

光ファイバ

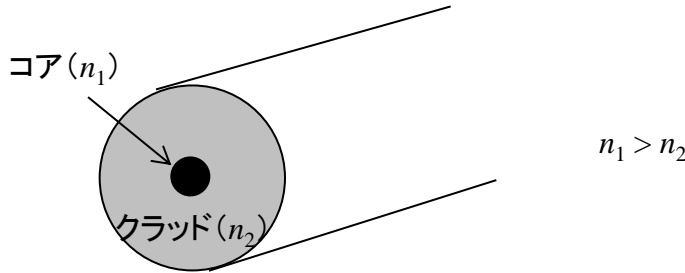
光通信の基本は光ファイバ。

第1章で、屈折率の異なる境界面では入射角によって全反射が起こることを示した。

光ファイバ内の光伝播の直感的な原理は光の全反射。

光ファイバの基本構造は、円筒状のガラス媒質にそれより屈折率の高いガラス媒質が埋め込まれた形状。但し、プラスチックの場合も有り(例えば、ディスプレイ用途)。

ここで、中心の高屈折率部をコア、周りの低屈折率部をクラッドと呼ぶ。



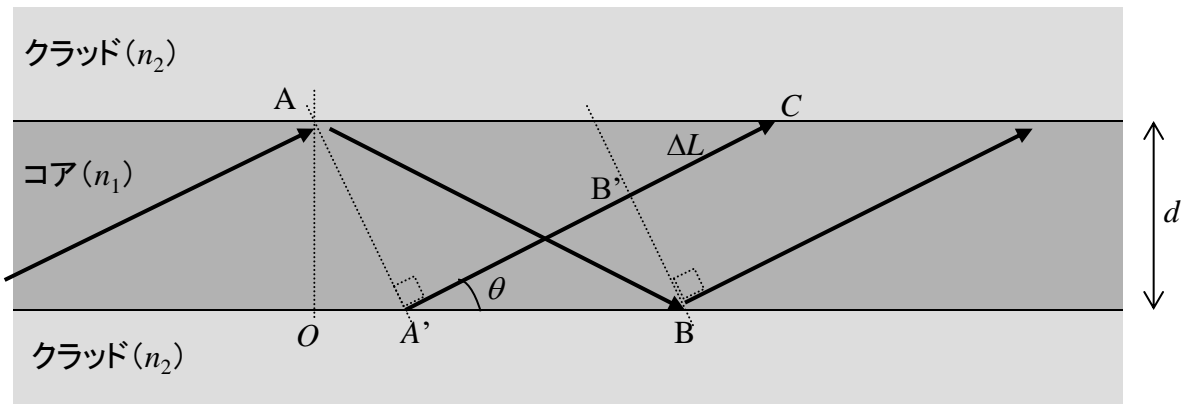
光が臨界角より浅い角度で高屈折率媒質から低屈折率媒質へ入射すると全反射される。

これにより、光はコア部に閉じ込められたまま伝播する。

但し、臨界角以上であればどんな角度でもよいわけではなく、特定の角度の光のみが伝播可能。

これを伝播モードと言う。以下、これについて説明する。

ファイバを横から眺めると、



平面波は伝搬方向に垂直面では等位相。言い方を変えると、等位相面に垂直方向に伝搬する。

従って、光が上図のように伝搬しているとすると、AとA'、BとB'、はそれぞれ同位相のはず。そのためには、光がA→Bへ進む間の伝播位相とA'→B'へ進む間の伝播位相との差が 2π の整数倍。

$$k(L_{AB} - L_{A'B'}) = 2m\pi \quad (k: \text{伝播定数}, m: \text{整数})$$

コア径 d とすると、

$$\begin{cases} L_{OA'} = d \frac{\sin \theta}{\cos \theta} & L_{OB} = d \frac{\cos \theta}{\sin \theta} & L_{AB} = \frac{d}{\sin \theta} \\ L_{A'B'} = L_{A'B} \cos \theta = (L_{OB} - L_{OA'}) \cos \theta \end{cases}$$

$$k(L_{AB} - L_{A'B'}) = k \left\{ \frac{d}{\sin \theta} - \left(d \frac{\cos \theta}{\sin \theta} - d \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \right) \cos \theta \right\}$$

$$= kd \cdot 2 \sin \theta = \frac{n_1 2\pi f}{c} d \cdot 2 \sin \theta = 2m\pi$$

f : 光周波数
 c : 真空中の光速

$$\sin \theta = m \frac{c}{2n_1 d f}$$

この角度を満たす光がファイバを伝播する。**伝搬モード**

伝播角度は、整数 m に応じて複数存在 → 伝播モードは複数 m 大につれて角度 θ も大。

但し、全反射条件を満たさなければならないので、 θ には上限がある。

よって、伝播モード数には上限がある。

伝播モード数は、 $c/(n_1 d f)$ に依存。これが大きいと、すぐに臨界角に達するのでモード数は少。すなわち、コア径 d が小、光周波数 f が小 (= 波長大)、だとモード数は少。

ここで、

伝播モードが1つのファイバを

シングルモードファイバ

伝播モードが複数のファイバを

マルチモードファイバ

と呼ぶ。

ちなみに、通常使われている通信用光ファイバ(波長 1.5 μm 用)では、シングルモードファイバのコア径 10 μm 、マルチモードファイバのコア径 50 μm 、くらい。

以上では、伝播モードを全反射モデルで説明したが、実はこれは初心者向け。

ファイバー内の光は光線状ではないので、正しくは、伝搬方程式に境界条件を課してを解く必要がある。

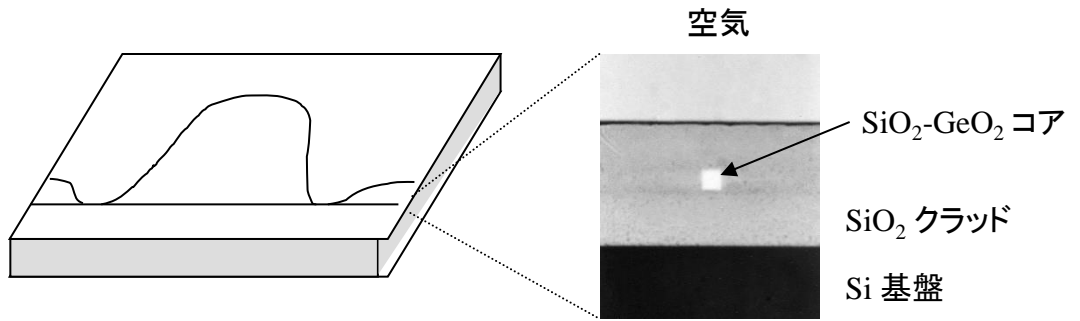
また、上記ではファイバーを横からみた断面上で考察したが、実際には円筒形なので、その意味でも精確ではない。

光導波路

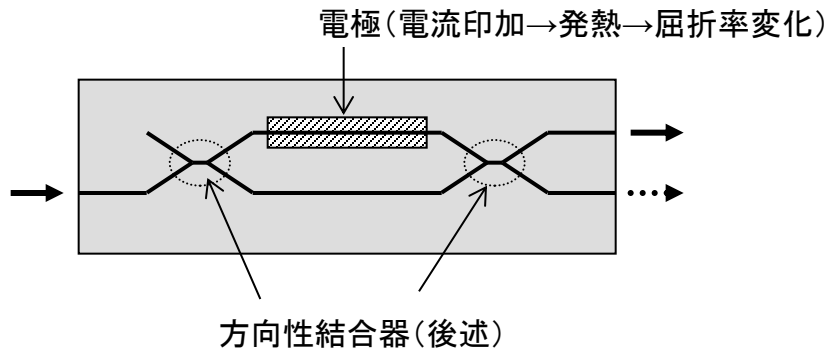
光通信で用いられる多くの光デバイス(変調器、スイッチ、カップラなど)では、光導波路構造が用いられる。

これは、基本的には光ファイバと同様であり、高屈折率のコア部の周りを低屈折率のクラッド部が取り囲む構造となっている。

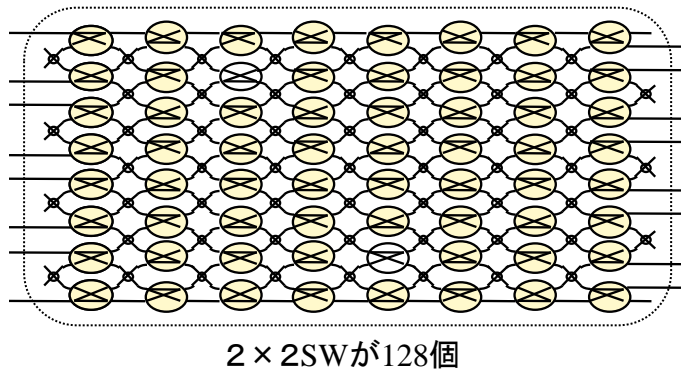
これにより、光を閉じ込めて導波させる。導波原理も光ファイバと同様。コア経路の設定により、任意の経路に光を伝搬させることができる。



例2) マツハツエンダ型光経路スイッチ。



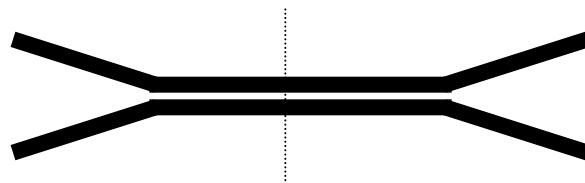
例3) マツハツエンダを多段に組み合わせて8×8光マトリックススイッチ。



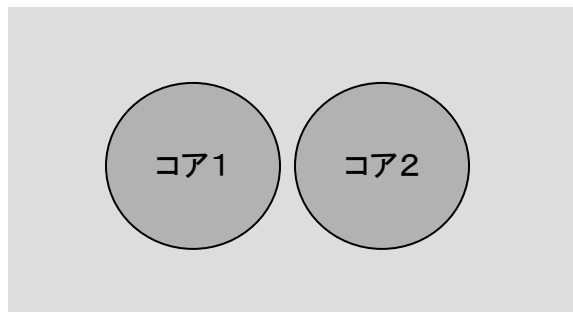
光の干渉を利用するデバイスでは、干渉する光の位相が安定であること、すなわち光学長 (屈折率×長さ) が安定であることが必要となる。光導波路は干渉デバイスに特に有効。

光カップラー(方向性結合器)

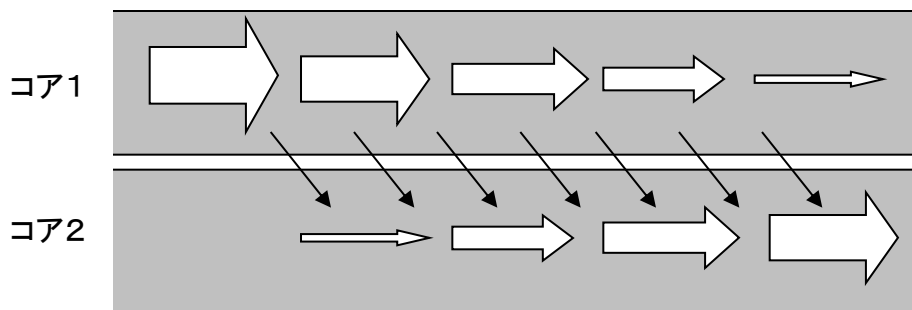
光を分岐・合波するデバイスであり、ビームスプリッタと等価。
2本のコア部を隣接させた構造によりビームスプリッタ機能を実現する。



(断面で見ると)

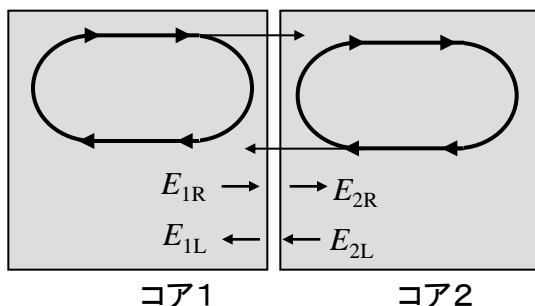


導波光は全反射のためコア部に閉じ込められているが、ごく微小にはクラッド部に滲み出している(第1章「エバネッセント波」)。2つのコア部が近接していると、滲み出した光が相手側のコア部に達し、相手側のコア部を伝播する。これにより、一方のコアから他方のコアへ光の一部が乗り移る。この光の乗り移りは、光の伝播につれて積算される。そこで、長さにより分岐比を設定。



以下、光パワーが乗り移る様子を式で導出。

ここでは、近接した2本の矩形導波路について考える。下図はそれを輪切りにした断面図。光線近似では、光はコア部を往復しながら伝搬する。このとき、端面で折り返す際に、隣りの導波路との境界側では、一部が相手側に透過。境界部はハーフミラーでモデル化。



E は境界面付近の光電場。
添え字 {1, 2} でコア1, 2側であることを、
添え字 {R, L} で右方向 (right)、左方向 (left) であることを、
それぞれ表す。

光の伝播と共に移動する座標系での E の時間変化をみていく。

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{1R} \text{ は } E_{1L} \text{ が } 1 \text{ 往復してきた光なので、} \\ E_{1R}(t + \Delta t) = e^{i\theta} E_{1L}(t) \end{array} \right. \quad \left(\begin{array}{l} \theta: \text{一回りの伝播位相} \\ \Delta t: \text{一回り時間} \end{array} \right)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{1L} \text{ は } (E_{1R} \text{ の反射}) + (E_{2L} \text{ の透過}) \text{ なので、} \\ E_{1L}(t) = i\sqrt{R}E_{1R}(t) + \sqrt{T}E_{2L}(t) \end{array} \right. \quad \left(\begin{array}{l} R: \text{境界面の強度反射率} \\ T: \text{境界面の強度透過率} \end{array} \right)$$



$$E_{1R}(t + \Delta t) = e^{i\theta} \{i\sqrt{R}E_{1R}(t) + \sqrt{T}E_{2L}(t)\} = e^{i(\theta + \pi/2)} \sqrt{R}E_{1R}(t) + e^{i\theta} \sqrt{T}E_{2L}(t)$$

上式において、 $\theta + \pi/2$ は1往復して元の位置に戻ったときの位相シフト。
伝搬モードの場合、これは 2π の整数倍となっているはず(共振条件)。
なので、 $\theta + \pi/2 = 0$ としてよいだろう。

$$E_{1R}(t + \Delta t) = \sqrt{R}E_{1R}(t) + e^{-i\pi/2} \sqrt{T}E_{2L}(t) = \sqrt{R}E_{1R}(t) - i\sqrt{T}E_{2L}(t)$$

さらに、 Δt 間の振幅の変化は大きくないとして、左辺を微小展開。

$$E_{1R}(t + \Delta t) \approx E_{1R}(t) + \frac{dE_{1R}}{dt}(t)\Delta t = \sqrt{R}E_{1R}(t) - i\sqrt{T}E_{2L}(t)$$



$$\frac{dE_{1R}}{dt} = -\frac{1 - \sqrt{R}}{\Delta t} E_{1R} - i\frac{\sqrt{T}}{\Delta t} E_{2L}$$

さらに、境界面での透過は微小な染み出し光によるものなので、透過率は微小、すなわち、 $R \doteq 1$ とする。

$$\frac{dE_{1R}}{dt} = -i\frac{\sqrt{T}}{\Delta t} E_{2L}$$

なお、上記の

- ・コア1内を1往復した光はモード伝搬条件(共振条件)を満たしている
- ・境界面での反射率は1

という想定は、コア1内の伝搬の様子は、コア2の存在には影響を受けず、コア1単独のときと同じ、ということである。

このように、単独で存在している時のモードを基本としてモード間の相互作用を考える手法は、一般に「摂動近似法」あるいは「摂動的取扱い」あるいは「摂動法」という。

上記は、コア1の話。コア2についても同様。

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{2L}(t + \Delta t) = e^{i\theta} E_{2R}(t) \\ E_{2R}(t) = i\sqrt{R}E_{2L}(t) + \sqrt{T}E_{1R}(t) \end{array} \right. \Rightarrow \begin{array}{l} E_{2L}(t + \Delta t) = \sqrt{R}E_{2L}(t) - i\sqrt{T}E_{1R}(t) \\ E_{2L} + \frac{dE_{2L}}{dt}\Delta t = \sqrt{R}E_{2L} - i\sqrt{T}E_{1R} \end{array}$$

$$\frac{dE_{2L}}{dt} = -\frac{1 - \sqrt{R}}{\Delta t} E_{2L} - i\frac{\sqrt{T}}{\Delta t} E_{1R}$$

$$\approx -i\frac{\sqrt{T}}{\Delta t} E_{1R}$$

まとめると、

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dE_{1R}}{dt} = -i \frac{\sqrt{T}}{\Delta t} E_{2L} \\ \frac{dE_{2L}}{dt} = -i \frac{\sqrt{T}}{\Delta t} E_{1R} \end{array} \right. \quad \text{表記を簡略化} \quad \longrightarrow \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{dE_1}{dt} = -i\kappa E_2 \quad \textcircled{1} \\ \frac{dE_2}{dt} = -i\kappa E_1 \quad \textcircled{2} \end{array} \right. \quad \left(\begin{array}{l} E_1 \equiv E_{2R} \\ E_2 \equiv E_{2L} \end{array} \quad \kappa \equiv \frac{\sqrt{T}}{\Delta t} \right)$$

これは解析的に解けます。

$$\frac{d^2 E_1}{dt^2} = -i\kappa \frac{dE_2}{dt} = -\kappa^2 E_1 \quad \longrightarrow \quad E_1(t) = A \cos(\kappa t + \phi) \quad (A, \phi : \text{定数})$$

$\begin{array}{ccc} \uparrow & & \uparrow \\ \textcircled{1} & & \textcircled{2} \end{array}$

②に代入

$$\begin{aligned} \frac{dE_2}{dt} &= -i\kappa A \cos(\kappa t + \phi) \\ E_2(t) &= -iA \sin(\kappa t + \phi) \end{aligned}$$

まとめると、

$$\left\{ \begin{array}{l} E_1(t) = A \cos(\kappa t + \phi) \\ E_2(t) = -iA \sin(\kappa t + \phi) \end{array} \right.$$

定数 $\{A, \phi\}$ は初期条件から求まる。

初期条件は、コア1のみに光が存在、とする: $E_1(0) = E_0 \quad E_2(0) = 0$

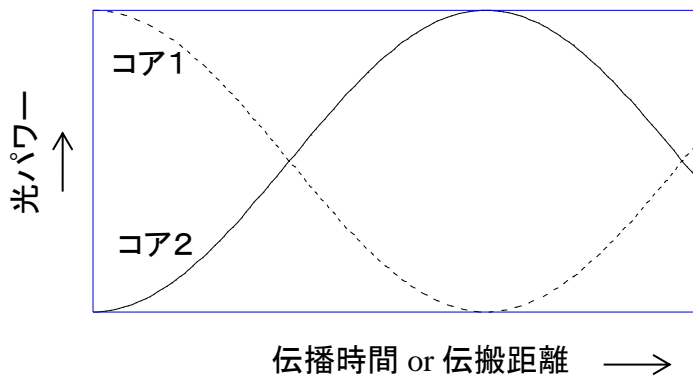
$$\left\{ \begin{array}{l} E_1(0) = A \cos \phi = E_0 \\ E_2(0) = -iA \sin \phi = 0 \end{array} \right. \longrightarrow \left. \begin{array}{l} A = 0 \text{ または } \sin \phi = 0 \text{ であるが、} A = 0 \text{ は解として無意味。} \\ \text{よって、} \sin \phi = 0 \longrightarrow \phi = 0 \text{ または } \pi \end{array} \right\} \begin{array}{l} \downarrow \\ \{A = E_0, \quad \phi = 0\} \\ \{A = -E_0, \quad \phi = \pi\} \end{array}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} E_1(t) = E_0 \cos(\kappa t) \\ E_2(t) = -iE_0 \sin(\kappa t) \end{array} \right. \quad \text{または、} \quad \left\{ \begin{array}{l} E_1(t) = -E_0 \cos(\kappa t + \pi) = E_0 \cos(\kappa t) \\ E_2(t) = iE_0 \sin(\kappa t + \pi) = -iE_0 \sin(\kappa t) \end{array} \right.$$

コア2へ透過する光は位相シフト

光パワーは、

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1(t) \propto |E_1(t)|^2 = |E_0|^2 \cos^2(\kappa t) \\ P_2(t) \propto |E_2(t)|^2 = |E_0|^2 \sin^2(\kappa t) \end{array} \right.$$



分岐比は kt で決まる。

なお、ここでは光を光線的に扱って光カップラーの動作原理を説明したが、厳密には、与えられた境界条件のもとでMaxwell方程式を解く必要がある。ここでの説明は、直感的な簡易版。

演習問題

- [4.1] 光の波長を $1.5\mu\text{m}$ 、ガラスの屈折率を1.5、光速を $3 \times 10^8\text{m/s}$ 、とする。講義で用いたモデル式に基づいて、ファイバーが単一モードとなるコア径を答えよ。
- [4.2] 光通信システムでは主に単一モードファイバー、光エネルギー伝送や装飾用にはマルチモードファイバー、が用いられる。その理由を述べよ。