電気電子基礎学
光エレクトロニクスの基礎
その2・光ファイバ通信

水本哲弥

電気電子工学専攻

光エレクトロニクスとは？

- Optoelectronics（光エレクトロニクス）
  - Optics（光学）
  - Electronics（電子工学）

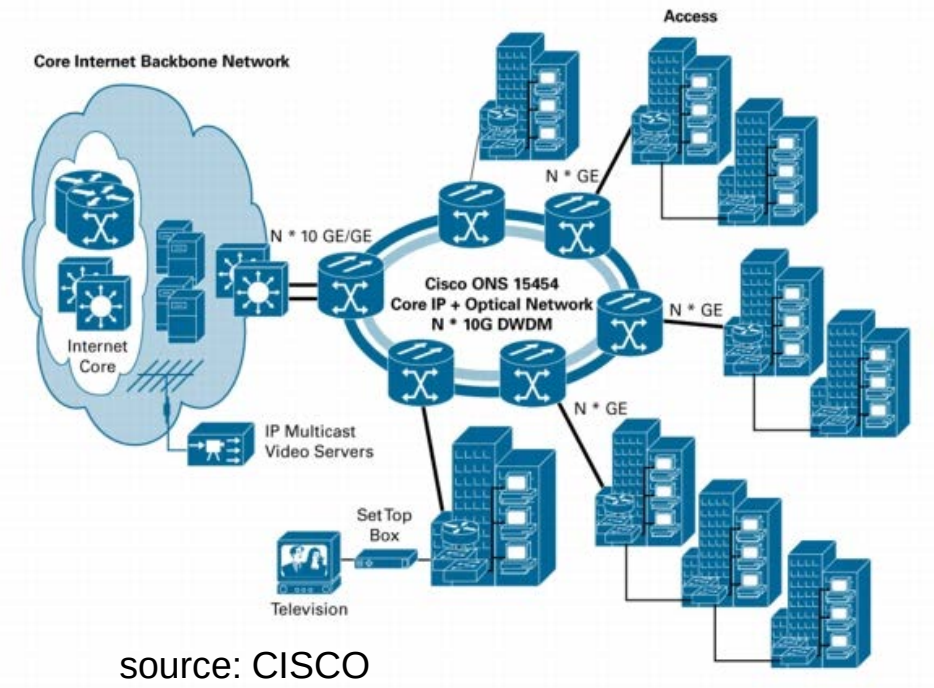
  が融合した分野＝光電子工学

  - システム：光通信，光記録，情報表示
  - 光デバイス：レーザ，LED，光ファイバ，光センサ
  - 材料：半導体(GaInAsP, Si)，誘電体，磁性体，
    有機材料

光ファイバ通信

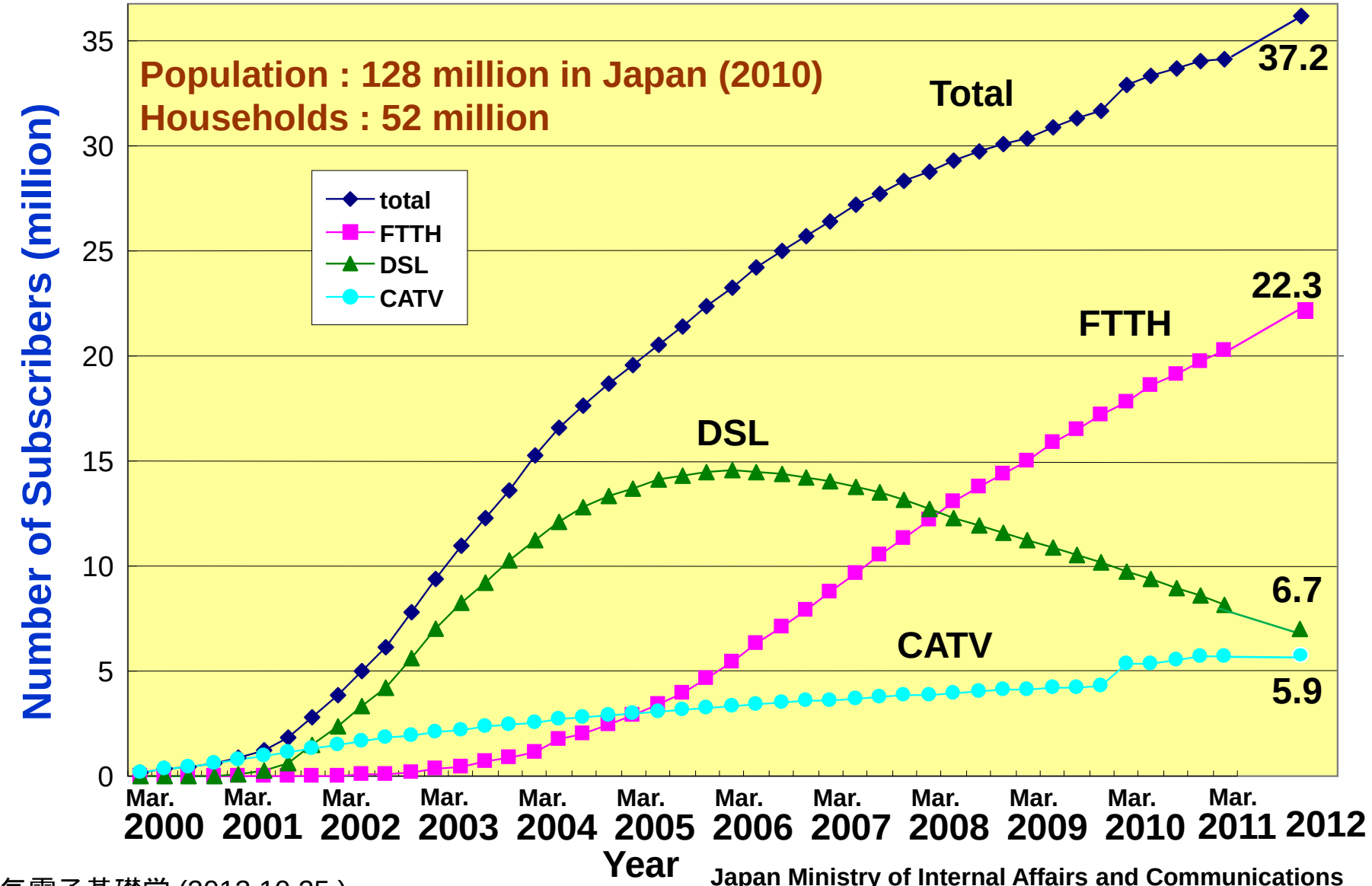
- 高速・大容量通信（2.5 Gbps, 10 Gbps, 40 Gbps）
  - 幹線通信網
- アクセス系光通信サービス（100 Mbps, 1 Gbps）
  - FHHT（Fiber To The Home）の普及率は日本がNo.1

bps：bit per sec.



source: CISCO

我が国のブロードバンドサービス加入者数

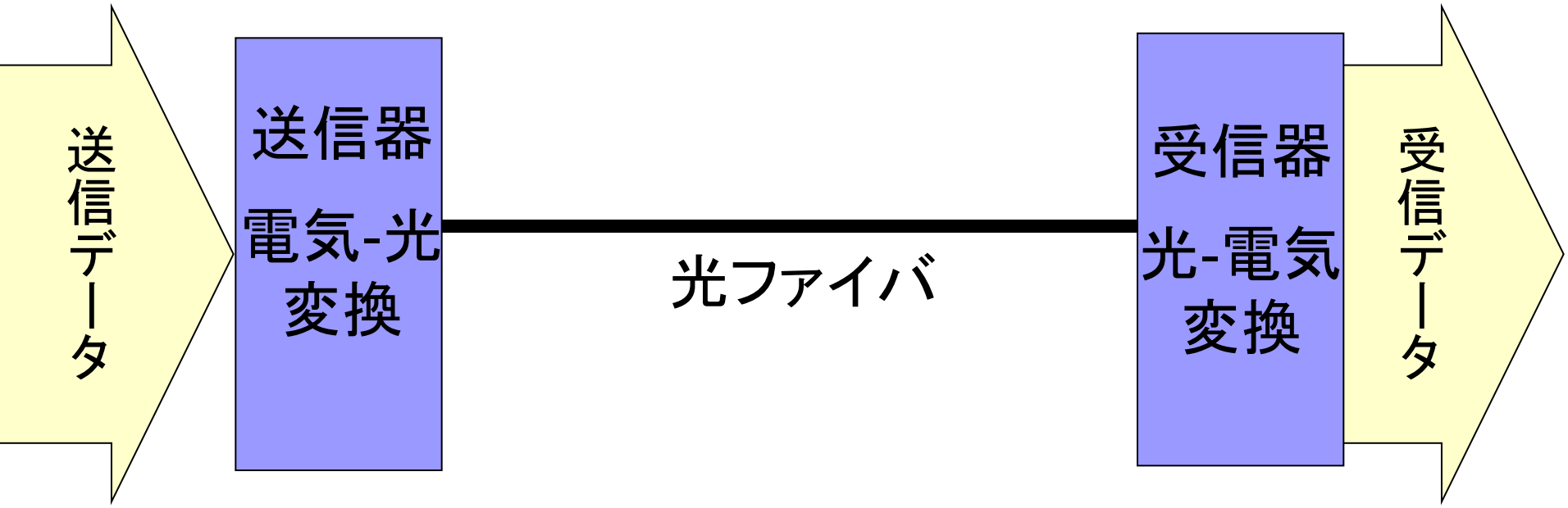


Japan Ministry of Internal Affairs and Communications

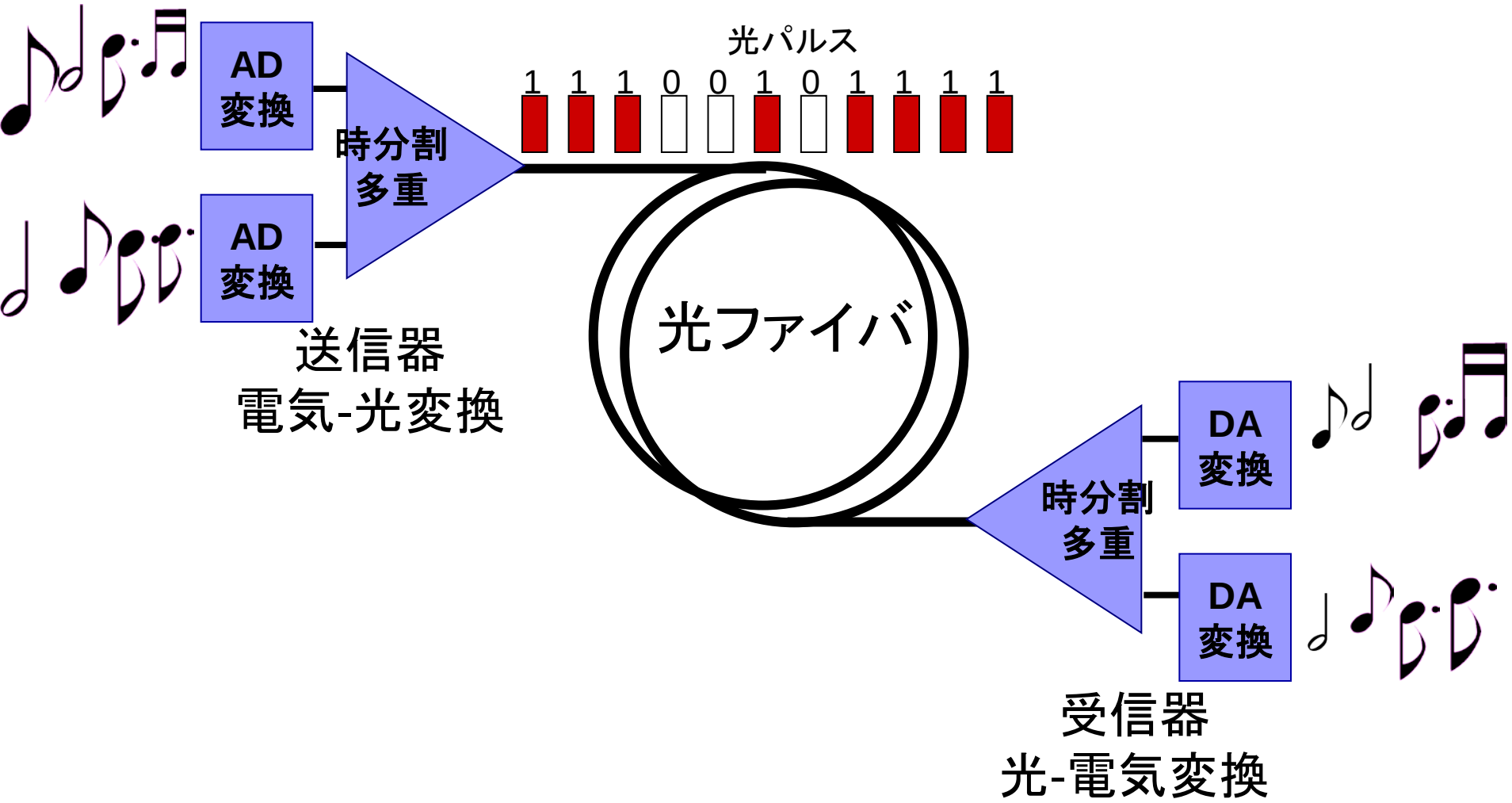
光ファイバ通信の原理

- 情報伝送

  通常、ビット1,0を光パルスの有無で表現して情報を伝送し、これを復調する --- 光強度変調・直接検波



光ファイバ通信：簡単なデモンストレーション



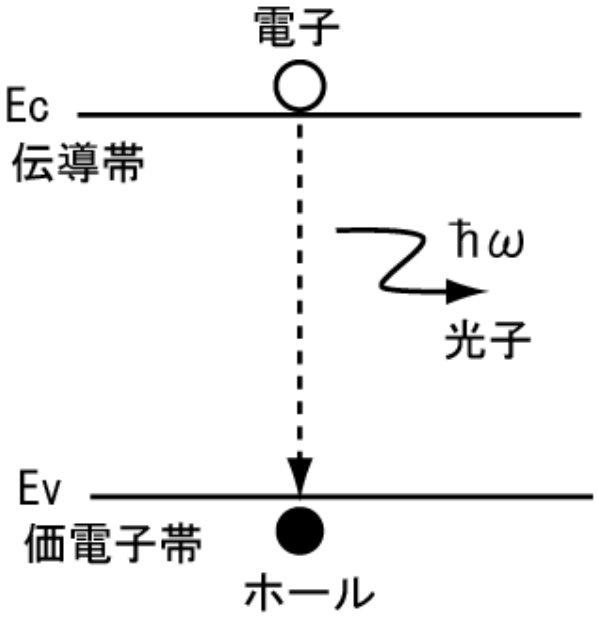
光ファイバ通信で使われる主要技術

- 光エレクトロニクスの3+1大要素
  - 高性能な半導体レーザ （1970年代）
  - 高感度な光検出器 （1970年代？）
  - 超低損失な光ファイバ （1970年代）
  - 光増幅器 （1990年代）
- これを巧みに駆使する技術
  - 時分割多重化
  - 波長分割多重化
  - エラー訂正 etc…

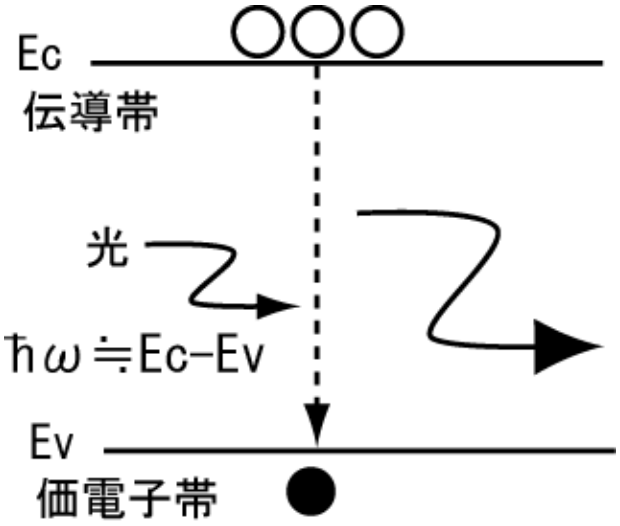
半導体における発光
～自然放出と誘導放出～

電気信号を光信号に変換する“信号源”

この基礎となる物理現象は…

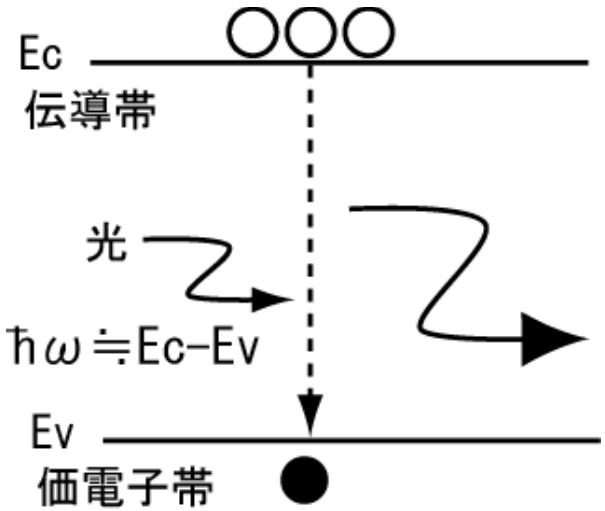


自然放出
⇒発光

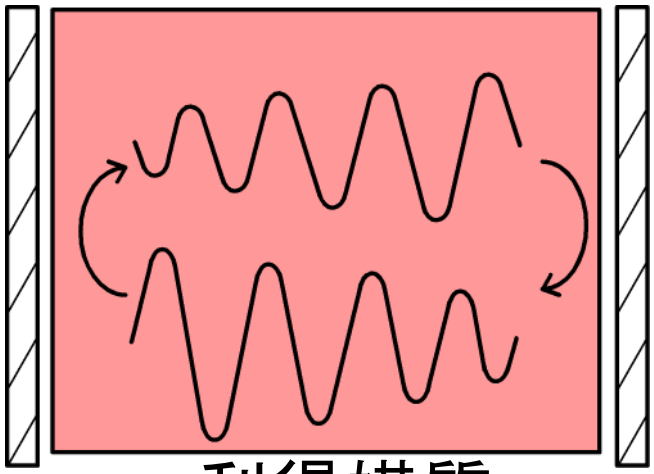


誘導放出
⇒レーザ

半導体レーザ
～誘導放出と共振器～



誘導放出



反射鏡　利得媒質　反射鏡

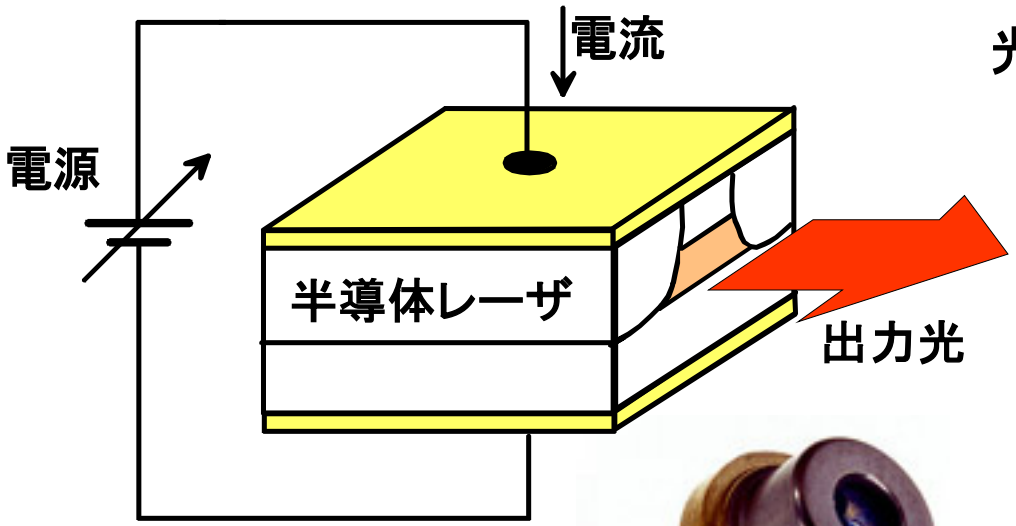
共振器

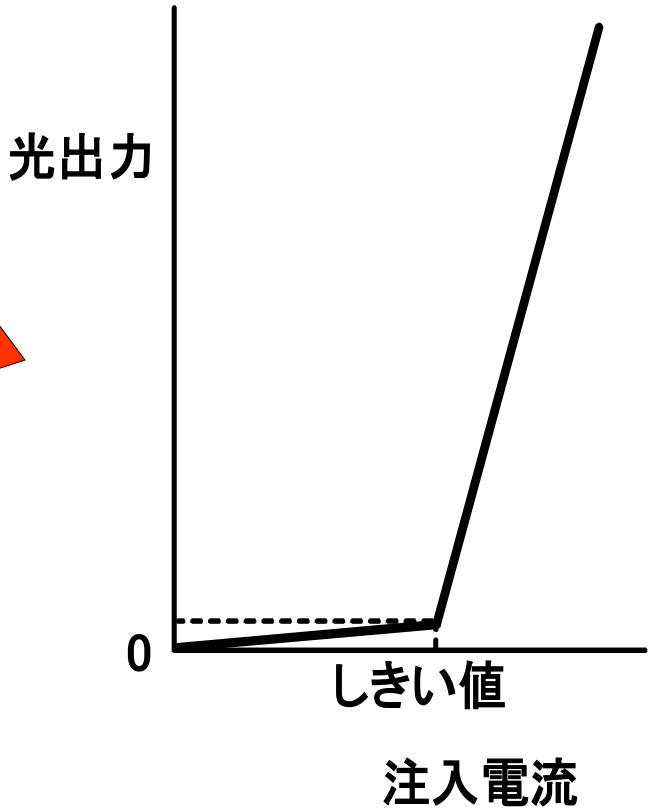
利得媒質を共振器の中に入れる ➡ 誘導放出が次々に起こる（レーザ発振）

光ファイバ通信の3大要素：光源

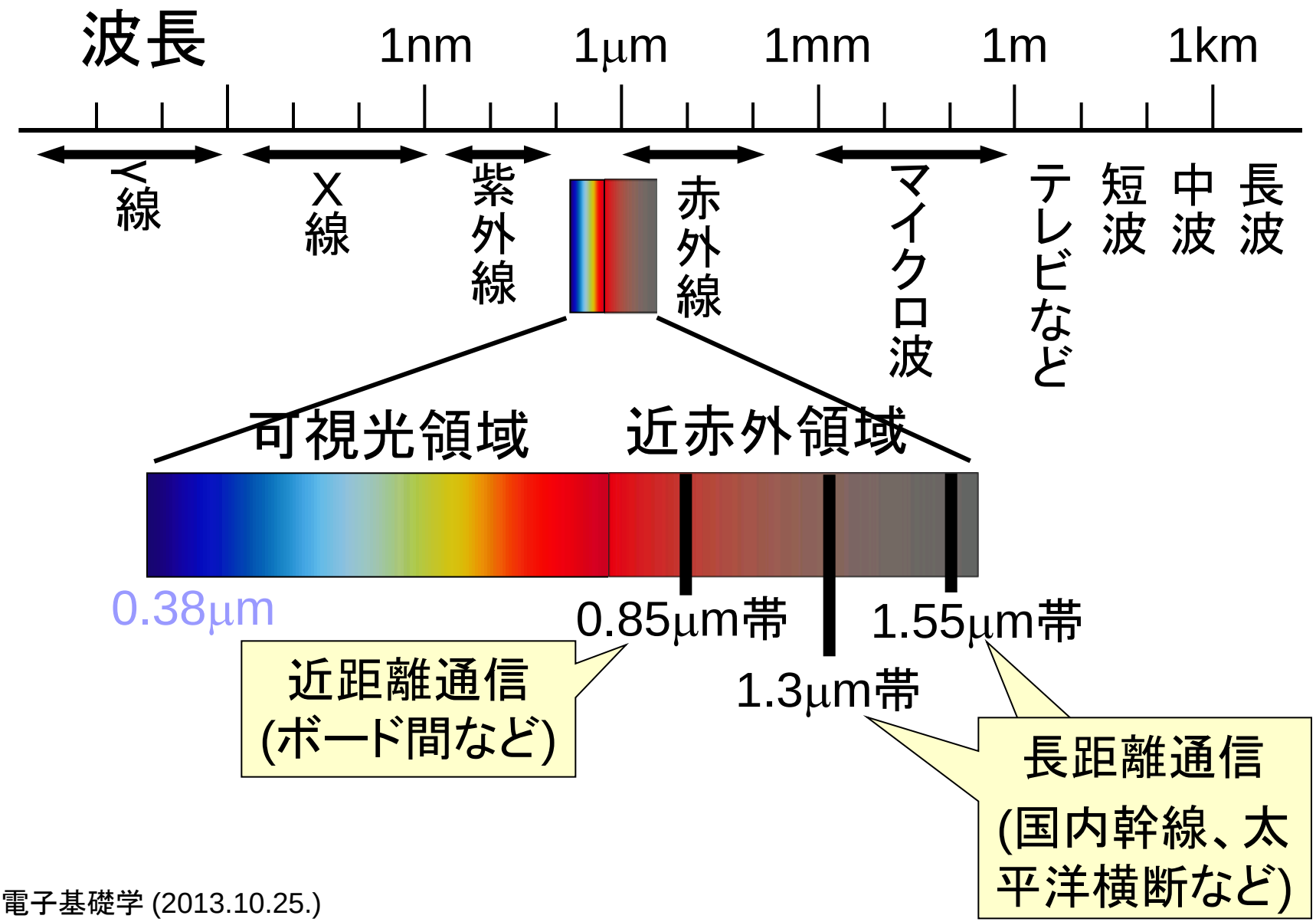
- レーザ・ダイオード (LD: Laser Diode)

  しきい値以上で光出力が注入電流に比例

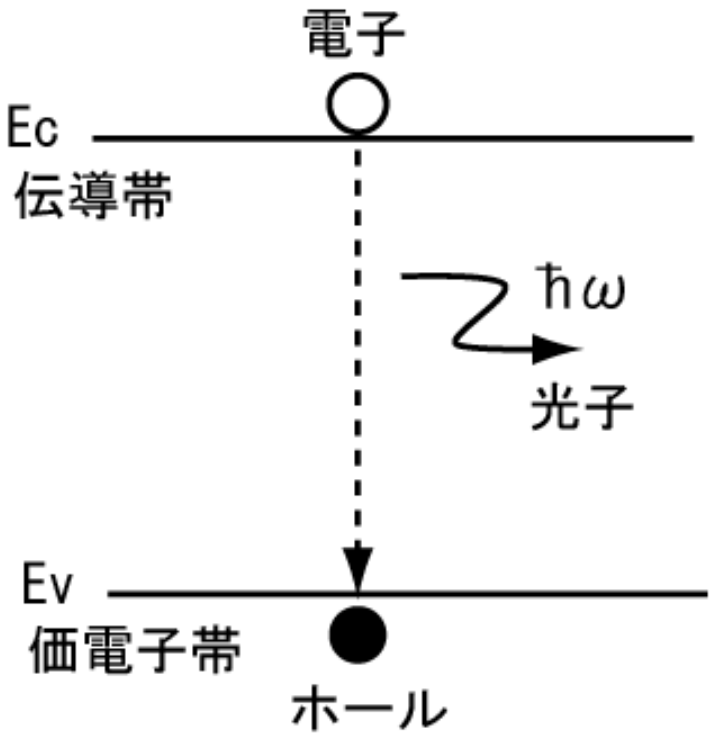




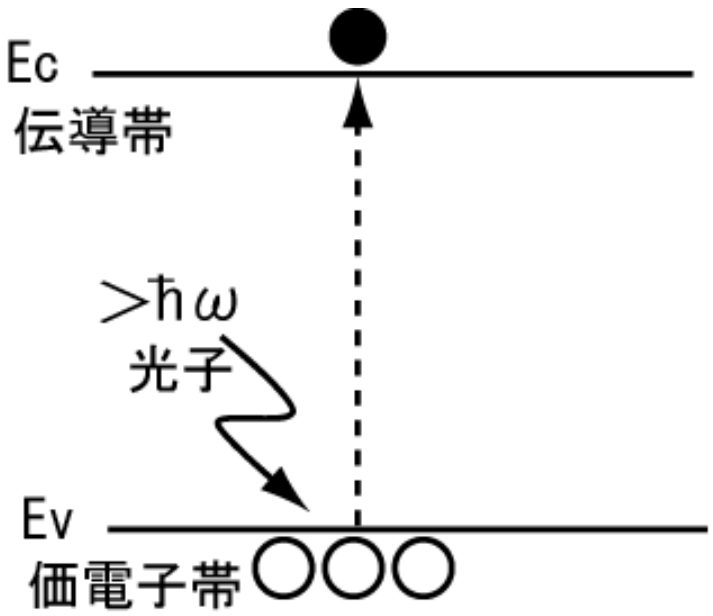
光ファイバ通信用波長帯



半導体における発光と吸収



自然放出
⇒発光

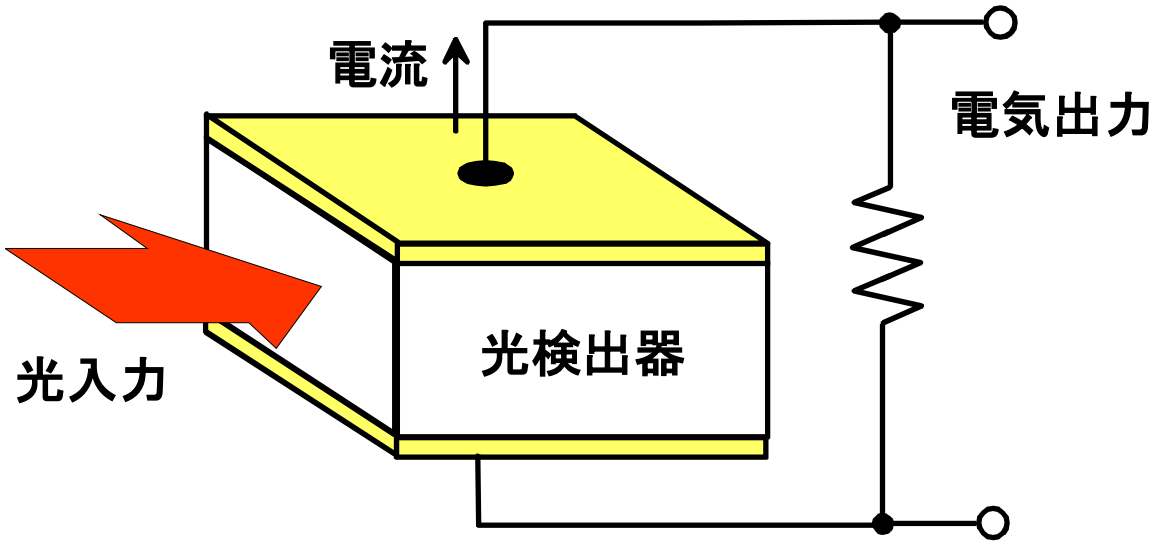


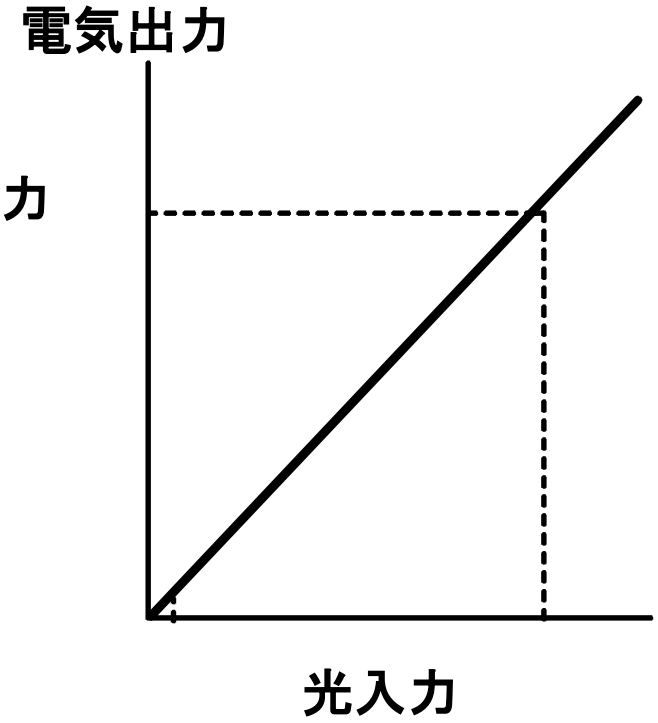
光吸収
⇒光検出器

光ファイバ通信の3大要素:光検出器

- 光検出器

入力した光パワーに比例した電流が流れる。
⇒光-電気変換

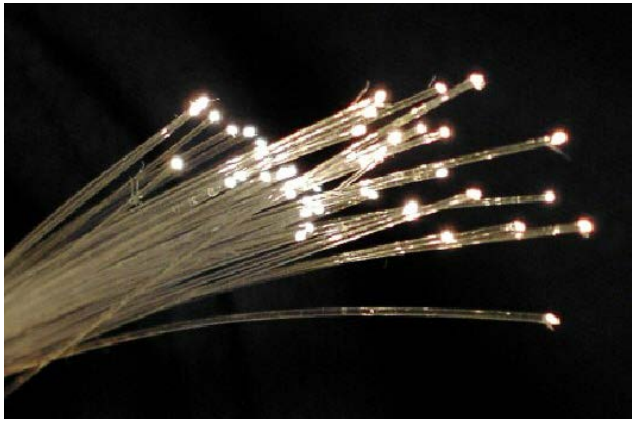


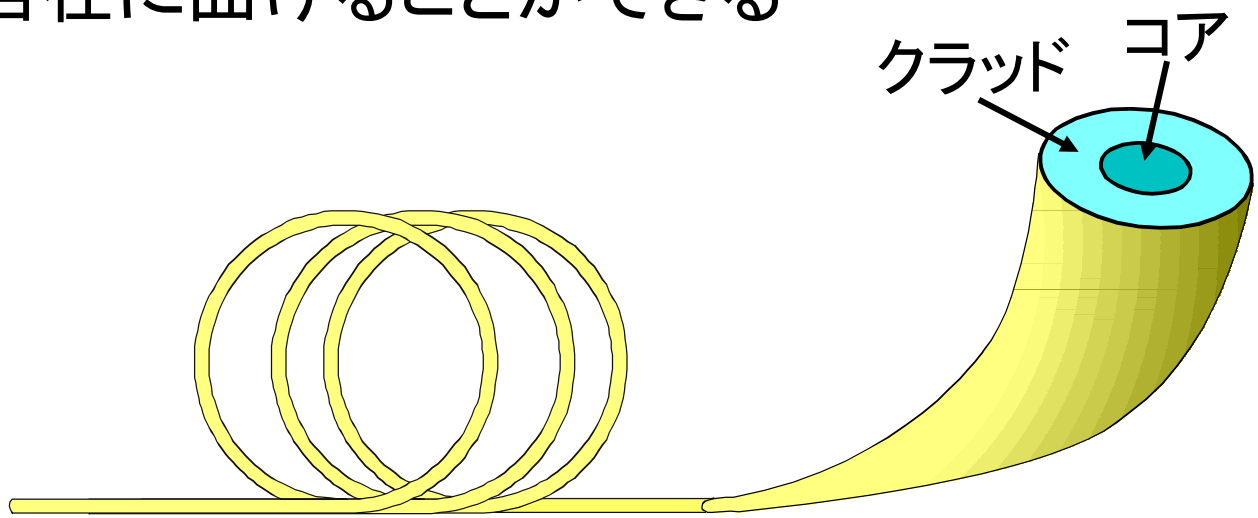


光ファイバ通信の3大要素：光ファイバ

光を伝える媒体

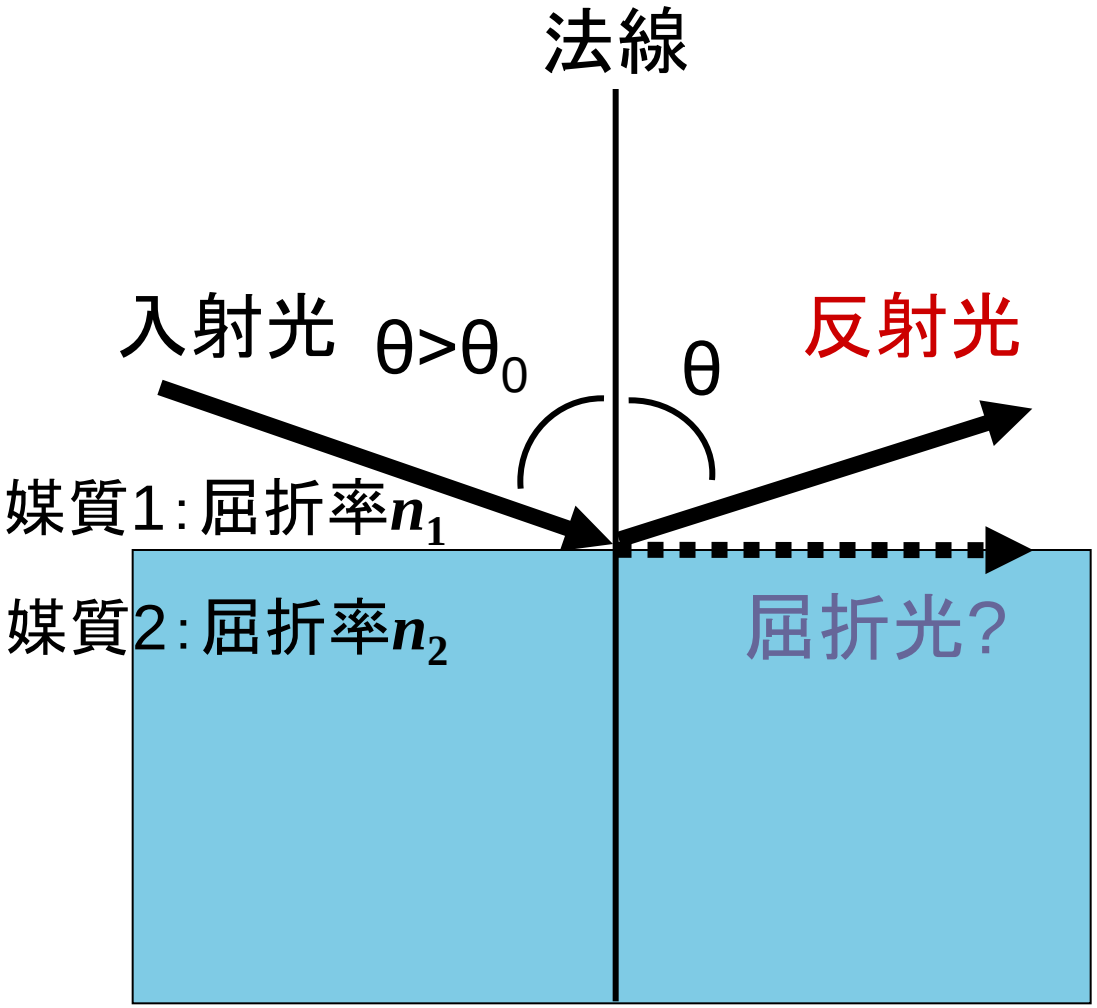
- 空間伝搬
  - 直進するしかない
  - 鏡やレンズで伝搬を制御
- 伝送路（光ファイバ）中の伝搬
  - 自由自在に曲げることができる





光ファイバ中の光伝搬原理:全反射

入射角が臨界角を越えるとどうなる？ ➡ 全反射



臨界角$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$

全反射が起こると、入射光は媒質1と2の境界面で全て反射される。

光ファイバ中の光伝搬原理

光ファイバ

コア : n_1

クラッド : n_2

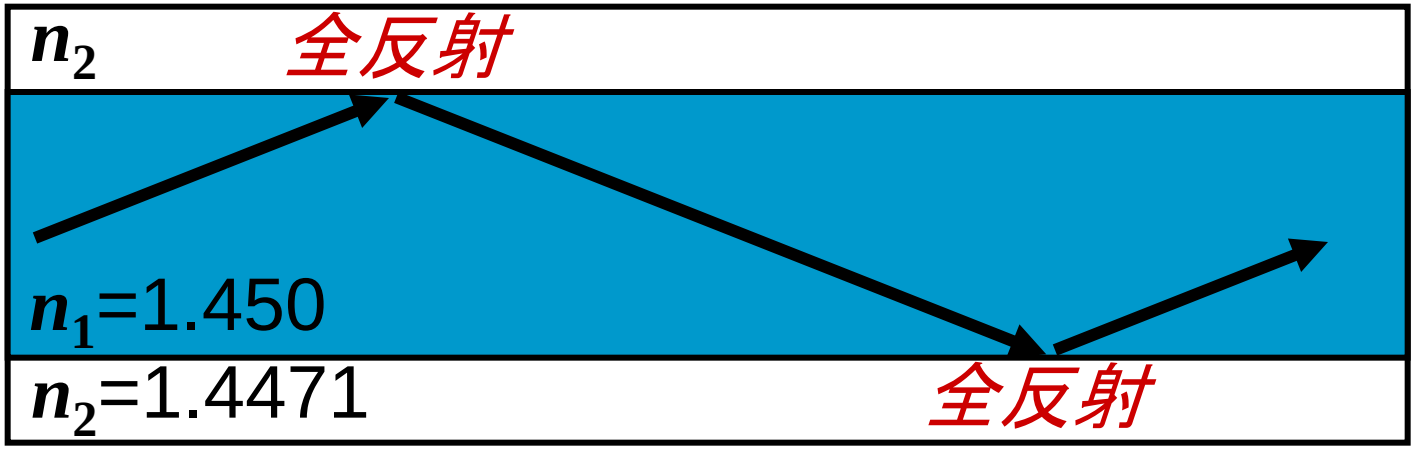
$n_1 > n_2$

n_1=1.450

n_2=1.4471

(その差0.2%)

臨界角θ_c=86.38°



縦断面拡大図

光ファイバ:曲げても大丈夫か

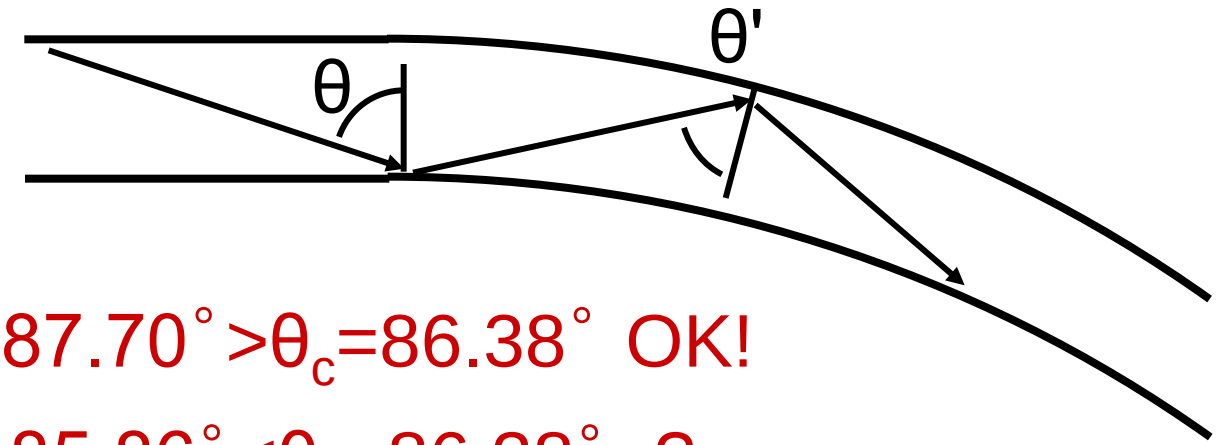
Q.光ファイバが曲がったら全反射でなくなる？

A.いいえ。曲げ半径Rがある程度大きい場合は大丈夫です。

(例)

コア直径10μm

θ=88°の光線



R=50mm → θ'=87.70°>θ_c=86.38° OK!

R= 5mm → θ'=85.86°<θ_c=86.38° ？

曲がり部分で放射→伝搬損失

光ファイバ:光は減衰しない？

Q.光は減衰しないの？

A.少しずつ不純物による吸収などによって減衰します。

しかし、材料の純度を高めることによって、光の減衰は理論限界近くまで低減されています。

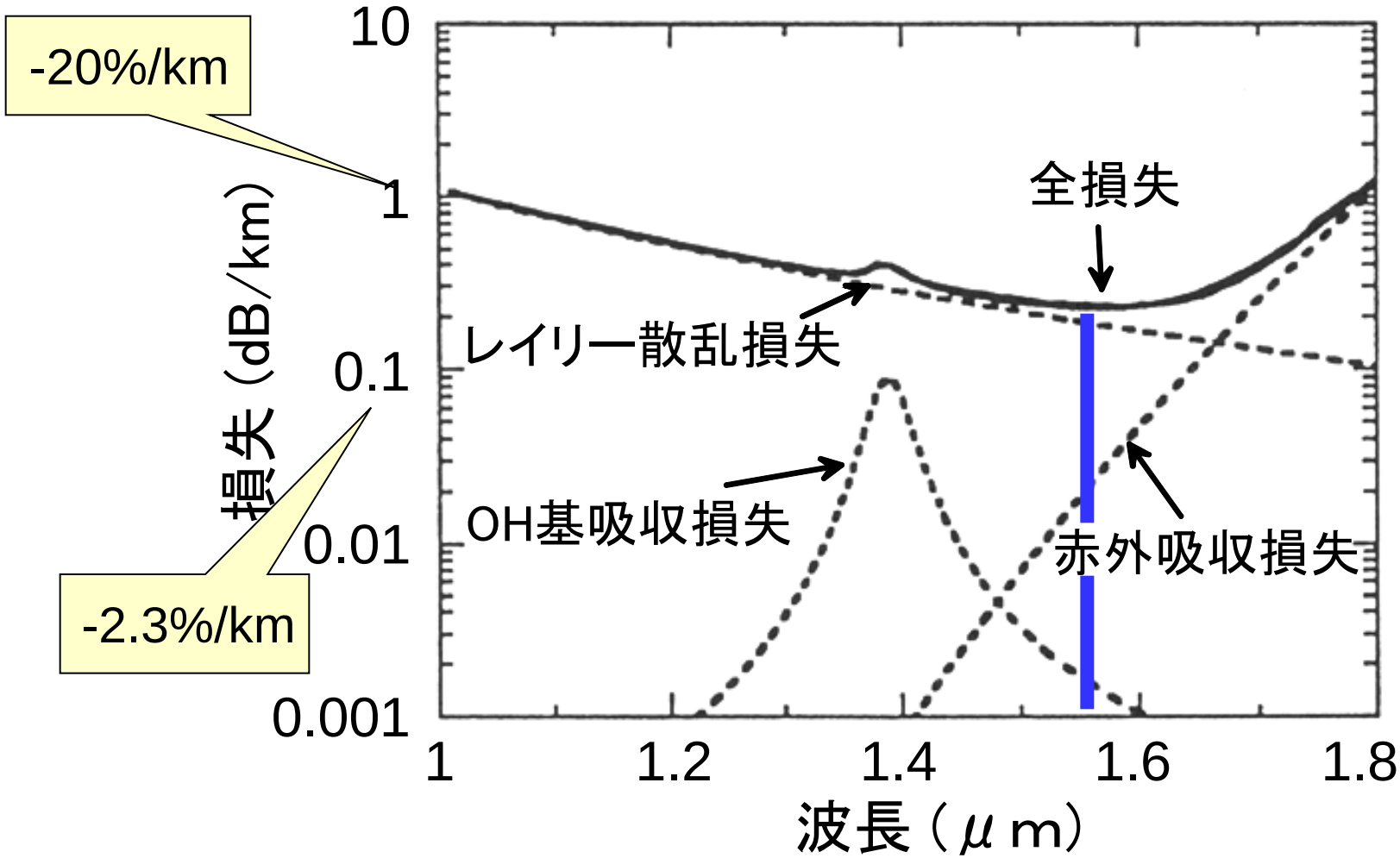
(例)石英系ガラスファイバ:

1kmの伝搬に伴う減衰はわずか3.4% (0.15 dB/km)

(波長1.55 μmにおいて)

→ 散乱損失＋吸収損失

石英系ガラス光ファイバの損失



（川上、白石、大橋共著:「光ファイバとファイバ形デバイス」(培風館)から転載）

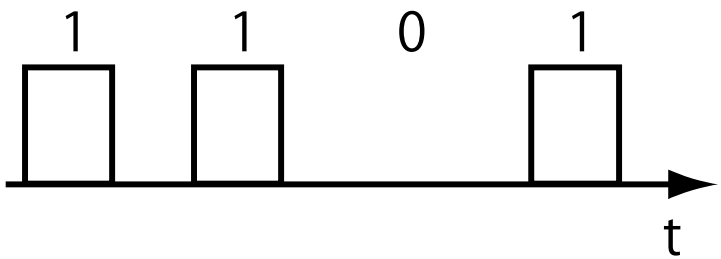
光ファイバ通信の研究開発

1990年		2000年	2010年
2.5 Gb/s	10 Gb/s	40 Gb/s	100 Gb/s

- 伝送容量の大容量化
  - 高ビットレート伝送
  - 変調フォーマットの工夫
  - 多重化（時間、波長、偏波、空間）
- ラスト・ワンマイル・アクセスネットワーク
- 光ファイバ通信の適用領域の拡大
- コンポーネント
  - 高性能＝高速・偏波無依存・低消費電力
- コンポーネントの集積化とパッケージング
  - 高機能＝新しい機能、機能複合化
  - 高信頼性
  - 低価格化

光ファイバ通信の実際:時間多重化

- 時間多重化(単位時間当りの伝送ビット数増大)

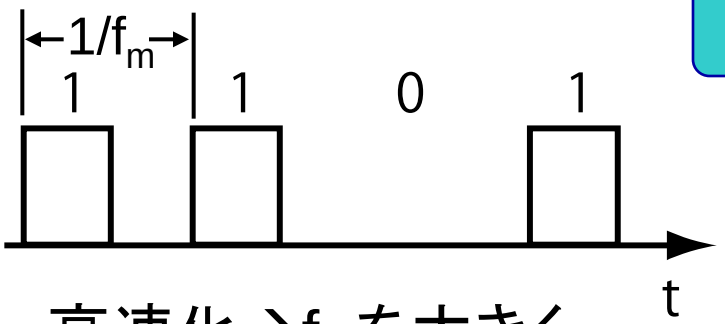


時間多重化 → 単位時間当たりの伝送ビット数増大
→ パルス周期短縮

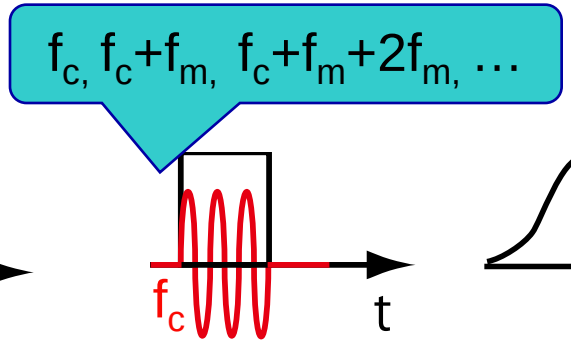
- ✓ 変調によるスペクトル拡がり → 光ファイバの波長分散(波長によって伝搬速度が異なる)
- ✓ 狭パルス幅 → 光ファイバの偏波モード分散(光の偏光方向によって伝搬速度が異なる)が顕在化
- ✓ 電気/光/電気変換の律速

時間多重化：波長分散

時間波形（強度変調）

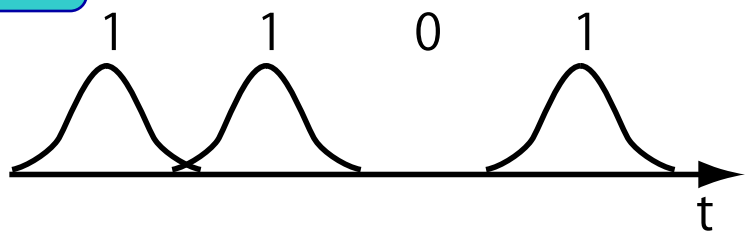


波長（周波数）成分

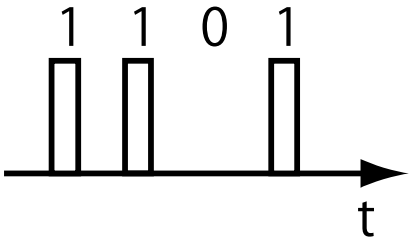


伝搬時間波形

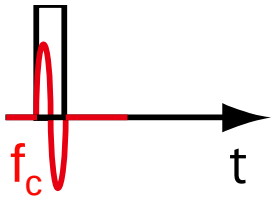
（パルス拡がり）

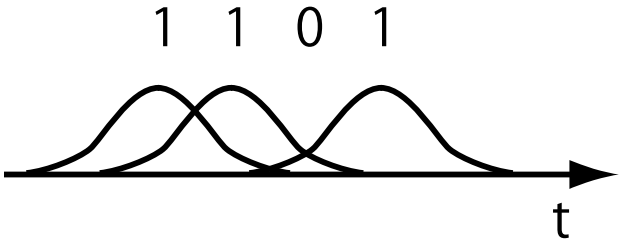


高速化→f_mを大きく



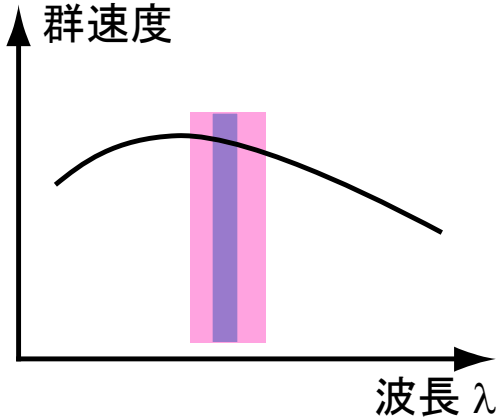
波長幅が拡がる





波長分散：

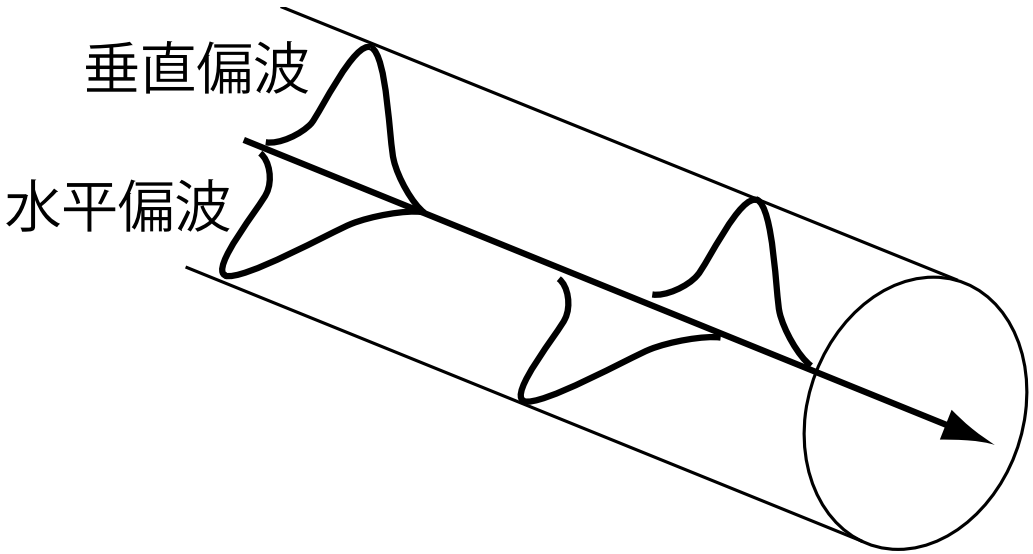
波長によってファイバ中の伝搬速度が異なる



光パルスに含まれる波長範囲が広い

→光パルスが拡がる

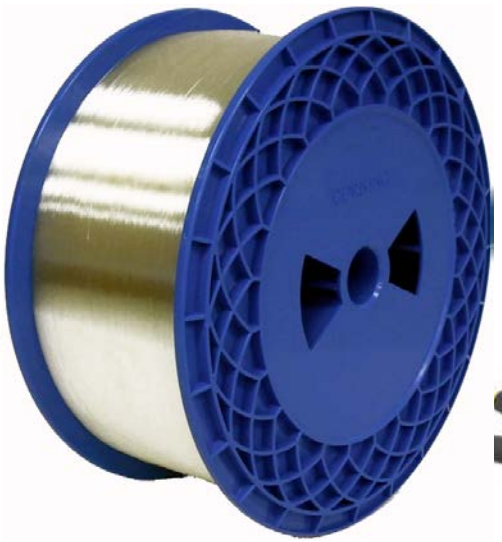
時間多重化：偏波モード分散



- ✓ 偏波モード分散→偏波成分によって伝搬速度が異なる
  （わずかな構造非対称性、ファイバの曲げ）
- ✓ 長距離伝搬後にパルス波形が拡がる

時間多重化：高速なE/O, O/E変換

送信側
電気-光変換



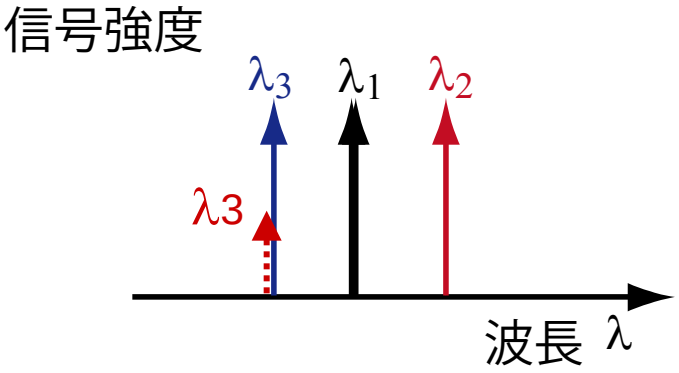
受信側
光-電気変換

source: PICOMETRIX

高速な電気/光、光/電気変換
- 高速光デバイス（LD、変調器、PD）
- これらを駆動する電子デバイスの高速化が必要

波長多重化

- 波長多重通信
  - 1本の光ファイバで異なる波長を使って信号を伝送
  - 波長数Nだけ信号チャネルを確保できる
  - 1波長あたりの光パワーP(W) → 全光パワーP(W)×N
- 光パワー増大 → 非線形光学効果
  - 信号光強度の飽和、波形変化
  - 自己位相変調 → パルス拡がり
  - 相互位相変調 → 他波長の信号（on/off）で位相が変化（チャネル間クロストーク）
- （縮退）四光波混合
  → 異波長信号間干渉



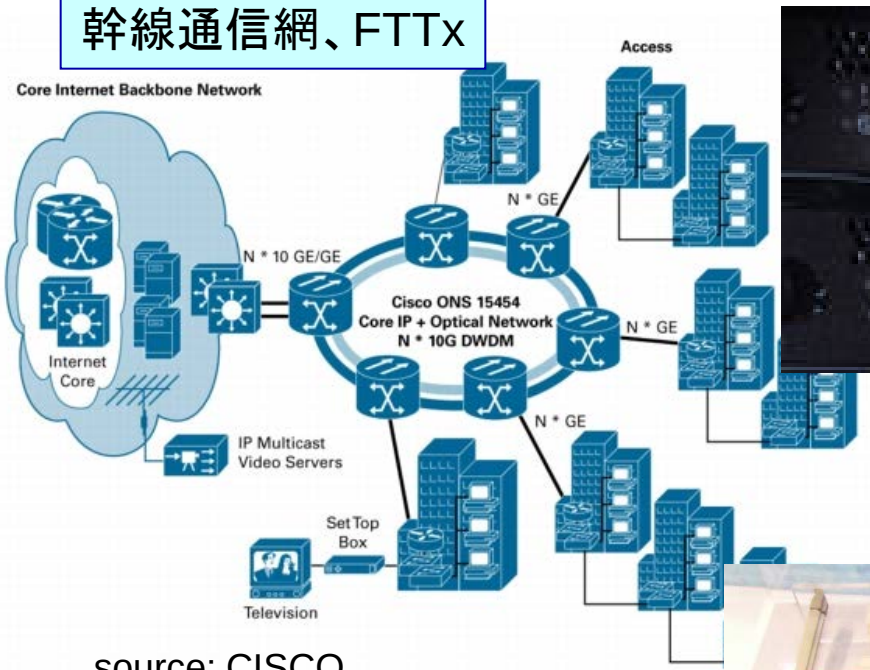
光ファイバ通信の研究開発

1990年		2000年	2010年
2.5 Gb/s	10 Gb/s	40 Gb/s	100 Gb/s

- 伝送容量の大容量化
  - 高伝送ビットレート
  - 変調フォーマットの工夫
  - 多重化（時間、波長、偏波、空間）
- ラスト・ワンマイル・アクセスネットワーク
- 光ファイバ通信の適用領域の拡大
- コンポーネント
  - 高性能化＝高速・偏波無依存・低消費電力
- コンポーネントの集積化とパッケージング
  - 高機能＝新しい機能、機能複合化
  - 高信頼性
  - 低価格化

光ファイバ通信の適用範囲

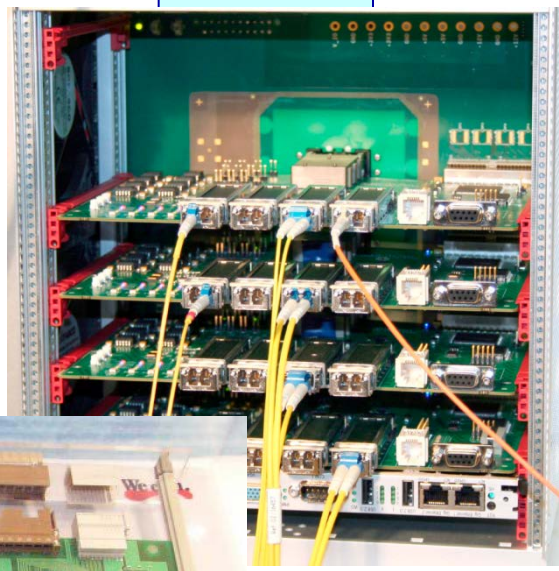
幹線通信網、FTTx



source: CISCO

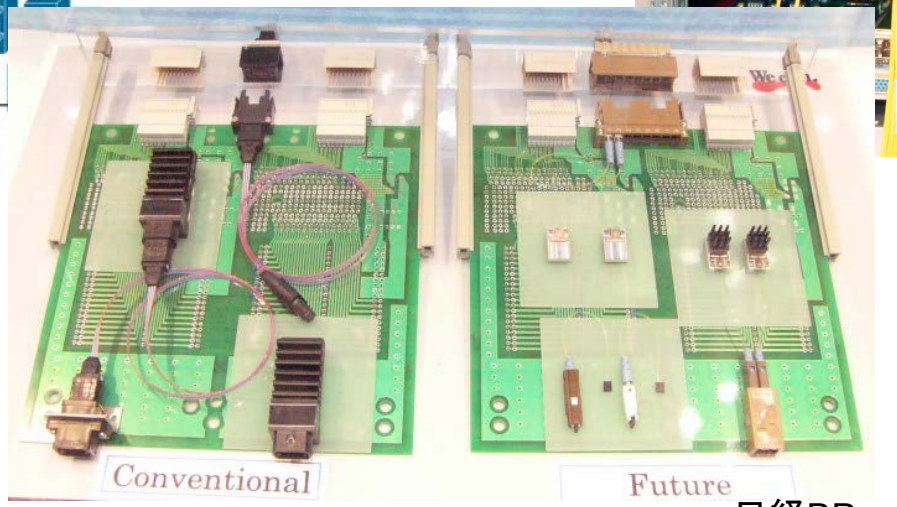
機器間

ボード間



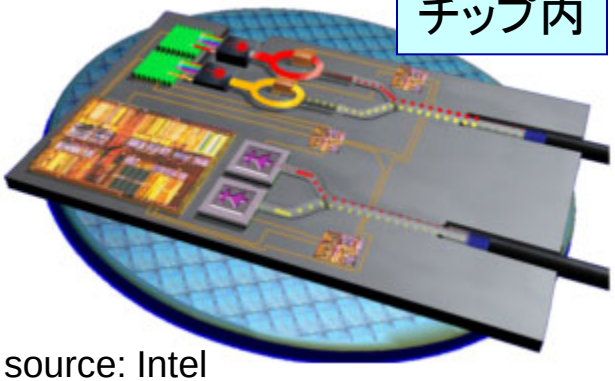
source: SPIE

ボード内



source:日経BP

チップ内



source: Intel

光ファイバ通信の研究開発

1990年		2000年	2010年
2.5 Gb/s	10 Gb/s	40 Gb/s	100 Gb/s

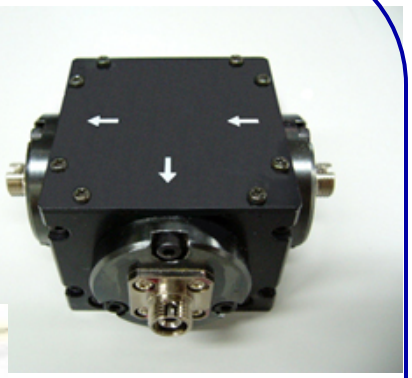
- 伝送容量の大容量化
  - 高伝送ビットレート
  - 変調フォーマットの工夫
  - 多重化（時間、波長、偏波、空間）
- ラスト・ワンマイル・アクセスネットワーク
- 光ファイバ通信の適用領域の拡大
- コンポーネント
  - 高性能化＝高速・偏波無依存・低消費電力
- コンポーネントの集積化とパッケージング
  - 高機能＝新しい機能、機能複合化
  - 高信頼性
  - 低価格化

光集積回路

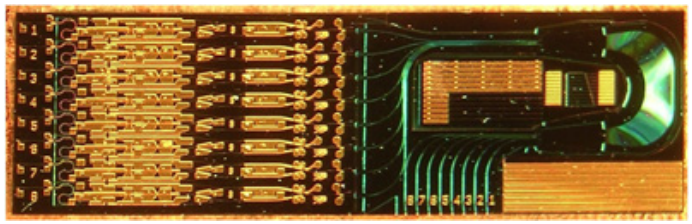
source: intense

source: FDK

source: Photline

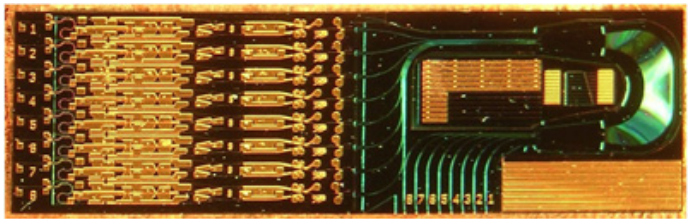


source: ESST

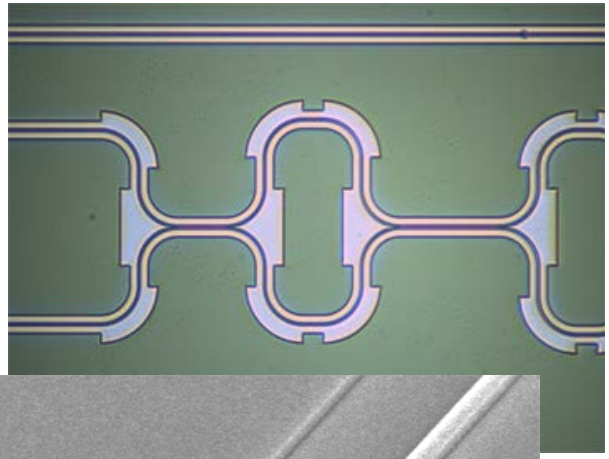


source: UCSB

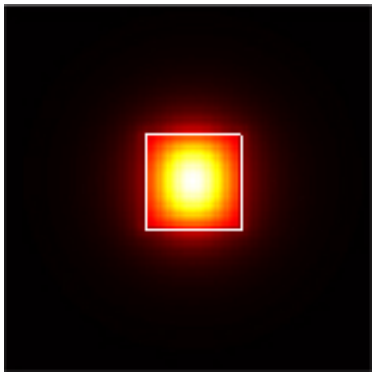
光導波路



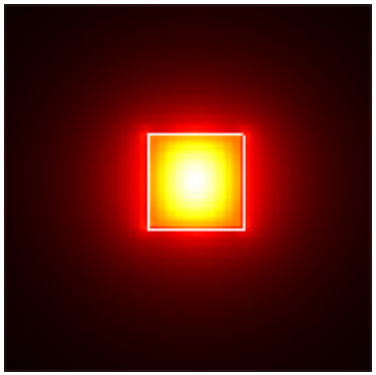
source: UCSB



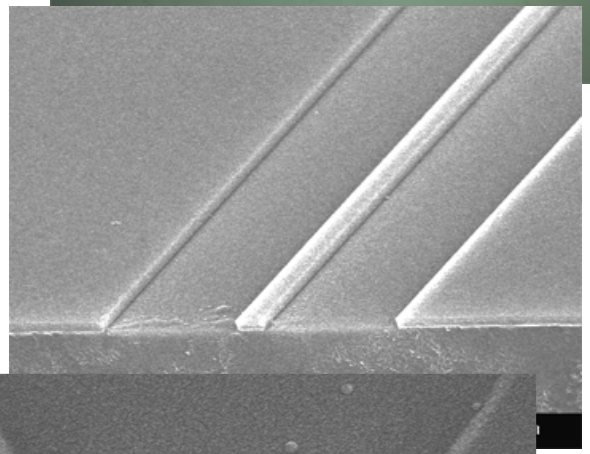
光集積回路の基本構成要素は光導波路
- 高屈折率材料:コア
- 低屈折率材料:クラッド

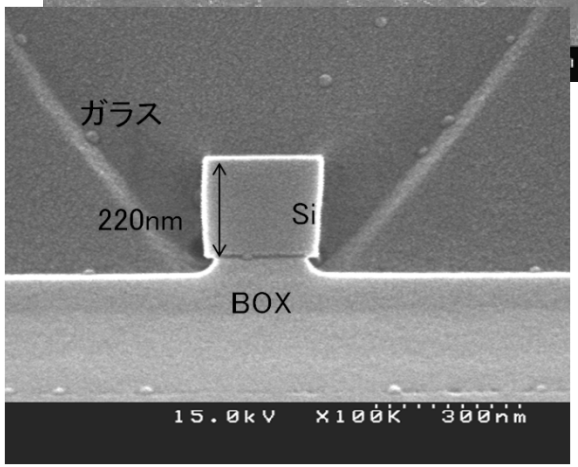


波長1270 nm

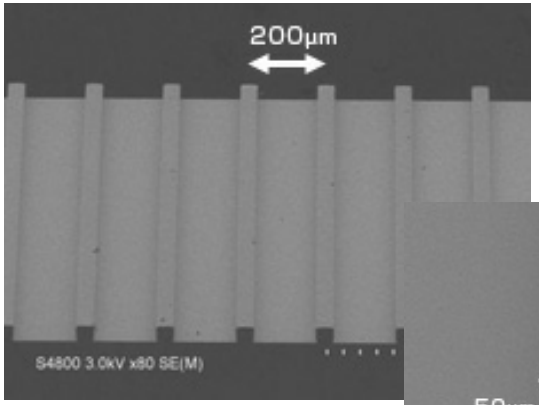


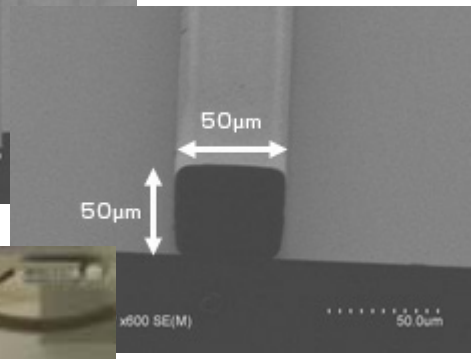
波長1550 nm





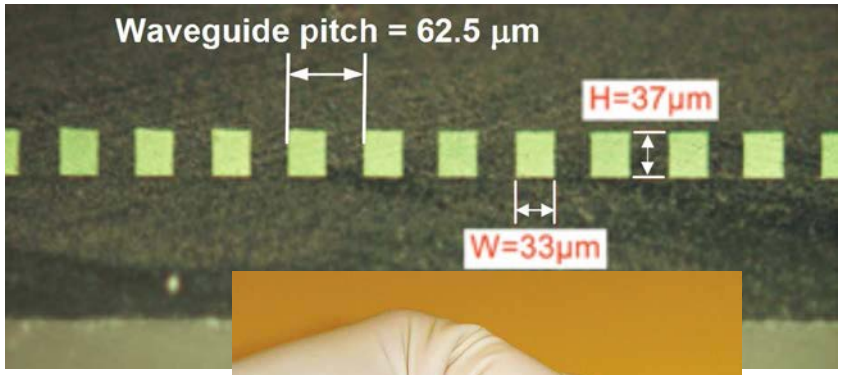
光配線

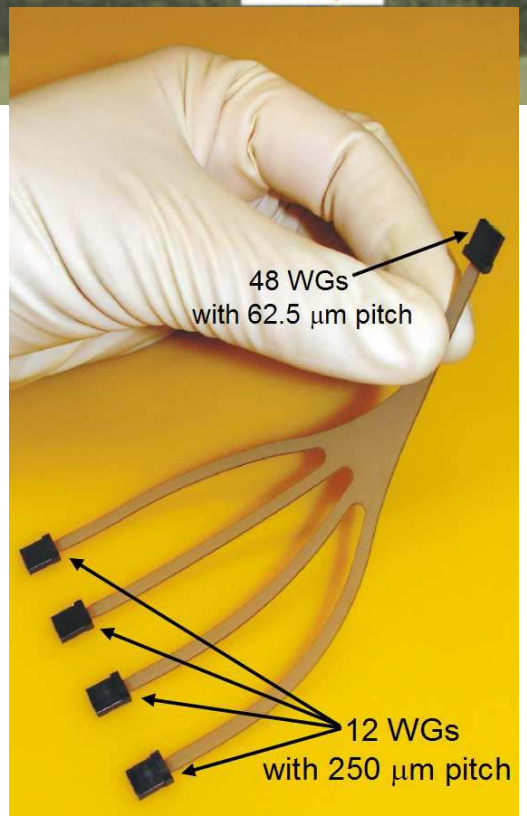




Source: TORAY

Source: オムロン・松下
CEATEC2005

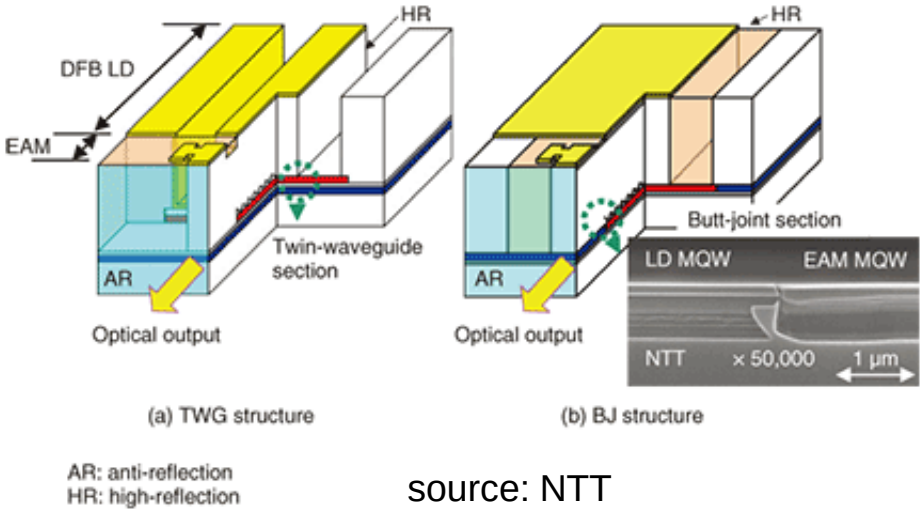




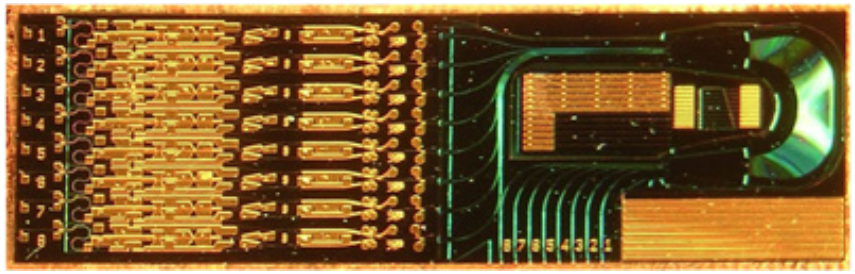
Source: IBM, MOC'08 Technical Digest

半導体光集積回路

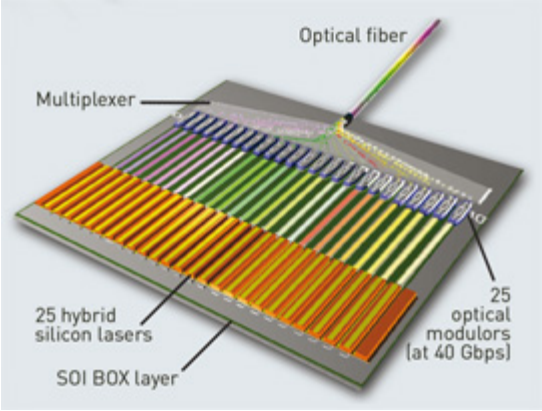
半導体光集積回路
- 半導体レーザ＋光変調器
- 多波長発振半導体レーザ（多数のLDと結合器）
- これらの組合せデバイス



source: NTT



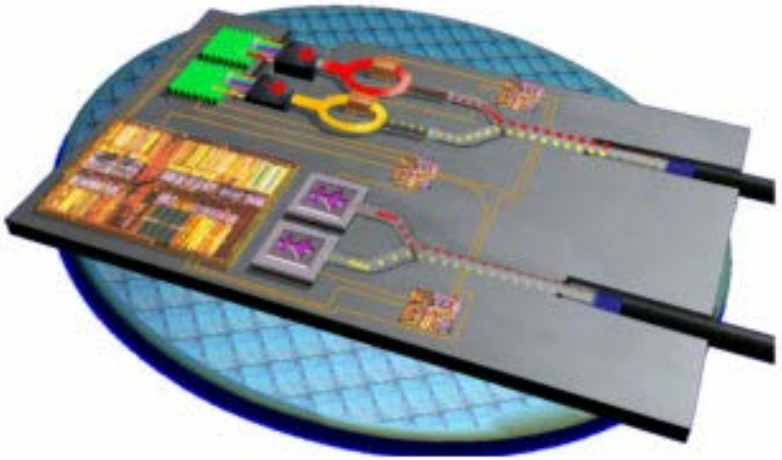
source: UCSB



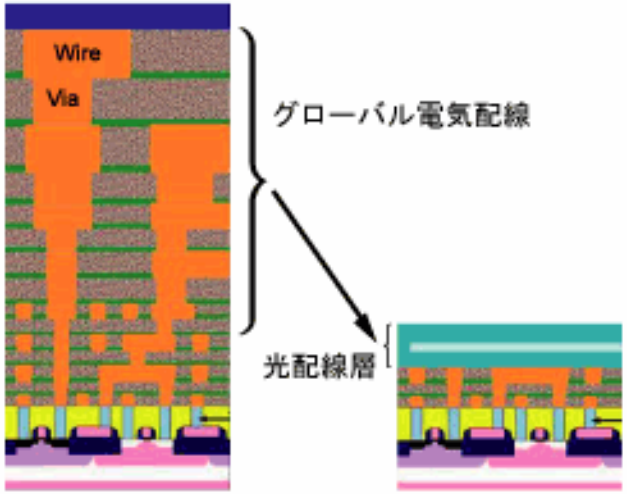
source: Intel

光配線はLSIチップの中へ

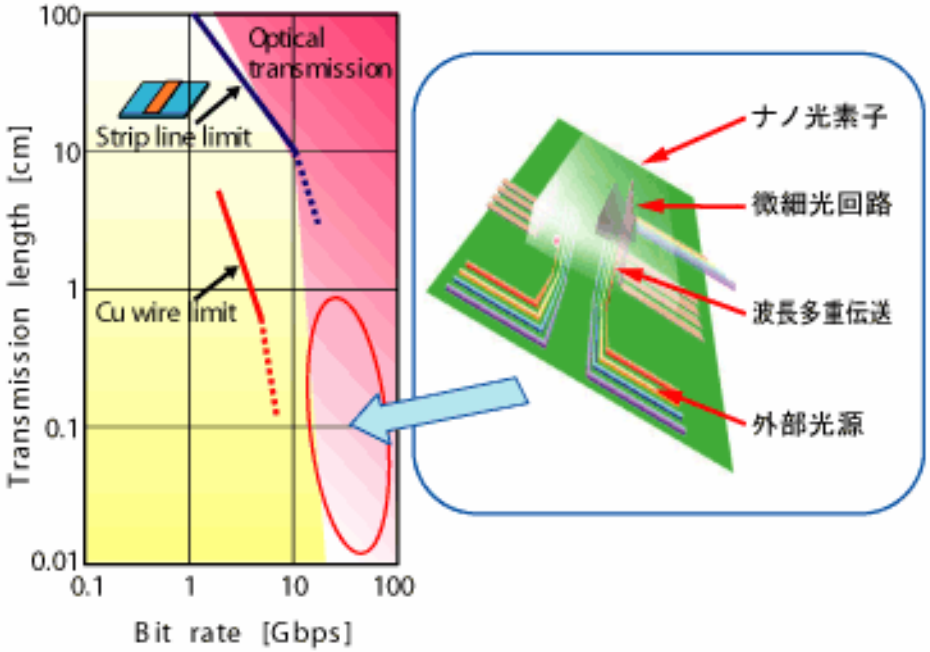
Source: Intel



半導体MIRAIプロジェクト
www.miraipj.jp



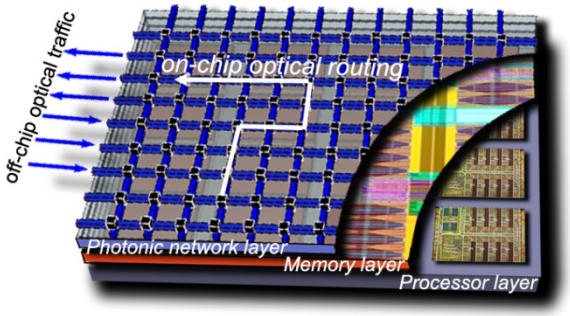
光配線によるグローバル配線の簡素化



オンチップ光配線技術の位置付けと開発要素技術

まとめ

- 光ファイバ通信：光が伝搬するしくみ
- 長距離伝搬させる際の課題
- どうやって伝送容量を増やすか（多重化）
- 超高速伝送技術を高速配線技術へ展開
- まだまだ解決しなければいけない課題が多い.
- 若い皆さんの活躍に期待



Source: IBM