

第3回

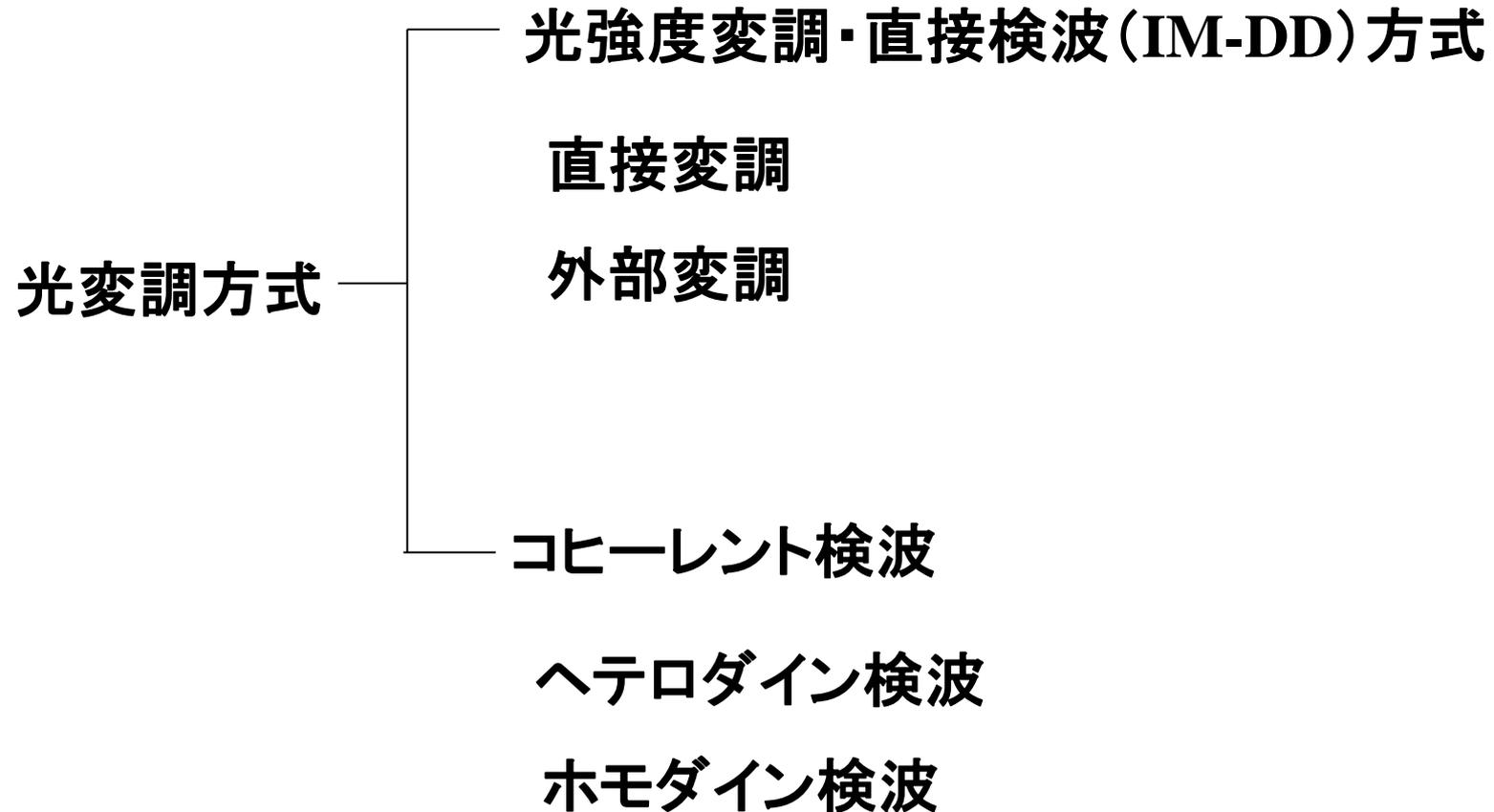
光変復調技術(1)

2013年10月22日(火)

第2章

光変復調技術

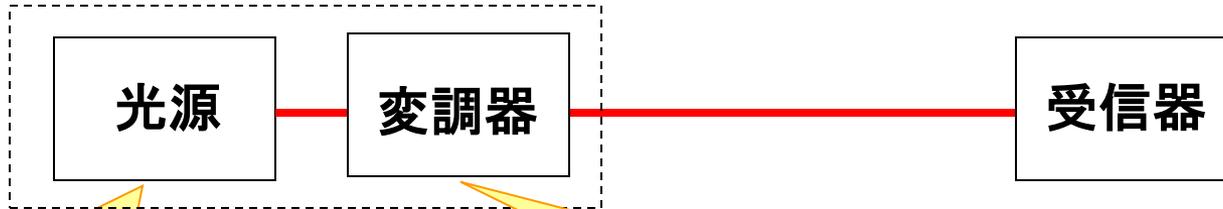
- 2-1. バイナリ変調方式と光送受信デバイス
- 2-2. 多値変調方式
- 2-3. デジタルコヒーレント方式
- 2-4. OFDM
- 2-5. モード多重伝送の信号生成・受信とMIMO



変調符号と変調信号 (バイナリ符号)

信号伝送における送信の役割

送信器

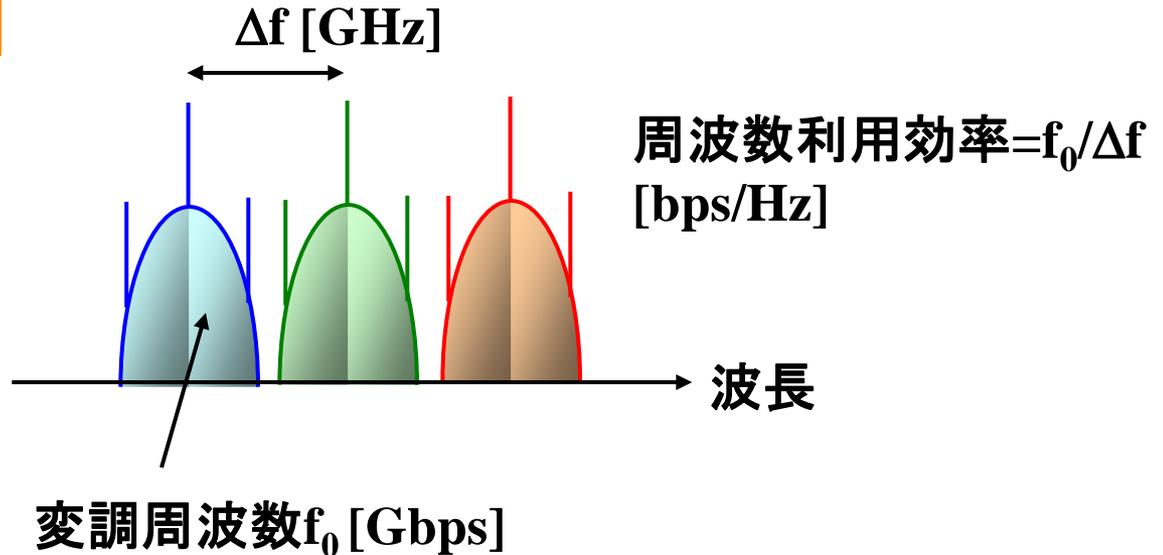


半導体レーザ(LD)

- ・必要なパワーを与える
- ・高周波数の搬送波 (約190THz)

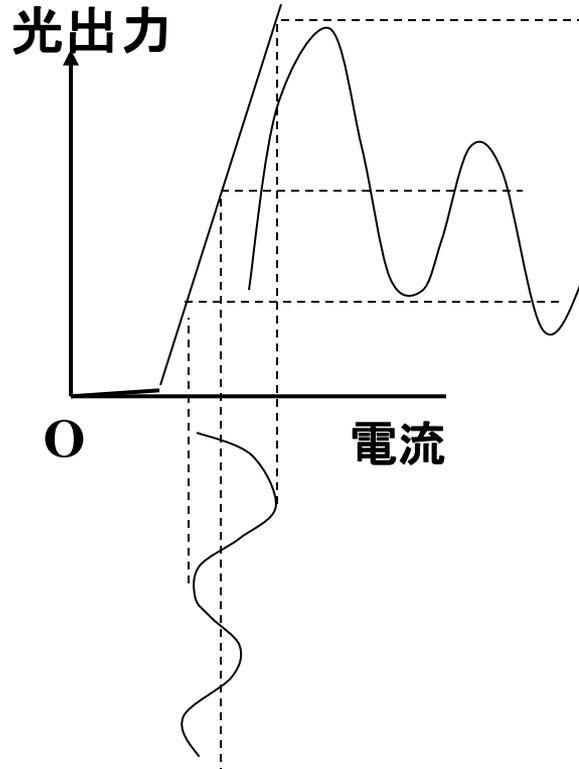
変調器

- ・符号化により情報伝達

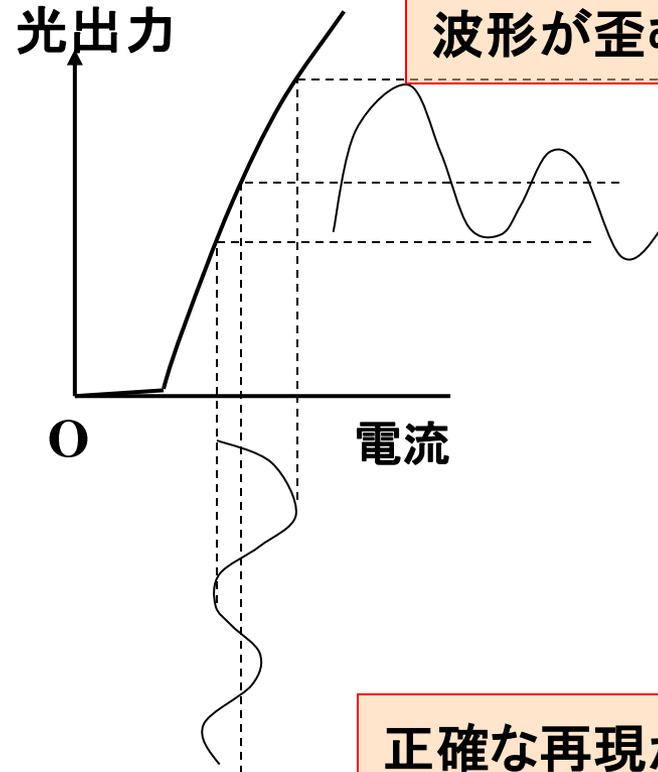
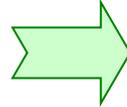


デジタル方式の利点

アナログ方式

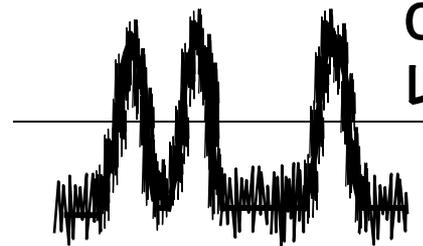


線形性の劣化

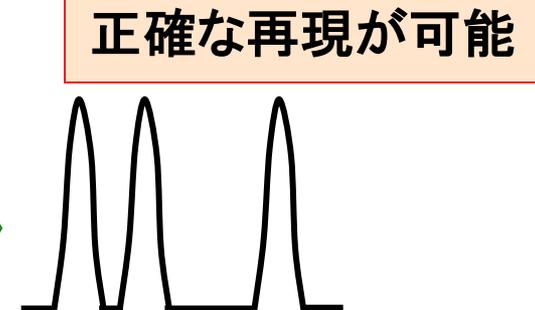
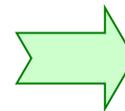


高出力側の
波形が歪む

デジタル方式



0・1識別
レベル

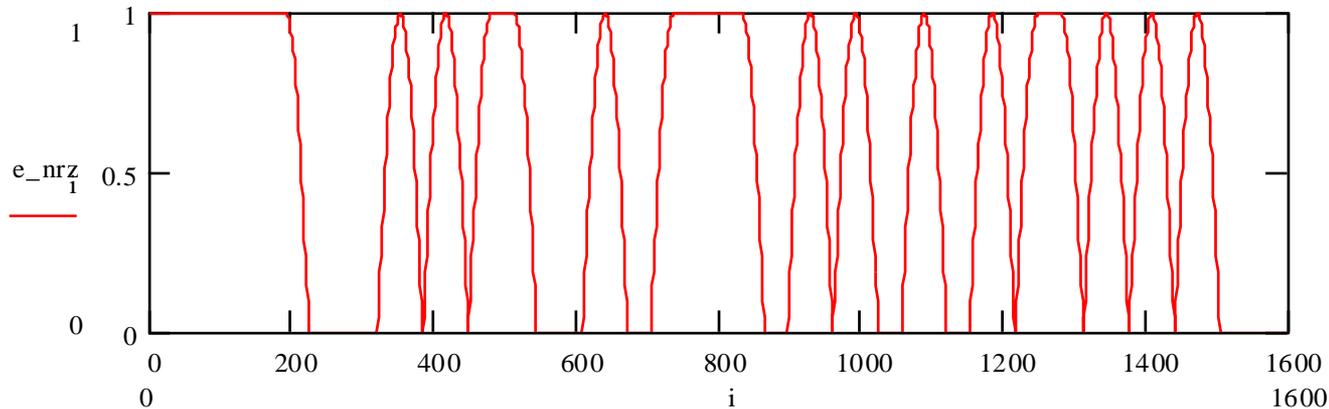


正確な再現が可能

M系列(Maximal-length linear shift register sequences, M-sequences)とは？

- 擬似ランダム符号 (Pseudo random code, PN code) の一種
- 符号長 m のM系列の周期: $2^m - 1$

符号長7のM系列の解析例



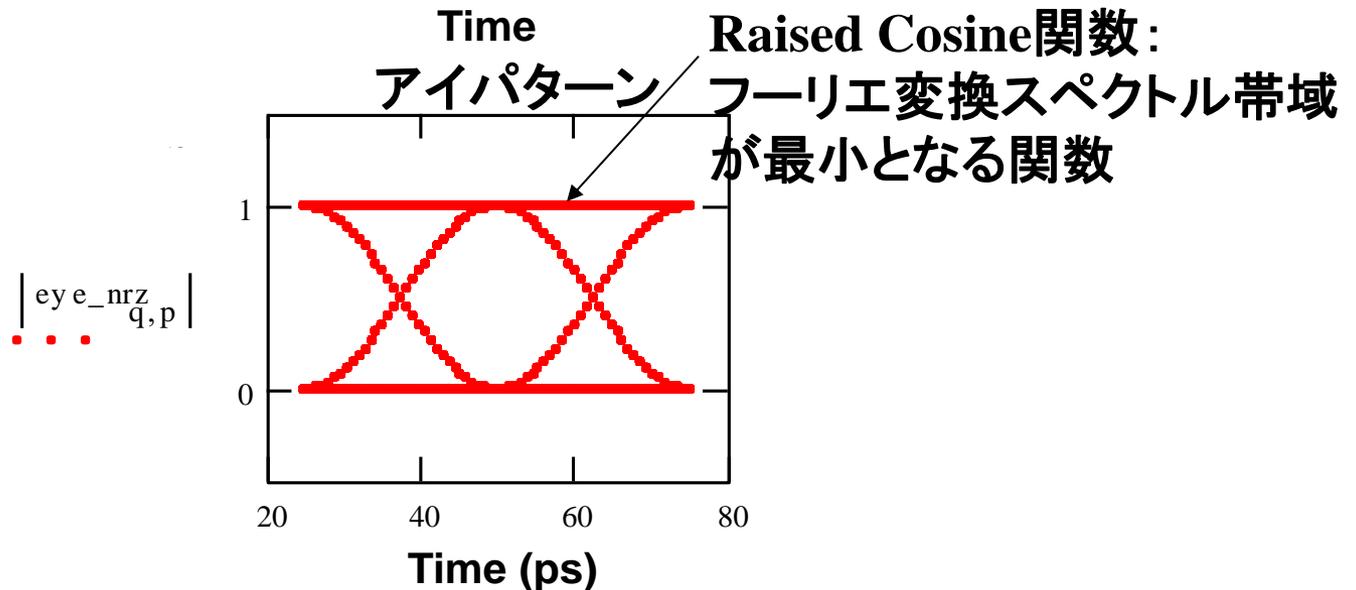
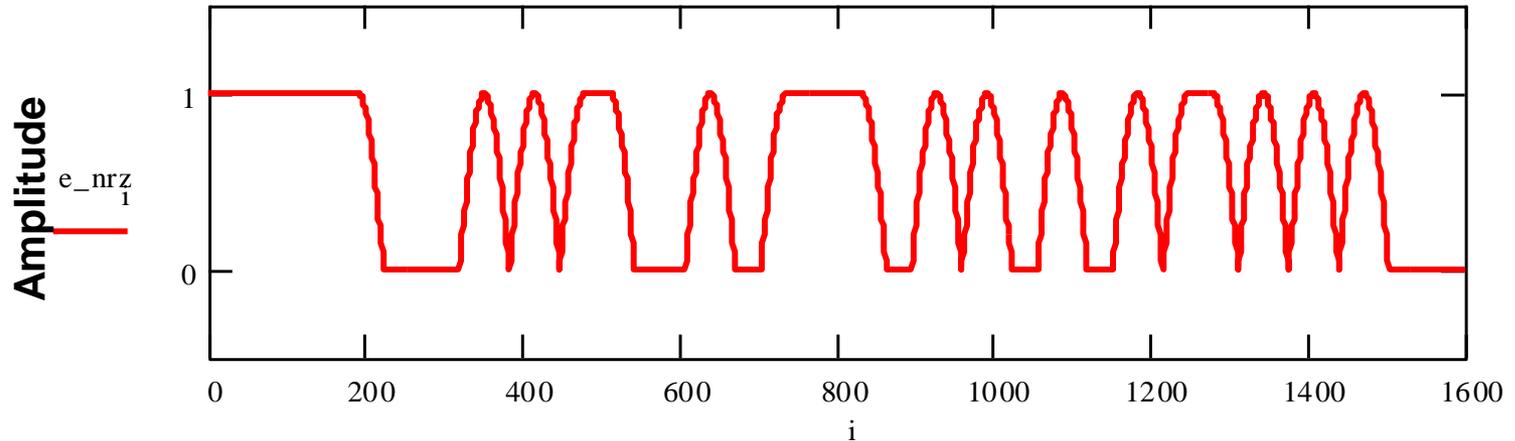
1111111000010101100010011110010100100101101010100000110010000111010111001110001
1011001100000010001111101001101000101111011011101

1ビットずつずらして見た7ビットの符号がすべて異なる (all 0以外すべてを含み、各符号は1回のみ出現)

NRZ符号(符号長7のM系列)(1)

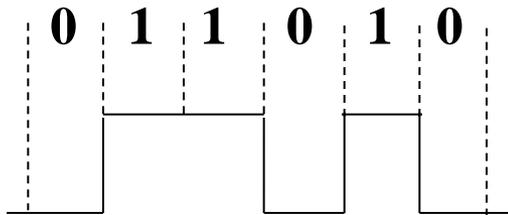
計算の参考:『Mathcadによる光システムの基礎』 小関 健, 原田一成 共著, 森北出版

時間波形(電界振幅)



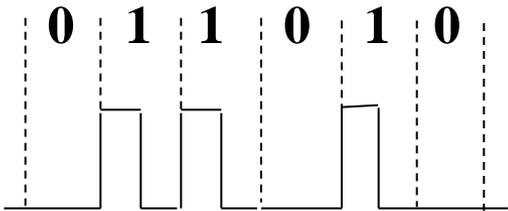
NRZとRZ方式

NRZ (Non Return-to-Zero)



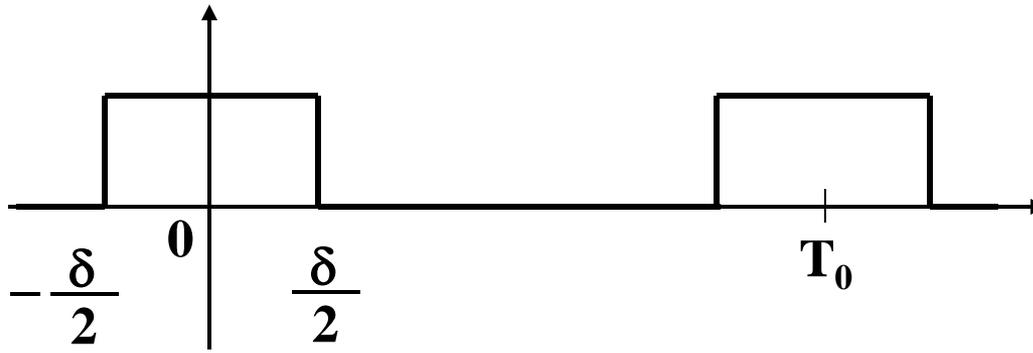
- 1シンボル(インターバル)の符号を変化させない。
- GbE, 10GbE, SONET/SDHなど
実用光通信システムで使用

RZ (Return-to-Zero)



- 1シンボル(インターバル)の符号を必ず0に戻す。
- 40Gbps以上の高速DWDM,
短パルス光源(パルス幅<10ps)の
研究用など。

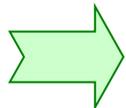
繰り返し周期を持つパルス波形の帯域



$$f(t) = \begin{cases} A(-\frac{\delta}{2} \leq t \leq \frac{\delta}{2}) \\ 0(\frac{\delta}{2} < t < T_0 - \frac{\delta}{2}) \end{cases}$$

このパルス列をフーリエ級数展開すると、

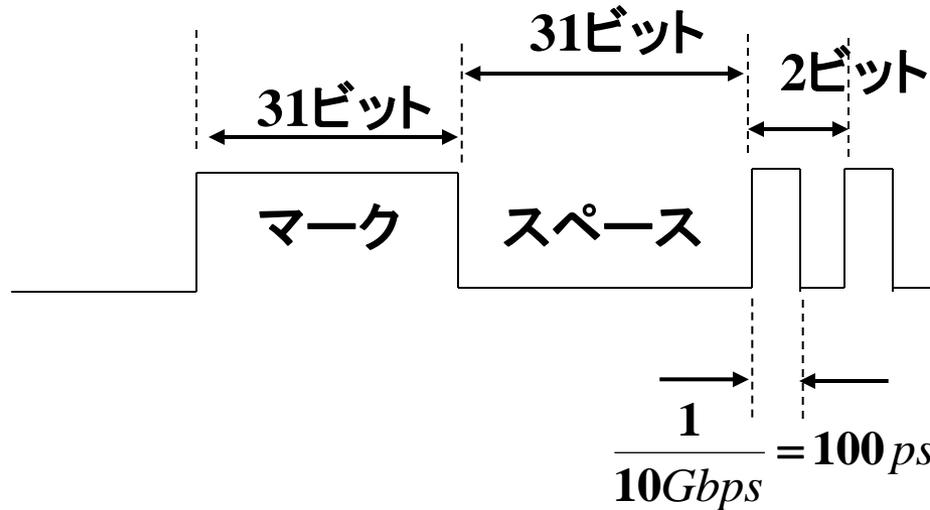
$$f(t) = \frac{A\delta}{T_0} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi\delta}{T_0}\right) \cos\left(2\pi \frac{n}{T_0} t\right)$$



基本周波数 $1/T_0$

NRZ変調の信号帯域

10Gbps, $2^{31}-1$ PRBS (Pseudo Random Bit Sequence), マーク率1/2



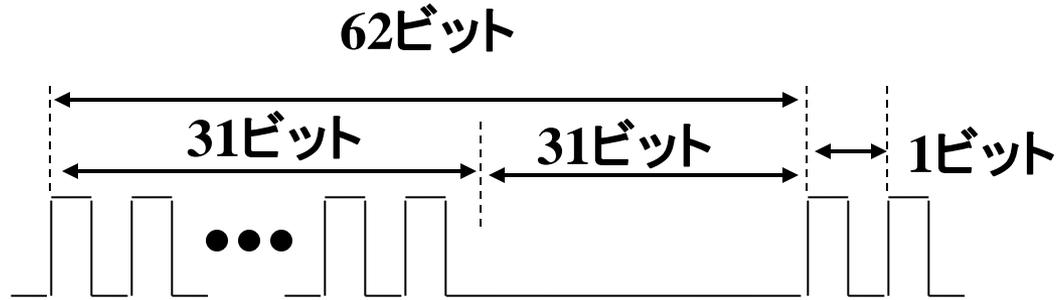
最低周波数

$$10G \div 62\text{ビット} = 162\text{MHz}$$

最高周波数

$$10Gbps \div 2 = 5\text{GHz}$$

RZ変調の信号帯域



最高周波数

$$10\text{Gbps} \div 1 = 10\text{GHz}$$

送信器用光源

半導体レーザの材料選択

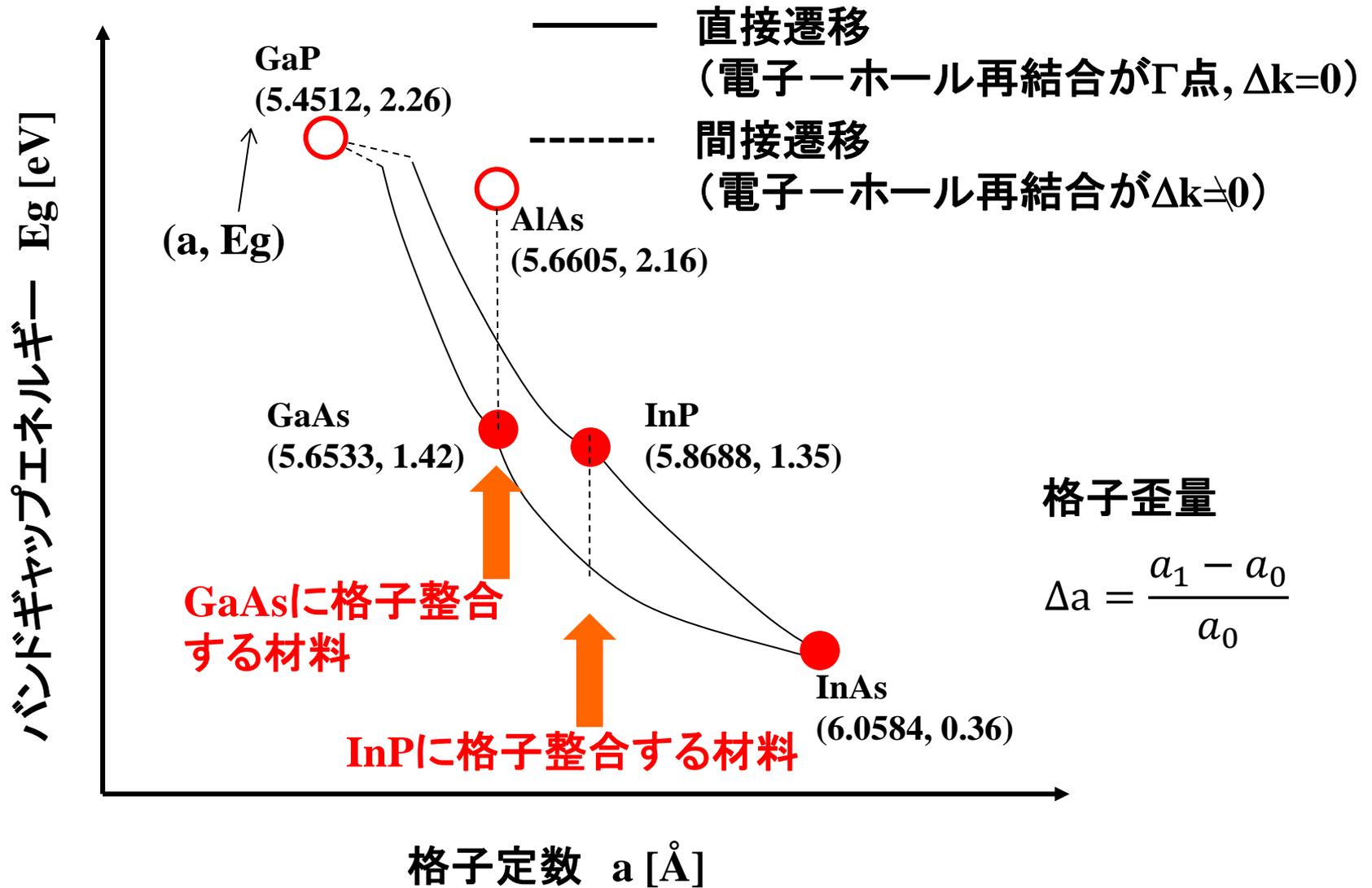
周期律表

2族	12族	13族	14族	15族	16族
Be					
		Al	C	N	O
	Zn	Ga	Si	P	S
		In	Ge	As	Se
			Sn	Sb	

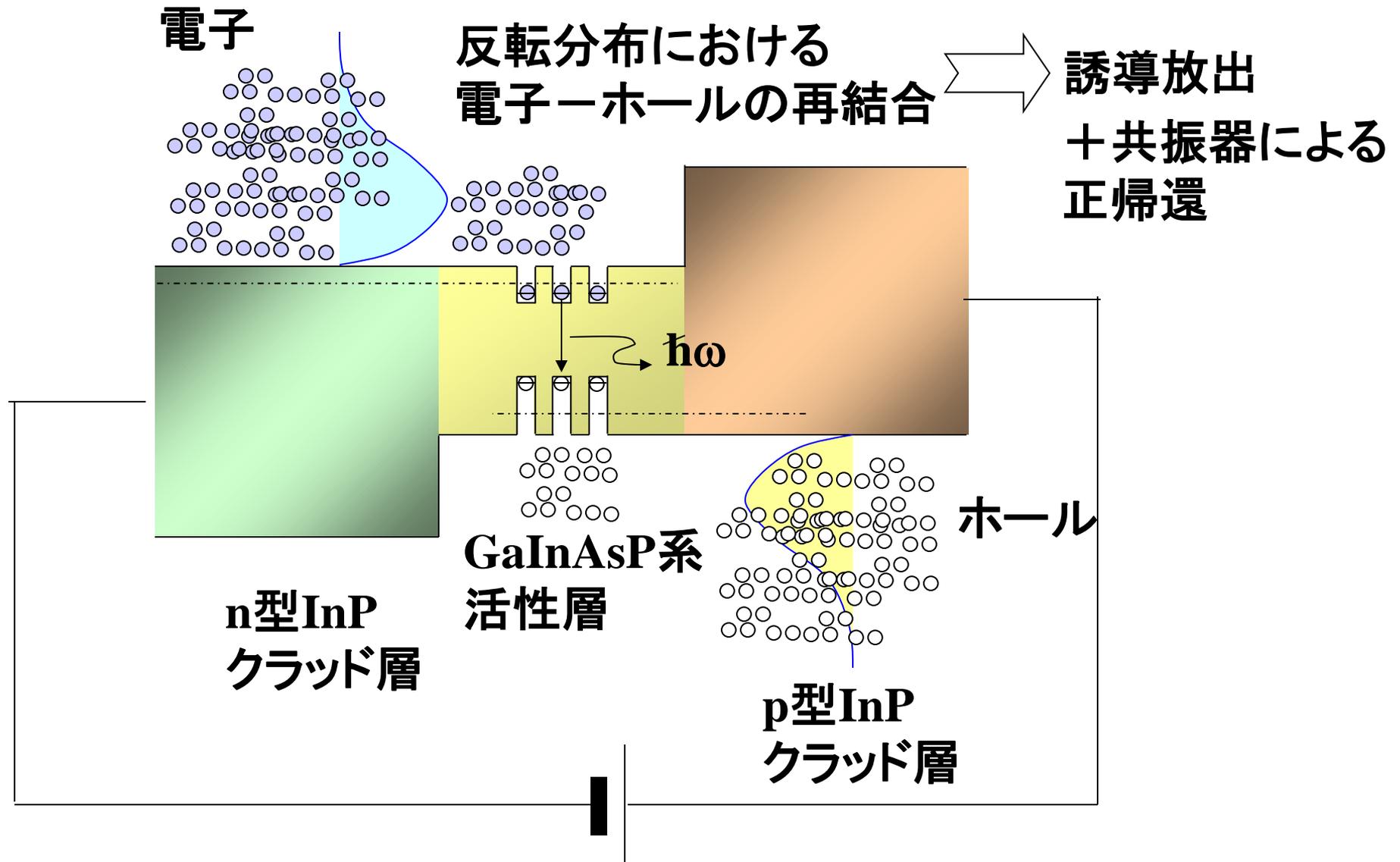
- 光通信用化合物半導体: 13族-15族
12族・14族: p型ドーパント
14族・16族: n型ドーパント
- 波長依存: 0.85 μ m帯 GaAs系
0.98 μ m帯 InGaAs系
1.31/1.55 μ m帯 InP系

$$E_g = \frac{hc}{\lambda_g}$$

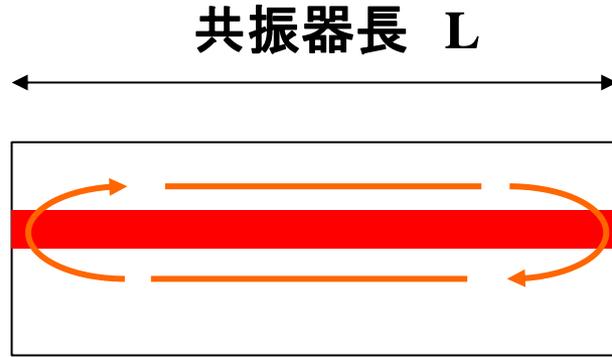
格子定数とバンドギャップ・エネルギー



半導体レーザーの動作原理



発振条件(導波路型)



利得係数 g

活性層吸収係数 α_{ac}

クラッド層吸収係数 α_{cl}

活性層厚 d

光閉込係数 Γ

パワー
反射率 R_1

パワー
反射率 R_2

位相変化
 ϕ_1

位相変化
 ϕ_2

$$R_1 R_2 \exp \left[\Gamma g (2L) - \Gamma \alpha_{ac} (2L) - (1 - \Gamma) \alpha_{cl} (2L) - j \left[\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_0} (2L) - \phi_1 - \phi_2 \right] \right] = 1$$

発振利得条件

発振波長条件

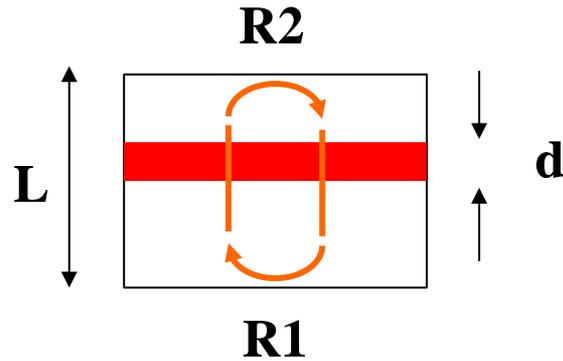
縦モード間隔

$$\Gamma g = \Gamma \alpha_{ac} + (1 - \Gamma) \alpha_{cl} + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right)$$

$$\lambda_0 = \frac{2n_{eff}L}{m}$$

$$\Delta\lambda_0 = -\frac{\lambda_0^2}{2n_{eff}L}$$

発振条件(面発光型)



$$R_1 R_2 \exp \left[g(2d) - \alpha_{ac}(2d) - \alpha_{cl}(2(L-d)) - j \left[\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_0} (2L) - \varphi_1 - \varphi_2 \right] \right] = 1$$

$$\Gamma g = \Gamma \alpha_{ac} + (1 - \Gamma) \alpha_{cl} + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right)$$

ただし、 $\Gamma = \frac{d}{L}$



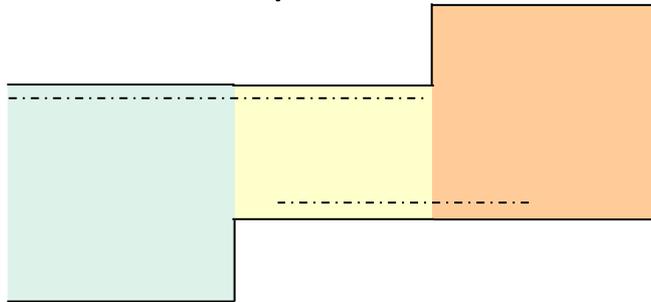
$L \sim \lambda$ なので、 $R > 99.5\%$ が必要

**$L \sim \lambda$ なので、 $\Delta\lambda_0 > 50\text{nm}$
(利得帯域内で単一縦モード)**

発光層の構造

バルク構造

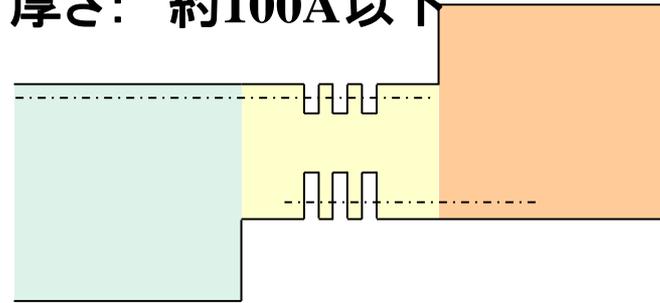
活性層が一種類
厚さ: 約 $0.1\mu\text{m}$



量子井戸構造

Quantum Well (QW)

活性層が2種類の周期構造
厚さ: 約 100\AA 以下



- 発光効率向上
低閾値電流・高スロープ効率

格子歪の良し悪し

$$\Delta a = \frac{a_1 - a_0}{a_0}$$

基本は格子整合が必要



格子欠陥による発光効率低下を防ぐ

しかし。。。

- 格子欠陥が発生しない程度の薄膜(臨界膜厚)以下であれば、発光効率向上が得られる場合あり。



歪量子井戸構造

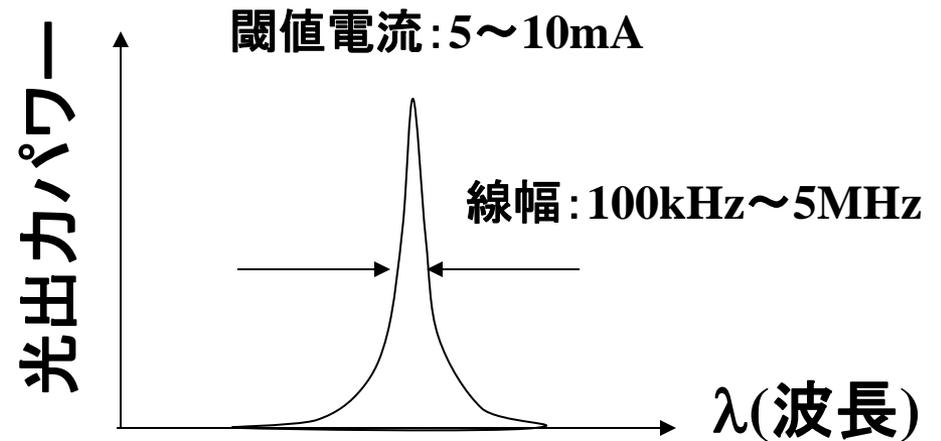
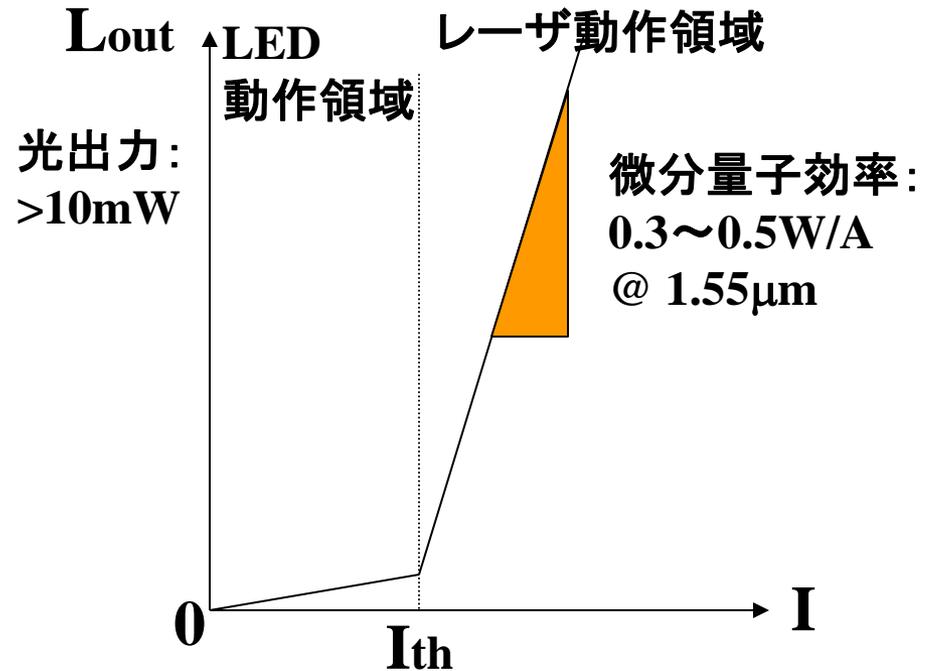
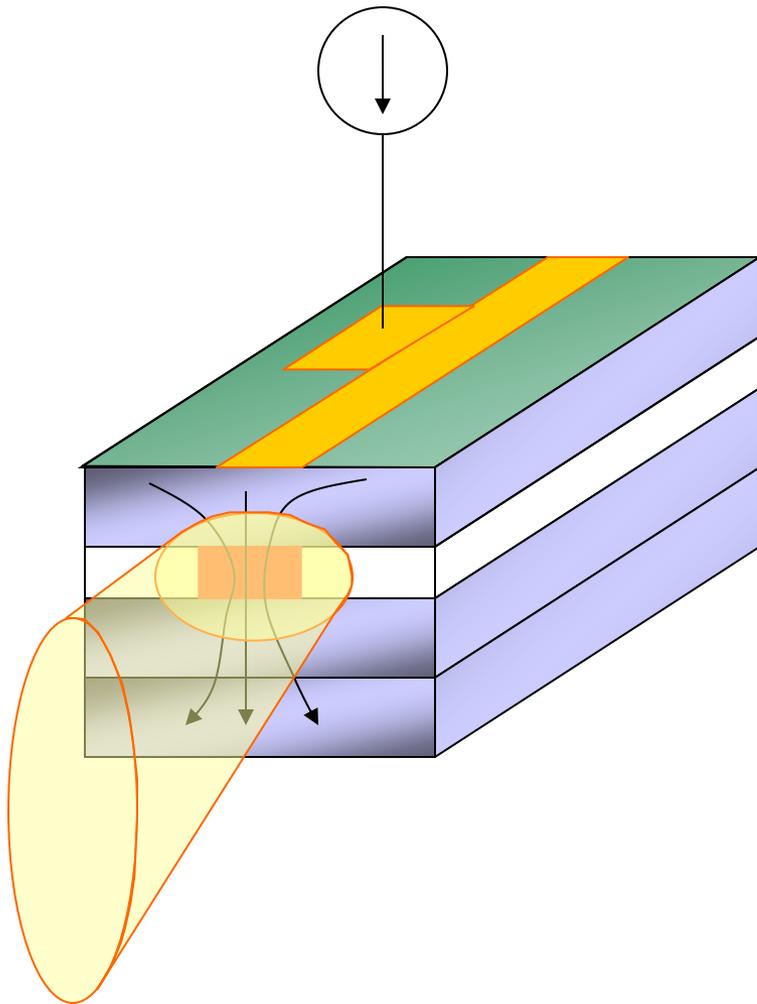
$\Delta a > 0$: 圧縮歪

$\Delta a < 0$: 伸張歪

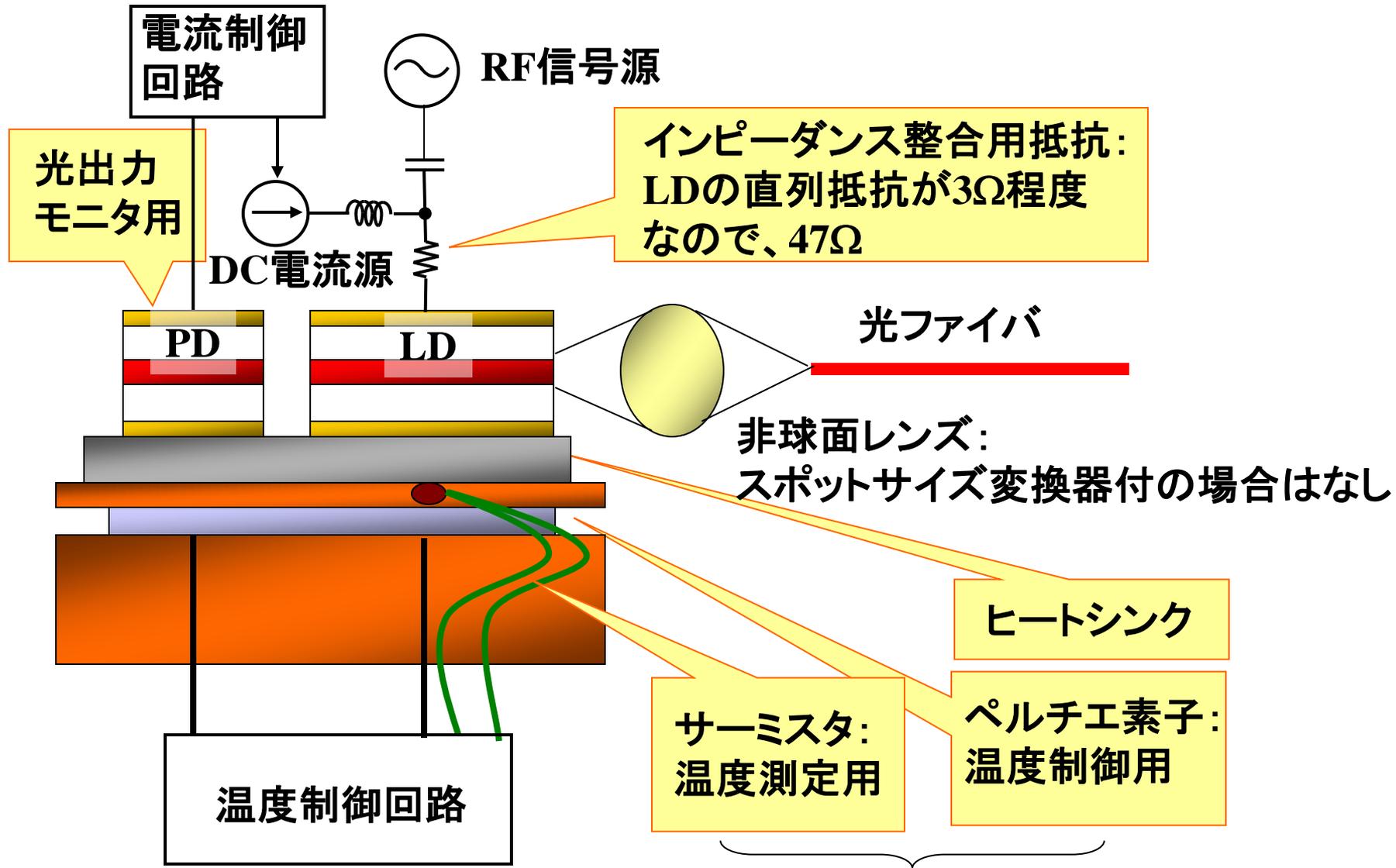


無歪量子井戸構造より
低閾値電流・高スロープ効率

半導体レーザーの基本特性

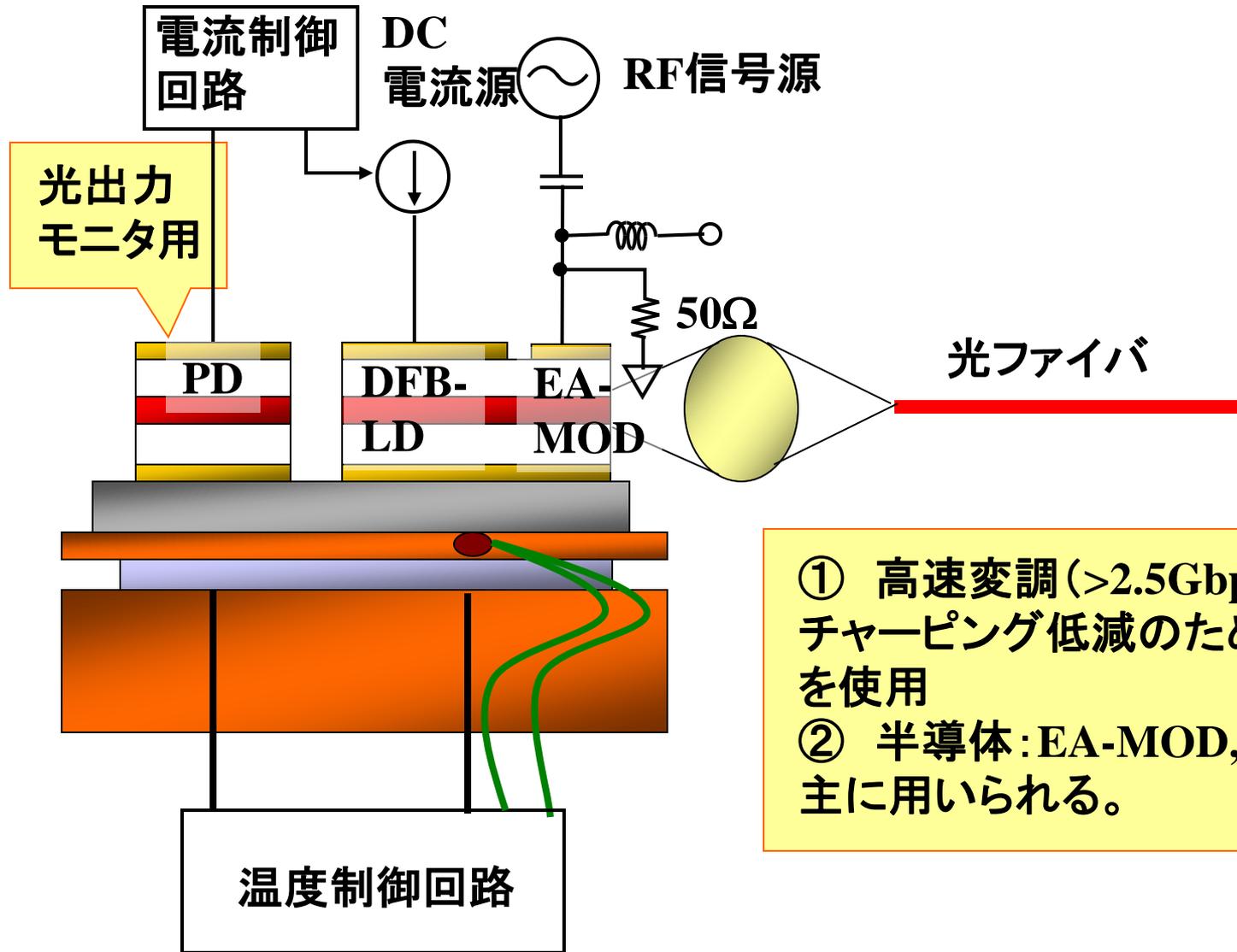


光強度変調方式(1) 直接変調方式の構成



光アクセス(FTTH)用光源にはなし

光強度変調方式(2) 外部変調方式の構成

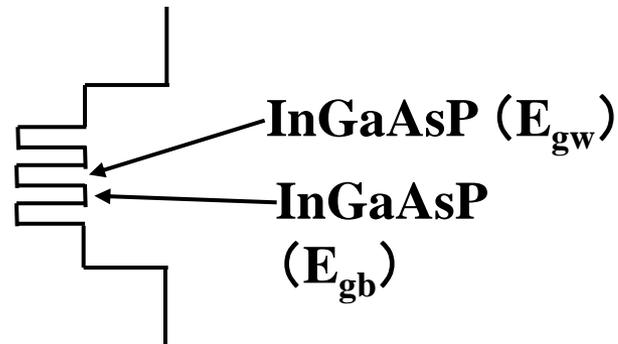
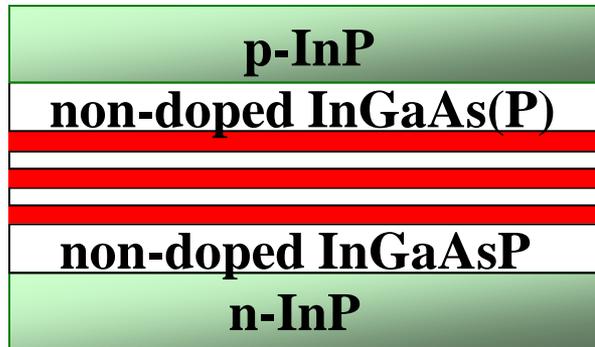
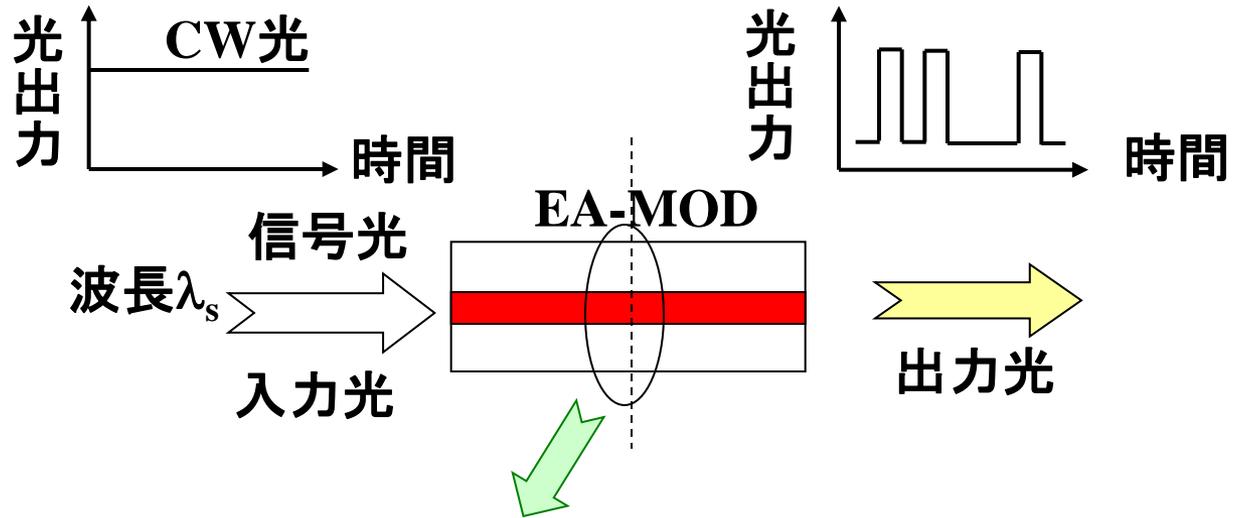


- ① 高速変調 (>2.5Gbps) ではチャープニング低減のため外部変調器を使用
- ② 半導体: EA-MOD, LiNbO₃が主に用いられる。

光変調器(電界吸収型変調器)

光変調器の動作原理(1) (電界吸収型)

EA Modulator (EAM): 電界吸収型変調器

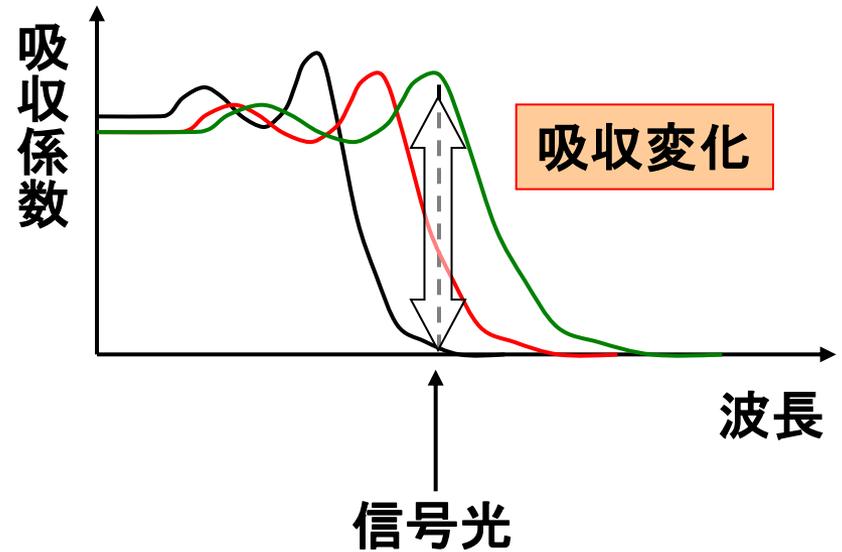
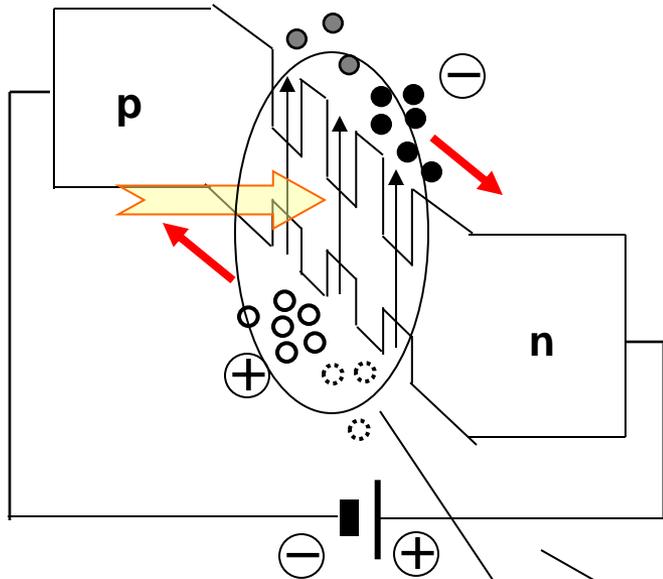


量子閉じ込めシュタルク効果 (Quantum Confined Stark Effect, QCSE)

pin構造に逆バイアス電圧を印加



- ・吸収端波長が長波長にシフト
- ・吸収ピーク値が減少



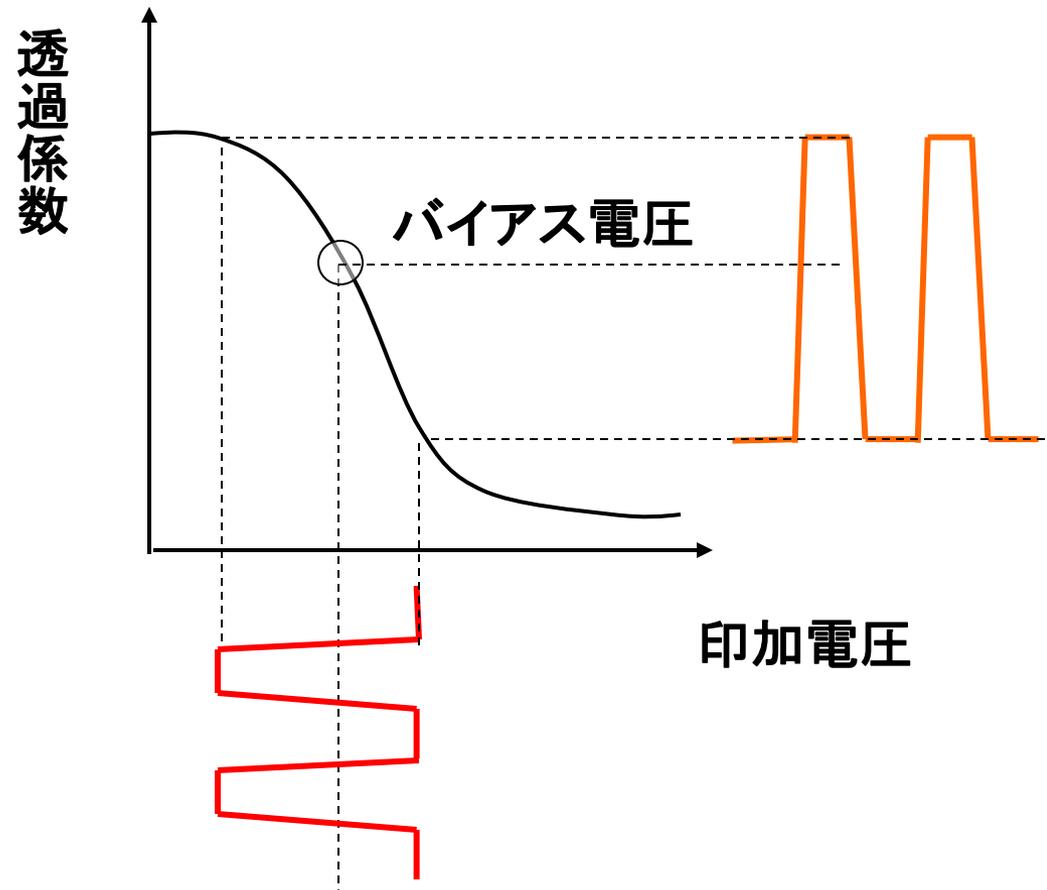
エネルギーシフト量:

$$\Delta E = \frac{\pi^2 - 15}{24\pi^4} (m_e + m_h) e^2 F^2 \frac{L_z^4}{\hbar}$$

m_e : 電子の有効質量, m_h : ホールの有効質量
 F : 外部電界, L_z : QW厚

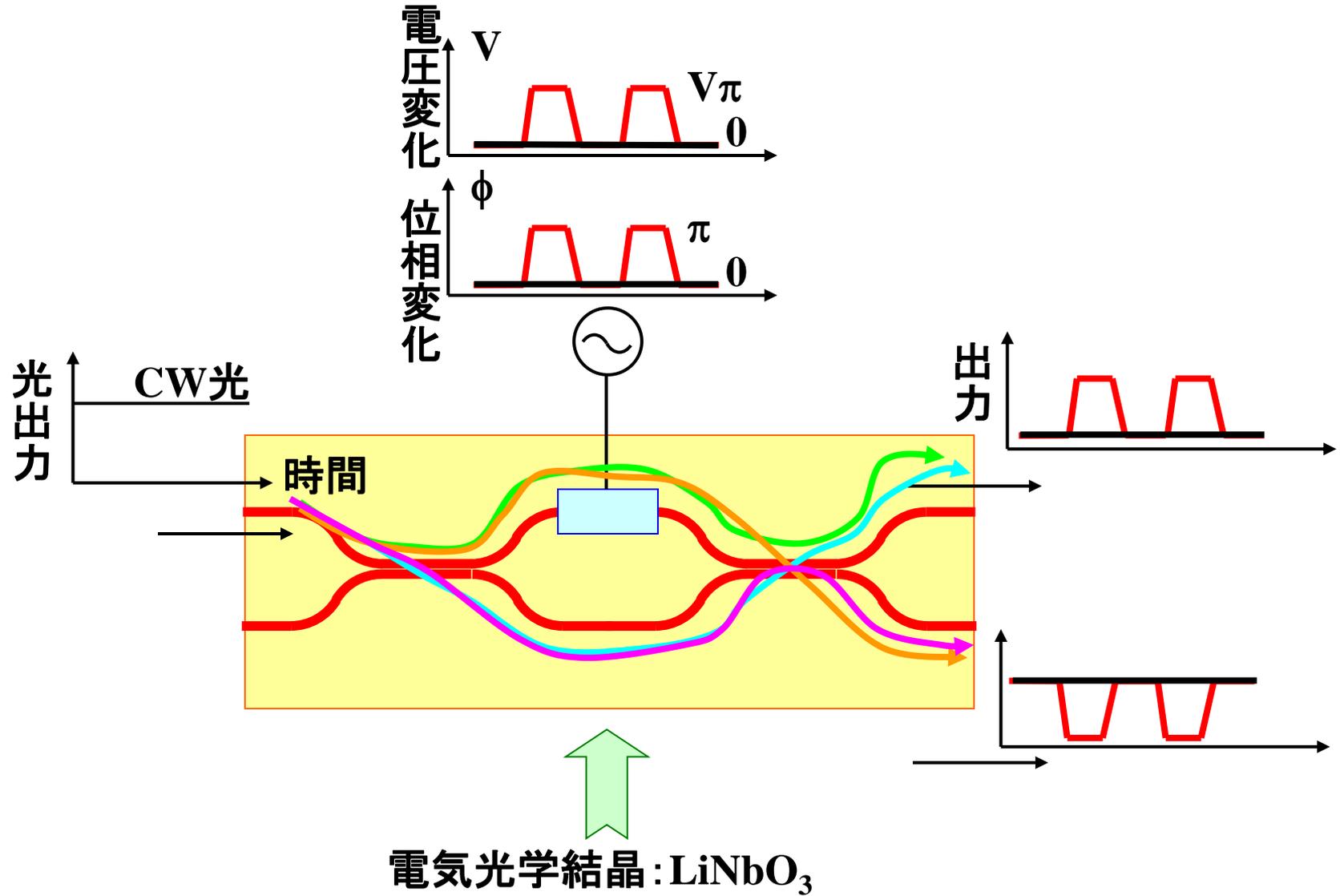
- ・実効的なエネルギーギャップ減少
- ・電子とホールの空間的重ね合わせ積分が減少

EAMによる符号化



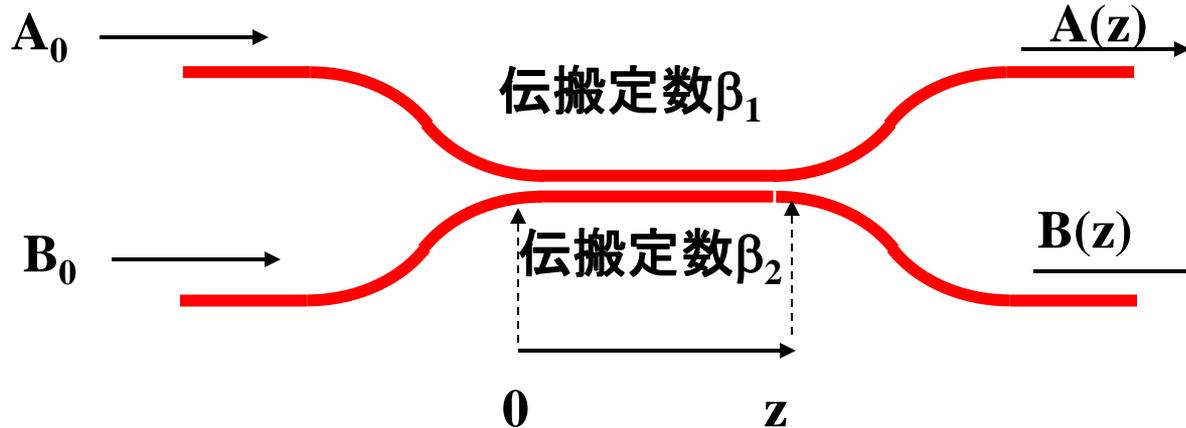
マツハツエンダー型光変調器

光変調器の動作原理(2) (電気光学結晶のマツハツエンダー型)



モード結合導波路(1)

結合導波路の基本形



モード結合方程式

$$\frac{dA}{dz} = -j\kappa_{12}B \exp\{-j(\beta_2 - \beta_1)z\} \quad (2.1)$$

$$\frac{dB}{dz} = -j\kappa_{21}A \exp\{j(\beta_2 - \beta_1)z\} \quad (2.2)$$

式(2.1)を微分して式(2.2)を代入

$$\frac{d^2 A}{dz^2} + j2\Delta \frac{dA}{dz} + \kappa^2 A = 0 \quad (2.3)$$

ただし

$$\begin{aligned} \kappa^2 &= \kappa_{12} \times \kappa_{21}^* \\ 2\Delta &= \beta_2 - \beta_1 \end{aligned}$$

結合導波路の結合係数

式(2.1)の κ_{12} は対称構造において以下の式で表される。

$$\kappa_{12} = \frac{\kappa_0^2}{\beta_0} \frac{1}{\gamma a} \frac{\exp(-\gamma d)}{1 + \left(\frac{\kappa_0}{\gamma}\right)^2}$$

ただし $\kappa_0 = \sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta_0^2}$

$$\gamma = \sqrt{\beta_0^2 - k_0^2 n_2^2}$$

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

n_1 : コアの屈折率

n_2 : クラッドの屈折率

a : コア幅の1/2

d : 2つのコアの間隔

λ_0 : 真空中の波長

q を未知数とし、

$$A(z) = [a_1 e^{jqz} + a_2 e^{-jqz}] \exp(-j\Delta z) \quad (2.4)$$

$$B(z) = [b_1 e^{jqz} + b_2 e^{-jqz}] \exp(j\Delta z) \quad (2.5)$$

式(2.4), (2.5)を式(2.1)、(2.2)に代入し、

$$a_1 + a_2 = A(0) \quad (2.6)$$

$$b_1 + b_2 = B(0) \quad (2.7)$$

を満足する定数 a_1, a_2, b_1, b_2 を求めると、以下の一般解を得る。

$$A(z) = \left\{ \left[\cos(qz) + j \frac{\Delta}{q} \sin(qz) \right] A(0) - j \frac{\kappa}{q} \sin(qz) B(0) \right\} \exp(-j\Delta z) \quad (2.8)$$

$$B(z) = \left\{ -j \frac{\kappa}{q} \sin(qz) A(0) + \left[\cos(qz) - j \frac{\Delta}{q} \sin(qz) \right] B(0) \right\} \exp(j\Delta z) \quad (2.9)$$

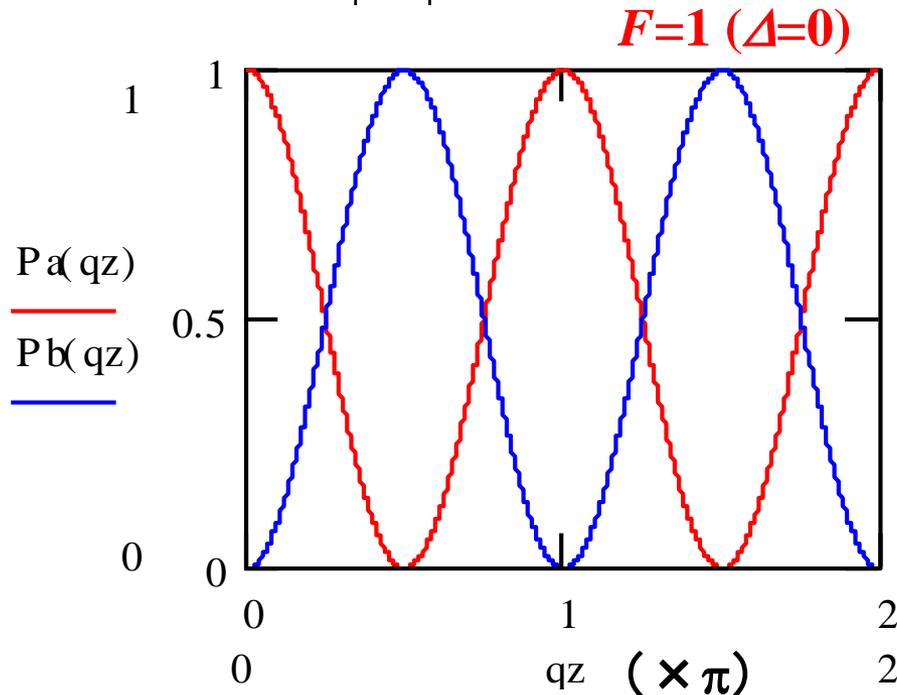
ただし、 $q = \sqrt{\kappa^2 + \Delta^2}$

モード結合導波路(3)

片方の導波路のみに光が入射された場合、 $A(0)=A_0$, $B(0)=0$ なので

$$P_a(z) = \frac{|A(z)|^2}{|A_0|^2} = 1 - F \sin^2(qz) \quad (2.10)$$

$$P_b(z) = \frac{|B(z)|^2}{|A_0|^2} = F \sin^2(qz) \quad (2.11) \quad \text{ただし } F = \left(\frac{\kappa}{q}\right)^2$$



$$L_c = \frac{\pi}{2q} \text{ のとき、}$$

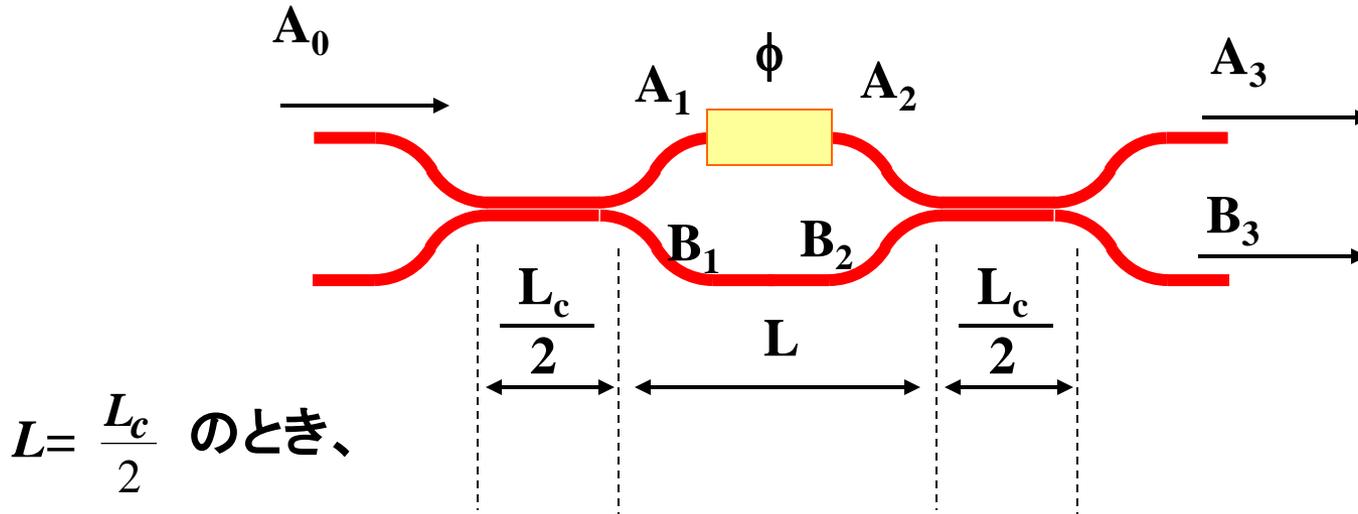
$$P_a(L_c) = 0, P_b(L_c) = A_0$$

➡ L_c : 結合長

2本の導波路が同一構造の場合 ($\beta_1 = \beta_2$ または $\Delta = 0$)、式(2.8), (2.9)は以下
のようになる。

$$\left\{ \begin{array}{l} A(z) = A(\mathbf{0}) \cos(\kappa z) - jB(\mathbf{0}) \sin(\kappa z) \quad (2.12) \\ B(z) = -jA(\mathbf{0}) \sin(\kappa z) + B(\mathbf{0}) \cos(\kappa z) \quad (2.13) \end{array} \right.$$

マツハツェンダー型導波路の解析(1)



上側と下側の導波路が同じ構造(等位相)であるとすると、 $\Delta=0$

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1 = A_0 \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) = \frac{A_0}{\sqrt{2}} = \frac{A_0}{\sqrt{2}} e^{j \cdot 0} \quad (2.14) \\ B_1 = -j A_0 \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) = -j \frac{A_0}{\sqrt{2}} = \frac{A_0}{\sqrt{2}} e^{-j \frac{\pi}{2}} \quad (2.15) \end{array} \right. \Rightarrow \text{位相が } \frac{\pi}{2} \text{ ずれている}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A_2 = \frac{A_0}{\sqrt{2}} \exp(-j\beta L) \quad (2.16) \\ B_2 = -j \frac{A_0}{\sqrt{2}} \exp(-j\beta L + j\phi) \quad (2.17) \end{array} \right. \Rightarrow$$

式(2.16)、(2.17)を式(2.12)、(2.13)のA(0)、B(0)に代入

⇒
$$A_3 = -jA_0 \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \exp(-j\beta L + j\frac{\phi}{2}) \quad (2.18)$$

$$B_3 = -jA_0 \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \exp(-j\beta L + j\frac{\phi}{2}) \quad (2.19)$$

⇒
$$|A_3|^2 = |A_0|^2 \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2.20)$$

$$|B_3|^2 = |A_0|^2 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2.21)$$

$\phi=0$ のとき、 $|A_3|^2 = 0, |B_3|^2 = 1$

$\phi=\pi$ のとき、 $|A_3|^2 = 1, |B_3|^2 = 0$

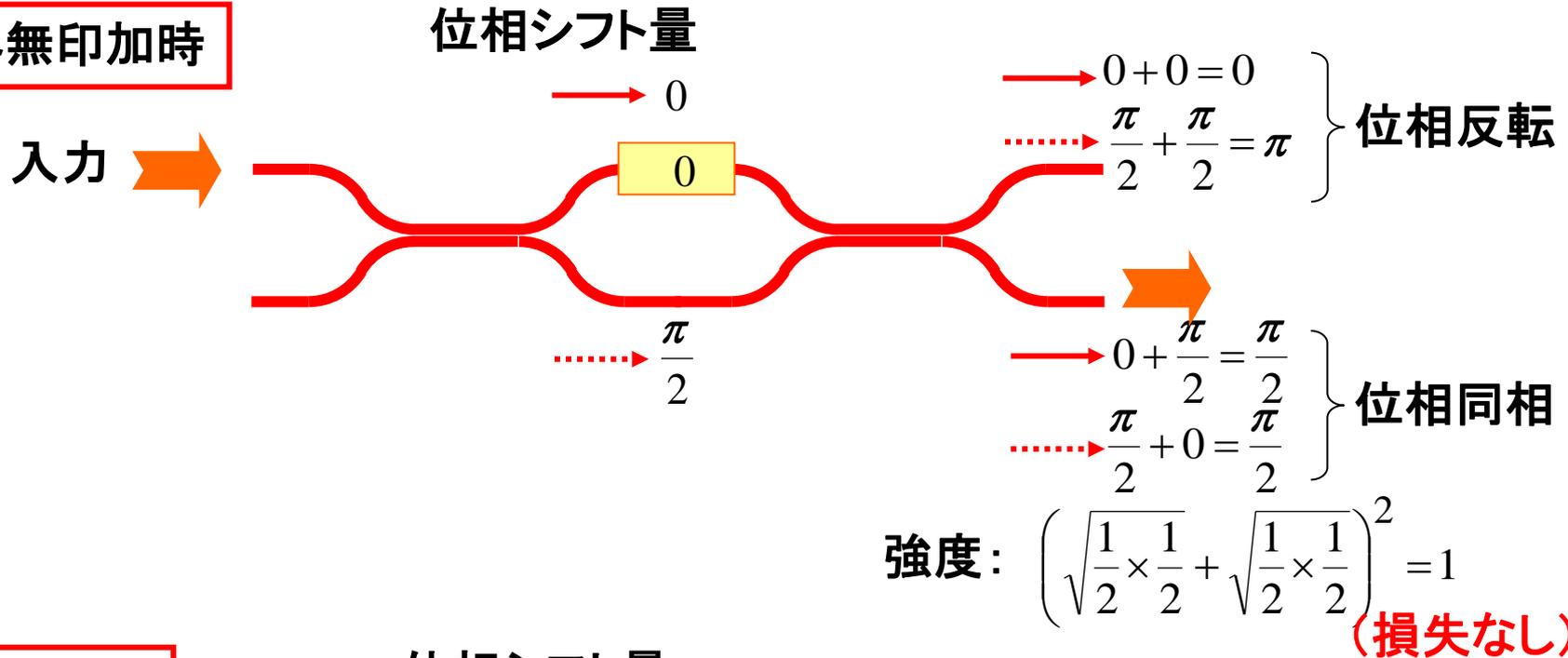
$\phi = \frac{\pi}{2} + \delta\phi$ となるようにバイアスを加えると、

$$|A_3|^2 \cong \frac{1}{2} |A_0|^2 (1 + \delta\phi) \quad (2.22)$$

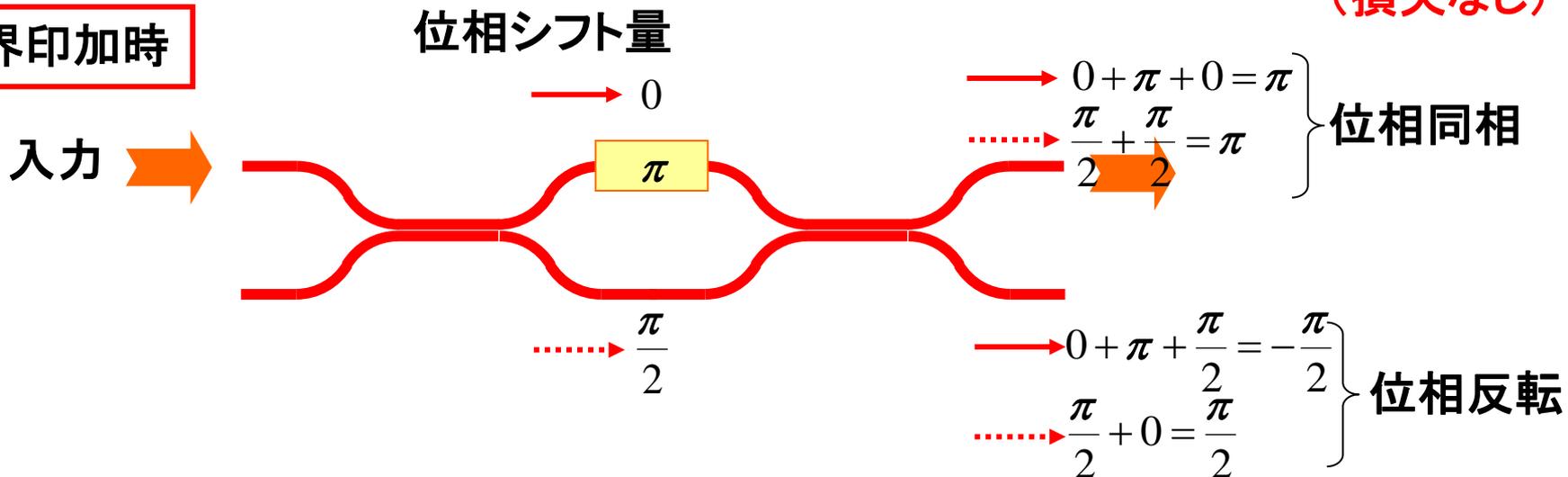


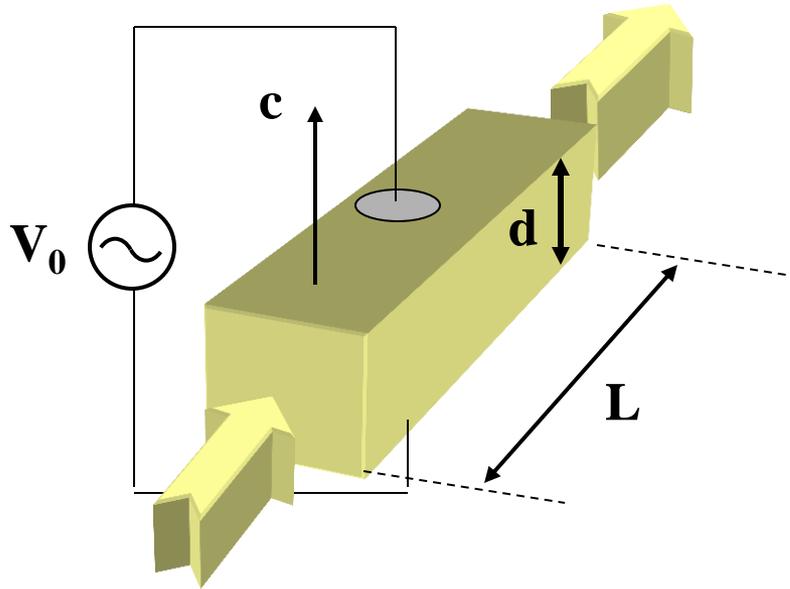
$\delta\phi$ に比例した
強度変化が得られる

電界無印加時

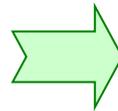


電界印加時





$$\delta\phi = \frac{\pi n_e^3 r_{33} L}{d \lambda} V_0$$



ポッケルス効果: 屈折率変化が印加電圧
の1乗に比例

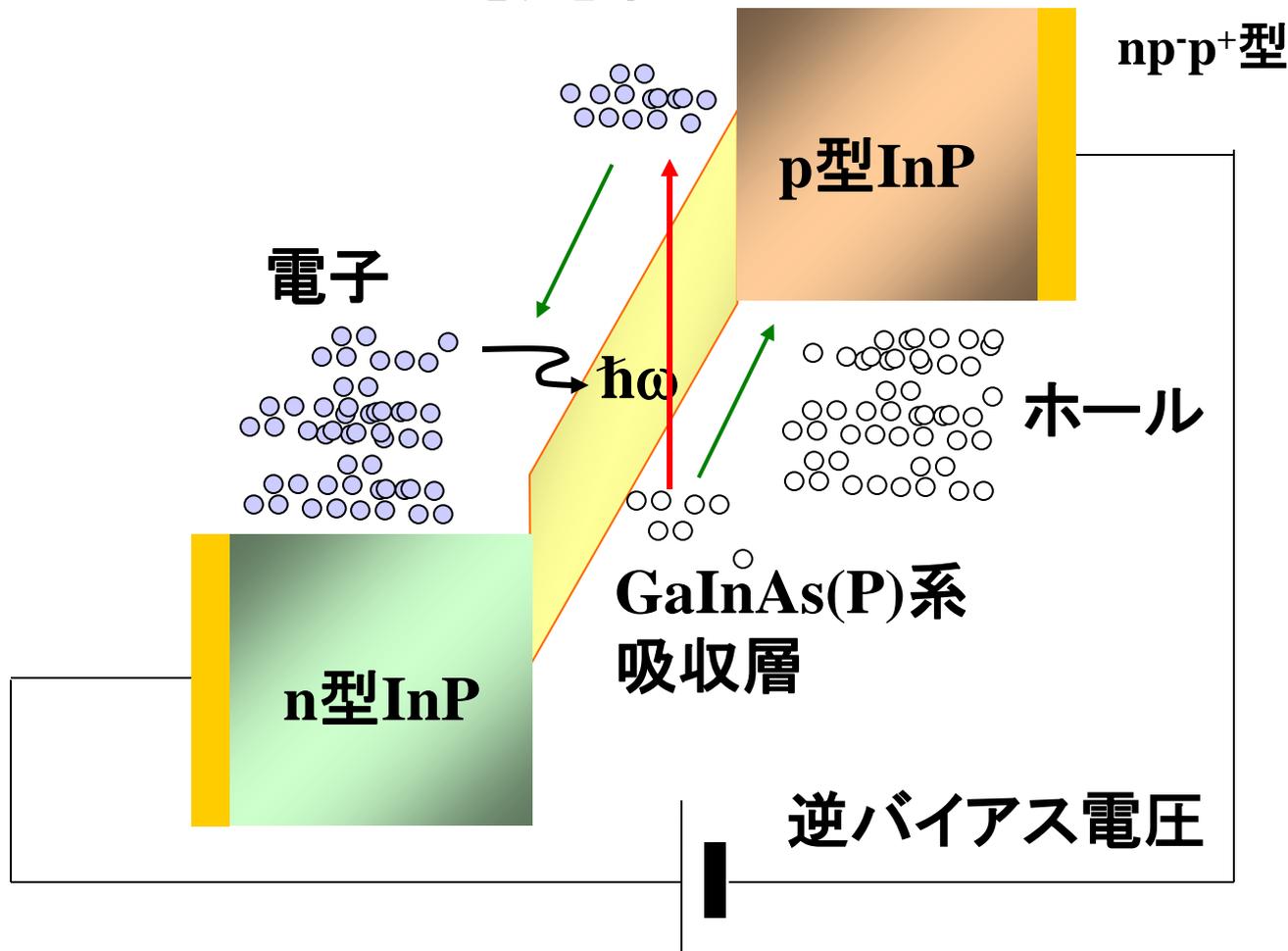
光受信器

フォトディテクタの動作原理(1)

pin-PDの構造

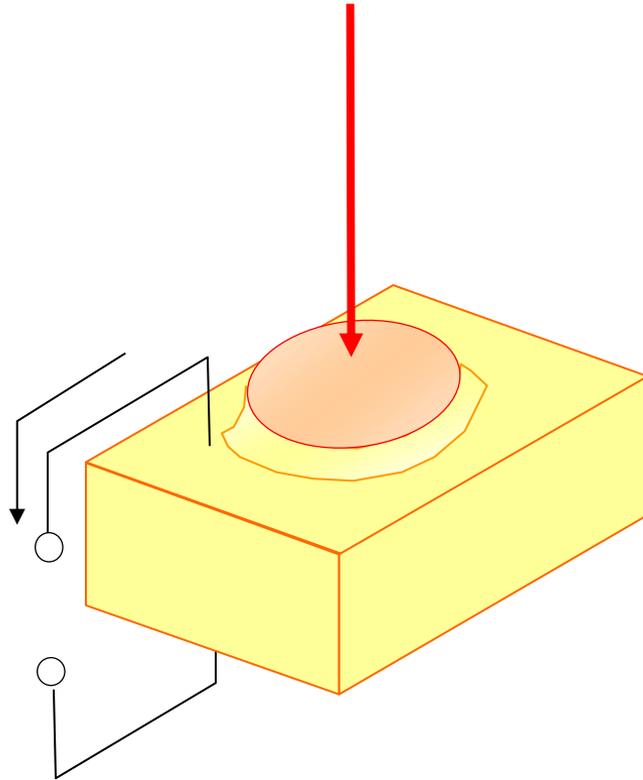
発生電流: $I = e \eta_i \frac{P_{in}}{h\omega}$

→ 受信光の吸収により発生する電子数(効率は内部量子効率として考慮)に電子素量を掛けて電流を導出

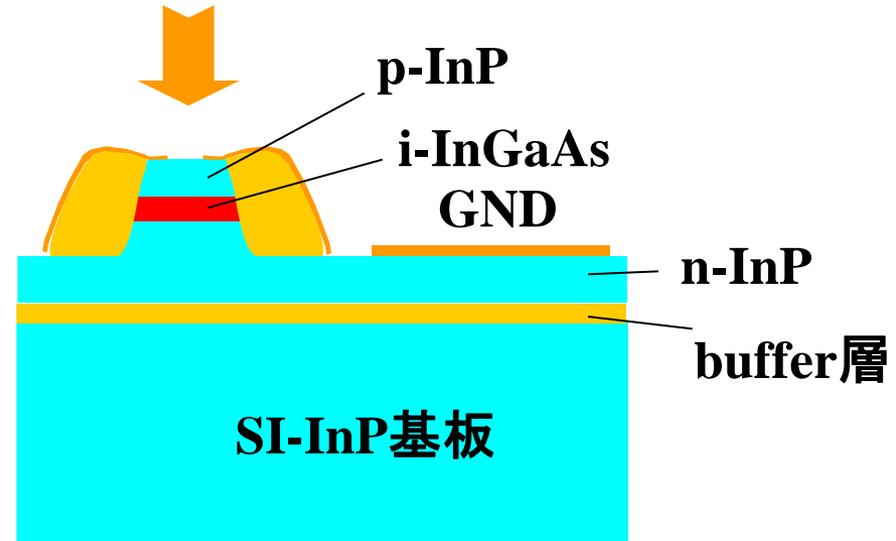


面入射型PDの構造

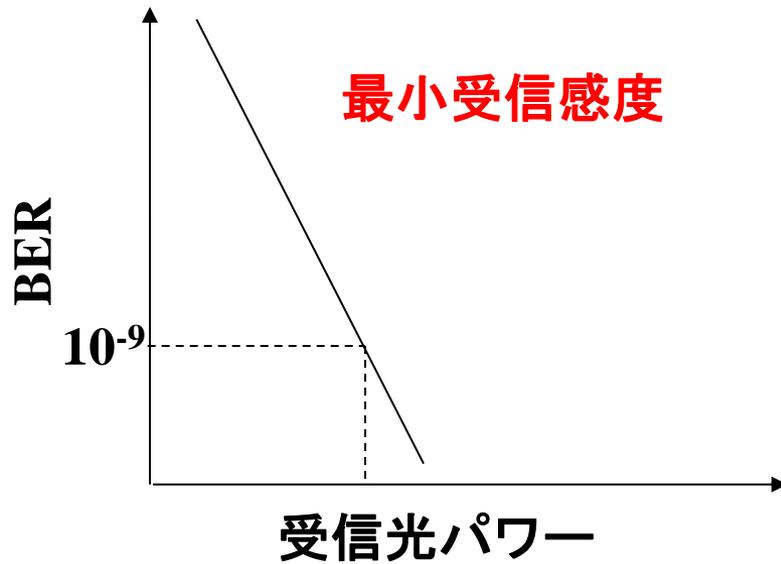
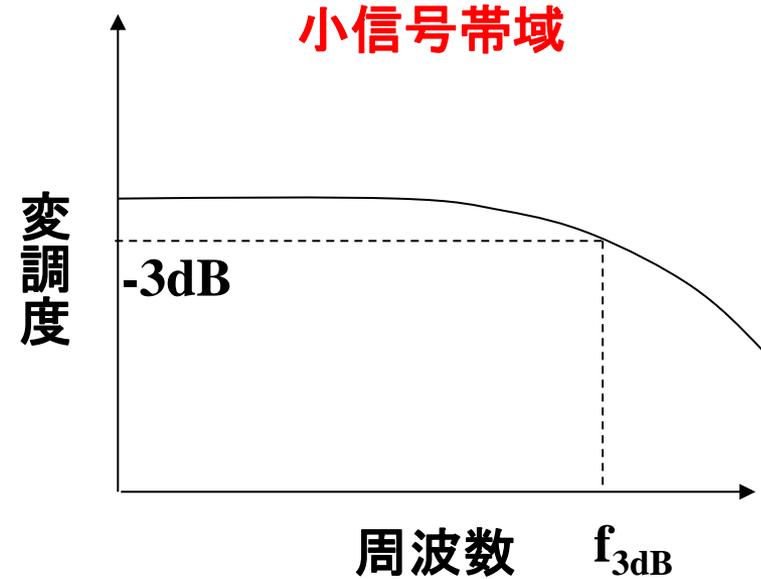
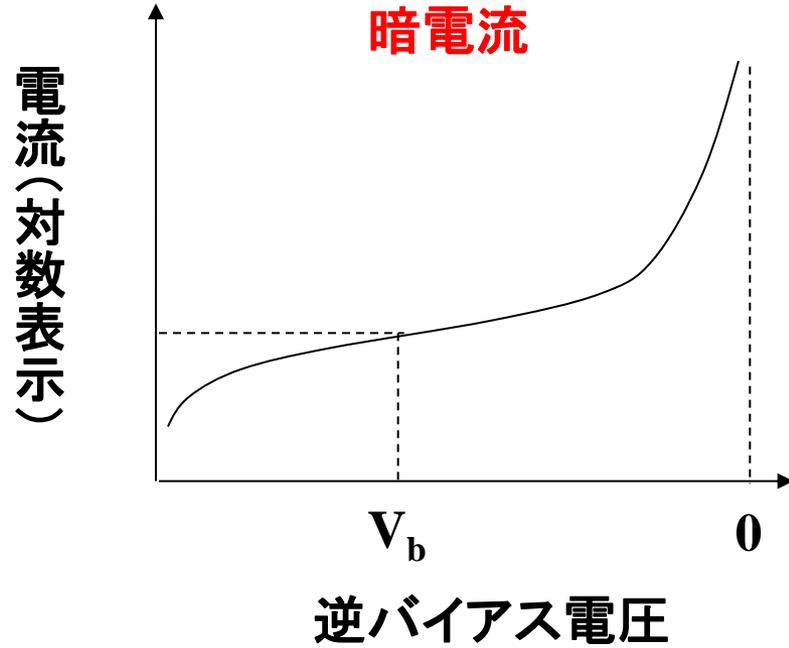
鳥瞰図



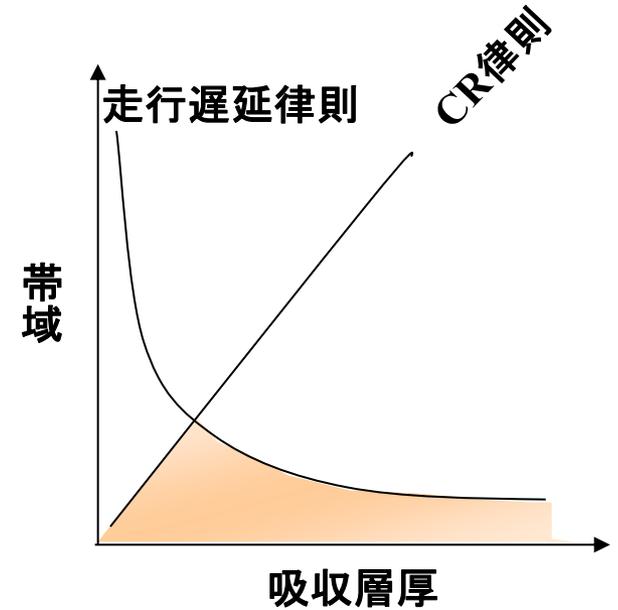
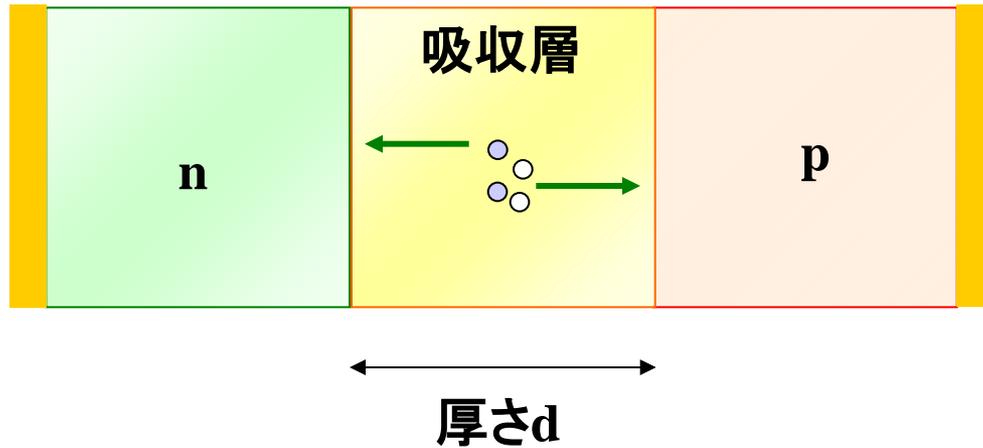
断面図



pin-PDの基本特性



走行遅延・CR時定数のトレードオフ



- 光励起電流 (Photocurrent): 厚さが**薄い**方が走行遅延小 → 広帯域
- 平行平板キャパシタ: 厚さが**厚い**ほうが低容量 → 広帯域

➡ 目標帯域に対して適した吸収層厚が存在

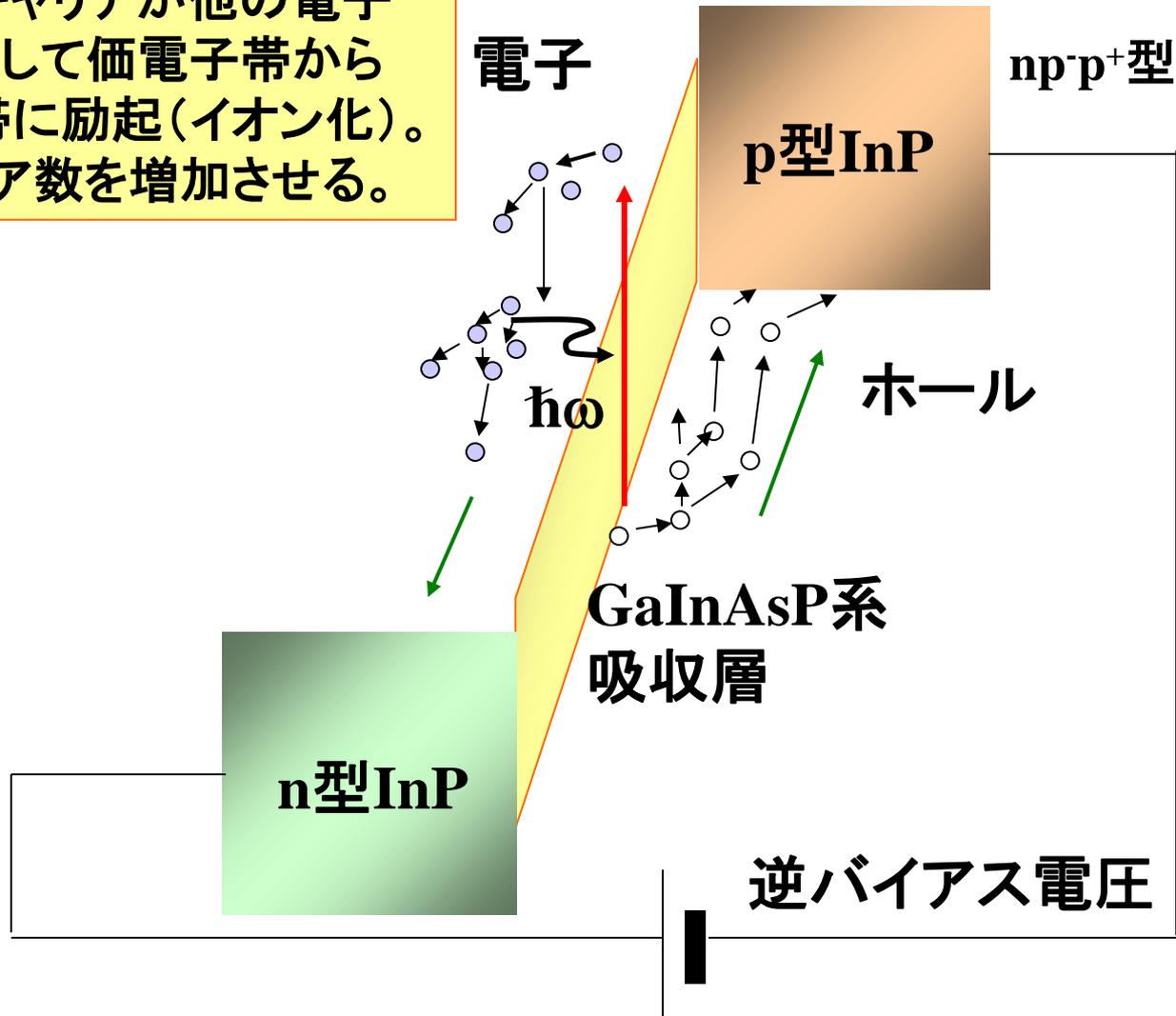
ただし、吸収層が薄いと受信感度が劣化の影響あり($\propto 1 - \exp(-\alpha d)$)

α : 吸収係数

フォトディテクタの動作原理(2)

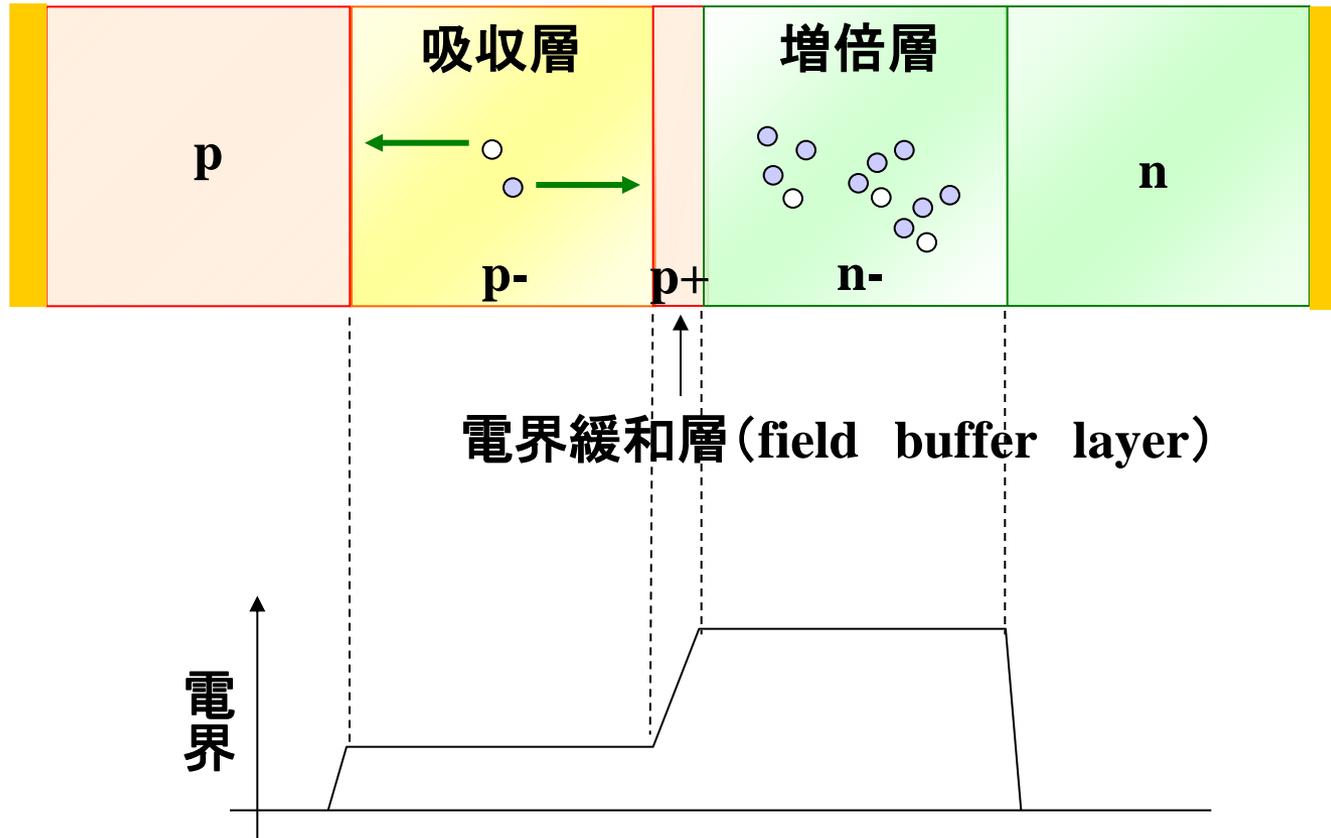
APD (Avalanche Photodiode) の構造

走行キャリアが他の電子と衝突して価電子帯から伝導帯に励起(イオン化)。キャリア数を増加させる。



実際のAPDの層構造

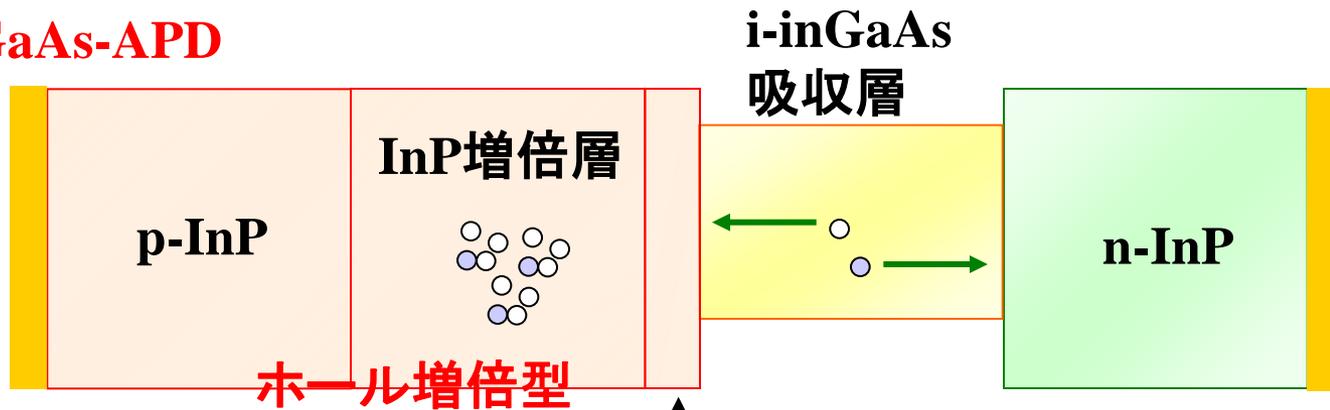
SAM型 : Separate Absorption Multiplication



増倍層の材料選択

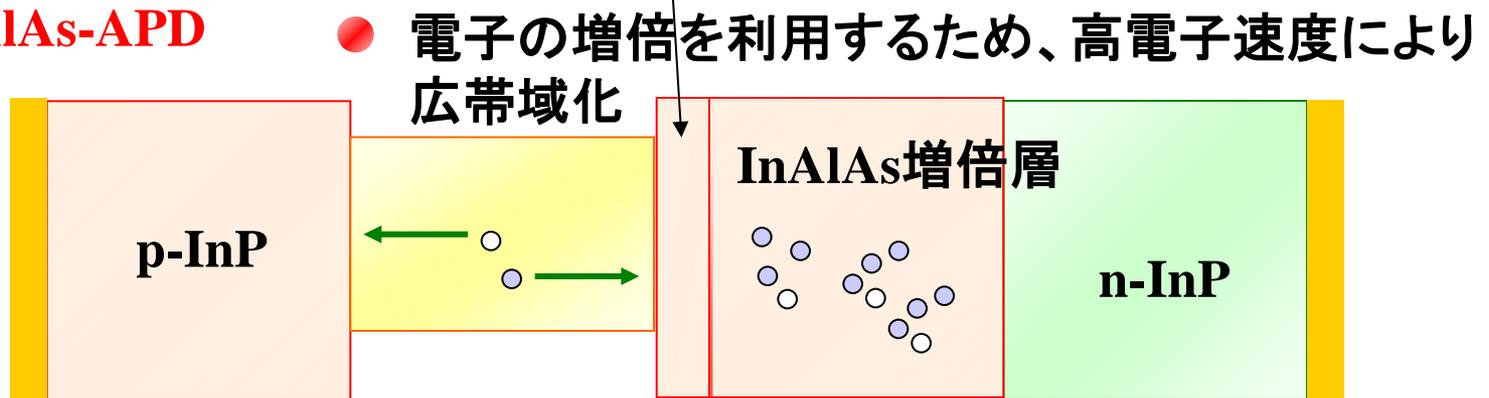
InGaAs-APDとInAlAs-APDの比較

InGaAs-APD



電界緩和層

InAlAs-APD



電子増倍型

イオン化率比

過剰雑音指数 F (APDの増倍過程で加わる雑音の大きさの程度を表す指標)

$$F = M \left\{ 1 - (1-k) \frac{(M-1)^2}{M^2} \right\} \quad \text{M:増倍率, k:イオン化率比}$$
$$= M \left[k \left(1 - \frac{1}{M} \right)^2 + \frac{1}{M} \left(2 - \frac{1}{M} \right) \right]$$

ここで、 $k = \frac{\beta}{\alpha}$ (if $\alpha \geq \beta$), or $\frac{\alpha}{\beta}$ (if $\beta \geq \alpha$)

α : 電子のイオン化率, β : ホールのイオン化率

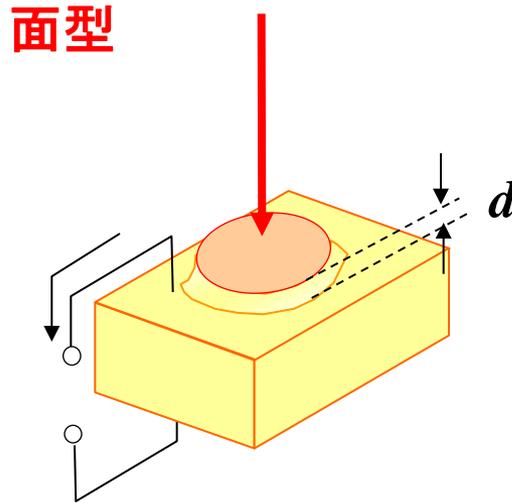


F は k に比例し、 $k=0$ で最小、 $k=1$ で最大

イオン化率比の低減が低雑音化に重要

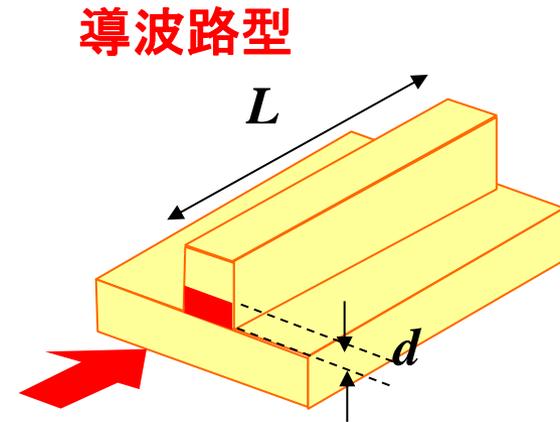
面型から導波路型へ

走行遅延・受信感度のトレードオフ



$$\text{受信感度 (吸収率)} \propto 1 - \exp(-\alpha d)$$

d を厚くすると感度は上がり
CR時定数も低減するが、
走行遅延劣化が起きる



$$\text{受信感度 (吸収率)} \propto 1 - \exp(-\alpha L)$$

L を長くすると感度があがり
走行遅延と独立に最適化設計化
(L 短尺化によるCR低減は必要)