# 第7回

## 光送信器(2)

### 2007年6月4日(月)

### 資料中、著作権にかかわる資料は意図的に 削除しておりますことをご承知置きください。

参考文献は明記しておりますのでご参照ください。

2007年度 光通信システム

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

2007年度 光通信システム

## 半導体レーザの基本特性





### 半導体レーザの製品写真



2007年度 光通信システム

### 実際の送信器構成の一例



半導体レーザの動作原理



直接変調方式の電流・光出力の設定(1-1)



直接変調方式の電流・光出力の設定(1-2)



#### <sup>2007年度</sup> <sub>光通信システム</sub> 直接変調方式の電流・光出力の設定(2-1)



直接変調方式の電流・光出力の設定(2-2)



2007年度 光通信システム

発振遅延時間から導出した発振閾値電流・

キャリア寿命への要求

発振遅延時間

(ts:キャリア寿命)



例

 ● B=1Gbps伝送に対して100ps以下の発振遅延時間(Bの10%)を 得るためには、

Ith < 1.5mA @ τs=0.5ns

 B=2.5Gbps伝送に対して40ps以下の発振遅延時間(Bの10%)を 得るためには、

Ith < 0.64 mA (*a*)  $\tau$ s=0.5 ns

2007年度 光通信システム

### 直接変調方式の制限

① 半導体レーザの本質的な変調帯域制限:緩和振動周波数 f<sub>r</sub>

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{v_g}{eL} \frac{\Gamma_{MQW}}{wN_w L_w}} \eta_i \left(\frac{dg}{dn}\right) (1 - \varepsilon S) (I - I_{th})$$

10~20GHzが一般的

- ② 等価回路上の電気的(CR)帯域制限

   *f*<sub>3dB</sub> < 20GHz
   </li>
- ③ 時間的な波長変動(チャーピング)の影響

   αパラメータ: α = 3 ~ 7(伝送距離制限)

L:共振器長 w:活性層幅 Nw:QW数 Lw:QW厚 ηi:内部量子効率 Lw:光閉じ込め係数 dg/dn:微分利得係数 ε:利得飽和係数 I:バイアス電流 Ith:閾値電流

他の変調方式の必要性 (外部変調)

M. Suzuki, H. Hatakeyama, K. Fukatsu, T. Anan, K. Yashiki and M. Tsuji, Electron. Lett., vol.42, No.17, pp.975-976 (2006).



2007年度 光通信システム

光強度変調方式(2) <u>外部変調方式の構成</u>



2007年度 光通信システム

### 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





### EAMによる符号化



光変調器の動作原理(2)



### モード結合導波路(1)



式(5.1)を微分して式(5.2)を代入  $\frac{d^2 A}{dz^2} + j2\Delta \frac{dA}{dz} + \kappa^2 A = 0$  (5.3)  $\kappa^2 = \kappa_{12} \times \kappa_{21}^*$   $2\Delta = \beta_2 - \beta_1$ 

### 結合導波路の結合係数

式(5.1)の<sub>K12</sub>は対称構造において以下の式で表される。

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

たたじ 
$$\kappa_0 = \sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta_0^2}$$
  
 $\gamma = \sqrt{\beta_0^2 - k_0^2 n_2^2}$   
 $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ 

n1:コアの屈折率 n2:クラッドの屈折率 a:コア幅の1/2 d: 2つのコアの間隔 λ0: 真空中の波長



### モード結合導波路(2)

qを未知数とし、

$$A(z) = [a_1 e^{jqz} + a_2 e^{-jqz}] \exp(-j\Delta z) \quad (5.4)$$
$$B(z) = [b_1 e^{jqz} + b_2 e^{-jqz}] \exp(j\Delta z) \quad (5.5)$$

式(5.4), (5.5)を式(5.1)、(5.2)に代入し、  
$$a_1 + a_2 = A(0)$$
 (5.6)  
 $b_1 + b_2 = B(0)$  (5.7)

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。  $A(z) = \{ [\cos(qz) + j\frac{\Delta}{q}\sin(qz)]A(0) - j\frac{\kappa}{q}\sin(qz)B(0) \} \exp(-j\Delta z)$ (5.8)  $B(z) = \{ -j\frac{\kappa}{q}\sin(qz)A(0) + [\cos(qz) - j\frac{\Delta}{q}\sin(qz)]B(0) \} \exp(j\Delta z)$ (5.9) 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<sub>0</sub>, B(0)=0なので





### モード結合導波路(4)

2本の導波路が同一構造の場合( $\beta_1 = \beta_2$ または $\Delta = 0$ )、式(5.8), (5.9)は以下のようになる。

$$\begin{cases} A(z) = A(\mathbf{0})\cos(\kappa z) - jB(\mathbf{0})\sin(\kappa z) & (5.12) \\ B(z) = -jA(\mathbf{0})\sin(\kappa z) + B(\mathbf{0})\cos(\kappa z) & (5.13) \end{cases}$$

### マッ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、△=0

$$\begin{cases} A1 = A0 \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) = \frac{A0}{\sqrt{2}} = \frac{A0}{\sqrt{2}} e^{j \cdot 0} & (5.14) \\ B1 = -jA0 \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) = -j\frac{A0}{\sqrt{2}} = \frac{A0}{\sqrt{2}} e^{-j\frac{\pi}{2}} & (5.15) \end{cases} \qquad (5.16) \\ \begin{cases} A_2 = \frac{A0}{\sqrt{2}} \exp(-j\beta L) & (5.16) \\ B_2 = -j\frac{A0}{\sqrt{2}} \exp(-j\beta L + j\phi) & (5.17) \end{cases} \end{cases}$$

### マッハツェンダー型導波路の解析(2)

式(5.16)、(5.17)を式(5.12)、(5.13)のA(0)、B(0)に代入  

$$\begin{cases}
A_3 = -jA_0 \sin(\frac{\phi}{2\phi}) \exp(-j\beta L + j\frac{\phi}{2\phi}) & (5.18) \\
B_3 = -jA_0 \cos(\frac{\phi}{2}) \exp(-j\beta L + j\frac{\phi}{2}) & (5.19)
\end{cases}$$

$$\sum \left\{ \begin{array}{l} |A_3|^2 = |A_0|^2 \sin^2(\frac{\phi}{2}) & (5.20) \\ |B_3|^2 = |A_0|^2 \cos^2(\frac{\phi}{2}) & (5.21) \end{array} \right.$$

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

2007年度

光通信システム

$$\phi = \frac{\pi}{2} + \delta \phi$$
 となるようにバイアスを加えると、  
 $|A_3|^2 \simeq \frac{1}{2} |A_0|^2 (1 + \delta \phi)$  (5.22) 〇〇 強度変

δφに比例した 強度変化が得られる

#### 2007年度

#### 2007年及 光通信システム マッハツェンダー型干渉計の強度変調器の動作を再度



#### <sup>2007年度</sup> <sub>光通信システム</sub> マッハツェンダー型導波路用デバイス(電気光学結晶)





### いろいろな光強度変調方式

伝送方式	NRZ	RZ	CS-RZ	SSB-RZ
データ パターン	011010 位相は一定	011010 位相は一定	011010 070707	
スペクトル	<b>f</b> <sub>0</sub> /2			
光SN比耐力	$\bigtriangleup$		$\bigcirc$	
SPM-GVD 耐力	$\bigtriangleup$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	
光スペクトル 重なり	$\bigcirc$	$\square$	$\bigcirc$	
変調の構成	IM/PM	IM IM $$	$ \begin{array}{c c} IM & PM \\ \hline & & & \\ \hline f_0 & NRZ & f_0 \end{array} $	$ \begin{array}{c c} IM & PM \\ \hline & & & \\ \hline f_0 & NRZ & f_0 \end{array} $

### NRZとRZ方式



(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



このパルス列をフーリエ級数展開すると、

### NRZ変調の信号帯域

10Gbps, 2<sup>31</sup>-1 PRBS (Pseudo Random Bit Sequence), マーク率1/2





### RZ変調の信号帯域



最高周波数

 $10Gbps \div 1 = 10GHz$ 





### 各変調方式の光パルス生成手法(1)

1台のマッハツェンダー型光変調器での生成方法



### マッハツェンダー型光変調器における電界の入出力の関係

$$\begin{cases} E_{out} = jE_{in} \exp(-j\beta L) \sin(\frac{\phi_1 - \phi_2}{2}) \exp(j\frac{\phi_1 + \phi_2}{2}) \\ \phi_1 = \frac{\pi}{2} \frac{V_1}{V_{\pi}} [\sin(\omega t + \Psi)] + V_{bias1} \\ \phi_2 = \frac{\pi}{2} \frac{V_2}{V_{\pi}} \sin(\omega t) + V_{bias2} \end{cases}$$
(5.23)

各変調方式の光パルス生成手法(2)

変調方式	CS-RZ	RZ	SSB-RZ	Duobinary
駆動条件	$V_{1}=V_{2}=V_{\pi}$ $\Psi=\pi$ $V_{\text{bias1}}=V_{\text{bias2}}=0$ $\omega=\omega_{1}=2\pi f_{0}/2$	$V_{1} = V_{2} = V_{\pi}/2$ $\Psi = \pi$ $V_{\text{bias1}} = \pi/2$ $V_{\text{bias2}} = 0$ $\omega = \omega_{0} = 2\pi f_{0}$	$V_{1}=V_{2}=V_{\pi}/\sqrt{2}$ $\Psi=\pi/2$ $V_{\text{bias1}}=\pi/2$ $V_{\text{bias2}}=0$ $\omega=\omega_{0}=2\pi f_{0}$	$V_{1}=V_{2}=V_{\pi}$ $\Psi=\pi$ $V_{\text{bias1}}=V_{\text{bias2}}=\pi$ $\omega=\omega_{0}=2\pi f_{0}/2$
位相状態	・位相項一定 ・f <sub>0</sub> /2周波数で 交互に位相反転	・位相項一定 ・f₀周波数の 光パルス	・f₀周波数の光 パルスにビット 同期して位相変調	・位相項一定 ・f₀/2周波数で 交互に位相 反転

RZ方式



CS-RZ方式



#### 2007年度 光通信システム $E_{out} = jE_{in} \exp(-j\beta L) \exp(j\frac{\pi}{4}) \sin\{\frac{\pi}{4}\sin(\omega_0 t - \frac{\pi}{4}) - \frac{\pi}{4}\}$ $\sum_{ssbrzp(1,t)} 0$ $\sum_{r=1}^{1} -1$ $\sum_{r=1}^{1} \frac{1}{1}$ $\sum_{r=1}^{1} \frac{1}{1}$

2







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<sup>m</sup> 1



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



2007年度 光通信システム

NRZ符号(符号長7のM系列)(2)

フーリエ変換(波長軸)

フーリエ変換(周波数軸)



2007年度 光通信システム



2007年度 光通信システム

### RZ符号(符号長7のM系列)(2)

フーリエ変換(波長軸)



フーリエ変換(周波数軸)



デュオバイナリ符号(符号長7のM系列)(1)



デュオバイナリ符号(符号長7のM系列)(2)

フーリエ変換(波長軸)

フーリエ変換(周波数軸)

