

# 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

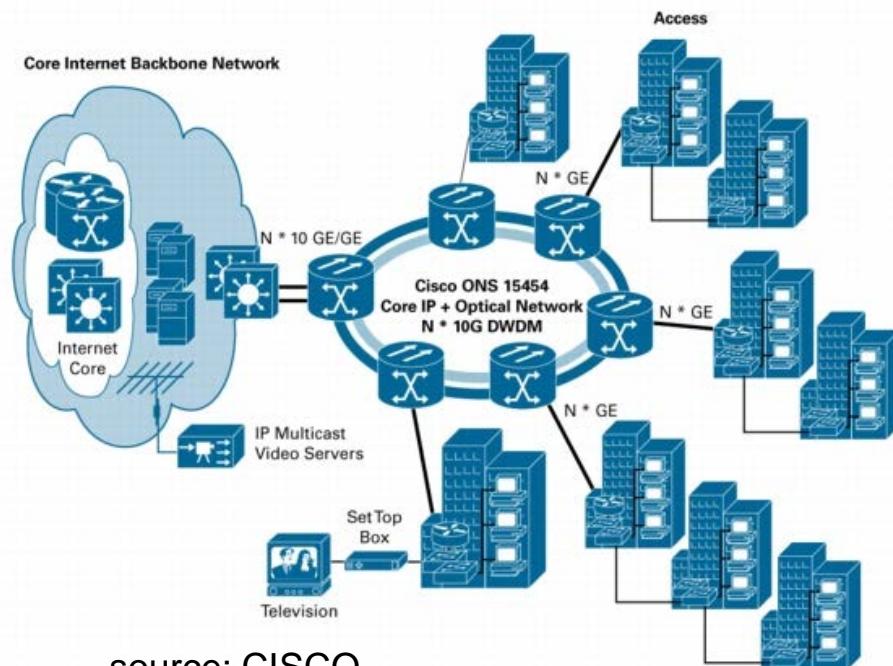
電気電子工学専攻

# 今週の講義内容

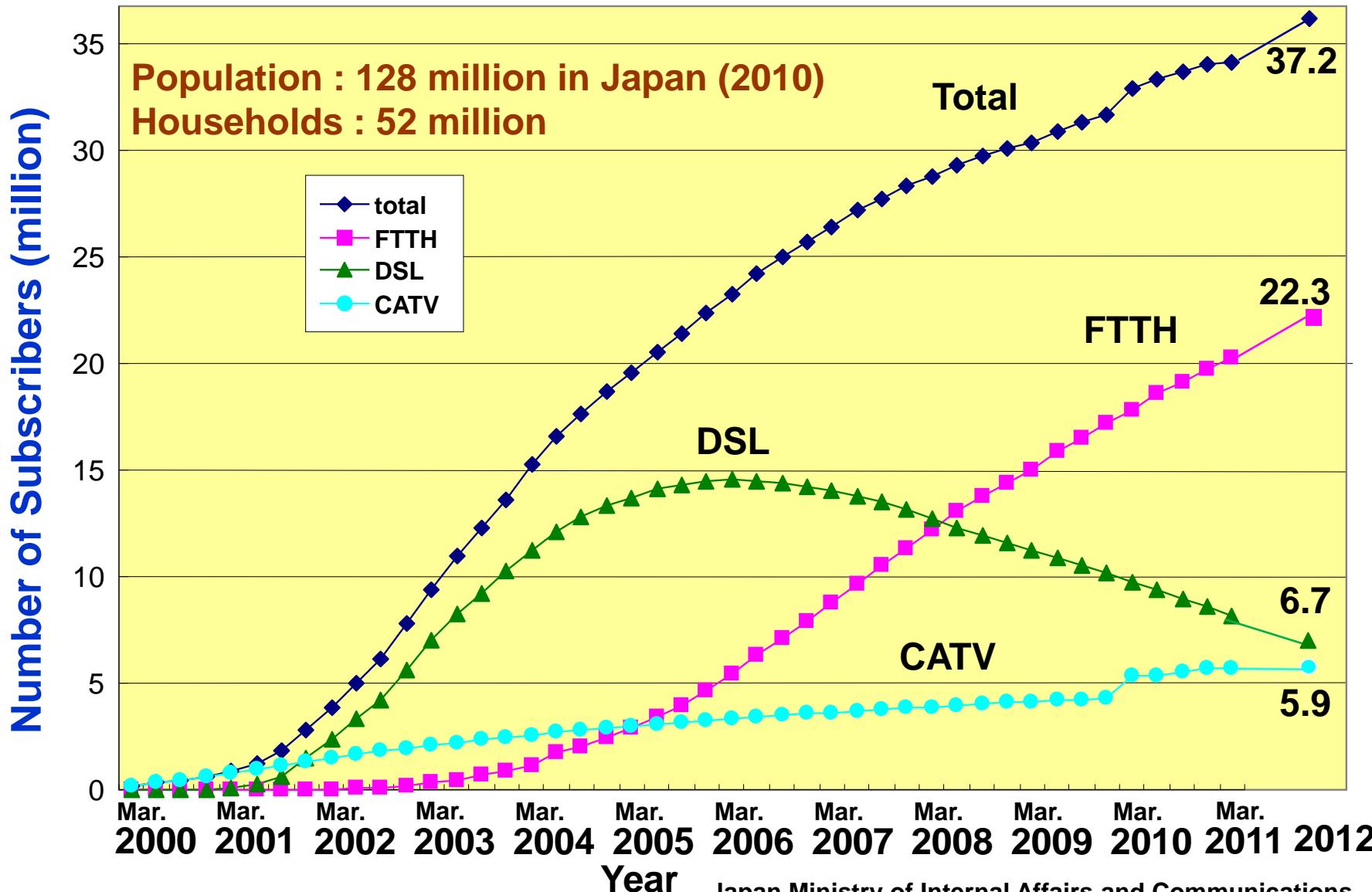
- 光エレクトロニクスの応用分野: 光ファイバ通信
  - 原理
  - 構成要素(光源・光検出器・光ファイバ)
  - 光ファイバ通信の伝送容量拡大
    - (重要)分散
  - 光通信技術の適用範囲拡大
  - 光集積回路

- 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.

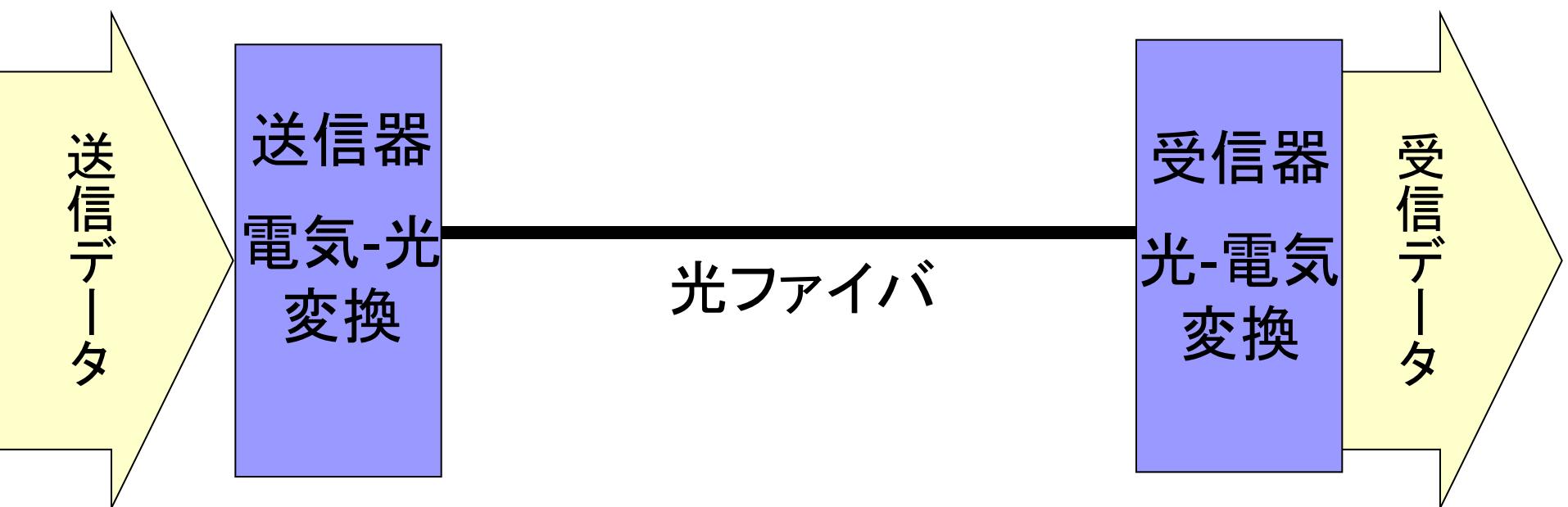


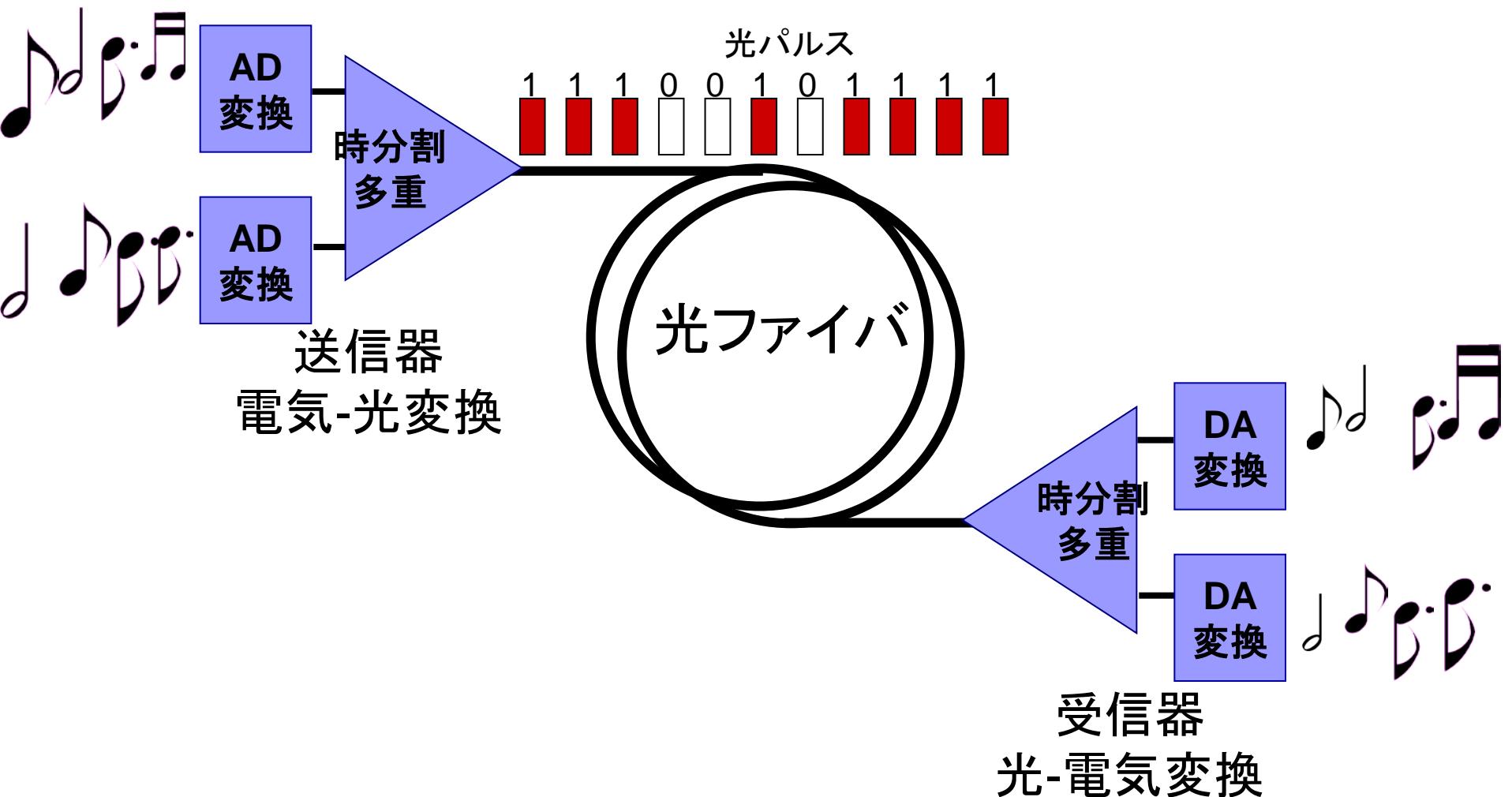
# 我が国のブロードバンドサービス加入者数



## ■ 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



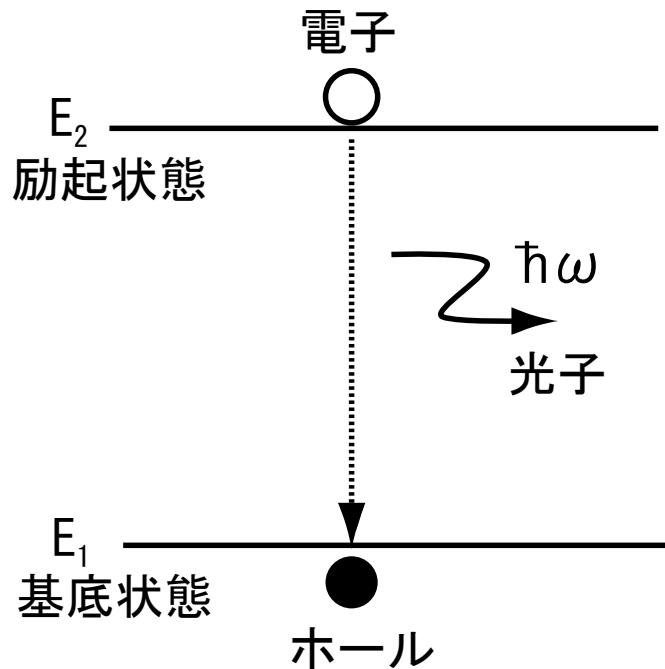


- 光エレクトロニクスの3+1大要素
  - 高性能な半導体レーザ (1970年代)
  - 高感度な光検出器 (1970年代?)
  - 超低損失な光ファイバ (1970年代)
  - 光増幅器 (1990年代)
- これを巧みに駆使する技術
  - 時分割多重化
  - 波長分割多重化
  - エラー訂正 etc...

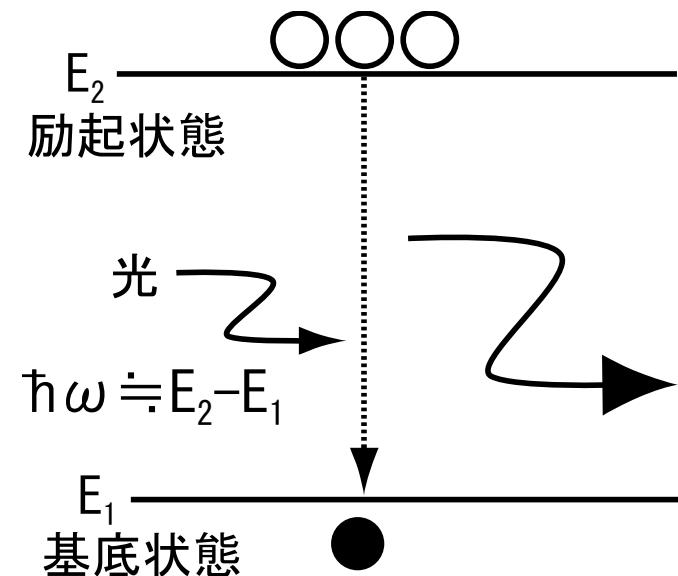
# 半導体における発光 ～自然放出と誘導放出～

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...

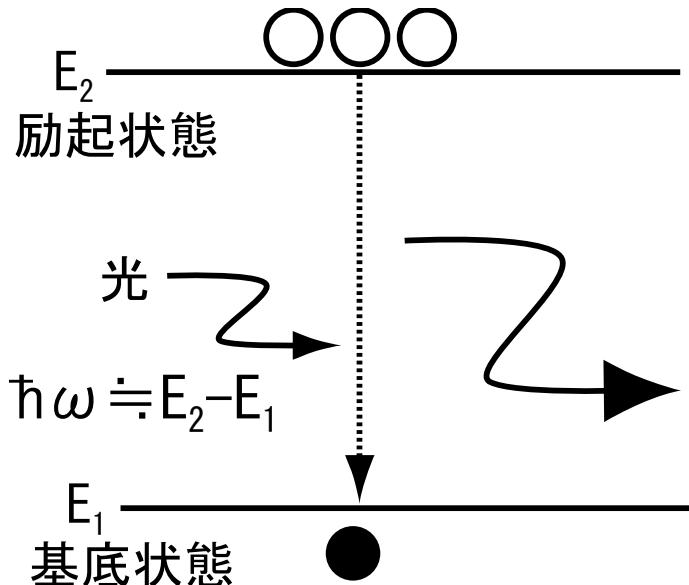


自然放出  
⇒ 発光

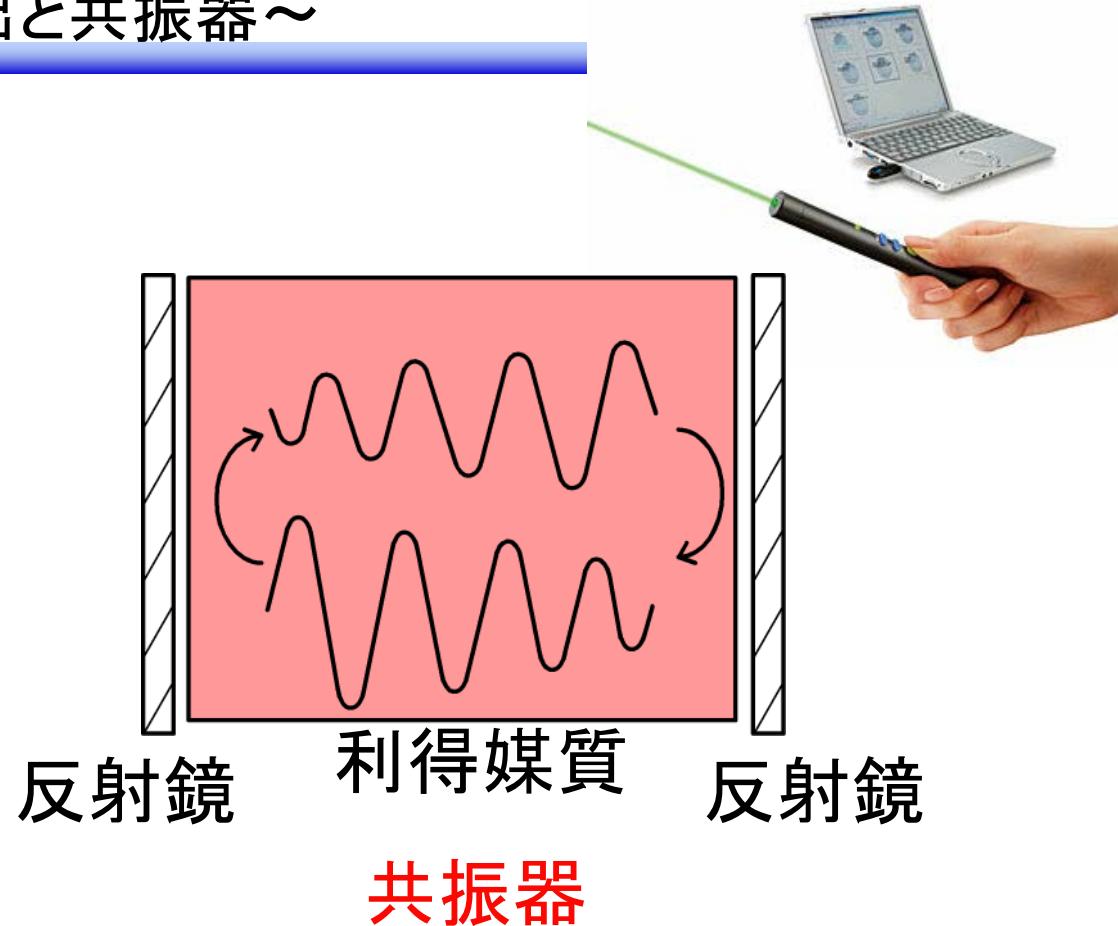


誘導放出  
⇒ レーザ

# 半導体レーザ ～誘導放出と共振器～



誘導放出

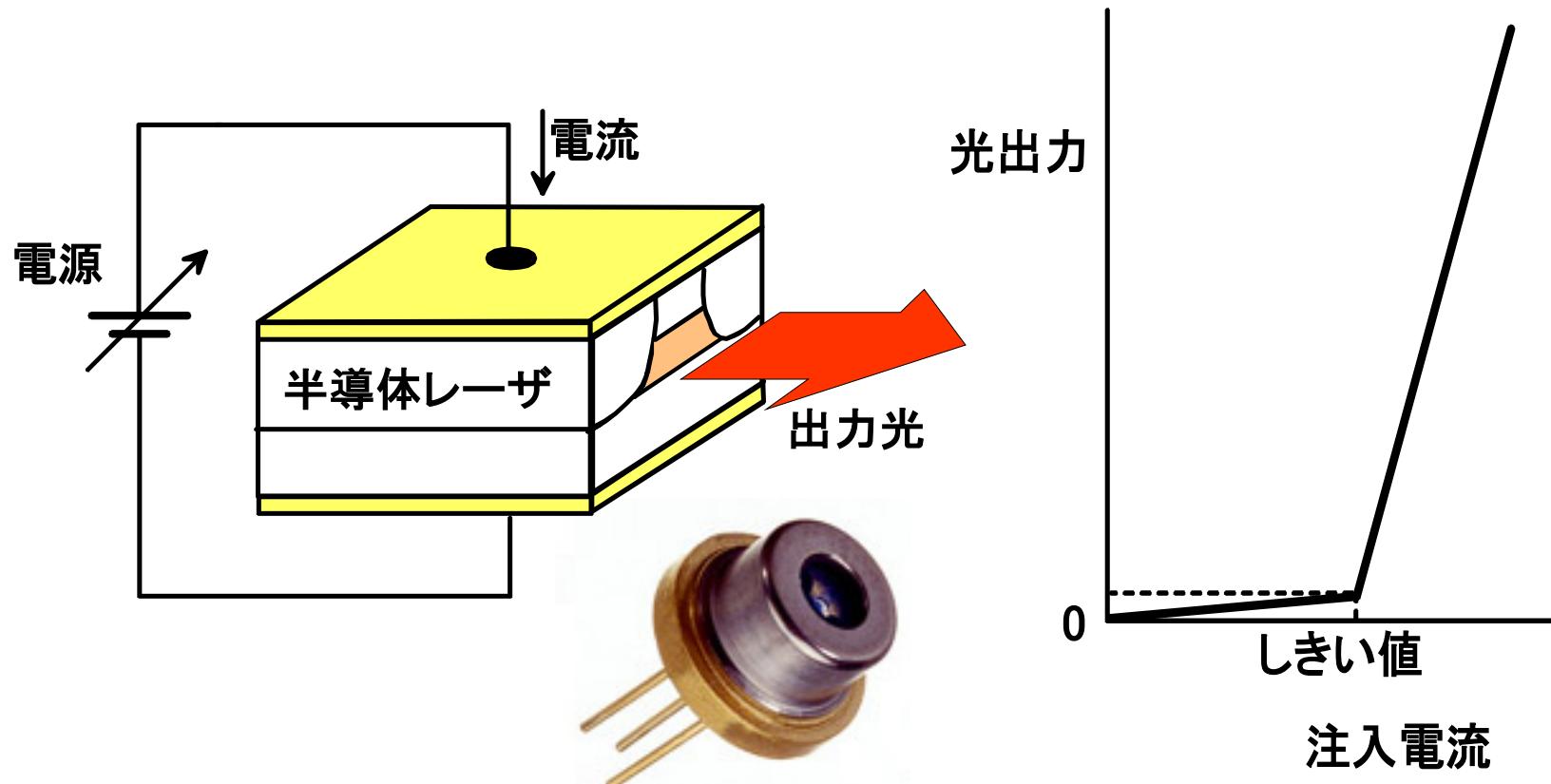


共振器

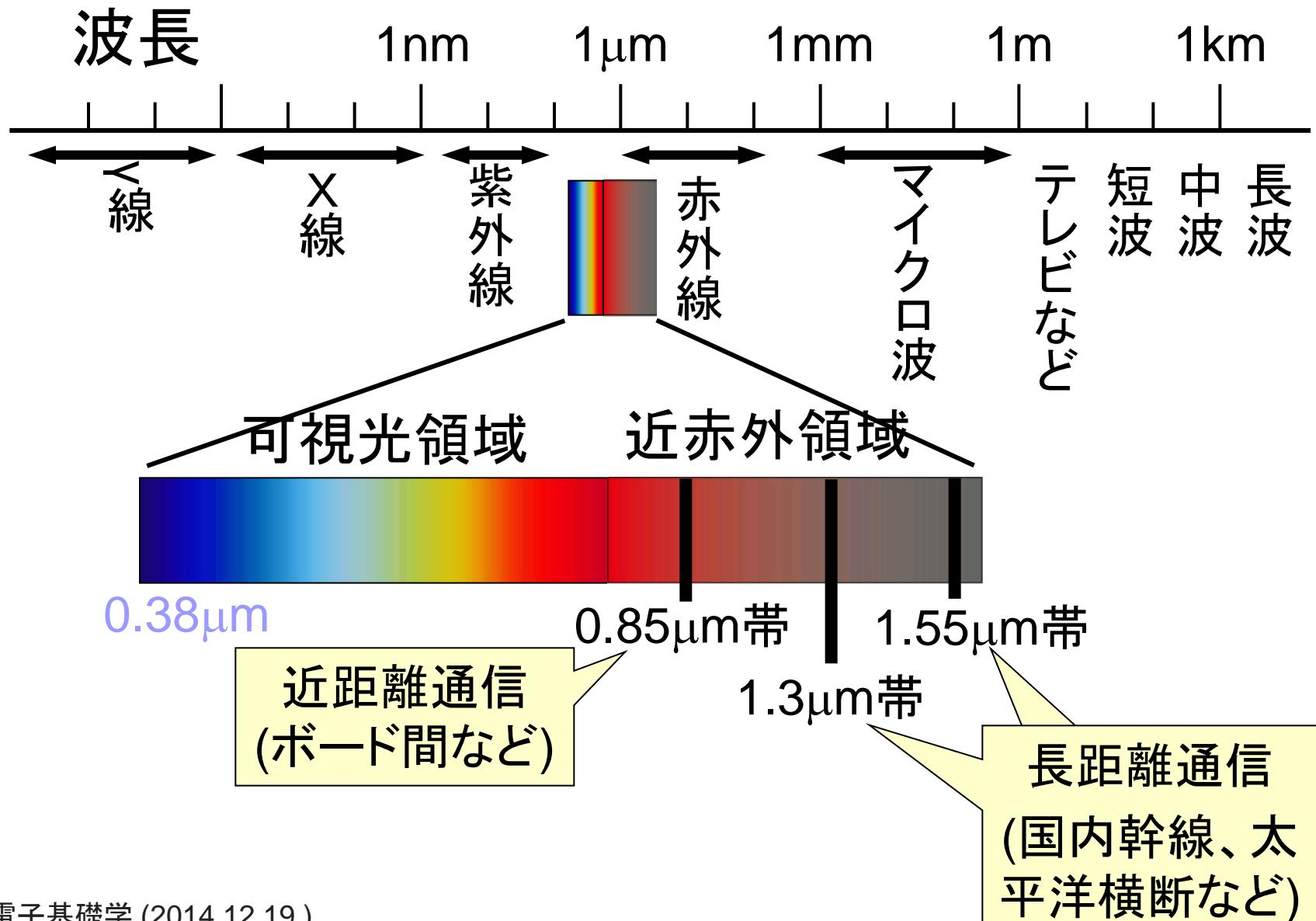
利得媒質を共振器の中に入れる  $\Rightarrow$  誘導放出が次々に起こる(レーザ発振)

# 光ファイバ通信の3大要素: 光源

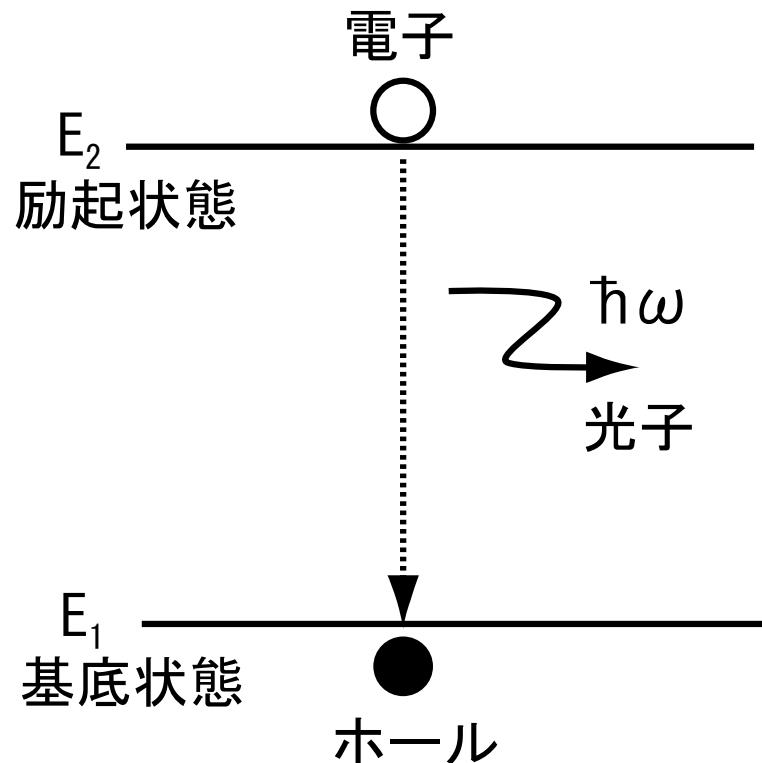
- レーザ・ダイオード (LD: Laser Diode)  
**しきい値以上で光出力が注入電流に比例**



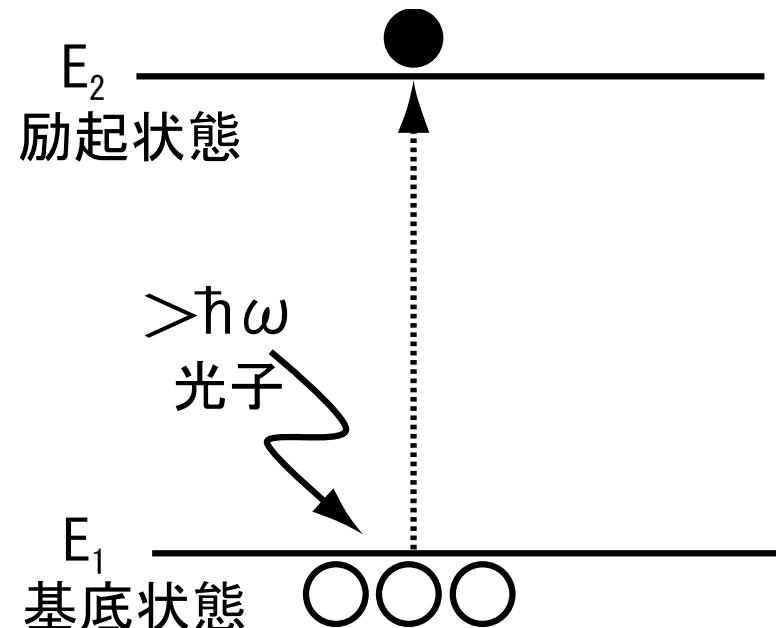
# 光ファイバ通信用波長帯



# 半導体における発光と吸収



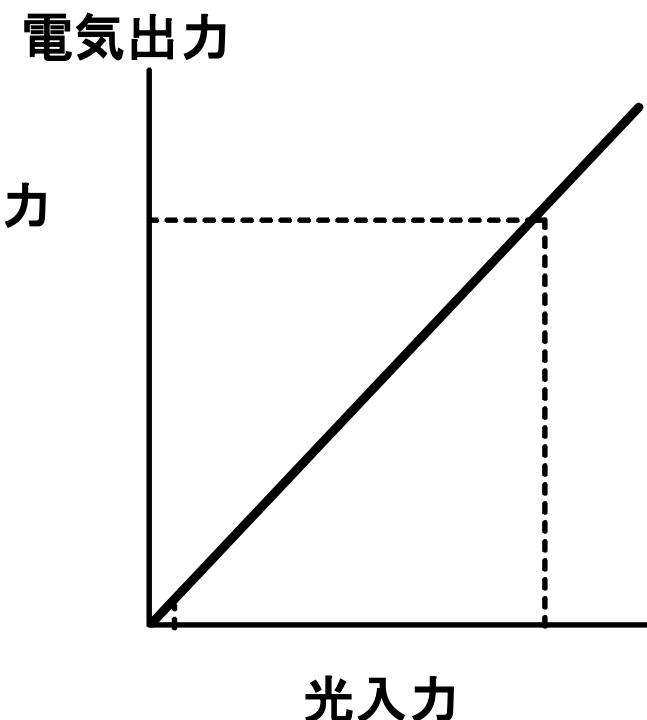
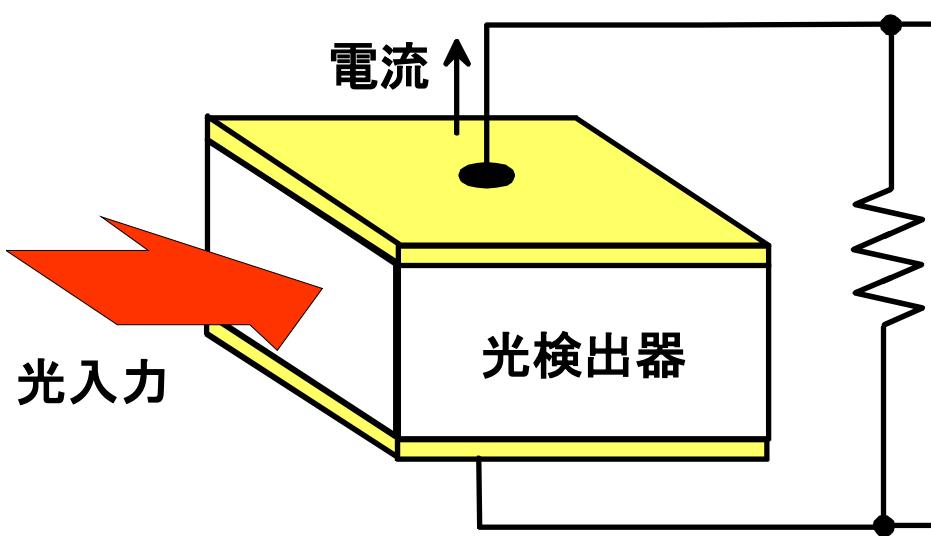
自然放出  
⇒ 発光  
(電気/光変換)



光吸收  
⇒ 光検出  
(光/電気変換)

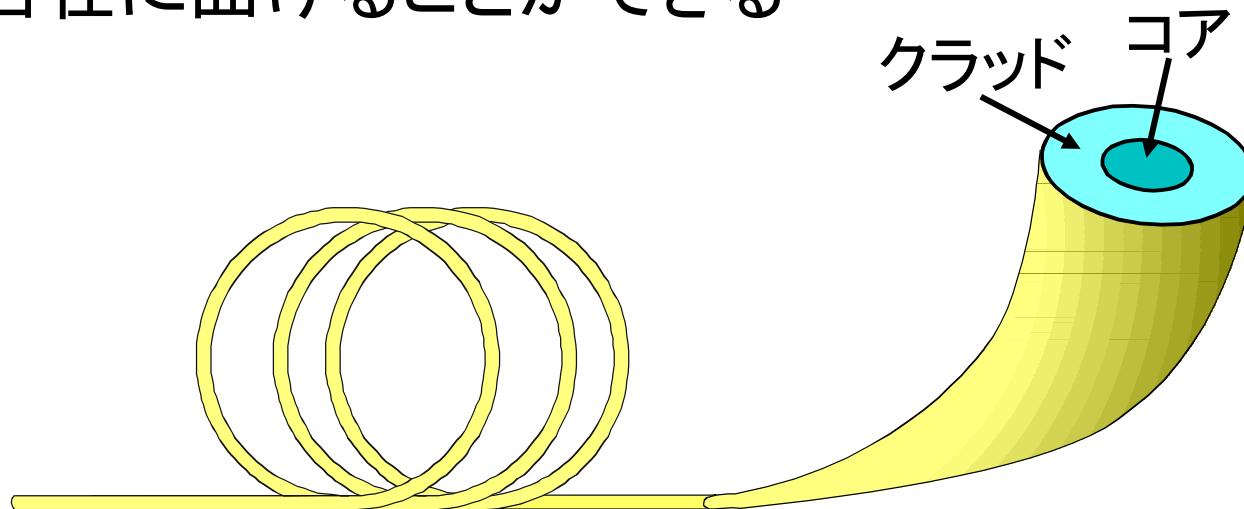
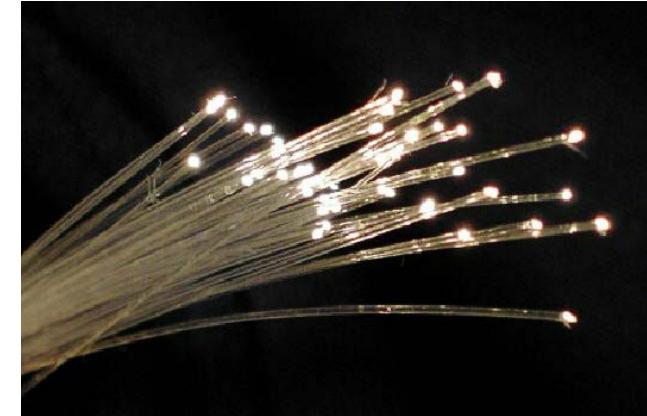
## ■光検出器

入力した光パワーに比例した電流が流れる。  
→光-電気変換



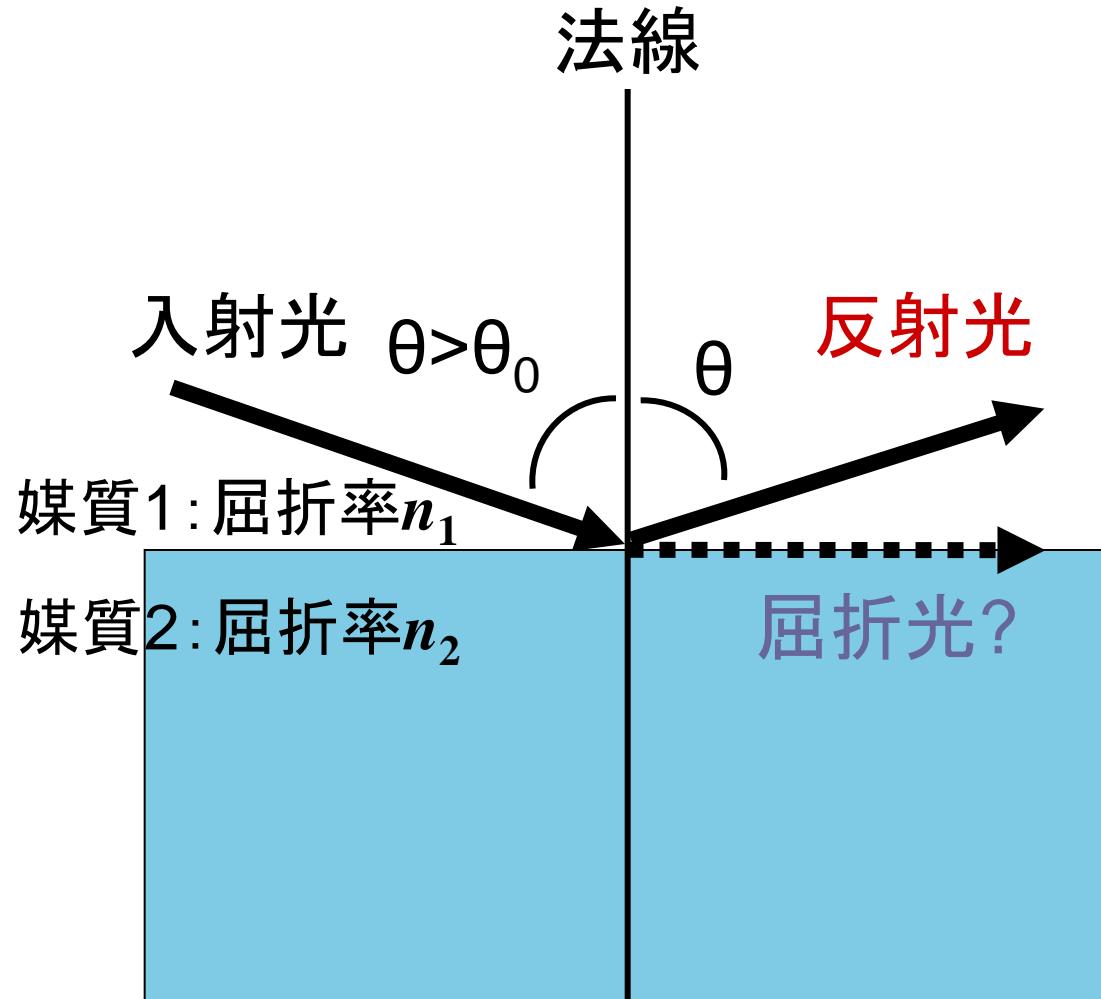
## 光を伝える媒体

- 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

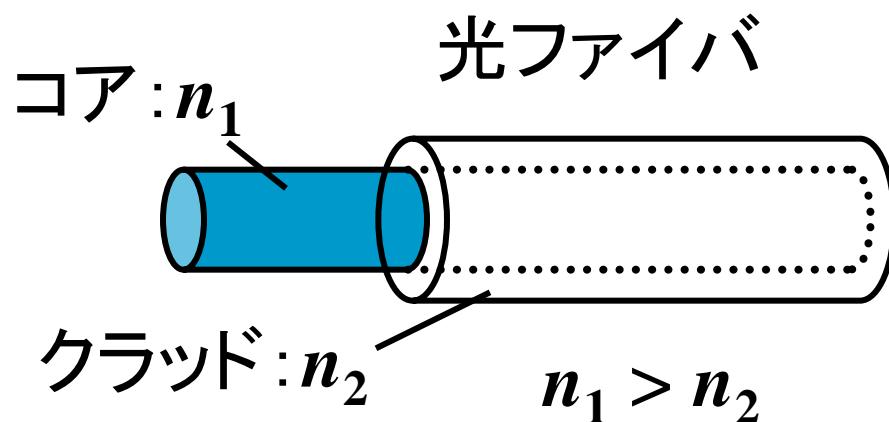
入射角が臨界角を越えるとどうなる? → 全反射



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

全反射が起こると、入射光は媒質1と2の境界で全て反射される。

## 光ファイバ中の光伝搬原理



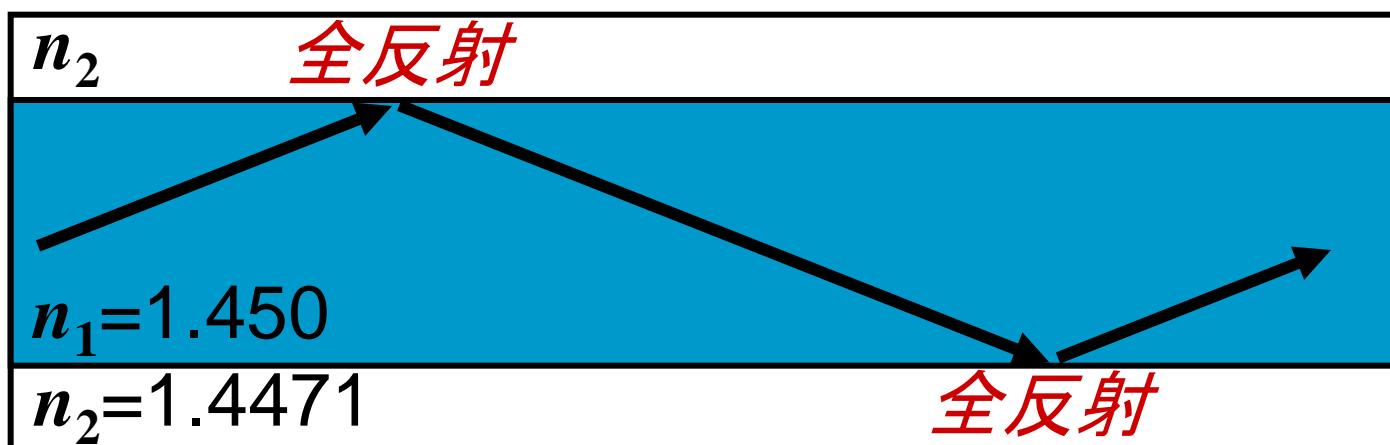
$$n_1 = 1.450$$

$$n_2 = 1.4471$$

(その差0.2%)



$$\text{臨界角 } \theta_c = 86.38^\circ$$



縦断面拡大図

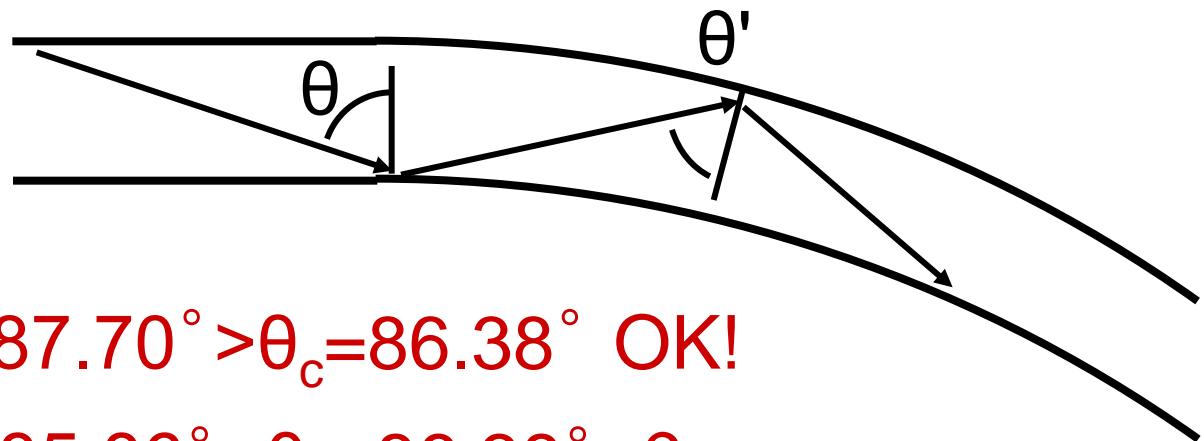
Q. 光ファイバが曲がったら全反射でなくなる？

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  $10\mu\text{m}$

$\theta=88^\circ$  の光線



$R=50\text{mm} \rightarrow \theta'=87.70^\circ > \theta_c=86.38^\circ$  OK!

$R=5\text{mm} \rightarrow \theta'=85.86^\circ < \theta_c=86.38^\circ$  ?

曲がり部分で放射 → 伝搬損失

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。

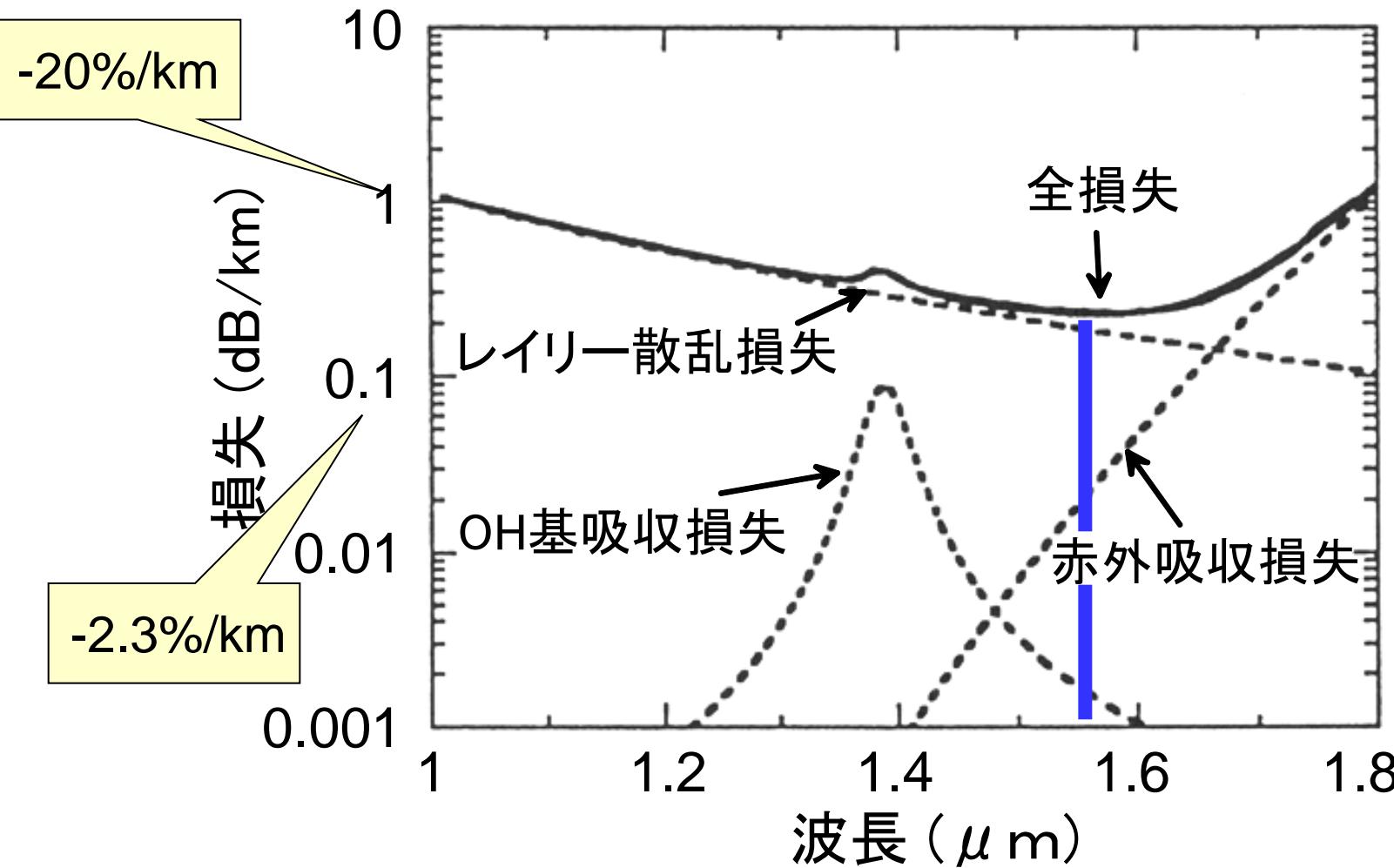
(例) 石英系ガラスファイバ：

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)

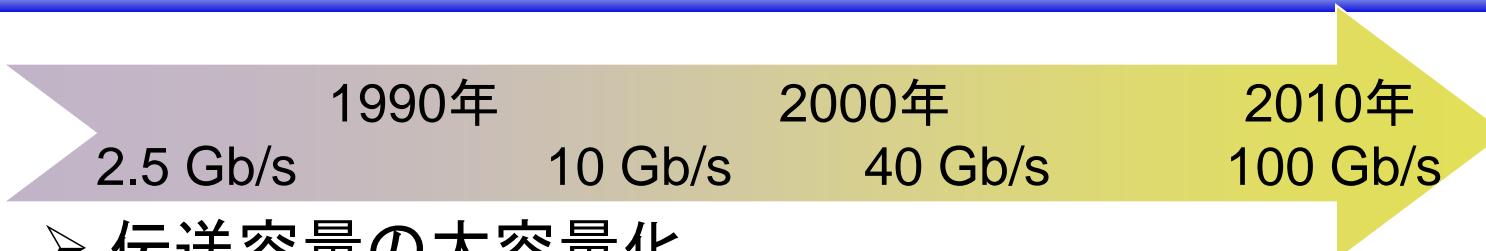
→ 散乱損失 + 吸収損失

## 石英系ガラス光ファイバの損失



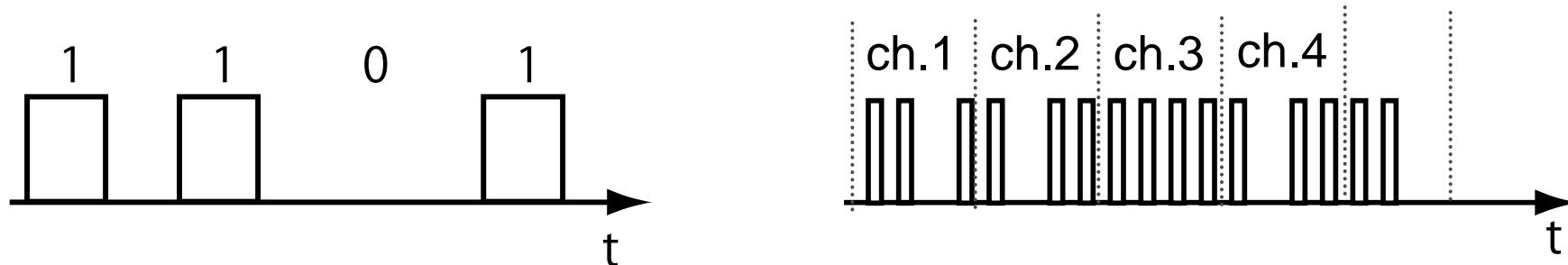
(川上、白石、大橋共著:「光ファイバとファイバ形デバイス」(培風館)から転載)

# 光ファイバ通信の研究開発



- 1990年 2.5 Gb/s
- 2000年 10 Gb/s
- 2010年 40 Gb/s
- 2010年 100 Gb/s
- 伝送容量の大容量化
  - 高ビットレート伝送
  - 多重化(時間、波長、偏波、空間)
  - 変調フォーマットの工夫
- 光ファイバ通信の適用領域の拡大
- コンポーネントの高性能化・集積化
  - 高性能化＝高速・偏波無依存・低消費電力
  - 高機能＝新しい機能、機能複合化
  - 高信頼性
  - 低価格化

- 時間多重化(単位時間当たりの伝送ビット数増大)

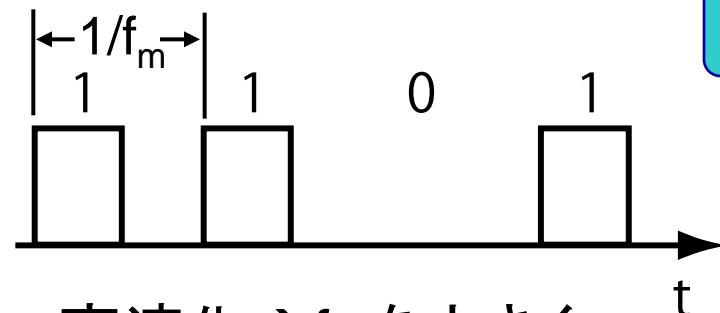


時間多重化 → 単位時間当たりの伝送ビット数増大  
→ パルス周期短縮

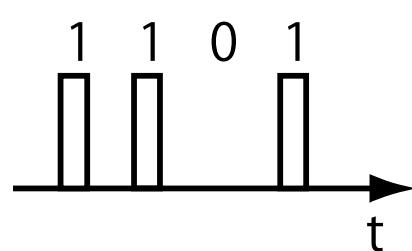
- ✓ 変調によるスペクトル拡がり → 光ファイバの波長分散(波長によって伝搬速度が異なる)
- ✓ 狹パルス幅 → 光ファイバの偏波モード分散(光の偏光方向によって伝搬速度が異なる)が顕在化
- ✓ 電気/光/電気変換の律速

# 時間多重化: 波長分散

時間波形(強度変調)

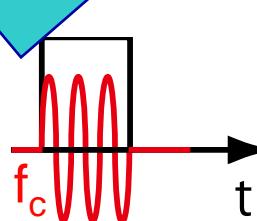


高速化  $\rightarrow f_m$  を大きく

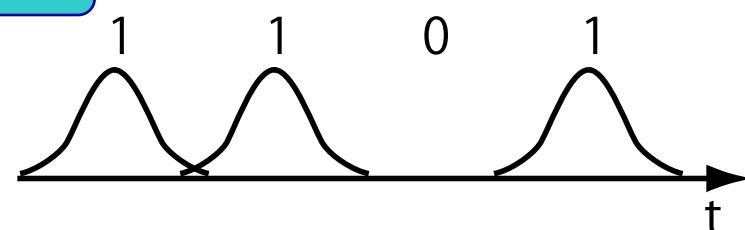


波長(周波数)成分

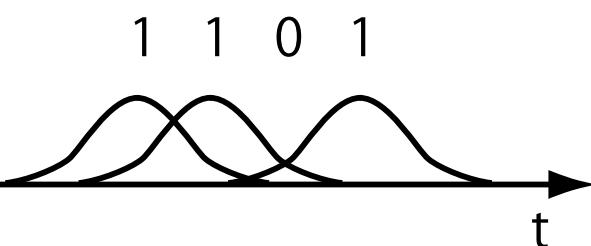
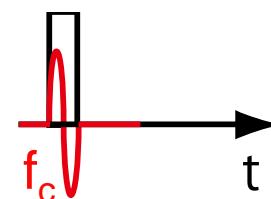
$$f_c, f_c + f_m, f_c + f_m + 2f_m, \dots$$



伝搬時間波形  
(パルス拡がり)



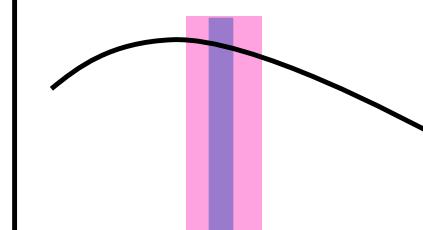
波長幅が拡がる



波長分散:

波長によってファイバ中の  
伝搬速度が異なる

群速度



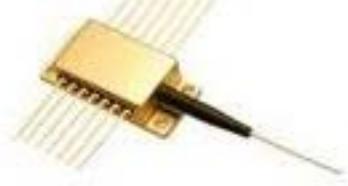
光パルスに含まれる波  
長範囲が広い

$\rightarrow$  光パルスが拡がる

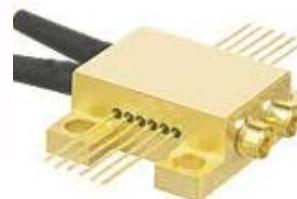
波長  $\lambda$

# 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



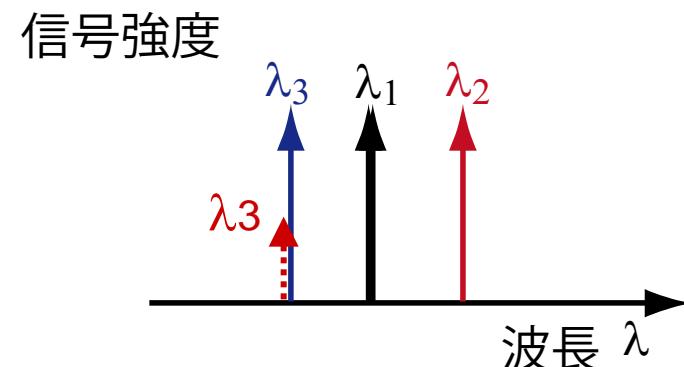
高速な電気/光、光/電気変換

source: PICOMETRIX

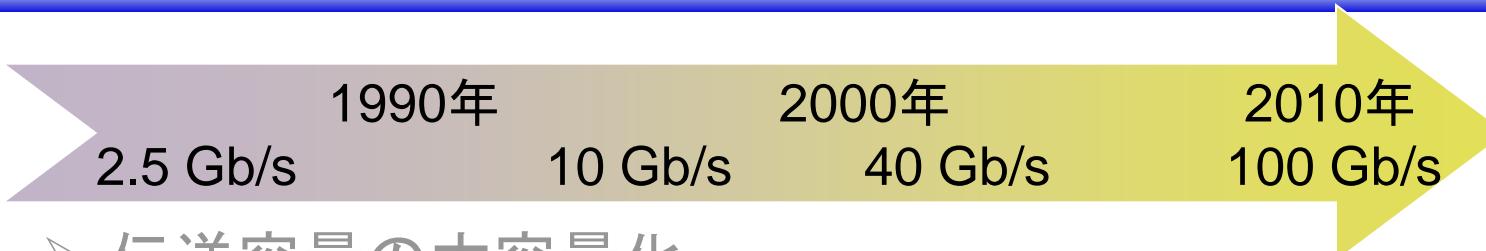
- 高速光デバイス(LD、変調器、PD)
- これらを駆動する電子デバイスの高速化が必要

# 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



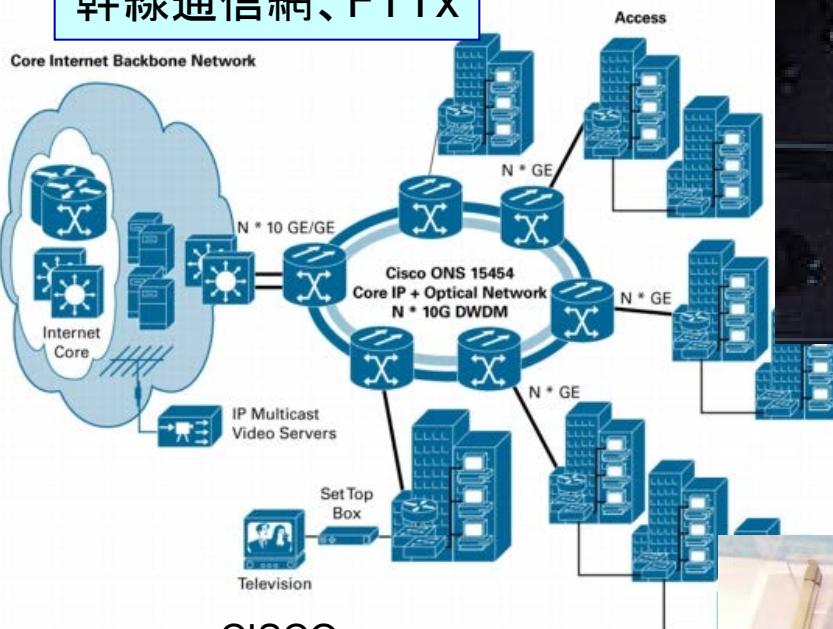
# 光ファイバ通信の研究開発



- 伝送容量の大容量化
  - 高伝送ビットレート
  - 多重化(時間、波長、偏波、空間)
  - 変調フォーマットの工夫
- 光ファイバ通信の適用領域の拡大
- コンポーネントの高性能化・集積化
  - 高性能化＝高速・偏波無依存・低消費電力
  - 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



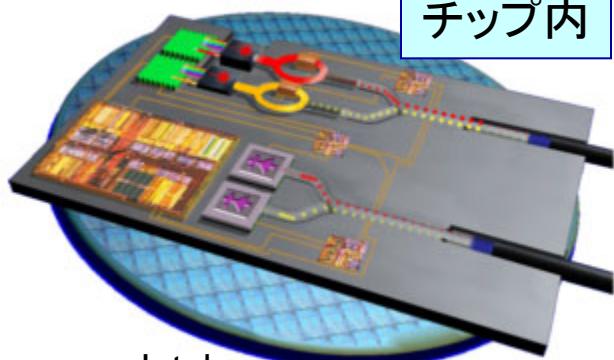
機器間

ボード間

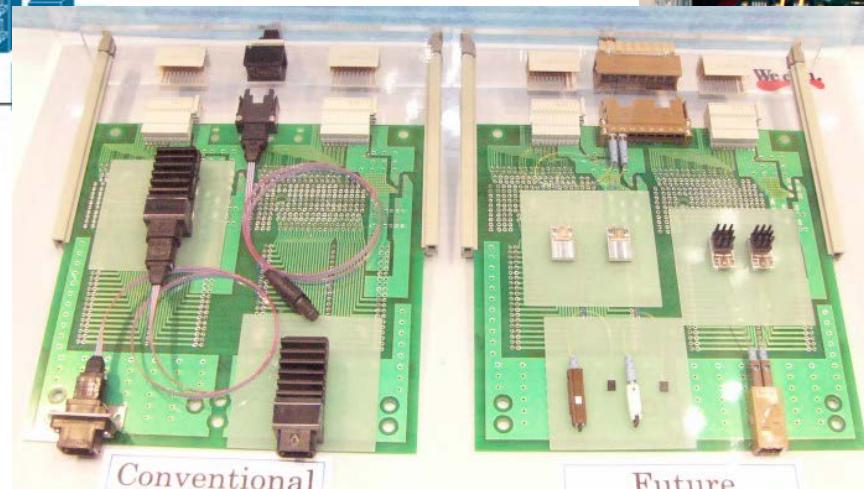


source: SPIE

チップ内

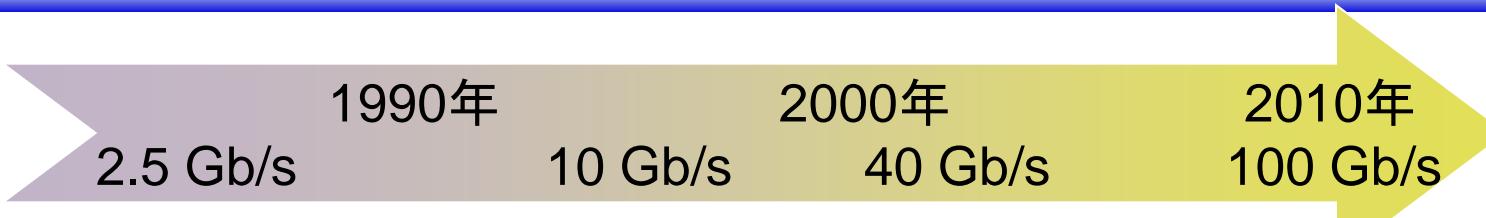


source: Intel



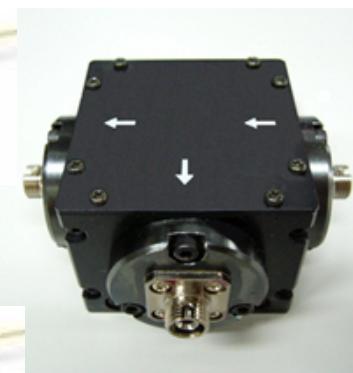
Future  
source: 日経BP

# 光ファイバ通信の研究開発

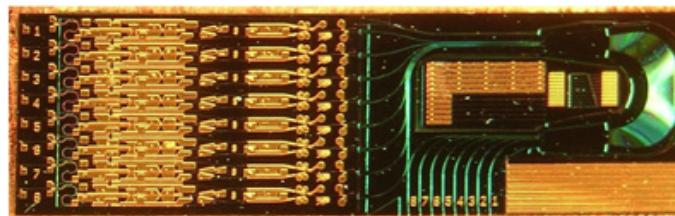


- 伝送容量の大容量化
  - 高伝送ビットレート
  - 多重化(時間、波長、偏波、空間)
  - 変調フォーマットの工夫
- 光ファイバ通信の適用領域の拡大
- コンポーネントの高性能化・集積化
  - 高性能化＝高速・偏波無依存・低消費電力
  - 高機能＝新しい機能、機能複合化
  - 高信頼性
  - 低価格化

# 光集積回路



source: ESST

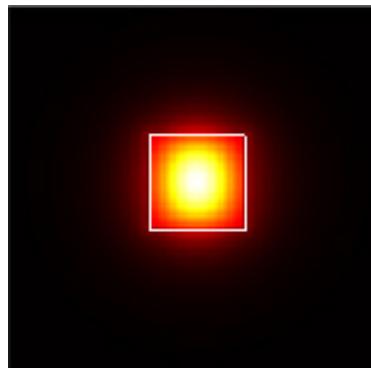


source: UCSB

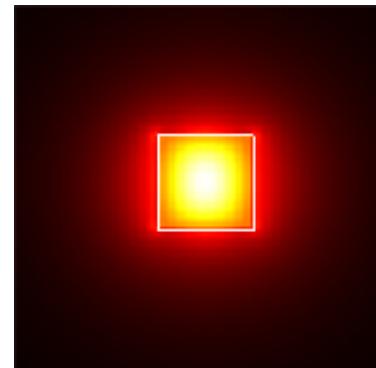
# 光導波路

光集積回路の基本構成要素は光導波路

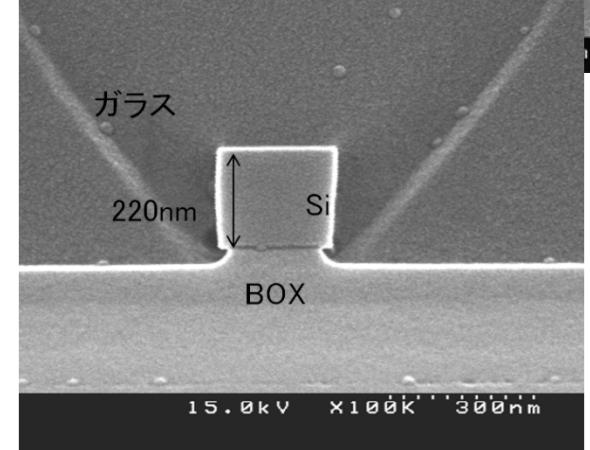
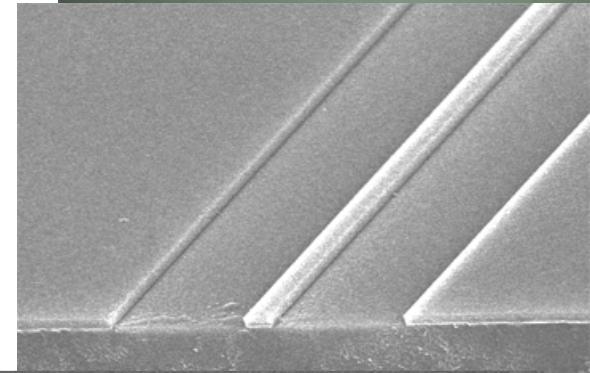
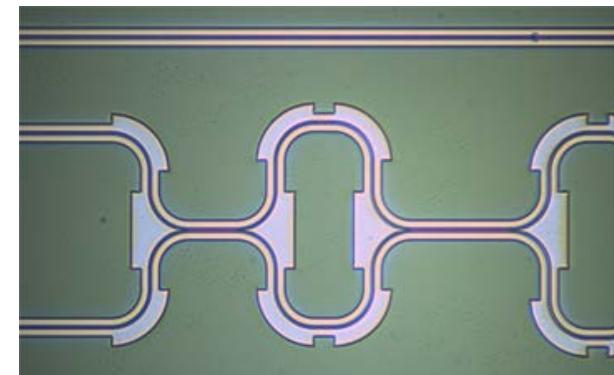
- 高屈折率材料:コア
- 低屈折率材料:クラッド



波長1270 nm

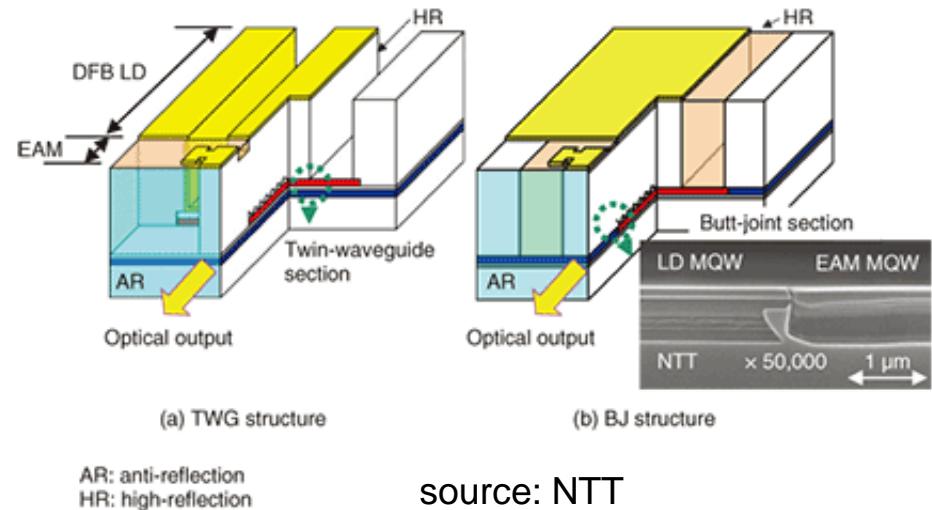


波長1550 nm

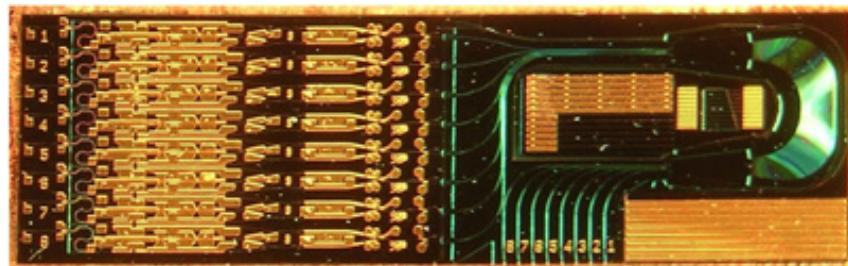


## 半導体光集積回路

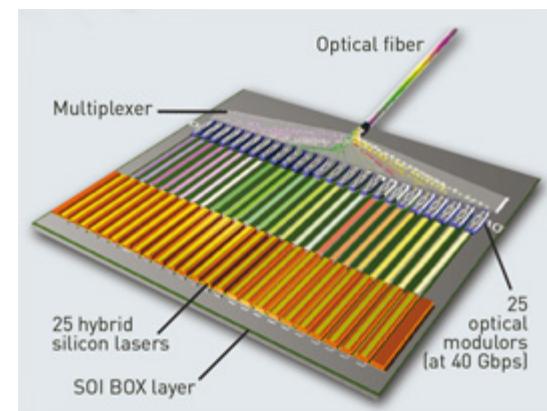
- 半導体レーザ + 光変調器
- 多波長発振半導体レーザ  
(多数のLDと結合器)
- これらの組合せデバイス



source: NTT

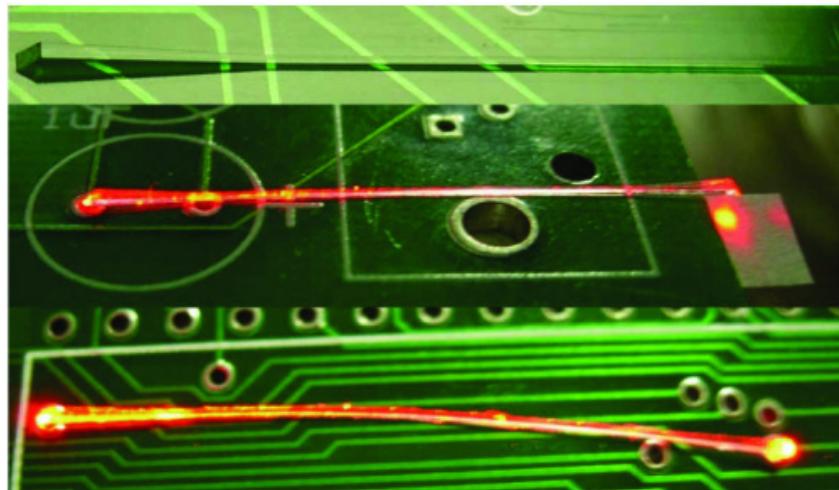


source: UCSB



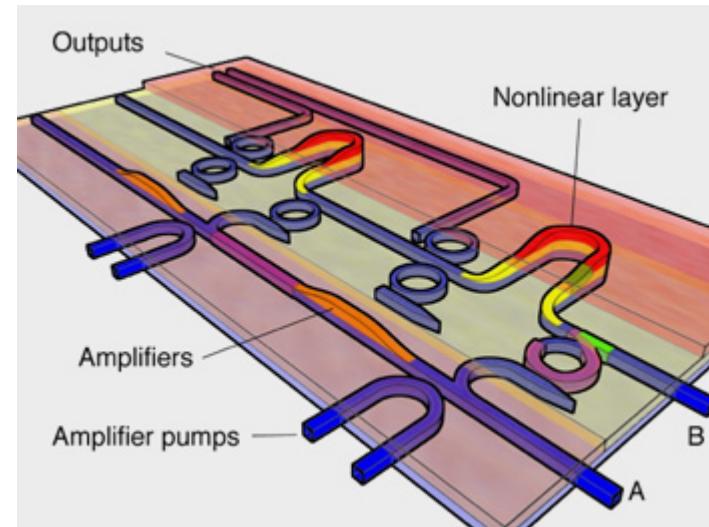
source: Intel

# 光配線



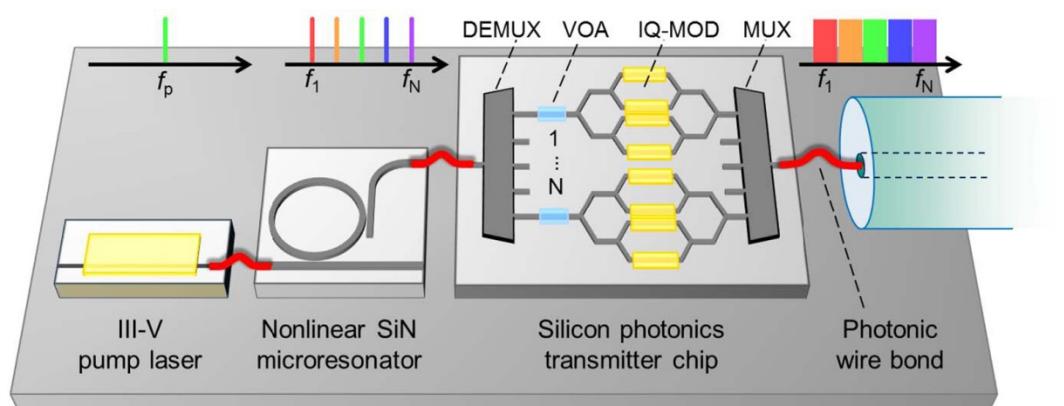
ボード上光配線

Junhao Wu, et al. *Optics Express*, Vol. 13 (16), pp. 6259-6267 (2005)



ハイブリッド集積光回路

[http://www.cudos.org.au/research/projects/hybrid\\_integration.shtml](http://www.cudos.org.au/research/projects/hybrid_integration.shtml)



チップスケールのテラビット級送信回路

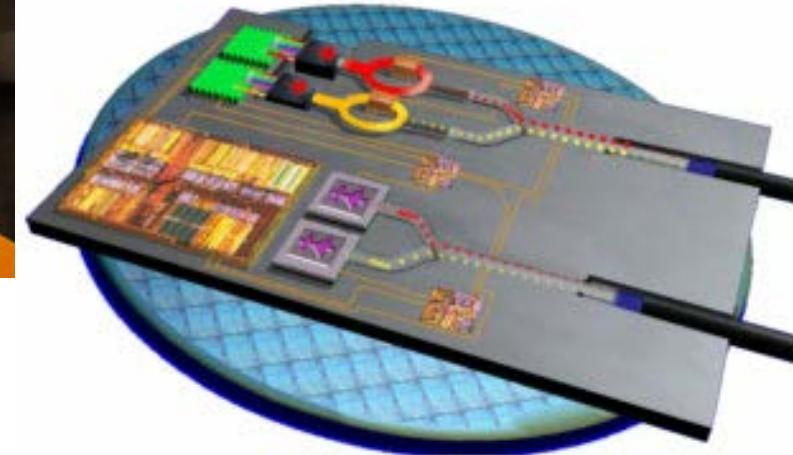
Ecole Polytechnique

<http://k-lab.epfl.ch/page-102725-en.html>

# 光配線はLSIチップの中へ

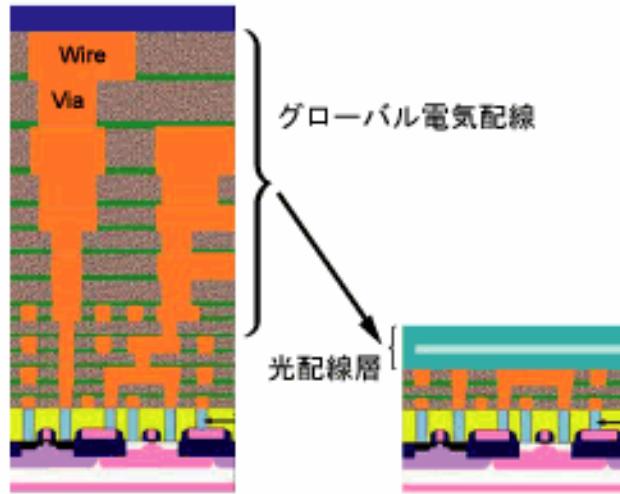
Today, optics is a niche technology.  
Tomorrow, it's the mainstream of every chip that we build.

Patrick Gelsinger, Sr. Vice President

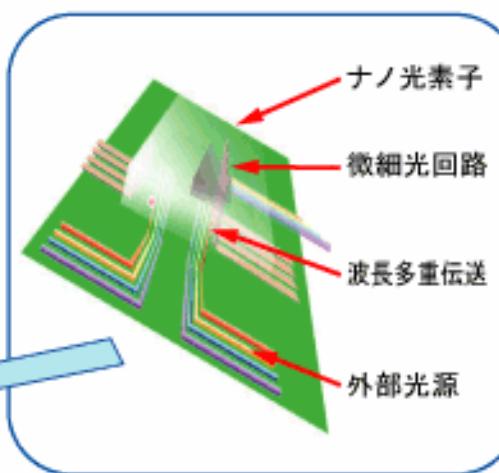
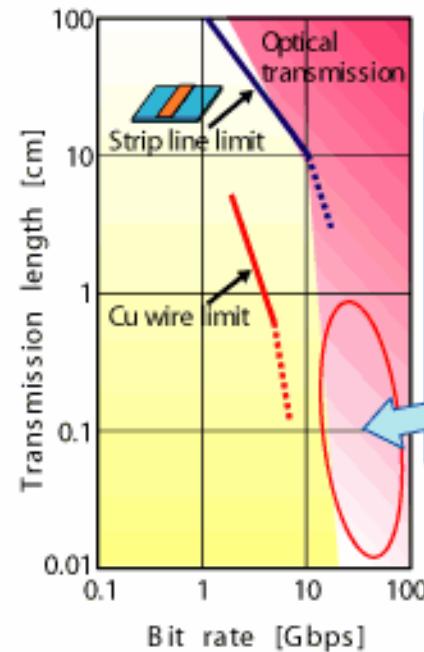


Source: Intel

半導体MIRAIプロジェクト  
[www.miraipj.jp](http://www.miraipj.jp)

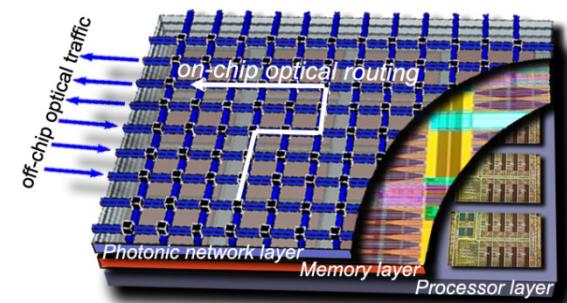


光配線によるグローバル配線の簡素化



オンチップ光配線技術の位置付けと開発要素技術

- 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

# 重要なお知らせ

## ■ 5類特別セミナー

日時：1月21日(水) 13:20～14:50

会場：デジタル多目的ホール

講師：伊賀健一前学長（面発光レーザの発明者）

題目：「電子と光と音と：光エレクトロニクスの玉手箱より」

　　講義とコントラバス演奏（ピアノ演奏：波多腰玄一）

### 【重要】

- ・1月30日(金)の電気電子基礎学の講義の代わりに、上記の5類特別セミナーを開催します。
- ・5類特別セミナーでは出席をとります。
- ・やむを得ない事情で5類特別セミナーに出席できない場合は、レポートを提出してください（詳細は後日連絡）。