

11.光波回路

マイクロ波、ミリ波に対して、圧倒的に波長が短い光波帯では、誘電体導波路が用いられる。また、これにともなって、動作原理が特徴的な機能素子が多く存在する。光波帯における典型的な機能素子の動作原理を説明する。

11.1.誘電体導波路(結合導波路)による方向性結合器

二本の誘電体導波路を近接して配置すると、導波路間に光波電磁界の結合が生じる。二本の導波路構造が同一の場合、対称結合導波路と呼ばれる。

対称結合導波路では、伝搬する光波電磁界(固有モード)が、対象軸に対して対称なモード(偶モード)と反対称なモード(奇モード)になる。また、偶モードと奇モードは、それぞれ異なる伝搬定数 β_e 、 β_o で伝搬する。

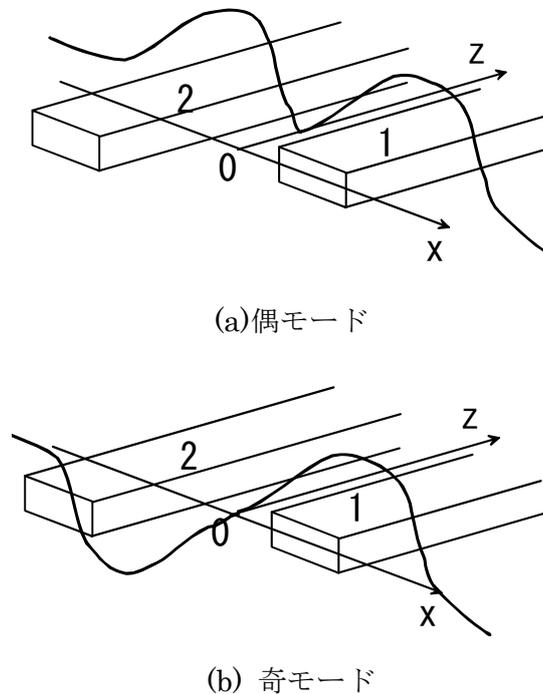


Fig. 11.1 対称結合導波路における偶・奇モードの界分布

導波路の構造は、 $x=0$ に関して対称とする。偶モードの横方向(x 方向)の電界分布は $x=0$ に関して対称な関数なので、次のようにおくことができる。

$$\begin{aligned} f_e(x) & \quad x > 0 \text{ (導波路1)} \\ f_e(-x) & \quad x < 0 \text{ (導波路2)} \end{aligned} \quad (11.1)$$

また、奇モードの横方向(x 方向)の電界分布は $x=0$ に関して反対称な関数なので、次のように表される。

$$\begin{aligned} f_o(x) & \quad x > 0 \text{ (導波路1)} \\ -f_o(-x) & \quad x < 0 \text{ (導波路2)} \end{aligned} \quad (11.2)$$

したがって、それぞれの導波路中で、伝搬に伴って電界分布は次のように変化する。

導波路 1 :

$$E_1(x, z) = E_e f_e(x) e^{-j\beta_e z} + E_o f_o(x) e^{-j\beta_o z} \quad (11.3)$$

導波路 2 :

$$E_2(x, z) = E_e f_e(-x) e^{-j\beta_e z} - E_o f_o(-x) e^{-j\beta_o z} \quad (11.4)$$

[近似]

ここで、横方向の電界分布を次のように近似する。

$$f_e(x) \approx f_o(x) \approx f(x) = f(-x) \quad (11.5)$$

[定式化]

散乱行列の代わりに、入力位置における電界分布 $E_1(x, 0)$ 、 $E_2(x, 0)$ を、任意の伝搬位置 z における $E_1(x, z)$ 、 $E_2(x, z)$ と関係付ける次の行列 $[T]$ を考える。

$$\begin{pmatrix} E_1(x, z) \\ E_2(x, z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1(x, 0) \\ E_2(x, 0) \end{pmatrix} \quad (11.6)$$

ここで、 $|E(x, z)|^2$ が、導波路中の光パワーに比例するので、 E_1 や E_2 は散乱行列を定義する a 、 b と同じような意味をもつ。

反射は小さく、無視できるものとして、つぎのようにして行列要素を決定する。

(i) 入力として $\begin{pmatrix} E_1(x, 0) \\ E_2(x, 0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(x) \\ 0 \end{pmatrix}$ を与えて T_{11} と T_{21} を求める

(ii) 入力として $\begin{pmatrix} E_1(x, 0) \\ E_2(x, 0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ f(-x) \end{pmatrix}$ を与えて T_{12} と T_{22} を求める

(i) $E_e = E_o = 1/2$ とすると、 $E_1(x, 0) = f(x)$ 、 $E_2(x, 0) = 0$ であるから

$$\begin{aligned} T_{11} &= \cos\left(\frac{\beta_e - \beta_o}{2} z\right) e^{-j\frac{\beta_e + \beta_o}{2} z} \\ T_{21} &= -j \sin\left(\frac{\beta_e - \beta_o}{2} z\right) e^{-j\frac{\beta_e + \beta_o}{2} z} \end{aligned} \quad (11.7)$$

(ii) $E_e = -E_o = 1/2$ とすると、 $E_1(x, 0) = 0$ 、 $E_2(x, 0) = f(x)$ であるから

$$\begin{aligned} T_{12} &= -j \sin\left(\frac{\beta_e - \beta_o}{2} z\right) e^{-j\frac{\beta_e + \beta_o}{2} z} \\ T_{22} &= \cos\left(\frac{\beta_e - \beta_o}{2} z\right) e^{-j\frac{\beta_e + \beta_o}{2} z} \end{aligned} \quad (11.8)$$

すなわち、行列 $[T]$ は次のように定まる。

$$\begin{pmatrix} T_{11} & T_{21} \\ T_{12} & T_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\beta_e - \beta_o}{2} z\right) & -j \sin\left(\frac{\beta_e - \beta_o}{2} z\right) \\ -j \sin\left(\frac{\beta_e - \beta_o}{2} z\right) & \cos\left(\frac{\beta_e - \beta_o}{2} z\right) \end{pmatrix} e^{-j\frac{\beta_e + \beta_o}{2} z} \quad (11.9)$$

ここで $e^{-j\frac{\beta_e + \beta_o}{2} z}$ は、伝搬にともなう平均的な位相変化を表す項である。

結合係数を $\kappa = \frac{\beta_e - \beta_o}{2}$ と定めると、

$$[T] = \begin{pmatrix} \cos \kappa z & -j \sin \kappa z \\ -j \sin \kappa z & \cos \kappa z \end{pmatrix} e^{-j\frac{\beta_e + \beta_o}{2} z} \quad (11.10)$$

※bar 出力と cross 出力の間に、常に $\pi/2$ の位相差があることに注意。

(1) 伝搬距離が $\kappa z = \pi/2$ を満足するとき

$$[T] = \begin{pmatrix} 0 & -j \\ -j & 0 \end{pmatrix} e^{-j\frac{\beta_e + \beta_o}{2} z} \quad (11.11)$$

・一方の導波路から他方の導波路にパワーが完全に推移する

・伝搬距離 $z = \frac{\pi}{\kappa} = \frac{\pi}{\beta_e - \beta_o}$ は完全結合長

(2) 伝搬距離が $\kappa z = \pi/4$ を満足するとき

$$[T] = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -j \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -j \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} e^{-j\frac{\beta_e + \beta_o}{2} z} \quad (11.12)$$

・一方の導波路から入力したパワーが1対1に分岐する (3dB 方向性結合器)

11.2. アレイ導波路格子(AWG)

光波回路で用いられる合分波素子の一つ。平面導波路構造で形成される。

[動作原理]

隣り合う導波路間の光路長差を ΔL 、出射導波路間隔を d とすると、 i 番目と $i+1$ 番目の導波路から角度 θ 方向に出射した光波の位相差は、

$$(n_s d \sin \theta + n_c \Delta L) k_0 \quad (11.13)$$

ただし、 n_c はアレイ導波路の屈折率 n_s は出射領域の屈折率を表す。したがって、次の条件が成り立つ角度 θ 方向で、全ての回折波が同位相で重ね合される。

$$(n_s d \sin \theta + n_c \Delta L) k_0 = 2m\pi \quad (m \text{ は回折の次数を表す整数}) \quad (11.14)$$

この式を次のように変形する。

$$n_s d \sin \theta + n_c \Delta L = m \lambda$$

$$\sin \theta = \frac{m \lambda - n_c \Delta L}{n_s d} \quad (11.15)$$

式(11.15)から、波長が異なると回折角度 θ が異なることがわかる。すなわち、分波器として動作する。

実際には、入出力側に自由空間に相当するスラブ領域を設け、レンズとして作用させ、各出力導波路に光波を均一分岐させる必要がある。

分散(波長依存性)

近接した二つの波長で、回折条件を考える。

$$n_s d \sin \theta_1 + n_c \Delta L = m \lambda_1$$

$$n_s d \sin \theta_2 + n_c \Delta L = m \lambda_2$$

$$m(\lambda_1 - \lambda_2) = m \Delta \lambda = n_s d (\sin \theta_1 - \sin \theta_2) = n_s d (\sin \theta_1 - \sin \theta_1 \cos \Delta \theta - \cos \theta_1 \sin \Delta \theta) \approx -n_s d \Delta \theta \cos \theta$$

したがって、近接する二つの波長で回折角度の違いは、次の式で関係付けられる。

$$\therefore \Delta \lambda = \frac{-n_s d \cos \theta}{m} \Delta \theta \quad (11.16)$$

焦点距離 f のレンズで集光すると、集光位置の変位 Δx の波長依存性は次のようになる。

$$\Delta x = f \Delta \theta = \frac{-mf}{n_s d \cos \theta} \Delta \lambda$$

$$\therefore \frac{\Delta x}{\Delta \lambda} = \frac{-mf}{n_s d \cos \theta} \quad (11.17)$$

これが、波長分解能を決める。

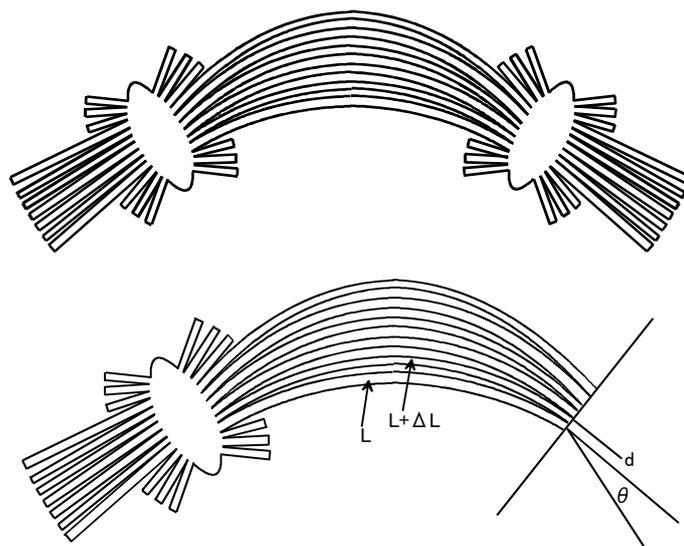


Fig. 11.2 アレー導波路格子 AWG