

맥스웰방정식을 이용한 1차원 자성포토닉결정의 특성 계산

Calculation of 1-dimensional magnetophotonic crystals with Maxwell equations

신광호(경성대 정보과학부), 김영학(부경대 전기계측공학과)

조재경(경상대 전자재료공학과), 사공건(동아대 전기전자컴퓨터공학과)

Mitsuteru Inoue(Toyohashi University),

1. 서론

광의 파장보다 짧은 주기를 가지며, 광의 굴절을 이 서로 다른 2종류이상의 투명매질을 이용하는 1차원구조를 가지는 포토닉결정은 1970년대부터 널리 연구되어 왔다. 1980년대 후반에 들어서서, 그 주기적인 구조체가 기존의 물질에서 발견할 수 없었던 새롭고 유용한 효과(임의주파수의 광을 선택적으로 전송하거나 금지, 혹은 특정영역내에 광을 국재하는 등)를 나타낼 수 있다는 것이 밝혀면서 주목을 받게 되었다¹⁻⁴⁾. 포토닉결정은 자연적으로 만들어지는 결정과 비교가 되지 않을 정도로 흥미로운 특성을 가지는 전혀 새로운 광학용 재료(혹은 디바이스)이지만, 실지로 디바이스를 제작하는 것이 매우 어렵기 때문에 지금까지도 그 물리적인 특성이 명확하게 밝혀져 있지 않다. 예를 들어, 광파이버통신에서 사용하는 $1.5\mu\text{m}$ 의 파장의 광을 제어하기 위한 포토닉결정을 만든다는 것은, 포토닉결정 내에서의 광의 반사가 기본적인 효과를 나타내는 요인이 되므로, 파장의 1/2정도의 주기, 즉 $0.75\mu\text{m}$ 정도의 주기를 가진 인공결정을 만들어야 하는 것이다. 또, 포토닉결정의 밴드갭효과를 유용하게 사용하기 위해서는, 물질의 굴절율에 영향을 받지만, 결정의 주기수가 10이상일 것이 요구되는 것이다.

그러나, 1990년대에 들어서면서 반도체연구의 부산물로서, 혹은 MEMS기술의 발달로서 재료를 나노미터오더로 정밀가공할 수 있는 기술이 사용될 수 있게 되면서 포토닉결정에 대한 연구가 본격적으로 수행되게 되었다. 최근, Tohoku대학 전기통신연구소의 S. Kawakami는 물리적인 연구를 넘어서 포토닉결정의 우수한 특성을 이용하는 디바이스의 개발에도 착수함으로써 꿈과 같이 생각되던 광을 자유롭게 제어하는 소자가 현실로 나타나게 될 날도 멀지 않았다는 것을 알 수 있다.

그러나, 이러한 연구들은 주로 광손실이 적은 유전체나 반도체를 이용하는 것으로, 자성체의 스핀을 이용하는 포토닉결정에 관한 연구는 현재까지 그 예가 많지 않다. 이러한 상황에서 본 연구그룹의 M. Inoue는 1999년 최초로 1차원 자성포토닉결정의 형성하고 광의 국재화를 통한 자기광학효과의 증대가 가능성을 증명함으로써 세계적인 주목을 받고 있다. 본 논문에서는 1차원 자성포토닉결정의 특성을 해명하기 위해서 광학적으로 불연속면을 가지는 주기구조에 맥스웰방정식을 이용한 해석적인 방법을 적용함으로써 1차원 자성포토닉결정이 가지는 독특한 특성인 거대자기광학효과가 주기구조의 주기가 광주기와 같은 오더일 때 급격히 증가한다는 것을 해명하였다.

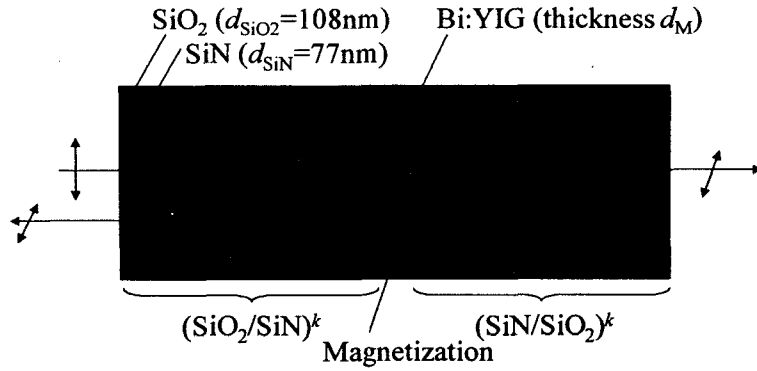


Fig. 1 Structure of 1D-MPC with a Bi:YIG film sandwiched between two dielectric multilayer films.

2. 이론적 해석

그림 1은 해석에 이용한 1차원 자성포토닉결정의 구조를 나타낸 것이다. 두께 d_M 의 Bi:YIG막을 $(\text{SiO}_2/\text{SiN})$ 주기구조의 다층막(10층)사이에 배치한 $(\text{SiO}_2/\text{SiN})^k/\text{Bi:YIG}/(\text{SiO}_2/\text{SiN})^k$ 구조의 1차원 자성 포토닉결정을 고려한다. 다층구조의 중심에 위치한 Bi:YIG층이 포토닉결정에서의 결합층으로 작용한다. 그림 1에서 나타낸 것과 같은 1차원 자성포토닉결정의 광국재모드는 주기구조를 가지는 다층막 유전체의 유전율과 적층수에 의해 결정되는 포토닉 밴드갭내에 결합으로써 존재하는 Bi:YIG층의 두께(본 계산에서는 170nm로 하여 계산하였다)에 대한 함수로서 나타낼 수 있고, 결합층의 두께를 파라미터로 하여 광의 투과율 $T(\%)$ 와 패러데이 회전 각 $\theta_F(\text{deg})$ 의 파장스펙트럼의 변화를 조사함으로써 1차원 자성포토닉결정의 특성을 알 수가 있다. Bi:YIG막 내부의 자화는, 광진행방향과 평행하다고 가정하면 광파의 다음과 같은 맥스웰방정식으로 표현될 수 있다.

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = j\omega\mu_0 \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = -j\omega\epsilon_0 \tilde{\epsilon} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \quad (2)$$

여기서, 비유전율 $\tilde{\epsilon}$ 은 텐서로서 그림 2에 계산에 사용한 Bi:YIG의 비유전율텐서의 주파수특성을 나

타내었다. 계산에 사용한 SiO_2 와 SiN 의 유전율은 상수로 각각 2.25, 4.41을 적용하였다. Bi:YIG층에서의 광파상태를 나타내는 상태벡터 $\tau(Z)$ 는 다음 식과 같이 좌우편광진행파와 후퇴파의 합으로 나타낼 수 있고, 상태벡터의 매트릭스를 고려함으로써

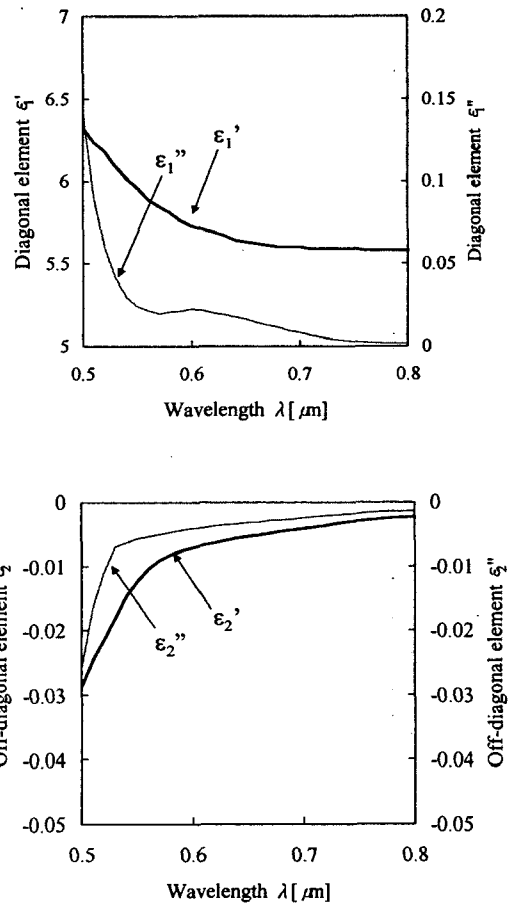


Fig. 2 Relative permittivity of Bi:YIG.

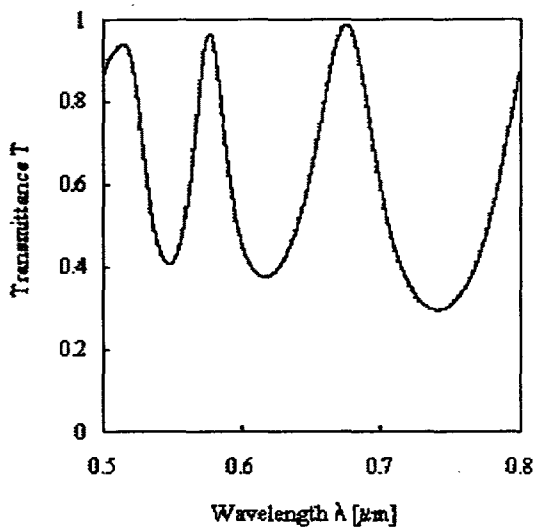
광파의 투과율을 구할 수 있다⁵.

또한, 기본방정식과 상태벡터를 연산하여 다음과 같이 패러데이회전각을 구할 수 있다.

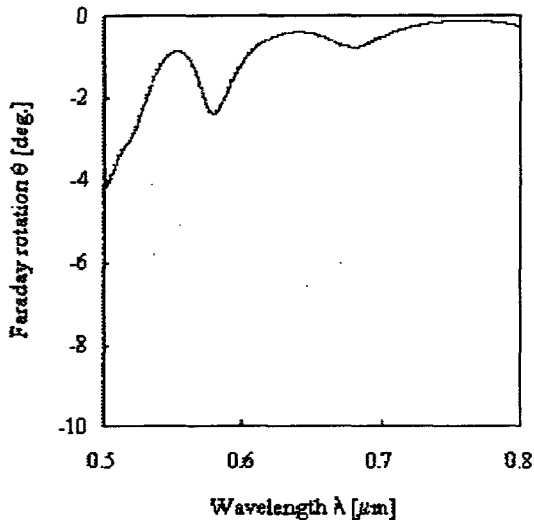
$$\theta = \frac{1}{2N_M d_M} \tan^{-1} \left(\frac{2\text{Re}(\chi)}{1 - |\chi|^2} \right) \quad (3)$$

3. 결과 및 고찰

그림 3은 앞에서 서술한 주기구조를 가진 1차원



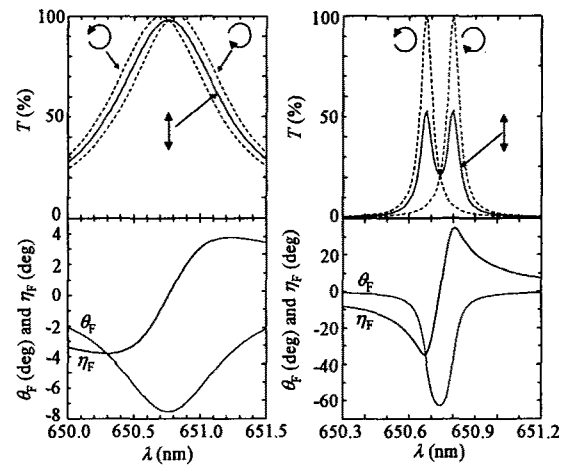
(a)



(b)

Fig. 3 Transmittance and Faraday rotation of magnetophotonic crystal.

자성 포토닉결정의 광반사율과 패러데이회전각을 계산한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 결합층의 두께를 170nm로 하고, 다층막의 층수를 10층으로 하여 계산한 경우, 포토닉밴드갭이 0.5-0.8 μm 의 파장영역내에서는 존재하지 않았다. 이는 자성 포토닉결정내에 존재할 수 있는 두 개의 밴드갭이 분리되지 않았기 때문일 것으로 추정된다. 그림4은 이러한 위상간섭효과를 설명하기 위해서, $d_M=140\text{nm}$ 의 1차원 자성포토닉결정에 원편광(점선)과 직선편광(실선)을 각각 독립적으로 입사시킨 경우의 국재모드(1)의 투과율과 파장스펙트럼을 구한 것이다. 그림4(a)는 (SiO_2/SiN)의 적층수를 10으로, 그림4(b)는 적층수를 14로 한 경우를 나타낸 것으로, 직선편광 입사시의 패러데이회전각과 타원율을 같이 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 원편광의 국재모드는 양쪽의 전송파수가 미세하게 다르기 때문에, 그 차이에 대응한 파장에서 100%의 투과율을 나타낸다. 그림4(b)의 경우에는, 두 개의 국재모드가 분리되어 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 유전체적층막의 증가에 의해서 파장선택성이 강하게 나타나기 때문이다. 이 결과 직선편광입사시에는 자성체내부에서 2개의 직교하는 국재모드 간에서 위상간섭을 나타내고 있다. 위상정보를 나타내는 θ_F 와 η_F 는 이 상태를 잘 반영하고 있으며,



(a) $k=10, d_M=140\text{nm}$

(b) $k=14, d_M=140\text{nm}$

Fig. 4 Wavelength spectra of transmissivity T of the localized modes.

원편광모드의 강도가 같은 파장에서 최대의 θ_F 와 $\eta_F=0$ (직선편광)이 실현되어, 이 파장에서 벗어나게 되면 타원편광으로 되어서 θ_F 가 저하 되는 것이다.

4. 참고문헌

1. J. D. Joannopoulos, R. D. Meade and J. N. Winn: Photonic Crystal, Princeton University Press, New Jersey, 1995.
2. K. Ohtaka: Phys. Rev. B 19, 5057 (1979).
3. E. Yablonovitch: Phys. Rev. Lett. 58, 2059 (1987).
4. S. John: Phys. Lett. 58, 2486 (1987).
5. M. Inoue: J. Appl. Phys., 81(8), 5659 (1997).