテロ構造により、注入された少数キャリアを活性層に閉じ込める。

・光の閉じ込め

活性層の屈折率が周りの層よりも大きい材料を選ぶと、活性層内に光を閉じ込めることができる。

活性層で、「キャリア」と「光」の閉じ込めの二重の効果



### 3.3.2 固体レーザー



(1) ルビーレーザー

ルビー  $\text{Cr}^{3+} : \text{Al}_2\text{O}_3$  …Cr が  $\text{Cr}^{3+}$  の形でサファイア結晶 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) の  $\text{Al}^{3+}$  と一部置換。  
 アレキサンドライト  $\text{Cr}^{3+} : \text{BeAl}_2\text{O}_4$  … $\text{Al}^{3+}$  が  $\text{Cr}^{3+}$  で置換。発振波長  $\lambda=720\sim 820\text{nm}$   
 チタンサファイアレーザー  $\text{Ti}^{3+} : \text{Al}_2\text{O}_3$  …発振波長  $\lambda=700\sim 1100\text{nm}$  (可変)  
 ポンピング光源 : キセノン (フラッシュ) ランプ、水銀灯等

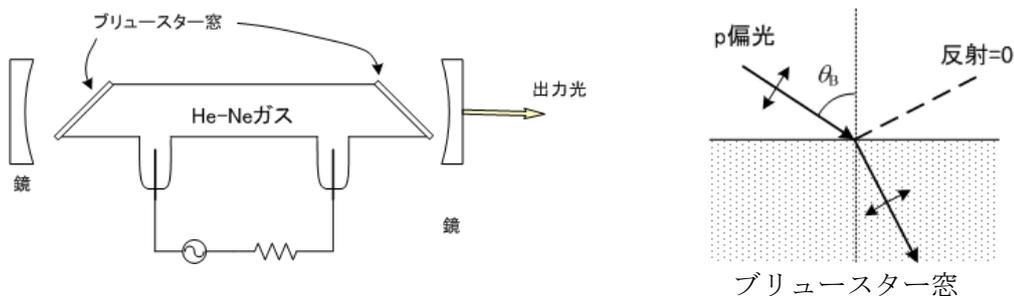
(2) YAG レーザ (イットリウム アルミニウム ガーネット … $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ )

主な発振波長 :  $\lambda=1060\text{nm}$  (赤外光)  
 ポンピング光源 : クリプトンアークランプ、発光ダイオード、半導体レーザー等  
 高出力、連続発振、レーザー加工に利用される。

### 3.3.3 気体レーザー

(1) He-Ne レーザ

共鳴遷移 : He 原子と Ne 原子間のエネルギー交換  
 放電によるポンピング。発振波長 :  $\lambda=632.8\text{nm}$  (赤色)



(2) 炭酸ガスレーザー (CO<sub>2</sub> レーザ)

$\text{N}_2$  から  $\text{CO}_2$  への共鳴遷移を利用する。  
 励起する放電エネルギーは分子振動として吸収される (振動励起状態)。  
 分子振動モード : 伸縮 (対称)、屈伸、伸縮 (非対称)  
 発振波長 :  $\lambda=10.6\mu\text{m}$ 、 $9.6\mu\text{m}$  (赤外線)。  
 大出力、連続発振、加工用レーザー (金属切断、溶接)

## 4 光センサ

### 4.2 可視光の測定

#### 光度 luminous intensity

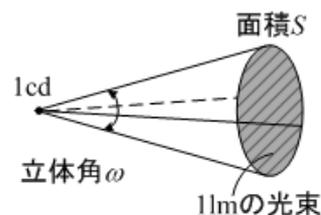
- ・単位: cd (カンデラ)
- ・定義: 1 気圧下で完全黒体を加熱し、白金の溶け出す温度 (2042K) になった時、 $1\text{cm}^2$  の平らな表面から放射される光の中の垂直方向の明るさの  $1/60 \rightarrow 1\text{cd}$

#### 光束 luminous flux

- ・単位: lm (ルーメン)
- ・1cd の光は全周囲 ( $4\pi$  ラジアン) に発散し、 $4\pi$  ルーメンの光を放射する。  
すなわち、1cd は立体角  $1\text{sr}$  (ステラジアン) に放射される 1lm の光束。  
 $1[\text{cd}] = 1[\text{lm}/\text{sr}]$
- ・光束: 視感度特性をもった目で見たときの視感に基づいた放射量を表した値

$$\Phi = K_m \cdot V_\lambda \cdot \Phi_e$$

ここで、 $\Phi$ : 光束、 $K_m$ : 波長 555nm の 1W の光束 (=683 lm/W)、 $V_\lambda$ : 比視感度での任意の波長の時の値、 $\Phi_e$ : 放射束

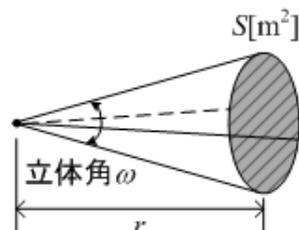


#### 照度 illuminance

- ・単位: lx (ルクス) =  $[\text{lm}/\text{m}^2]$
- ・光に照らされた面の明るさ = 単位面積あたりの光束

$$1[\text{lx}] = 1[\text{lm}/\text{m}^2]$$

$r = 1\text{ m}$  のとき、 $S = \omega [\text{m}^2]$  なので照度は  $1 [\text{lx}]$  となる。



#### センサ感度

$$\text{ルーメン感度} = \frac{\text{センサの出力電圧}[\text{V}]}{\text{光束}[\text{lm}]} \left( = \frac{\text{センサの出力電流}[\text{A}]}{\text{光束}[\text{lm}]} \right)$$

$$\text{ルクス感度} = \frac{\text{センサの出力電圧}[\text{V}]}{\text{照度}[\text{lx}]} \left( = \frac{\text{センサの出力電流}[\text{A}]}{\text{照度}[\text{lx}]} \right)$$

$$\text{感度} = \frac{\text{センサの出力電圧}[\text{V}]}{\text{入力}[\text{W}]}$$

#### 標準光源

- ・A 光源: 色温度 2854K のガス入りタングステン電球の光 (普通の家庭用電球とほぼ同じ)
- ・B 光源: A 光源にフィルターをかけた光。太陽直射光に近い光。
- ・C 光源: 昼光に近い光になるようにフィルターをかけた光。

### 4.3 赤外線測定

#### 4.3.1 赤外線放射体

- 温度  $T$  [K] の黒体からの赤外線放射量  $I$  [W/m<sup>2</sup>]

$$I = \sigma T^4$$

$\sigma$  はステファン・ボルツマン定数 ( $5.670 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>K)

- ウィーンの変位則

$$\lambda_{\max} \times T = 2898 \quad (\text{一定})$$

- 放射率

$$\varepsilon = \frac{\text{実際の物体放射量}}{\text{黒体放射量}}$$

#### 4.3.2 赤外線センサの評価法

$$\text{感度 } R = \frac{\text{センサ出力電圧 } V_0}{\text{入射光 } P} \quad [\text{V/W}]$$

$$\text{検出能 } D = \frac{\text{感度 } R}{\text{ノイズ } V_N} \quad [1/\text{W}]$$

NEP (雑音等価パワー noise equivalent power)

$$\text{NEP} = \frac{1}{D} = \frac{P}{\frac{V_0}{V_N}} \quad [\text{W}]$$

帯域幅  $\Delta f$  を定義して

$$\text{NEP} = \frac{1}{D \sqrt{\Delta f}} = \frac{P}{\left( \frac{V_0}{V_N} \right) \sqrt{\Delta f}} \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{Hz}^{1/2}} \right]$$

$$\text{比検出能 } D^* = D \sqrt{\Delta f \cdot A_s} \quad \left[ \frac{\text{cmHz}^{1/2}}{\text{W}} \right]$$

$A_s$  : センサの受光面積 [cm<sup>2</sup>]

#### 4.4 可視光センサ

##### 4.4.1 光電子変換管

外部光電効果(光電子放出効果): 光照射で電子を放出する現象

(1) 光電管

・2 極電子管

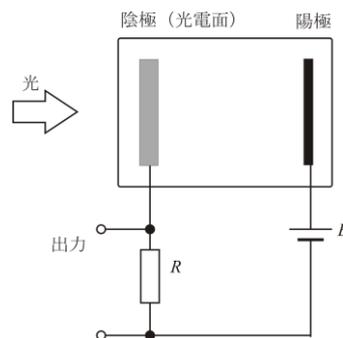
・化学・医用分析機器、レーザ光計測などに利用

(2) 光電子増倍管(photo-multiplier、フォトマル)

・2 次電子放出効果で増倍、100 万～1000 万倍

・高感度、高速時間応答

・ニュートリノ検出



光電管

##### 4.4.2 半導体光センサ

(1) 光導電形センサ(photo-conductive sensor、PC 形)

・CdS(硫化カドミウム)センサ(CdS セル)

くし型電極構造: 効率を上げるため、長さ  $l$  を短くして電極面積  $S$  を大きくする

可視光用: CdS、CdSe      赤外用: PbS

(2) 光起電力形センサ(photo-voltaic sensor、PV 形)

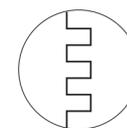
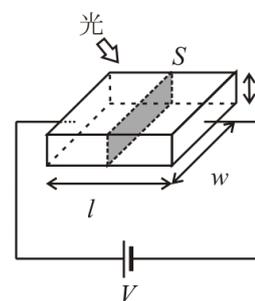
①pn 接合形: 空乏層内で光を吸収 → 電子・正孔対生成

②ショットキー形: 金属-半導体接触

③ヘテロ接合: 異種材料による pn 接合

・フォトダイオード

・太陽電池



CdS

#### 4.5 赤外線センサ

量子形: 電子・正孔対生成を利用、高速応答、波長域狭い、冷却が必要

熱形: 温度上昇による物性変化を利用、応答遅い、波長域広い、室温動作

##### 4.5.1 量子形センサ

センサ材料:  $E_g$  が小さい材料

・近赤外(0.8～3.0 $\mu\text{m}$ ): PbS 硫化鉛 ( $E_g=0.42\text{eV}$ )

・中赤外: InSb ( $E_g=0.23\text{eV}$ ) ... III-V 族化合物半導体、移動度が高い、液体窒素による冷却が必要

・遠赤外: HgCdTe ( $E_g=0.09\text{eV}$ )

##### 4.5.2 熱形センサ

熱電効果(焦電センサ、pyroelectric sensor)

・一定温度

分極は安定、表面に周囲の浮遊電荷が吸引 → 表面の電荷は見かけ上、 $\pm 0$ (中性)

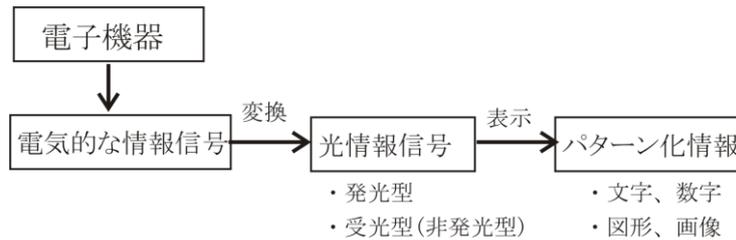
・温度変化直後

温度変化により焦電体内部の電極の大きさが変化、浮遊電荷は分極変化より遅いので短い時間取り残される → この分の電荷が表面に誘起される

## 5 表示デバイス (Electric Display device)

Human machine interface:

各種電子機器(から) → 人間 (へ) 視覚を通してさまざまな情報を伝達する電子デバイス



### 電子ディスプレイデバイスの分類

#### 発光型(Emissive type display, Active display)

- ・ **CRT: Cathode Ray Tube (ブラウン管)**  
...真空中の加速電子ビームの蛍光体への衝突
- ・ **PDP: Plasma Display Panel (プラズマディスプレイ)**  
...ガス放電に伴う発光等 (放電による紫外線を用いた蛍光体の発光が主流)
- ・ **ELD: Electroluminescent Display (EL ディスプレイ)**  
**IELD(Inorganic ELD)無機 EL ディスプレイ**  
...高電圧印加による蛍光体の励起
- ・ **OELD, OLED(Organic EL, Organic LED)有機 EL ディスプレイ**  
...注入キャリア再結合による励起
- ・ **VFD: Vacuum Fluorescent Display (蛍光表示管)**  
...熱電子の蛍光体への照射による発光
- ・ **LED: Light Emitting Diode Display (発光ダイオード)**  
...pn 接合へのキャリア注入による再結合発光
- ・ **FED: Field Emission Display (電界放出ディスプレイ)**  
...画素毎に電子銃と蛍光体の一体化

#### 非発光型, 受光型(Non emissive type display, Passive Display)

- ・ **LCD: Liquid Crystal Display (液晶ディスプレイ)**  
...液晶の電気光学効果
- ・ **ECD: Electro-chromic Display (エレクトロクロミックディスプレイ)**  
...電気化学反応による着色

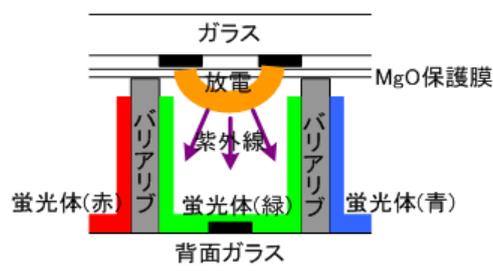
～電子ペーパー～

- ・ **EPID: Electrophoretic Image Display (電気泳動方式表示ディスプレイ)**  
...着色微粒子による電気泳動
- ・ **TBD: Twisting Ball Display (ツイストボール方式表示ディスプレイ)**  
...微小球 (半球面で色が異なる) の回転

### 5.2 プラズマディスプレイパネル PDP

放電現象を利用したディスプレイ。高速応答、大画面、高精細、高画質

- ・モノクロ表示:Ne ガス放電によるオレンジ色発光+黒の 2 色
- ・カラー表示:He+Xe または Ne+Xe ガス放電で紫外線を放出し  
蛍光体で R (赤)、G (緑)、B (青) 発光。
- ・液晶ディスプレイ(LCD)と比較して、  
利点:応答速度、広視野角、大画面  
課題:コスト削減、寿命



PDP

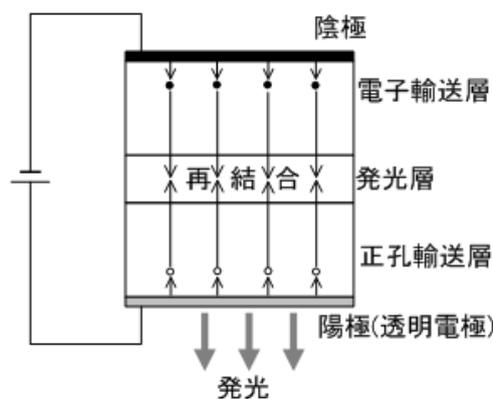
### 5.3 エレクトロルミネセンス EL

#### 無機 EL

- ・真性(固有)エレクトロルミネセンス
- ・発光体:ZnS 蛍光体粉末(分散型) → モノクロ  
ZnS 薄膜(薄膜型) → フルカラー
- ・発光中心:Cu、Cl、Alなどを添加
- ・問題点:高駆動電圧、フルカラー化困難

#### 有機 EL

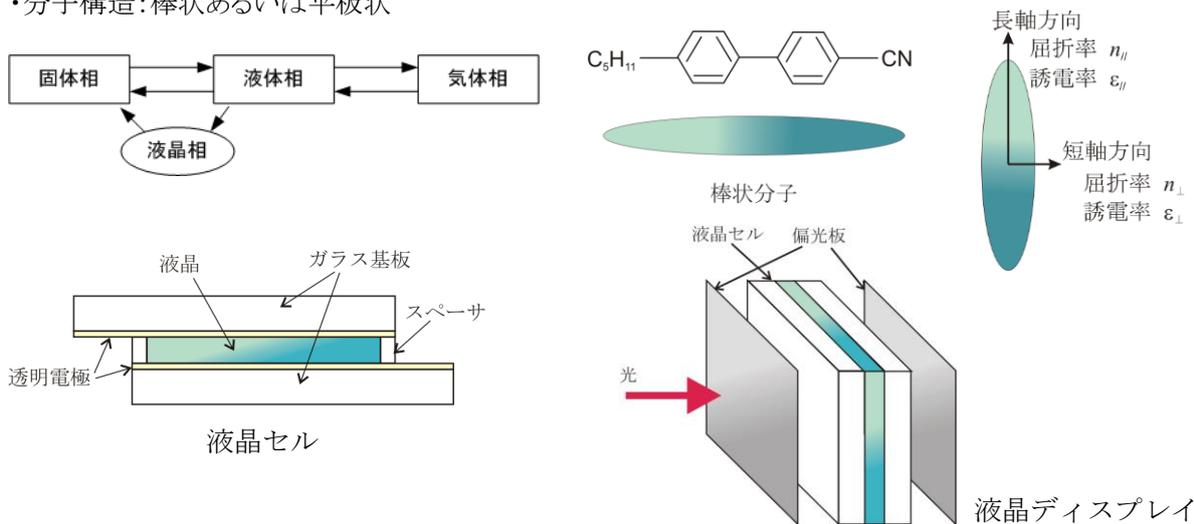
- ・電流注入型(電子、正孔を電極から注入)
- ・電子輸送層:Alq<sub>3</sub>(アルミキノリノール錯体)
- ・正孔輸送層:TPD(テトラフェニルジアミン誘導体)
- ・利点:自己発光型、高コントラスト、高速応答、広視野角
- ・問題点:寿命(発光効率をトレードオフ)



有機 EL

### 5.4 液晶表示素子

- ・液晶相:液体と同じ流動性と、固体と同じ分子配列の規則性の二つの性質を併せ持つ
- ・分子構造:棒状あるいは平板状



- ・応答速度:TV(60Hz)表示では 16ms 以下が必要。材料・構造改善により高速化。
- ・広視野角化、大画面化
- ・バックライトが必要(非自己発光)
- ・コントラスト比(白黒比):黒表示時に光を完全に遮断できない → コントラスト比が低い
- ・ドット落ち