

광굴절 결정체의 비가역적 투과도에 관한 연구

(A Study on the Nonreciprocal Transmissivity of a Photorefractive Crystals)

趙濟煌*, 金恩洙**, 楊仁應**

(Che Hwang Cho, Eun Soo Kim, and In Eung Young)

要約

광굴절 효과가 있는 결정체에서의 전자파 전파 특성을 고찰한다. 입사되는 전자파는 TE파와 TM파로써 임의의 각도를 갖고 입사되어 Fresnel 반사에 의한 반사파와 결정체 내에서 결합된다. 이러한 파결합은 비가역적 광 투과도를 나타낸다. 결합 강도에 대한 TE, TM파의 광 투과도를 몇가지 입사각에 대하여 살펴본다.

Abstract

The propagation of electromagnetic waves in a photorefractive crystal is considered.

The electromagnetic waves (i.e. TE waves and TM waves) incident upon the crystal at any incident angle are coupled with reflected waves due to the Fresnel's reflectance in the photorefractive crystal. This coupling leads to a nonreciprocal optical transmissivity. About some incident angles, the optical transmissivity of TE and TM waves in regard to the coupling strength is investigated.

I. 서론

좌우 입사 정리(left-and-right incidence theorem)라고도 하는 매질의 가역적 투과성(reciprocal transmission properties)은 매질의 응답이 선형인 경우(즉, 광 필드 세기의 변화에 대해 유전율(permittivity)과 투자율(permeability)이 일정한 경우) 발생한다.

다.

그러나, $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, LiNbO_3 , BaTiO_3 등과 같은 광굴절 결정체(Photorefractive crystals)는 비선형 응답 특성을 나타내며, 따라서 비가역적 투과성(nonreciprocal transmission properties)을 갖는다.

광굴절 결정체에 입사되는 광간섭 무늬(Optical interference pattern)는 매질의 광굴절 효과에 의해 광간섭 무늬와 위상 천이(phase shift)가 발생하도록 굴절률 분포를 변조한다.¹⁾

광간섭 무늬와 grating으로 알려진 변조된 굴절률 분포 사이의 위상 천이는 매질 내를 진행하는 파들 사이의 결합을 비대칭적으로 일어나게 하며, 이러한

*正會員, 東新工大 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Dongshin Eng. College)

**正會員, 光云大學校 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Kwangwoon Univ.)

接受日字: 1988年 7月 27日

비대칭적 결합은 결국 매질의 비가역적 투과성을 가져온다.

광굴절 결정체에서의 비가역적 광 에너지 전달은 영상 증폭(Image amplification),^[2] 진동 분석(Vibrational analysis),^[3] 자기 발진(Self-oscillation)^[4] 등에 적용된다.

1983년 P. Yeh는 지금까지의 외부에서 입사되는 두 파를 이용한 결합 방법(2광파 합성; Two-wave-mixing)과는 달리, 단일파 만을 입사하여 매질의 투과면에서의 Fresnel 반사에 의한 2 광파 합성에 대하여 분석했다.^[5]

분석결과에 의하면, 단일파 입사시 광굴절 결정체로부터 비가역적 투과도(Nonreciprocal transmissivity)를 얻을 수 있으며, 결합 강도(Coupling strength)의 증가 시 비가역적 투과성이 더욱 뚜렷해짐을 알 수 있었다.

1984년 K. R. Macdonald 등은 P. Yeh의 이론적 분석 결과를 광굴절 결정체 BaTiO₃를 사용한 실험에서 입증한 바 있다.^[6]

레이저 광파는 한 방향의 편광상태를 갖도록 편광기(Polarizer)를 거쳐 초점렌즈(초점거리 200mm)로 aperture에 초점화 되어 BaTiO₃(4.2×4.8×4.5mm³) 입사된다.

투과된 파는 BaTiO₃ 뒤에 놓여진 검출기에 의해 검출되고, 레이저 파장이 632.8mm인 경우 T(+), T(-)이 각각 0.63, 0.54이며, 488.0mm인 경우 각각 0.50, 0.37로 관찰되었다.

그러나 P. Yeh의 분석은 단지 매질에 파를 수직으로 입사한 경우로서, 입사파의 편광(Polarization) 상태에 관계없이 동일한 비가역적 투과도를 나타내지만, 수직이 아닌 임의의 각으로 입사하는 경우, 입사되는 파가 TE파(Transverse electric waves)인가, TM파(Transverse magnetic waves)인가에 따라 매질의 Fresnel 반사율이 다르기 때문에 그 투과도도 입사각에 대하여 변화 됨을 알 수 있다.

따라서 본 논문에서는 TE파, TM파에 대한 광굴절 결정체 투과도의 비가역성과, 결합 강도에 따른 입사각과 투과도 간의 관계를 분석 고찰하고자 한다.

II. 이론 및 고찰

매질에 입사되는 TE파와 TM파의 전기(Electric fields)와 자기(Magnetic fields) 성분은 그림 1에 주어진 각 구간에 대하여 다음과 같이 주어진다.^[5]

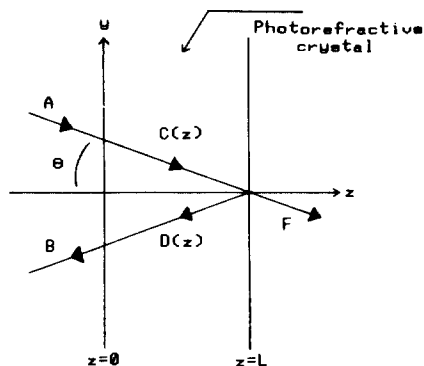


그림 1. 광굴절 결정체에 입사되는 파의 반사와 투과

Fig. 1. Transmission and reflection of wave incident upon a photorefractive crystal.

$$\begin{aligned}
 \begin{matrix} E_x \text{ (TE)} \\ H_x \text{ (TM)} \end{matrix} &= \begin{cases} A \exp[ik_1(-y \sin \theta_1 + z \cos \theta_1)] \\ \quad + B \exp[-ik_1(y \sin \theta_1 + z \cos \theta_1)] \\ \quad : (z < 0) \\ C(z) \exp[ik_2(-y \sin \theta_2 + z \cos \theta_2)] \\ \quad + D(z) \exp[-ik_2(y \sin \theta_2 + z \cos \theta_2)] \\ \quad : (0 < z < L) \\ F \exp[ik_3(-y \sin \theta_3 + (z-L) \cos \theta_3)] \\ \quad : (z < L) \end{cases} \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서, A, B, F는 각각 입사파, 반사파, 투과파의 진폭이며, C(z)와 D(z)는 광굴절 결정체 내를 진행하는 파의 진폭이다.

$k_i = n_i w / c$ 는 $i = 1, 2, 3$ 인 파수(Wave number)이고, 여기서 n_i 는 i 번째 매질의 굴절률이며, w 는 파의 주파수, c 는 진공 중의 광속도이다. $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 는 각각 입사각, 매질 내 굴절각, 그리고 투과각이다.

이론적 취급을 간단히 하기 위해, 고려된 모든 파의 진폭은 z 에 대해서만 변화하고, 매질 1, 3은 균질인 유전체(Homogeneous dielectric)로 가정한다.

이제, $z=0$ 과 $z=L$ 에서의 경계 조건(Boundary conditions)을 고려하면 다음과 같다.^[7]

TE 파인 경우 :

$$E_{x1} = E_{x2}, \quad dE_{x1}/dz = dE_{x2}/dz \quad : (z=0)$$

$$E_{x2} = E_{x3}, \quad dE_{x2}/dz = dE_{x3}/dz \quad : (z=L) \quad (2)$$

TM 파인 경우 :

$$\begin{aligned} H_{x_1} &= H_{x_2}, \quad (dH_{x_1}/dz)/n_1^2 = (dH_{x_2}/dz)/n_2^2 \\ &: (z=0) \\ H_{x_2} &= H_{x_3}, \quad (dH_{x_2}/dz)/n_2^2 = (dH_{x_3}/dz)/n_3^2 \\ &: (z=L) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 첨자 1, 2, 3은 각각 구간 $z < 0$, $0 < z < L$, $z > L$ 을 의미한다.

매질 내를 진행하는 파의 진폭 $C(z)$, $D(z)$ 에 관한 필드 변화 근사(Slowly varying field approximation)를 적용하고, 각 경계면에서 성립되는 Snell 법칙을 이용하여 식 (1), (2)로부터 TE파와 TM파에 대한 관계 식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} A+B &= C(0)+D(0) \\ k_1^0(A-B) - k_2^0C(0) - D(0) &= \\ C(L) \exp(ik_2L \cos\theta_2) + D(L) &= \\ \exp(-ik_2L \cos\theta_2) - F &= \\ k_2^0[C(L) \exp(ik_2L \cos\theta_2) - D(L)] &= \\ \exp(-ik_2L \cos\theta_2) - Fk_3^0 & \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, TE파는 $k_i^0 = k_i \cos\theta_i$ 이고 TM파는 $k_i^0 = k_i \cos\theta_i/n_i^2$ 이며, $i=1, 2, 3$ 이다. 그림 1로부터 파가 좌에서 우로 진행시 광굴절 결정체의 투과계수(Transmission coefficients)와, 역으로 진행시 투과 계수를 각각 $g(+)$, $g(-)$ 라고 하면,

$$g(+)=C(L)/C(0), \quad g(-)=D(0)/D(L) \quad (5)$$

임을 알 수 있다.

식 (4), (5)을 이용하여 TE파와 TM파에 대한 반사 계수(Reflection coefficients) r (TE, TM)와 투과 계수 t (TE, TM)를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} r(\text{TE, TM}) &= \frac{r_{12} + r_{23} g(+)}{1 + r_{12} r_{23} g(+)} \frac{\exp(2ik_2L \cos\theta_2)}{g(-) \exp(2ik_2L \cos\theta_2)} \\ & \quad (6) \\ t(\text{TE, TM}) &= \frac{t_{12} t_{23} g(+)}{1 + r_{12} r_{23} g(+)} \frac{\exp(ik_2L \cos\theta_2)}{g(-) \exp(2ik_2L \cos\theta_2)} \\ & \quad (7) \end{aligned}$$

여기서, r_{12} , r_{23} 와 t_{12} , t_{23} 는 각각 다음과 같이 주어지는 Fresnel 반사 계수와 투과 계수이다.¹⁾

$$\begin{aligned} r_{12} &= (n_{1,2} \cos\theta_{1,2} - n_{2,1} \cos\theta_{2,1}) / (n_{1,2} \cos\theta_{1,2} + n_{2,1} \cos\theta_{2,1}) \\ r_{23} &= (n_{2,3} \cos\theta_{2,3} - n_{3,2} \cos\theta_{3,2}) / (n_{2,3} \cos\theta_{2,3} + n_{3,2} \cos\theta_{3,2}) \\ t_{12} &= 2n_1 \cos\theta_1 / (n_1 \cos\theta_{1,2} + n_2 \cos\theta_{2,1}) \\ t_{23} &= 2n_2 \cos\theta_2 / (n_2 \cos\theta_{2,3} + n_3 \cos\theta_{3,2}) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, 첫번째 첨자는 TE파를 의미하고 두번째 첨자는 TM파를 의미한다. 식 (8)로부터 매질의 경계면 $z=0, L$ 에서의 투과율(Transmittance)과 반사율(Reflectance)은 다음과 같다.¹⁾

$$\begin{aligned} T_{12} &= |t_{12}|^2 k_2 \cos\theta_2 / k_1 \cos\theta_1 \\ T_{23} &= |t_{23}|^2 k_3 \cos\theta_3 / k_2 \cos\theta_2 \\ R_{12} &= |r_{12}|^2 \\ R_{23} &= |r_{23}|^2 \end{aligned} \quad (9)$$

식 (5)로부터 광굴절 결정체 내의 진행파 결합에 의한 투과율은 다음과 같다.¹⁾

$$\begin{aligned} 1/G(+) &= 1/|g(+)|^2 = (1-R_{23})/2 + \\ & \quad [(1-R_{23})^2/4 + R_{23} \exp(-\tau L)]^{1/2} \\ G(-) &= |g(-)|^2 = (R_{23}-1)/2R_{23} + \\ & \quad [(R_{23}-1)^2/4R_{23}^2 + 1/R_{23} \exp(\tau L)]^{1/2} \end{aligned} \quad (10)$$

매질이 파에 대하여 약한 결합력(즉, $\tau L \ll 1$)을 나타내는 경우, 식 (10)로부터 $G(+)$, $G(-)$ 은 거의 1이며, 따라서 매질의 비가역적 투과성은 사라진다.

반면, 강한 결합력을 갖게되는 경우 식 (6), (7)에 주어진 위상 성분 $k_2 L \cos\theta_2$ 은 파의 주파수 ω 와 매질의 길이 L 에 대하여 급변하는 함수임을 알 수 있다.

그러므로, 광굴절 결정체의 투과도는 위상 성분 $k_2 L \cos\theta_2$ 에 대한 평균값으로써 구하게된다.¹⁾ 즉,

$$\langle T \rangle = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{k_3 \cos\theta_3}{k_1 \cos\theta_1} |t|^2 d\sigma \quad (11)$$

여기서, $d\sigma = k_2 L \cos\theta_2$ 이다.

식 (7), (9), (10), (11)를 이용하여 TE파와 TM파에 대한 광굴절 결정체의 투과도를 구하면 다음과 같다.

$$\langle T(\text{TE}) \rangle = T_{12} T_{23} G(+)/(1-G(+)) R_{12} R_{23} \quad (12)$$

$$\langle T(\text{TM}) \rangle = n_3 T_{12} T_{23} G(+)/n_1 (1-G(+)) R_{12} R_{23} \quad (13)$$

그림 2, 3, 4, 5는 입사각이 각각 0, 40, 60, 80도인 경우, 결합 강도에 대한 TE파와 TM파의 비가역적 투과도를 보여준다.

그림 2에서는 TE파와 TM파의 투과도가 같게 나타나는데, 이는 식 (8)에 주어지는 Fresnel 반사 계수나 투과 계수가 파의 수직 입사시(즉, 입사각 0도) TE파나 TM파에 관계없이 동일한 값으로 주어지기 때문이다.

그림 3, 4, 5로부터 입사각이 증가함에 따라 TE파에 대한 투과도는 감소하는 반면, TM파에 대한 투과도는 점차 증가하다가 입사각 60도를 정점으로 감소함을 알 수 있다.

이는 약 60도의 입사각에서 TM파에 대한 Fresnel 반사 계수가 0이 되는 Brewster 각이 존재하기 때문이다. 즉, 입사파와 매질 내에서 파결합을 이루는 반사파가 없으며, 따라서 매질 손실이 없는 경우 결

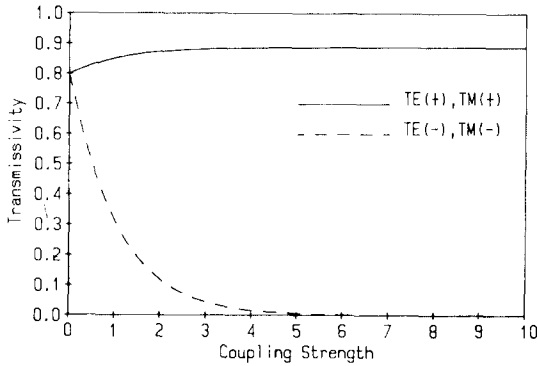


그림 2. 입사각 0도의 TE파와 TM파에 대한 비가역적 투과도
 Fig. 2. Nonreciprocal transmissivity of TE and TM waves at 0 degree of incident angle.

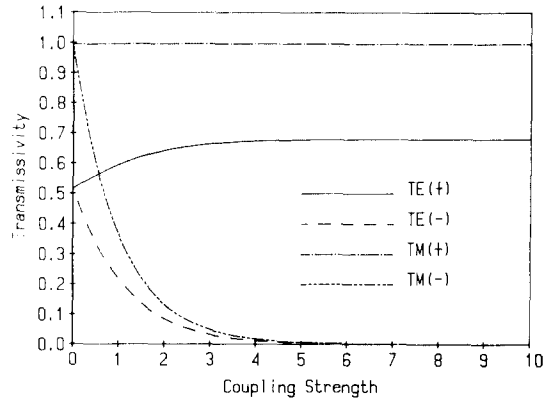


그림 4. 입사각 60도의 TE파와 TM파에 대한 비가역적 투과도
 Fig. 4. Nonreciprocal transmissivity of TE and TM waves at 60degrees of incident angle.

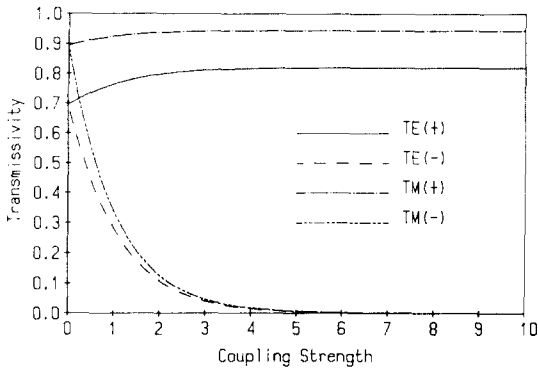


그림 3. 입사각 40도의 TE파와 TM파에 대한 비가역적 투과도
 Fig. 3. Nonreciprocal transmissivity of TE and TM waves at 40 degrees of incident angle.

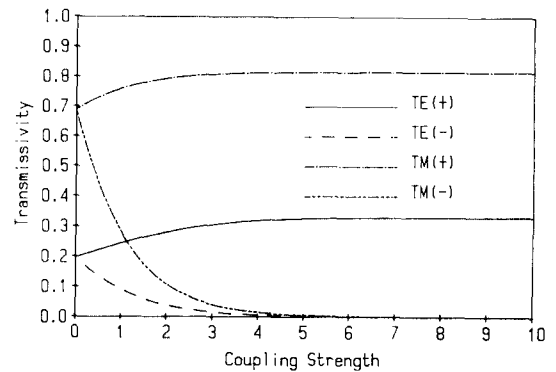


그림 5. 입사각 80도의 TE파와 TM파에 대한 비가역적 투과도
 Fig. 5. Nonreciprocal transmissivity of TE and TM waves at 80 degrees of incident angle.

합 강도에 무관한 1의 투과도를 나타낸다.

여기서, 균질 유전체로 가정한 매질 1, 3은 굴절률 1인 공기 중으로 보고, 광굴절 결정체의 굴절률은 2로 가정하였다.

III. 결 론

광굴절 결정체의 비가역적 투과성에 관하여 분석 고찰하였다.

입사되는 파는 단일파로써 임의의 각으로 입사되

어 매질의 투과면에서의 Fresnel 반사파와 매질 내에서 결합한다.

두 파의 간섭 무늬는 광굴절 효과에 의해 간섭 무늬와 위상 차이가 있는 grating을 형성하며, 이러한 위상 천이는 매질 내 파결합을 비대칭적으로 발생시키고, 결국 광굴절 결정체의 비가역적 투과도를 낮게 된다.

입사각에 따라 TE파와 TM파의 Fresnel반사가 다르기 때문에 입사각을 변화시키며 각 입사파에 대한

비가역적 투과도를 분석하였다.

매질에 수직으로 입사하는 경우, TE파와 TM파 모두 같은 Fresnel 반사율을 가지며, 따라서 파의 편광 상태에 관계없이 동일한 투과도를 나타낸다.

그러나 수직이 아닌 임의의 각으로 입사하는 경우, 입사각이 증가함에 따라 TE파의 투과도는 감소하는 반면, TM파의 투과도는 점차 증가하다 약60도의 입사각을 정점으로하여 감소하기 시작한다.

이는 입사되는 파가 TM파인 경우 Fresnel 반사가 0이 되는 Brewster 각이 거의 입사각 60도에서 존재하기 때문이다.

여기서, $z < 0$, $z > L$ 영역의 균질 유전체는 굴절률 1인 공기 중으로 보고, 광굴절 결정체의 굴절률은 2로 가정하였다.

고려된 모든 파의 진폭은 z방향에 대해서만 변화가 있는 것으로 가정하였으며, 광굴절 결정체 내의 모든 진행파는 완만한 필드 변화 근사를 적용하였다.

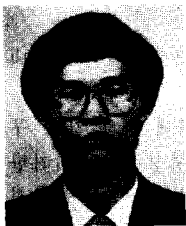
參 考 文 獻

- [1] R.A. Fisher, *Optical phase conjugation*, Academic Press, p. 417, 1983.
 [2] J.P. Huignard and A. Marrakchi, "Coherent

signal beam amplification in two wave mixing experiments with photorefractive B.S.O. crystals," *Opt. Comm.*, vol. 38, p. 249, 1981.

- [3] J.P. Huignard and A. Marrakchi, "Two wave mixing and energy transfer in B.S.O. crystals: amplification and vibration analysis," *Opt. lett.*, vol. 6, p. 622, 1981.
 [4] J.O. White, M. Cronin-Golomb, B. Fisher, and A. Yariv, "Coherent oscillation by self-induced gratings in photorefractive crystals," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 40, p. 450, 1982.
 [5] P. Yeh, "Electromagnetic propagation in a photorefractive layered medium," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 73, p. 1268, 1983.
 [6] K.R. Macdonald, J. Feinberg, M.Z. Zha, and P. Gunter, "Asymmetric transmission through a photorefractive crystal of Barium Titanate," *Opt. Comm.*, vol. 50, p. 146, 1984.
 [7] A. Yariv and P. Yeh, *Optical waves in crystals*, Wiley, New York, p. 165, 1984.
 [8] E. Hecht, *Optics*, Addison-Wesley Publishing Company, p. 94, 1987. *

著 者 紹 介



趙 濟 煌 (正會員)

1960年 11月 10日生. 1984年 2月 광운대학교 전자공학과 졸업 공학사 학위취득. 1986年 2月 광운대학교 대학원 전자공학과 공학석사 학위 취득. 1989年 2月 광운대학교 대학원 전자공학과 공학박사과정 수료. 현재 동신공과대학 전자공학과 전임강사.

金 恩 洙 (正會員) 第25卷 第9號 參照

현재 광운대학교 전자공학과 부교수.

•

楊 仁 應 (正會員) 第25卷 第9號 參照

현재 광운대학교 대학원장 및 부총장, 전자공학과 교수.