## 第9回

## 光送受信器(3)・ビット誤り率(1)

2009年12月14日(月)

# 光インターコネクト ・LAN用送信器

<sup>2009年度</sup> <sub>光通信システム</sub> 光送信器(半導体レーザ)への要求拡大と改善方法

## 要求

- 高温動作特性(閾値電流上昇・出力低下の抑制)の改善 特にアクセス系(FTTH)用途・LAN用途は低コスト化の要求が厳しい Telcordia規格: -40°C~+85°C → -40°C~+100°C
  - 無温調化によるシステムの低コスト化・低消費電力化

## 改善方法

● 高∆Ec(伝導帯不連続値)材料の 導入



#### <sup>2009年度</sup> 光通信システム 高温動作・無温調動作InGaAlAs MQWレーザ

- 伝導体不連続△Ecの拡大による温度特性改善
- 動作温度は-20℃~+100℃に拡大
- < 1000 FIT's @ 95°C</li>
   (T. Takeshita et al. (NTT), OFC2006 OThN2)
- マスクマージン > 10% @ 10.7Gbps
   f<sub>r</sub>向上 による低温・低バイアスでの高速動作維持 (H. Singh et al. (Opnext), OFC2006 OThN3)

<sup>2009年度</sup> <sub>光通信システム</sub> 半導体LDの更なる高速化への挑戦(40Gbps直接変調)

K. Nakahara et al. (Hitachi), OFC2006, OWC5

- InGaAlAs系MQW活性層による高緩和振動周波数 (2.8GHz/mA<sup>1/2</sup>, f<sub>r</sub> > 20GHz)
   DFB回折格子のノッチフリーによる低抵抗化(10Ω@100μmL)
- I<sub>th</sub> = 7.4mA, η<sub>d</sub> = 0.46W/A
- 40Gbps直接変調時に5dB消光比を実現, 2km SMF伝送

#### 2009年度 100GbE用EAM集積DFB-LD(1) <sup>光通信システム</sup> (設計時の課題)

▶ 無温調(UncooledまたはCoolerless)による低コスト化(0~85℃)



#### 100GbE用EAM集積DFB-LD(2) (バイアス設定による課題解決)



波長

消光比が温度に対して一定となるよう、EAMのDCバイアスを調整

高温の"0"レベルで最適離調に設定した場合: 低温 → 大きな離調を低DCバイアスで調整

#### 100GbE用EAM集積DFB-LD(3-1)

2009年度 光通信システム

#### (報告例)

S. Makino(Hitachi), COIN2008, C-15-PM3-2-4 (2008).

DFB-LD: 400µm EAM: 100µm

無温調化のための技術

 高温動作時のLD特性劣化抑制 InGaAsAs系MQW構造による キャリア・オーバーフロー抑制

LDとEAMの離調調整
 オフセットバイアス調整

Dynamic Extinction Ratio:
 9.9dB(0°C), 9.6dB(85°C)

# 光受信器

### 光受信器の役割



## フォトディテクタの動作原理(1)

pin-PDの構造



#### 面入射型PDの構造



2009年度 光通信システム

pin-PDの基本特性



#### <sup>2009年度</sup> <sub>光通信システム</sub> 光受光器の高速化のポイント(1)



 $\alpha$ :吸収係数

## フォトディテクタの動作原理(2)

#### APD(Avalanche Photodiode)の構造



## 実際のAPDの層構造

#### SAM型: Separate Absorption Multiplication



#### InGaAs-APDとInAlAs-APDの比較



#### 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)

 $F = M \left\{ 1 - (1 - k) \frac{(M - 1)^2}{M^2} \right\}$ 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*  $\alpha \ge \beta$ ), *or*  $\frac{\alpha}{\beta}$  (*if*  $\beta \ge \alpha$ )  
 $\alpha$ : 電子のイオン化率,  $\beta$ : ホールのイオン化率

2009年度

光通信システム

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



#### 超格子のポテンシャルを ホールが超えにくい



2009年度 光通信システム

APDの特性評価パラメータ



#### 受信系の基本構成(1)









#### 受信系の基本構成(2)



光受光器の高速化のポイント(2)

面型から導波路型へ

走行遅延・受信感度のトレードオフ



導波路型 L L d

受信感度(吸収率)∝ 1-exp(-ad)

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 受信感度(吸収率)∝ 1-exp(-αL)

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)

## 光強度変調方式における受信の基本構成

#### 直接検波(IM-DD)方式の場合



#### 受信回路の構成(前置増幅器あり)





T. Takeuchi, T. Nakata, K. Makita and T. Torikai (NEC), OFC2001, WQ2-1 (2001).

<u>Graded Index層付き装架型素子</u>

2009年度

光通信システム



## 導波路型光受信器

K. Kato, M. Yuda, A. Kozen, Y. Muramoto, K. Oguchi and O. Nakajima. (NTT), Electron. Lett., Vol.32, No.22, pp.2078-2079 (1996).





## 耐高光入力·高感度導波路型APD

中田、芝、牧田、佐々木、鳥飼(NEC)、信学会2004年総合大会、C-4-36.







#### 2009年度 光通信システム 40Gbps動作導波路型APD

S. Shimizu, K. Shiba, T. Nakata, K. Kasahara, and K. Makita, Electron. Lett., vol.43, No.8, pp.476-477 (2007).



## 単一走行キャリアPD

石橋 ら(NTT), 1998年電子情報通信学会総合大会 C-4-12 (1998) 385.



#### アクセス用バースト受信器

- 異なる距離・送信パワー差などによりONU間の信号強度に差が発生
- ▶ 同レベルの電気信号に等化(自動利得等化、Auto-Gain Control, AGC)

セットアップ信号を読み取りながら、クロック抽出・同期確立

光強度



## バースト受信器の構造(1)

S. Nishihara, M. Nakamura, K. Nishimura, K. Kishine, S. Kimura, and K. Kato (NTT), Electron. Lett., vol.44, No.3, pp. (2008).

2009年度

光通信システム

バースト対応TIA部



**AOC:** Automatic Offset Compensation

0.13µm SiGe-BiCMOS <0.76W

## バースト光信号の受信

S. Nishihara, M. Nakamura, K. Nishimura, K. Kishine, S. Kimura, and K. Kato (NTT), Electron. Lett., vol.44, No.3, pp. (2008).



## バースト受信器の構造(2)

J. Nakagawa, M. Nogami, N. Suzuki, M. Noda, S. Yoshima, and H. Tagami (Mitsubishi), ECOC2009, 7.5.3.

## バースト受信器の構造(2)

鈴木,名倉,田上,野上,小崎,中川(三菱電機),2009年信学会ソサイエティ大会,B-10-57.

バースト対応CDR(Clock and Data Recovery)部



## バースト受信器の受信特性

J. Nakagawa, M. Nogami, N. Suzuki, M. Noda, S. Yoshima, and H. Tagami (Mitsubishi), ECOC2009, 7.5.3.

第6章

## ビット誤り率

- 1. 誤り率(BER)
- 2. IM-DD方式のBER
- 3. コヒーレント方式のBER

#### 受信系の基本構成(1)





#### 受信系の基本構成(2)

② ヘテロダイン検波







## 受信信号の品質評価

● 信号対雑音比(SNR: Signal to Noise Ratio)





● 誤り率(BER: Bit Error Rate)

## 誤り率特性

ビット誤り率(BER: Bit Error Rate): Oレベルを1レベル、1レベルをOレベルに誤判定する確率。 低ければ低いほど良い。



# IM-DD方式のBER

#### **BERの計算式**

 $\frac{S_1 - v}{\sigma_1} = y, \frac{v - S_0}{\sigma_0} = y$ の変数変換を行い、p(1)=p(0)=1/2(マーク率1/2)



BER最小の条件は識別レベルが2つのガウス分布の交点に設定した場合であり、  $E_{10}=E_{01}$ である。



#### BERとSNRの関係

光通信のマーク、スペースの雑音量は強度・構成要素に違いがあるため等しくないが、両者の平均量を等価的な雑音量と仮定して、

$$SNR = \left\{ \frac{s_1 - s_0}{(\sigma_1 + \sigma_0)/2} \right\}^2 = 4Q^2 \quad (6.6) \quad \sum \qquad BER = \frac{1}{2} erfc(\frac{\sqrt{SNR}}{2\sqrt{2}}) \quad (6.7)$$



ただし  
erfc(x):補誤差関数  
erfc(x) = 
$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{x}^{\infty} \exp(-t^2) dt$$

2009年度 光通信システム

#### 雑音の構成要素



Oレベル  $\sigma 0^2 = \sigma_{id}^2 + \sigma_{ith}^2$ (背景光をOと仮定。 光源の消光比が有限の場合には考慮が必要)



#### ショット雑音限界



BER<10<sup>-9</sup>となるQ>6, SNR=4Q<sup>2</sup>=144=21.6dB

 B=40Gbps, ηi=1.0のとき
 Ps=185nW (-37.3dBm, マーク率1/2の時は 平均パワー-40.3dBm)
 → ビット当たり36個・平均18個の光子が必要

#### PIN-PDにおけるBER



1レベルの信号光ショット雑音と熱雑音の分散量( $\sigma_1$ )

※ NRZ信号を仮定し、信号帯域B/2とした。

※数値例)  $P_{s} = -3dBm, B = 40GHz, T = 300K, \eta_{i} = 0.8, R_{L} = 50\Omega, \lambda = 1.55\mu m$ のとき、  $k = 1.38 \times 10^{-23} J/K, \hbar = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{2\pi} J \cdot s, \omega = 2\pi \frac{c}{\lambda} = 2\pi \frac{3 \times 10^{8}}{\lambda} Hz$ なので  $2e \frac{e \eta_{i} P_{s}}{\hbar \omega} \frac{B}{2} = 3.2 \times 10^{-12} [A^{2}]$  $\frac{4kT}{R_{L}} \frac{B}{2} = 6.62 \times 10^{-12} [A^{2}]$ 熱雑音が支配的

#### PIN-PDにおける最小受信感度(続き)

計算結果



最小受信感度:所定のBERを達成するために必要な最小の受信光パワー

・SNR ∝ 1/B ・SNR ∝  $P_s^2$  同じBERを得るには $P_s \epsilon \sqrt{B}$ 倍に (帯域4倍に対し受信感度3dB劣化)

#### 熱雑音の影響を軽減するための工夫 光通信システム 前置増幅器

高インピーダンスフロントエンド

▶ 負荷抵抗を大きくして 熱雑音の影響を低減 するため、入力インピー ダンスを大きくした増幅器 容量による帯域制限

2009年度



トランスインピーダンス フロントエンド

▶ 高感度・高速用に使用



陸上光ケーブル伝送方式: < 2.4Gbps BER < 10<sup>-11</sup> 10Gbps BER < 10<sup>-14</sup>

電話のサービスに適する:<10<sup>-6</sup> 長時間平均符号誤り率:<10<sup>-9</sup>

などサービス・システムによって要求条件が異なる。

2009年度 光通信システム

#### APDにおける最小受信感度



x:過剰雑音指数(x ~ 0.5 @ GaInAsP系)

 $M \rightarrow \infty, x=0$ の場合、

$$SNR = \frac{\eta_i P_s}{2\hbar\omega(\frac{B}{2})\frac{1}{4}}$$
 ショット雑音限界と等価

#### APDにおける最小受信感度(続き)

計算結果





#### 高感度化の変遷



年

2009年度 光通信システム

#### 伝送距離の損失制限



## 光ファイバの損失による伝送帯域制限



非線形効果による送信出力制限(1)

光ファイバ屈折率の光強度依存性:光カー効果

$$\Delta \phi = \frac{2\pi \Delta nL}{\lambda_0} = \frac{2\pi n_2 |E|^2 L}{\lambda_0}$$

数100mWが限界。



<sup>2009年度</sup> <sub>光通信システム</sub> 非線形シュレーディンガー方程式による伝送解析(1)

非線形シュレーディンガー方程式



E:光の電界 β<sub>2</sub>:2次分散値 k:波数 n<sub>2</sub>:非線形定数=1.22×10<sup>22</sup> m/V

入力信号(10Gbps,7段M系列)



#### <sup>2009年度</sup> <sub>光通信システム</sub> 非線形シュレーディンガー方程式による伝送解析(2)

伝送後(入力光ピークパワー:1mW, D=18ps/nm/km, L=100km)





非線形効果による送信出力制限(2)

#### 1波長だけでも問題となる現象

誘導ブリルアン散乱(Stimulated Brillouin Scattering, SBS):
 入力光信号が光ファイバ自身の格子振動(音響フォノン)を引き起こし、
 入力方向に散乱する非線形現象。
 通常構造のファイバでは数dBmが限界

WDMで問題となる現象

- 誘導ラマン散乱(Stimulated Raman Scattering, SRS):
   入力光信号が光ファイバ自身の格子振動(光学フォノン)を引き起こし、 進行方向に散乱する非線形現象。
   積極的に光増幅器として利用する場合もある(ラマン増幅器)。
   数W程度。
- 4光波混合(Four Wave Mixing, FWM):
   2入力あるいは3入力の光信号の和周波・差周波信号を誘起する 非線形現象。
   入力光電界の3乗に比例。