

理工学セミナー

光ファイバーの科学

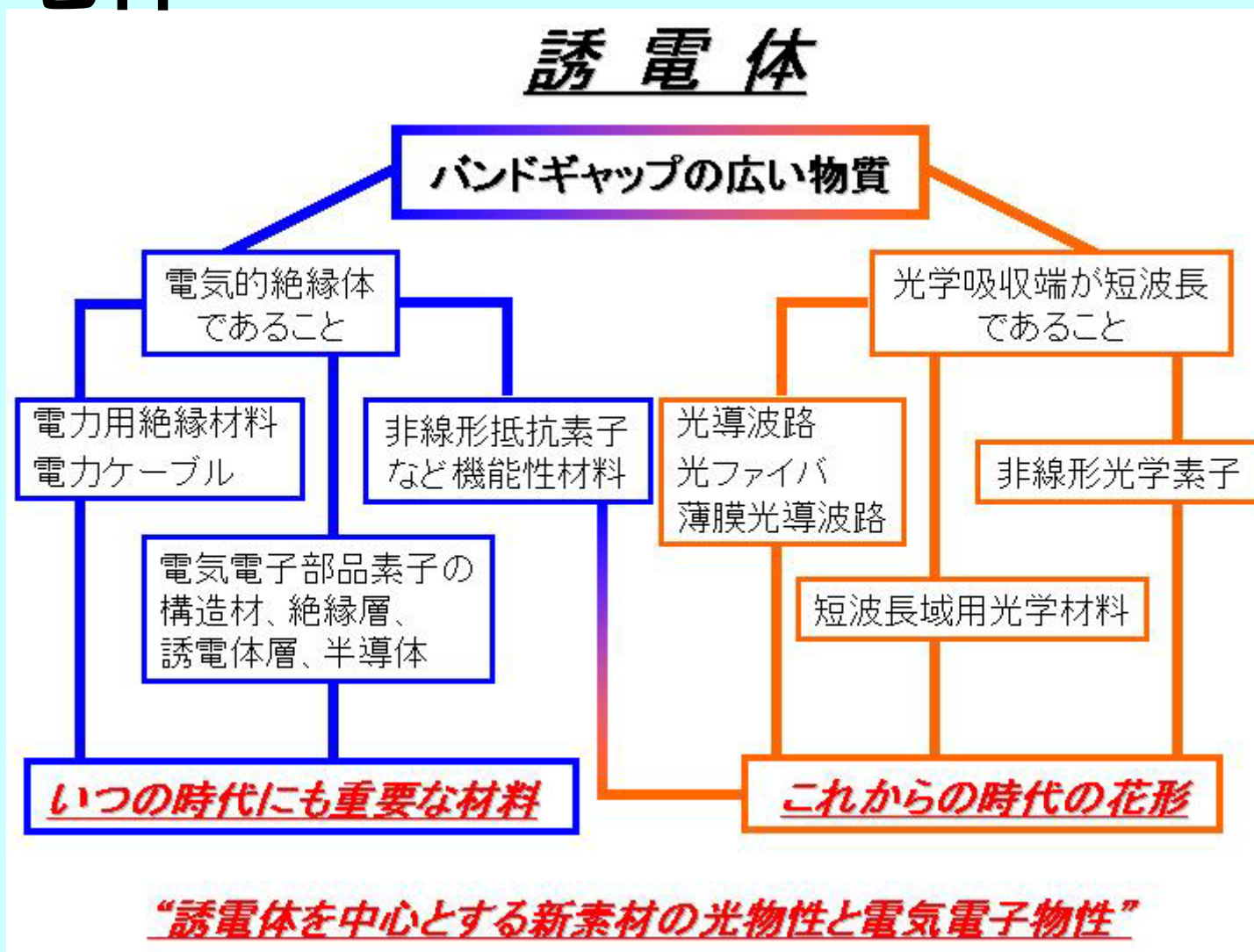
(誘電体って何だ)

早稲田大学

理工学部電気・情報生命工学科

大木義路

誘電体



誘電体とは(1)

誘電体＝電氣的な絶縁体

- ・ 身近な絶縁体

ガラス

プラスチック(ポリエチレンなど)

石

上記のうち、ガラスや(着色されていない本来の)プラスチックは透明。

- ・ 一方、光を反射する金属や黒色の鉛筆の芯は電氣的な導体

- 炭素のみからなる2物質

ダイヤモンド—透明、絶縁体

グラファイト—黒色、導体

- どうやら

「光を通す性質」

と

「電流を流さない性質」

には共通性がありそうだ。

両方とも「誘電体」の重要な性質

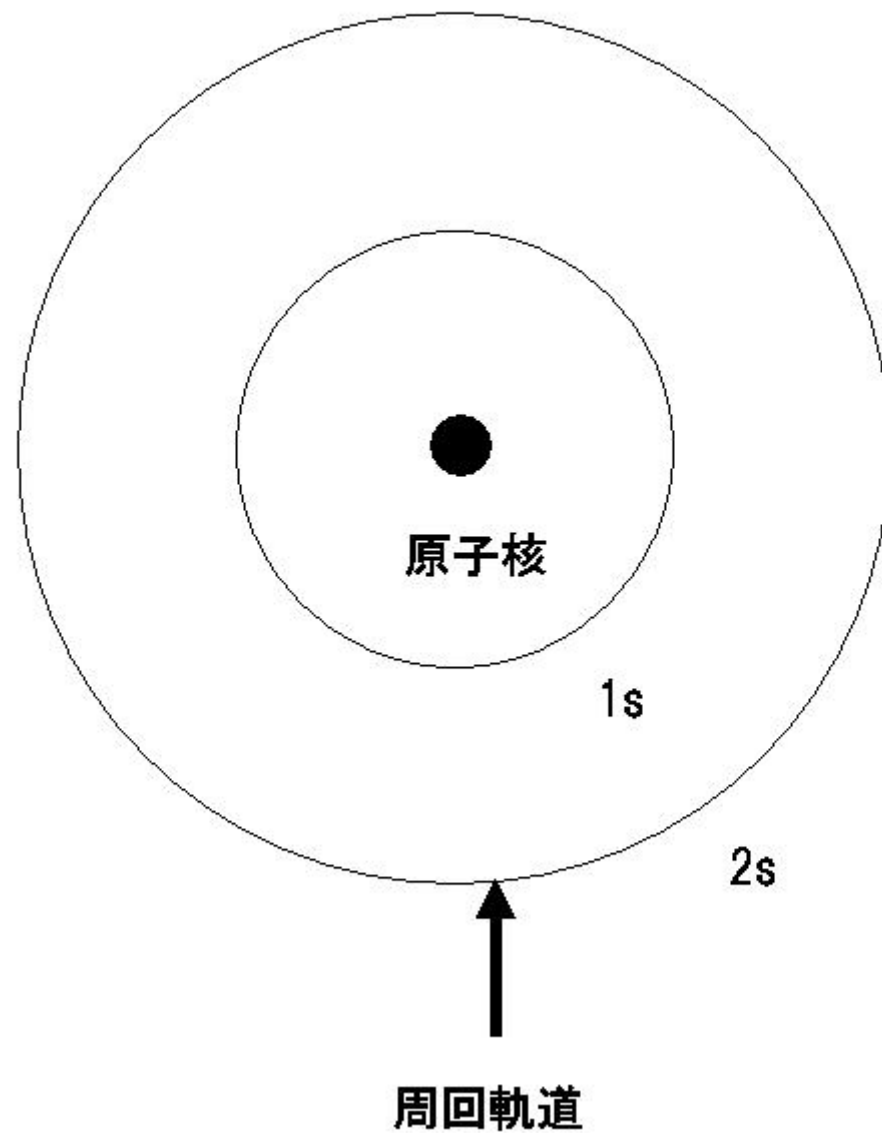
誘電体とは？(2)

電気、電子、光技術によって支えられている現代社会においては、様々な材料が使われています。材料を電気的特性から分類すると、超伝導体、導体、半導体、絶縁体と分類できますが、誘電体とは、上記の分類の中の絶縁体を指しています。電気を利用するには必ず電気絶縁を施す必要があります。したがって、どのような電気電子素子であれ、電気機械であれ、およそ電気により動作するもので誘電体が使われていないものはありません。この点において、誘電体(絶縁体)は、時代を超えて重要な材料です。

誘電体とは？(3)

誘電体は光学材料としても重要です。導体のように自由に動ける電荷が沢山存在している物質では、可視光は表面で反射されてしまいます。さらに、半導体では可視光は吸収されてしまいます。この為、光学的に透明な物質は誘電体に限られます。光は、(1)電気信号と同一の極めて速い速度を有する、(2)電波より高周波であるのでより高い情報密度が実現可能、(3)電磁誘導の影響を受けない、(4)絶縁が不要であり空間上に重ね合わせることが可能、等々電気にはない優れた特徴を有しています。したがって、最近の光情報通信の急速な発展を支える光ファイバを例にとるまでもなく、光を通す材料は、今後ますます重要となります。

原子：電子の軌道



孤立した原子の中

電子は飛び飛びの軌道を廻っている



電子のエネルギーも飛び飛び(量子化)

固体中では原子と原子の間隔狭い

→ 電子が“友達”の電子を感じる。

パウリの排他律:「1つの電子状態に入れる電子の数は1つ」、「(孤立していない)電子は完全に同一のエネルギーを取ることはできない」

→ ゆえに、固体中では、前の図の飛び飛びの軌道の幅が広がってバンドになる。



固体中では、電子の存在できるバンド(許容帯)と、許容帯と許容帯の間の電子の存在できないバンド(禁止帯)に分かれる。

誘電体のバンド

電子の

エネルギー



禁止帯D

許容帯C

電子がない

禁止帯C

許容帯B

電子が充満

禁止帯B

許容帯A

電子が充満

禁止帯A

誘電体のバンド

- ① 電子は許容帯AとBを満たしているが許容帯Cには1つもいない(孤立したヘリウム原子中の電子がK殻(1s軌道)を満たしているが、L殻(2s軌道)にはまったく電子がないことから連想するとわかりやすい)

- ② 禁止帯Cのエネルギー幅は大きい。



許容帯A、Bの電子は、丁度道一杯に車がいるのと同じで動けない、許容帯Cはガラガラに空いた道だが、そこへ行く為に必要なエネルギーが大きいので行けない。



電流が流れない、つまり絶縁体となる。

電子が許容帯Cへ行く方法は？

——→ 光を吸収し光のエネルギーをもらう。

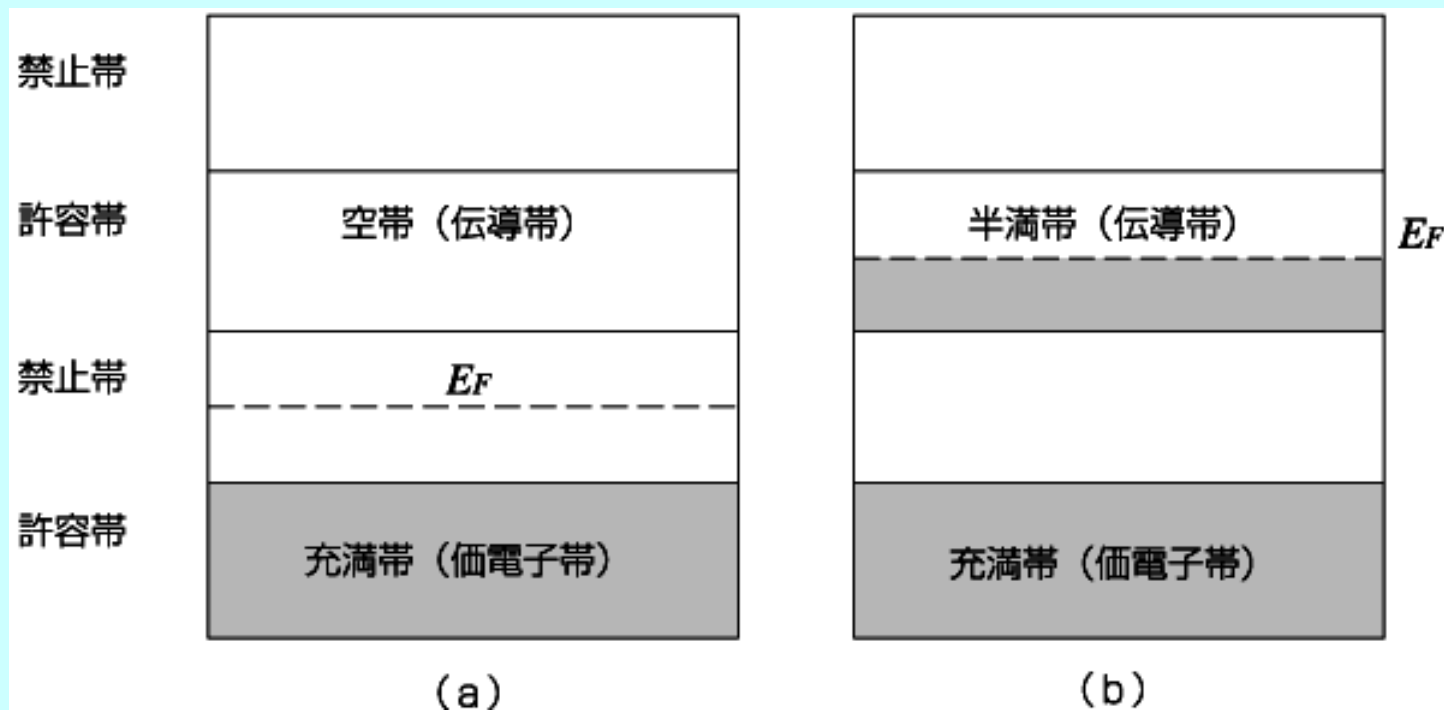
もし、禁止帯Cの幅が狭いと、小さなエネルギーの光も吸収される。しかし、禁止帯Cの幅が大きければ、エネルギーの大きな光しか吸収されない。

——→ 全ての可視光が吸収されなければ透明に見えるはず。

つまり、「絶縁体であること」と「透明であること」は両方とも誘電体の性質である。

(発展)

1. 導体や半導体のバンドはどうなっているのでしょうか？
2. 可視光の波長と色はどう関係しているか？
3. 光の波長とエネルギーはお互いにどういう関係を持っているか？



(a) 誘電体(絶縁体) (b) 導体

光を通すための条件

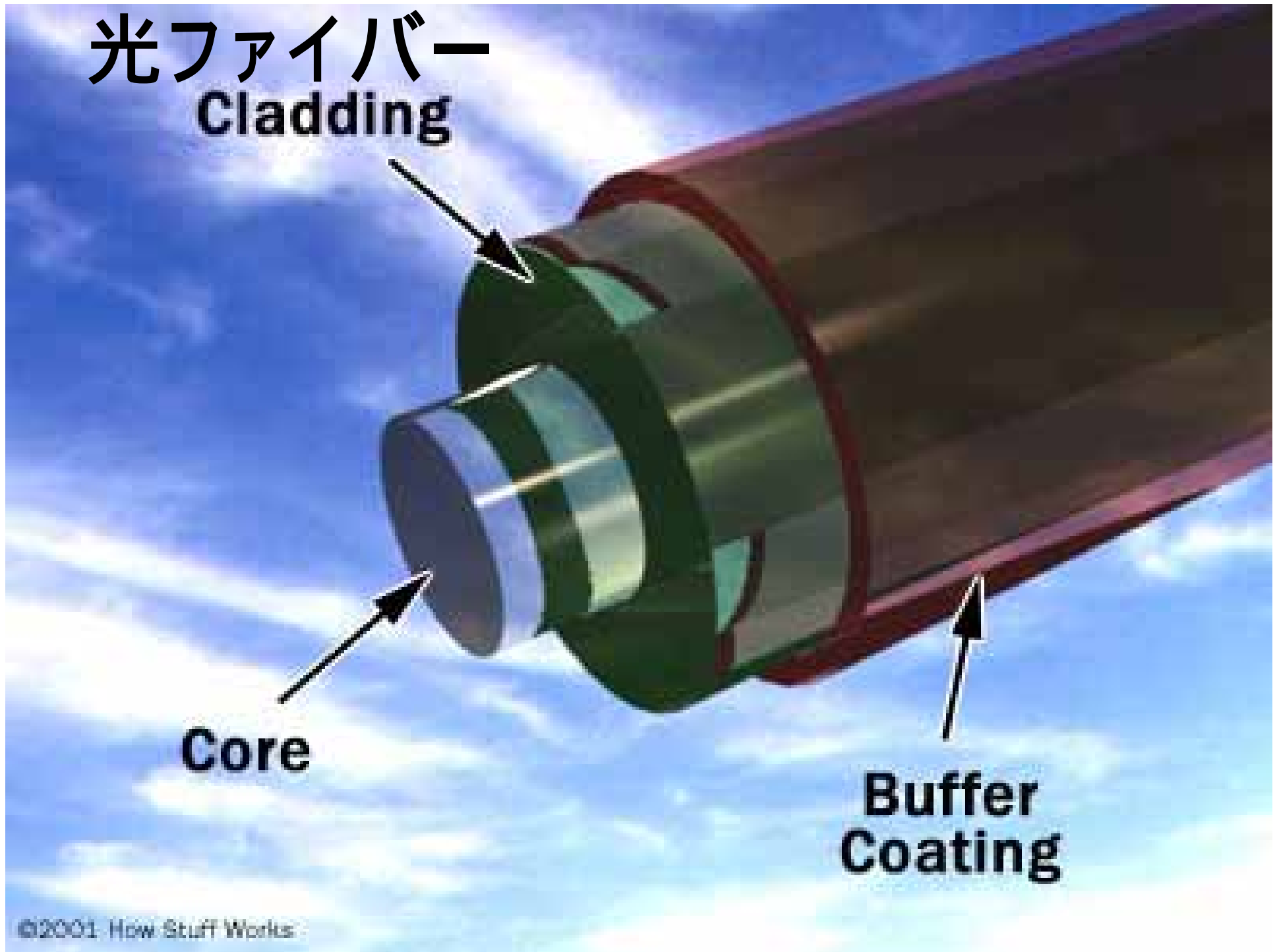
物質が光を透過するためには、次の条件が必要である。

- 1) 物質に光が**入射される**こと。すなわち、物質の表面で**反射されない**こと。
- 2) 物質の内部で光が**吸収されない**こと。
- 3) 物質の内部で光が**散乱されない**こと。
- 4) 光が物質の内部で**伝送される**こと。すなわち、伝送モードが維持されること。

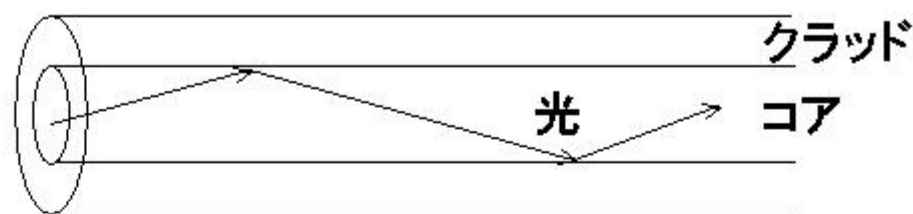
光ファイバー
Cladding

Core

Buffer
Coating



光ファイバ

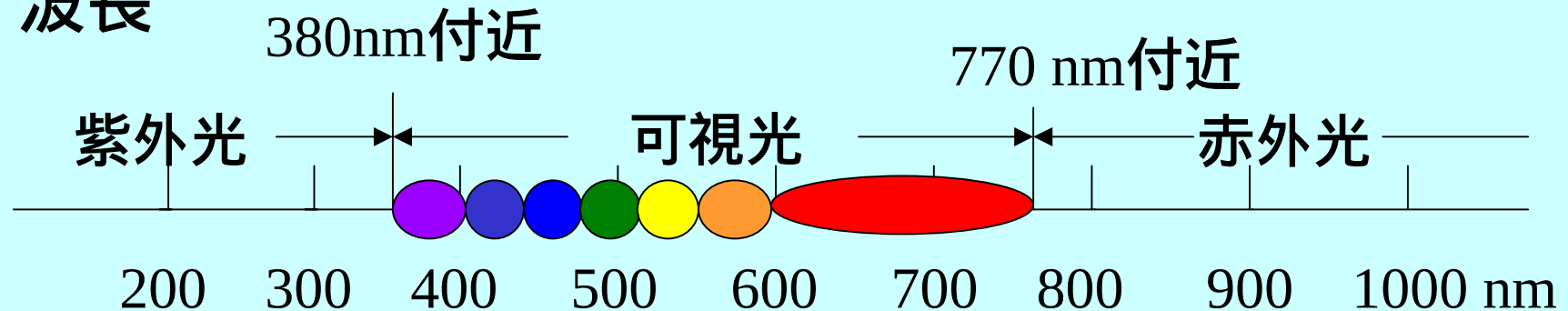


コアとクラッドの境界面で光
が全反射しながら進む

(発展)

1. 全反射が起こるためには、
コアとクラッドの屈折率にどう
いう関係が必要か？
2. 光ファイバとして使われて
いる材料を調べてみよう。

波長



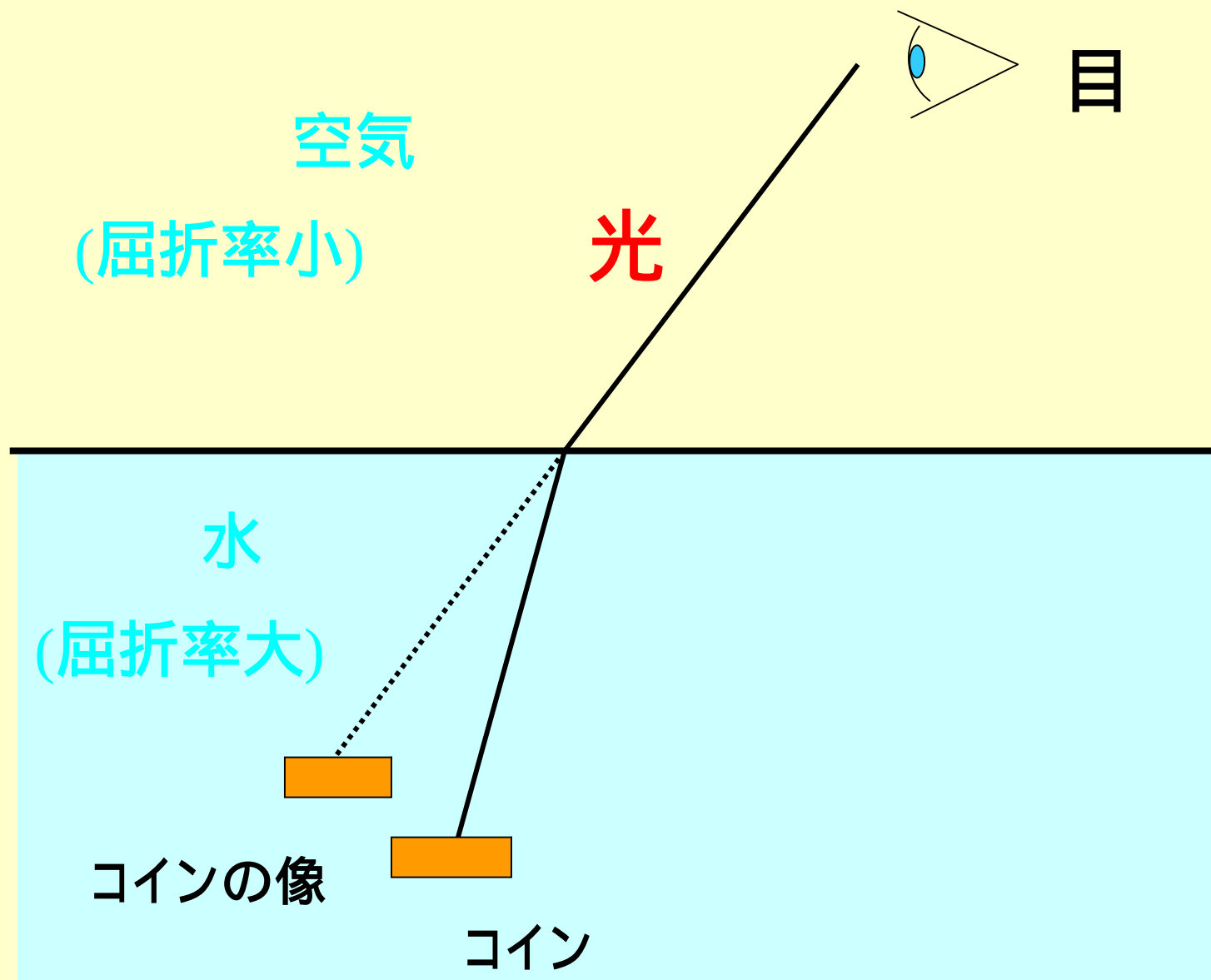
エネルギーは強い。
化学反応を生じる
能力が大きい。

エネルギーは弱い。
但し、物を暖める能力
は大きい。

(注1)nm(ナノメートル): $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ つまり(10億分の1)メートル
 $1000\text{ nm} = 1\mu\text{m}$ (1ミクロン) = 100万分の1メートル

(注2)波長とエネルギーは反比例。波長300nmの紫外光は波長600nmの光(赤)の2倍のエネルギーを持つ。

→ したがって、紫外光に当たると、日焼けしたり、皮膚ガンになる。



空気

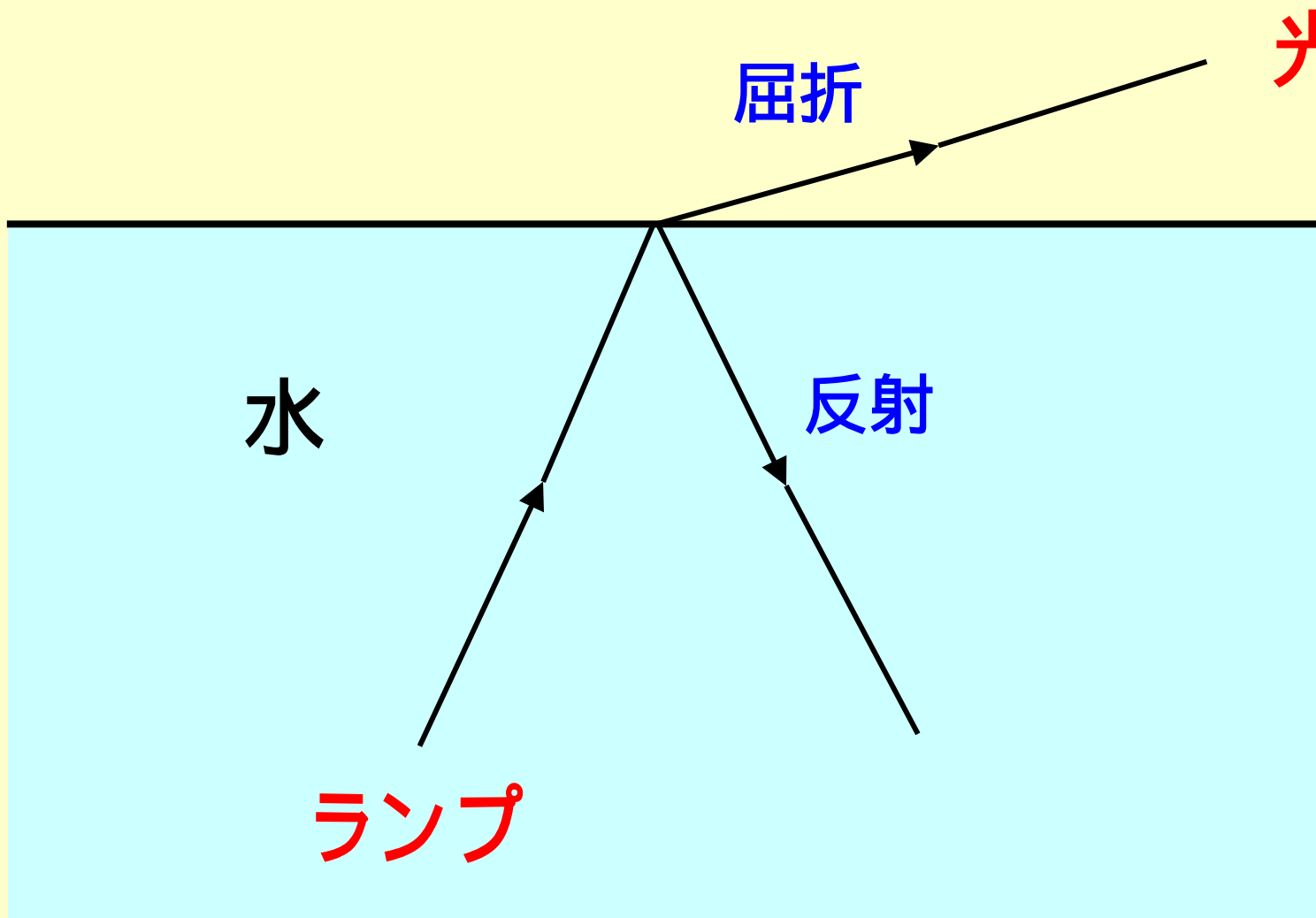
屈折

光

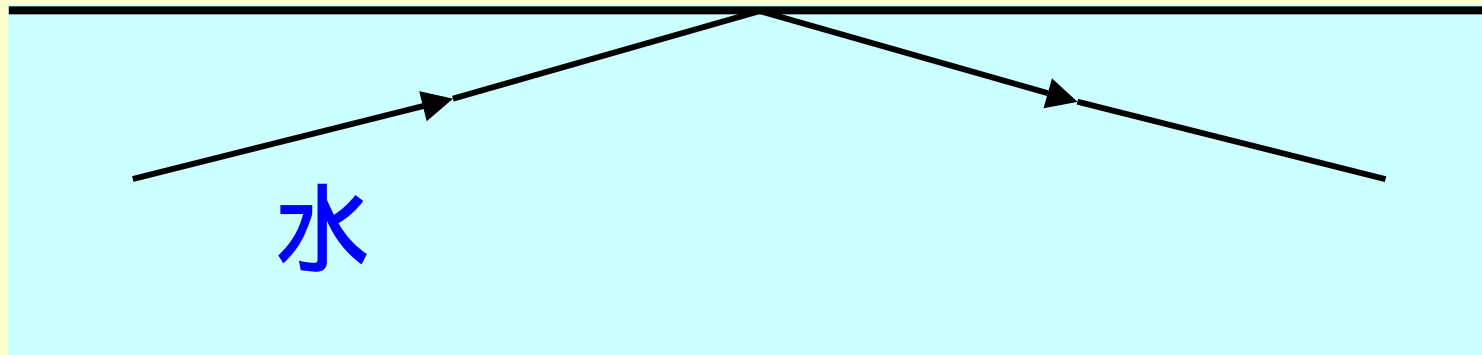
水

反射

ランプ



空気



界面近く進んできた光は、すべて反射されてしまう。



全反射

こうなった理由：水の屈折率 $>$ 空気の屈折率
だから

光ファイバのコアの屈折率 $>$ クラッドの屈折率

光ファイバの材料

シリカ (SiO_2 2酸化ケイ素) ----- 窓ガラスと同じ成分

但し、窓ガラスを10枚も重ねると相当に暗くなる。
1cm程度の厚さで光の量は10分の1位に減る。
光ファイバでは、数10km伝送されて初めて10分の1の光量になる。

(参考)対数を学んだ学生さんへ

伝送損 = $-10\log_{10} (\text{伝送後の光量} / \text{元の光量})[\text{dB}]$ と表すので、光量が $(1/10)$ になると、10dB(デシベル)の伝送損になる。

現在、一番光をよく伝えるファイバーの特性は0.148 dB/kmなので、 $10 \div 0.148 = 67.6\text{km}$ 伝わって初めて光量が $(1/10)$ になる。

光量が $(1/1000)=30\text{dB}$ 位までは信号が伝わる。ゆえに $30 \div 0.148 = 203.4\text{km}$ も信号を届けることが出来る。(銅線の電話線は、わずか1.5km位しか届かない。1.5km毎に増幅している。)

超高速光ネットワークの時代へ

Optical fiber group

現在インターネットの急速な普及によって大容量な通信ネットワークが必要



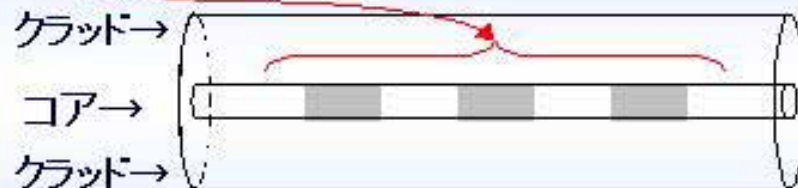
通信容量を増大するため波長多重通信が広く使われている



光ファイバグレーティングを始めとした光デバイスが必要

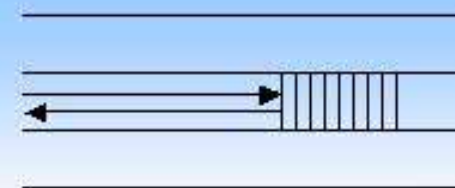
グレーティング:

コア内部の周期的に光学定数の違う部分

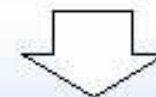


光ファイバグレーティング

コア:光が通る部分、クラッド:光を閉じこめる部分



Bragg gratings



反射ミラー、フィルター、センサー等

光デバイス

1. パッシブ光デバイスの必要性

光信号処理

✧ 特定の波長の光だけを分岐・挿入

➡ 光アド・ドロップ: OADM
(Optical Add/Drop Multiplexing)

✧ 多数の経路を接続

➡ 光クロスコネク: OXC
(Optical cross Connect)

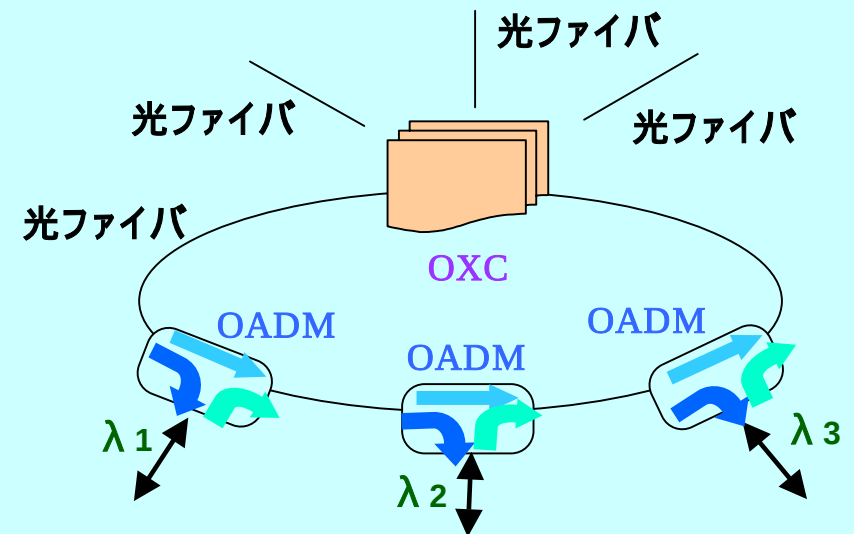


図2 フォトニックネットワーク

H.Takahashi, J.IEE Japan, Vol.121, No.9, p.716 (2001)

様々なパッシブ光デバイスが必要

3. グレーティングの役割

グレーティング
(grating: 格子)

光導波路(又は光ファイバ)における
高屈折率部と低屈折率部の周期構造

格子の周期に依存して、
任意の波長の光だけを反射 / 透過

フィルタ機能

反射型

ブラッググレーティング

グレーティングの周期が小さい
(光の波長オーダー)

透過型

長周期グレーティング

グレーティングの周期が大きい
(約100 μm 程度)

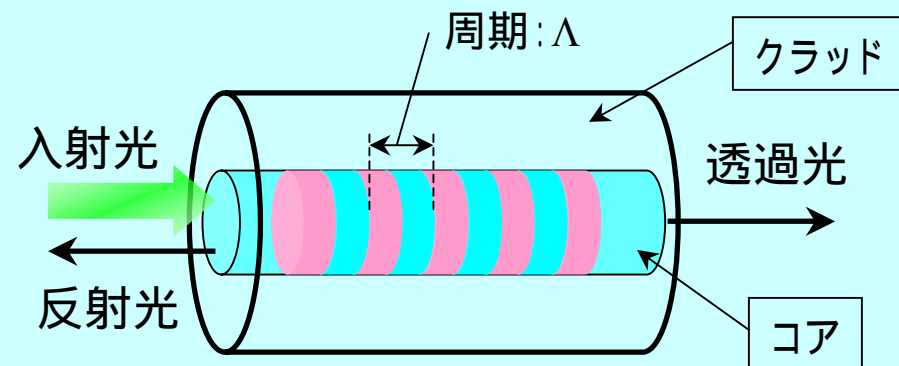
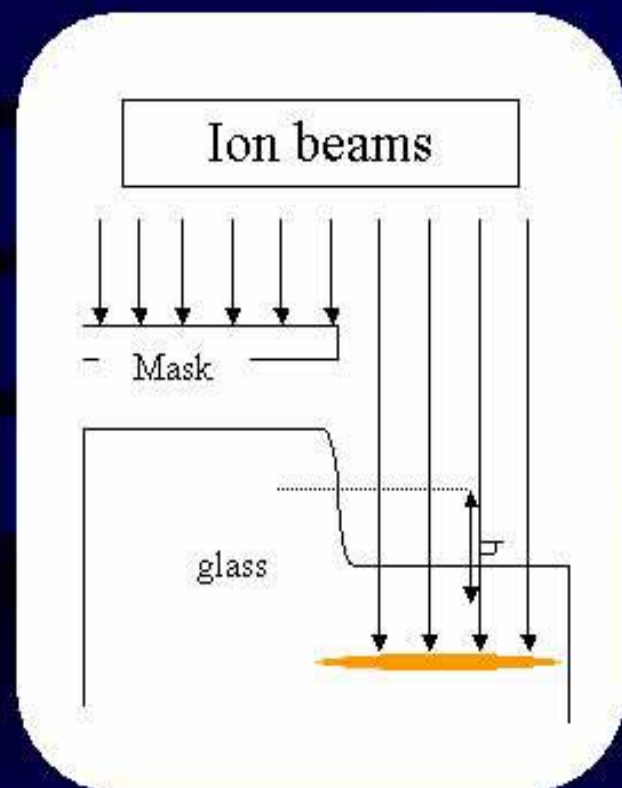


図3 ファイバグレーティングの例

イオン注入を用いたファイバグレーティングの作製

Optical fiber group



イオン注入による高密度化

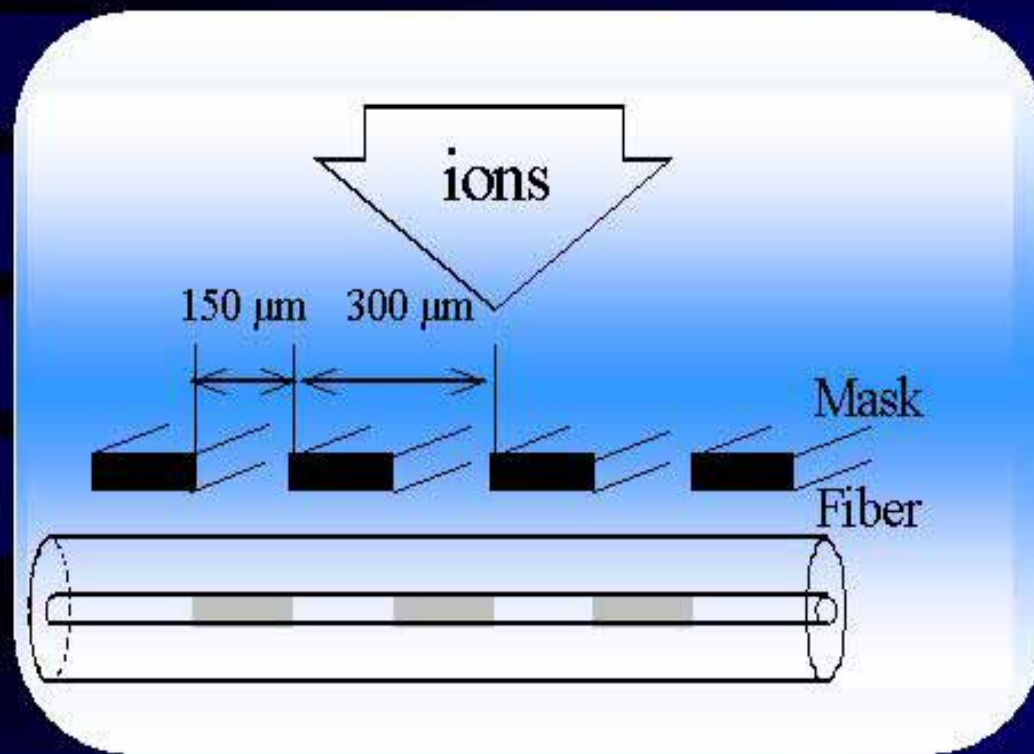
イオン注入誘起屈折率変化：
高密度化、欠陥生成が原因

ほぼ全ての石英系ガラスに対し屈折率上昇が誘起できる。
上昇量(Δn): 10^{-2} オーダー
(従来用いられてきた紫外光誘起のものより1~2桁高い)

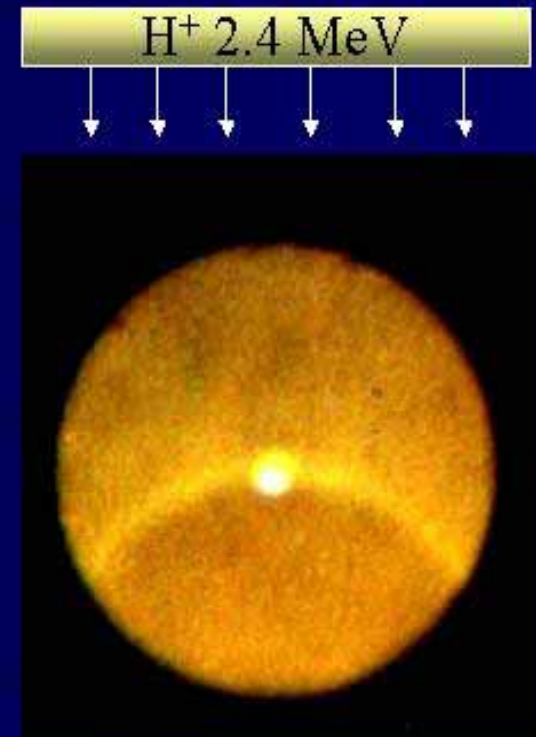
この屈折率変化を用いた光学素子作成及び誘起屈折率の生成メカニズムの解明

グレーティング作製

Optical fiber group



Maskを介して光ファイバにイオンを注入



光ファイバの断面図

4. 方向性結合器 (Directional Coupler)

方向性結合器 (Directional Coupler)

2本の光導波路コアの一部が数 μm 程度まで接近し、
この接近部にて光の授受を行う光合分波器

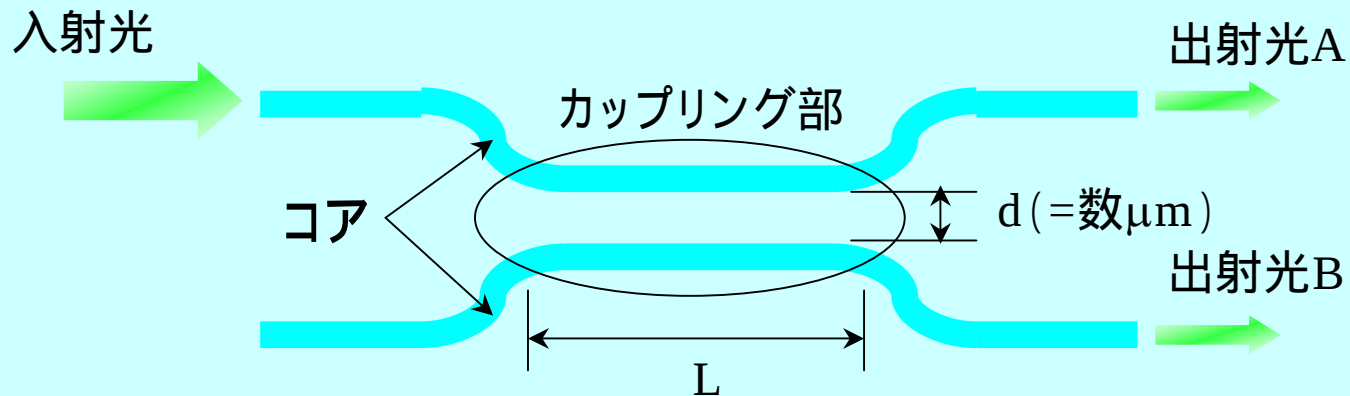


図14 方向性結合器のモデル図

一方のコアに光を入射すると、
その光は他方のコアと結合



入射光を分割(結合)

導波路

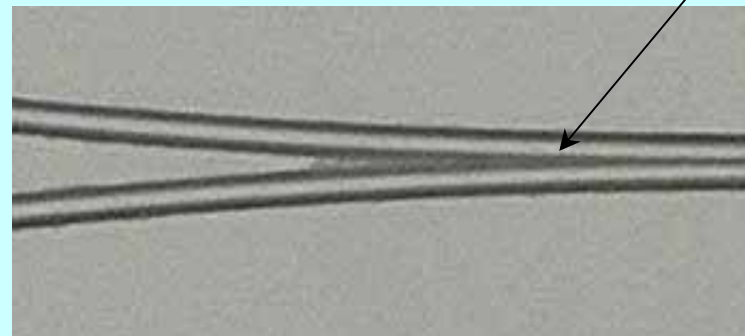


図15 カップリング部のマイクロ스코プ像

5. 偏波面保持光ファイバとデポラライザ

光通信では偏光状態を制御することは非常に重要である

光ファイバ中を伝送する通信光の偏波面を保持する

偏波面保持光ファイバ



DWDMシステムでは不可欠

完全偏光または部分偏光を非偏光にする

光ファイバ型デポラライザ



ラマンアンプの利得における励起光の偏波依存性の解消

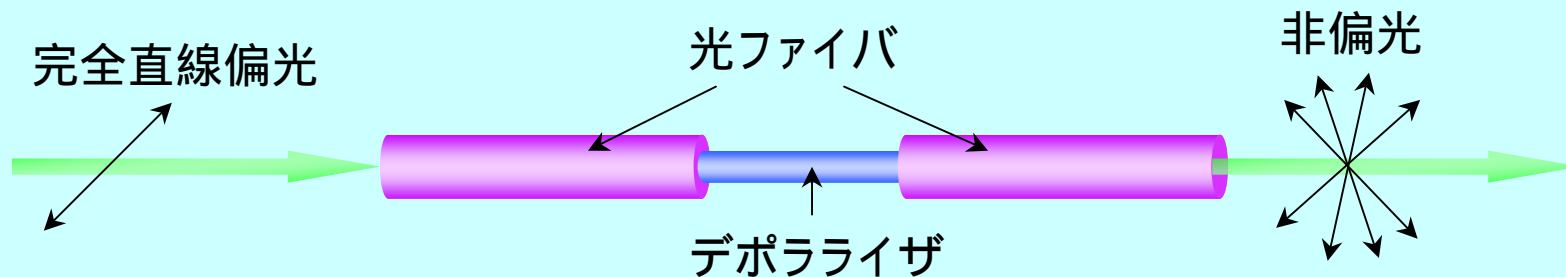


図19 デポラライズ効果の例

大型研究

電気・情報生命工学科大木義路教授に経済産業省平成14年度大学発事業創出実用化研究開発事業費補助金が交付されることが決まりました。これは、大学での研究成果を元に得た特許等知的財産を産業界の協力を得て社会に還元することを目的とした補助金であり、早稲田大学知的財産センターを窓口として経済産業省へ申請していたものです。

事業の概要は以下の通りです。

研究テーマ：高エネルギーイオン注入を用いた高機能光通信用素子作製技術の実用化研究

目的

光目的

光通信デバイスの根幹材料であるシリカガラスはイオン注入によって、ガラスの屈折率を制御できます。我々は、上記イオン注入誘起屈折率変化が、光デバイス作成に適応できる可能性が高いことに注目し、これまでに、光フィルターとして用いられる光ファイバグレーティングのイオン注入による試作に世界で初めて成功するなど、研究成果をあげてきました。また、光通信にとって重要度の高い偏波面保持機能をイオン注入により光ファイバに付与する技術や、方向性結合器(カップラ)の特性調整(トリミング)技術なども考案し、イオン注入技術が光通信において非常に有用であることを見出しました。本研究の目的は、実際の生産に向けた本技術の最適化、高効率化を行ない、本技術の事業化を行なうことです。

活用する大学の研究成果（特許の名称）

グレーティング並びにグレーティング作成方法及び装置

（特許第3456927号〔日本〕、その他米国・カナダ特許）

偏波保持光導波路およびその製造方法

（特願2001-369223）

光導波路カップラー及びその特性調整方法

（特願2001-369224）

光導波路グレーティング、その形成方法、及びその形成用

マスク （特願2001-379173）

実用化研究開発を行う必要性

研究開発の必要性については、技術の有効性および実用化に向けた課題解決の2つの視点から述べます。

最近の通信技術の発展は目を見張るものがあります。その特徴を列挙すると、アナログ電話中心からデジタル・データへ、伝送される信号のマルチメディア化へ、伝送速度の高速化へ、電話網からIP網（インターネットのプロトコルをベースにした網）へという網（ネットワーク）構造の変革へ、その発展の過程でのビットあたりの通信コストの飛躍的低下へ、と整理することができます。

そのために、基幹網が高速化し次いでその傾向が加入者網にも及んできており、加入者回線の速度は、I S D Nの6 4 kbps（あるいは1 2 8 kbps）から、最近のA D S LやC A T V網による高速サービス（8 Mbps以上のいわゆるブロードバンドサービス）へ急速に進展し、更に高速化する傾向にあります。これを技術的に支えるものとして、**波長多重方式（WDM）さらには高密度波長多重方式（DWDM）光ファイバー伝送技術の導入による**基幹網の伝送コストの飛躍的な低下がありますが、さらに加入者回線にも光ファイバー伝送技術を本格的に導入する大きな流れがあります。

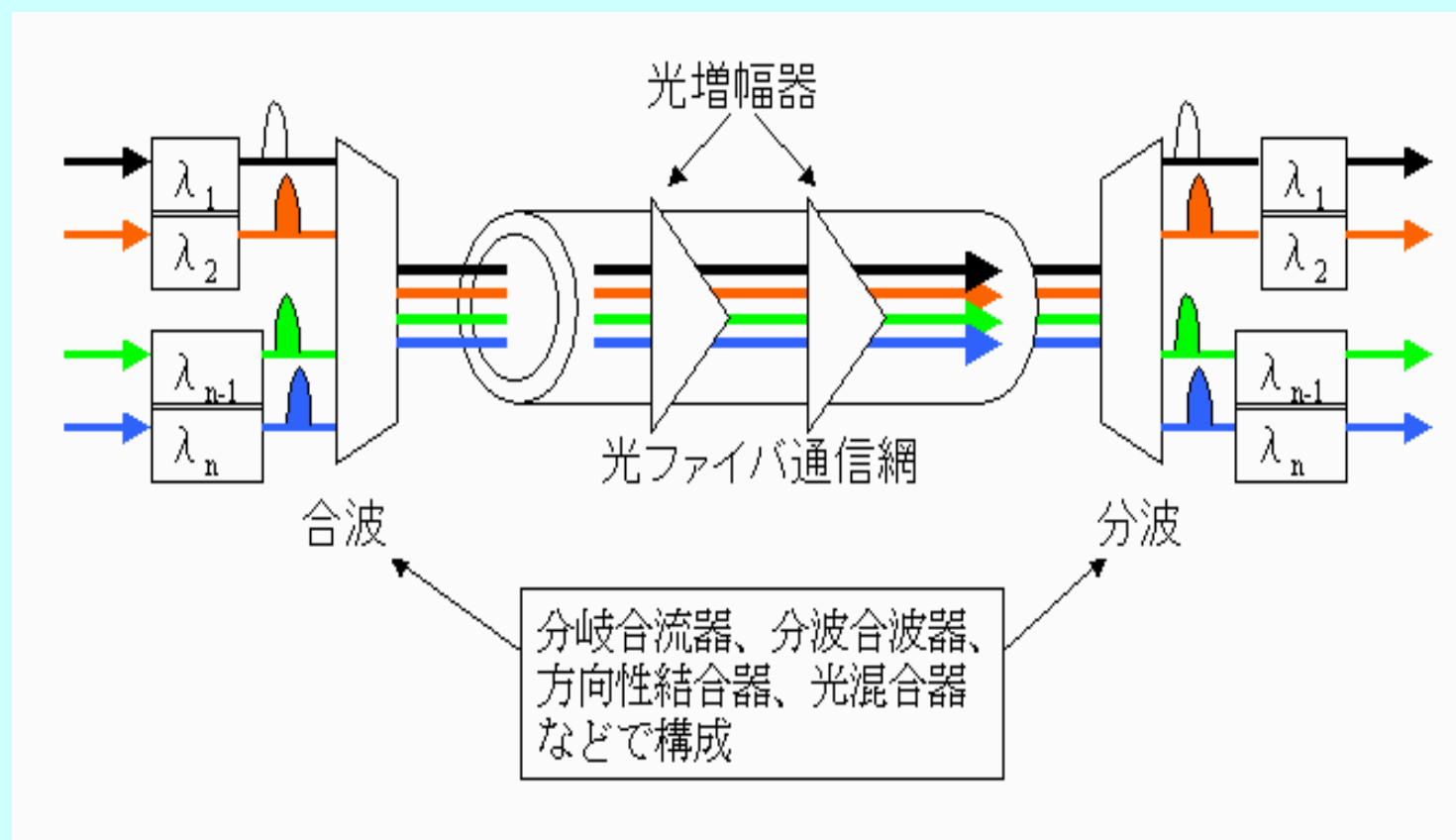


図 1 波長多重方式の概念

我々が行なう実用化研究は、光通信の伝送媒体となる各種の材料中に、イオン注入という光素子作製技術の分野では革新的な技術を適用して各種の原子を注入することによって誘起される大きな屈折率変化を用いて、光素子の作製技術を革新しようというものです。本実用化研究を行なうことによって、従来用いられていた紫外線照射法に比べてはるかに高速かつ安価に高性能な素子作製が実現できます。

また、イオン注入技術を用いることにより、従来では作製が難しく高価であった、超狭帯域光フィルタや、簡易な構造でかつ高精度なカップラが安価で得られるようになります。本技術が実用化されることにより、これから普及が大いに見込まれ、かつ期待されている超高速伝送手段(アクセス系(加入者回線)で100Mbps、幹線では数Tbps、T(テラ)は 10^{12} を表す)である高密度波長多重方式(DWDM)は、一層の高密度化の可能性が付与され、素子の高集積化、量産化が格段に促進されます。その結果、光ファイバ通信回線の一般家庭への普及(いわゆるFTTH)の低価格化を実現できるようになります。

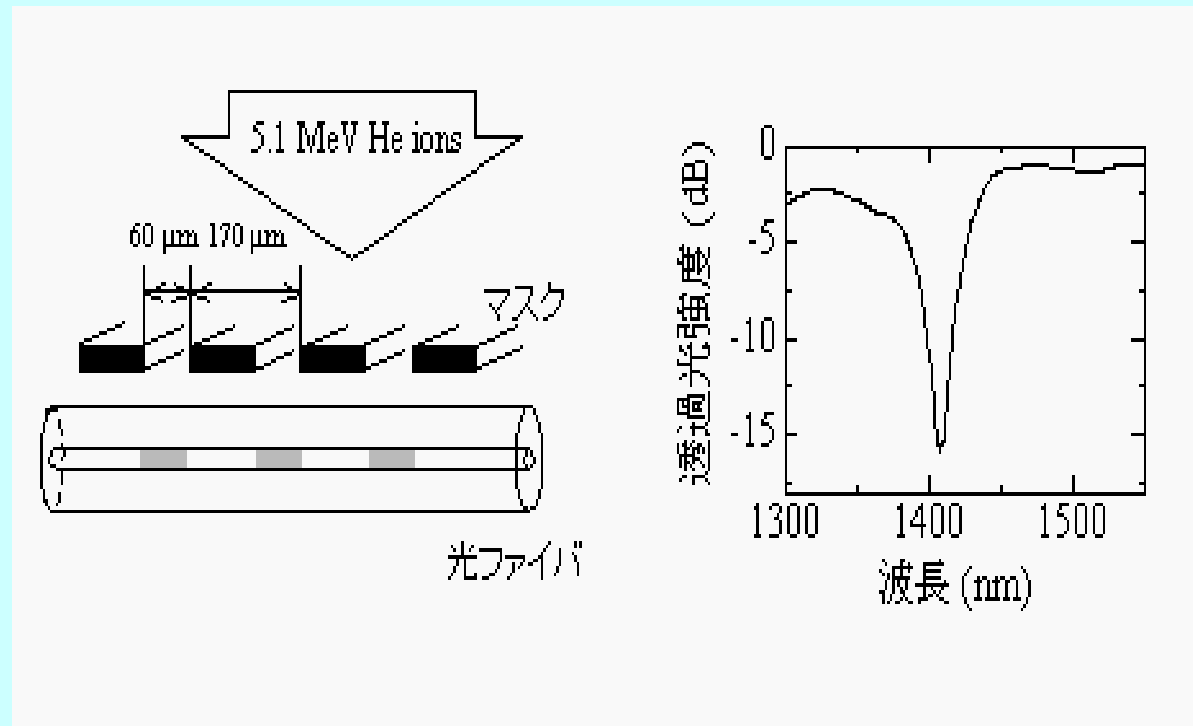


図2 我々が作成した、世界初のイオン注入による長周期グレーティング

左図：作成方法

右図：得られたフィルタリング特性

1410nmにピークを持つ光フィルタが得られています

。

事業期間

2002(平成14)年7月1日 ~ 2005(平成17)年3月31日

補助金額 124,550,000円

付随する民間企業よりの受入額 69,416,000円

計 約1億9,400万円