

講義予定

- 1. 光エレクトロニクスとは
- 2. 光の性質1: マクスウェルの方程式
- 3. 光の性質2: 物質中での光
- 4. 光の性質3: 干渉、回折、屈折
- 5. 光と物質の相互作用: 光の吸収・放出
- 6. レーザーの原理: 誘導放出・反転分布
- 7. 種々の光源: ランプ、LED、レーザー
- 8. 半導体レーザー
- 9. 光検出器
- 10. 撮像装置
- 11. 光導波路: 光ファイバーの原理
- 12. 光の制御: 光変調法
- 13. 光ディスクについて
- 14. 非線形光学現象について
- 15. **まとめ**

光エレクトロニクスとは

光の利用: 人類の歴史……

太陽光 → 照明  
火 → 照明、暖房、調理、通信

19~20世紀: 電磁気学の知識の増大

↓  
電氣の利用 照明、動力、通信

通信: 電氣信号の制御  
= エレクトロニクスが発展

エレクトロニクス: 半導体、トランジスタ  
集積回路(IC: Integrated Circuit)  
LSI(大規模集積回路: Large Scale IC)  
CPU (Central Processing Unit)

スーパーコンピューターを越える(データ量)×(演算速度)

↓  
エレクトロニクスでは不可能

↓  
光エレクトロニクスへ

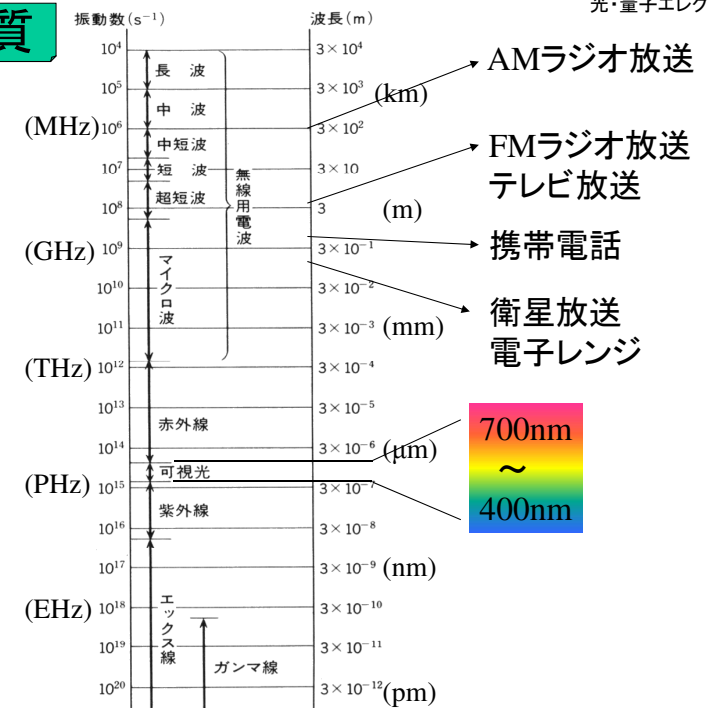
エレクトロニクス  
+  
光技術

現在の利用例

- 光ストレージ (CD, DVD, BD……)
- 光ファイバー通信 (電話、インターネット)
- CCDカメラ  
など

光の性質

光は電磁波



## マクスウェルの方程式:微分形

$$\nabla \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \frac{\rho(\mathbf{r}, t)}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = \mu_0 \mathbf{i}(\mathbf{r}, t)$$

マクスウェルの方程式  
(Maxwell's equation)

ただし  $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t) = \epsilon_0 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$  電束密度(D), 電場の強さ(E)

$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$  磁場の強さ(H), 磁束密度(B)

## 波動方程式

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = 0$$

に平面波の解を代入

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$$

$$\mathbf{k}^2 = \epsilon_0 \mu_0 \omega^2 \longrightarrow k = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \longrightarrow v = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

真空中の光速  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$

等方的な物質の場合

$$\mathbf{P}(\mathbf{r}) = \epsilon_0 \chi_e \mathbf{E}(\mathbf{r})$$

電気感受率  $> 0$  : 電場と同じ向き

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}) = \epsilon_0 \mathbf{E}(\mathbf{r}) + \mathbf{P}(\mathbf{r}) = \epsilon_0 \mathbf{E}(\mathbf{r}) + \epsilon_0 \chi_e \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \epsilon \mathbf{E}(\mathbf{r})$$

比誘電率  $\kappa = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} > 1$   $\searrow$  物質の誘電率

物質(誘電体)中の静電場

$$\int_S \mathbf{D}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{S} = \int_V \rho(\mathbf{r}) dV$$

$$\oint_C \mathbf{E}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{s} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}) = \rho(\mathbf{r})$$

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0$$

磁化と磁場の強さ 磁性体中

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mu_0 \mathbf{H}(\mathbf{r}) + \mu_0 \mathbf{M}(\mathbf{r})$$

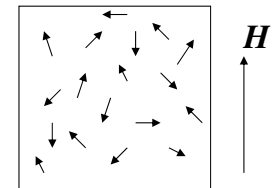
磁化ベクトル

$$\mathbf{M}(\mathbf{r}) = \chi_m \mathbf{H}(\mathbf{r})$$

磁化率

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \mu_0 \mathbf{H}(\mathbf{r}) + \mu_0 \mathbf{M}(\mathbf{r}) = \mu_0 (1 + \chi_m) \mathbf{H}(\mathbf{r}) = \underline{\mu} \mathbf{H}(\mathbf{r})$$

透磁率



外部磁場Hにより、  
内部に磁化Mが生じる。

物質(磁性体)中の静磁場

$$\int_S \mathbf{B}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{S} = 0$$

$$\oint_C \mathbf{H}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{s} = \int_S \mathbf{i}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{S}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}) = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{i}(\mathbf{r})$$

物質 (誘電体:  $i=0$ ) 中のマクスウェルの方程式

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) &= \rho(\mathbf{r}, t) \\ \nabla \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) - \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} &= 0 \end{aligned}$$

ただし

$$\begin{aligned} \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) &= \epsilon_0 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{P}(\mathbf{r}, t) \\ &= \epsilon_0 \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \epsilon_0 \chi_e \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \\ &= \epsilon \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \\ \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) &= \mu_0 \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) + \mu_0 \mathbf{M}(\mathbf{r}, t) \\ &= \mu_0 (1 + \chi_m) \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) \\ &= \mu \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) \end{aligned}$$

$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ : 電場,  $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$ : 電束密度  
 $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ : 磁場,  $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ : 磁束密度  
 $\mathbf{P}(\mathbf{r}, t)$ : 分極密度,  $\mathbf{M}(\mathbf{r}, t)$ : 磁化  
 $\epsilon$ : 誘電率,  $\mu$ : 透磁率,  $\chi_e$ : 電気感受率

真空中では  
 $\epsilon = \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$   
 $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

物質中の電磁波

波動方程式:  $\epsilon_0, \mu_0 \longrightarrow \epsilon, \mu$

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \epsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad \text{物質中の光速: } v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$

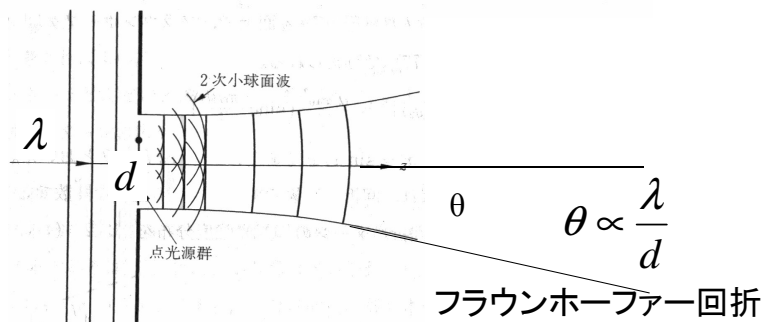
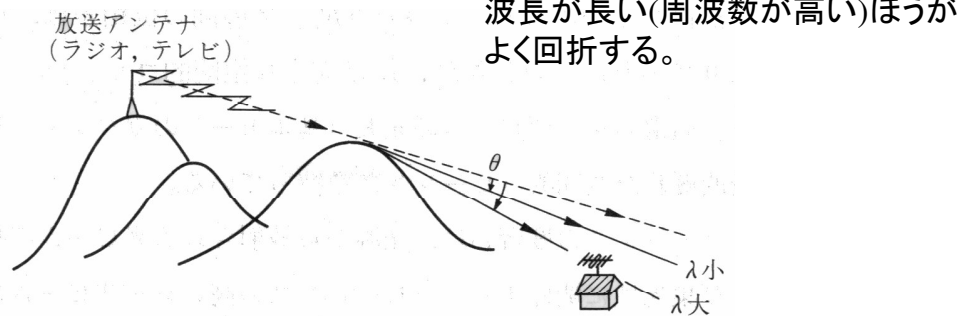
$$\text{物質の絶対屈折率: } n = \frac{c}{v} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} \approx \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} > 1$$

屈折率  $n$  の物質中では光の波長は真空中の  $1/n$  倍、波数は  $n$  倍

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E}_0 = \omega \mathbf{B}_0, \quad \mathbf{k} \times \mathbf{B}_0 = -\omega \mu \epsilon \mathbf{E}_0$$

$$\longrightarrow Z = \frac{|\mathbf{E}_0|}{|\mathbf{H}_0|} = \frac{|\mathbf{E}_0|}{|\mathbf{B}_0| / \mu} = \frac{\omega \mu}{k} = \frac{\omega \mu}{\omega \sqrt{\epsilon \mu}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad \text{固有インピーダンス}$$

光の回折



光の反射、屈折

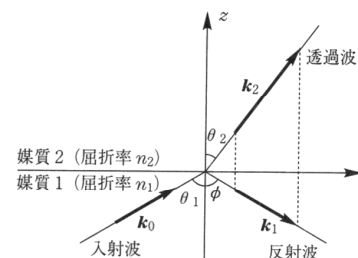


図 2・6 反射と屈折における  $k$  ベクトルの関係

入射波  $\mathbf{E}_0 \exp\{i(\omega t - \mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r})\}$   
 反射波  $\mathbf{E}_1 \exp\{i(\omega t - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r})\}$   
 屈折波  $\mathbf{E}_2 \exp\{i(\omega t - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r})\}$

電場は境界面 ( $z=0$ ) で接線方向が連続

$$\mathbf{E}_{0t} \exp\{-ik_{0y}y\} + \mathbf{E}_{1t} \exp\{-i(k_{1x}x + k_{1y}y)\} = \mathbf{E}_{2t} \exp\{-i(k_{2x}x + k_{2y}y)\}$$

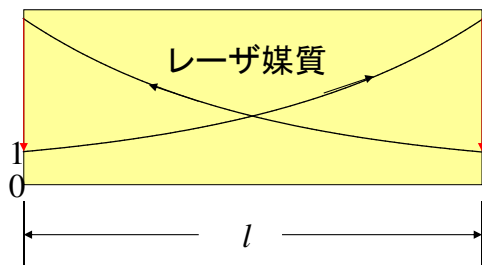
$\downarrow z=0$  面内の  $x, y$  に関係なく成立のために

$$k_{1x} = k_{2x} = 0, \quad k_{0y} = k_{1y} = k_{2y}$$

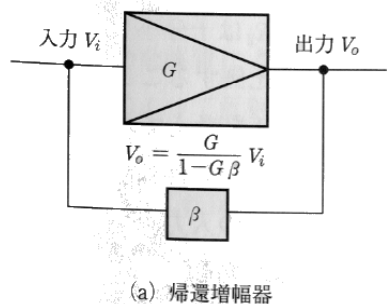
$$\frac{k_0 \sin \theta_1}{\sin \phi} = \frac{k_1 \sin \phi}{\sin \theta_2} = k_2 \sin \theta_2$$

$$\theta_1 = \phi, \quad n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

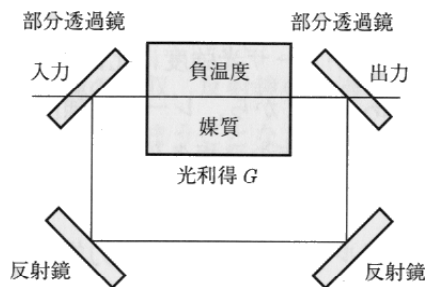
スネルの法則



$\exp(gl) = G$  利得  
出力を $\beta$ 倍して入力に戻す。  
増幅率:  $\frac{G}{(1-G\beta)}$



(a) 帰還増幅器



(b) 帰還光増幅器

$$\frac{dn_2}{dt} = -W_L(n_2 - n_1)N_P - w_{21}n_2 + R_2$$

$$\frac{dn_1}{dt} = W_L(n_2 - n_1)N_P + w_{21}n_2 - w_{10}n_1$$

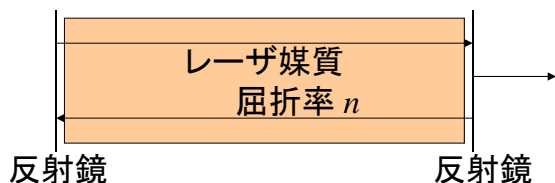
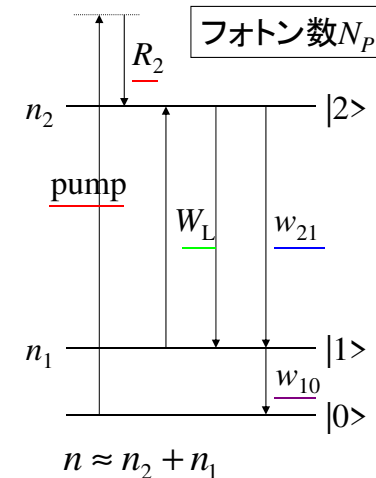
定常状態  $\frac{d}{dt} = 0$

$$n_2 - n_1 = R_2 \frac{1 - w_{21}/w_{10}}{W_L N_P + w_{21}}$$

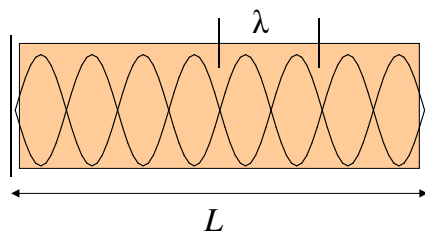
反転分布( $n_2 - n_1 > 0$ )のためには

$$1 - \frac{w_{21}}{w_{10}} > 0 \rightarrow w_{10} > w_{21} \rightarrow \tau_{10} < \tau_{21}$$

$|2\rangle$ の寿命のほうが $|1\rangle$ の寿命より長い



負温度(反転分布)のレーザ媒質によるレーザ発振

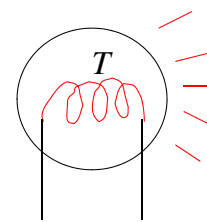


$$nL = \frac{\lambda_m}{2} m \quad m: \text{整数}$$

縦モード

$$\lambda_m = \frac{2nL}{m}$$

1. 白熱電球



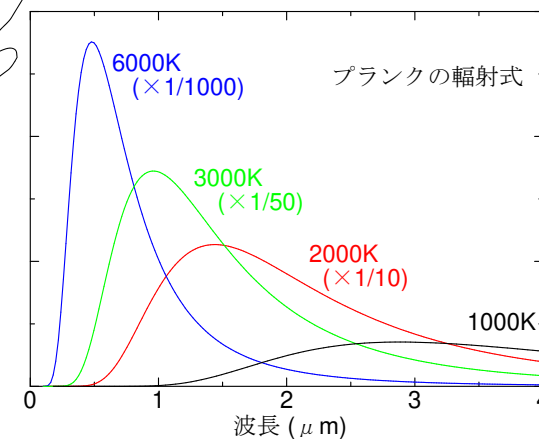
連続スペクトル

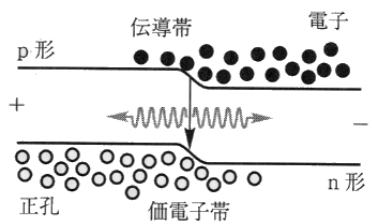
黒体放射: プランクの輻射式

$$I(\lambda)d\lambda \propto \frac{1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1} d\lambda$$

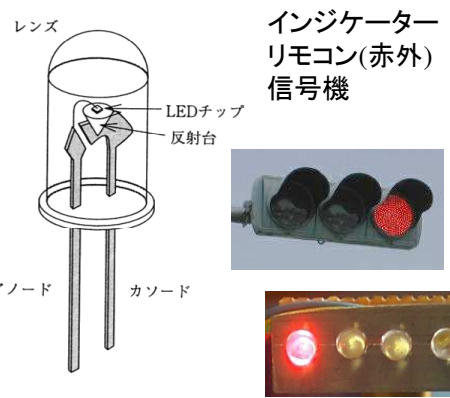
ウィーンの変位則

$$\lambda_{\max} T = 2897.8 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$





発光色	半導体材料 (活性体)	発光波長 [nm]	遷移系
青	InGaN	450	直接
	SiC (Al, N)	470	間接
緑	GaP	555	間接
	GaP (N)	565	間接
黄	GaAs <sub>0.1</sub> P <sub>0.9</sub> (N)	583	間接
	GaAs <sub>0.15</sub> P <sub>0.85</sub> (N)	588	間接
橙	GaAs <sub>0.25</sub> P <sub>0.75</sub> (N)	610	間接
	GaAs <sub>0.35</sub> P <sub>0.65</sub> (N)	630	間接
赤	GaAs <sub>0.6</sub> P <sub>0.4</sub>	660	直接
	Al <sub>0.35</sub> Ga <sub>0.65</sub> As	660	直接
	GaP (Zn, O)	700	間接
赤外	Al <sub>0.15</sub> Ga <sub>0.85</sub> As	780	直接
	Al <sub>0.03</sub> Ga <sub>0.97</sub> As	850	直接
	GaAs (Zn)	900	直接
	GaAs (Si)	940	直接
	Ga <sub>0.24</sub> In <sub>0.76</sub> As <sub>0.55</sub> P <sub>0.45</sub>	1300	直接
	Ga <sub>0.35</sub> In <sub>0.65</sub> As <sub>0.79</sub> P <sub>0.21</sub>	1550	直接



インジケータリモコン(赤外)信号機

○固体レーザー

- ・ルビーレーザー
- ・Nd:YAGレーザー
- ・ガラスレーザー
- ・チタンサファイアレーザー

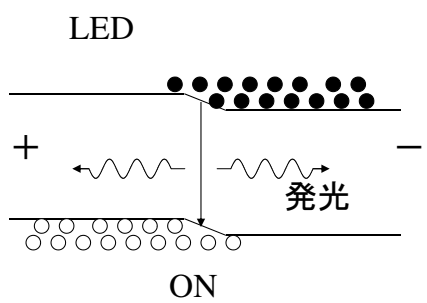
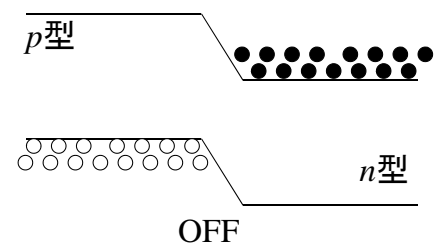
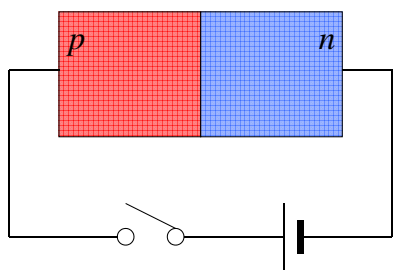
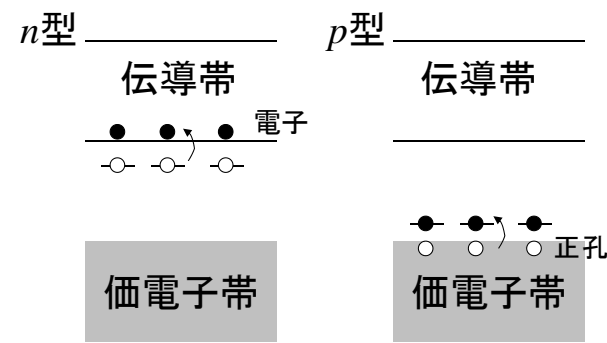
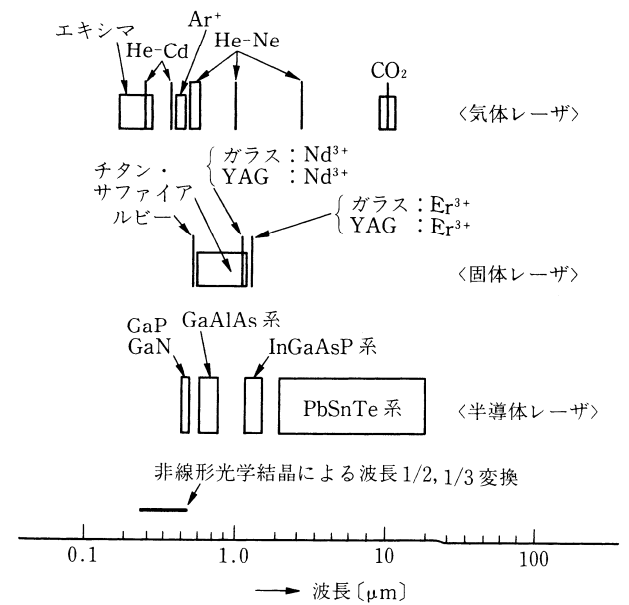
○気体レーザー

- ・HeNeレーザー
- ・HeCdレーザー
- ・N<sub>2</sub>レーザー
- ・Ar<sup>+</sup>レーザー
- ・CO<sub>2</sub>レーザー
- ・エキシマレーザー

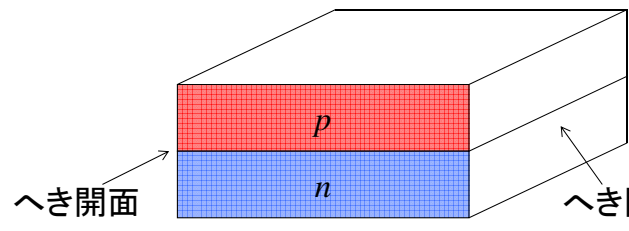
○半導体レーザー

○その他のレーザー

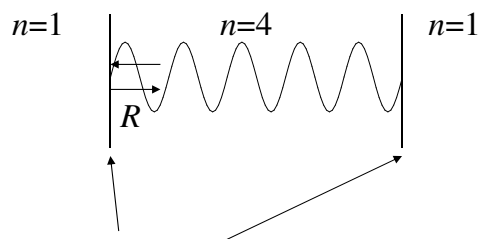
- ・色素レーザー
- ・OPO (Optical Parametric Oscillator)



半導体レーザー



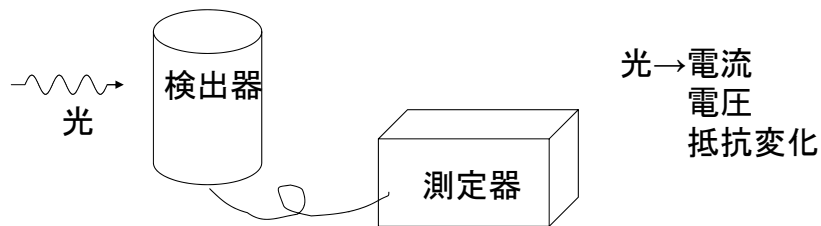
原子面の精度で平坦かつ平行



結晶へき開面=反射鏡

内部反射率が高い  
屈折率3~4  
反射率30~40%

$$R = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2}$$



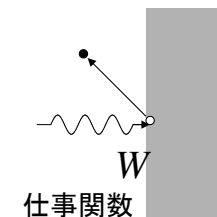
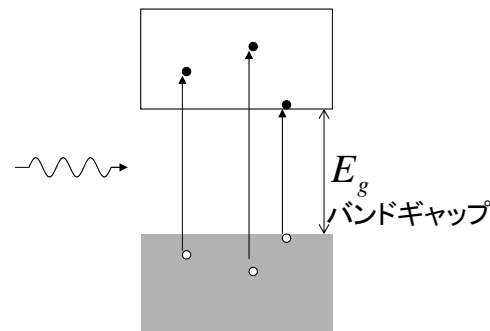
- 量子型光検出器
  - 内部光電効果型
    - ・光起電力型
    - ・光伝導型
  - 外部光電効果型
- 熱型光検出器

○量子型光検出器

光子のエネルギー → キャリアー(電子・正孔)生成

●内部光電効果型

●外部光電効果



電流・電圧変化(光起電力型)  
電気伝導度(抵抗)変化(光伝導型)

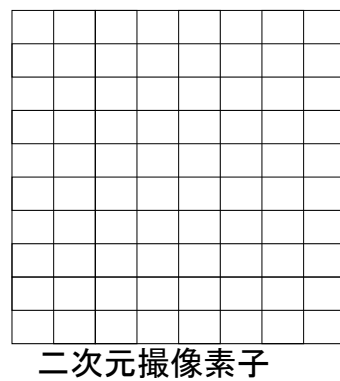
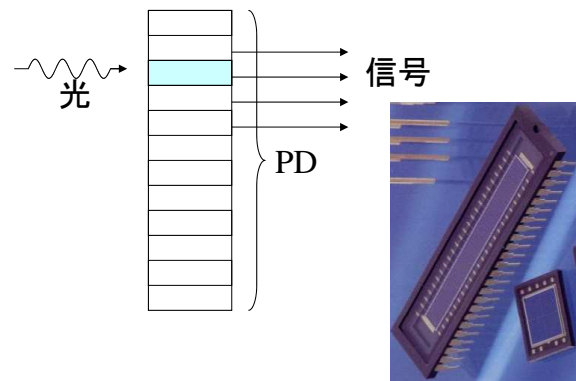
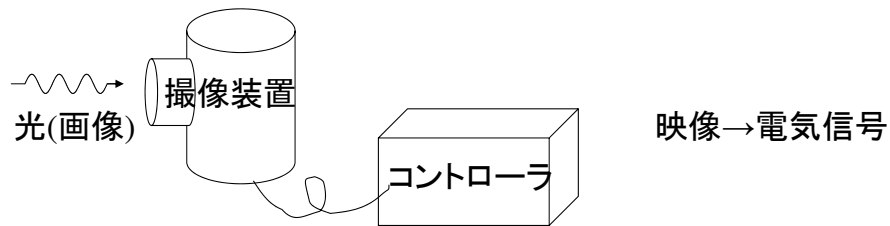
光電効果

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} \approx \frac{1.240}{E_g [eV]} [\mu m]$$

検出限界波長

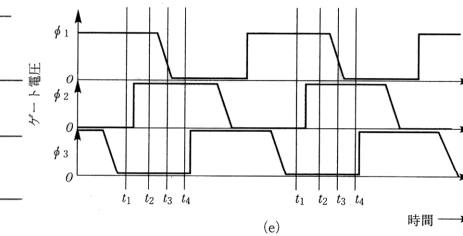
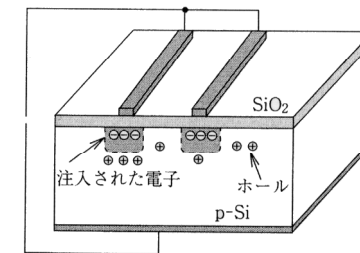
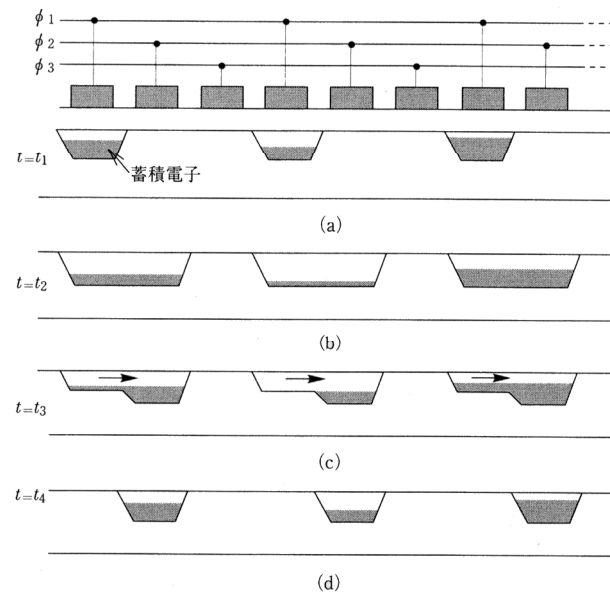
$$\lambda_c = \frac{hc}{W}$$

撮像装置



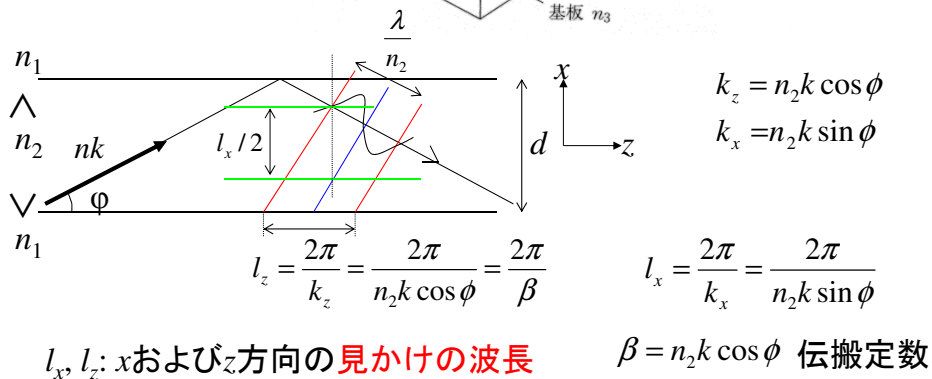
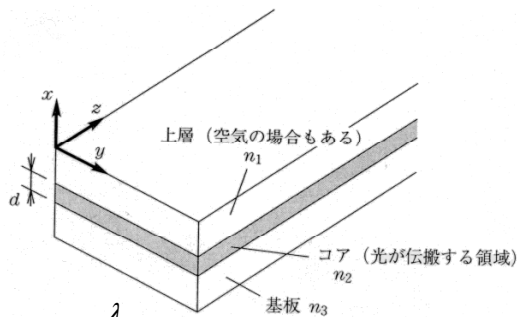
光信号の順次読み出し

CCDの電荷転送



光導波路

- 半導体導波路
- 光ファイバー



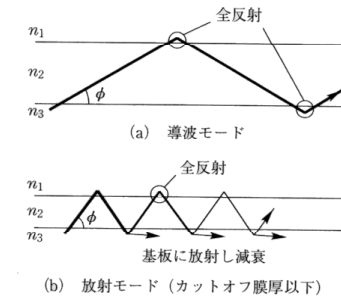
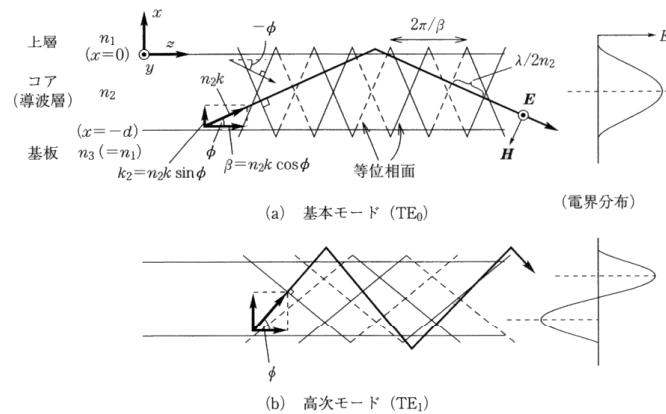
導波路内に安定に電磁界が存在する条件

→ x方向に定常波

→ 全反射可能な角度

$2dn_2k \sin \phi = 2\pi m \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$   
モード

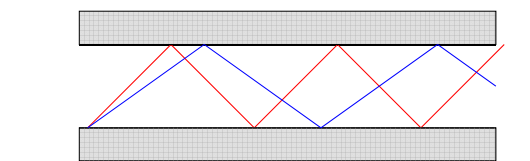
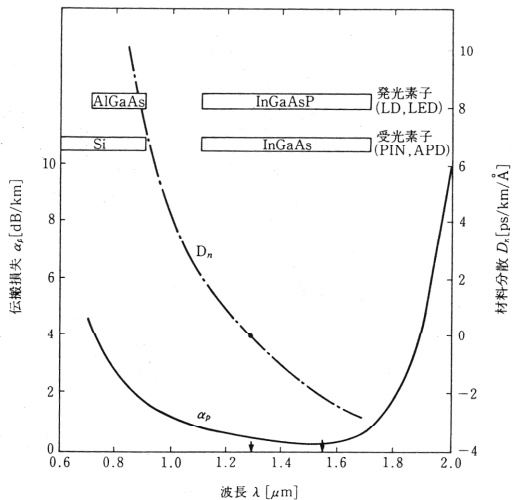
$\cos \phi > \frac{n_1}{n_2}$



2つの分散

材料分散: 屈折率が波長に依存

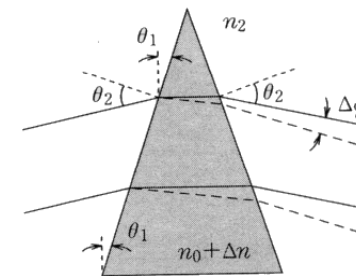
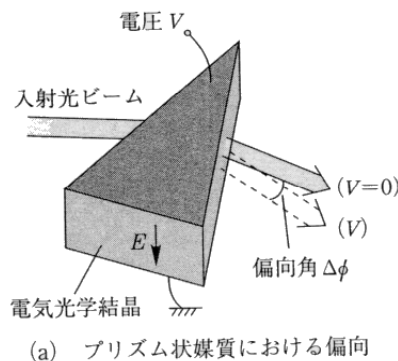
モード分散: モードにより速度が異なる



1.3umでは、材料分散が無い。

シングルモードファイバではモード分散はない。

電気光学素子

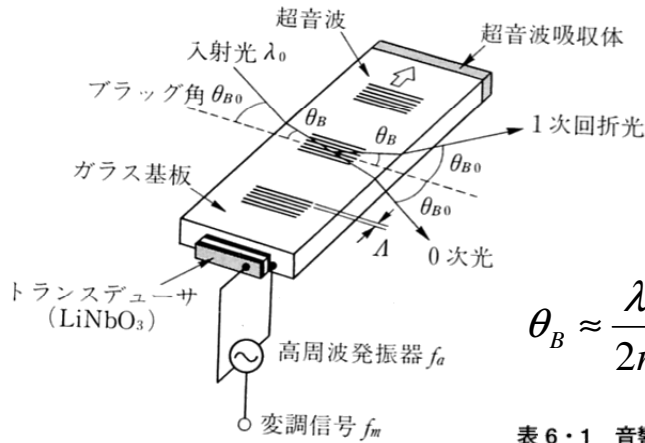


$\Delta n \propto E$

$\Delta \phi \approx \frac{2\Delta n \sin \theta_1}{n_2 \cos \theta_2}$

印加電圧に比例

音響光学素子 (AOモジュレーター)



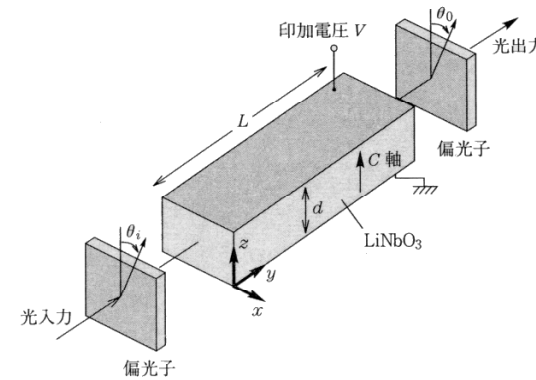
弾性波によるひずみ  
↓  
屈折率の変化  
↓  
屈折率の回折格子

$$\theta_B \approx \frac{\lambda_0 f_a}{2n_0 v_a} \quad \text{周波数に比例}$$

表 6・1 音響光学偏向材料 (λ = 0.6328 μm)

	音速 [km/s]	屈折率	M (10 <sup>-15</sup> s <sup>3</sup> /kg)
LiNbO <sub>3</sub>	6.57 (縦波 [100])	2.20/2.286	7.0
TeO <sub>2</sub>	0.616 (横波 [110])	2.26	793
PbMoO <sub>4</sub>	3.63 (縦波 [001])	2.262	36.1
水	1.49 (縦波)	1.33	126

電気光学効果による変調



$$n_x = n_o - aE$$

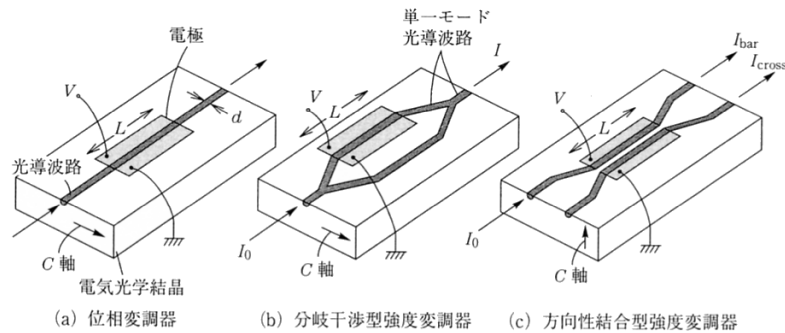
$$n_z = n_e - bE$$

屈折率変化が電場の一次  
→ ポッケルス効果

x, z方向の屈折率が変わる

x, z方向の電場の位相が変わる  
→ 入射と出射の偏光方向が変わる  
→ 出口の偏光子で選択  
→ 強度変化

電気光学効果による変調



長さLの部分の屈折率変化Δnによる光学長の変化ΔL

$$\Delta L = L\Delta n$$

ΔLに伴う位相変化Δφ

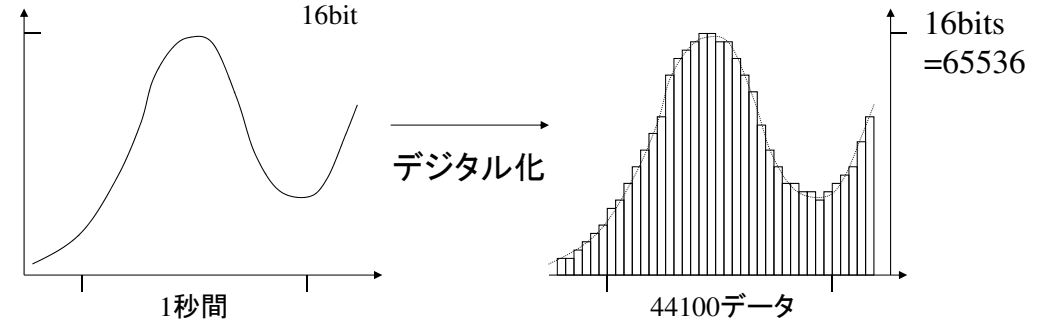
$$\Delta\phi = kL\Delta n = \frac{2\pi L\Delta n}{\lambda}$$

光ディスク

音楽用CD: 1981 Sony, Philips

音楽データ → ADコンバータ → デジタルデータ

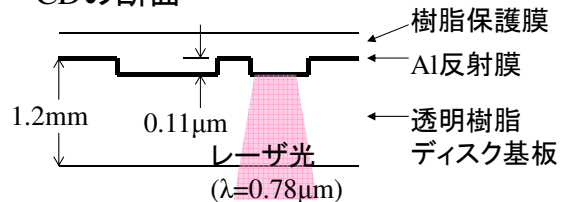
サンプリングレート: 44.1kHz  
16bit



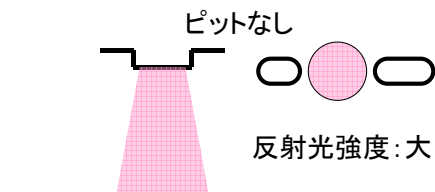
CD: 74分 → 約800MBのデータ



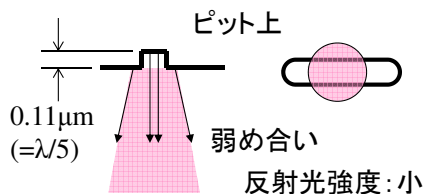
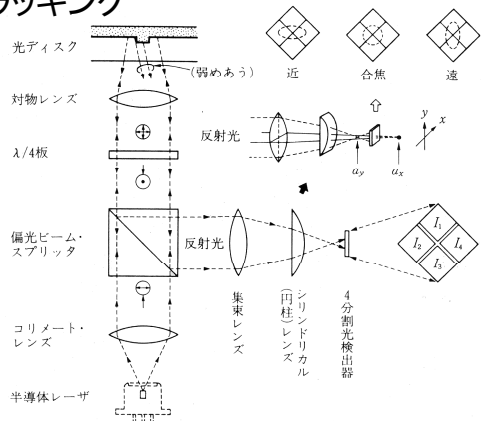
CDの断面



信号の読出し



トラッキング



$$\lambda \rightarrow d \propto \frac{\lambda}{NA} = \frac{\lambda}{\sin \theta}$$

映像データ

例えば100万画素、フルカラー(8bit×RGB)、1秒間に30枚(30fps)  
 → 1000000 × 3 × 30 = 90MB/s → CDに9秒弱しか記録できない  
 → 2時間の映画=CD 800枚!!

Discの大容量化 & データ圧縮

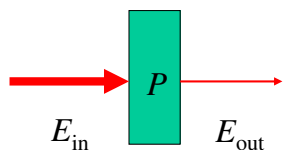


大容量化

CD (0.8GB) → DVD (5GB) → Blu ray Disc (25GB) (片面単層の場合)

- 短波長化  
 CD (0.78µm) → DVD (0.65µm) → BR (0.41µm)
  - NAを大きくする  
 CD (0.45) → DVD (0.60) → BR (0.85)
  - 二層化、高密度化(ランドとグルーブにデータ) → 記録面積の増大
- } スポットサイズの減少

非線形光学現象



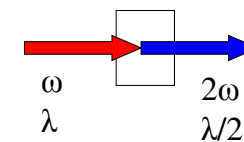
$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= \mathbf{P}_L + \mathbf{P}_{NL} = \epsilon_0 \chi^{(1)} \mathbf{E} + \mathbf{P}_{NL} \\ &= \epsilon_0 \chi^{(1)} \mathbf{E} + \epsilon_0 \chi^{(2)} \mathbf{E}\mathbf{E} + \epsilon_0 \chi^{(3)} \mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots \\ &= \epsilon_0 (\chi^{(1)} + \chi^{(2)} \mathbf{E} + \chi^{(3)} \mathbf{E}\mathbf{E} + \dots) \mathbf{E} \end{aligned}$$

1. 強い光電場Eが物質に入射
2. 物質中に電場に比例しない分極P<sub>NL</sub>が発生
3. その分極が電場を発生させて外部の電場と混ざる
4. 非線形信号として出力される

2次の非線形性

$$2\text{次の分極 } P^{(2)}(z,t) = \epsilon_0 \chi^{(2)} E(z,t)E(z,t)$$

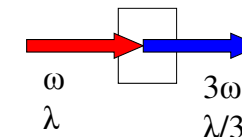
→ 2ω<sub>1</sub>, 2ω<sub>2</sub> (第2高調波発生, SHG),  
 ω<sub>1</sub>+ω<sub>2</sub> (和周波発生, SFG),  
 ω<sub>1</sub>-ω<sub>2</sub> (差周波発生, DFG)



3次の非線形性

$$3\text{次の分極 } P^{(3)}(z,t) = \epsilon_0 \chi^{(3)} E(z,t)E(z,t)E(z,t)$$

• 第3高調波発生 (THG):



## ・吸収飽和、光力一効果

$$P = P^{(1)} + P^{(3)} = \varepsilon_0 \chi^{(1)} E + \varepsilon_0 \chi^{(3)} E^3 = \varepsilon_0 (\chi^{(1)} + \chi^{(3)} E^2) E$$

$$= \varepsilon_0 (\chi^{(1)} + \chi^{(3)} I) E = \varepsilon_0 \chi(I) E$$

$$D = \varepsilon_0 E + P = \varepsilon_0 E + \varepsilon_0 \chi(I) E = \varepsilon(I) E$$

$$\hat{n}(I) = \sqrt{\frac{\varepsilon(I)}{\varepsilon_0}} = \sqrt{1 + \chi(I)}$$

$= n(I) + i\kappa(I)$  複素屈折率 → 実部: 屈折率、虚部: 消衰係数

屈折率、吸収係数(透過率)が光の強度に依存

→ 光スイッチング

