第8回

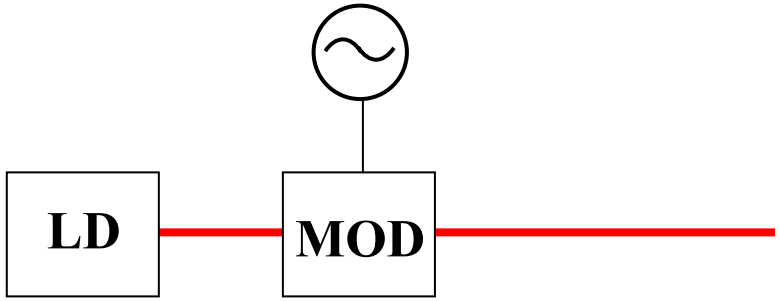
光送信器（3）・光受信器

2007年6月11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。

外部変調器におけるチャーピング



① 電気光学結晶（$LiNbO_3$）の場合
印加電界による屈折率変動がチャーピングの原因
→ 影響小

② 半導体（EA変調器）の場合
光励起キャリアによる屈折率変動がチャーピングの原因
→ $LiNbO_3$より影響大
バイアス電圧を選ぶとブルーチャープ領域があり、パルス圧縮の効果が期待できる。

コヒーレント検波の動向

２０～１５年前の研究のモーティベーション

① ショット雑音限界に近い高感度の最小受信感度の実現が可能（IM-DD方式より25dB程度の受信感度改善が可能）。
② 良好な特性の受信器の少ない波長1.3, 1.55μm帯における受信感度の向上が期待できる。

１５年前の暗転

EDFA（光ファイバ増幅器）の登場により吸収による伝送距離制限が飛躍的に改善され、受信にかかわる技術的課題をかかえても受信感度改善効果を期待してコヒーレント方式を推し進める動機が薄れた。

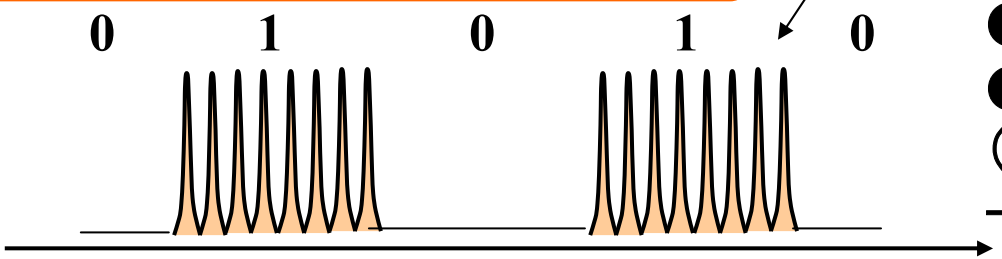
２～３年前からの復興

EDFAを用いたDWDM方式の残留分散・非線形効果の影響など技術的困難さを克服するため、コヒーレント方式の受信感度改善効果が見直された。DPSKは受信器構成など技術的敷居が低かったので採用。

コヒーレント検波の変調方式

振動波形は光の波長レベルでの振動

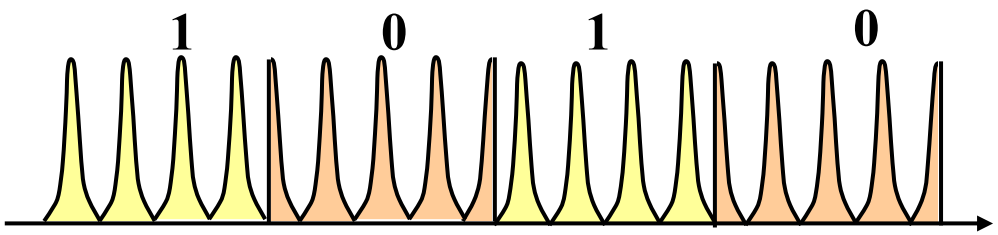
ASK (Amplitude Shift Keying)



- 振幅の有無にビットを対応
- 振幅の大きさで多値化

（4ASK：4値の場合
→ 2^2なので2ビット1シンボル）

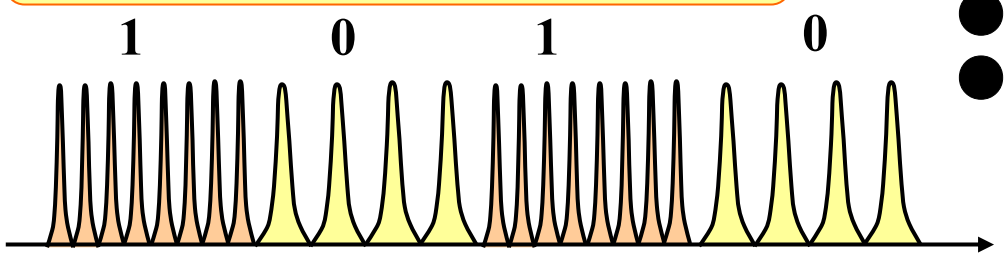
PSK (Phase Shift Keying)



- 位相の変化にビットを対応
- 位相の位置で多値化

（QPSK：0, π/2, π, 3/2π）

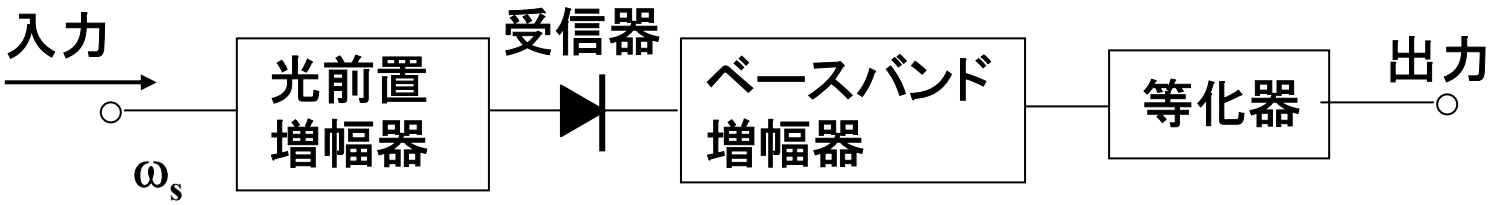
FSK (Frequency Shift Keying)



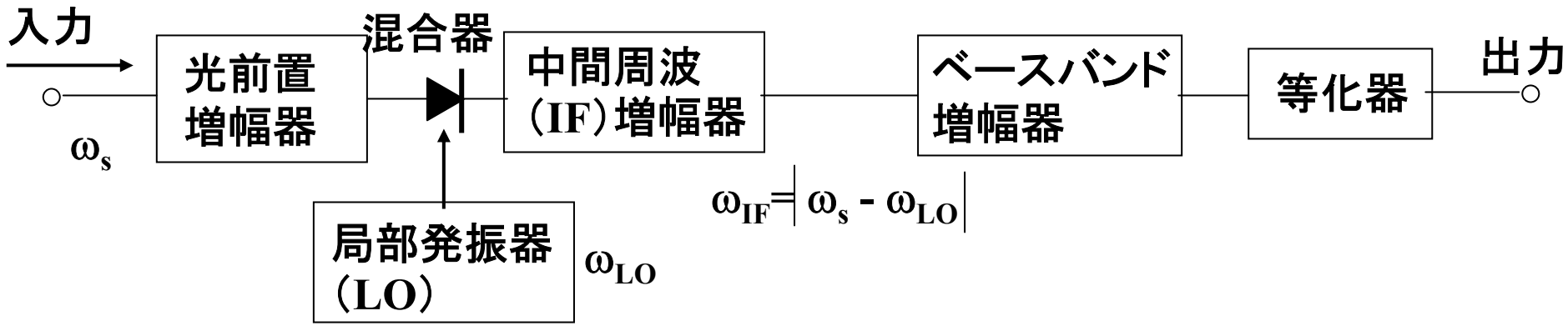
- 周波数の変化にビットを対応
- 周波数の大きさで多値化

受信系の基本構成（1）

① 直接検波（IM-DD方式）

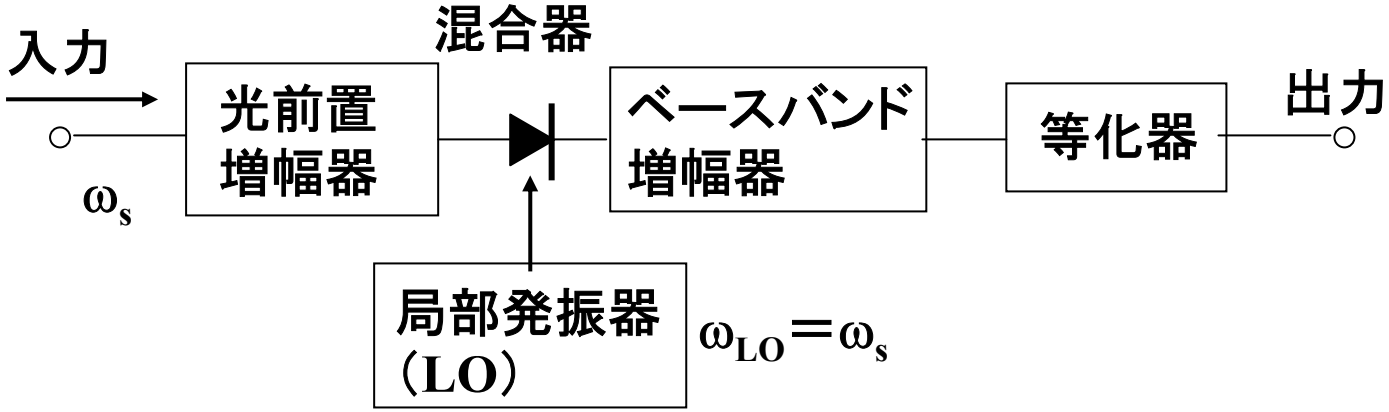


② ヘテロダイン検波



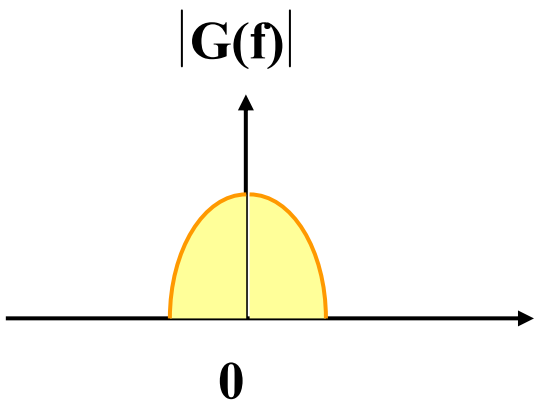
受信系の基本構成（2）

③ ホモダイン検波

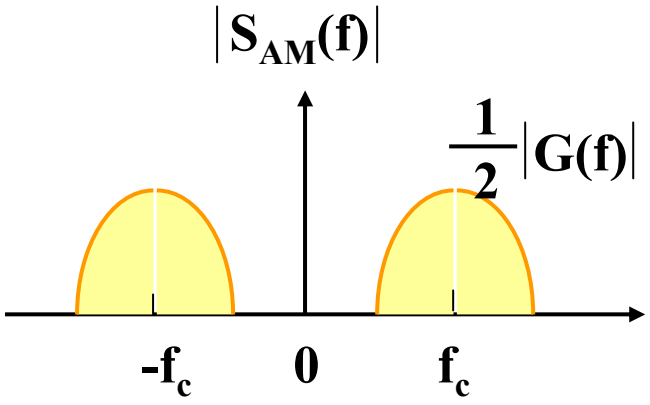


ASK（振幅変調）の変調信号（1）

ベースバンド信号



振幅変調波



変調波の一般表現

$$s(t) = A(t)\cos[2\pi f_c t + \phi(t)]$$

振幅変調では$A(t) \propto g(t)$ ($g(t)$: 変調信号), $\phi(t)=0$なので、
振幅変調波は以下に書き換えられる。

$$S_{AM}(t) = g(t)\cos(2\pi f_c t)$$

ASK（振幅変調）の変調信号（2）

フーリエ変換して、

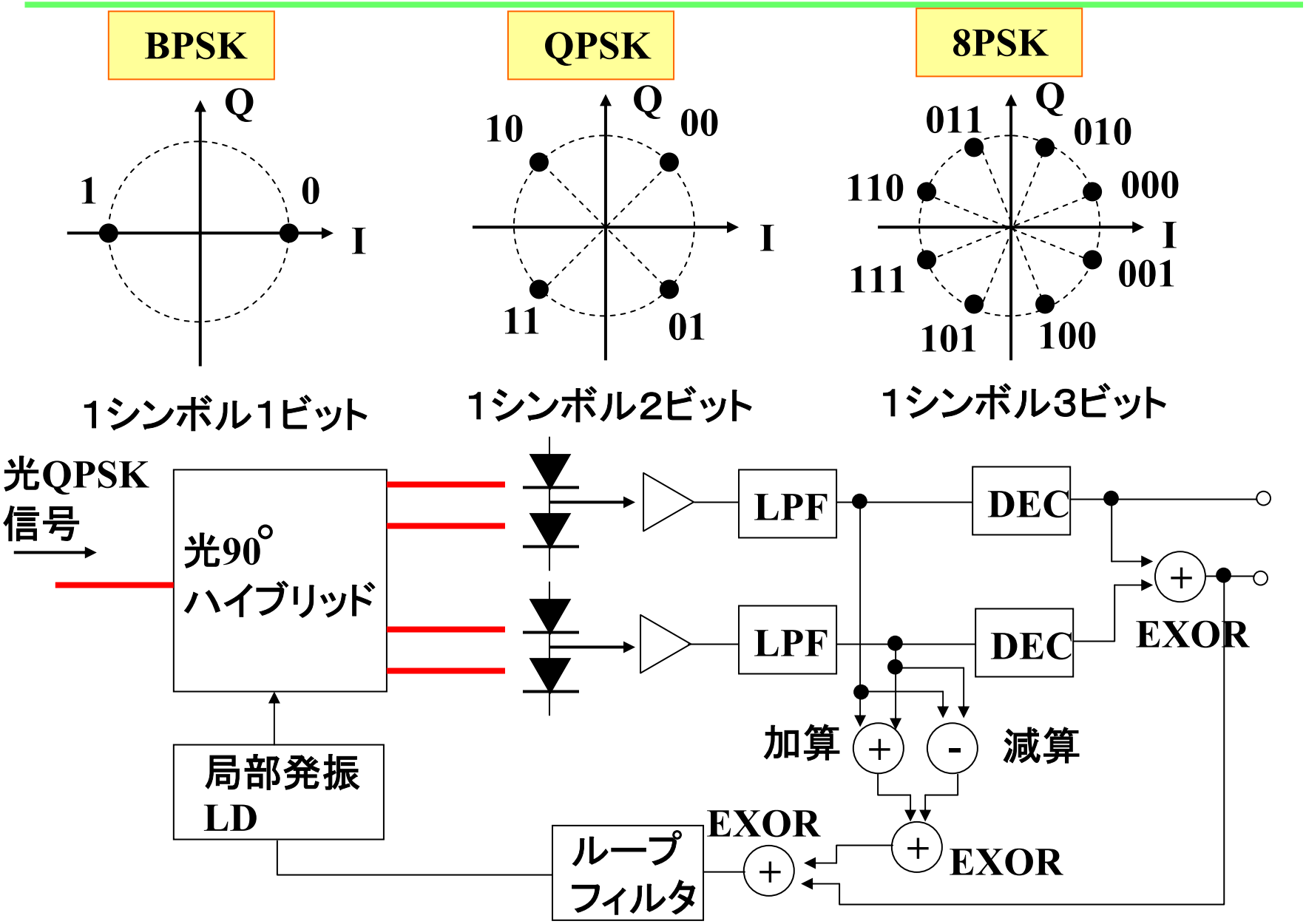
$$S_{AM}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)\cos(2\pi fct)e^{-j2\pi ft}$$

$$= \frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty} g(t)\exp\{-2\pi(f-f_c)t\}dt + \frac{1}{2}\int_{-\infty}^{\infty} g(t)\exp\{-2\pi(f+f_c)t\}dt$$

$$= \frac{1}{2}G(f-f_c) + \frac{1}{2}G(f+f_c)$$

- s(t)のフーリエ変換スペクトルはG(f)を±f_cへ周波数変換
  → 両側帯波搬送波抑圧（Double Sideband Suppressed Carrier：DSB-SC）変調
- 変調度が1よりも小さいAM変調では搬送波成分が生じ、送信電力効率が低下（g(t)を1+g(t)に置き換えて計算）

PSK方式の種類


BPSK
QPSK
8PSK
Q
I
1
0
10
00
11
01
011
010
110
000
111
001
101
100
1シンボル1ビット
1シンボル2ビット
1シンボル3ビット
光QPSK
信号
光90°
ハイブリッド
LPF
LPF
DEC
DEC
EXOR
加算
減算
局部発振
LD
ループ
フィルタ
EXOR
EXOR

PSK（位相変調）の変調信号（1）

変調波の一般表現

$$s(t) = A(t)\cos[2\pi f_c t + \phi(t)]$$

位相変調ではA(t)：一定, $\phi(t) \propto g(t)$ (g(t)：変調信号) なので、
位相変調波は以下に書き換えられる。

$$S_{PSK}(t) = \cos[2\pi f_c t + g(t)]$$

PSKでは送信する位相情報の不確定性を除去するため、以下の条件を課す。

$$|g(t)| \le \pi(rad)$$

$$S_{PSK}(t) = \cos[g(t)]\cos(2\pi f_c t) - \sin[g(t)]\sin(2\pi f_c t)$$

⇒ 互いに位相がπ/2異なる搬送波を、位相偏移量の正弦・余弦で変調し、それらを合成したもの。

PSK（位相変調）の変調信号（2）

（例①） BPSKの場合

g(t)=0またはπ

$$S_{PSK}(t) = m(t)\cos(2\pi f_c t), m(t) = \pm 1$$

両極性矩形パルスでDSB-SC変調

（例②） QPSKの場合： 2つの直交したBPSKを線形加算

$$S_{QPSK}(t) = m_1(t)\cos(2\pi f_c t) - m_2(t)\sin(2\pi f_c t)$$

$$= \cos[2\pi f_c t + \tan^{-1}\frac{m_2(t)}{m_1(t)}]$$

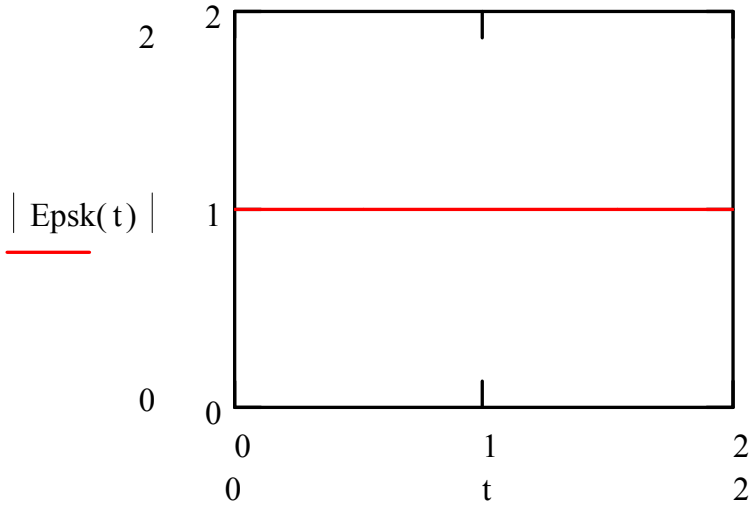
$$m_1(t), m_2(t) = \pm 1$$

PSK方式

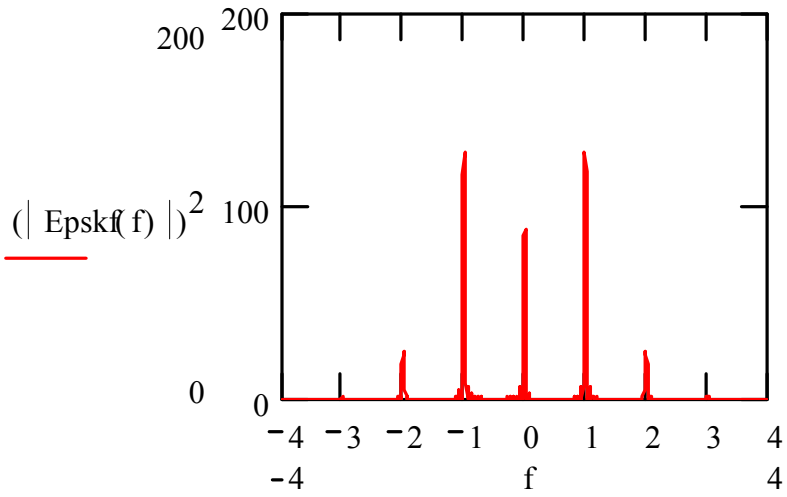
式(5.23)において、 $V_1 = V_2 = V_\pi$, $\psi = 0$, $V_{bias1} = \pi$, $V_{bias2} = 0$ とおくと、

$$E_{out} = -E_{in}\exp(-j\beta L)\exp(j\frac{\pi}{2}\sin\omega t)$$

強度



フーリエ変換スペクトル

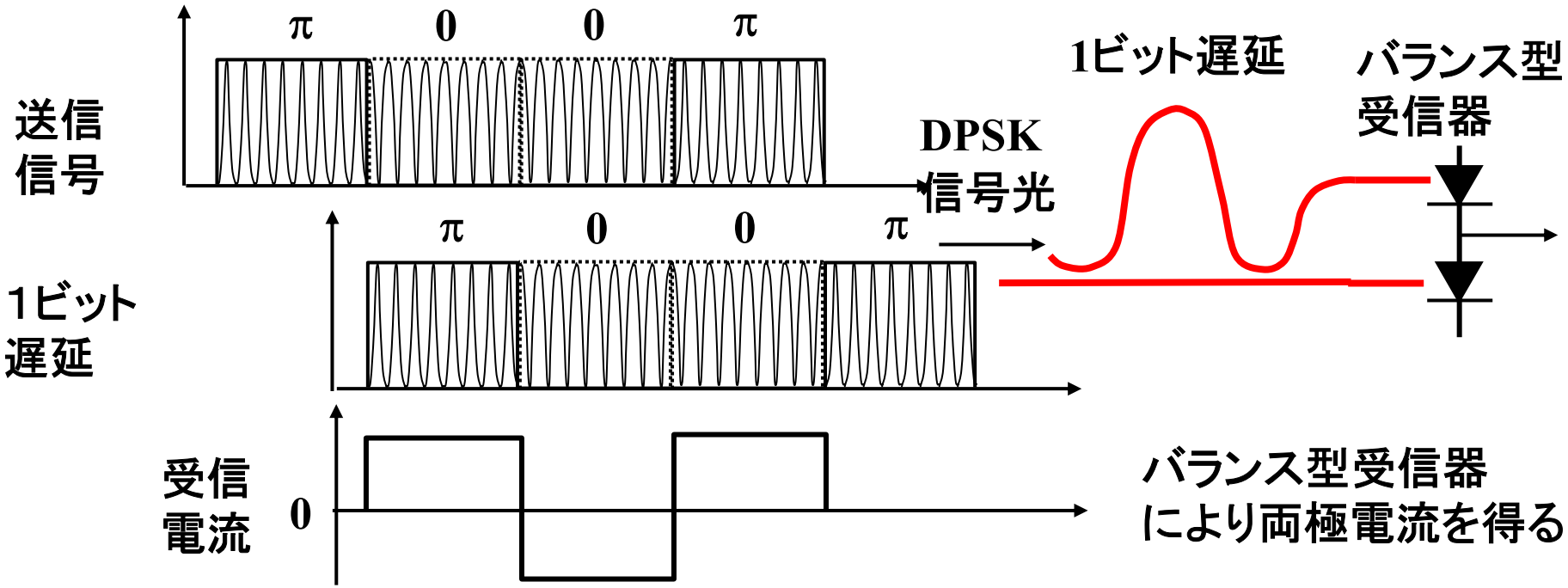


- 時間周波数f_0（図中では1に相当）
- 振幅は時間変動せず
- 搬送波成分を中心に±f_0の側波帯間隔

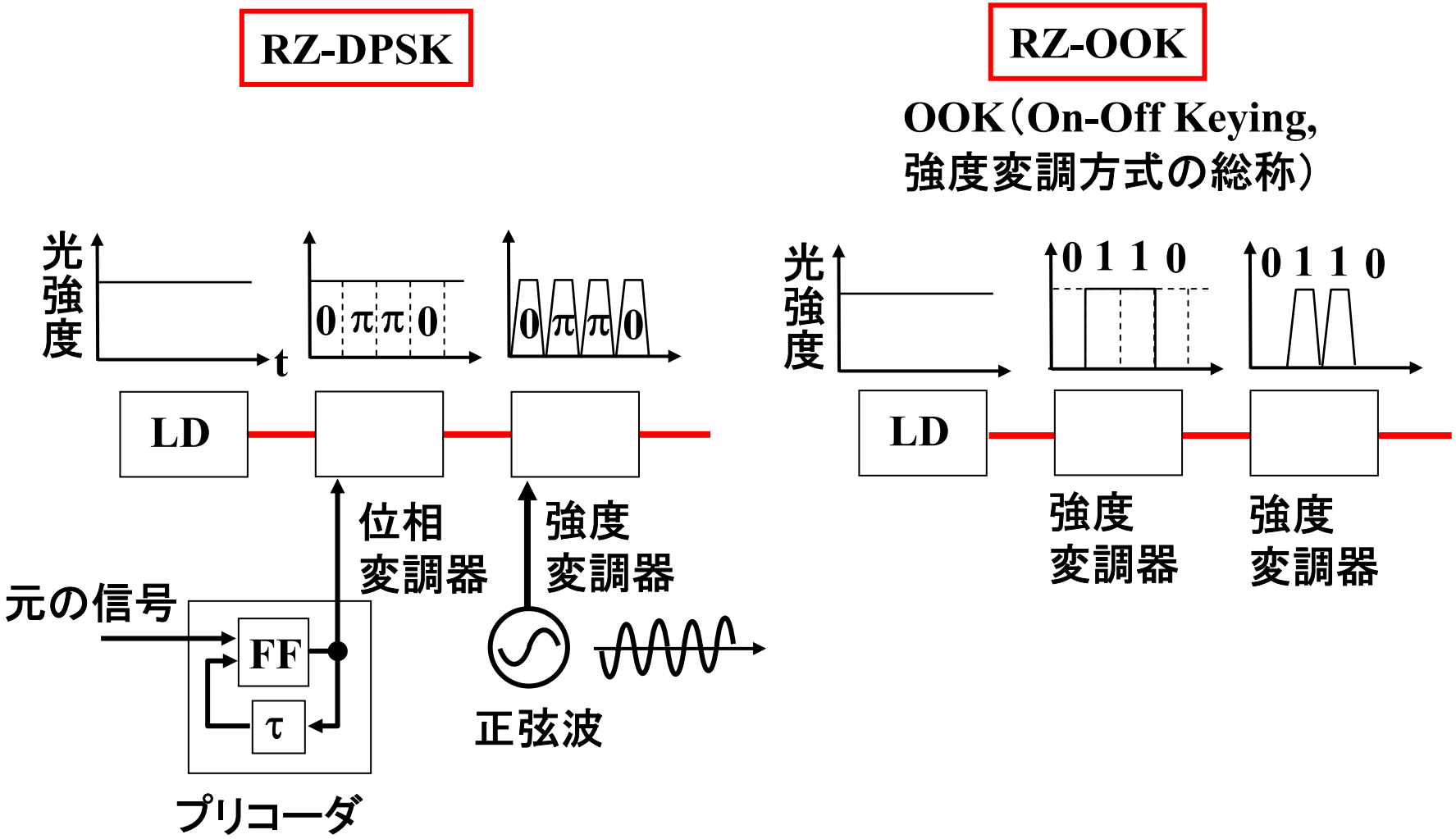
DPSK変調

DPSK（Differential Phase-Shift-Keying, 差動位相シフトキーイング方式）

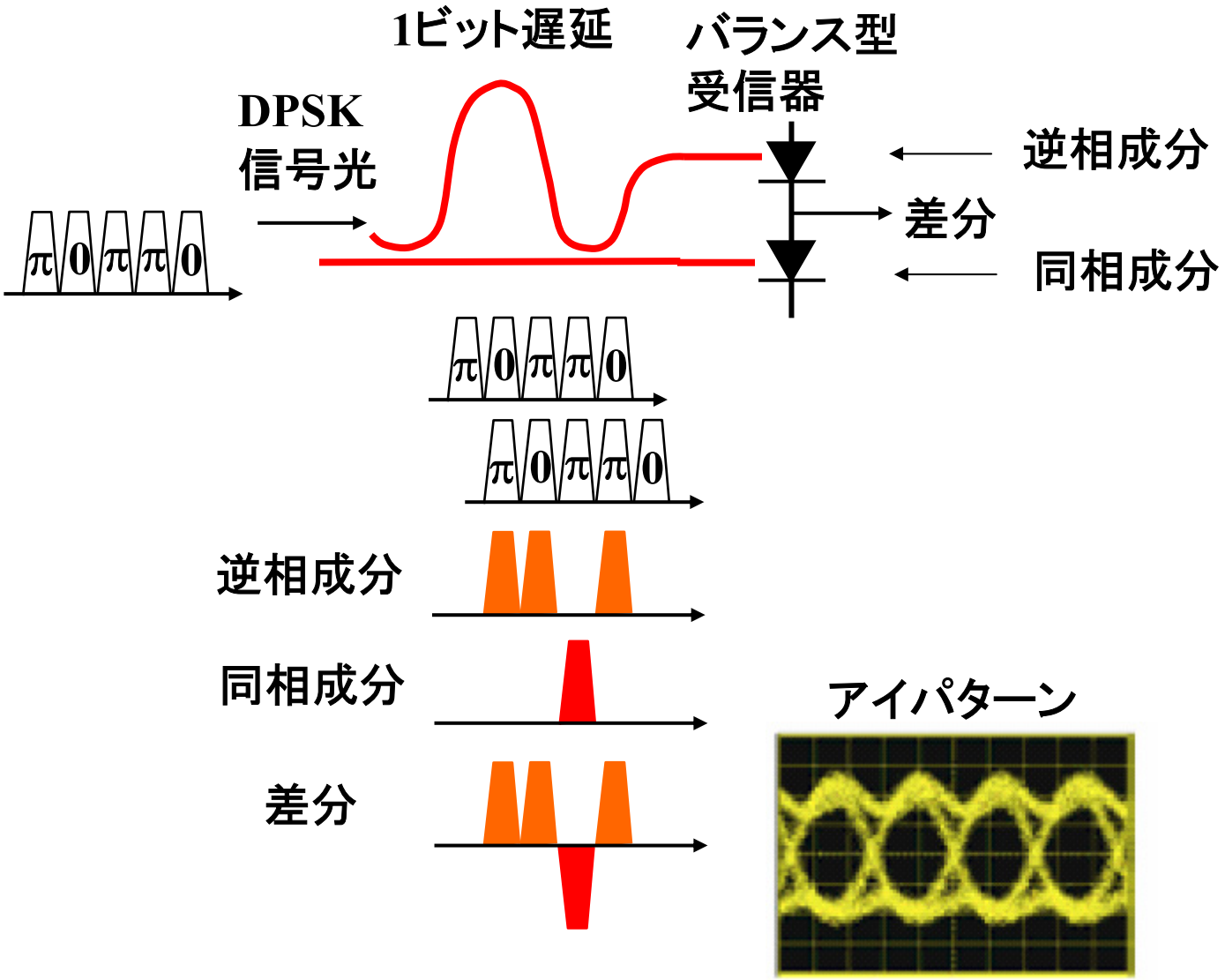
- PSK変調の１種でデータ1を隣接ビット間の位相差π、データ0を隣接ビット間の位相差0に割り当てたもの。
- 40Gbps DWDMの長距離・受信感度改善（3dB）を目的にこの２～３年急激に取り組みが盛んになってきた。



DPSK送信器


RZ-DPSK
RZ-OOK
OOK（On-Off Keying,
強度変調方式の総称）
光強度
t
0 π π 0
0 π π 0
LD
位相
変調器
強度
変調器
元の信号
FF
τ
プリコーダ
正弦波
光強度
0 1 1 0
0 1 1 0
LD
強度
変調器
強度
変調器

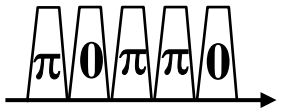
DPSK受信器


1ビット遅延
バランス型
受信器
DPSK
信号光
逆相成分
差分
同相成分
π 0 π π 0
π 0 π π 0
π 0 π π 0
逆相成分
同相成分
差分
アイパターン

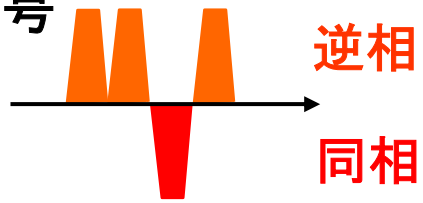
DPSKによる受信感度の改善効果

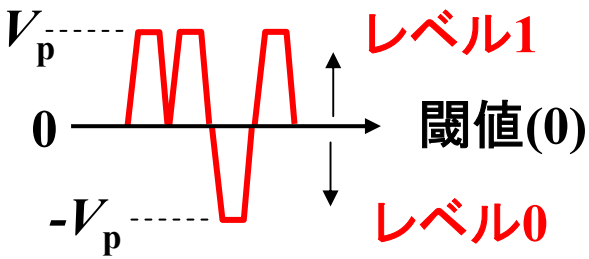
DPSK

送信信号



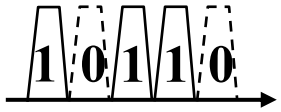
受信信号
（差分）



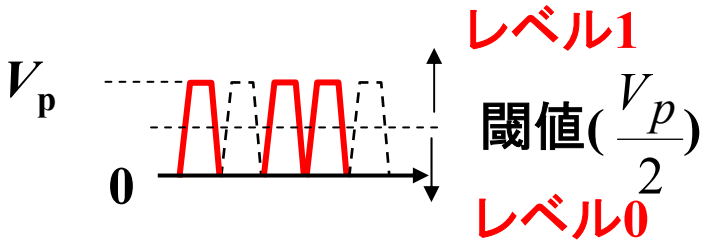


OOK

送信信号

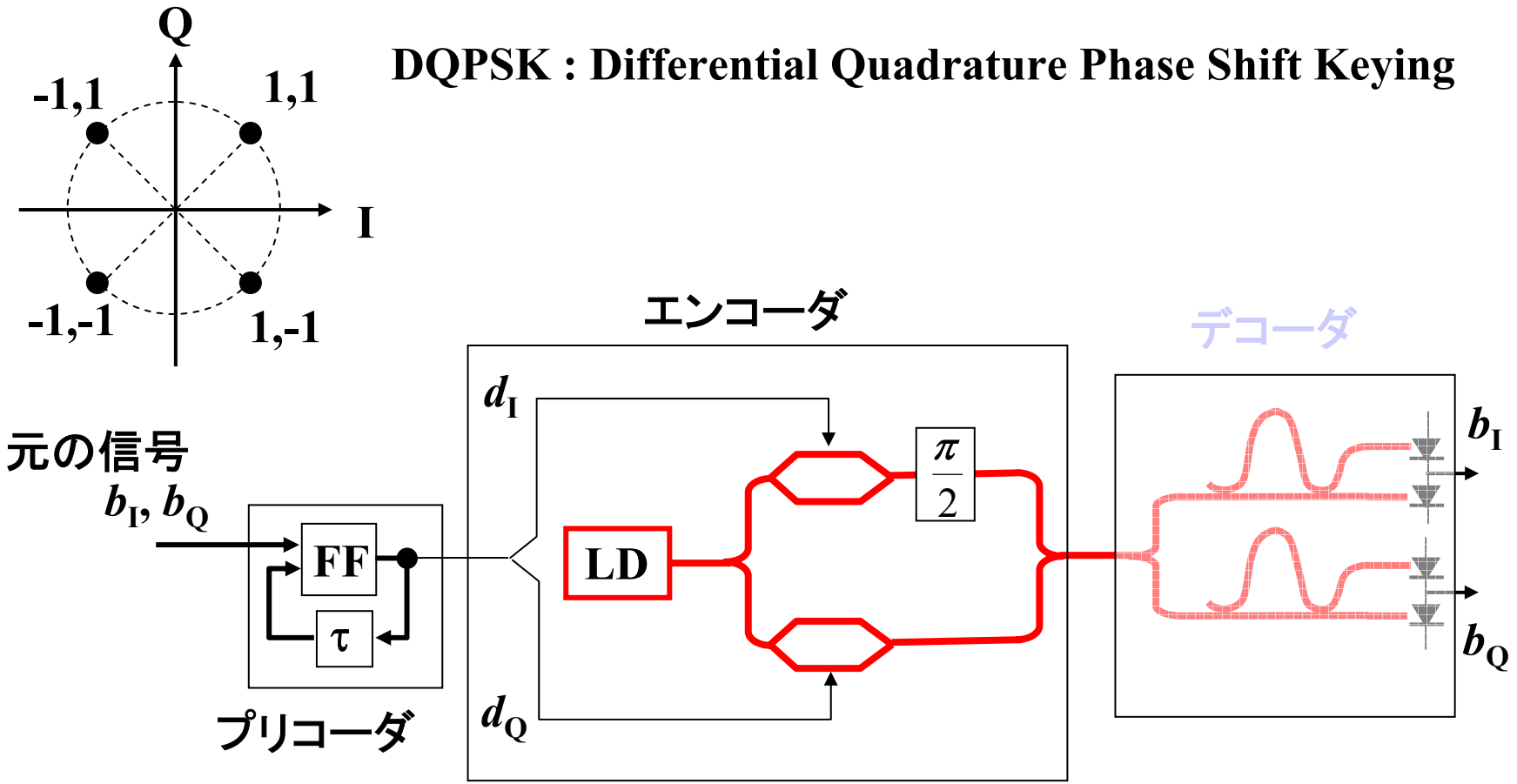


受信信号



- 信号対雑音比の3dB改善 → 受信感度の3dB改善

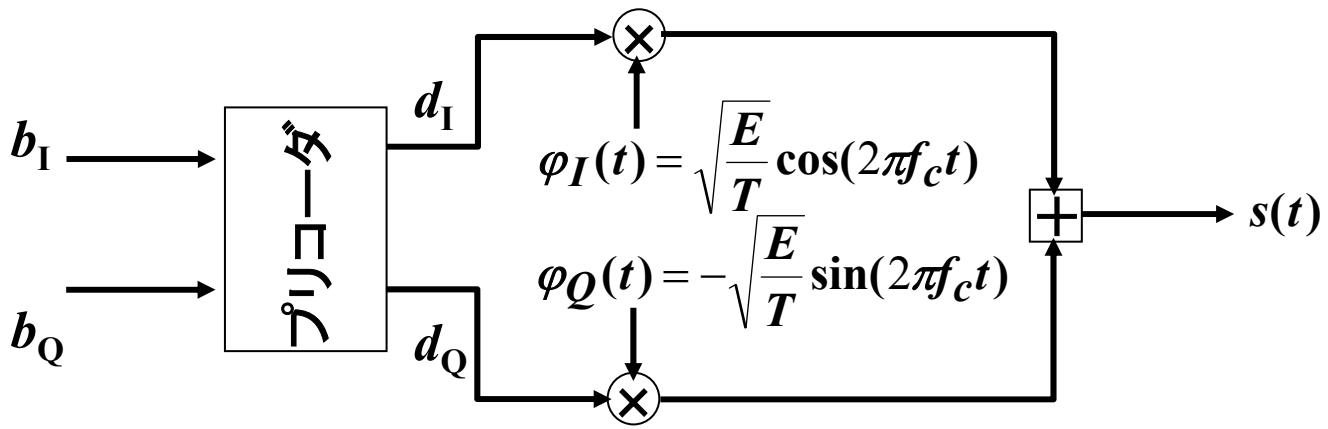
DQPSK送信器



$$d_I(n) = b_I(n)\cdot b_Q(n)\cdot d_I(n-1) + b_I(n)\cdot \overline{b_Q(n)}\cdot d_Q(n-1)$$
$$+\overline{b_I(n)}\cdot \overline{b_Q(n)}\cdot \overline{d_I(n-1)} + \overline{b_I(n)}\cdot b_Q(n)\cdot \overline{d_Q(n-1)}$$

$$d_Q(n) = b_I(n)\cdot b_Q(n)\cdot d_Q(n-1) + \overline{b_I(n)}\cdot b_Q(n)\cdot d_I(n-1)$$
$$+b_I(n)\cdot \overline{b_Q(n)}\cdot \overline{d_I(n-1)} + \overline{b_I(n)}\cdot \overline{b_Q(n)}\cdot \overline{d_Q(n-1)}$$

DQPSK送信ブロック



$$s(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{E}{T}}\cos[2\pi f_c t + \phi] & (0 \le t \le T) \\ 0 & (elsewhere) \end{cases}$$ とすると、

$$s(t) = \sqrt{\frac{E}{T}}\cos[2\pi f_c t + \phi] = \sqrt{\frac{E}{T}}\cos\phi\cos 2\pi f_c t - \sin\phi\sin 2\pi f_c t$$

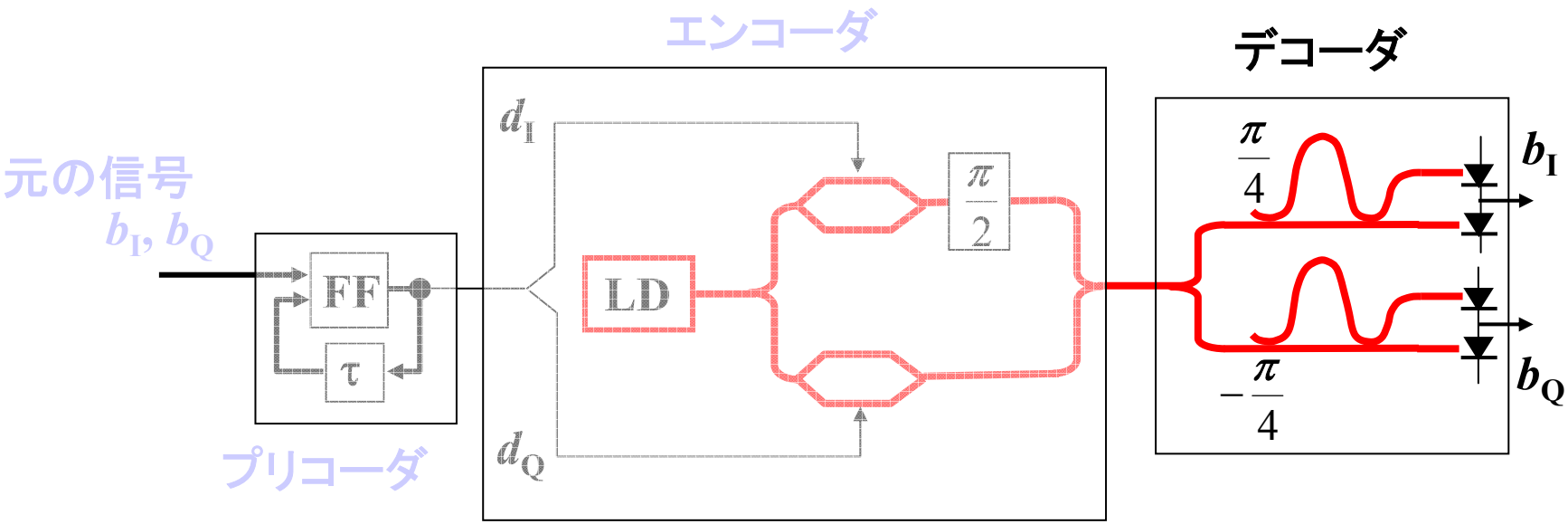
搬送波の正相、直交成分を

$$\varphi_I(t) = \sqrt{\frac{E}{T}}\cos(2\pi f_c t),\quad \varphi_Q(t) = -\sqrt{\frac{E}{T}}\sin(2\pi f_c t)$$ と定義し、

変調器に与えるベースバンド信号をd_I, d_Qとすると、

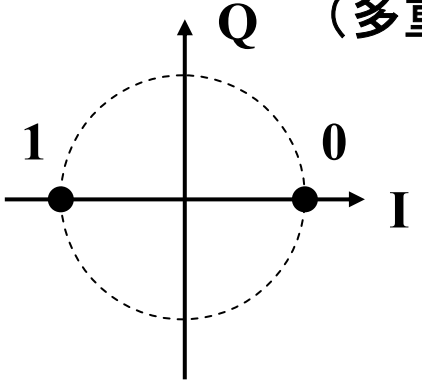
$s(t) = d_I\varphi_I(t) + d_Q\varphi_Q(t)$ となる。 ➡ 上図の構成

DQPSK受信器

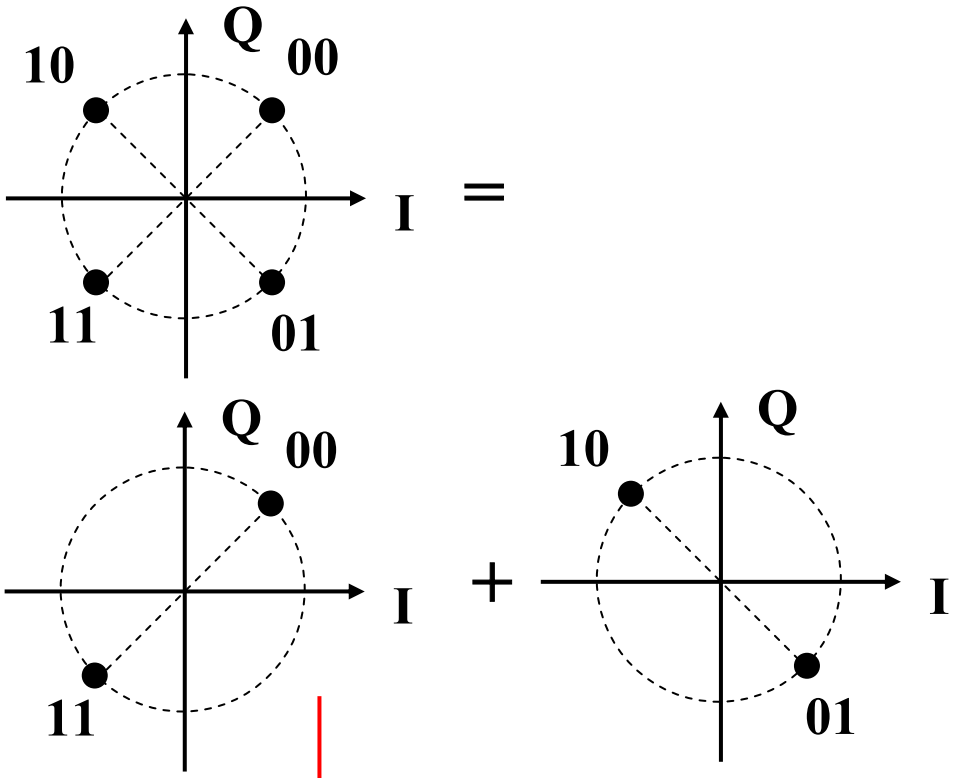

エンコーダ
デコーダ
元の信号
b_I, b_Q
FF
τ
プリコーダ
d_I
d_Q
LD
$\frac{\pi}{2}$
$\frac{\pi}{4}$
$-\frac{\pi}{4}$
b_I
b_Q

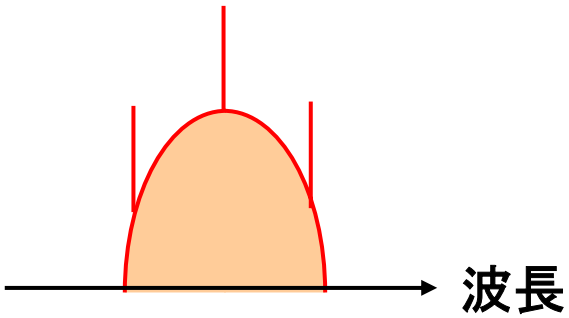
DQPSKによる狭帯域化の効果

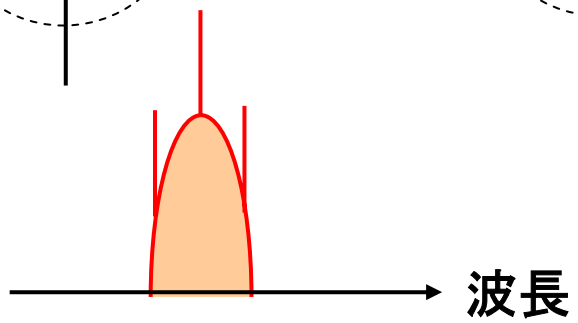
BPSK 1シンボル2値（多重度1）



QPSK 1シンボル4値（多重度2）







- 帯域を半分に狭帯域化可能, 高密度WDM・分散の影響低減可能

WDM用光送信器

光送信器の紹介例

10Gbps SONET/SDH用光送受信器　　OpNext, TRV5001/11/21BN

多波長DFB-LD/EA変調器

K. Kudo, M. Ishizaki, T. Sasaki, H. Yamazaki and M. Yamaguchi（NEC）,
IEEE Photon. Technol. Lett., vol.10, pp.929-931 (1998).

波長選択光源

H. Hatakeyama, K. Kudo, Y. Yokoyama, K. Naniwae, and T. Sasaki,
IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron., vol.8, No.6, pp.1341-1348 (2002).

光アクセス系用光送信器

アクセス系NW用光デバイスへの要求条件

アクセスネットワークの特質

- ユーザはビジネスユーザではなく個人ユーザ
- コスト感覚が厳しい
- 家庭内には各個人につき（最低）1台の装置が必要

光デバイスへの要求条件

- 経済性（低コストな光部品）
- 生産性
- 耐環境性

アクセス系光デバイスの技術ポイント

（1） 低コスト実現のための実装負担の軽減技術が主体

- LD／PDと光ファイバの調心トレランスを拡大するためのスポットサイズ変換器
- パッシブ・アライメント技術
- 温調無しで-40℃～+85℃動作が可能な耐環境材料の使用

スポットサイズ変換器付半導体レーザ

H. Oohashi, M. Fukuda, Y. Kondo, M. Wada, Y. Tohmori, Y. Sakai, H. Toba and Y. Itaya (NTT),
J. Lightwave Technol., Vol.16, No.7, pp.1302-1307 (1998).

光インターコネクト
・LAN用送信器

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

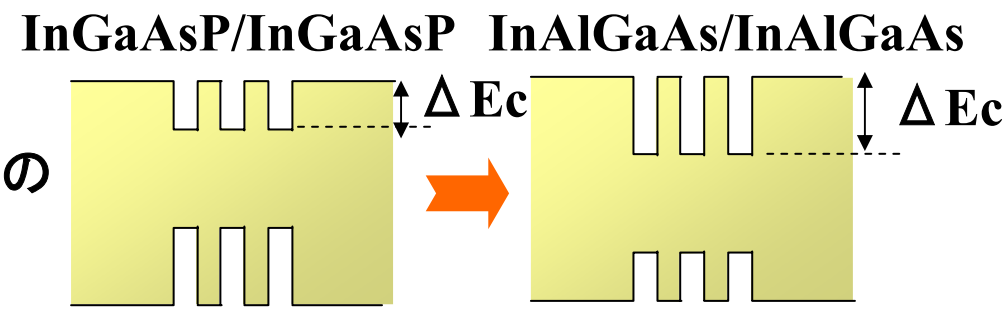
  特にアクセス系(FTTH)用途・LAN用途は低コスト化の要求が厳しい

  Telcordia規格:-40℃～+85℃ → -40℃～+100℃

- 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ΔEc(伝導帯不連続値)材料の導入



高温動作・無温調動作InGaAlAs MQWレーザ

- 伝導体不連続ΔEc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℃
  (T. Takeshita et al. (NTT), OFC2006 OThN2)
- マスクマージン > 10% @ 10.7Gbps
  f_r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)

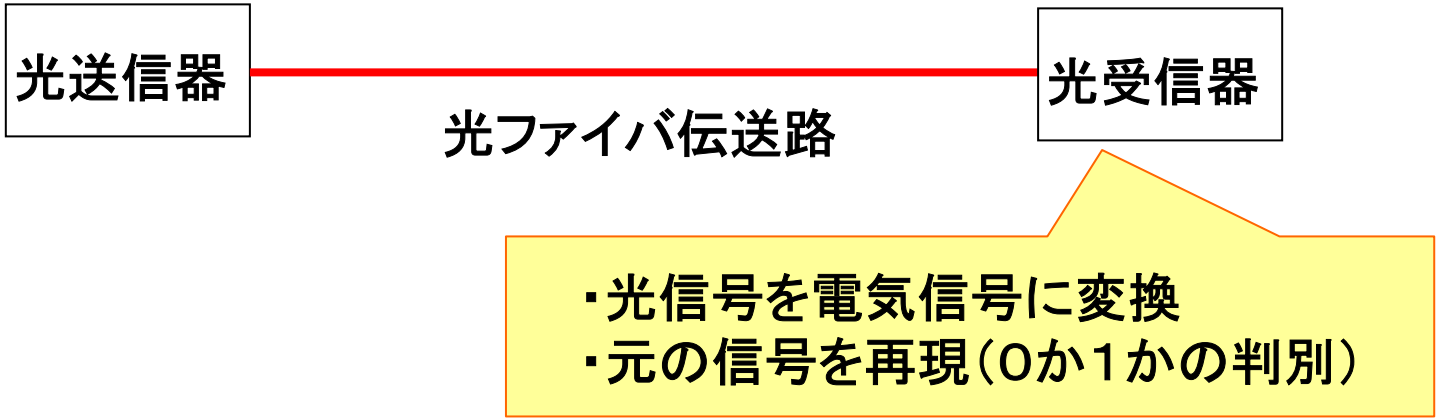
半導体LDの更なる高速化への挑戦（40Gbps直接変調）

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

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

光受信器

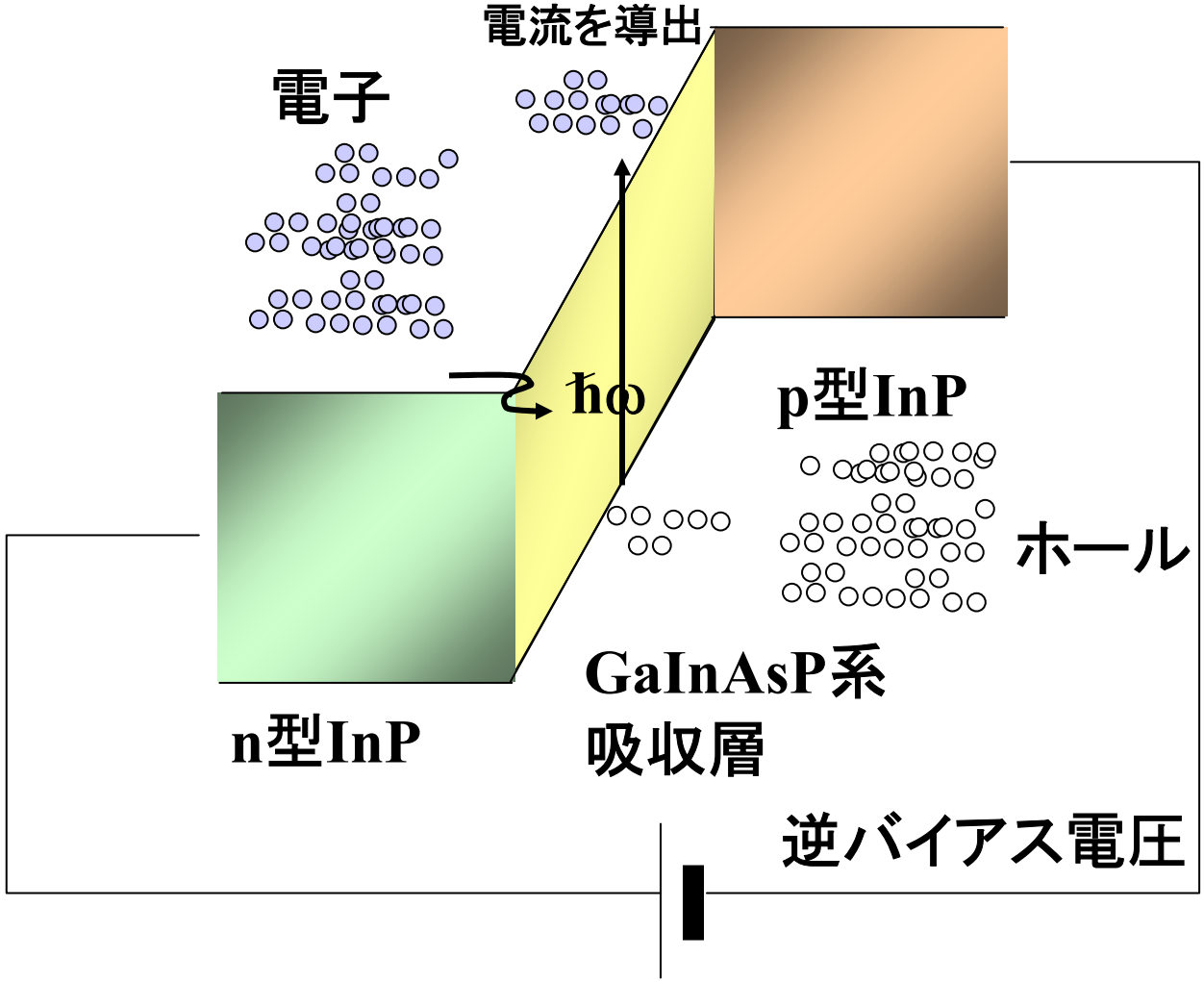
光受信器の役割



フォトディテクタの動作原理（1）

pin-PDの構造

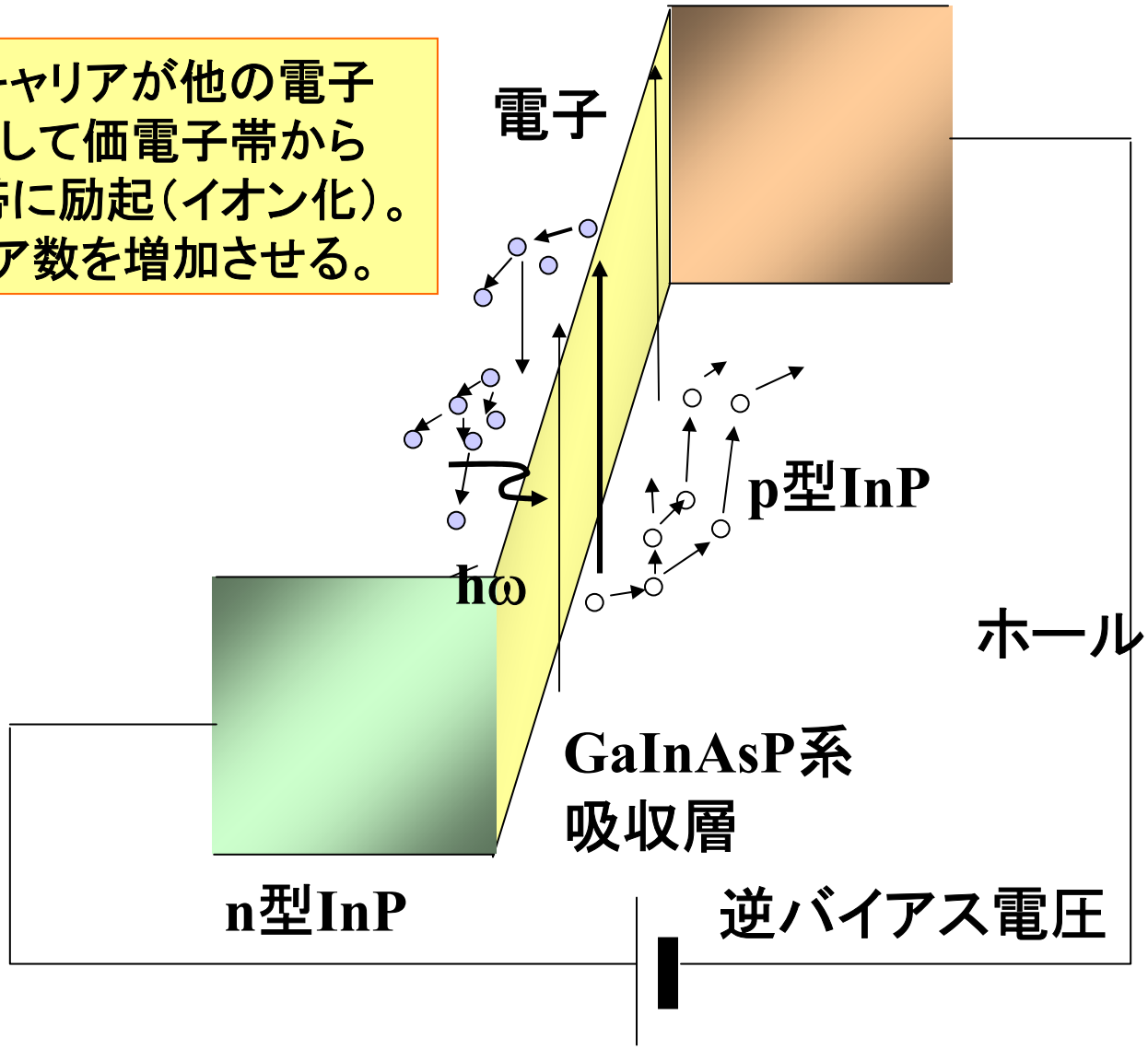
発生電流： $I = e\eta_i \dfrac{P_{in}}{\hbar\omega}$ → 受信光の吸収により発生する電子数（効率は内部量子効率として考慮）に電子素量を掛けて電流を導出



フォトディテクタの動作原理（2）

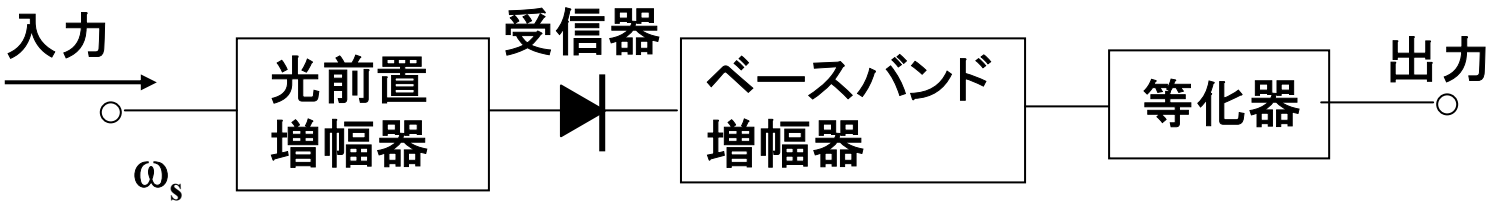
APD（Avalanche Photodiode）の構造

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。

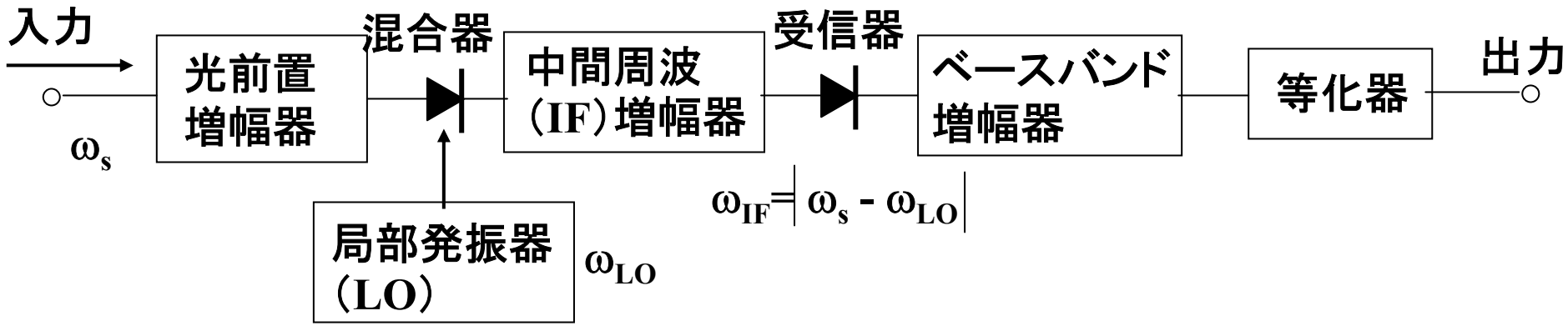


受信系の基本構成（1）

① 直接検波（IM-DD方式）

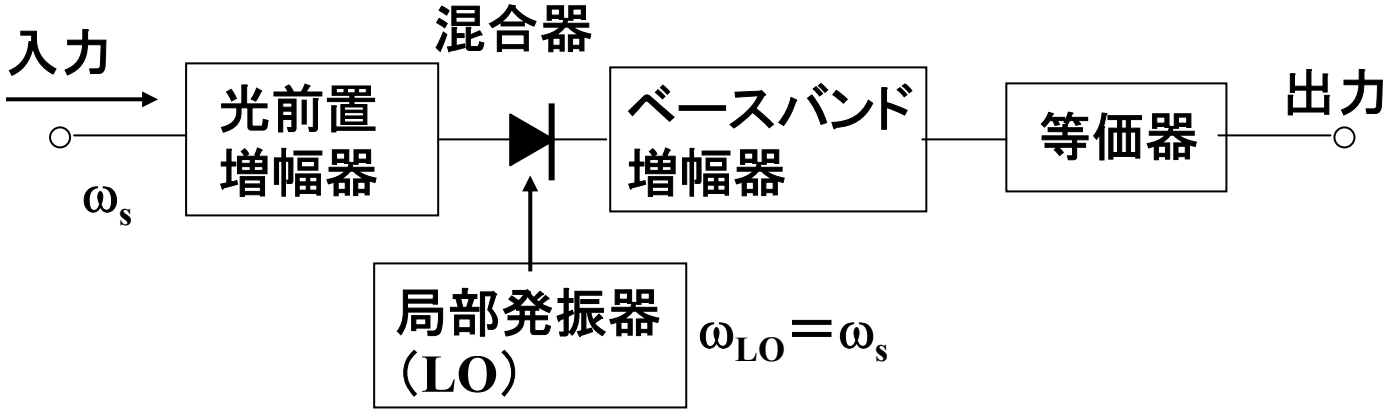


② ヘテロダイン検波



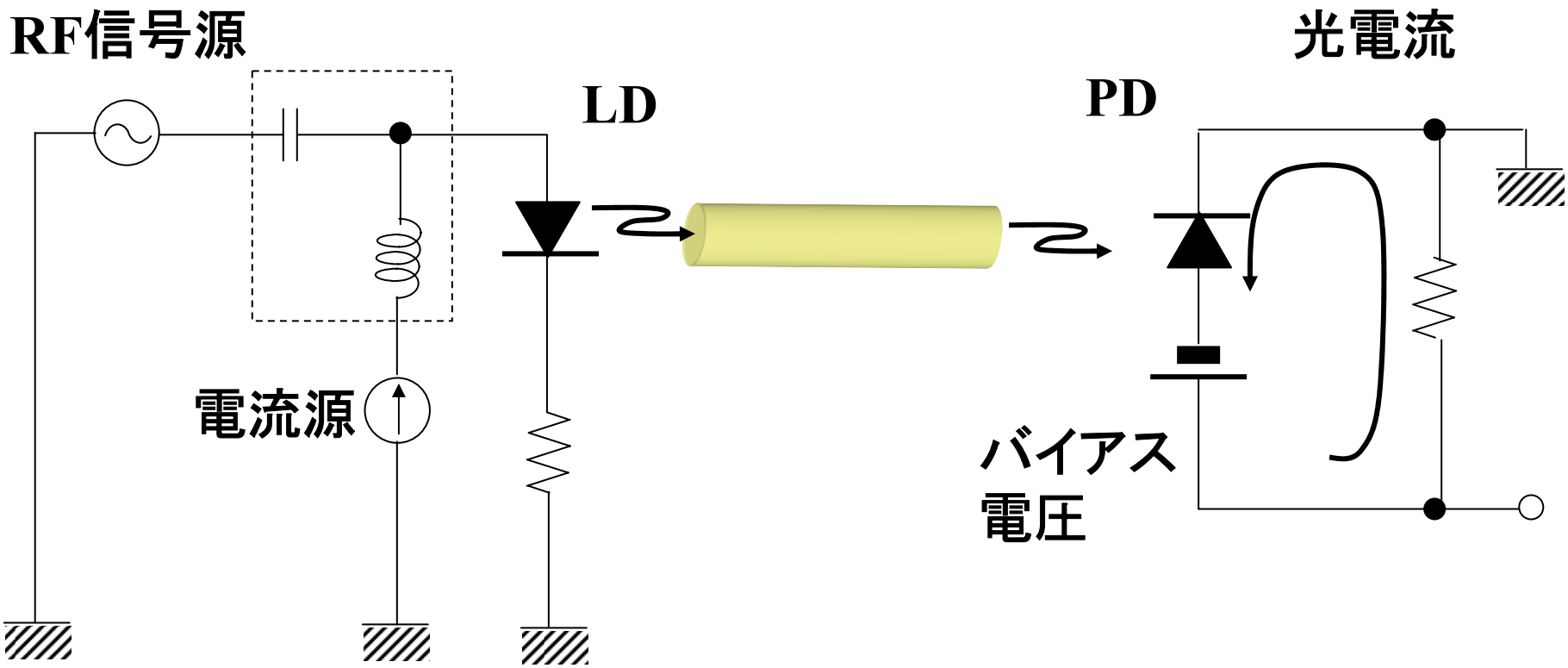
受信系の基本構成（2）

③ ホモダイン検波



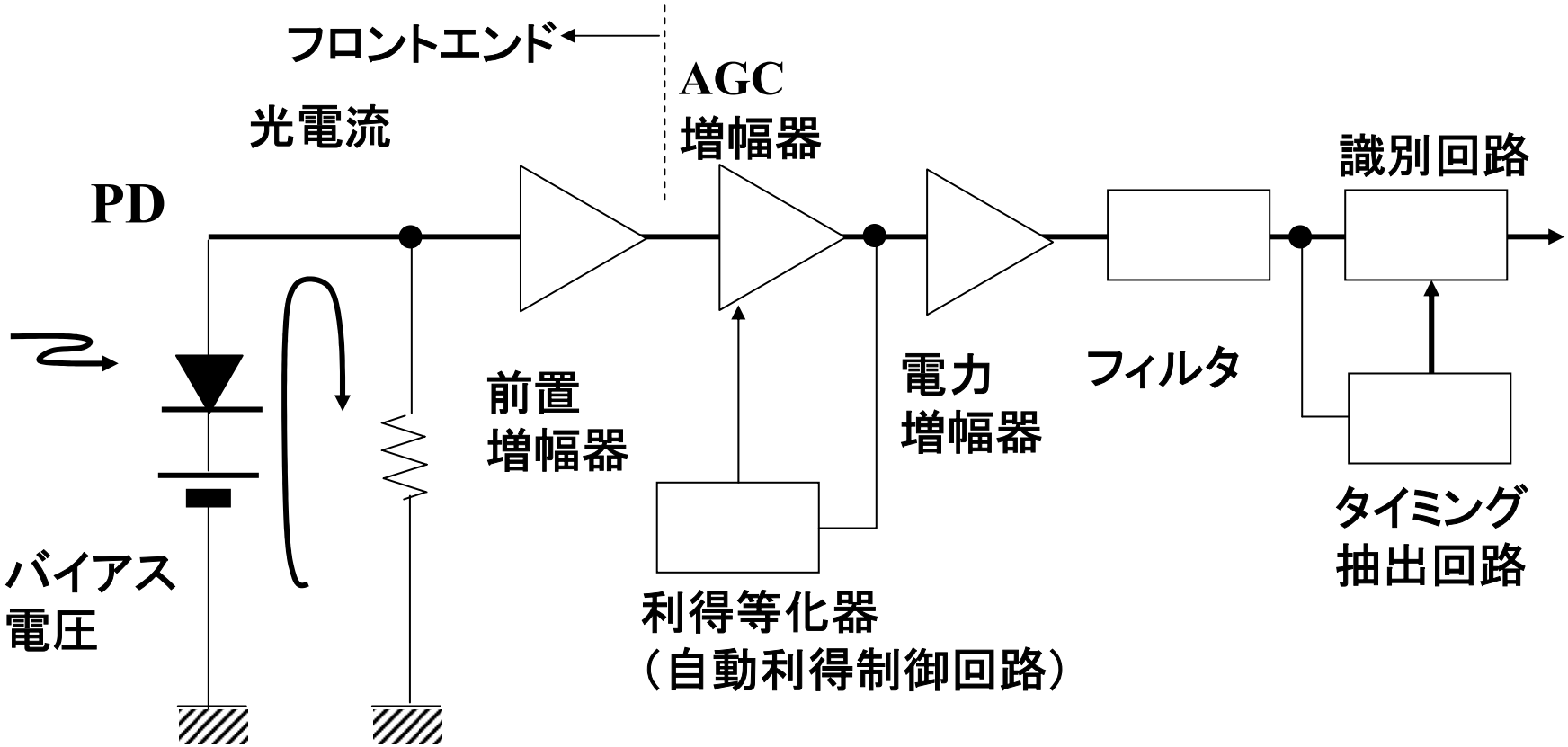
光強度変調方式における受信の基本構成

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）

直接検波（IM-DD）方式の場合



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).

- 光ファイバとの結合損失＜0.5dB
- 結合損失の1dBトレランス：±2.5μm(垂直)、±15μm(水平)

WG-PD特性

- 光ファイバとの結合損失＜0.5dB
- 結合損失の1dBトレランス：±2.5μm(垂直)、±15μm(水平)

K. Kato et al., 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.

非対称ガイド層付導波路型APD

受信感度特性

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).