

광도파관에서 자성박막에 의한 모드 변환 (Mode Conversion in Magneto-Optic Thin-Film Waveguides)

鄭 相 九*, 林 漢 祚*

(Sang Koo Chung and Han Jo Lim)

要 約

자성체 박막을 갖는 광도파관에서 전자파의 전파를 이론적으로 조사하였다. 광도파관이 갖는 혼합모드의 전계 및 자계의 분포, 또한 그들의 위상속도를 광도파관의 기본 모드의 위상차와 자성박막의 파라데이 회전각으로 나타냈으며 파라데이 효과에 의한 위상 특성곡선의 분할에 대하여 논하였다.

그리고 혼합모드의 이론으로 모드변환 행렬을 도출한 결과, 전자파의 진행 거리에 따른 모드변환이 광도파관에서는 bulk 매질과는 다름을 나타내었다.

Abstract

We report a theoretical study on wave propagation in magneto-optic thin-film waveguides. The field distribution and phase velocity of the guided hybrid modes are analyzed in terms of the phase difference of basic system modes and the Faraday rotation of the magneto-optic thin film.

Splitting of the phase constant curves due to the Faraday rotation is discussed. The present hybridmode analysis leads to a conversion matrix which shows that the distance dependence of the mode conversion in the guide is different from that in the bulk medium.

I. 序 論

YIG와 같이 투명한 자성체 박막을 광도파관으로 사용하면 박막의 자기광 파라데이 효과에 의하여 진행파의 TE성분과 TM성분사이에 결합이 일어나므로 이를 이용하면 집적광학용 모드변환 및 변조기를 제작할 수 있다. 그러나 이러한 박막형 광도파관의 모드변환에 대한 종래의 해석은 결합모드 이론^{1,2}에 의존하여 박막내의 진행파를 사실상 평면파로 취급하기 때문에

진행파의 각 성분간의 위상관계 및 모드변환의 조건등을 설명할 수가 없었다.

우리는 지난번 논문^{3,4}에서 광도파관의 기관, 박막 및 박막 상층중에서 어느 한층이라도 이방성(anisotropic) 및 회전성(gyrotropic)을 나타내는 결합매질로 구성되면 광도파관의 고유모드는 TE성분과 TM성분이 각기 다른 비율로 혼합된 두개의 혼합모드가 되며 또 이들 혼합모드의 TE 및 TM 성분은 각기 다른 위상속도로 광도파관속을 진행하게 됨을 밝혔으며 구체적으로 광도파관의 기관이 자성체로 구성된 경우⁴를 그 예로 취급하였다.

본 논문에서는 먼저 복굴절과 자기광 효과를 갖는 균일한 bulk 매질에서 임의의 방향으로 진행하는 전자파가 어떻게 혼합모드를 이루는가를 설명하고 그 결과를 광도파관에 적용하여 광도파관의 자성체 박막에 의한 자기광 효과가 혼합모드의 전파 및 모드변환에 미치는 영향을 혼합모드 이론에 입각하여 해석하고 그

*正會員, 亞洲大學校 電子工學科

(Dept. of Electronics Eng., College of Eng.,
Ajou Univ.)

接受日字: 1983年 8月 22日

(※본 연구는 1982년도 문교부 기초과학 연구비로
수행된 것임.)

결과를 결합모드 이론의 그것과 비교 검토하려고 한다.

II. 복굴절과 자기광 효과를 나타내는 균일한 매질에서의 전자파

복굴절과 자기광 효과를 나타내는 매질에서 광의 주파수로 진행하는 전자파는 매질의 비투자율을 $\mu/\mu_0 = 1$ 로 택하는 대신 그 유전율을 다음의 감수율 텐서로 나타낼 수 있다. [5]

$$\epsilon = \epsilon [\tilde{K}] = \epsilon_0 \begin{bmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & -jr \\ 0 & jr & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 매질은 손실이 없으며 종형(longitudinal configuration)으로 되어 있다고 가정하였다. 매질내에서의 전계(혹은 자계)가

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp(j[\omega t - k_0(z + \beta x)]) \quad (2)$$

로 주어진다고 가정하면 전자파의 파동 방정식은 다음의 특성식이 만족될 때만 존재하게 된다.[3]

$$\Delta \equiv \begin{bmatrix} g_i^2 - K_{xx} & 0 & -\beta_i g_i \\ 0 & g_i^2 + \beta_i^2 - K_{yy} & -jr \\ -\beta_i g_i & jr & \beta_i^2 - K_{zz} \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

(2)식에서 $k_0 = \omega(\mu_0 \epsilon_0)^{1/2}$ 이며 (3)식에서 ℓ 은 a 혹은 b로서 특성식이 주는 두개의 값을 각각 나타내기 위한 것인데 (1)식의 감수율 텐서중 비대각선항이 $r \neq 0$ 인 경우는 TE 성분 E_y 와 TM 성분 E_z 및 E_x 사이에는 결합이 생기게 되므로 이 매질의 고유모드는 TE 및 TM 성분이 서로 다른 비율로 혼합된 두개의 혼합모드, 즉 a 및 b모드가 되며 그 위상속도는 (3)식으로 주어진다.

(1)식에서 감수율 텐서의 대각선 항들의 상대적인 크기는 앞으로 계산의 편의를 위하여 $K_{yy} > K_{zz} = K_{xx}$ 라고 가정한다. 그러면 (3)식의 조건으로부터 우리는

$$\beta_i^2 = \frac{1}{2} \left\{ (K_{yy} + K_{zz}) - 2g_i^2 \pm \left[(K_{yy} - K_{zz})^2 + 4r^2 \left(1 - \frac{g_i^2}{K_{xx}}\right) \right]^{1/2} \right\} \quad (4)$$

을 얻을 수 있다. 여기서 $\ell = a$ 일 때는 “-” 부호를, 그리고 $\ell = b$ 일 때는 “+” 부호를 택하기로 하자. (4)식에서 일반적으로 $K_{zz} > |r|$ 이므로 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$g_a^2 \approx K_{zz} - \beta_a^2 - \frac{r^2 \beta_a^2}{K_{zz}(K_{yy} - K_{zz})} \quad (5)$$

$$g_b^2 \approx K_{yy} - \beta_b^2 + \frac{r^2 \beta_b^2}{K_{zz}(K_{yy} - K_{zz})} \quad (6)$$

만약 매질이 자기광 파라데이 효과를 나타내지 않는다면, 즉 $r=0$ 이면 이 매질의 고유모드는 순수 TE와 순수 TM이 되며, [3] (5) 및 (6)식은 각각

$$g_a^2 = K_{zz} - \beta_a^2 \quad (7)$$

$$g_b^2 = K_{yy} - \beta_b^2 \quad (8)$$

이 된다.

그림 1에 (1)식으로 주어진 매질과 굴절율 n_i 의 등방성 매질이 이루는 경계면에서의 전자파의 전파를 나타내었다. 그림에서 등방성 매질의 고유편광 모드는 TE 및 TM이므로 입사파는 각각 (E_0, H_0) 와 (E_m, H_m) 로, 그리고 반사파는 각각 (E'_0, H'_0) 및 (E'_m, H'_m) 로 나타내었다.

이방성 매질에서의 TE와 TM간의 결합때문에 등방성 매질에서 반사파는 입사파의 성분뿐 아니라 다른 편광 성분도 갖게 되어 혼합모드를 이루며 그 크기는 $x=0$ 의 경계조건에 의하여 구할 수 있다.[6] 그러나 전자파의 위상속도는 그림에서 나타낸 것처럼 굴절율 n_i 와 입사각 θ 에 의하여 결정된다. 경계면 $x=0$ 에서 전자파의 z축방향의 위상속도 g 는 연속이어야 하므로

$$g^2 = g_a^2 = g_b^2 \approx g_i^2 = g_m^2 \quad (9)$$

이 되며 이 관계를 (4)식에 이용하면

$$\beta_{a,b} \approx \beta_0 \mp \Omega \quad (10)$$

를 얻을 수 있다.

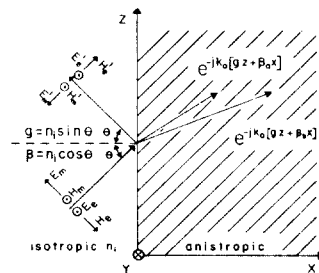


그림 1. 이방성 매질 경계면에서의 전자파의 전파
Fig. 1. Wave propagation at the boundary of anisotropic medium.

여기서 -부호는 a모드, 그리고 +부호는 b모드를 나타내며

$$\beta_o = \frac{\beta_e + \beta_m}{2} \tag{11}$$

$$\Delta\beta = \beta_e - \beta_m \tag{12}$$

$$\theta_F = \frac{r}{2\sqrt{K_{xx}}} \tag{13}$$

$$\Omega = \left[\left(\frac{\Delta\beta}{2} \right)^2 + \theta_F^2 \right]^{1/2} \tag{14}$$

이다. (10)식은 복굴절 ($\Delta\beta \neq 0$)과 자기광효과 ($\theta_F \neq 0$)를 함께 갖는 bulk 매질에서 혼합모드의 x방향의 위상 속도가 어떻게 나타나는가를 보여주는데 그림 1의 경계면에서 입사각 $\theta = 0$ 인 경우, 즉 $g = 0$ 때의 이미 잘 알려져 있는 결과^{7)와 일치한다.}

그림 2에 (10)식으로 주어진 혼합모드의 위상 속도를 비유적으로 나타내었다.

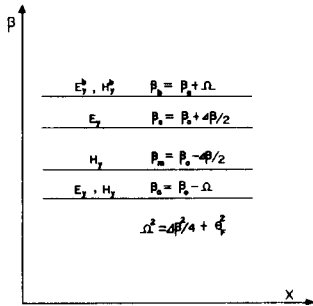


그림2. Bulk 매질에서 복굴절과 자기광 효과에 의한 혼합모드의 위상속도

Fig. 2. Phase-constant curves of bulk medium with birefringence and Faraday rotation.

그림에서 매질이 자기광 효과가 없을때 ($\theta_F = 0$)는 TE 모드의 E_y 는 β_e 의 위상속도를, TM모드의 H_y 는 β_m 의 위상속도를 갖는 반면에 혼합모드가 되면 자기광 효과에 의하여 TE 성분과 TM성분이 결합하므로 a모드에서는 (E_y^+, H_y^+), 그리고 b모드에서는 (E_y^-, H_y^-)의 성분을 가지며 각각 β_a 및 β_b 의 위상속도로 진행하게 된다. 혼합모드에서 TM 성분과 TE성분의 비는 (1)식의 감수율 텐서를 갖는 매질에서 전자파의 파동 방정식을 만족하는 전계 및 자계 성분간의 관계식으로 부터 얻을 수 있으며 그 결과를 다음과 같다!⁴⁾

$$Y_1 = \frac{H_y^+}{E_y^+} = \sqrt{\frac{\epsilon_o}{\mu}} \frac{\alpha_i \beta_i K_{xx}}{g_i^2 - K_{xx}} \tag{15}$$

$$\alpha_i = \frac{E_z^+}{E_y^+} = \frac{\beta_i^2 + g_i^2 - K_{yy}}{-j r} \tag{16}$$

따라서(9)및 (10)식을 (15)및 (16)식에 사용하면 Y_1 은 다음의 근사식으로 주어진다.

$$Y_{a, b} = j Y_o \frac{\frac{\Delta\beta}{2} \pm \Omega}{\theta_F} \tag{17}$$

$$Y_o = \sqrt{\frac{\epsilon_o K_{xx}}{\mu}} \tag{18}$$

일반적으로 $\frac{\Delta\beta}{2} \gg \theta_F$ 이므로 Y_a 는 대단히 큰 값인데 반하여 Y_b 는 대단히 작은 값을 알 수 있으며 이때 a모드는 TM-like 그리고 b모드를 TE-like 모드라고 부른다.¹⁸⁾

한편 TE-TM모드결합을 알기 위하여는 그림 2에서 공통위상 $e^{-j\beta_o k_o x}$ 를 고려하지 않으면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} E_y^+(x) \\ H_y^+(x) \end{bmatrix} = F_1(z) \begin{bmatrix} 1 \\ Y_1 \end{bmatrix} \exp(\pm j \Omega k_o x) \tag{19}$$

여기서 +부호는 a 모드, 그리고 -부호는 b 모드에 해당하며 $F_1(z)$ 는 (2)식에서 X의 항수를 제외한 나머지 부분이다. (19)식으로 부터 $E_y(x) = E_y^+(x) + E_y^-(x)$ 및 $H_y(x) = H_y^+(x) + H_y^-(x)$ 를 구한 다음 $F_a(z)$ 및 $F_b(z)$ 를 $E_y(0)$ 및 $H_y(0)$ 로 나타내고 (16)식을 대입하면 다음의 모드결합 행렬을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} E_y(x) \\ H_y(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Omega k_o x - j \frac{\Delta\beta \sin \Omega k_o x}{2 \Omega} \\ -Y_o \frac{\theta_F \sin \Omega k_o x}{\Omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_y(0) \\ H_y(0) \end{bmatrix} \tag{20}$$

(20)식에서 θ_F 가 $\frac{\Delta\beta}{2}$ 에 가까운 값을 갖지 않는 한 모드 변환율은 θ_F / Ω 에 비례하므로 대단히 미미함을 알 수 있다.

III. 자성 박막을 갖는 광도파관에서의 혼합모드

그림 3에 자성박막을 갖는 도파관 구조를 나타내었다. 기관 및 박막상층은 각각 감수율이 K_s 및 K_t 인 등방성 매질이고 박막은 순수 파라데이 효과를 나타내는 투명한 자성체 매질로 그 감수율은 다음식으로 주어진다.

$$[\tilde{K}_r] = \begin{bmatrix} K_r & 0 & 0 \\ 0 & K_r & -jr \\ 0 & jr & K_r \end{bmatrix} \quad (21)$$

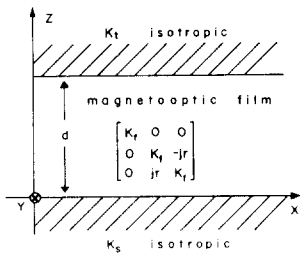


그림 3. 자기광 효과를 갖는 광도파관
Fig. 3. Magneto-optic thin-film waveguide.

광도파관에 존재하는 TE 성분 E_y (혹은 TM 성분 H_y) 는 다음식

$$E_y = E_0 \exp[j(\omega t - \beta_0 x)] \begin{cases} \cos(p_s z) \exp(p_s z) & : z < 0 \\ \cos(h_r z + \phi) & : 0 \leq z \leq d \\ \cos \Psi \exp[-p_t(d-z)] & : z > d \end{cases} \quad (22)$$

으로 나타낼 수 있으며 (22)식을 (2)식과 비교하면 $(p_s/k_0)^2 = -g_s^2$, $(p_t/k_0)^2 = -g_t^2$ 및 $(h_r/k_0)^2 = g_r^2$ 임을 알 수 있으며 여기서 s, t 및 r 는 각각 기관, 박막 상층 및 박막을 의미한다.

따라서 각 매질의 감수율 텐서로 결정되는 특성식 (3)으로 부터 a 및 b 혼합모드에 대하여 다음 표 1을 얻게 된다.

표 1. 그림 3의 광도파관 각층에서의 위상속도
Table 1. Phase constants for different layer media of the guide in Fig. 3.

혼합모드	a	b
$(p_r/k_0)^2$	$\beta_a^2 - K_t$	$\beta_b^2 - K_t$
$(h_r/k)^2$	$K_r - (\beta_a - \theta_r)^2$	$K_r - (\beta_b + \theta_r)^2$
$(p_s/k_0)^2$	$\beta_a^2 - K_s$	$\beta_b^2 - K_s$

표 1에서 θ_r 는 자성 박막의 파라데이 회전각을 k_0 로 나눈 값이며 (13)식으로 부터 다음 식으로 주어진다.

$$\theta_r = \frac{r}{2\sqrt{K_r}} \quad (23)$$

한편 혼합모드의 TE 성분과 TM 성분을 광도파관의 $z=0$ 및 $z=d$ 에서 연속이어야 한다는 경계조건으로부터 다음의 위상 특성식을 얻을 수 있다.^[9]

$$TE: \tan^{-1} \frac{p_s}{h_r} + \tan^{-1} \frac{p_t}{h_r} + m\pi = 2\pi t h_r \quad (24)$$

$$TM: \tan^{-1} C_s \frac{p_s}{h_r} + \tan^{-1} C_t \frac{p_t}{h_r} + m\pi = 2\pi t h_r \quad (25)$$

여기서

$$C_s = \frac{K_r}{K_s}, \quad C_t = \frac{K_r}{K_t}, \quad t = d/\lambda_0 \quad \text{이며, } m \text{ 은 정수이고 } \lambda_0 \text{ 는 전자파의 대기중의 파장이다.}$$

만약 박막이 자성매질이 아니고 순수 등방성 매질 ($r=0$)인 경우에는 모드간의 결합이 일어나지 않으므로 a모드는 순수 TM 그리고 b모드는 순수 TE 가 되며 이때 TE 및 TM모드를 광도파관의 기본모드^[10]라고 한다.

(24)식 및 (25)식에 의하여 결정되는 위상 특성곡선은 같은 m값에 대하여 TE가 TM보다 항상 위상이 크며 그 위상속도의 차이는 다음의 근사식으로 주어진다.^[13]

$$\Delta\beta = \frac{(K_r - \beta_e^2)^{1/2}}{\beta_e(2\pi + \sum Q_i)} \sum_i \tan^{-1} \frac{\sqrt{(K_r - \beta_e^2)(\beta_e^2 - K_i)}}{\beta_e^2} \quad (26)$$

$$Q_i = \frac{1}{\sqrt{\beta_e^2 - K_i}} - \frac{1}{\beta_e^2 \left(\frac{1}{K_r} + \frac{1}{K_i} \right) - 1} \quad (27)$$

이미 i 는 s 및 t를 의미한다.

그림 4에 $K_r=4.48$, $K_s=2.5$ 및 $K_t=1.0$ 인 등방성매질로 구성된 광도파관의 기본모드 즉 TE_m 및 TM_m 의 위상곡선을 나타내었다, 같은 m에 대하여 TE_m 은 TM_m 보다 항상 위상이 크며 그 위상차는 박막 두께의 증가에 따라 점점 감소함을 알 수 있다. 이와같이 등방성 매질로 구성된 광도파관에서 기본모드의 위상차가 $\Delta\beta = \beta_e - \beta_m > 0$ 인 이유는 광도파관의 박막이 기관이나 박막 상층보다 큰 굴절률을 갖도록 구성되기 때문이다.

이러한 광도파관에서의 전자파의 전파는 II장에서 취급한 복굴절율을 갖는 bulk 매질에서의 그것과 유사하다.

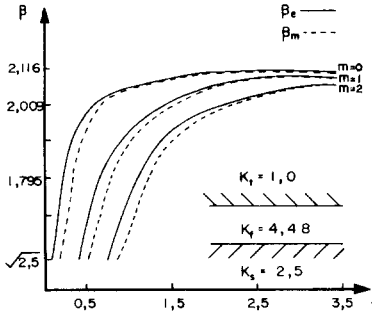


그림4. 동방성 매질로 구성된 광도파관의 위상특성 곡선

Fig. 4. Phase-constant curves for the guide structure shown in inset.

한편 박막의 자기광효과는 표 1에서 $\theta_F \neq 0$ 로 나타나며 (24)식과 (25)식에 표 1의 값들을 사용하면 TE_m 기본모드는 TE_m^a 및 TE_m^b 혼합모드를, 그리고 TM_m 기본모드는 TM_m^a 및 TM_m^b 혼합모드를 이루게 된다.

그림 5에 기본모드 E_y 와 H_y 가 자성박막에 의하여 혼합모드로 분할(splitting) 되었을때 각 성분의 위상특성곡선을 비유적으로 나타내었다. 그림에서의 위상속도는 bulk 매질이 복굴절과 함께 자기광 효과를 갖는 경우 생성되는 혼합모드의 위상속도(그림2)를 광도파관에서 기본모드가 위상차를 갖는 경우에 적용하여 박막의 자기광 효과가 일으키는 혼합모드가 (24) 및 (25)식의 위상특성식을 만족하도록 나타낸 것이다. 따라서 bulk 매질일 때는 어느 한 혼합모드의 TE성분과 TM성분 즉 (E_y^a, H_y^a) 혹은 (E_y^b, H_y^b)는 같은 위상속도를 갖는데 반하여 광도파관에서는 E_y^a 와 H_y^a 및 E_y^b 와 H_y^b 가 그림 5에 나타낸 바와 같이 모두 서로 위상속도를 갖게 된다.

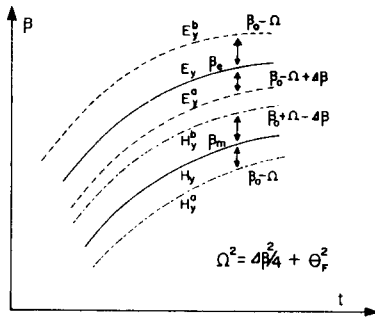


그림5. 자성 박막의 파라데이 효과에 의한 위상특성 곡선의 분할

Fig. 5. Splitting of phase-constant curves due to the Faraday effect of the magneto-optic thin-film.

그림 5에서 광도파관의 혼합모드 성분을 다음의 관계식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} E_y^a(x) \\ H_y^a(x) \end{pmatrix} = F_a(z) \begin{pmatrix} \exp(-j\Delta\beta k_0 x) \\ Y_a \exp(j\Delta\beta k_0 x) \end{pmatrix} \exp(j\Omega k_0 x) \quad (28)$$

$$\begin{pmatrix} E_y^b(x) \\ H_y^b(x) \end{pmatrix} = F_b(z) \begin{pmatrix} 1 \\ Y_b \exp(j\Delta\beta k_0 x) \end{pmatrix} \exp(-j\Omega k_0 x) \quad (29)$$

여기서 a모드가 TM-like 모드이고 b모드는 TE-like 모드이므로 Y_a 및 Y_b 는 (15)식에서 β_a 를 H_y^a 의 위상으로 그리고 β_b 는 E_y^b 의 그것을 택하면 bulk 매질에서와 같이 (17)식으로 주어진다. 또 이때 광도파관에서 혼합모드간에 결합이 일어나기 위해서는 혼합모드의 z방향의 위상속도는 bulk 매질에서 처럼 (9)식을 만족한다고 가정하였다. (28)식 및 (29)식을 사용하면 모드 결합 행렬식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} E_y^b(x) \\ H_y^b(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\Omega_F x - j \frac{\theta_F}{2\Omega} \sin\Omega_F x \\ -Y_b \frac{\theta_F}{\Omega} \exp(j\Delta\beta k_0 x) \sin\Omega_F x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_y(0) \\ H_y(0) \end{pmatrix} \exp(j\Delta\beta k_0 x) \left[\cos\Omega_F x + j \frac{\Delta\beta}{2\Omega} \sin\Omega_F x \right] \quad (30)$$

여기서 $\Omega_F = k_0(\Omega - \Delta\beta/2)$ 이다.

TE-TM변환을 보기 위하여 초기 조건으로서 (30)식에서 $E_y(0) = 1, H_y(0) = 0$ 로 놓으면 TE 및 TM의 전력(power)

$$P_e(x) = 1 - P_m(x) \quad (31)$$

$$P_m(x) = \left(\frac{\theta_F}{\Omega}\right)^2 \sin^2\Omega_F x \quad (32)$$

을 얻는다. 따라서 전력변환 효율(power-conversion efficiency) F와 최대 모드 결합을 위한 최소거리 L은

각각 다음식으로 주어진다.⁹⁾

$$F = \left(\frac{\theta_F}{Q}\right)^2 = \frac{S^2}{1+S^2} \quad (33)$$

$$L = \frac{\lambda_0}{2\Delta\beta\sqrt{1+S^2-1}} \quad (34)$$

여기서 $S = \theta_F / (\Delta\beta/2)$ 이다.

같은 방법으로 TM-TE 변환도 꼭 같음을 알 수 있다.

IV. 실험결과와의 비교

(33)식 및 (34)식에서 보면 광도파관의 자성체 박막이 갖는 자기광 효과 θ_F 와 기본모드의 위상차 $\Delta\beta$ 의 비 S 가 모드결합에서 가장 중요한 파라미터임을 알 수 있다. S 가 1보다 작은 매질에서는 모드 변환 효율이 작을뿐만 아니라 최대 모드 결합을 위한 최소거리 L 이 S 값의 감소에 따라 급격히 증가한다. 한편 결합 모드 이론에 의하면 전력이 (32)식에서 Q_F 대신에 Q 의 합수로 나타나므로 L 은 (34)식 대신에 $\frac{\lambda_0}{2\Delta\beta(1+S^2)^{\frac{1}{2}}}$ 으로 주어진다.⁹⁾ 따라서 파라데이 효과가 적은 매질인 경우에도 자성체 박막의 길이가 $\frac{\lambda_0}{2\Delta\beta}$ 이상의 값에서는 항상 최대 모드결합을 얻을 수 있다. 그러나 실제로 $K_s = 2.5$ 인 $Gd_3Ga_5O_{12}$ 기판의 (111) 방향으로 성장시킨 두께 $d = 3.5\mu m$ 의 $Y_3Ga_5O_{12}$ 단결정 박막($K_F = 4.48$)으로 구성된 광도파관에서 파장 $1.152\mu m$ 의 He Ne 레이저 광이 갖는 TE_0 및 TM_0 모드의 전파 상수가 각각 $\beta_e = 2.10988$ 및 $\beta_m = 2.10942$ 이고 따라서 $\Delta\beta = 4.6 \times 10^{-4}$ 임이 실험으로 확인¹¹⁾ 되었으며 (26)식으로 부터 얻어지는 이론치는 4.67×10^{-4} 이므로 실험결과와 매우 가깝다는 것을 알 수 있다. 한편 파라데이 회전각이 $280^\circ/cm$ 인 위의 자성체 박막은 $\theta_F = 0.9 \times 10^{-4}$ 이 되므로 $S = 0.39$ 이고 또 (33)식과 (34)식에서 전력 변환효율은 최고 13.3%, 그리고 이때의 최소거리 $L = 1.7cm$ 이어야 한다.

따라서 자성체 박막의 길이가 8mm인 경우에는 효율이 7% 미만임을 알 수 있으며 실제 실험결과¹¹⁾와 일치하고 있다. 전력변환 효율을 높이기 위해서는 광도파관의 기본모드가 갖는 위상차를 감소시키고 자기광 효과가 큰 매질을 사용하거나 혹은 $\Delta\beta = 0$ 이 되도록 위상정합^{1, 10)} (phase-matching)을 위한 수단을 써야 한다.

V. 結 論

광도파관의 박막이 투명 자성체로서 자기광 효과를 나타내는 경우에 광도파관 고유모드의 구성 성분 및 이들의 위상 특성곡선의 분할을 혼합모드의 파동 방정식에 의하여 해석하였고 이러한 광도파관의 모드변

환 효율 및 최소거리를 모드변환 행렬에 의하여 결정하였다.

參 考 文 獻

- [1] P.K. Tien et al, "Switching and modulation of light in magneto-optic waveguides of garnet films", *Appl. Phys. Lett.*, vol 21, no. 3, pp. 394, Oct. 1972.
- [2] A. Yariv, "Coupled-mode theory for guided-wave optics," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. QE-9, no.9, pp. 919, Sept. 1973.
- [3] 정상구, 원영희, "박막형 광도파관에서 이방성 매질에 의한 TE-TM 모드변환," 대한전사공학회지, vol. 19, no. 6, pp. 17, Dec. 1982.
- [4] 정상구, 임한조, "자기광 효과를 갖는 광도파관의 혼합모드 해석" 대한전사공학회 1983 하계총합 학술대회논문집, vol. 6, no. 1, 83/7, pp. 101, 및 S.K. Chung and H. J. Lim, "Hybrid-mode analysis of thin film waveguides deposited on magnetic substrates", *J. Appl. Phys.*; to be Published.
- [5] L.D. Landau and E.M. Lifshitz, *Electrodynamics of Continuous Media*. Addison-Wesley, Mass, 1960.
- [6] S. Wang, M. Shah, and J.D. Grow, "Studies of the use of gyrotropic and anisotropic materials for mode conversion in thin film optical waveguide applications," *J. Appl. Phys.*, vol. 43, no.4, pp. 1861, 1972.
- [7] J.F. Dillon, J.P. Remeika, and C.R. Staton, "Linear magnetic birefringence in the ferrimagnetic garnets," *J. Appl. Phys.*, vol. 41, no.11, pp. 4613, Oct. 1970.
- [8] S. Wang, J.D. Crow, S. Wong, and M. Shah, "Eigenmode analysis of wave propagation in optical waveguides deposited on gyrotropic and anisotropic substrates," *J. Appl. Phys.*, vol. 44, no.7, pp. 3232, 1973.
- [9] S. Yamamoto, Y. Koyamada, and T. Makimoto, "Normal-mode analysis of anisotropic and gyrotropic thin-film waveguides for integrated optics," *J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 12, pp. 5090, Dec. 1972.
- [10] M.W. Muller, M. J. Sun, and S.K. Chung, "Magnetic domains for integrated optics," *Symp. Proc. of Optical and Acoustical Micro-Electronics*, vol. 23, pp. 393, 1974. *