

物理システム工学科3年次

# 物性工学概論

第火曜1限0031教室

第9回： 光エレクトロニクスと材料[2] 光通信と材料

副学長(工学教育部兼務)

佐藤勝昭

# 前回の問題

- Laserは何の頭文字をとったもので意味は何か
  - Light amplification by stimulated emission of radiation: 誘導放出による光増幅
- Laserのさまざまな応用はレーザーのどのような特徴を利用しているか(例示して述べよ。)
  - 高い直線性、単色性、高いエネルギー密度
- Laser動作が起きるためには、どのような条件が必要になるのか。
  - 反転分布により正味の誘導放出を実現する

# 前回の復習:レーザー

1. レーザーの歴史
2. レーザ光の特徴
3. 身の回りのレーザー
4. 自然放出と誘導放出
5. さまざまなレーザー

# レーザーの歴史

- レーザー発明のきっかけは、タウンズ、ショーローによるメーザーの発明だった。
- 彼らは、レーザーの理論的裏付けも与えた。
- 最初のレーザーの実験はメイマンによりルビーロッドを用いて成功した。
- レーザーの最初の応用はゴールドマン医師による眼科治療であった。

# レーザーの原理

- 自然放出と誘導放出
- 誘導放出の原理
- レーザーと反転分布
- 正常な分布と反転分布
- 反転分布をどう実現するか

# レーザーの原理

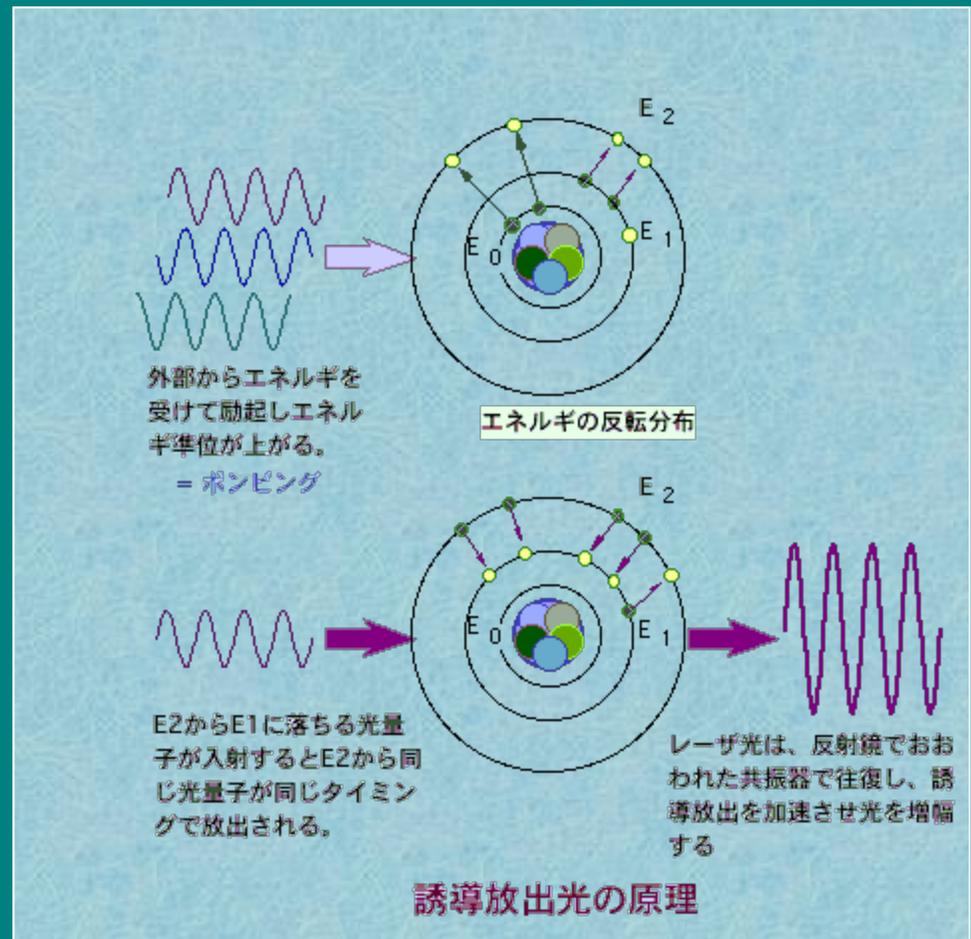
## 自然放出と誘導放出

- 自然放出(spontaneous emission): 励起状態から基底状態への緩和によって発光
- 誘導放出(stimulated emission): 光の電界を受けて励起状態から基底状態へ遷移、この逆過程は光吸収。
- 前者が後者より強ければ、正味の誘導放出が起きる。
- この現象を  
laser=light amplification by stimulated emission of radiation (誘導放出による光増幅)とよぶ

# レーザーの原理

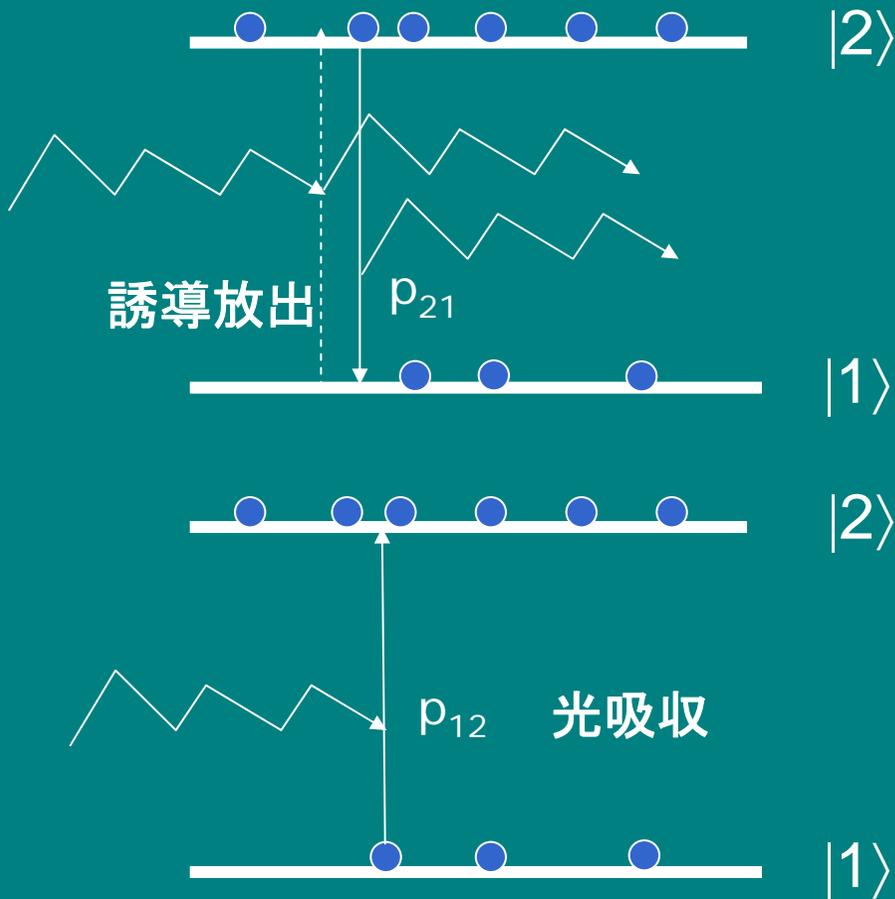
## 誘導放出の原理

- 光の吸収により励起状態に反転分布状態を作る(ポンピング)
- 光の刺激により励起状態から基底状態へ遷移が起きる



# レーザーの原理

## レーザーと反転分布

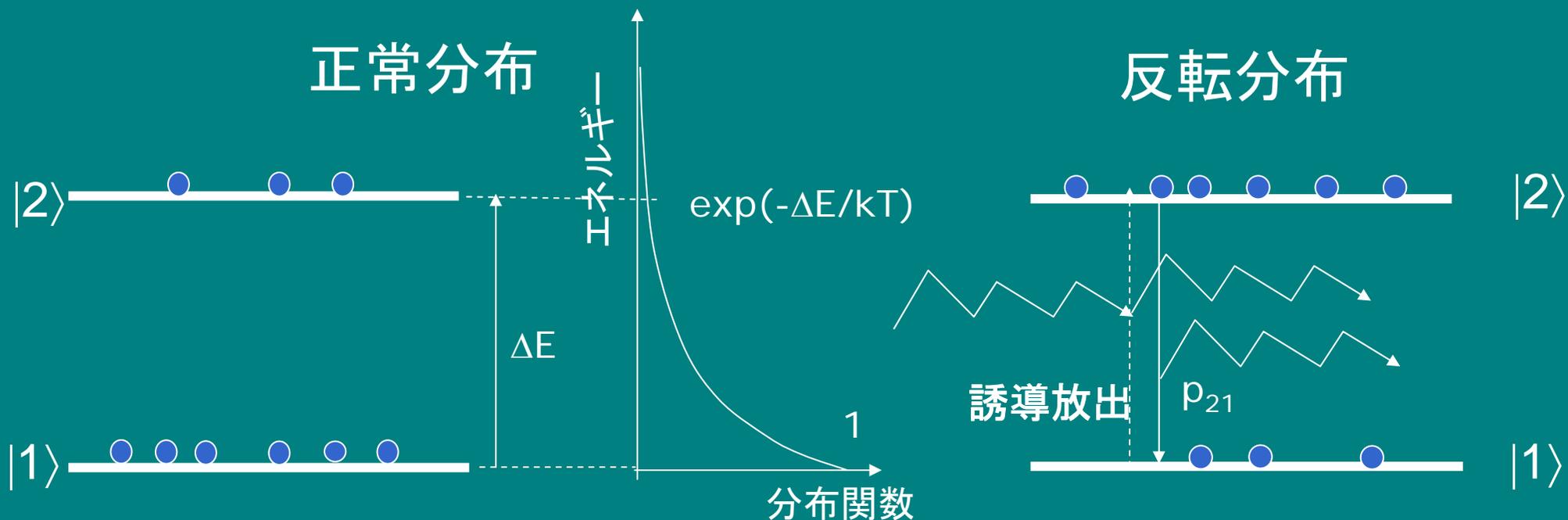


- 電界を受けて状態 $|1\rangle$ から $|2\rangle$ に遷移
- 同じ確率で状態 $|2\rangle$ から $|1\rangle$ に遷移
- $|2\rangle$ のポピュレーションが $|1\rangle$ のそれより大きいと正味の誘導放出が起きる。

# 自然放出と誘導放出

## 正常な分布と反転分布

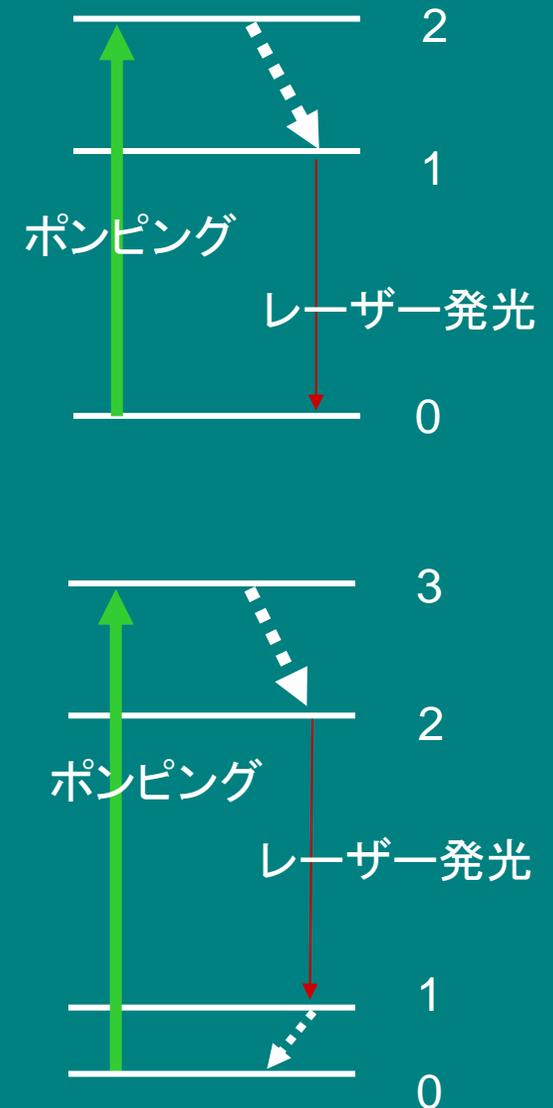
- $\Delta E$ だけ上にある準位の分布は  $\exp(-\Delta E/kT)$



# 自然放出と誘導放出

## 反転分布をどう実現するか

- 通常レーザーは3準位系と4準位系が使われる。
- 3準位レーザーの場合は熱平衡状態では原子は基底状態に多く存在するため、反転分布が作りにくい。という欠点がある。反転分布をつくるためには、強い励起を用いて、基底状態の原子の半分以上を上準位に移行させる必要がある。
- 4準位レーザーは励起すると、準位3に原子がポンピングされ、すぐに準位3に落ちてくる。また、発振後準位1に落ちてくるが、その直後準位0に戻っていく。つまり、準位1と準位2の間では、簡単に反転分布を作りやすいという特徴がある。



# この講義で学ぶこと

- 光ファイバー通信と光エレクトロニクス
- 光ファイバー通信とは？
- 光ファイバー通信用要素技術
  - 送信機：半導体レーザーについて
  - 伝送路：光ファイバーについて
  - 受信機：フォトダイオード
  - 波長多重(WDM)
  - 光増幅器：EDFAについて
  - 光アイソレータについて

# 光通信システムの進展

光ファイバ通信大容量化の進展

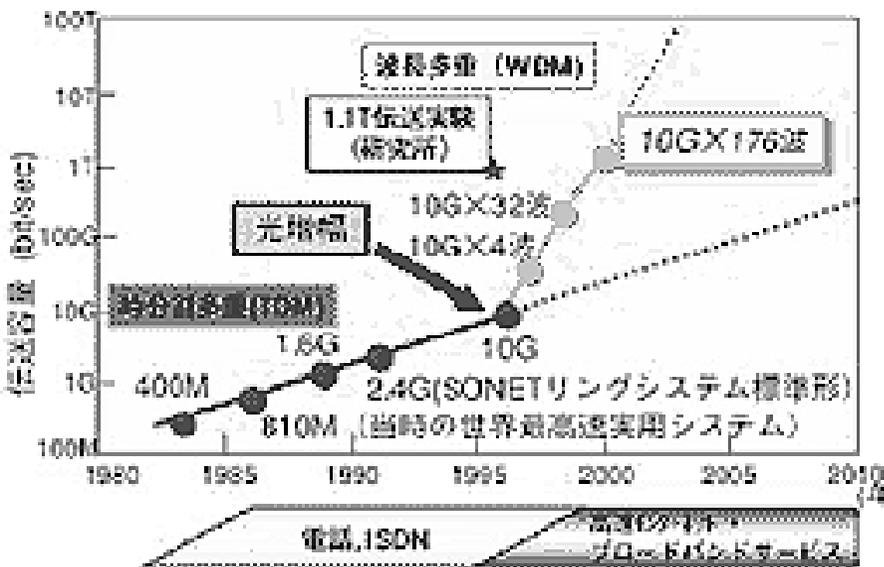
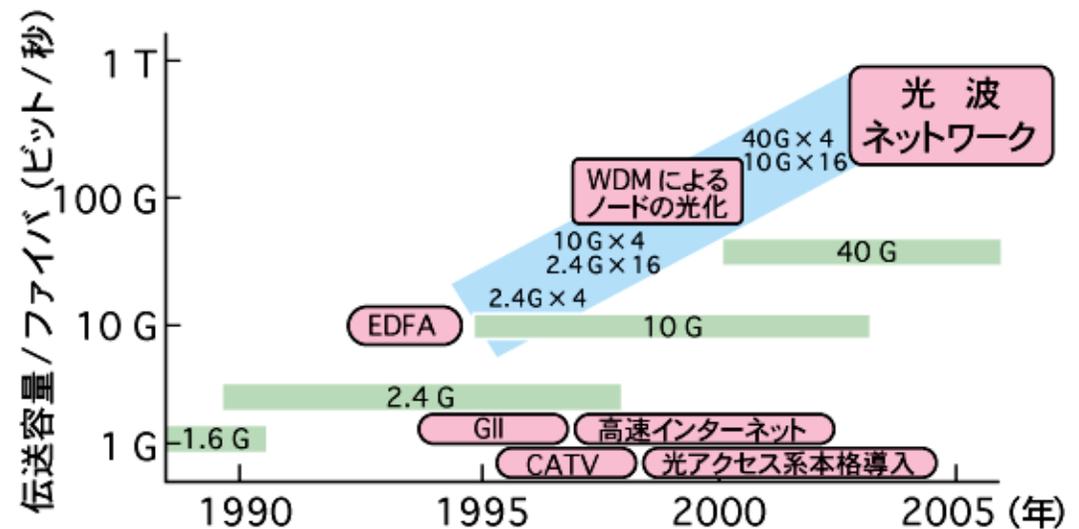


図-1 光通信システムの展開

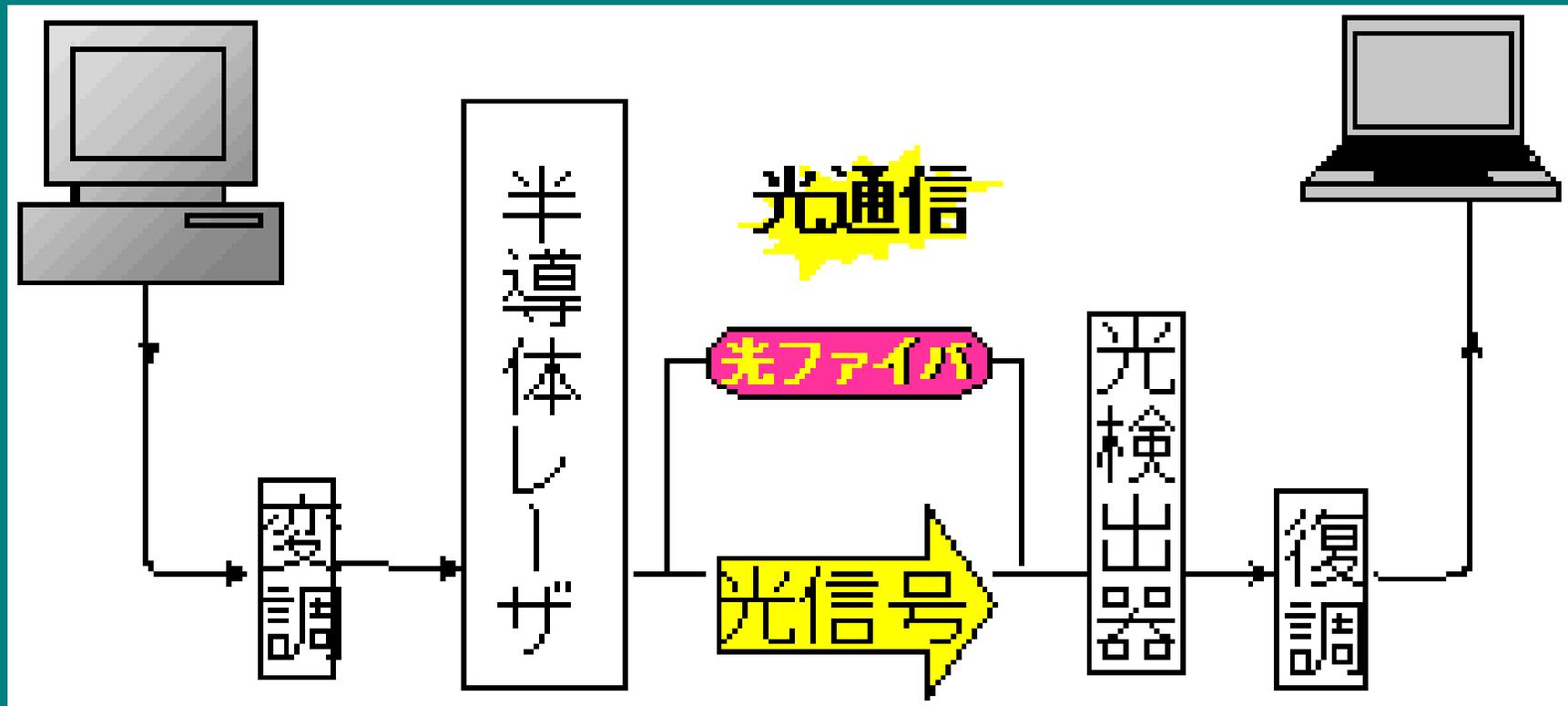


[http://www.sgkz.or.jp/nenpoh/34\\_sangyo/002.html](http://www.sgkz.or.jp/nenpoh/34_sangyo/002.html)

<http://magazine.fujitsu.com/vol48-3/6.html>

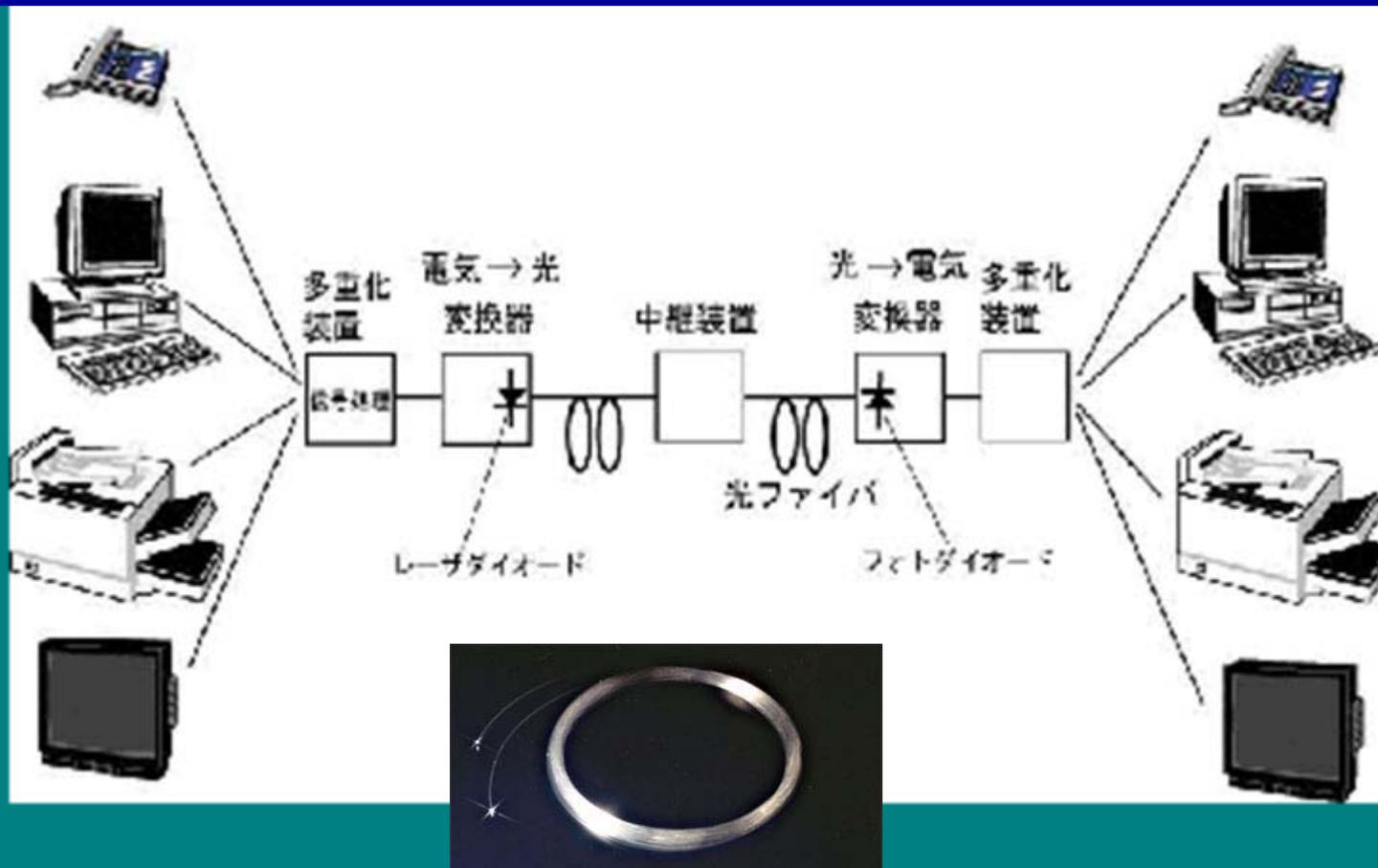
# 半導体レーザーと光通信

- 光通信の光源は半導体レーザー、電気信号を光の強弱に変えて伝送する。



# 光ファイバー通信システム

- 光ファイバー通信はどのように行われているか調べてみよう。

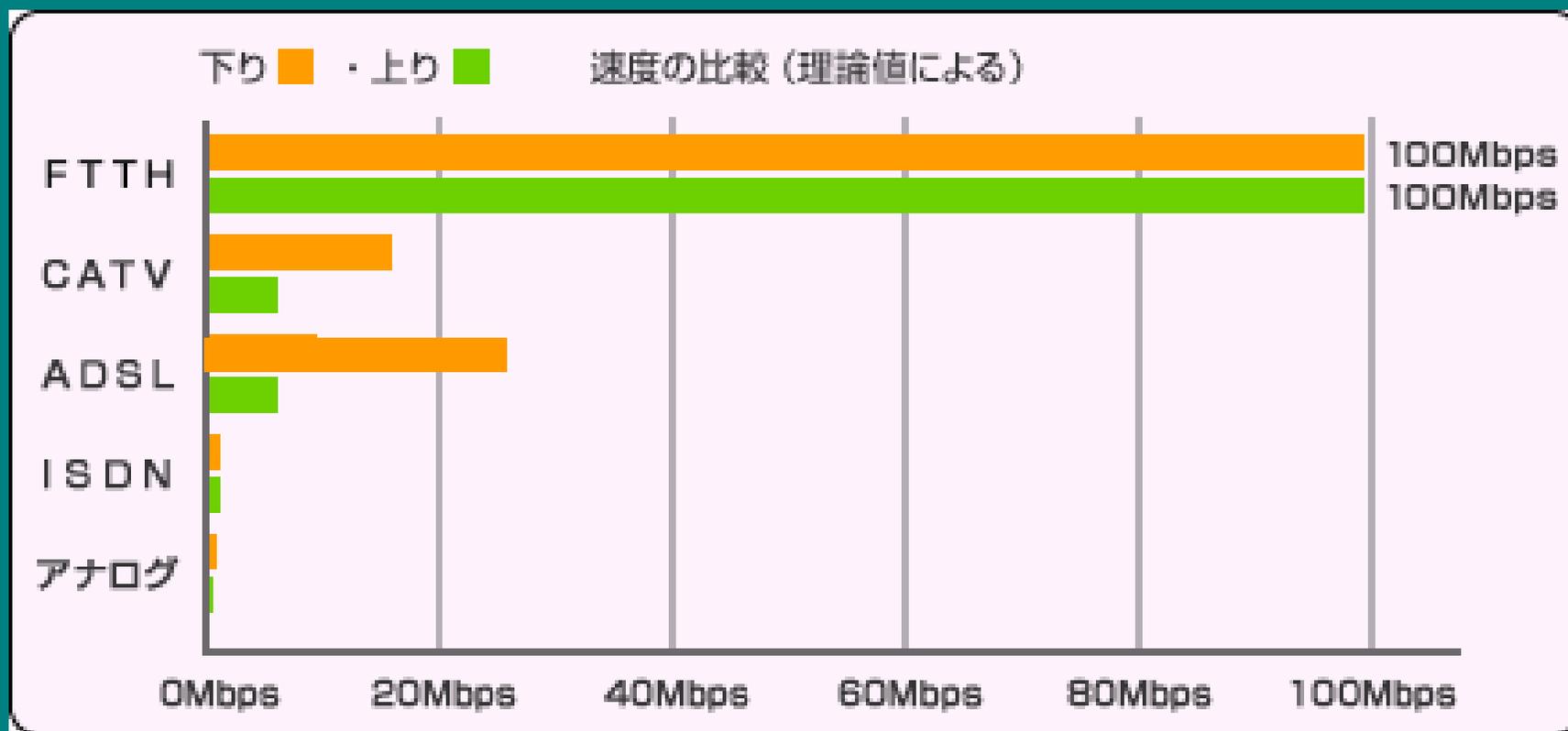


# ブロードバンドとナローバンド

- 最近、ブロードバンド(BB)という言葉が飛び交っている。ブロードバンドとナローバンドとは何か？
- ブロードバンドは広帯域、ナローバンドは狭帯域と訳される。情報を伝送するための「道の太さ」が広いか狭いかを表している。
- 道の広さは転送速度(単位bps=bit per second)で表す。通常のメタル(銅ケーブル)を用いたアナログ電話回線は56kbps、デジタル(ISDN)回線でも128kbpsです。これらはナローバンドという。
- これに対して同じメタルでも、ADSL(非対称デジタル加入者線)は下り1.5Mbps、上り512kbpsとなっておりブロードバンドといえる。
- 光ファイバーFTTH (fiber to the home)では、上下線とも100Mbpsなので、ADSLの67倍の早さである。

# 光ファイバーはBBの主演

- FTTHはアナログモデムの1790倍の100Mbit=13MBの情報量を1sに転送できる。
- CD一枚(約640MB)のダウンロードは約1分



# QUIZ1

- 日本とアメリカの距離を1万kmとして光ファイバー通信で信号が伝達する時間を計算せよ。ただし、屈折率を1.5と仮定する。
- 静止衛星の地上高度は35,000kmである。衛星経由で信号が到達するのにどれだけ時間がかかるか。

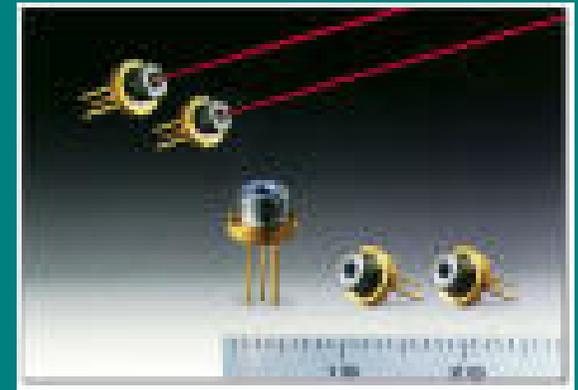
# 光通信の要素技術

- 光源：半導体レーザー(LD=laser diode)
  - pn接合, DH構造, DFB構造, 高速化
- 線路：光ファイバー
  - 全反射, レーリー散乱, 分子振動
- 光検出器：フォトダイオード(PD)
  - アバランシェ型(APD)
- 中継器：ファイバーアンプ(EDFA)
- 光制御器：アイソレータ、アッテネータ、サーキュレータ

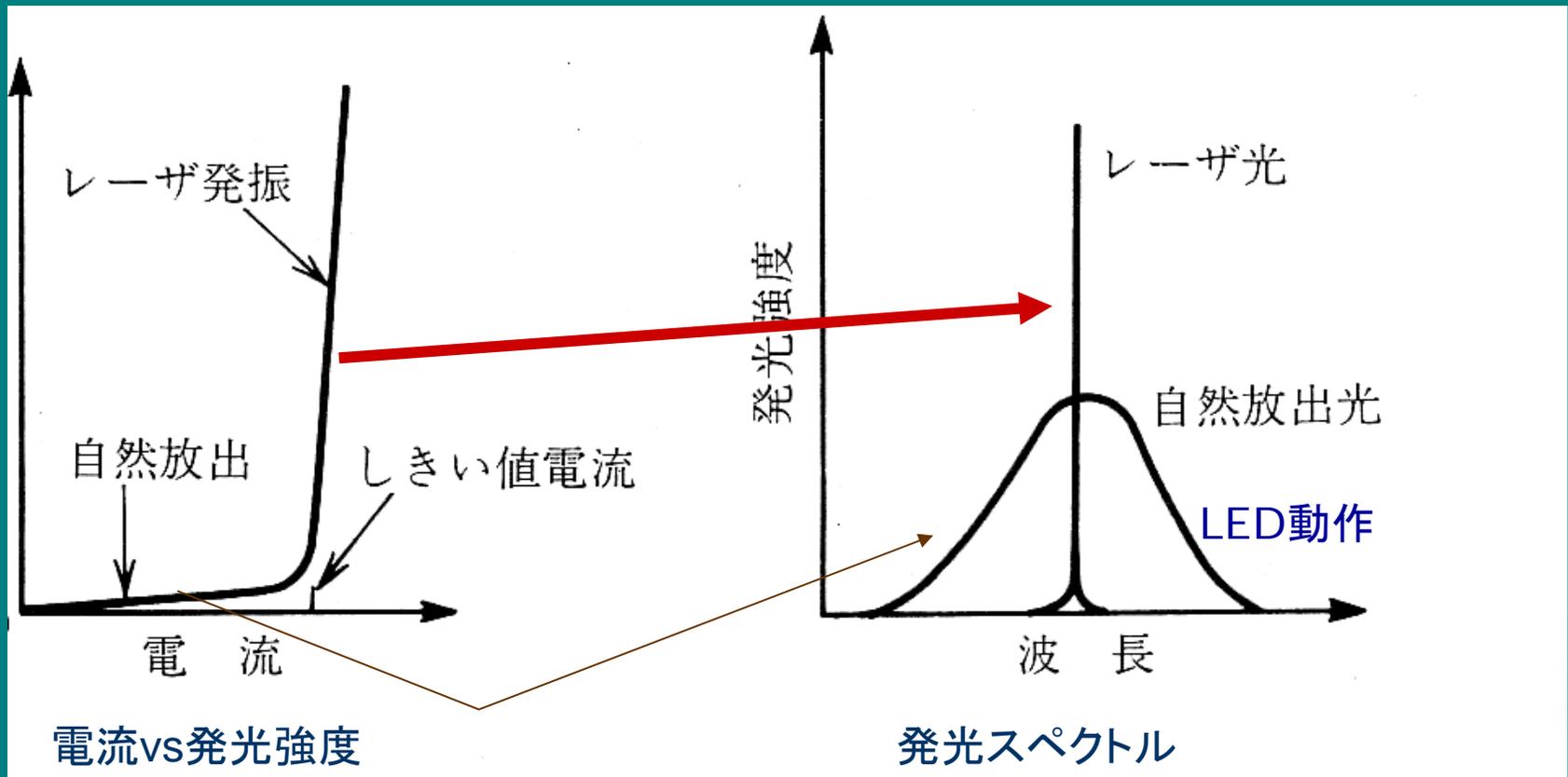
## 要素技術

# 半導体レーザー LD (laser diode)

- LED構造において、劈開面を用いたキャビティ構造を用いるとともに、ダブルヘテロ構造により、光とキャリアを活性層に閉じ込め、反転分布を作る。
- DFB構造をとることで特定の波長のみを選択している。



# 半導体レーザーの動作特性



# 半導体レーザーの材料

- 光通信帯用:  $1.5 \mu\text{m}$ ; GaInAsSb, InGaAsP
- CD用: 780nm GaAs
- DVD用: 650nm GaAlAs MQW
- 次世代DVD用: 405nm InGaN

バルク基板にMOVPE、MBEなど気相成長によって薄膜をエピタキシャル成長している。

MOVPE: metal-organic vapor phase epitaxy  
MBE: molecular beam epitaxy

# エピタキシャル成長

- エピタキシャル成長とは、単結晶基板上に結晶方位が揃った単結晶の薄膜を成長させる方法のことである。
- エピタキシで得られる薄膜結晶は、バルクの結晶に比べ結晶性、純度ともに優れており、また極めて薄い結晶膜や複雑な多層の結晶構造を作り出せることから、特に化合物半導体の分野では不可欠な技術となっている。
- 原料物質の形態、成長に利用する原理により、気相エピタキシ、液相エピタキシ、分子線エピタキシなどの手法がある。

# ホモ接合とダブルヘテロ構造

- 活性層(GaAs)をバンドギャップの広い材料でサンドイッチ:ダブルヘテロ(DH)構造

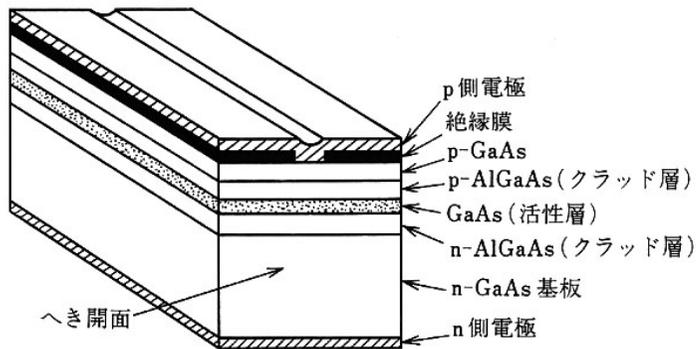
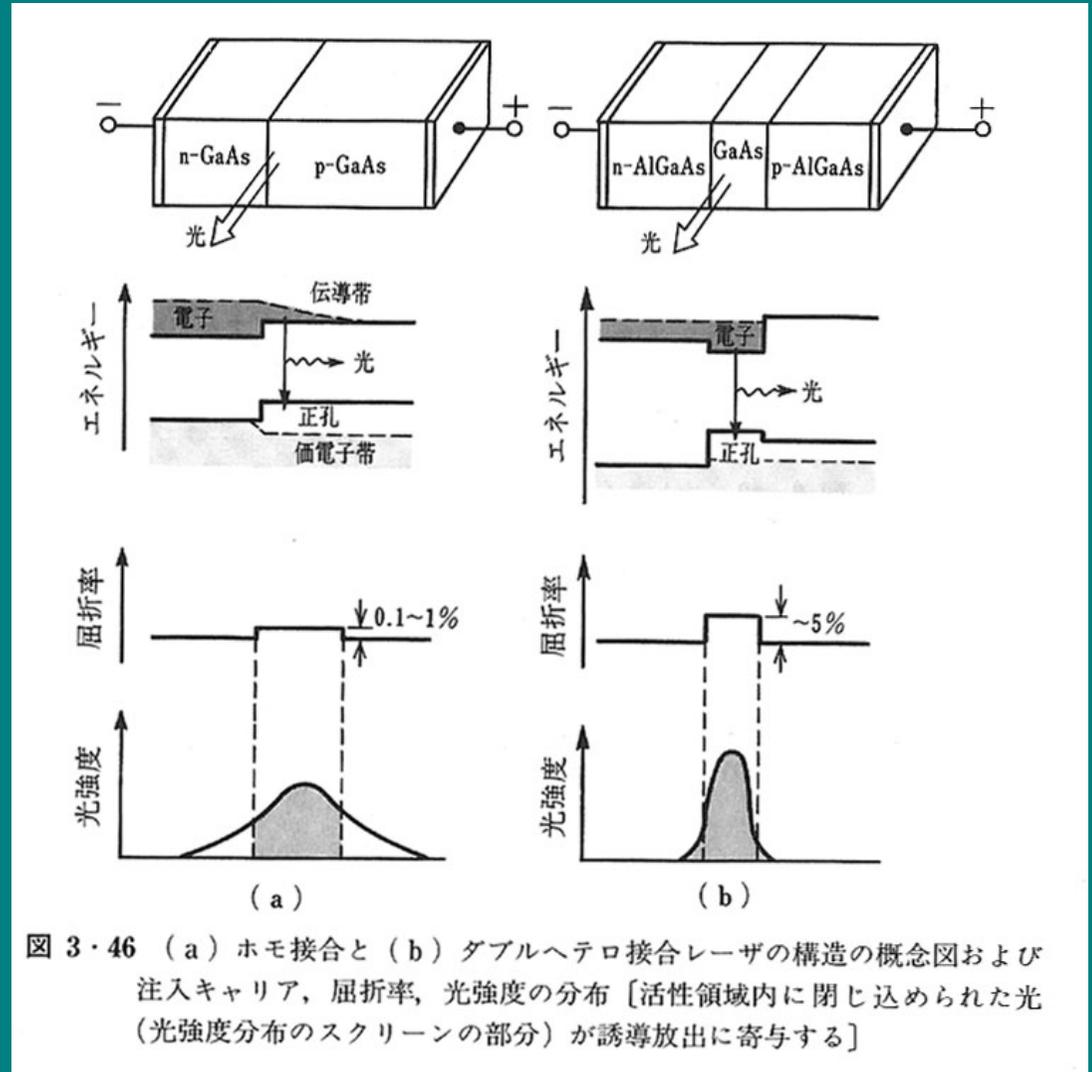


図 3・48 ストライプ形ダブルヘテロ接合レーザー



# DHレーザー

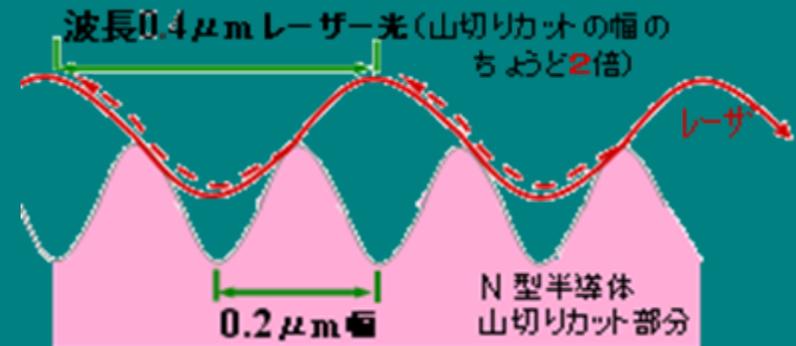
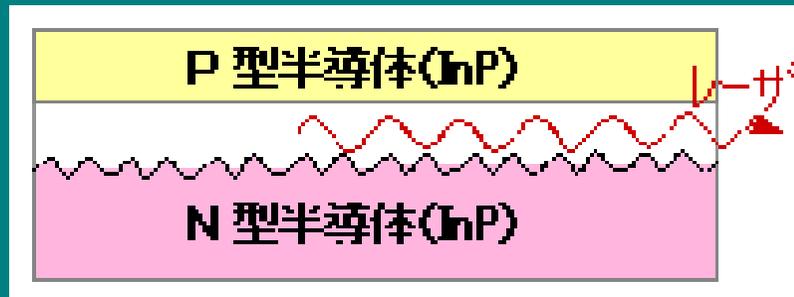
- 光とキャリアの閉じこめ
  - バンドギャップの小さな半導体をバンドギャップの大きな半導体でサンドイッチ: 高い濃度の電子・ホール活性層に閉じこめ
  - 屈折率の高い半導体(バンドギャップ小)を屈折率の低い半導体(バンドギャップ大)でサンドイッチ: 全反射による光の閉じこめ



DHレーザーを発明した  
Alferov博士と故林巖雄  
博士

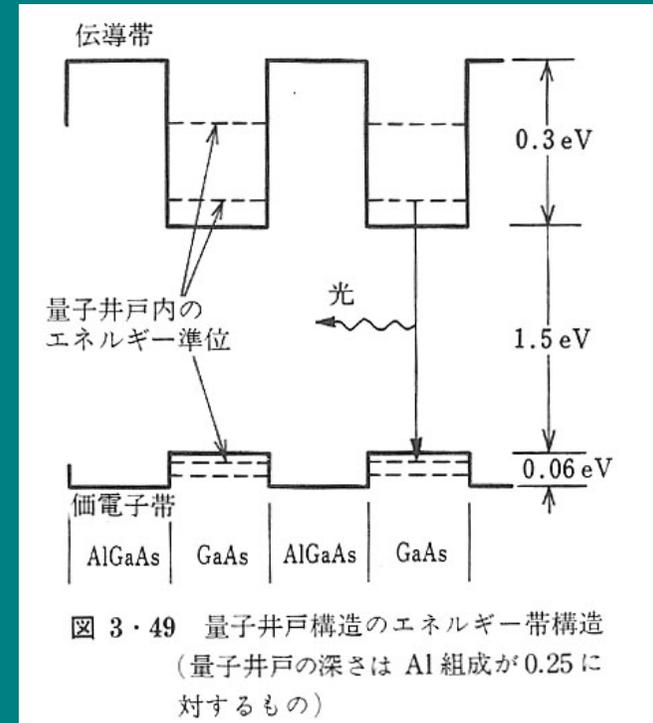
# DFBレーザー

- 1波長の光しかでないレーザー。つまり、通信時に信号の波がずれることがないので、高速・遠距離通信が可能。
- (通信速度: Gb/s = 1秒間に10億回の光を点滅する。電話を1度に約2万本通話させることができます)



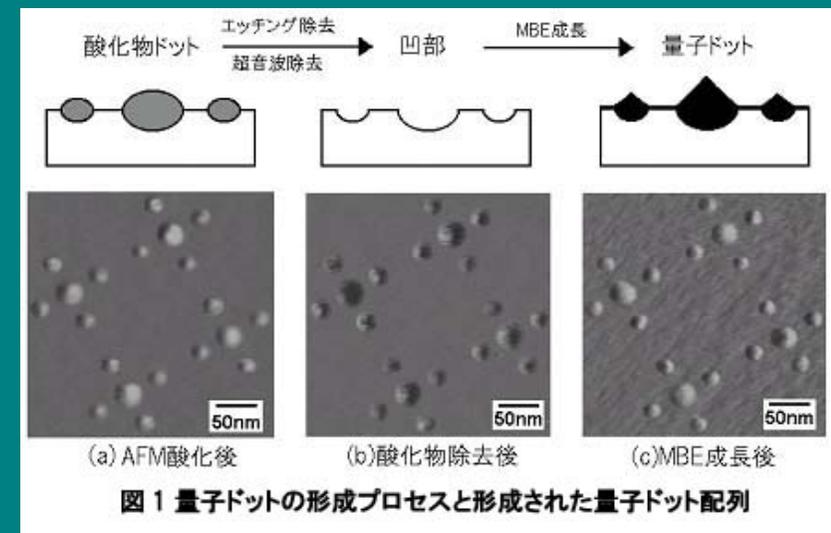
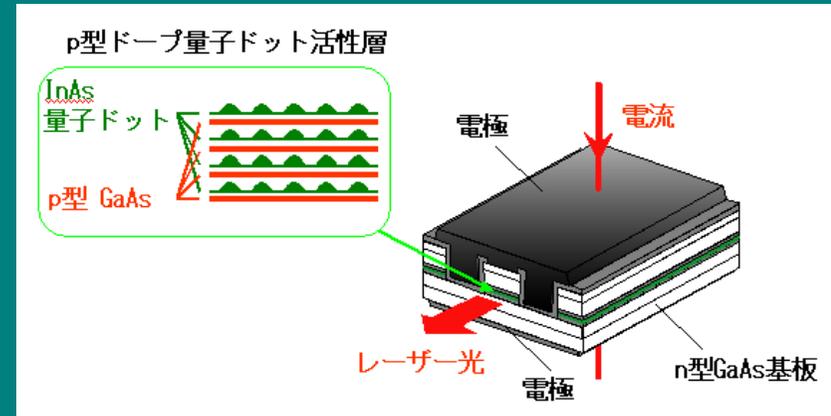
# 量子井戸レーザー

- 厚みが1nm程度のGaAsとAlGaAsを交互に積層した人工格子構造のバンド構造は図のようになり、1次元の量子井戸(QW)を形成する。量子井戸内には離散的なエネルギー準位ができる。
- 量子井戸レーザーは、しきい値電流が低く、しきい値電流の温度依存性が小さい、利得スペクトル幅が狭い、レーザーの偏光度が高い、パルス応答性が優れているなどの特徴をもつ。



# 量子ドットレーザー

- 量子ドットレーザーでは活性層に、量子ドットが縦横に並んだ量子ドットアレイ(quantum dot array)を用いている。量子ドットでは空間的に同じ場所に電子と正孔が閉じ込められるため、一対の正孔と電子が効率よく再結合を行うことができる。
- なお、一対の電子と正孔の再結合では光子が一つしか発生しないため、活性層では量子ドットがたくさん並んだアレイ構造になっている。



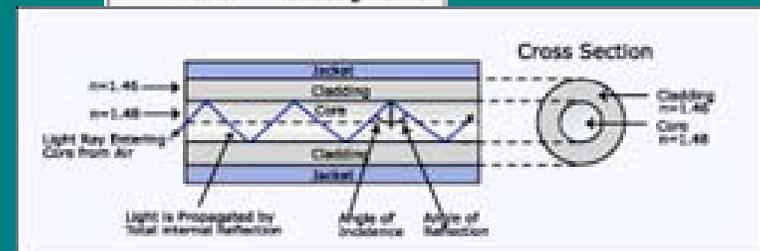
# 実用化されたQDレーザー

- 東京大学と富士通株式会社は、量子ドットを用い、従来の半導体レーザーでは不可能であった、温度による光出力特性の変化を抑制した量子ドットレーザーの開発に成功した。
- 開発した量子ドットレーザーは、温度による光出力の変動が非常に小さく、レーザーの駆動電流を調整することなく、 $20^{\circ}\text{C}$ から $70^{\circ}\text{C}$ の範囲で、毎秒10ギガビットの高速動作を実現した。

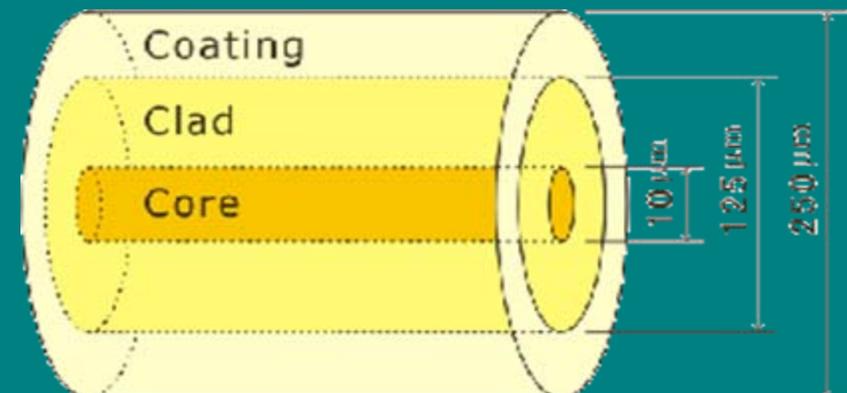
# 要素技術

## 光ファイバー

- 材料: 熔融石英(fused silica  $\text{SiO}_2$ )
- 構造: 同心円状にコア層、クラッド層、保護層を配置
- 光はコア層を全反射によって長距離にわたり低損失で伝搬



<http://www.miragesofttech.com/ofc.htm>

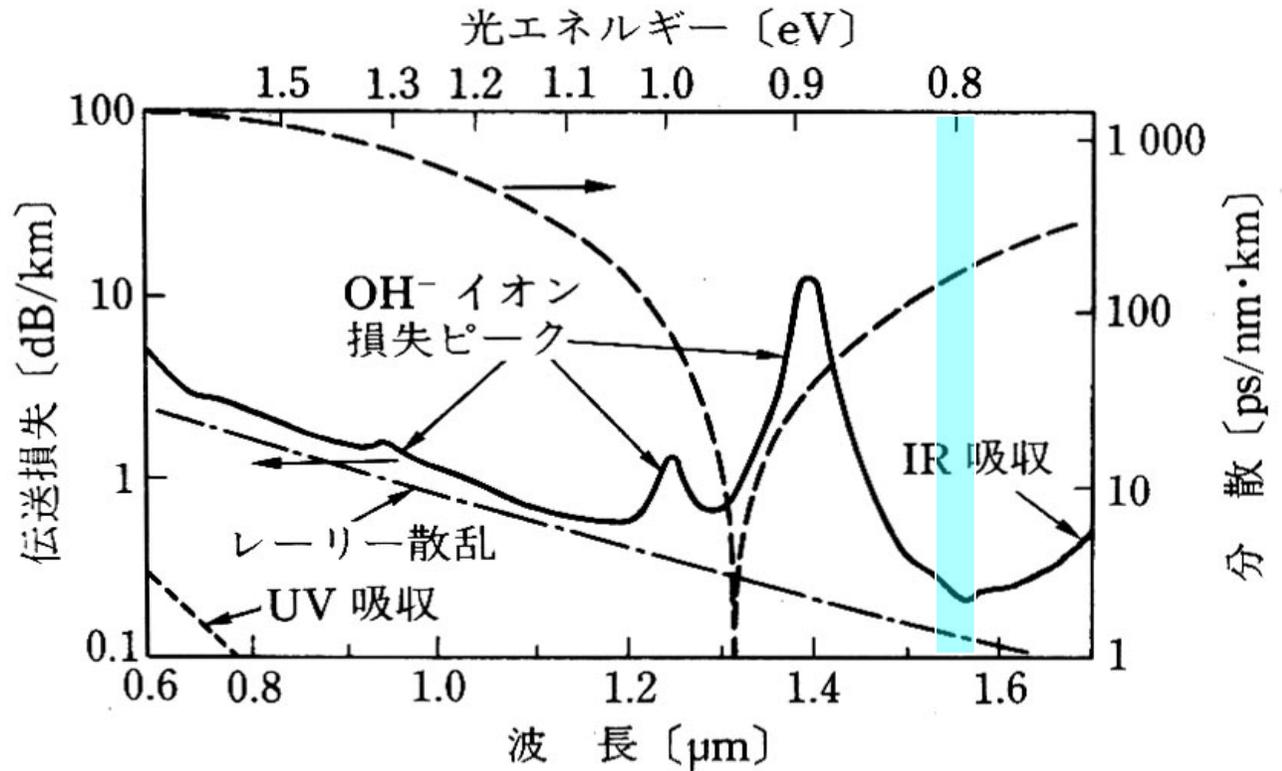


東工大影山研HPより



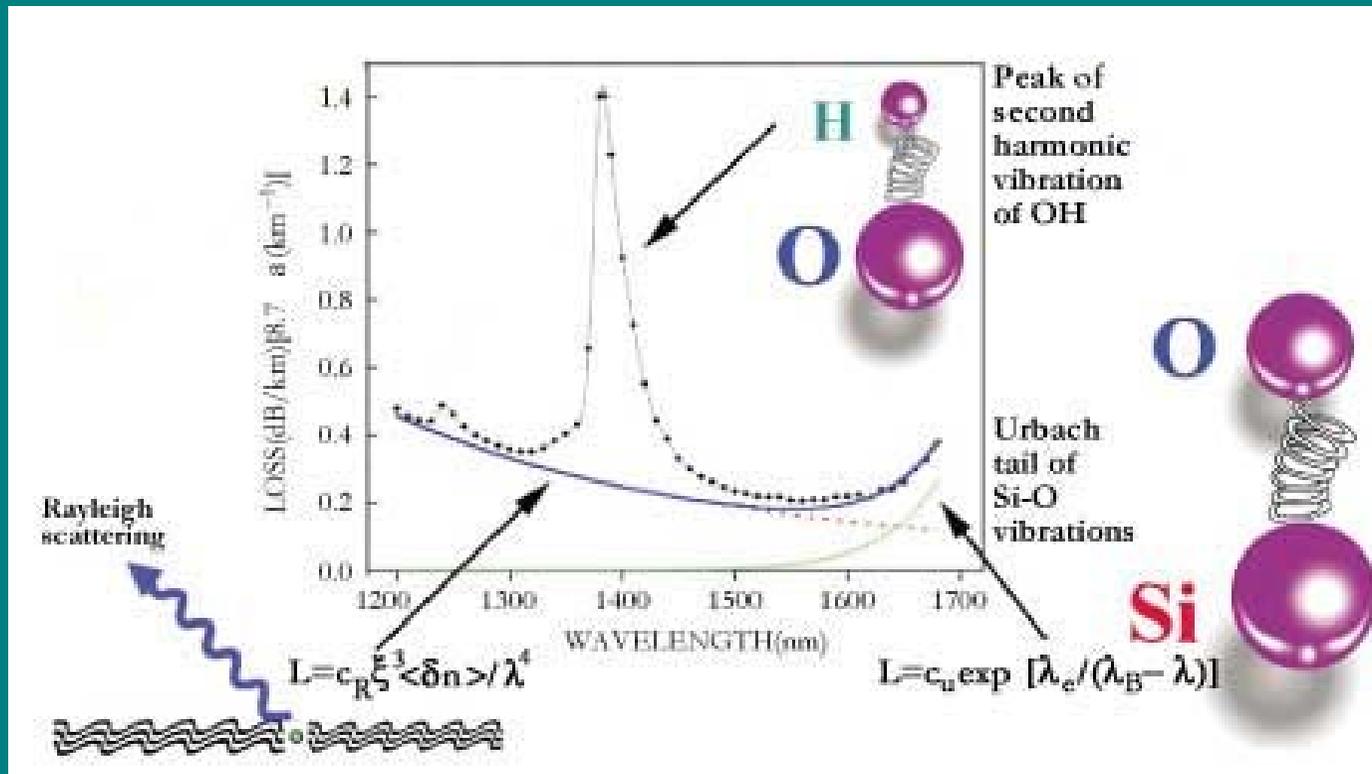
# 光ファイバーの伝搬損失

- 短波長側の伝送損失はレーリー散乱
- 長波長側の伝送損失は分子振動による**赤外吸収**
- 1.4  $\mu\text{m}$ 付近の損失はOHの分子振動による



超低損失光ファイバの伝送損失および分散特性

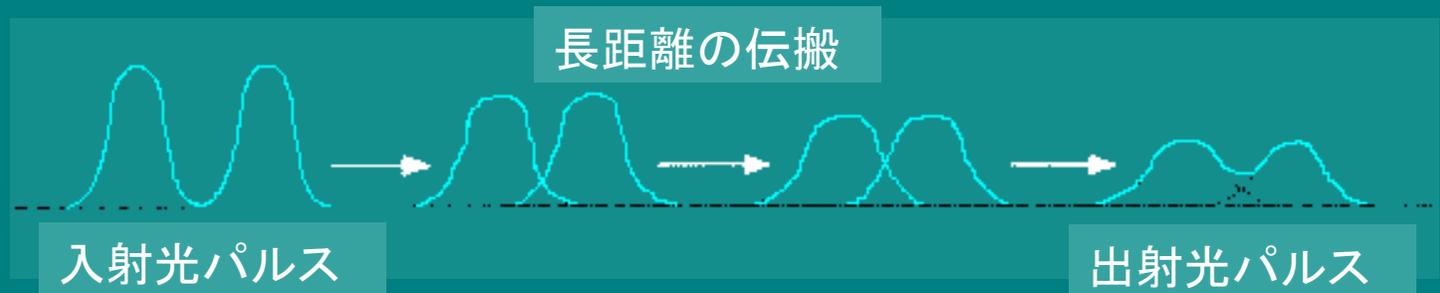
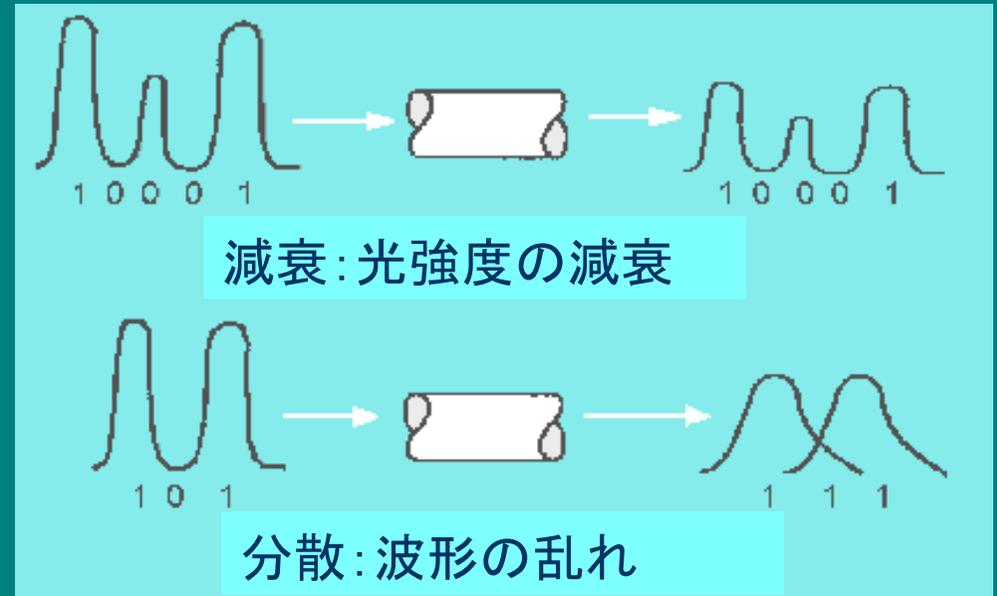
# 光ファイバーの伝搬損失



Physics Today Onlineによる  
<http://www.aip.org/pt/vol-53/iss-9/captions/p30cap1.html>

# 光ファイバーの減衰と分散

- 減衰: 光強度の減衰
- 分散: 波形の乱れ



# QUIZ2

- 屈折率1.5のコアと屈折率1.3のクラッドを考えたときの臨界角を求めよ。
- 実際の系では、屈折率の違いは1%程度である。屈折率1.4のコアと1.38のクラッドの場合はどうか
- 低損失ファイバーの減衰は0.2dB/kmである。東京から富士山まで約100kmとして、光強度はもとの何%になるか。ここではpowerの損失に対するdBの定義 $\text{dB}=10\log(I_0/I)$ を使って下さい。

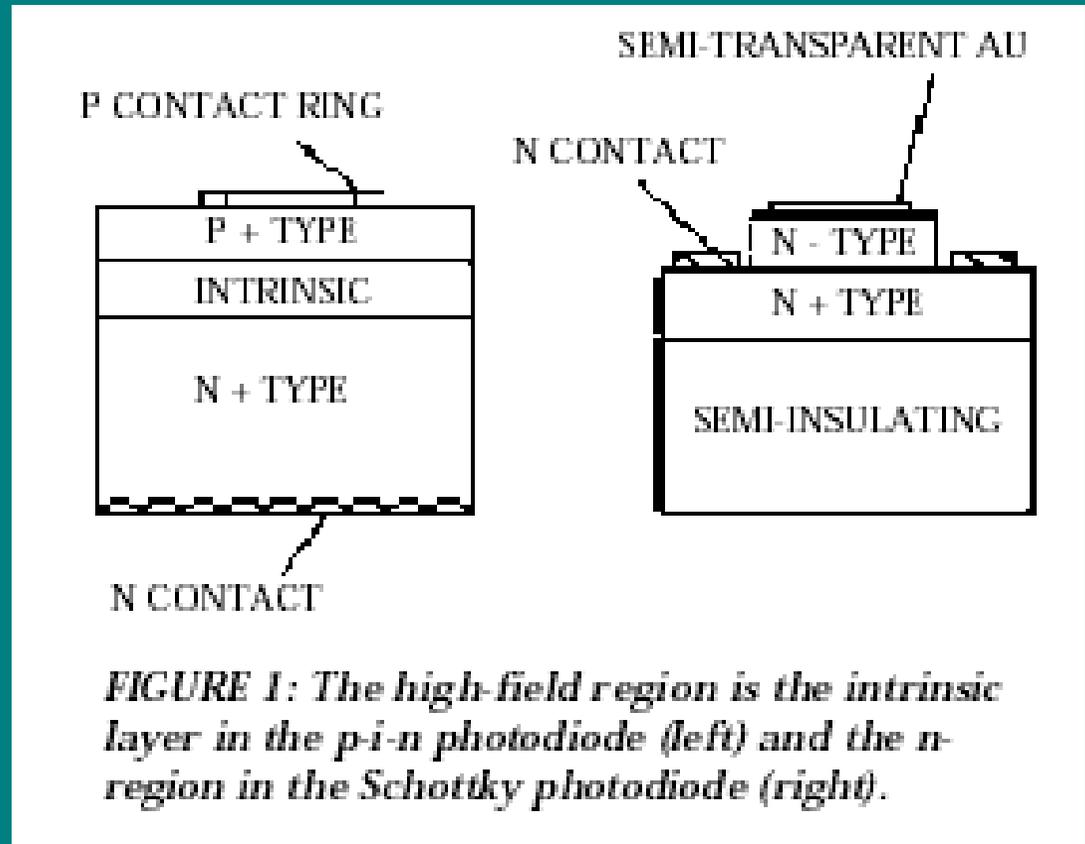
## 要素技術

# 光検出

- フォトダイオードを用いる
- 高速応答の光検出が必要
- pinフォトダイオードまたはショットキー接合フォトダイオードが使われる。(注:ショットキー接合:金属と半導体の接合)
- 通信用PDの材料としてはバンドギャップの小さなInGaAsなどが用いられる。

# 光検出器

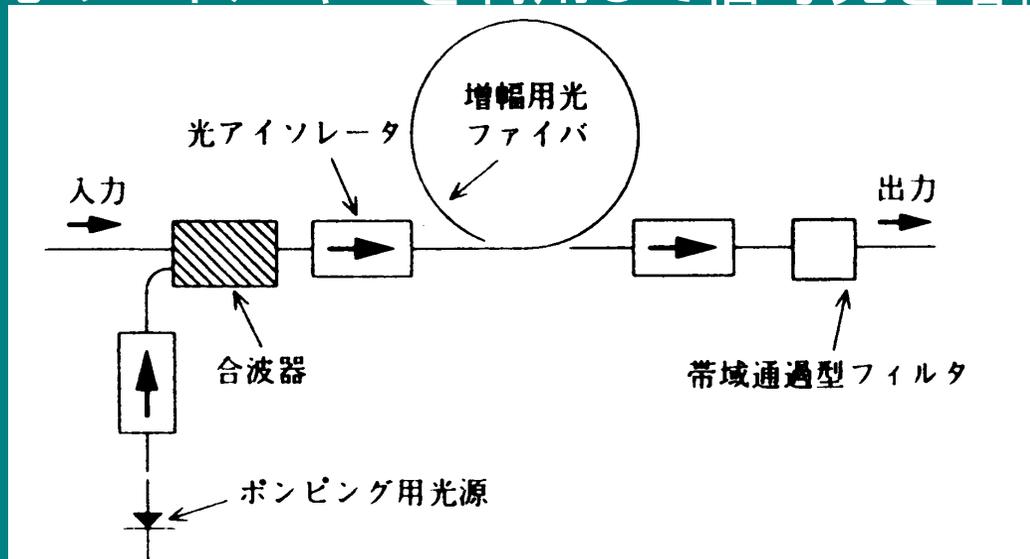
- Pin-PD
- Schottky PD
- 応答性は、空乏層をキャリアが走行する時間と静電容量で決まる。
- このため、空乏層を薄くするとともに、接合の面積を小さくしなければならない。



## 要素技術

# 光中継：ファイバーアンプ

- 光ファイバー中の光信号は100km程度の距離を伝送されると、20dB(百分の一に)減衰する。これをもとの強さに戻すために光ファイバーアンプと呼ばれる光増幅器が使われている。
- 光増幅器は、エルビウム(Er)イオンをドープした光ファイバー(EDF:Erbium Doped Fiber)と励起レーザーから構成されており、励起光といわれる強いレーザーと減衰した信号光を同時にEDF中に入れることによって、Erイオンの誘導増幅作用により励起光のエネルギーを利用して信号光を増幅することができる。



旭硝子の  
HP <http://www.agc.co.jp/news/2000/0620.html>より

# エルビウムの増幅作用

- エルビウム (Er) イオンをドープしたガラスは、980nmや1480nmの波長の光を吸収することによって1530nm付近で発光する。この発光による誘導放出現象を利用することによって光増幅が可能になる。  
具体的には、EDFに増幅用のレーザー光を注入すると、Erイオンがレーザー光のエネルギーを吸収し、エネルギーの高い状態に一旦励起され、励起された状態から元のエネルギーの低い状態に戻るときに、信号光とほぼ同じの1530nm前後の光を放出する(誘導放出現象)。信号光は、この光のエネルギーをもらって増幅される。
- Erをドープするホストガラスの組成によって、この発光の強度やスペクトル幅(帯域)が変化する。発光が広帯域であれば、光増幅できる波長域も広帯域になる。

# 要素技術5

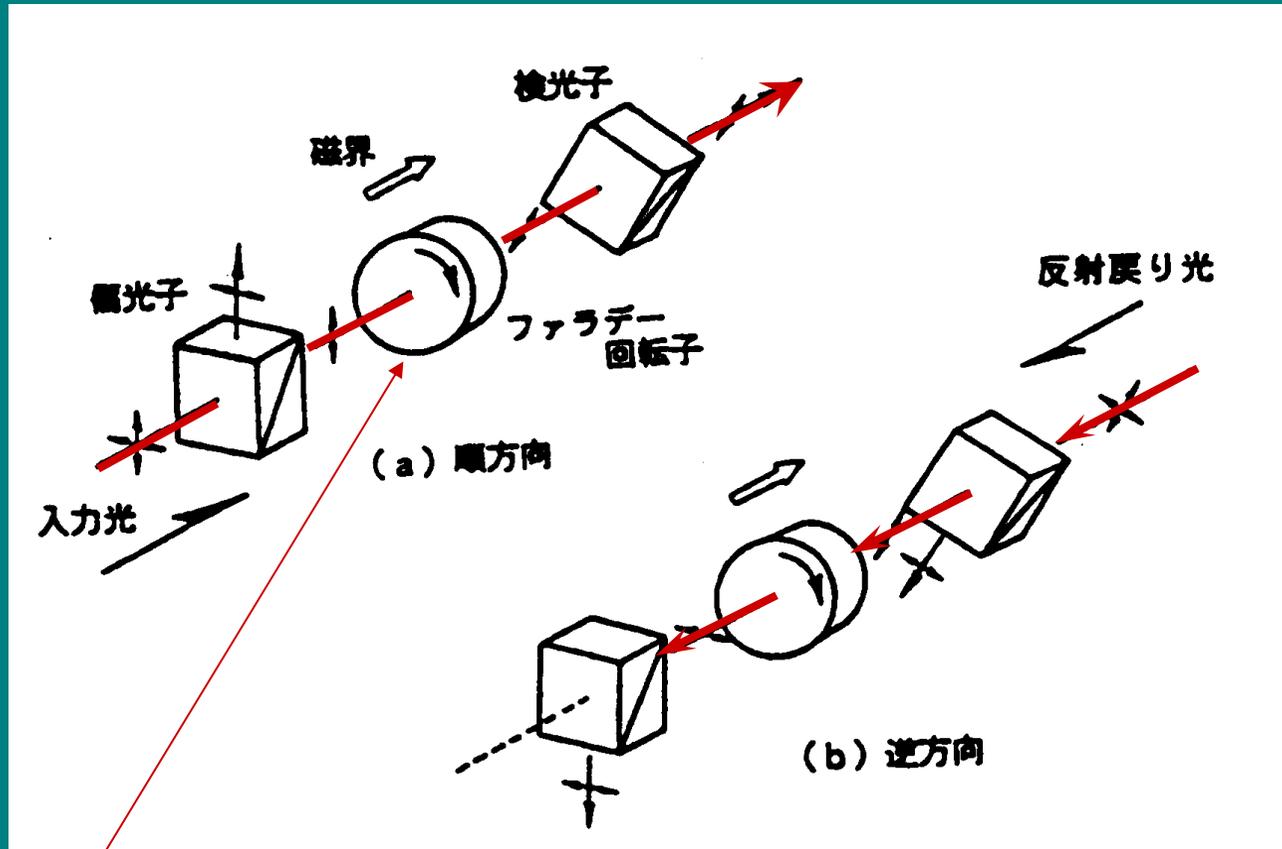
## 光アイソレータ

- 光アイソレータ: 光を一方向にだけ通す光デバイス。
- 光通信に用いられている半導体レーザ(LD)や光アンプは、光学部品からの戻り光により不安定な動作を起こす。
- 光アイソレータ: 出力変動・周波数変動・変調帯域抑制・LD破壊などの戻り光による悪影響を取り除き、LDや光アンプを安定化するために必要不可欠な光デバイス。



信光社  
<http://www.shinkosha.com/products/optical/>

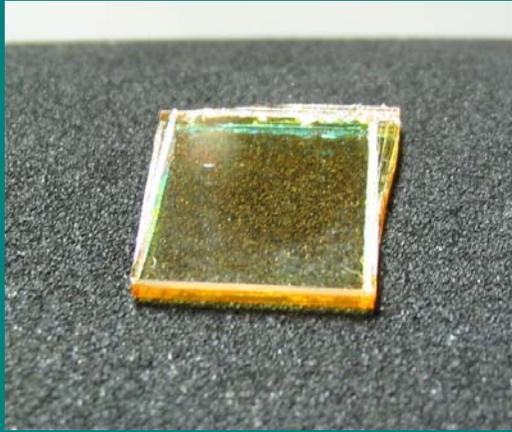
# 偏光依存アイソレータ



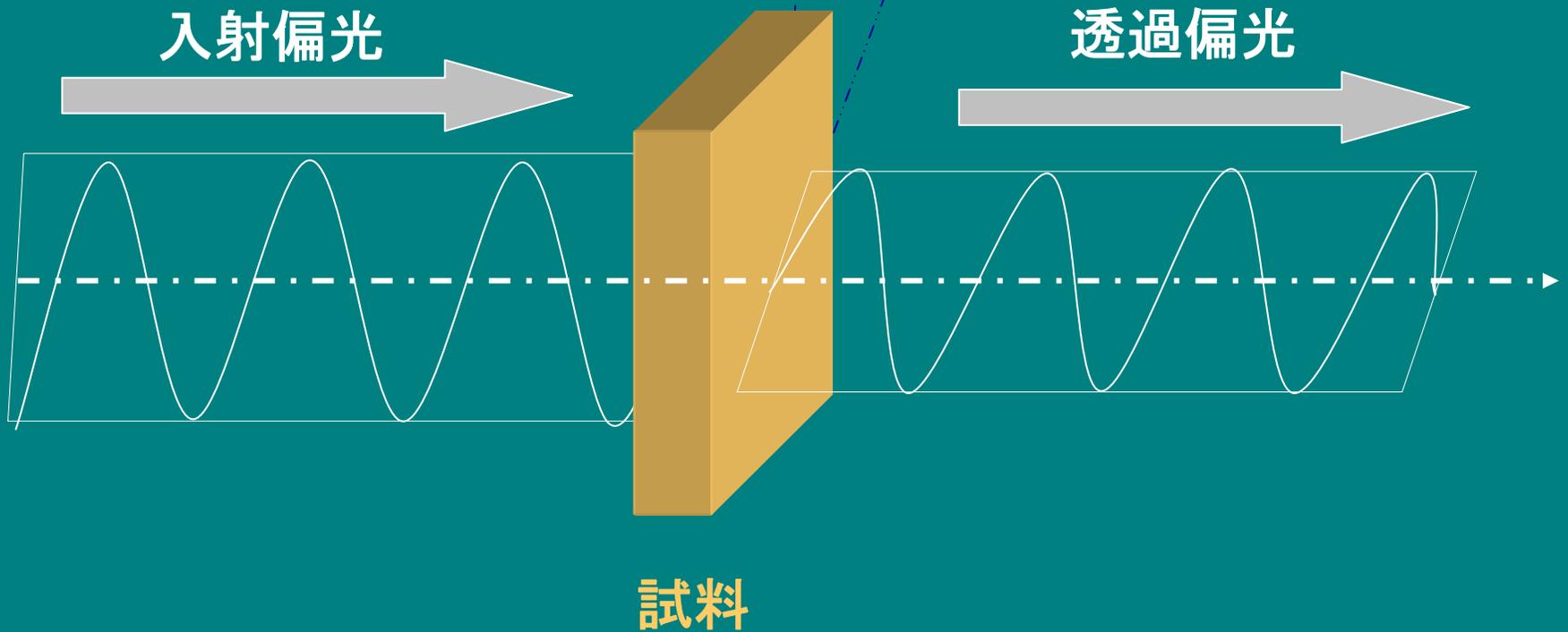
磁性ガーネット

直線偏光を磁界に関して右回り45度回転

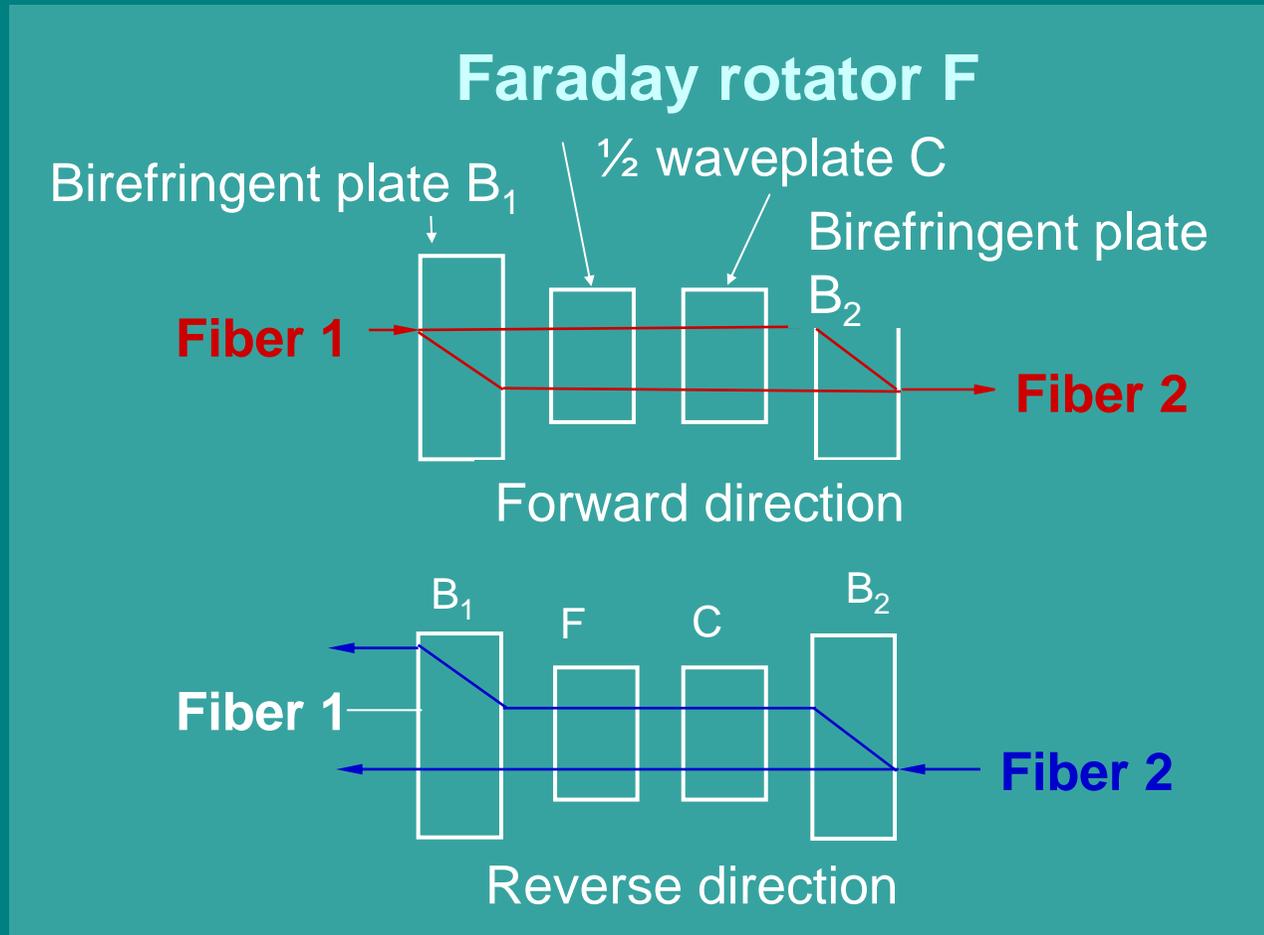
# ファラデー回転



ファラデー回転角  $\theta$



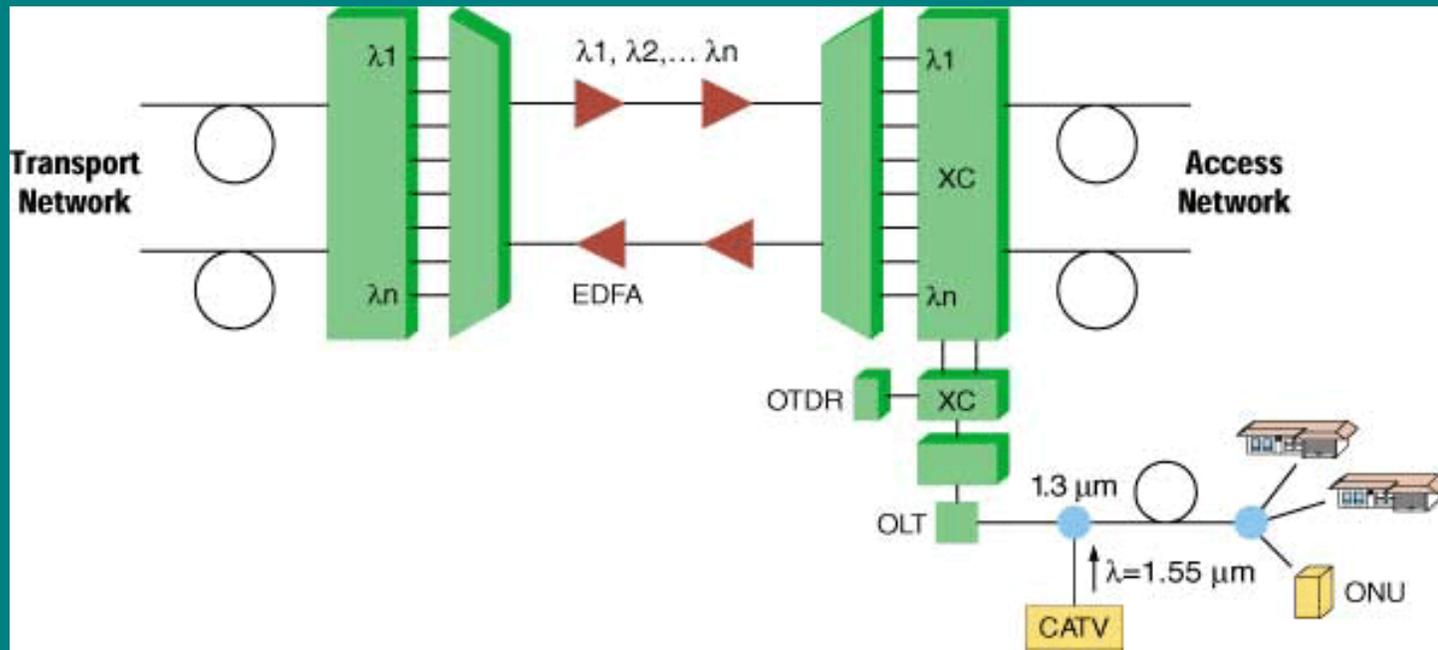
# 偏光無依存アイソレータ



# 要素技術

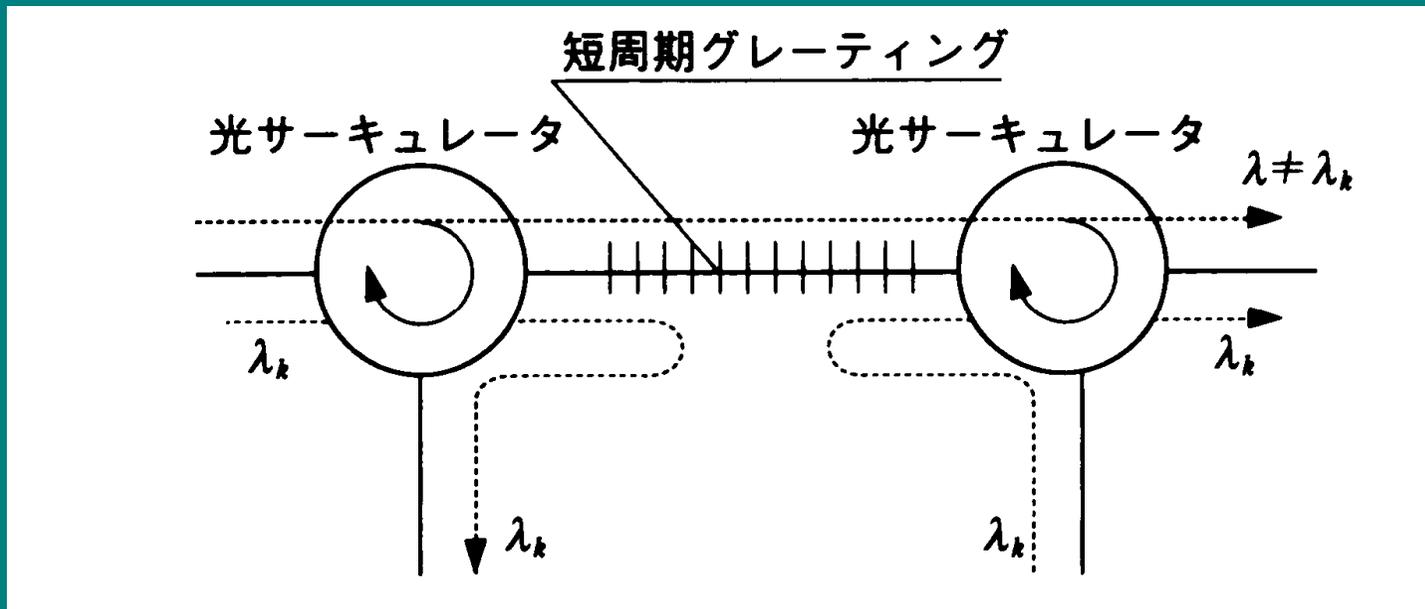
## 波長多重(WDM=wavelength division multiplexing)

- この方式は、波長の異なる光信号を同時にファイバー中を伝送させる方式であり、多重化されたチャンネルの数だけ伝送容量を増加させることができる。
- 通信用光ファイバーは、1450～1650nmの波長域の伝送損失が小さい(0.3dB/km以下)ため、原理的にはこの波長域全体を有効に使うことができる。



# 光アドドロップ

- 波長多重された光信号から特定の波長を抜き出すとともに、特定の波長の光を加える。



# 光電子集積回路(OEIC)

- 光半導体素子と電氣的な半導体素子とを同一半導体基板上に集積し、関連付けた集積回路。半導体レーザーなどの発光素子とそれを駆動する電界効果トランジスタを集積化したものと、フォトダイオードなどの受光素子と増幅・信号処理用の電界効果トランジスタを集積化したものとに大別される。光通信の送信・受信が主な用途。ガリウム・ヒ素系やインジウム・リン系などの化合物半導体と混晶が材料として注目されている。

<http://www2.nsknet.or.jp/~azuma/o/o0028.htm>

# 今回の課題

1. 半導体レーザにおいて、しきい値電流以下としきい値電流以上では、どの点が違うのか
2. 光ファイバーを光が少ない減衰で長距離にわたって伝搬する原理を述べよ。
3. 光ファイバー通信には波長 $1.5\ \mu\text{m}$ の光が使われる理由を述べよ。
4. 光ファイバーアンプの原理を述べよ。