

일차원 광자결정을 이용한 다중채널 광-투과필터

남기연, 정건, 김준형, 조성준, 이현용

전남대학교 응용화학공학부

Multichannel optical transmission-filters based on one-dimensional photonic crystals

Gi-Yeon Nam, Geon Jeong, Jun-Hyung Kim, Sung-Jun Cho, and Hyun-Yong Lee

Faculty of Applied Chemical Engineering, Chonnam National University

Abstract

파장다중분할 방식의 광통신소자는 단일파장 뿐만 아니라 이웃하는 여러 파장대에서도 동작할 수 있는 유연성을 갖는 소자가 요구된다. 이를 해결하는 하나의 방법이 파장제어(다중채널) 광자결정(Photonic crystal)소자이다. 본 연구에서는 결합층으로 광자결정체 배열구조를 가지는 다중주기 일차원광자결정을 이용하므로 투과광 파장제어가 가능한 가변형 다중채널 투과필터를 얻을 수 있는 이론적 모델과 그에 따라 제작된 Si/SiO₂의 광자결정체를 제작하고 그 특성을 고찰하였다. 반사밴드 겹내에 생성된 다중투과-dip의 파장 위치는 이론값과 정확하게 일치하였다. 특히, 결합층 수(N)에 따라 광자 에너지갭내에 $2N$ 개의 투과-dip 모드를 생성할 수 있으며, 이들은 주파수범위에 대해 대칭 분포됨을 알 수 있다. 여기에 제안하는 다중채널 투과필터는 외부 전원 없이 입사각도를 미세 조절하므로 파장을 tuning할 수 있다.

Key Words : 일차원광자결정, 파장가변 광-투과필터, 광자 에너지갭, 결합층, 투과-dip 모드수

1. 서론

21세기 들어 전 세계적으로 더욱 빠른 속도로 발전해 나가고 있는 광통신 산업과 그에 발맞춰 진화발전하고 있는 광부품 시장에서 주도적인 역할을 하기 위해 기반, 원천기술에 대한 새로운 아이디어 창출이 필요하다. 21세기형 새로운 광소재 및 소자개발이라는 목표 실현에 적합한 재료중의 하나가 광자결정(photonic crystals)일 것이다. 최근, 광자결정의 제조 및 그의 이론 확립 그리고 차세대 광전자소자 및 광통신분야로의 응용성에 많은 관심이 모아지고 있다.[1-5]

광자결정에 대한 체계적인 연구는 기존 결정-반

도체가 갖는 원자적 주기성에 의해 특정 에너지 범위에서 전자에 대해 전자적 에너지갭을 갖는 것과 마찬가지로, 임의의 파장을 갖는 광자(photon) 역시, 그 파장 스케일의 주기를 갖는 결정 구조에서 광자밴드갭(photonic bandgap, PBG)을 가질 것이라는“『발상의 전환』”으로부터 시작한다.[1] 최근까지 빛의 편광상태 및 입사방향에 상관없이 완전한(옴니-, omnidirectional) 광자밴드갭은 3차원 구조의 잘 제작된 광자결정에서만 얻어지는 것으로 인식되어 왔다. 그러나, 1998년 Fink 등[3]이 “잘 디자인된 1차원(1D) 광자결정에서도 옴니-PBG를 얻을 수 있다”는 것을 발표한 이래 3D, 2D 뿐만 아니라 1D 광자결정에 대한 연구가 본격

적으로 이루어지고 있다. 광자결정 개념의 중요성은 적절하게 디자인된 광자결정을 이용하므로 빛의 경로 및 발생을 자유로이 제어할 수 있다는 점에서 광통신분야 및 광전소자 분야에 포괄적으로 이용될 수 있다는 것이다. 즉, 광자결정이 microcavity, 광도파로, 발광소자, 광스위치 및 검출기, 광섬유 등의 많은 능, 수동 광전소자 및 광통신분야에 직접 이용될 수 있다는 점 이외에 이 광자결정의 개념이 에너지, 의료분야 등 타 분야에 새로운 아이디어를 지속적으로 제공할 것이라는 데 그 중요성이 있다.

단일 파장이 아닌 이웃하는 여러 파장대에서도 동작할 수 있는 유연성을 갖는 소자가 파장분할다중(WDM) 방식의 광통신분야에 요구된다. 이 요구를 포괄적으로 만족시킬 수 있는 소재가 파장제어(다중채널) 광자결정이라 판단된다. 많은 세계적인 연구그룹에서 이미 파장제어 광자결정에 대한 연구개발의 필요성 및 중요성을 보고했고, 일부이지만 이러한 소자를 설계, 테스트 단계에 있는 것으로 보고되고 있다. 2002년 말, 광자결정분야의 리더그룹인 MIT의 Joannopoulos 그룹에서는 저전압에서 파장을 가변할 수 있는 공기-갭을 갖는 일차원 실리콘계열 광자결정을 보고 한 바 있다.[6] 이 소자는 비록 저전압(약 4V)에서 파장가변이 가능하지만 공기-갭의 존재로 인해 제작이 복잡하고, 단지 4개의 공진 파장을 갖는 단점을 보였다.

본 연구에서는 에어-갭을 갖지 않는, 광자결정체 구조 내에 다른 광자결정구조를 결함층(defect layers)으로 삽입한 다중주기 일차원 광자결정체를 제안하고, 전압인가방식이 아닌 입사각 조절 및 TE/TM 편광광 선택에 의해 투과파장을 미세하게 제어할 수 있음을 보이고자 한다. 즉, 일차원광자결정체를 이용한 파장가변 다중채널 광-투과필터를 얻을 수 있는 이론적 모델을 세우고 Si-SiO₂를 이용한 소자를 제작하고 특성을 평가할 것이다.

2. 실험

그림 1은 다중투과필터로의 적용을 위한 Si/SiO₂ 일차원 광자결정체의 기본구조이다. 제안하는 필터의 기본구조는 그림과 같이 주기(period) Λ_A 의 일차원 광자결정체를 기본으로 하며, 이 내부에 새로운 주기 Λ_B 의 결함(defect) 광자결정체를 포함한다.

다. Λ_A 의 쌍수(number of pairs)를 M , Λ_B 의 쌍수를 N 을 갖도록 설계할 경우, 단순 광경로는 대기 $\rightarrow [1/2 \cdot M \cdot \Lambda_A \rightarrow (N \cdot \Lambda_B) \rightarrow 1/2 \cdot M \cdot \Lambda_A] \rightarrow$ 기판 형태로 표현된다.

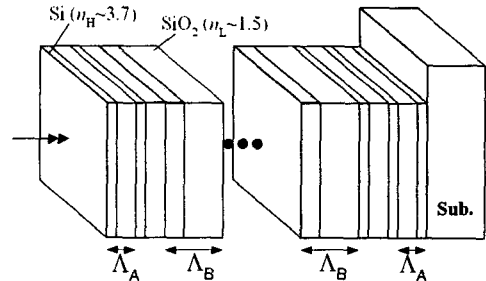


그림 1. 제안하는 Si/SiO₂ 일차원 광자결정체의 기본구조

Si과 SiO₂ 및 기판에 대한 복소굴절률 $n_H(\text{Si}) = 3.7 + i0$, $n_L(\text{SiO}_2) = 1.5 + i0$, $n_s(\text{corning 유리기판}) = 1.6$ 으로 가정하여 계산하였다. 실제, 이러한 재료들의 광통신 파장대인 1.3-1.6 μm 범위의 광에 대해 소광계수(extinction coefficient)는 무시할 정도로 작으며 굴절률(실수부)의 분산특성은 매우 작다[7,8]. 또한, 광자결정구조의 각 교번층에 대한 두께 비율(d_H/d_L)로 정의되는 n 는 각각 0.348, 0.406, 0.508, 0.569로 가정하여 계산할 수 수행한다. $n=0.406$ 은 Si과 SiO₂에 대한 굴절률 비와 일치하는 조건이다.

광자결정 제작은 r.f. 스퍼터를 이용하였고, 스퍼터 시간을 조절하므로 두께를 제어하였다. 균일한 막을 얻기 위해 기판은 일정한 속도(4 rpm)로 회전시켰다. 제작된 광자결정체의 구조파라미터 값은 다음과 같다. $\Lambda_A = 323.6 \text{ nm}$ ($d_H = 93.4 \text{ nm}$, $d_L = 230.6 \text{ nm}$), $\Lambda_B = 647.2 \text{ nm}$ ($d_H = 186.8 \text{ nm}$, $d_L = 461.2 \text{ nm}$), $n = 0.406$, $M = 4$, $N = 2$. 제작된 광자결정의 반사 특성은 파장범위 700-2500 nm(입사각 5°의 비편광빔)에서 Spectrophotometer(HITACHI, U-4100)를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

일차원 광자결정은 그 설계에 따라 원하는 파장 범위에서 음니-광자밴드갭(완전반사)을 가질 뿐 아니라, 광자결정 내부에 결함층을 갖게 하므로 음니-광자밴드갭 내에 결함준위(defect level)를 만들 수 있다. 여기서의 결함 준위는 예리한(sharp) 투

과특성으로 나타나며, 투과파장(주파수)은 결합층 및 광자결정의 구조적 파라미터-재료의 굴절율(n), 두께(d) 및 충진계수(η)등-를 조절하므로 제어될 수 있다.[7-9] 더욱이, 단일 결합층을 갖는 광자결정에서는 단일 결합준위가 생성되는 반면, 결합층의 구조를 변화시키므로 결합준위 수를 제어할 수 있다. 즉, 이것은 음-광자밴드갭 내에 인위적으로 다중투과필터 역할을 할 수 있는 다중 결합준위 생성을 의미한다. 제작된 광자결정체에 대한 계산 및 실측된 반사도 특성을 각각 그림 2(a),(b)에 보였다.

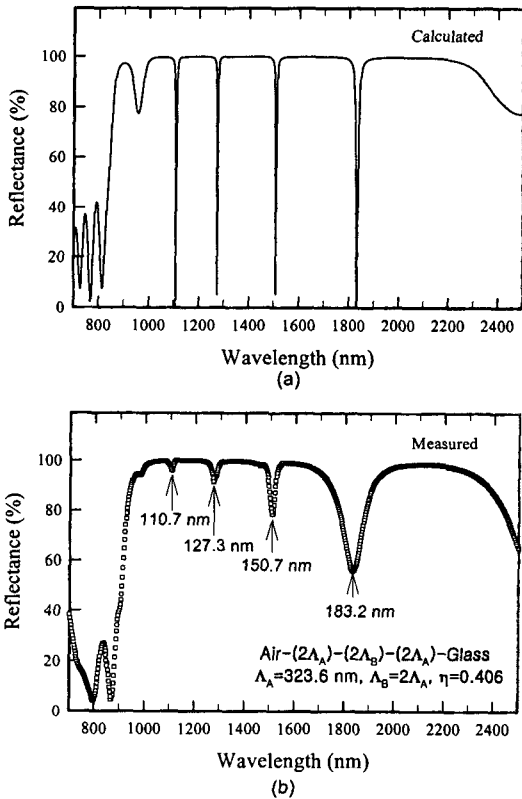


그림 2. 제작된 광자결정체에 대한 계산 및 실측된 반사도

그림 2(b)에서 보는 바와 같이 반사 밴드갭 내에 110.7, 127.3, 150.7, 183.2 nm의 파장에서 반치폭이 각각 96, 26, 26, 15 nm인 dip(4개의 투과모드)이 관찰되었다. dip의 모양이 계산 결과와는 크게 다르지만, 파장 위치는 정확하게 일치함을 알 수 있다. 비록, 박막의 균일도를 높이기 위해 스퍼터링 시 기판을 회전시켰지만, 제작된 시료에서 프린지

및 얼룩이 관찰되었다. 또한, 측정 dip의 반치폭이 증가한 것은 비교적 큰 측정 빔(직경~10 mm)으로 인한 결과로 판단된다. 1000 nm 파장이하에서 두 스펙트럼사이에 두드러진 차이가 생긴 것은 Si의 흡수에 기인한 결과이다.

자체 개발된 계산-툴을 이용하여 얻어진 결과를 그림 3-5에 각각 보였다. 그림 3는 $\eta=0.406$, $M=4$ 로 고정하고 결합광자결정체의 쌍수 N 을 1, 2, 5, 10, 20으로 변화시킨 광자결정구조에서의 반사스펙트럼이다. 가로축은 규격화주파수($\omega=\Lambda_A/\lambda$)의 함수로 표현하였으며, FB는 평탄밴드(flat band)이다.

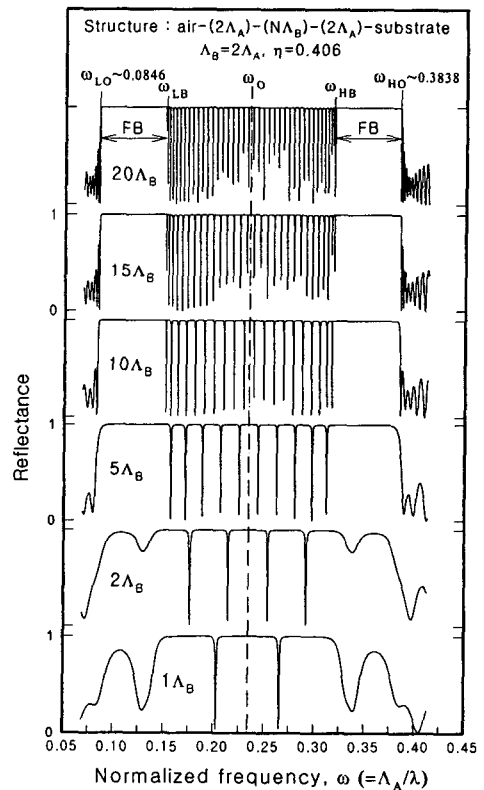


그림 3. 결합 광자결정체의 쌍수 N 을 1, 2, 5, 10, 20으로 변화시킨 광자결정구조($\eta=0.406$, $M=4$)의 계산된 반사도

그림 3에서 보는 바와 같이 비교적 큰 수의 N (≥ 10)에 대해 광자밴드갭(반사도>99%)은 약 $\omega_{LO}=0.0486$ 과 $\omega_{HO}=0.3838$ 의 주파수 범위에 존재한다. 여기서, ω_{LO} 과 ω_{HO} 는 각각 수직입사($\theta_i=0^\circ$)에 대한 하부주파수단(lower frequency edge)과 상부주파수단(upper frequency edge)을 나타내며 밴드

중심주파수 ω_0 는 $(\omega_{H0} + \omega_{L0})/2$ 로 정의된다. 즉, $\omega_0 = 0.2342$. 특히, 그림 3에서 보는 바와 같이 “결합브랜치 또는 결합준위들은 광자에너지갭내에 $2N$ 가 존재하며 이들은 ω_0 를 축으로 대칭 분포됨”을 알 수 있다. 즉, 결합준위들은 양단의 평탄밴드 사이에 존재하며 ω_0 를 중심으로 좌우 대칭된다. 이 구조에서 평탄밴드는 약 0.0656이고 결합준위 수 m (channels)은 $2N$ 으로 주어진다.

그림 4는 $M=4$, $N=10$ 으로 고정하고 결합광자결정체의 충진율 η 를 변화시켜 가며 계산된 광자결정구조에서의 반사 스펙트럼을 보여준다.

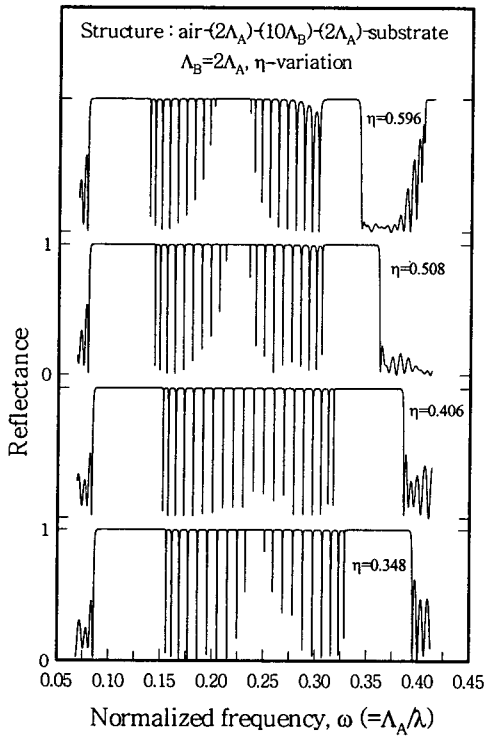


그림 4. 광자결정체의 η 에 대한 결합준위분포 의존성

그림 4에서 보는 바와 같이 η 가 두 교번층 내의 광경로가 일치하는 조건인 0.406을 벗어남에 따라 중앙부분의 결합준위간 간격에 차이가 발생하며, 양쪽 평탄밴드의 대칭성이 파괴된다. 또한, η 가 증가함에 따라 광자밴드갭이 증가함을 알 수 있다. 따라서, 결합준위의 제어를 위해 η 에 대한 결합준위분포를 모델화하는 것이 필요하다.

그림 5는 $M=4$, $N=10$, $\eta=0.406$ 인 광자결정체의 광자밴드구조를 나타낸다. 그림 5에서와 같이 음-광자밴드갭이 ω_H 와 ω_L 사이에 존재함을 알 수 있다. 또한, TM 편광광의 경우, 입사각 증가에 따라 결합준위의 반치폭은 증가하여 약 40° 부근에서 겹쳐진다. 반면에, TE 편광광의 경우, 입사각증가에 따라 결합준위의 폭은 감소한다. 특히, 양 편광광에 대해 의존하는 정도는 차이가 있지만, 입사각도 증가에 따라 결합준위들은 어떤 체계적인 모습으로 고주파수 (단파장) 영역으로 천이(shift)됨을 알 수 있다. 즉, 입사각의 미세변화가 다중채널(이 경우, $m=20$)의 미세변화를 야기함을 알 수 있다.

따라서, 이론적 모델링을 통해 결합준위분포의 입사각의존성을 규명함으로써 가변형 다중채널 투과필터를 제작하는 것이 가능하다.

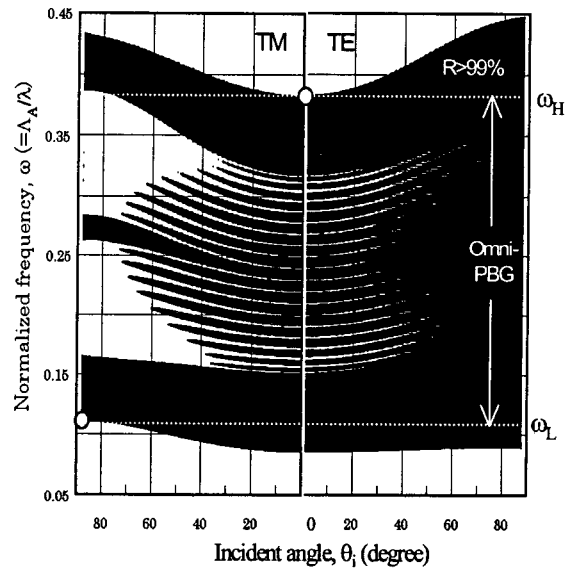


그림 5. 광자결정체의 광자밴드구조

기존 광통신시스템의 필터링은 입력 정보광원에 대해 단일 파장을 투과필터하고 이를 반복 수행하는 것으로 요약된다.

여기서 제안하는 다중채널 투과필터는 그림 6과 같이 다발(packet)형태의 m -채널파장($\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_m$)을 투과필터링하며, 투과되지 않은 평탄밴드내의 반사광(>99% 이상의 반사)에 대해 필터 입사각도를 미세 조절하여 이웃하는 m -채널파장($\lambda_1^*, \lambda_2^* \dots \lambda_m^*$)을 재 투과필터링 시키는 방식의 파장가변이 가능하다.

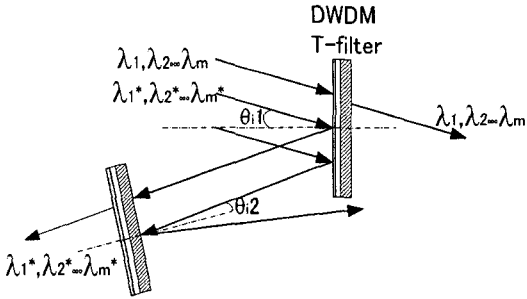


그림 6. 제안하는 광자결정체를 통한 다발형태의 m -채널 파장투과와 입사각변화에 따른 투과파장 가변을 나타내는 개략도

4. 결론

본 연구에서는 결합층으로 하나의 광자결정체 배열구조를 가지는 다중주기 일차원광자결정체를 이용하므로 투과광 파장제어가 가능한 가변형 다중 채널 투과필터를 얻을 수 있는 이론적 모델과 그에 따라 제작된 Si/SiO₂의 광자결정체를 제작하고 그 특성을 고찰하였다. 반사밴드 갭내에 생성된 투과-dip의 모양은 계산 결과와는 크게 달랐지만, 파장 위치는 정확하게 일치함을 알 수 있다. 특히, 투과-dip(결합브랜치 또는 결합준위)은 광자에너지 갭내에 $2N$ 가 존재하며 이들은 주파수범위에 대해 대칭 분포됨을 알 수 있다. 여기서 제안하는 다중 채널 투과필터를 이용하므로 외부 전원 없이 입사각도를 미세 조절하므로 다발(packet)형태의 m -채널파장을 투과 필터링시킬 수 있다.

본 연구에서 제안한 일차원광자결정 가변형 광 투과필터의 주요 특성은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- (1) N 의 수를 증가시키므로 투과결합준위 수 m 을 증가시킬 수 있다.
- (2) M 의 수를 증가시키므로 투과 결합준위의 반치폭을 나노-스케일이하 줄일 수 있다.
- (3) 입사각(광자결정의 결정축)의 미세 조절을 통해 투과결합준위 분포의 연속적제어가 가능하다.
- (4) 위의 (1),(2),(3)의 특성은 입사광의 선형 편광 상태(TE/TM)에 의존한다.
- (5) 광자결정체를 구성하는 재료의 선택 및 구조에 따라 광자밴드갭을 제어하는 것이 가능하다. 따라서, (1)-(5)로부터 얻을 수 있는 투과 광정보(optical signals)는 미세하게 분류될 수 있다. 최

근, 광섬유나 평판도파로에 Bragg grating을 형성하여 광센서(바이오, 압력, 온도센서 등)에 이용하려는 연구가 한참 진행 중이다. 본 연구에서 제안하는 광자결정체는 광-가스 센서나 광-바이오센서 재료로 응용이 기대된다. 예를 들어, 광자결정 센서의 타겟이 되는 매질(가스층, 바이오품질 등)을 통과하고 광자결정에 입력되어 투과되어 나가는 정보를 스펙트럼 분석기 등을 이용, 레퍼런스 광정보와 비교하므로 타겟 매질 특성을 분석하는 것이 가능하다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2003-003-D00171).

참고 문헌

- [1] E.Yablonovitch, *Phys. Rev. Lett.* **58**, p.2059 1987.
- [2] J.D.Joannopoulos, R.Meade, and J.Winn, *Photonic Crystals (Princeton Univ. Press, Princeton, 1995)*.
- [3] J.D.Joannopoulos, P.Villeneuve, and S.Fan, *Nature (London)* **386**, p.143, 1997.
- [4] Y.Fink, J.N.Winn, S.Fan, C.Chen, J.Michel, J.D. Joannopoulos, and E.L.Thomas, *Science* **282**, p. 1679, 1998.
- [5] J.C.Knight, J.Broeng, T.A.Birks, and P.S.J. Russell, *Science* **282**, p.1476, 1998.
- [6] Y.Yi, P.Bermel, K.Wada, X.Duan, and J.D. Joannopoulos, and L.C. Kimerling, *Appl. Phys. Lett.* **81**, p.4112, 2002.
- [7] H.Y.Lee and T.Yao, *J. Appl. Phys.* **93**, p.819, 2003; *Virtual J. Nano. Sci. Technol.* **2**, 2003.
- [8] H.Y.Lee, H.Makino, T.Yao, and M.Tanaka, *Appl. Phys. Lett.* **81**, p.4502, 2002.
- [9] H.Y.Lee and T.Yao, *J. Kor. Phys. Soc.* **44**, p. 387, 2004.