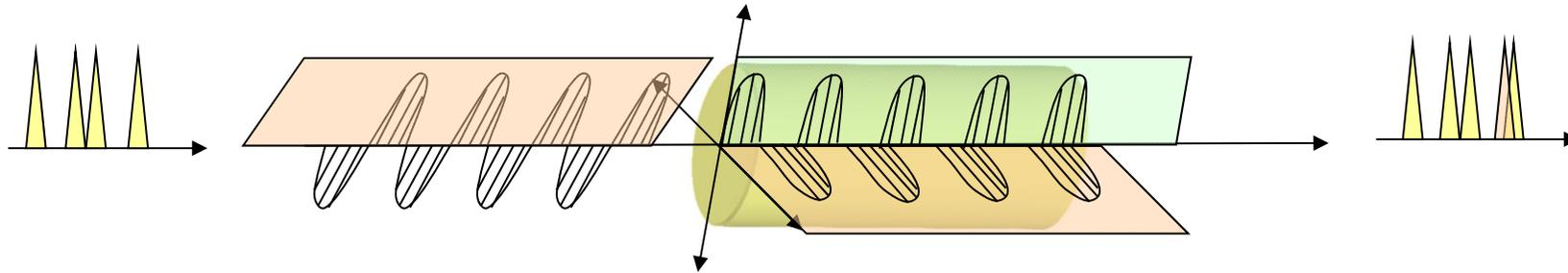


第6章(続き)

光ファイバ伝送特性(2)

2012年1月16日(月)

偏波モード分散 (Polarization Mode Dispersion, PMD)



- ・コア形状のわずかな歪み
- ・ガラス中の残留応力
- ・外力

偏波モード間に群遅延時間の差が発生



- ・偏波モードごとの到着時間に差
- ・伝送距離を制限

(例)

偏波モード分散: $0.05\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$

到着時間差の時間平均としてタイムスロットの30%を許容限度とした場合、

- ・40Gbpsにおいて22,500kmの距離制限 → 海底系もOK
- ・160Gbpsにおいて1,400kmの距離制限 → $0.02\text{ps} / \sqrt{\text{km}}$ 以下が必要 @ 6,000km

● PMD制限

バイナリ・コード

bit rate	PMD制限距離
20Gbps	520km
40Gbps	130km
100Gbps	21km

PMDの面では、伝送帯域40Gbps以上は厳しい

● 波形歪の原因

① 波長分散

$$B\sqrt{L} = \sqrt{\frac{\ln 2}{2\pi}} \frac{\sqrt{c}}{\lambda\sqrt{|\sigma_T|}} = \frac{181.9}{\lambda\sqrt{|\sigma_T|}} \quad \Rightarrow \quad \text{伝送距離制限はビットレートの2乗に反比例}$$

② 偏波モード分散

PMDによる波形歪は距離のルートに比例(比例定数をCとおく)

➡ 1タイムスロットの一定割合(kとおく)以内が伝送制限とすると、

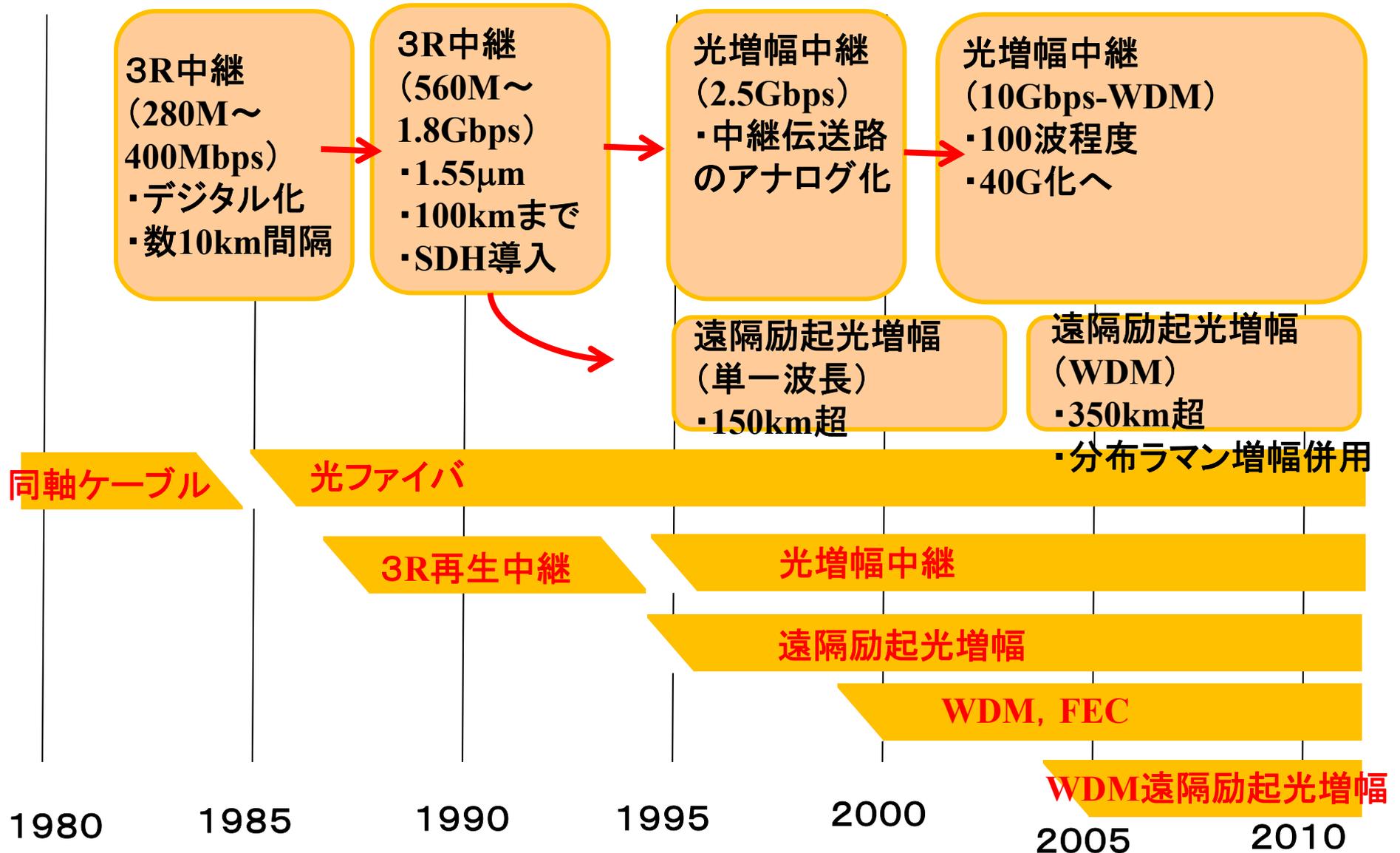
$$\frac{k}{B} \geq C\sqrt{L}$$

$$B\sqrt{L} \leq \frac{k}{C} \quad \Rightarrow \quad \text{伝送距離制限はビットレートの2乗に反比例}$$

海底系光ファイバの研究動向

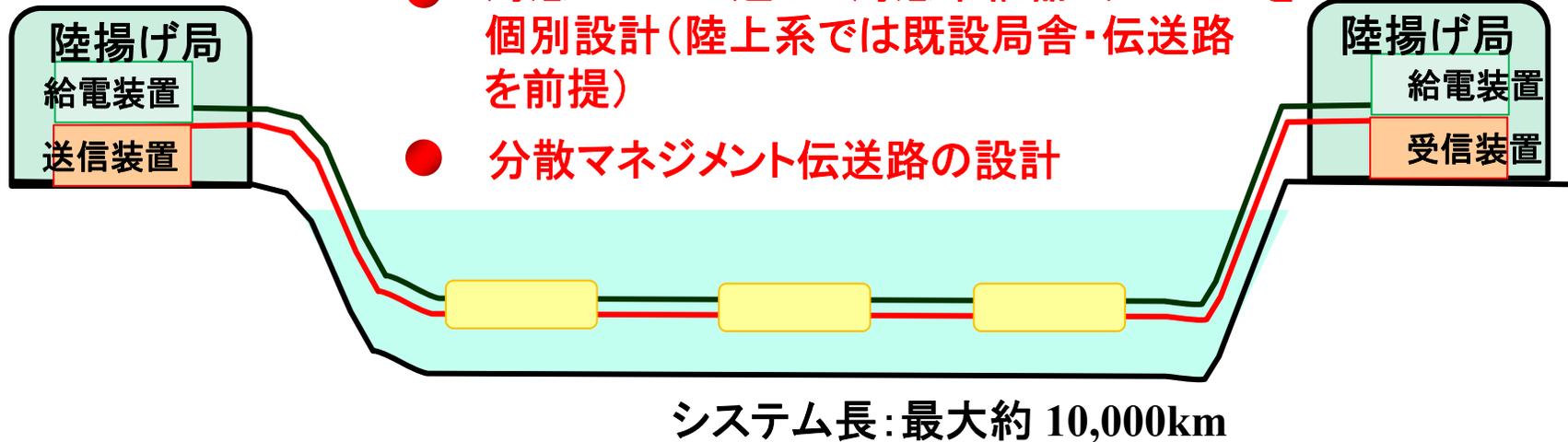
海底伝送システムの開発史

日経コミュニケーション 2010年1月1日号『光ネットワーク最新技術(19) 国際間を結ぶ海底伝送システム』 p.66 図1



海底光伝送システムの基本構成

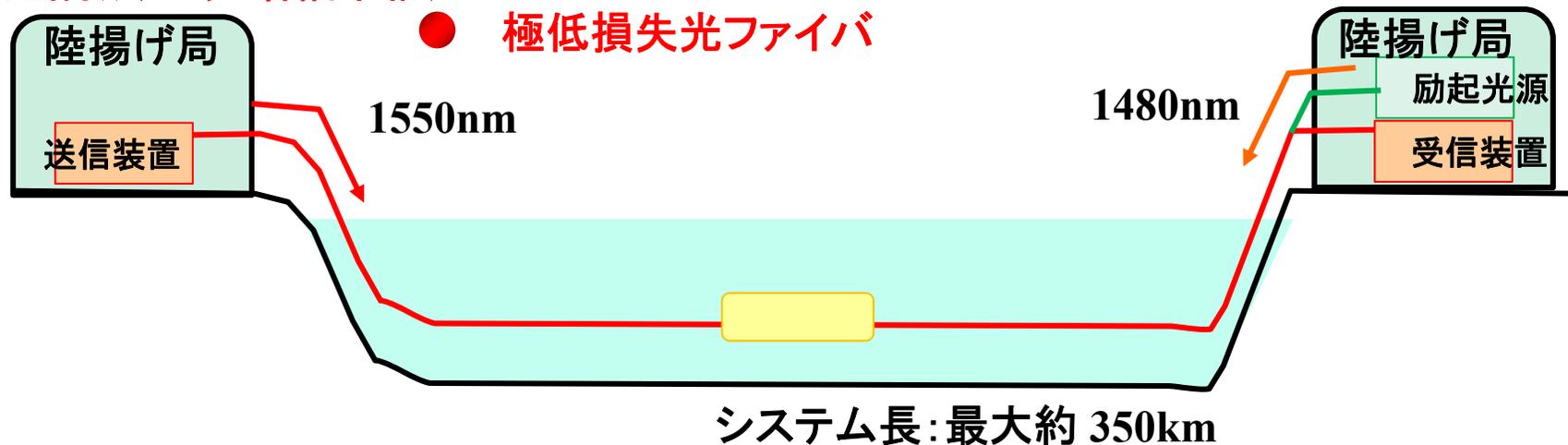
中継伝送システム (光増幅中継)



陸上系と異なる設計手法

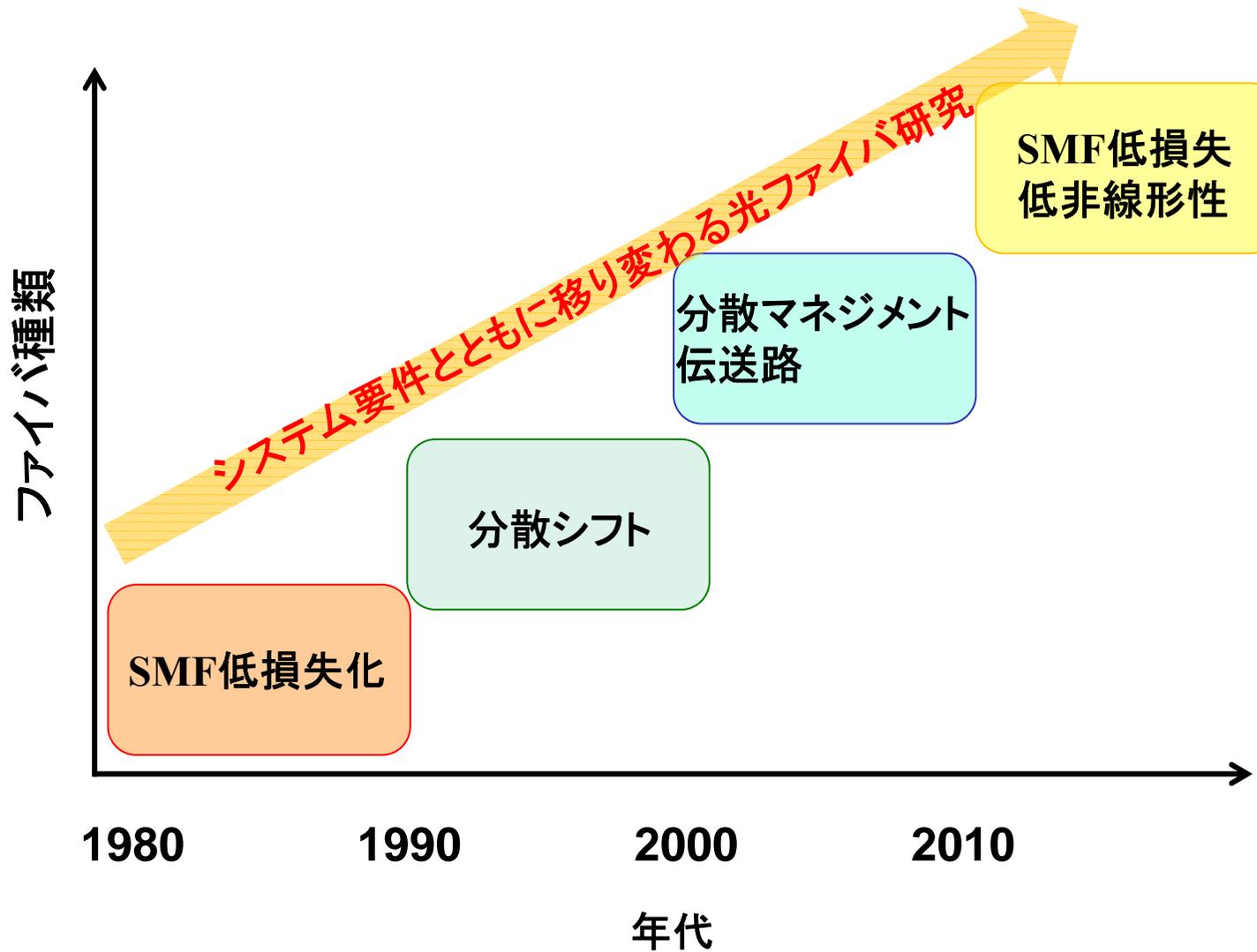
- 海底ルートに適した海底中継器・ケーブルを個別設計(陸上系では既設局舎・伝送路を前提)
- 分散マネジメント伝送路の設計

無中継伝送システム (遠隔励起・光増幅中継)



- 極低損失光ファイバ

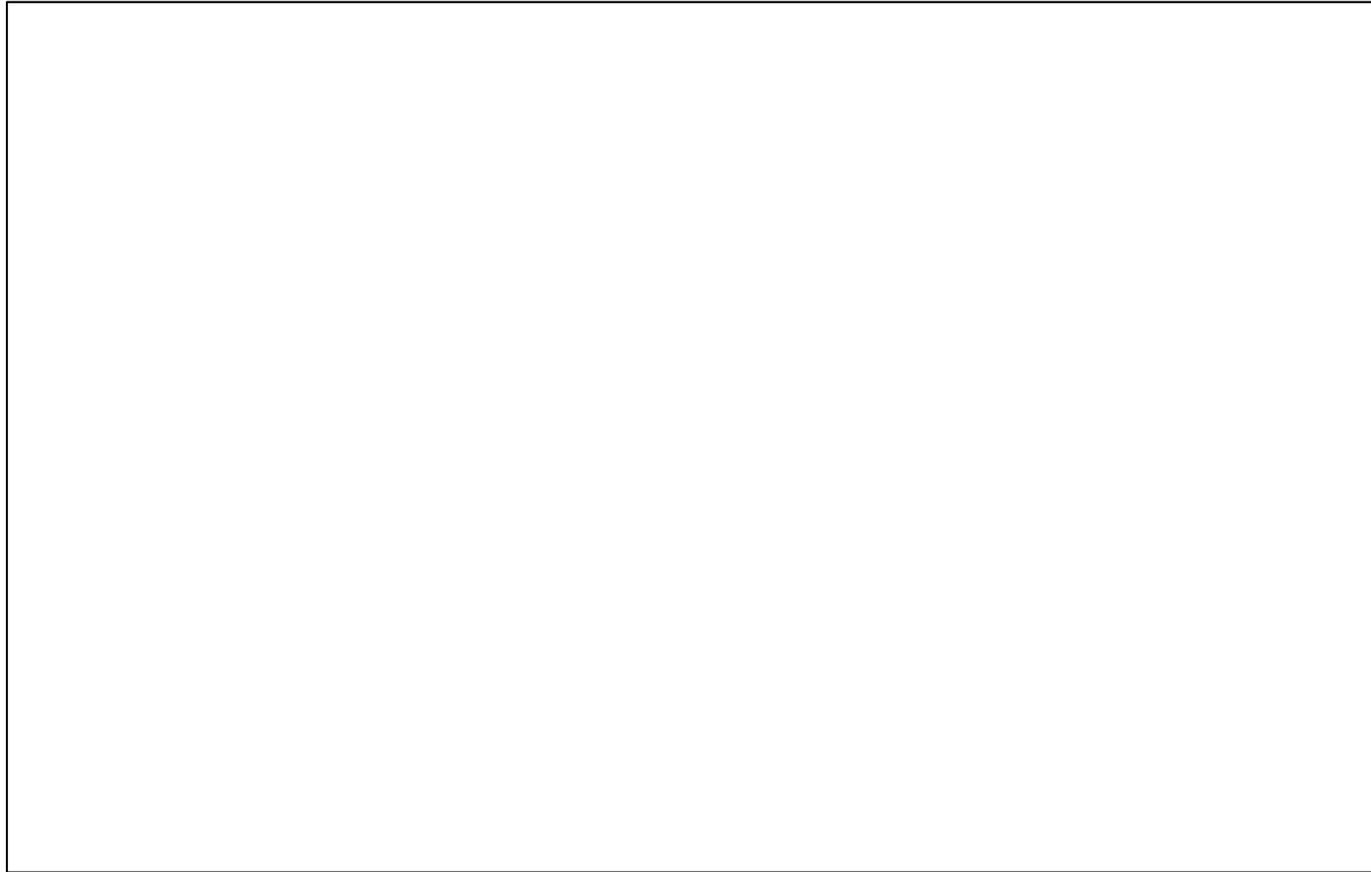
最近の光ファイバの研究動向



2011年度

周波数利用効率・距離積を引き上げる 光通信システム デジタル・コヒーレント技術と低非線形性ファイバ

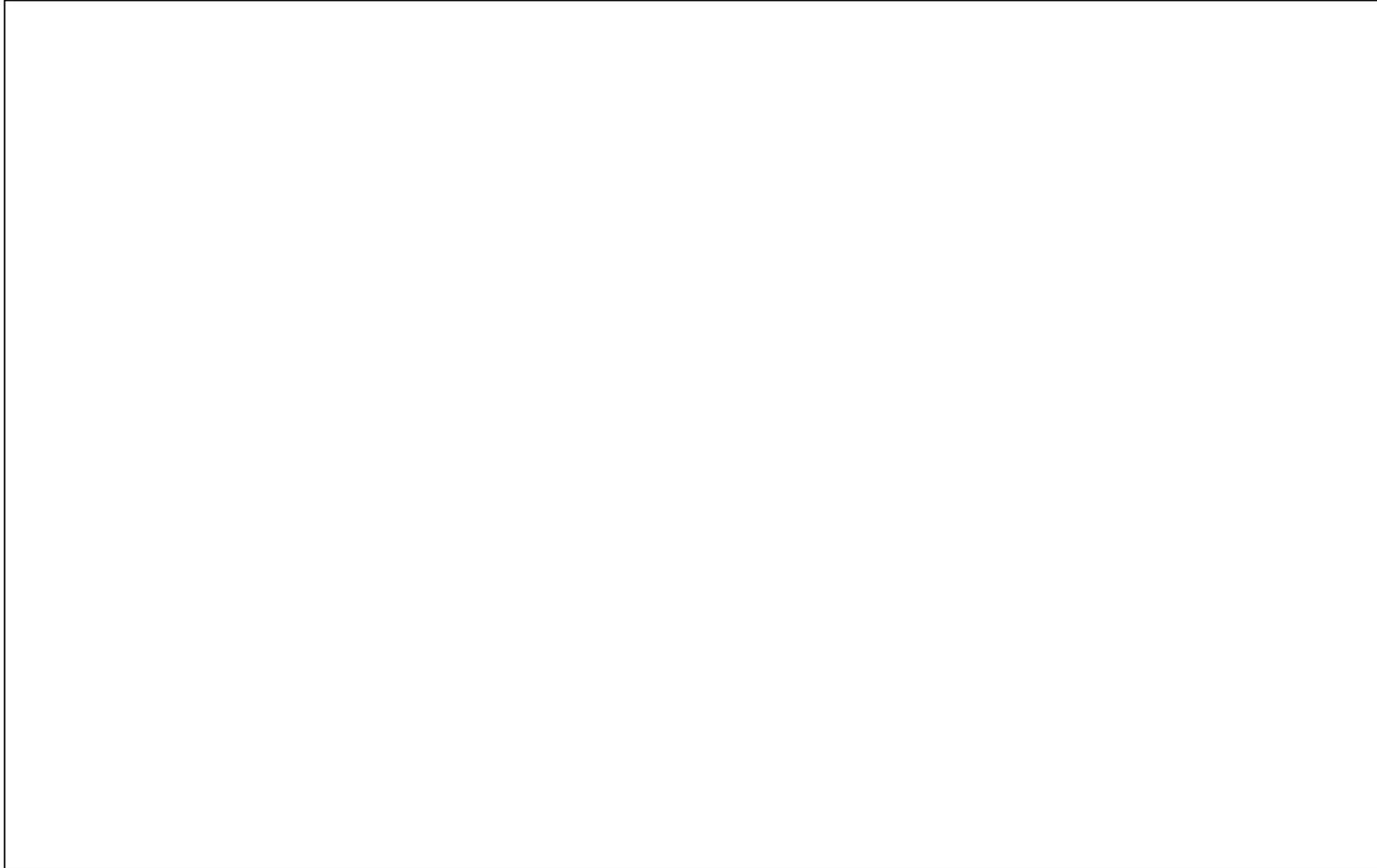
Y. Yamamoto, M. Hirano, and T. Sasaki, OFC/NFOEC2011, OWA6 (2011).



2011年度
光通信システム

新規光ファイバ開発が求められる背景

ITUジャーナル vol.39, No.5 (EXAT研究会特集) 中沢 “光通信インフラの限界に挑戦する” p.3 (2009).



大容量化(1000倍の容量拡大)を実現する3M技術

- マルチレベル変調(多値変調): ×10

m-PSK, m-QAM, 偏波多重(PDM), O-OFDM(マルチキャリア)



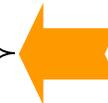
拡大コアによる
非線形低減

- マルチコアファイバ: ×10

空間分割多重(Spatial Division Multiplexing, SDM)

- マルチモード制御: ×10

モード分割多重(Mode Division Multiplexing, MDM)

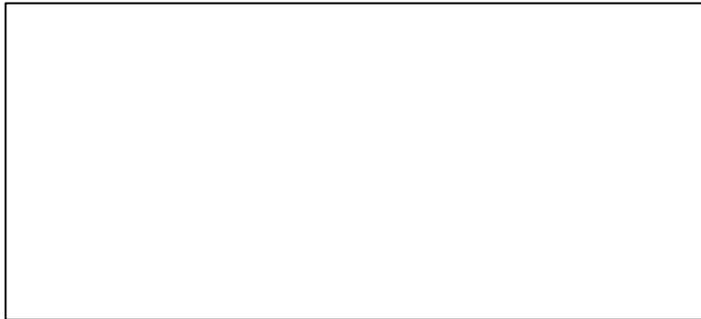


異種コアマルチコア
ファイバ

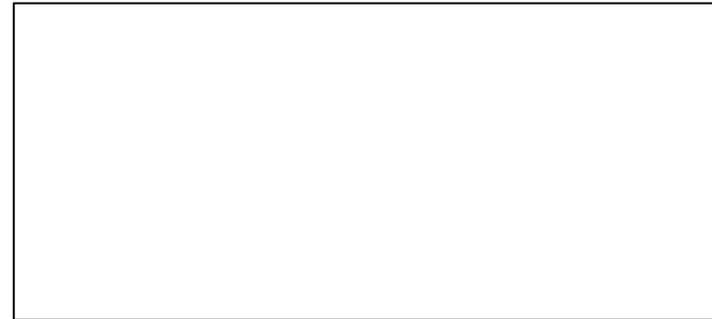
ファイバ・フューズの問題

ITUジャーナル vol.39, No.5 (EXAT研究会特集) 笹岡, 武笠, Abedin “光ファイバの限界と課題” p.9 (2009).

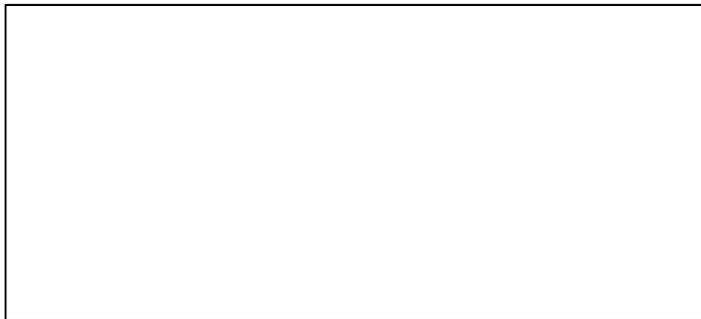
ファイバフューズ発生実験



ファイバフューズの発生閾値



ファイバフューズ発生後の光ファイバ



コア拡大により閾値拡大可

光ファイバの特性改善例と研究課題

ITUジャーナル vol.39, No.5 (EXAT研究会特集) 笹岡, 武笠, Abedin “光ファイバの限界と課題” p.8 (2009).

	伝送容量へのインパクト	光ファイバの課題
モード数拡大 1 → 10	<ul style="list-style-type: none"> ● モード多重による容量拡大 (MIMO等伝送技術は必要) ● V値3倍強(単純ステップ型) → コア断面積10倍 (Δn維持) → 非線形性低減 	<ul style="list-style-type: none"> ● モード数増加だけであれば課題なし ● モード分散制御・モード間結合の抑制等に対して新規設計・開発必要
コア数増大 1 → 10	<ul style="list-style-type: none"> ● 各コアが従来と同等性能であれば容量10倍 	<ul style="list-style-type: none"> ● コア間クロストークを考慮した設計 ● 製造技術開発 ● ファイバ相互・機器間接続
伝送損失 1/10	<ul style="list-style-type: none"> ● 光SNR確保 ● 強度／振幅変調多値化 ● 入力パワー減による位相の非線形ノイズ低減 → 位相／周波数変調多値化 ● 非線形性低減の可能性 	<ul style="list-style-type: none"> ● PBGFや石英以上に透明な新材料

最近の光ファイバ研究の傾向

- ① マルチコア・ファイバ
Multi-Core Fiber
- ② マルチモード・ファイバ
Multi-Mode Fiber(モード多重伝送用Few Mode Fiber)
- ③ 空孔アシストファイバ
Hole Assisted Fiber (HAF)
- ④ フォトニック結晶ファイバ
Photonic Crystal Fiber (PCF)
- ⑤ フォトニック・バンドギャップ・ファイバ
Photonic Bandgap Fiber (PBF)

非結合マルチコアファイバ

ITUジャーナル vol.39, No.5 (EXAT研究会特集) 國分,小柴 “シングルコア光ファイバの限界を打ち破るマルチコアファイバ” p.17 (2009).

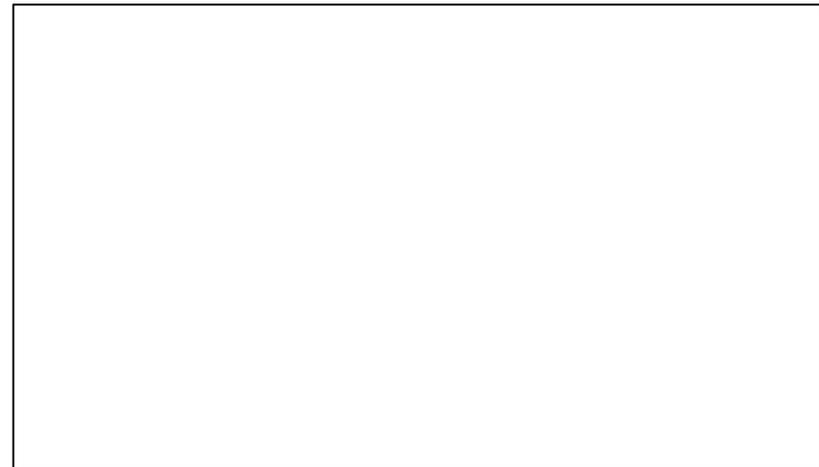
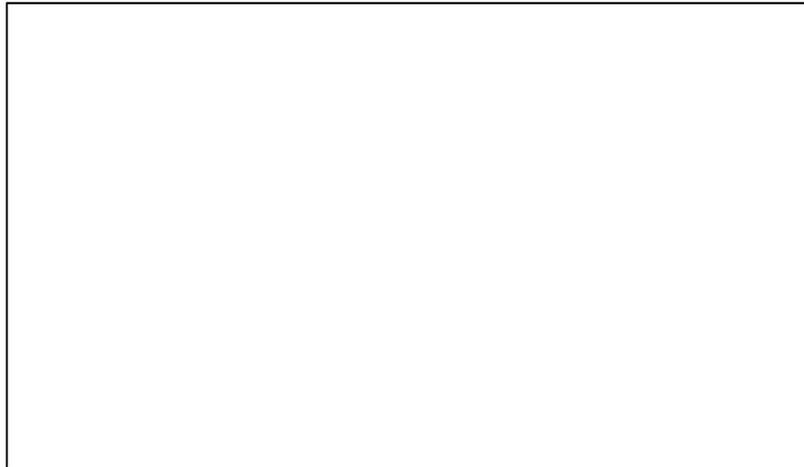


比屈折率差 Δ の異なる
複数のクラッド間の結合が小さくなる
設計



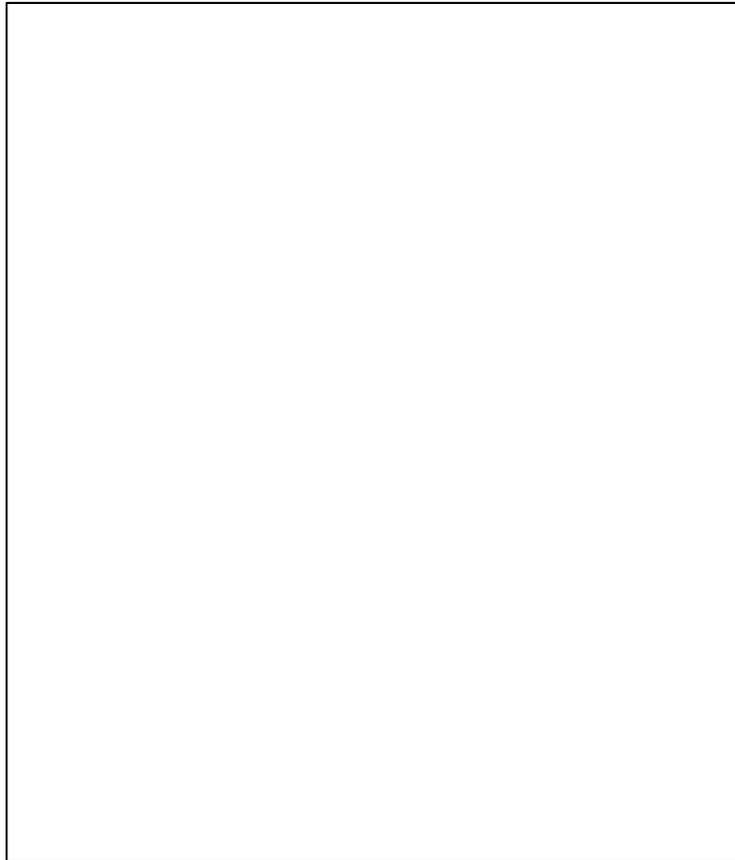
結合マルチコアファイバ

ITUジャーナル vol.39, No.5 (EXAT研究会特集) 國分,小柴 “シングルコア光ファイバの限界を打ち破るマルチコアファイバ” p.18 (2009).

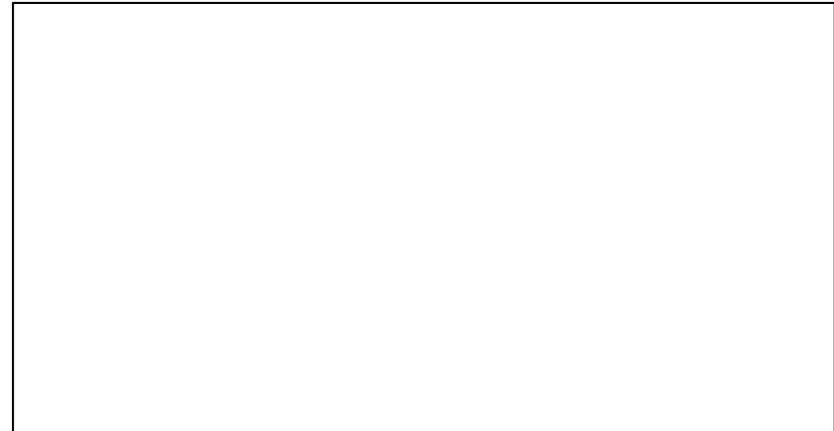


コア間を強結合させ、異なる伝搬定数のモードに
伝送チャンネルを配置

http://www.ntt.co.jp/news/news03/0312/031217_1.html



大藺, Yao, 滑川, 日立電線No.26、p.73 (2007-1).

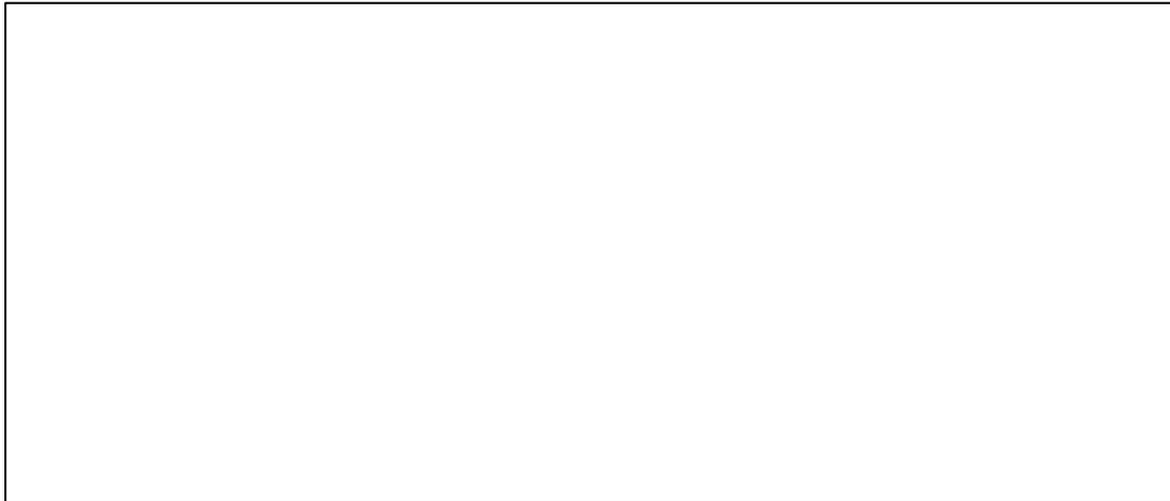


屈折率差増大による曲率半径低減
→ 施工性向上に寄与

- カールコード形状により、実寸の15分の1に縮小
- 収容面積: 36分の1 (曲率半径5mm)

Photonic Crystal Fiber (PCF)

大藺, Yao, 滑川, 日立電線No.26、p.73 (2007-1).



- 石英コアと外周構造の等価屈折率差による閉じ込め
- $d/\Lambda \leq 0.43$ のとき、すべての波長域においてシングルモード可
 d : 空孔径
 Λ : 空孔間隔
- 低損失化が課題(2dB/km程度)

PCFの分散特性

(左側写真) <http://www.bath.ac.uk/physics/groups/opto/pcf.html>

(右側データ) <http://www.bath.ac.uk/physics/groups/opto/documents/PECS%20pcf.PDF>



Photonic Bandgap Fiber (PBGF)

大藪, Yao, 滑川, 日立電線No.26、p.75 (2007-1).



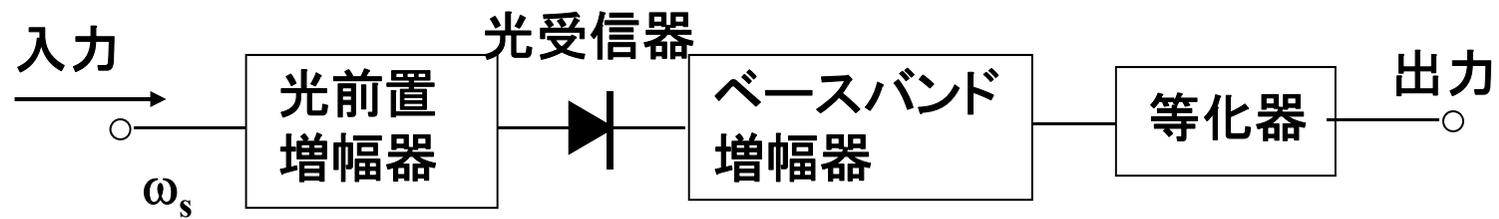
- 周期構造のブラッグ回折による
バンド形成
- 空気コア → 高パワー伝送路
極低非線形性
極低損失

第7章

ビット誤り率(1)

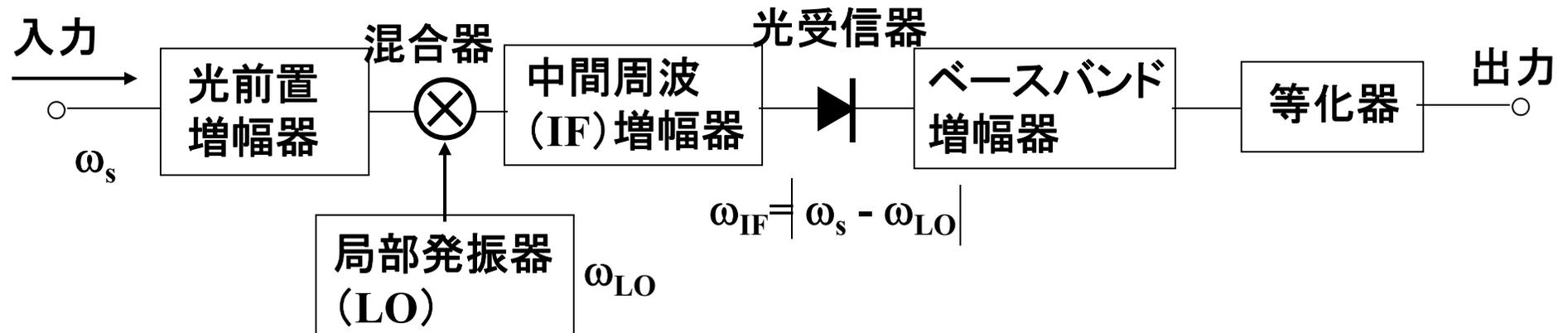
1. 誤り率(BER)
2. IM-DD方式のBER
3. コヒーレント方式のBER

① 直接検波(IM-DD方式)

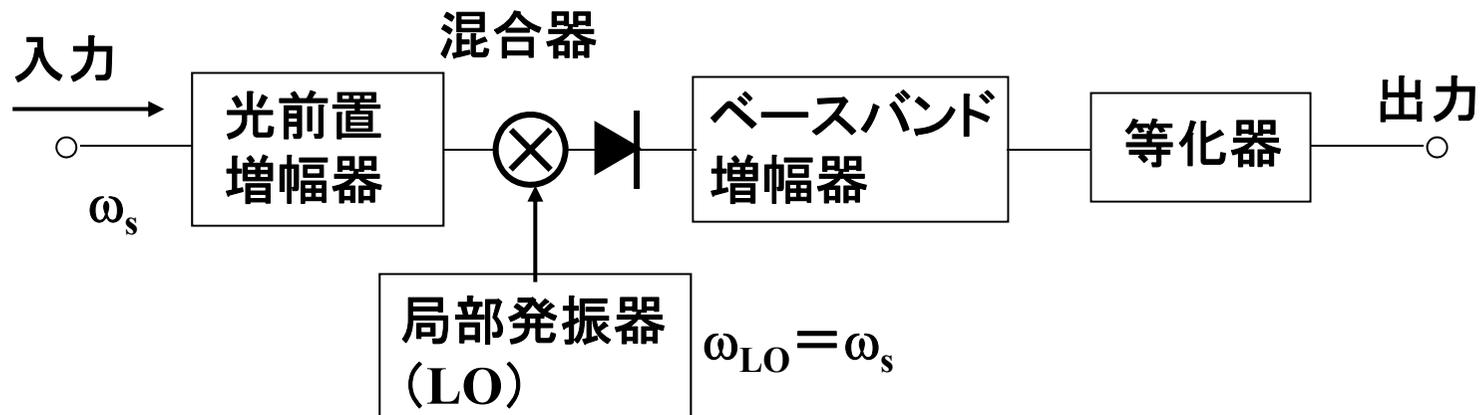


受信系の基本構成(2)

② ヘテロダイン検波



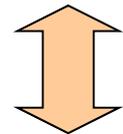
③ ホモダイン検波



- 信号対雑音比 (SNR: Signal to Noise Ratio)

雑音の要因 {

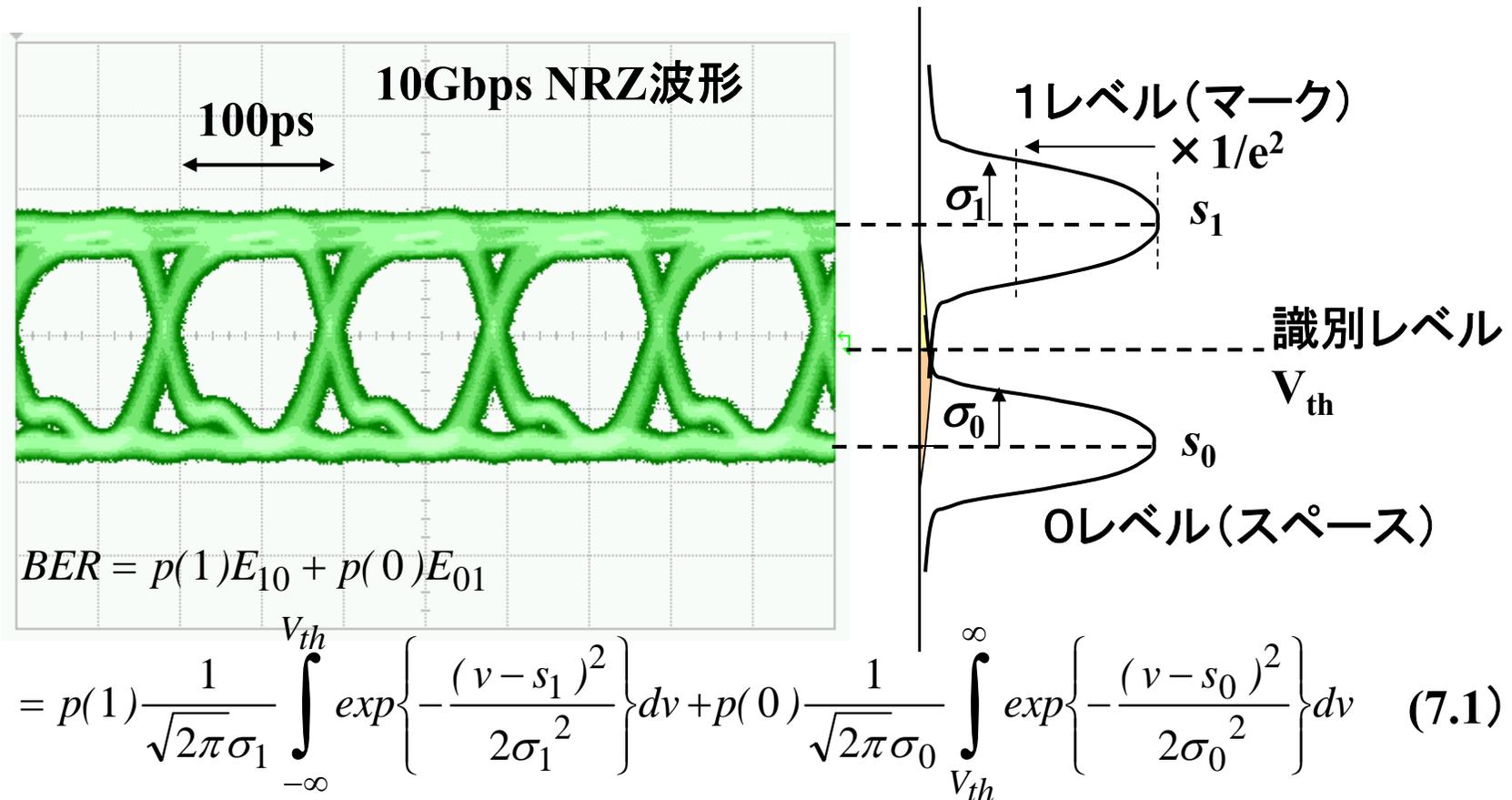
- ① ショット雑音
- ② 熱雑音
- ③ 前置増幅器の雑音

 1対1の関係

- 誤り率 (BER: Bit Error Rate)

誤り率特性

ビット誤り率 (BER: Bit Error Rate) :
0レベルを1レベル、1レベルを0レベルに誤判定する確率。
低ければ低いほど良い。



$p(i)$: i レベルの発生確率 ($i=0,1$)

E_{ij} : i レベルを j レベルと誤認識する確率 (ガウス分布)

IM-DD方式のBER

BERの計算式

$$\frac{s_1 - v}{\sigma_1} = y, \frac{v - s_0}{\sigma_0} = y \quad \text{の変数変換を行い、} p(1)=p(0)=1/2 \text{ (マーク率} 1/2)$$

とすると、(7.1)より

$$BER = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}} \left\{ \int_{\frac{s_1 - V_{th}}{\sigma_1}}^{\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy + \int_{\frac{V_{th} - s_0}{\sigma_0}}^{\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy \right\} \quad (7.2)$$

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。

$$Q = \frac{s_1 - V_{th}}{\sigma_1} = \frac{V_{th} - s_0}{\sigma_0} \longrightarrow V_{th} = \frac{\sigma_0 s_1 + \sigma_1 s_0}{\sigma_0 + \sigma_1} \quad (7.3)$$

$$\longrightarrow Q = \frac{s_1 - s_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (7.4)$$

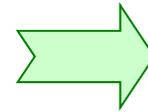
(7.2)に代入して、

$$BER = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_Q^{\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \quad (7.5)$$

BERとSNRの関係

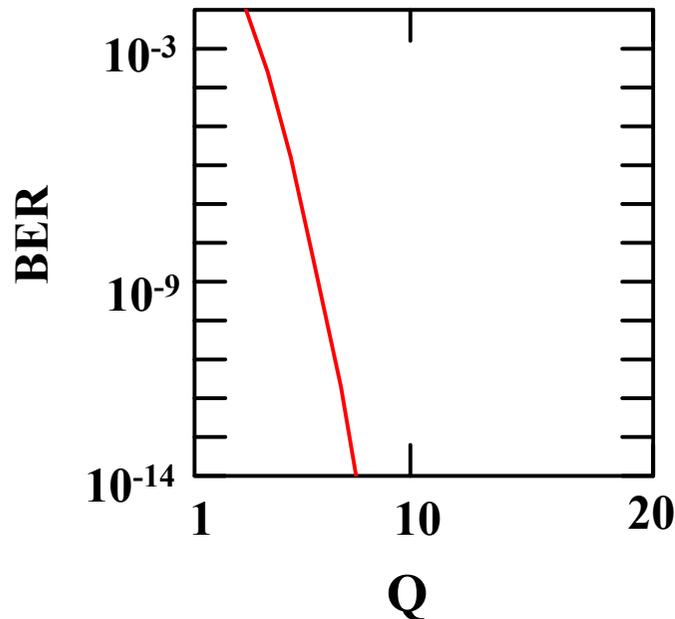
光通信のマーク、スペースの雑音量は強度・構成要素に違いがあるため等しくないが、両者の平均量を等価的な雑音量と仮定して、

$$SNR = \left\{ \frac{s_1 - s_0}{(\sigma_1 + \sigma_0)/2} \right\}^2 = 4Q^2 \quad (7.6)$$



$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{SNR}}{2\sqrt{2}}\right)$$

(7.7)



ただし

$\operatorname{erfc}(x)$: 補誤差関数

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-t^2) dt$$

雑音の構成要素

雑音の定義: 0レベル及び1レベルそれぞれの受信光パワーの揺らぎ(分散)

1レベル

$$\sigma_1^2 = \sigma_{is}^2 + \sigma_{id}^2 + \sigma_{ith}^2 = 2e \cdot e\eta i \left(\frac{P_s}{h\omega} \right) B + 2e i_d B + \frac{4kTB}{RL} \quad [A^2]$$

雑音帯域

① 信号光のショット雑音:
フォトンの発生確率の不確定性
を原因とするフォトン数の揺らぎ

③ 電子回路の熱雑音

② 受信器の暗電流によるショット雑音:
入力光が0でも流れる受信器の電流自体の
揺らぎ

0レベル $\sigma_0^2 = \sigma_{id}^2 + \sigma_{ith}^2$ (背景光を0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=10⁻⁹となるショット雑音限界の光子数を求める。

ショット雑音限界(熱雑音は考慮せず)

$$\sigma_1^2 = 2e \cdot e \eta_i \left(\frac{P_s}{\hbar \omega} \right) \left(\frac{B}{2} \right)$$

$$\sigma_0^2 = 0$$

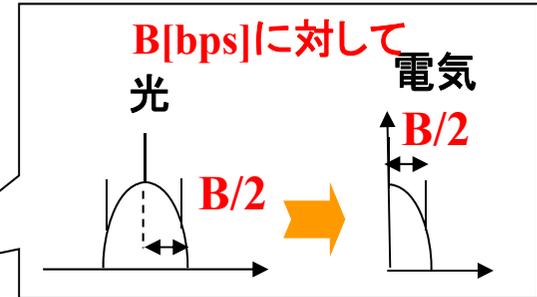
$$P_1 = e \eta_i \left(\frac{P_s}{\hbar \omega} \right)$$

$$P_0 = 0$$

NRZを対象
(RZではB)

$$Q = \frac{P_1 - P_0}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{e \eta_i \frac{P_s}{\hbar \omega}}{\sqrt{2e \cdot (e \eta_i \frac{P_s}{\hbar \omega}) \left(\frac{B}{2} \right)}}$$

$$= \sqrt{\eta_i \frac{P_s}{\hbar \omega} \frac{1}{B}}$$



BER < 10⁻⁹ となる Q > 6,
SNR = 4Q² = 144 = 21.6dB



B=40Gbps, η_i=1.0のとき
P_s=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

$$SNR = \frac{\left(e\eta_i \frac{P_s}{\hbar\omega} \right)^2}{\left(\sqrt{2e \frac{e\eta_i P_s}{\hbar\omega} \left(\frac{B}{2} \right) + \frac{4kT}{RL} \left(\frac{B}{2} \right)} + \sqrt{\frac{4kT}{RL} \left(\frac{B}{2} \right)} \right)^2} = \frac{\left(e\eta_i \frac{P_s}{\hbar\omega} \right)^2}{\left(\sqrt{2e \frac{e\eta_i P_s}{\hbar\omega} + \frac{4kT}{RL}} + \sqrt{\frac{4kT}{RL}} \right)^2 \frac{B}{8}} \quad (7.8)$$

$\left(e\eta_i \frac{P_s}{\hbar\omega} \right)^2$ ← R_L をかけると外部に取り出されるパワーとなる
 $\left(\sqrt{2e \frac{e\eta_i P_s}{\hbar\omega} \left(\frac{B}{2} \right) + \frac{4kT}{RL} \left(\frac{B}{2} \right)} + \sqrt{\frac{4kT}{RL} \left(\frac{B}{2} \right)} \right)^2$ ← R_L をかけると雑音パワーとなる
 $\left(\sqrt{\frac{4kT}{RL} \left(\frac{B}{2} \right)} \right)^2$ ← 0レベルの熱雑音の分散量 (σ_0)

1レベルの信号光ショット雑音と熱雑音の分散量 (σ_1)

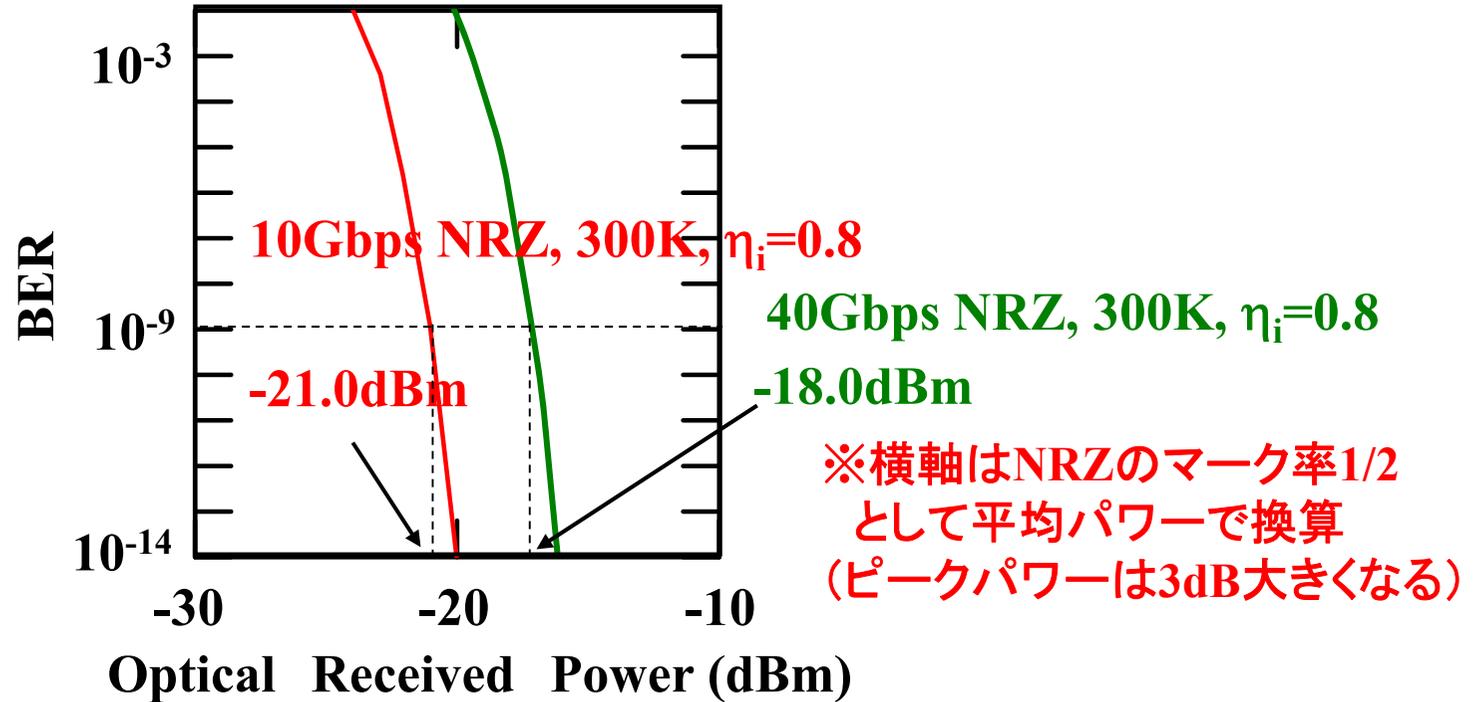
※ NRZ信号を仮定し、信号帯域B/2とした。

※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

$$\left. \begin{aligned} 2e \frac{e\eta_i P_s}{\hbar\omega} \frac{B}{2} &= 3.2 \times 10^{-12} [A^2] \\ \frac{4kT}{R_L} \frac{B}{2} &= 6.62 \times 10^{-12} [A^2] \end{aligned} \right\} \text{熱雑音が支配的}$$

計算結果



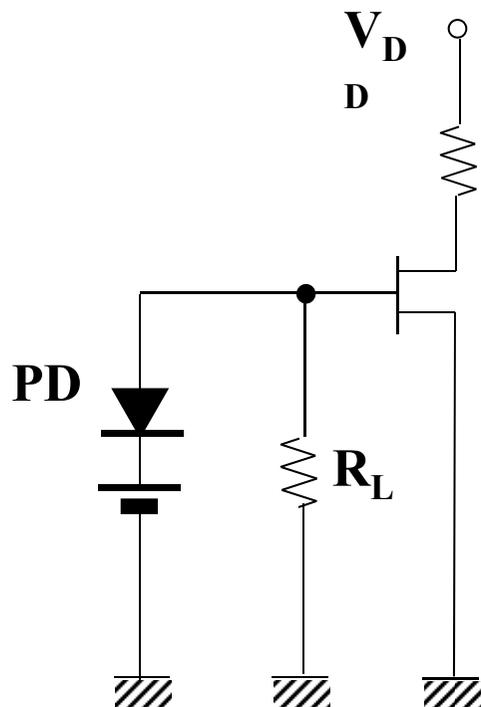
最小受信感度: 所定のBERを達成するために必要な最小の受信光パワー

$\left. \begin{array}{l} \cdot \text{SNR} \propto 1/B \\ \cdot \text{SNR} \propto P_s^2 \end{array} \right\} \rightarrow$ 同じBERを得るには P_s を \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 前置増幅器

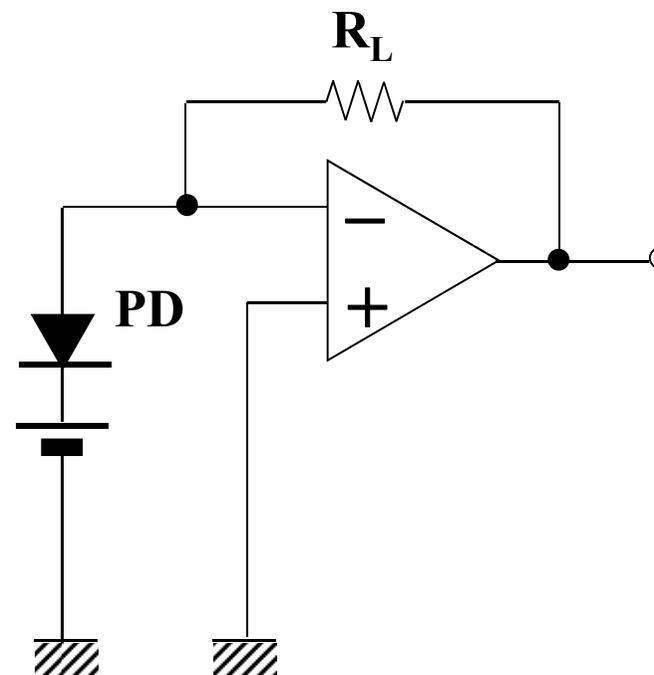
高インピーダンスフロントエンド

- 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



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^{-11}

10Gbps BER < 10^{-14}

電話のサービスに適する: < 10^{-6}

長時間平均符号誤り率: < 10^{-9}

などサービス・システムによって要求条件が異なる。

APDにおける最小受信感度

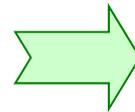
$$SNR = \frac{\left(e\eta_i \frac{P_s}{\hbar\omega} \langle M \rangle \right)^2}{\left(\sqrt{2e \frac{e\eta_i P_s}{\hbar\omega} \langle M^{2+x} \rangle} + \frac{4kT}{RL} + \sqrt{\frac{4kT}{RL}} \right)^2 \frac{B}{8}} \quad (7.9)$$

APDの電流増倍係数<M>を考慮

x : 過剰雑音指数 (x ~ 0.5 @ GaInAsP系)

M → ∞, x=0の場合、

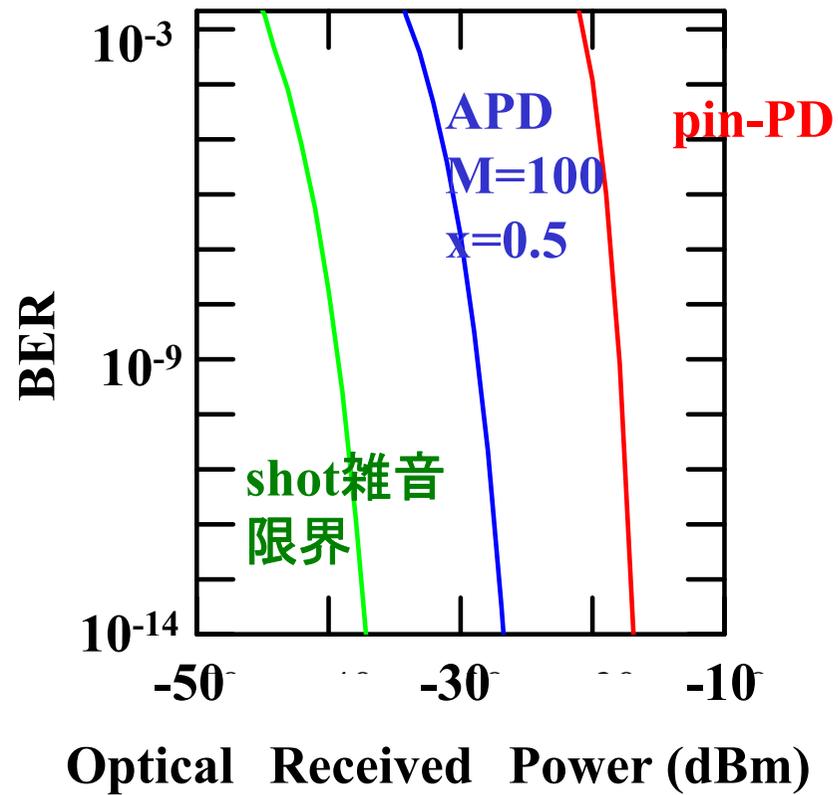
$$SNR = \frac{\eta_i P_s}{2\hbar\omega \left(\frac{B}{2}\right) \frac{1}{4}}$$



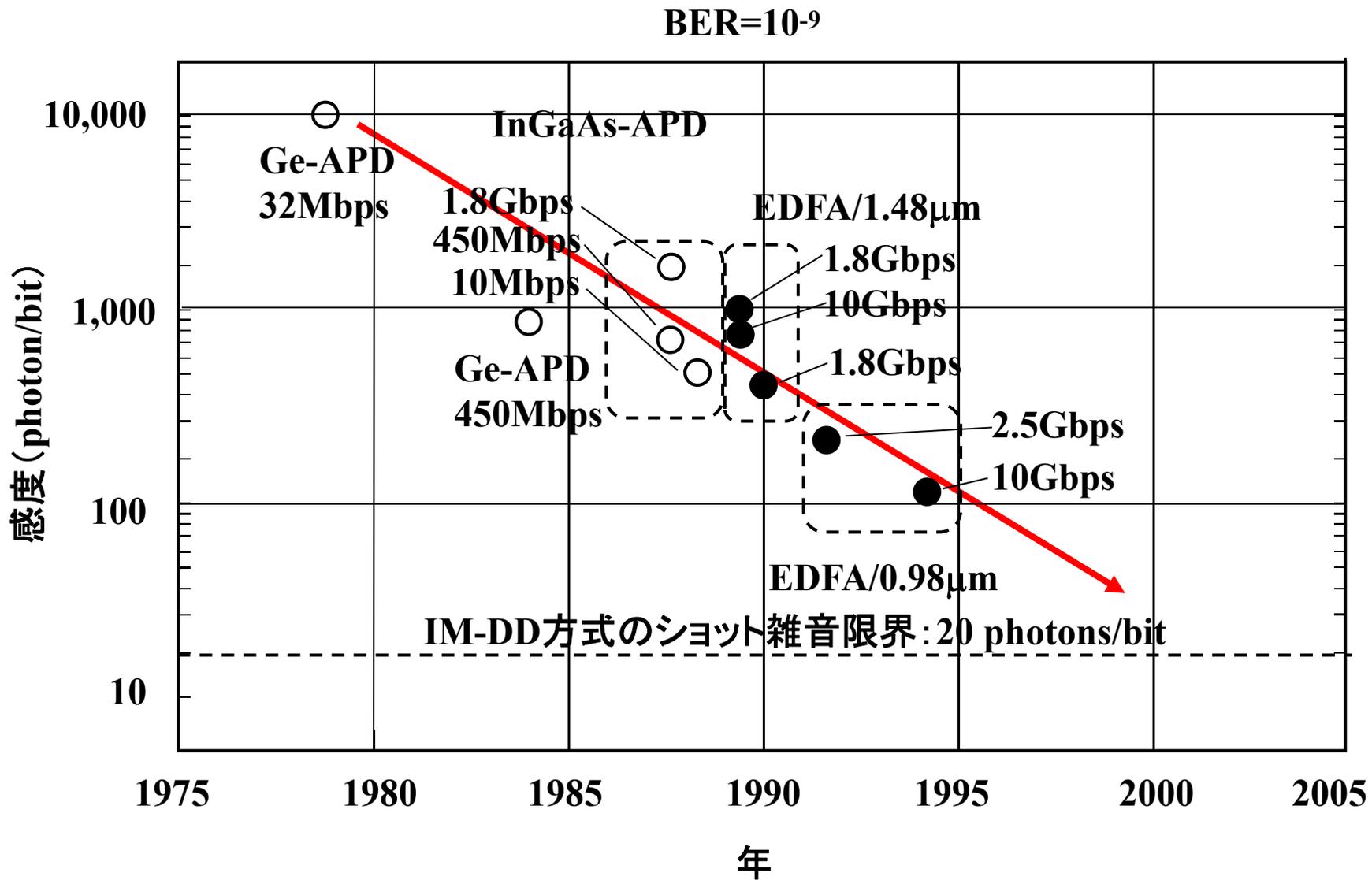
ショット雑音限界と等価

計算結果

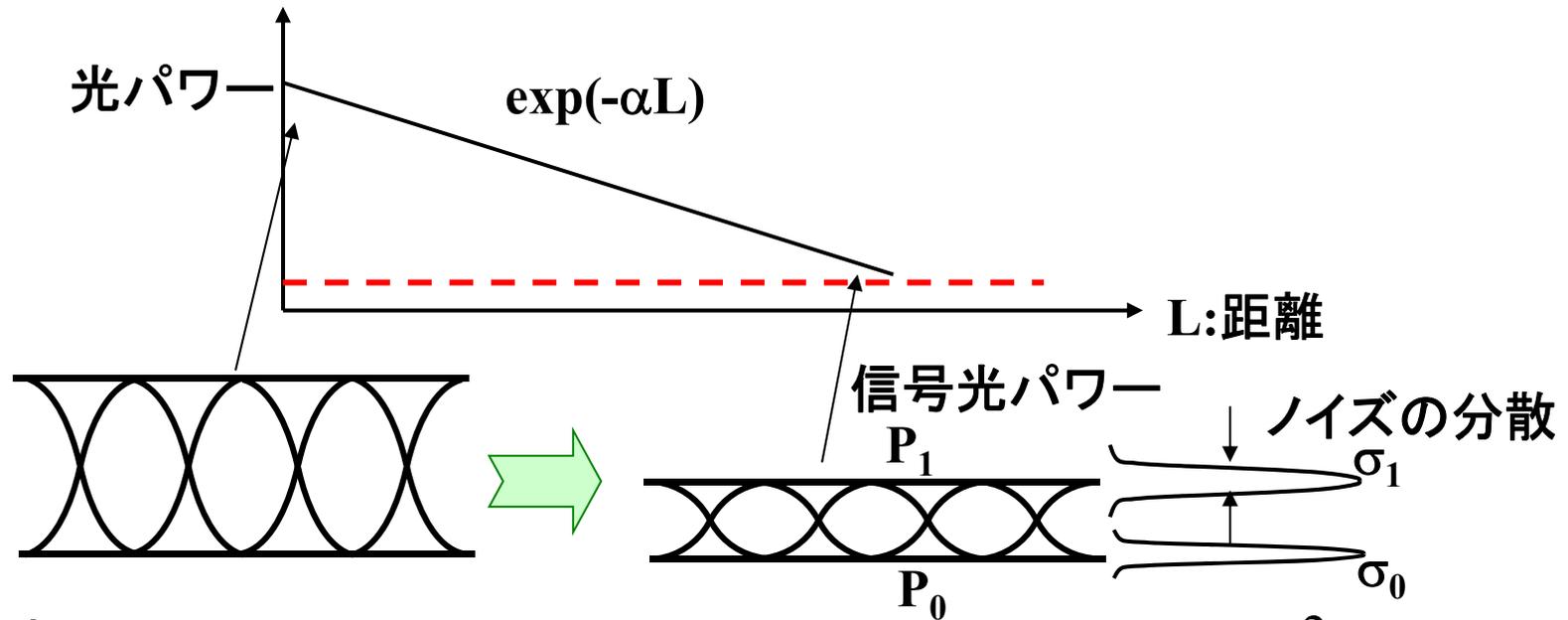
40Gbps NRZ, 300K, $\eta_i=0.8$



高感度化の変遷



伝送距離の損失制限



誤り率

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{SNR}}{2\sqrt{2}}\right)$$

ただし

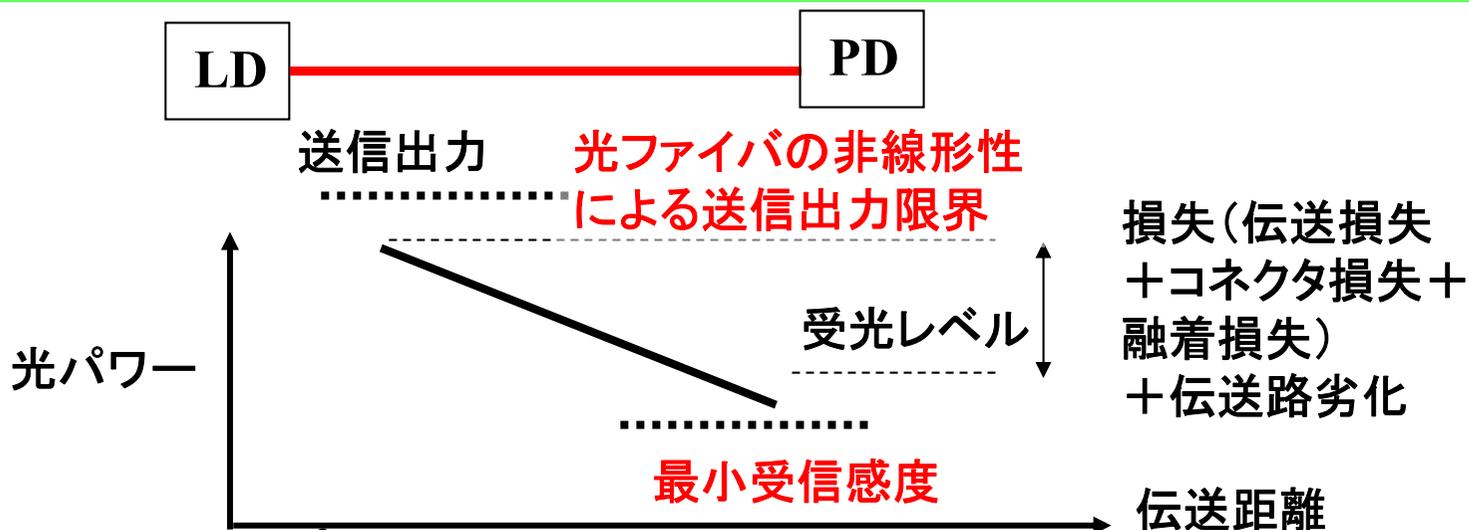
$$SNR = \left(\frac{s_1 - s_0}{\sigma_1 + \sigma_0 / 2} \right)^2 = 4Q^2$$



光パワーの減少に伴いSNR劣化

規程のBER (例. $<10^{-9}$) を満たす受信光パワーを維持するように伝送距離を決定

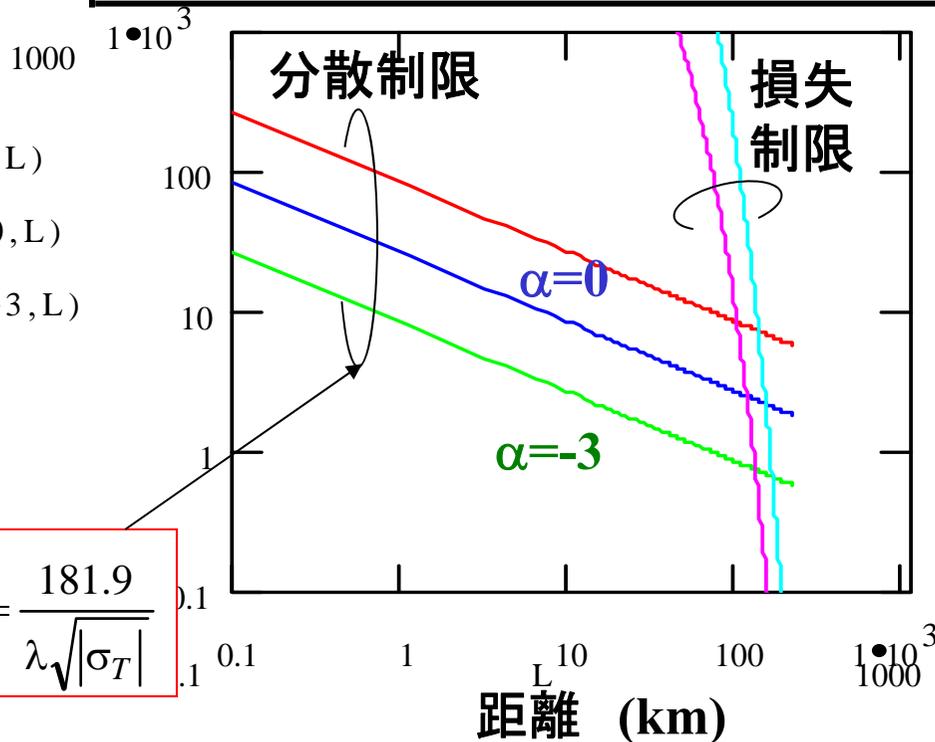
光ファイバの損失による伝送帯域制限



伝送帯域 (Gbps)

- Bdisp3 (2, 0, L)
- Bdisp3 (20, 0, L)
- Bdisp3 (20, -3, L)
- Bloss (L, 0)
- Bloss (L, 6)

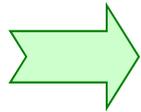
$$B\sqrt{L} = \sqrt{\frac{\ln 2}{2\pi}} \frac{\sqrt{c}}{\lambda\sqrt{|\sigma_T|}} = \frac{181.9}{\lambda\sqrt{|\sigma_T|}}$$



- 分散制限
- 分散2ps/nm/km
- チャープ無
- 分散20ps/nm/km
- チャープ無
- チャープ有
- 損失制限
- 0dBm
- +6dBm

距離 (km)

自己位相変調による位相変化



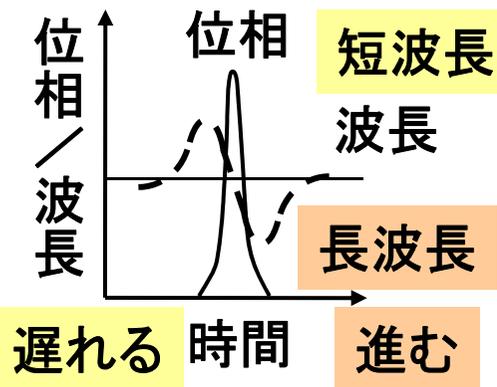
光ファイバ屈折率の光強度依存性: 光カー効果

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

数100mWが限界。



近年のDWDMでは
SPMとXPMの影響により
0dBm程度に制限



—— 位相
----- 波長

非線形シュレーディンガー方程式

$$\frac{dE}{dz} = j\frac{1}{2}\beta_2 \frac{d^2E}{dt^2} + j\frac{1}{2}kn_2|E|^2 E$$

$$\beta_2 = \frac{-D\lambda^2}{2\pi c}$$

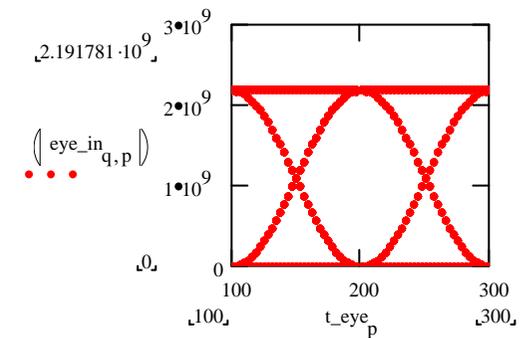
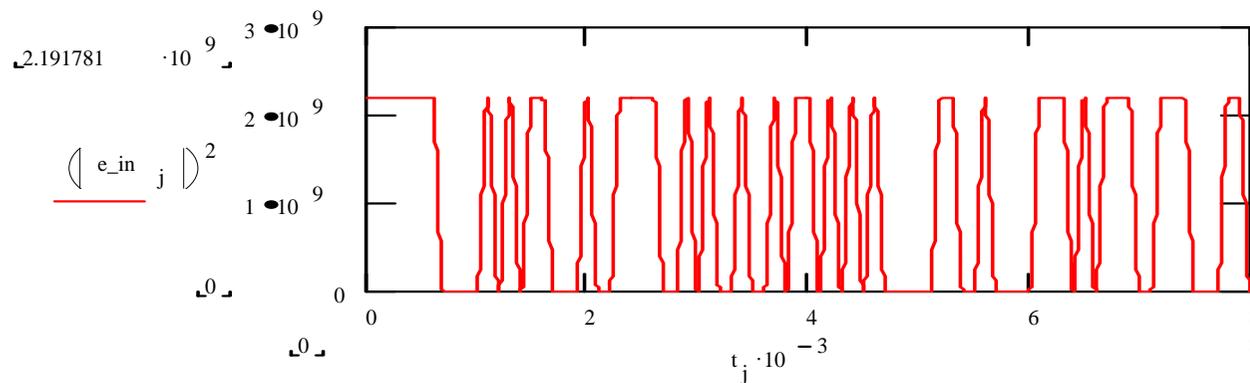
E : 光の電界

β_2 : 2次分散値

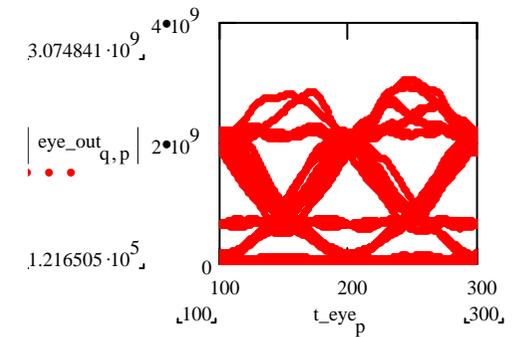
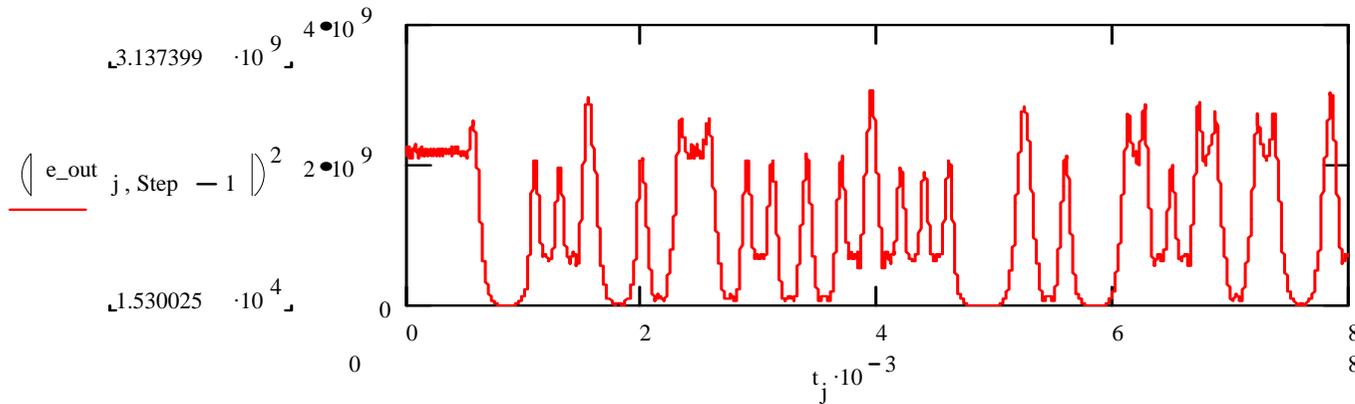
k : 波数

n_2 : 非線形定数 = 1.22×10^{22} m/V

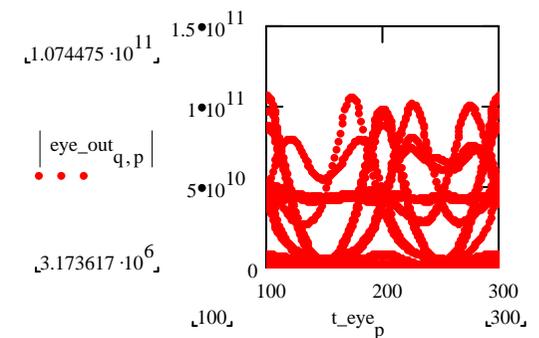
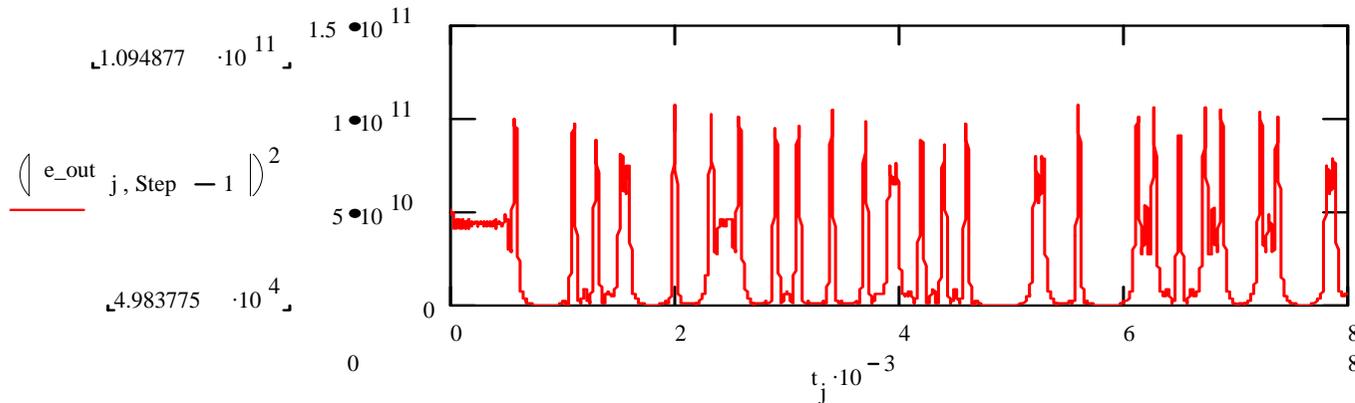
入力信号(10Gbps, 7段M系列)



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



伝送後(入力光ピークパワー: 20mW, $D=18\text{ps/nm/km}$, $L=100\text{km}$)



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。