

1차원 자성 포토닉 결정의 자기 광학 특성 수치해석

박재혁 · 조재경

경상대학교 공과대학 전자재료공학과, 경남 진주시 가좌동 900

(2000년 2월 22일 받음, 2000년 3월 10일 최종수정본 받음)

두 종류의 유전체 층(A: SiO_2 , B: Ta_2O_5)을 주기적으로 적층한 구조에, B를 다량 치환한 가넷 박막(M: $\text{Y}_{1.93}\text{Bi}_{1.07}\text{Fe}_3\text{O}_{12}$)을 결합층으로 삽입한 $(A/B)^k/M/(B/A)^k$ 의 구조를 갖는 1차원 자성 포토닉 결정의 자기 광학 특성을 수치해석하였다. 가시광과 적외선 영역에서 1차원 자성 포토닉 결정의 자성체 층의 두께(d_M)와 유전체 층의 적층수(k)를 변화시키며, 투과율(T)과 페러데이 회전각(θ_F) 및 성능지수(Q)를 조사하였다. 조사한 1차원 자성 포토닉 결정의 각 국제 모드에서의 페러데이 회전각 및 성능지수의 극대값들은 동일 조성의 단층 가넷 박막에 비해 수 배 내지 수 백 배 큰 값이 얻어졌다. 가시광 영역에서는 $k=11$ 이고, $d_M=375$ nm일때, 최대값 $Q=0.15$ 이 얻어졌다. 이 값은 단층의 가넷 막에 비해 약 30 배 큰 값이며, 이 때의 $\lambda=720$ nm, $T=0.54$, $\theta_F=8.13^\circ$ 이었다. 적외선 영역에서는 $k=11$ 이고, $d_M=800$ nm일때, 최대값 $Q=0.285$ (단층 가넷 막에 비해 100배 큰 값)이 얻어졌고, 이 때의 $\lambda=1114$ nm, $T=0.485$, $\theta_F=18^\circ$ 이었다.

I. 서 론

포토닉 결정이란 굴절률(다른 말로는 유전률)이 다른 물질들을 빛의 파장 정도의 크기로 주기적으로 배열한 인공적인 결정이다. 포토닉 결정은 1989년 Yablonovitch에 의해 제안되어, 새로운 광 매체로서의 가능성을 열었다. 최근에는 문턱 값이 '영'인 레이저나 무손실 도파로 등의 새로운 광 소자를 실현할 수 있다는 점에서 주목 받고 있다. 또한, 박막 제작 기술과 미세가공기술이 발전하여 나노 미터 정도의 정밀도를 얻는 것이 가능해진 것에 힘입어 포토닉 결정의 실험적인 제작이 활발히 연구되고 있다.

보통의 결정(이것을 전자 결정이라고 부르기로 하자)이 전자의 에너지 밴드 갭을 갖는 것처럼, 포토닉 결정은 포토닉 밴드 갭을 나타낸다. 포토닉 밴드 갭에 해당하는 에너지를 갖는 빛(또는 파장)은 포토닉 결정에서 그의 존재가 허용되지 않으므로, 이에 해당하는 빛은 투과가 허용되지 않는다. 전자 결정 내에 도너 또는 억셉터를 도핑하면 불순물 국제 준위가 밴드 갭 내에 생기는 것처럼, 포토닉 결정에 결합층을 삽입하면(말을 바꾸면, 포토닉 결정의 주기성을 국부적으로 흐트러 뜨리면) 그 결합에 의한 국제 준위가 포토닉 밴드 갭 내에 형성된다. 따라서, 포토닉 결정에 결합층을 삽입하면 결합층에 의한 국제 준위로 인해, 이에 해당하는 파장의 빛의 투과가 허용된다. 아울러, 불순물이 도핑된 전자 결정의 경우, 전자의 존재 확률을 나타내는 파동함수의 절대치의 제곱이 불순물이 도핑된 부분에 국제화되는 것과 유사하게, 결합을 갖는 포토닉 결정

에서는 전자의 파동함수에 대응하는 빛의 전기장의 진폭이 결합층 부분에 국제화된다. 포토닉 결정은 그 공간적인 주기성에 따라 1차원, 2차원, 3차원 포토닉 결정을 생각할 수 있으나, 2차원과 3차원 포토닉 결정은 실험적인 제작이 용이하지 않으므로, 1차원 포토닉 결정에 관한 연구가 주류를 이루고 있다.

1차원 자성 포토닉 결정이란 1차원 포토닉 결정 내에 결합층으로 자성층을 삽입한 것을 말한다. 1996년 Inoue 등에 의해 제안된 1차원 자성 포토닉 결정은 결합층으로 삽입된 자성층에 빛이 국제화되어 거대한 자기광학효과를 나타낸다는 점에서 주목을 받고 있다[1]. 또한, 그 구조를 적절하게 설계하면, 원하는 파장에서 거대한 자기광학 효과와 큰 투과율을 얻을 수 있으므로 각종 자기광학 소자의 응용이 기대되고 있다.

Inoue 등은 초기에는 유전체 박막(A)과 자성체 박막(M)을 교대로 적층하는 과정에 결합층을 삽입한(예를 들면, $(AM)^kM(MA)^k$, k:적층수) 1차원 자성 포토닉 결정의 광학적 및 자기광학적 특성을 수치해석을 통하여 이론적으로 연구하였다[2]. 그 후, 유사한 현상이 한 층의 자성체 박막(M)을 두 종류의 유전체(A, B)가 교대로 적층된 다층 박막으로 샌드위치한 구조(예를 들면, $(AB)^kM(BA)^k$)에서도 일어난다는 것을 이론적으로 예측하였고, 실험적으로 이러한 구조의 1차원 자성 포토닉 결정을 제조하여 이론적으로 예측한 특성들이 얻어진다는 것을 검증했다[3, 4]. 이러한 구조에서는 유전체 다층 박막이 반사 거울의 역할을 하여 소위 Fabry-Perot 공진기와 유사한 현상이 일어난다.

Inoue 등은 Bi가 소량 치환된 가넷 박막을 결합층으로 갖는 1차원 자성 포토닉 결정에 대하여 주로 연구해왔으므로 Bi가 다량 치환된 가넷 박막을 결합층으로 갖는 1차원 자성 포토닉 결정에 대해서는 그 특성이 아직 알려져 있지 않다. 본 연구에서는 가시광선과 적외선 영역에서 Bi를 다량 치환한 가넷 박막을 결합층으로 하는 1차원 자성 포토닉 결정의 자기광학 특성을 수치 해석한 결과를 보고한다.

II. 이 론

2.1. 1차원 자성 포토닉 결정의 투과율과 페러데이 효과

본 연구에서 수치해석을 수행한 1차원 자성 포토닉 결정의 모식도를 Fig. 1에 나타냈다. 굴절률이 서로 다른 두 종류의 유전체 박막(A, B)이 교대로 적층되어 있고, 중앙의 A 유전체 박막이 적층될 곳에 자성체 박막(M)이 삽입된 구조를 가지고 있다. 이 자성체 박막은 A와 B의 유전체 박막의 주기성을 흐트러뜨려 준주기구조를 형성하는 역할을 한다. 그림과 같은 1차원 자성 포토닉 결정은 유전체 박막 쌍(AB)의 적층수를 k 라고 하면 $(AB)^k/M/(BA)^k$ 로 나타낼 수 있다.

A, B 유전체 박막의 두께가 각각 d_A, d_B 이고, 자성체 박막의 두께가 d_M , 1차원 포토닉 결정 전체의 막후를 D라고 하자. 좌표축을 Fig.1과 같이 잡고, X축 방향으로 전장 벡터를 갖는 직선 편광(편의상 이것을 TM광이라고 부르자)을 $Z=Z_0$ 에 위치한 막면에 수직으로 입사시킨 경우를 생각하자.

자성층 M 내의 자화가 광 진행 방향과 평행한 +Z 방향을 향하고 있다고 하면, 1차원 자성 포토닉 결정 속을 전파하는 광파의 기본 방정식은 시간 인자를 $\exp(-i\omega t)$ 라고 가정하여 (1)식의 맥스웰 방정식으로 주어진다.

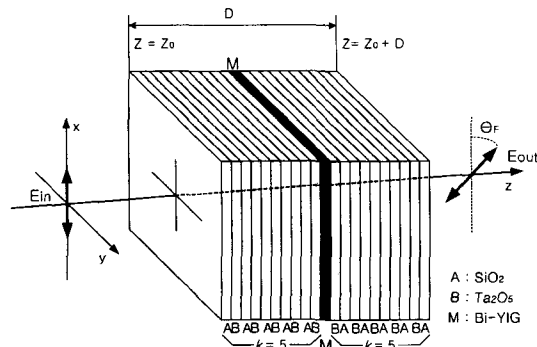


Fig. 1. Structure of 1-dimensional magneto-photonic crystal.

$$\nabla \times E(r,t) = i\omega\mu_0 H(r,t) \quad (1a)$$

$$\nabla \times H(r,t) = i\omega\epsilon_0 \epsilon E(r,t) \quad (1b)$$

(1b)식 중의 비유전율 텐서는, 자성층 M과 유전체층 A, B 각각에 대해 (2a), (2b), (2c)식으로 주어진다.

$$M : \epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_1 & i\epsilon_2 & 0 \\ -i\epsilon_2 & \epsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_3 \end{pmatrix} \quad (2a)$$

$$A : \epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_A & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_A & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_A \end{pmatrix} \quad (2b)$$

$$B : \epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_B & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_B & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_B \end{pmatrix} \quad (2c)$$

공간 인자로써 $\exp(ikz)$ 를 사용하며, (1a), (1b) 식으로부터, 자성층 M 내의 광파는 (3)식과 같이 우원편광과 좌원편광의 진행파와 후퇴파의 합으로 표현할 수 있다. 단, (3)식 중의 벡터 $\tau(Z)$ 는 좌표 Z에서의 광파의 상태를 나타내는 상태 벡터이다. 또한, (3)식에서는 수치계산의 편의상, 스케일링된 전자장, $e_v = \epsilon_0 E_v$ 및 $h_v = H_v/C_L$ ($v=X,Y, C_L$: 광속)을 사용했다. 아울러 (3)식 중의 파수 k_p, k_n 은, 각각 우원편광과 좌원편광의 파수이고, $\epsilon_p (= \epsilon_1 + \epsilon_2)$ 와 $\epsilon_n (= \epsilon_1 - \epsilon_2)$ 를 이용하면, 각각 $k_p = (\omega/C_L)\sqrt{\epsilon_p}$ 및 $k_n = (\omega/C_L)\sqrt{\epsilon_n}$ 이다. 그리고 A-D는 결합 상수이다.

$$\tau(Z) = \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ h_x \\ h_y \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} 1 \\ -i \\ i\sqrt{\epsilon_p} \\ \sqrt{\epsilon_p} \end{pmatrix} e^{ik_p z} + B \begin{pmatrix} 1 \\ -i \\ -i\sqrt{\epsilon_p} \\ -\sqrt{\epsilon_p} \end{pmatrix} e^{-ik_p z} + C \begin{pmatrix} 1 \\ i \\ -i\sqrt{\epsilon_n} \\ \sqrt{\epsilon_n} \end{pmatrix} e^{ik_n z} + D \begin{pmatrix} 1 \\ i \\ i\sqrt{\epsilon_n} \\ -\sqrt{\epsilon_n} \end{pmatrix} e^{-ik_n z} \quad (3)$$

(3)식으로부터, 1차원 자성 포토닉 결정 중의 $Z=Z_1$ 에 자성층이 존재하여 광 입사면이 있다고 하면, 그 면상에서의 상태 벡터 $\tau(Z_1)$ 은, 자성층의 출사면 $Z=Z_1+d_M$ 에서의 상태 벡터 $\tau(Z_1+d_M)$ 과 (4)식의 관계로 결합되어 있다.

$$\tau(Z_1+d_M) = \Phi^M \cdot \tau(Z_1) \quad (4)$$

(4)식의 Φ^M 은, 빛이 자성층 M을 통과하면서 받는 상태변화를 나타내는 천이행렬(4×4 복소 행렬)이다. 이 천이행렬은 자성층의 입사면과 출사면상에서, 자성층 내외의 광파가 연속이라는 조건으로부터, (3)식과 (4)식을 이용하여 구할 수 있고, 그 결과를 쓰면 식 (5)와 같다.

$$\Phi^M = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} a_p + a_n & -ia_p - ia_n & \frac{b_p}{\sqrt{\epsilon_p}} - \frac{b_n}{\sqrt{\epsilon_n}} & i\frac{b_p}{\sqrt{\epsilon_p}} + i\frac{b_n}{\sqrt{\epsilon_n}} \\ -ia_p + ia_n & a_p + a_n & -i\frac{b_p}{\sqrt{\epsilon_p}} - i\frac{b_n}{\sqrt{\epsilon_n}} & \frac{b_p}{\sqrt{\epsilon_p}} - \frac{b_n}{\sqrt{\epsilon_n}} \\ -\sqrt{\epsilon_p b_p} + \sqrt{\epsilon_n b_n} & -i\sqrt{\epsilon_p b_p} - i\sqrt{\epsilon_n b_n} & a_p + a_n & ia_p - a_n \\ i\sqrt{\epsilon_p b_p} + i\sqrt{\epsilon_n b_n} & -\sqrt{\epsilon_p b_p} + \sqrt{\epsilon_n b_n} & -ia_p + a_n & a_p + a_n \end{pmatrix} \quad (5)$$

식 (5)에서 $a_p = \cos(k_p d_M)$, $a_n = \cos(k_n d_M)$, $b_p = \sin(k_p d_M)$, $b_n = \sin(k_n d_M)$ 이다.

마찬가지로, 막층의 $Z = Z_2$ 에 유전체층 A의 광 입사면이 있다면, 그 면상에서의 상태벡터 $\tau(Z_2)$ 는, 유전체 층의 출사면 $Z = Z_2 + d_A$ 에서의 상태벡터 $\tau(Z_2 + d_A)$ 와 천이행렬 Φ^A 를 이용하여(6)식의 관계로 결합되어 있다.

$$\tau(Z_2 + d_A) = \Phi^A \cdot \tau(Z_2) \quad (6)$$

이 천이행렬도 경계면에서 빛의 전기장과 자기장이 연속이라는 경계조건으로부터 구할 수 있고, 그 결과를 쓰면 식 (7)과 같다.

$$\Phi^A = \begin{pmatrix} a_A & 0 & 0 & \frac{ib_A}{\sqrt{\epsilon_A}} \\ 0 & a_A & -\frac{ib_A}{\sqrt{\epsilon_A}} & 0 \\ 0 & -\sqrt{\epsilon_A b_A} & a_A & 0 \\ i\sqrt{\epsilon_A b_A} & 0 & 0 & a_A \end{pmatrix} \quad (7)$$

식 (7)에서, $a_A = \cos(k_A d_A)$, $b_A = \sin(k_A d_A)$ 이고, ϵ_A 는 유전체(A)의 유전율이다. 유전체 B의 경우에도, 식 (6)과 식 (7)에 의해 주어지는 관계가 동일하게 적용된다.

1차원 자성 포토닉 결정 내에 존재하는 모든 매체 불연속면상에서, 전장과 자장의 접선 성분은 연속이므로(따라서 상태벡터가 연속), 1차원 자성 포토닉 결정의 입사면($Z = Z_0$)과 출사면($Z = Z_0 + D$)에서의 상태벡터는 식 (8)의 관계를 갖는다.

$$\tau(Z_0 + D) = (\Phi^A \cdot \Phi^B)^k \cdot \Phi^M \cdot (\Phi^B \cdot \Phi^A)^k \cdot \tau(Z_0) = \Phi \cdot \tau(Z_0) \quad (8)$$

식 (8)에서 보듯이, 천이 행렬이 곱해져 있는 순서가 유전체 및 자성체 박막의 적층 순서와 동일하게 됨으로, 해석이 용이하다. 식 (8)에서 Φ 는 1차원 자성 포토닉 결정 전체의 천이 행렬이다.

한편, 1차원 자성 포토닉 결정의 입사광의 상태 벡터는, 입사 TM광과 반사 TM광, 반사 TE광의 선형 결합으로써, 결합상수 C_1, C_2 를 이용하여 식 (9)로 주어진다.

$$\tau(z) = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} e^{ik(Z-Z_0)} + C_1 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} e^{-ik(Z-Z_0)} + C_2 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} e^{-ik(Z-Z_0)} \quad (Z \leq Z_0) \quad (9)$$

유사하게, 출사광의 상태벡터는, TM광과 TE광의 선형 결합으로써 결합상수 C_3, C_4 를 이용하여 식 (10)으로 주어진다.

$$\tau(z) = C_3 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} e^{ik(Z-Z_0-D)} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} e^{ik(Z-Z_0-D)} \quad (Z \geq Z_0 + D) \quad (10)$$

이들 결합상수 $C_1 \sim C_4$ 는 1차원 자성 포토닉 결정의 입사면과 출사면상에서 결정 내외의 광파가 연속이라는 조건을 이용하여, 식 (9)와 식 (10)을 식 (8)에 대입하여 얻어지는 다음의 연립방정식(11)의 해로써 주어진다.

$$\begin{pmatrix} \phi_{00} - \phi_{03} & \phi_{01} + \phi_{02} & -1 & 0 \\ \phi_{10} - \phi_{13} & \phi_{11} + \phi_{12} & 0 & -1 \\ \phi_{20} - \phi_{23} & \phi_{21} + \phi_{22} & 0 & 1 \\ \phi_{30} - \phi_{33} & \phi_{31} + \phi_{32} & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_{00} + \phi_{03} \\ \phi_{10} + \phi_{13} \\ \phi_{20} + \phi_{23} \\ \phi_{30} + \phi_{33} \end{pmatrix} \quad (11)$$

이렇게 하여 얻어진 $C_1 \sim C_4$ 를 이용하면, 1차원 자성 포토닉 결정의 TM광 반사율 R^{TM} , TE광 반사율 R^{TE} , TM광 투과율 T^{TM} , TE광 투과율 T^{TE} 는 각각 식 (12)와 같이 된다.

$$R^{TM} = |C_1|^2, R^{TE} = |C_2|^2, T^{TM} = |C_3|^2, T^{TE} = |C_4|^2 \quad (12)$$

또한, 전반사율 R과 전투과율 T는, 각각, $R = R^{TM} + R^{TE}$, $T = T^{TM} + T^{TE} = 1 - R$ 로 주어진다.

한편, $\chi = C_4/C_3$ 라고 놓으면, 1차원 자성 포토닉 결정의 출사면상에서의 편광면의 회전각 θ_F (페러데이 회전각)와 타원율 η_F (페러데이 타원율)는 식 (13)으로 주어진다.

$$\theta_F = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\text{Re}(\chi)}{1-|\chi|^2} \right) \quad (13a)$$

$$\eta_F = \tan \left(\frac{1}{2} \sin^{-1} \left(-\frac{2\text{Im}(\chi)}{1+|\chi|^2} \right) \right) \quad (13b)$$

2.2. 성능지수

성능 지수는 Fig. 2(a)와 같은 페러데이 배치의 경우를 가정하여, 다음과 같이 정의했다. 그림과 같이 서로 다른 방향으로 자화된 영역을 통과한 빛의 강도차 ΔI 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \Delta I &= I_0 PA \exp(-\alpha d) \{ \cos^2(\phi + \theta_F) - \cos^2(\phi - \theta_F) \} \\ &= I_0 PA \exp(-\alpha d) \sin 2\phi \sin 2\theta_F \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 I_0 는 입사광의 강도, P와 A는 편광자와 검광자 투과율을 나타내고, d는 자성층의 두께이고, ϕ 는 편광자와 검광자의 투과축이 이루는 각도, α 와 θ_F 는 자성층의 흡광 계수와 페러데이 회전각을 나타낸다.(Fig. 2(b)) 이 식으로부터 $\phi = 45^\circ$ 일 때 ΔI 가 최대가 되므로, 통상 편광자와 검광자의 투과축이 이루는 각도는 45° 가 되도록 설정한다. 이 때의 ΔI_{max} 는

$$\Delta I_{max} = I_0 PA \exp(-\alpha d) \sin 2\theta_F \quad (15)$$

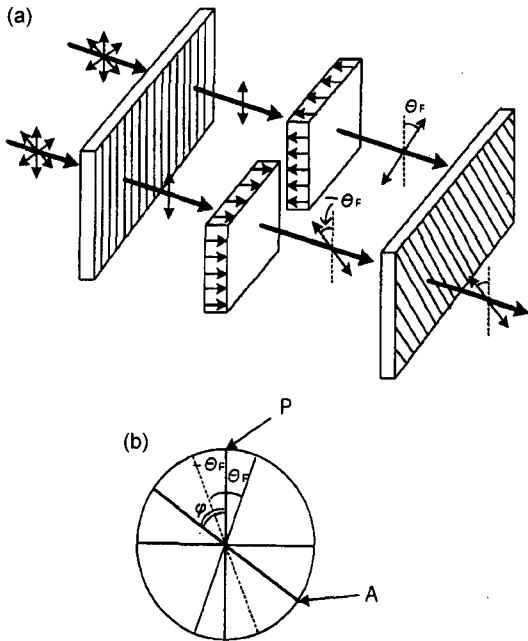


Fig. 2. (a) Operation of magneto-optic devices and (b) a schematic diagram showing the angles between polarizer, analyzer and Faraday rotation.

가 된다. 통상 투과율 T는

$$T = I/I_0 = \exp(-\alpha d) \quad (16)$$

로 주어지므로, $\exp(-\alpha d)$ 대신에 T를 대입하면,

$$\Delta I_{max} = I_0 PAT \sin 2\theta_F \quad (17)$$

를 얻는다. 여기서, P, A, I_0 는 주어지는 값이므로, 성능지수 Q(Figure of merit)는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Q = T |\sin 2\theta_F| \quad (18)$$

따라서, Q는 T = 1이고 $\theta_F = 45^\circ$ 일 때 최대값 1을 갖는다.

III. 수치해석

이와 같은 이론을 바탕으로 수치해석을 통하여 1차원 자성 포토닉 결정의 특성을 조사했다. 1차원 자성 포토닉 결정은 지금까지 알려진 자기광학 물질 중 가장 우수한 특성을 나타내는 Bi 치환 가넷 중에서 Bi를 다량 치환한 가넷 자성 박막($Y_{1.93}Bi_{1.07}Fe_3O_{12}$)을 결합층으로, SiO_2 와 Ta_2O_5 를 유전체 박막으로 설정하였다. 1차원 자성 포토닉 결정의 페러데이 효과와 투과율에 대한 수치해석은 컴퓨터 프로그램을 작성하여 수행했다. 자성 가넷 박막과 유전체 SiO_2 , Ta_2O_5 박막의 재료 파라미터(유전율 텐서)는 문헌[5]에 보고된 것을 사용했다. 유전체 층들에 의한 광흡수 및 굴절률의 파장 분산은 무시하였다. 가시광선 영역에서는 목표파장을 $\lambda = 633 \text{ nm}$ 로 하여, SiO_2 층의 두께 $d_{SiO_2} = \lambda/4n_{SiO_2} = 110 \text{ nm}$ ($n_{SiO_2} = 1.44$), Ta_2O_5 층의 두께 $d_{Ta_2O_5} = \lambda/4n_{Ta_2O_5} = 75 \text{ nm}$ ($n_{Ta_2O_5} = 2.1$)로 설정하였고, 자성체 층의 두께 d_M 을 1~535 nm로, 유전체 층의 적층수 k를 5~15로 변화시켰다. 적외선 영역에서는 목표파장을 $\lambda = 1000 \text{ nm}$ 로 하여, SiO_2 층의 두께 $d_{SiO_2} = \lambda/4n_{SiO_2} = 174 \text{ nm}$ ($n_{SiO_2} = 1.44$), Ta_2O_5 층의 두께 $d_{Ta_2O_5} = \lambda/4n_{Ta_2O_5} = 120 \text{ nm}$ ($n_{Ta_2O_5} = 2.1$)로 설정하였으며, 자성체 층의 두께 d_M 을 1~1000 nm로, 유전체 층의 적층수 k를 5~15로 변화시켰다.

IV. 결과 및 고찰

Fig. 3에 적외선 영역에서 유전체 층의 적층수(k)를 11로 고정시키고, 자성체 층의 두께(d_M)를 변화시켰을 때의 1차원 자성 포토닉 결정의 투과율(T)과 페러데이 회전각(θ_F)의 스펙트럼을 나타냈다. 그림에서 보듯이, 빛의 투과가 허용되지 않는 포토닉 밴드갭(PBG)이 뚜렷이 얻어지

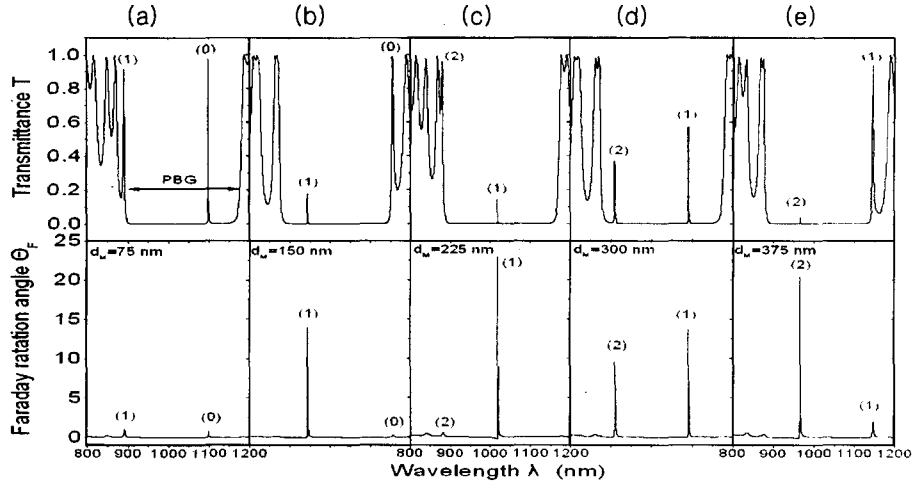


Fig. 3. Transmittance T and Faraday rotation angle θ_F spectra of 1D-MPCs as a function of d_M in the infrared when $k = 11$.

는 것을 알 수 있다. 포토닉 밴드갭 내에 자성체 층(결합층)에 의한 국제 준위로 인해 빛의 투과가 허용되는 파장이 존재하며, 그 파장에서 단층의 기네트 박막에 비하여 큰 페러데이 회전각이 얻어짐을 알 수 있다

그림에서 각 피크 위의 숫자는 국제 모드의 차수로, 다음의 관계로부터 정의되는 값이다

$$d_M = n \cdot (\lambda/2n_M) = n \cdot (211.5 \text{ nm}) \quad (19)$$

여기서 d_M 은 자성체 층의 두께, n 은 정수인 국제 모드의 차수, n_M 은 자성체 층의 굴절률(2.364), λ 는 목표 파장(1000 nm)이다. 자성체 층의 두께가 $\lambda/2n_M$ 의 정수배일 때, 국제 모드가 포토닉 밴드갭의 중앙에 오므로, 그에 따라 차수를 매긴 것이다.

따라서, 그림에는 나타내지 않았으나, 국제 모드 (0)($n = 0$ 인 경우)은 자성체 층이 없는 경우($d_M = 0$)에 포토닉 밴드갭의 중앙에 온다. 이 때는 중앙부의 2개의 유전체 층(Fig. 1에서 자성체 층 M의 두께가 영이면, 2개의 B 유전체 층이 서로 만나게 된다)이 포토닉 결정의 결합으로써 작용하여, 거의 100%의 투과율을 나타내나, 페러데이 회전각은 나타내지 않는다. Fig. 3(a)와 같이 자성층의 두께가 얇더라도($d_M = 75 \text{ nm}$) 자성층이 존재하는 경우에는, 그림에서와 같이, 국제 모드 (0)은 장파장 측(아래 밴드)으로 이동하고, 투과율이 다소 감소하고, 작은 페러데이 회전각을 나타낸다. 이와 함께, 국제 모드 (1)이 단파장 측(위 밴드)에서 출현한다.

국제 모드 (1)은 자성층의 두께가 증가함에 따라 장파장 쪽으로 이동하여(Fig. 3(a), (b)), 식 (19)에 $n = 1$ 을 대

입하여 얻어지는 두께($d_M = 211.5 \text{ nm}$)가 되면 포토닉 밴드갭의 중앙에 오고(Fig. 3(c)부근), 두께가 그 보다 더 증가하면 장파장 쪽으로 더욱 이동하여 아래 밴드로 소멸한다(Fig. 3(d), (e)). 자성층의 두께가 증가함에 따라, 투과율은 감소하여, 국제 모드 (1)이 포토닉 밴드갭의 중앙에 올 때 최소를 나타내고, 다시 증가한다. 페러데이 회전각은, 자성층의 두께가 증가함에 따라, 증가하여, 국제 모드 (1)이 포토닉 밴드갭의 중앙에 올 때 최대를 나타낸 후, 감소한다.

국제 모드 (1)이 포토닉 밴드갭의 중앙에 오면, 국제 모드 (0)은 아래 밴드로 소멸하고, 상위의 모드인 국제 모드 (2)가 아래 밴드로부터 출현한다(Fig. 3(c)). 국제 모드 (2)의 투과율과 페러데이 회전각은 국제 모드 (1)과 유사한 경향을 나타내나, 이 경우에는 자성층의 두께가 상대적으로 크므로, 국제 모드 (1)에 비해, 투과율은 작고, 페러데이 회전각은 큰 값이 얻어진다.

이와 같이, 각 국제 모드가 포토닉 밴드갭의 중앙에 위치할 때, 최소의 투과율과 최대의 페러데이 회전각을 나타내는 이유는 이 때의 자성층의 두께가 식 (19)에 나타난 것과 같이 광학 반파장과 일치하기 때문이다. 이 경우 빛이 자성층에 가장 강하게 국제화되어, 자성층 내를 다중회 왕복하는 다중 간섭이 강하게 일어난다. 그에 따라 자성층에 의한 빛의 흡수가 증가하여 투과율이 감소하고, 빛이 자성층 내를 왕복하는 횟수가 커서 좌 · 우원편광의 위상차가 증가하여 페러데이 회전각이 증대되기 때문이다.

가시광과 적외선 영역에서 적층수 $k = 7, 9, 11$ 일 때, Fig. 3과 같은 스펙트럼으로부터 각 국제 모드의 T, θ_F 파

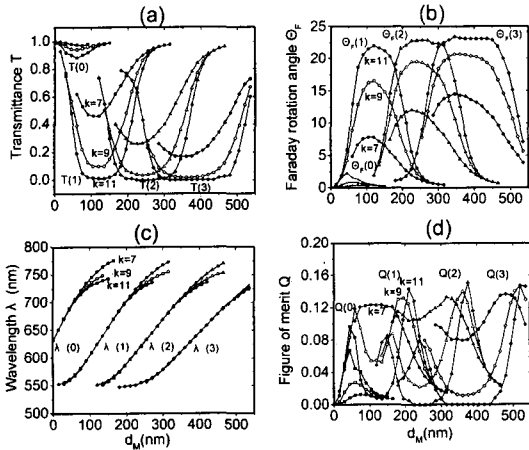


Fig. 4. (a) Transmittance T , (b) Faraday rotation angle θ_F , (c) wavelength λ , (d) figure of merit Q of the localized modes of 1D-MPCs as a function of d_M in the visible.

장(λ), 성능지수(Q)의 k 와 d_M 에 따른 변화를 각각 Figs. 4, 5에 나타냈다.

Figs. 4((a), (b)), 5((a), (b))에서 보듯이 k 가 커짐에 따라, T 의 극소와 θ_F 의 극대가 현저해짐을 알 수 있다. 이것은 k 가 증가함에 따라 다층 박막의 주기성(파장 선택성)이 강화되어 국재 모드가 보다 현저하게 발현되기 때문으로 생각된다. 또한, 그림에서 보듯이, 적외선 영역에서의 k 의 증가에 따른 각 국재 모드의 T 와 θ_F 의 변화가 가시광 영역에서의 변화에 비하여 큰 것도 적외선영역에서 파장 선택성이 증가하기 때문이다. 아울러, 국재 모드 (0)을 제외한 각 국재 모드에서의 θ_F 의 극대치는 단층 자성막에

비해 수 배 내지 수 백 배의 큰 값이 얻어졌다. 예를 들어 가시광 영역에서는 θ_F 가 20°를 증가하는 값(Fig. 4)이 얻어졌는데, 이것은 단층 자성막과 비교할 때 18배 이상 큰 값이다. 적외선영역에서는 θ_F 가 40°에 달하는 큰 값이 얻어졌다.

Fig. 4(c), 5(c)를 보면 국재화되는 파장 λ 는 목표파장(가시광 영역은 $\lambda = 633$ nm, 적외선 영역은 $\lambda = 1000$ nm)을 중심으로 대칭적인 S자 모양의 곡선을 나타내고, k 가 증가함에 따라 S자 모양이 보다 뚜렷이 나타난다. 이와 같이 S자 모양의 곡선을 나타내는 이유는 포토닉 밴드갭의 양단에서 국재 모드가 생성, 소멸할 때는 d_M 의 변화에 따라 λ 의 변화가 작고, 중앙 부근에서는 d_M 의 변화에 따라 λ 가 일정하게 증가하기 때문이다. 그리고 k 가 증가함에 따라 S자 모양이 보다 뚜렷이 나타나는 이유는 상기에 서술한 대로 주기성이 강화되어 포토닉 밴드갭이 뚜렷이 나타나기 때문이다.

성능지수 Q 는 가시광 영역(Fig. 4(d))에서 $k = 7$ 까지 그리고 적외선 영역(Fig. 5(d))에서 $k = 9$ 까지의 경우에는 d_M 이 증가함에 따라 증가하다가 감소하여 하나의 극대를 나타내었다. 가시광 영역에서 k 가 큰 경우($k = 9, 11$) 그리고 적외선 영역에서 k 가 큰 경우($k = 11$)에는 모드에 따라서는 두 개의 극대가 얻어졌다. 이는 모드에 따라서는 θ_F 가 극대를 이루는 d_M 에서 T 는 극소가 되어 성능지수가 감소하는 경우도 있기 때문이다. 그림으로는 나타내지 않았으나, 가시광 영역에서는 $k > 11$ 일 때 성능지수가 감소하는 경향을 보였다. 적외선 영역에서는 $k > 11$ 일 때 θ_F 가 45° 이상의 값이 얻어졌지만, 투과도가 현저히 감소하였다. 이것으로 볼 때 가시광 영역과 적외선 영역에서 모두 k 가 9~11일 때 가장 큰 성능 지수가 얻어짐을 알 수 있다. 국재 모드 (0)을 제외한 각 국재 모드에서의 성능지수는 단층 자성막에 비해 수 배 내지 수십 배 큰 값이 얻어졌다. 예를 들면, 가시광 영역에서 $k = 7$ 일 때, $Q = 0.12$ 이상 되는 부분이 국재 모드 (1)의 $d_M = 75 \sim 150$ nm에서, 국재 모드 (2)의 $d_M = 285 \sim 345$ nm에서, 국재 모드 (3)의 $d_M = 450 \sim 520$ nm에서 얻어졌다. 이 값은 단층 자성막에 비해 약 10배 이상 큰 값이다. 그리고, $k = 11$ 일 때 최대값 $Q = 0.15$ 가 $d_M = 375$ nm에서 얻어졌고, 이 값은 단층 자성막에 비해 약 30배 큰 값이며, 이 때의 $\lambda = 720$ nm, $T = 0.54$, $\theta_F = 8.13^\circ$ 이었다. 적외선 영역에서는 $k = 11$ 이고 $d_M = 800$ nm일 때, 단층 가네트막에 비해 약 100배 큰, 최대 값 $Q = 0.285$ 이 얻어졌고, 이 때의 $\lambda = 1114$ nm, $T = 0.485$, $\theta_F = 18^\circ$ 이었다. 따라서 성능지수가 가시광 영역에

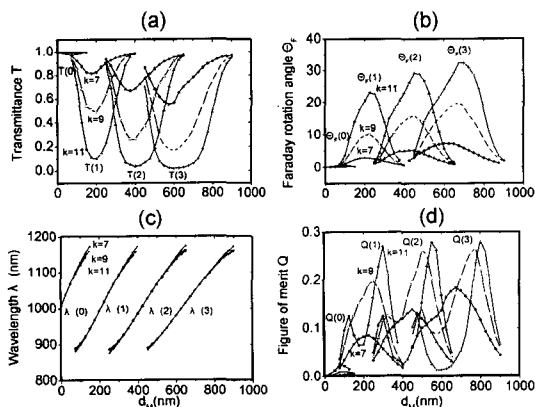


Fig. 5. (a) Transmittance T , (b) Faraday rotation angle θ_F , (c) wavelength λ , (d) figure of merit Q of the localized modes of 1D-MPCs as a function of d_M in the infrared.

비하여 적외선 영역에서 훨씬 크게 나타남을 알 수 있다. 또한, 이들 성능지수는 각각 $\lambda = 720 \text{ nm}$ ($\lambda = 1114 \text{ nm}$)의 경우, 단층의 가넷 막이라면 막후 $5 \mu\text{m}$ ($16 \mu\text{m}$)에서 얻는 값이나, 자성 포토닉 결정을 이용하면 막후 375 nm (800 nm)의 막에서 얻어지므로, 약 1/13 (1/20)밖에 안 되는 막으로도 동일한 성능 지수를 얻을 수 있어, 각종 자기 광학 디바이스에의 응용이 기대된다.

때의 $\lambda = 720 \text{ nm}$, $T = 0.54$, $\theta_F = 8.13^\circ$ 이었다. 적외선 영역에서는 $k = 11$ 이고, $d_M = 800 \text{ nm}$ 일때, 최대값 $Q = 0.285$ (단층 가넷막에 비해 약 100배 큰 값) 이 얻어졌고, 이때의 $\lambda = 1114 \text{ nm}$, $T = 0.485$, $\theta_F = 18^\circ$ 이었다. 이상으로부터 1차원 자성 포토닉 결정의 구조를 최적화하는 것에 의해, 단층의 자성막으로는 얻을 수 없는 높은 성능 지수를 얻을 수 있음을 밝혔다. 또한, 가시광선 영역에 비해 적외선 영역에서 보다 높은 성능지수가 얻어짐을 밝혔다.

V. 결 론

주기적으로 유전체 층($\text{SiO}_2(\text{A})$, $\text{Ta}_2\text{O}_5(\text{B})$)이 적층된 다층 막에 Bi를 다량 치환한 가넷 박막($\text{Y}_{1.93}\text{Bi}_{1.07}\text{Fe}_3\text{O}_{12}(\text{M})$)을 결합층으로 삽입한 $(\text{A/B})^k/\text{M}/(\text{B/A})^k$ 의 구조를 갖는 1차원 자성 포토닉 결정의 자기 광학 특성을 수치해석하였다. 자성체 층의 두께(d_M)와 유전체 층의 적층수(k)를 변화시키며, 가시광과 적외선 영역에서의 투과율과 페리데이 회전각 및 성능지수를 조사했다. 조사한 1차원 자성 포토닉 결정의 각 국제 모드에서의 페리데이 회전각 및 성능 지수의 극대값들은 단층 Bi 치환 가넷 박막에 비해 수 배 내지 백 배 큰 값이 얻어졌다. 가시광 영역에서는 $k = 11$ 일 때 최대값 $Q = 0.15$ 가, $d_M = 375 \text{ nm}$ 에서 얻어졌고, 이 값은 단층 가넷 막에 비해 약 30배 큰 값이며, 이

감사의 글

이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] M. Inoue, Jpn. Appl. Magetics, **22**, 1105(1998).
- [2] M. Inoue, K. I. Arai, M. Abe, T. Fujii, S. Fan, and J. D. Joannopoulos, Jpn. Appl. Magnetics, **23**, 1861(1999).
- [3] M. Inoue and T. Fujii, Jpn. Appl. Magnetics, **21**, 187 (1997).
- [4] M. Inoue, K. Arai, M. Abe, and T. Fujii, Digest of MORIS, Jan. **10-13**, USA (1999).
- [5] V. Doorman, J. P. Krumme, and H. Lenz, J. Appl. Phys. **68**, 3544(1990).

Numerical Analysis of Magneto-Optic Performance of One-Dimensional Magneto-Photonic Crystal

Jaehyuk Park and Jaekyong Cho

Department of Electronic Materials Engineering, Gyeongsang National University
900 Gazwa Chinju Gyeongnam

(Received 22 February 2000, in final form 10 March 2000)

One dimensional magneto-photonic crystal having structure of $(\text{A/B})^k/\text{M}/(\text{B/A})^k$, where M is a magnetic layer of highly Bi-substituted iron garnet, A and B are dielectric layers of SiO_2 and Ta_2O_5 , and k is the stacking number of the dielectric layers, has been numerically analyzed as a function of the thickness (d_M) of M (1~535 nm) and the stacking number of k (5~15). The transmittance, Faraday rotation, and figure of merit of the magneto-photonic crystal have been investigated both in the visible and infrared wavelengths. A factor of several and several tens greater Faraday rotation and figure of merit have been obtained compared to the single layer of M, at many localized modes. In the visible the maximum figure of merit of 0.15 was obtained ($\lambda = 720 \text{ nm}$) when $k = 11$ and $d_M = 375 \text{ nm}$ with $T = 0.54$, $\theta_F = 8.13^\circ$, which was a factor of 30 greater than that of single garnet layer. Much greater maximum figure of merit, 0.285, was obtained in the infrared ($\lambda = 1114 \text{ nm}$) when $k = 11$ and $d_M = 800 \text{ nm}$ with $T = 0.66$, $\theta_F = 18^\circ$, which was a factor of 100 greater than that of single garnet layer.