

액정을 이용한 광자결정의 형성과 전기광학 효과

권장운, 한순구, 강대승  
 송실대학교 전기공학과

Electro-optic Behavior of Photonic Crystals with Nematic Liquid-Crystal

Jangun Kwon, Soonku Han, Daeseung Kang  
 Department of Electrical Engineering, Soongsil University, Seoul 156-743

**Abstract** - In this paper, we present a study of the structure and electro-optic behavior of hybrid liquid-crystal-silica sphere composite photonic crystals, formed by filling the (26% by volume) void space of fcc (face centered cubic) silica opals infiltrated with a nematic liquid crystal. Three dimensional photonic crystals of visible range were fabricated via a self assembly method of silica spheres of submicron diameter. The expected fcc structure was confirmed by scanning electron microscopy (SEM) of the dehydrated crystal with glass removed. The photonic crystal exhibited significant electric-field-induced shift of the optical Bragg reflection peak when the liquid crystal has the long molecular axis oriented parallel to the sphere surfaces.

1. 서 론

결정 구조를 갖는 물질들은 원자나 분자들의 규칙적인 배열로 인하여 주기적인 포텐셜이 생겨 전자들의 움직임에 영향을 미치는데 이로 인해 생기는 현상이 전자 밴드갭(electronic band gap)의 형성이다. 이렇게 생긴 밴드갭은 특정한 에너지를 가진 전자의 진행을 막는 역할을 한다. 이를 빛에 대해서도 그러한 밴드갭 개념으로 적용할 수 있는데, 유전율이 서로 다른 물질을 주기적으로 배열한 광자결정(photonic crystal)은 특정한 파장대역의 전자기파를 선택적으로 통과시킬 수도 있고 막을 수도 있다[1-2]. 이러한 광자밴드갭(photonic band gap) 구조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 알려진 바로는, 실리카 구들이 서로 밀착된 fcc(face centered cubic) 구조체에서는 8번과 9번 밴드 사이에 광자밴드갭이 나타난다.

3차원 광자결정의 형성법과 더불어 광소자로의 응용을 위해서는 밴드갭영역등 광자결정의 물리적 특성을 임의로 조절할 수 있는 방법에 대한 연구가 관심을 끌고 있는데, 현재 평판 디스플레이등에 널리 쓰이고 있는 액정(liquid crystal, LC)재료는, 유전율 이방성(anisotropy)을 지니고 있어 외부 전기에 의해 분자의 방향을 손쉽게 재배열 할 수 있다. 이러한 전기적 이방성을 이용하면, 광자결정의 유전상수를 조절할 수 있어, 제어가능한(tunable) 광자밴드갭 소자에 이용할 수 있다[3-9].

본 논문에서는 초미세한 크기의 균일한 실리카(SiO<sub>2</sub>) 구를 이용하여 self-assembly 방법으로 가시광선영역의 3차원 opal 광자결정을 구현하고, 결정의 빈공간(총부피의 약 26%)을 네마틱액정으로 채운 후 Bragg 반사도를 측정함으로써 광자결정의 전기광학적 특성과 구조에 대해 연구하였다. 형성된 광자결정이 fcc 구조를 지니고 있음을 전자현미경으로 확인하고, 액정 장축방향에 실리카 구의 표면과 평행이 되도록 배향된

경우 최대 Bragg 반사파장은 외부전기장에 의해 움직임을 관측하였다.

2. 본 론

2.1 실험방법

직경(D)이 200nm 정도인 구형 비정질 실리카(SiO<sub>2</sub>) colloid 용액(Nissan Chemical Corp.,에서 제공)을 초고속 원심분리회 회석을 반복적으로 되풀이하여 입자크기분포를 비교적 monodisperse 하게 만든다. 1cm X 3cm 크기의 두개의 투명전극(ITO, InTiO<sub>2</sub>) 유리판 사이에 10μm 두께의 spacer를 끼운 후 두 판을 고정시켜 빈 cell을 만들고, cell 내부로 실리카 colloid를 침투시킨다. cell을 수직으로 세워두어 실리카입자들이 서서히 침전하도록 한다. 시간이 지남에 따라 실리카 입자들이 self-assemble 하면서 cell의 아래 부분에서 강한 반사광을 볼 수 있다. 이는 cell의 아래 부분에 작은 인공 opal 광자결정체들이 형성되어 감을 보여준다. 결정의 성장률은 약 1mm/day 이다. 저온에서 천천히 물을 증발시킨 후 250°C에서 약12시간 정도 어닐링(annealing) 함으로써 opal 결정의 기계적 강도를 증가시킨다. 이렇게 형성된 opal의 결정구조는 한쪽 유리판을 제거한 후, SEM을 이용하여 ABCABC 배열을 갖는 fcc 구조를 확인하였다(그림 1).

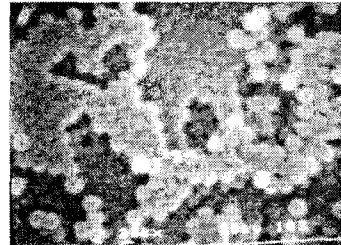


그림 1. opal 결정의 SEM

이렇게 opal 결정이 형성된 cell에 굴절을 이방성을 지닌 네마틱 액정 PCH5(Merck 사, 등방성←54℃←네마틱)[10]을 진공에서 모세관 현상을 이용하여 침투시킨다. 액정은 opal의 빈 공간에 침투하게 된다. 실험시 너무 빠른 침투는 실리카입자들의 주기적인 배열을 흐트러 수 있으므로 주의가 필요로 한다. opal과 opal-액정 복합재료의 전기광학적 특성은 Ocean Optic사의 S2000 UV-Visible Spectrometer 장비를 이용하여 측정하였다. 본 실험에서 사용한 opal 광자결정의 domain 크기는 직경 50~100μm이다.

Bragg 반사 peak 파장은 Bragg 회절이론에 의하면

$$\lambda_B = D(2\sqrt{2/3})n \tag{1}$$

에 의해 결정된다. 이때  $D$ 는 입자의 직경,  $n$ 은 전체 매질(액정-opal 복합체)의 평균유효굴절율을 의미한다.

### 2.2 실험결과 및 토론

그림 2는  $T=45^\circ\text{C}$ 에서  $[111]$  방향에서의 Bragg 반사 spectrum 을 나타낸 것으로, 전계를 인가하여도 기본적인 형태는 변하지 않음을 알 수 있다. 매질의 유효굴절율  $n$ 은 실리카의 굴절률과 액정의 유효굴절률의 평균으로 결정되어진다. 전체 매질중, 실리카구가 74%의 부피를 차지하고 있으므로

$$n = \sqrt{0.74 n_s^2 + 0.26 n_{LCeff}^2} \quad (2)$$

식(2)에서  $n_s$ 와  $n_{LCeff}$ 는 각각 silica의 굴절률과 액정의 유효굴절률을 나타낸다. 그러므로 Bragg peak  $\lambda_B$ 는

$$\lambda_B = D(2\sqrt{2/3})\sqrt{0.74 n_s^2 + 0.26 n_{LCeff}^2} \quad (3)$$

이다. 이때, bulk 실리카의 전형적인 굴절률 값  $n_s = 1.45$  과, 온도  $55^\circ\text{C}$  즉 등방상(isotropic phase)에서의 PCH5 액정의 굴절률 값  $n_{LC} = 1.52$ 을 식(3)에 대입하면, 실리카 입자의 직경  $D = 207\text{nm}$ 을 얻는다. 이는 SEM으로 측정된 값과 잘 일치한다.

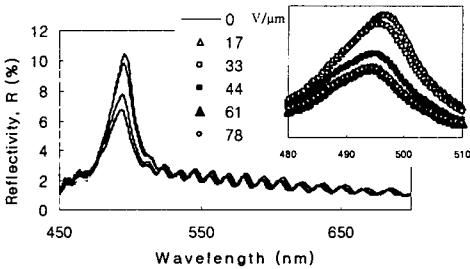


그림 2. PCH5 액정이 침투된 액정/오파 복합결정의  $[111]$ 방향에서의 반사 spectra. Inset: 외부전계의 크기에 따라 Bragg 최대 파장  $\lambda_B$ 의 위치가 단파장쪽으로 이동함을 보여주고 있다.

$n_{LCeff}$ 가  $n_s$ 보다 크므로, 외부전계에 의한  $n_{LCeff}$ 값의 감소는  $\lambda_B$ 의 감소를 수반한다. 그림 3에서 보듯이, 외부전계가 증가함에 따라 Bragg peak 파장변화가 Freederick 전이형 변화곡선을 따른다.

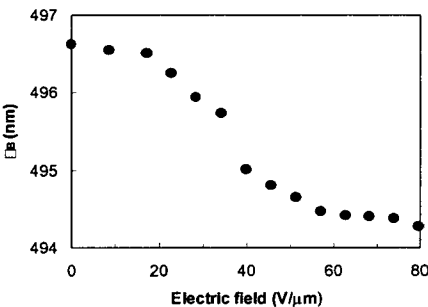


그림 3. Bragg 반사 peak 파장  $\lambda_B$ 의 전계 의존

그림 4는  $[111]$  방향 Bragg peak 와 이에 상응하는 액정의 유효굴절률  $n_{LCeff}$ 의 온도변화와 전계 유도변화를 보여주고 있다.  $\lambda_B$ 로부터 계산한  $n_{LCeff}$  값은 등방상일때의 굴절률과 액정상 온도영역에서의 평균굴절률 값과 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 4는 또한  $n_{LCeff}$ 가 최대값 ( $n_e$ )와 최소값 ( $n_o$ )을 가지는 극한 경우에서의 최대 Bragg 반사파장을 보여주고 있으며,  $E = 70\text{V}/\mu\text{m}$ , 60Hz 교류 전계를 가하였을 때  $\lambda_B$ 의 온도에 대한 의존성을 보여준다. 그림에서 드러나듯이 강한 외부전계에 의해 Bragg peak 변화는 최대변화폭의 약 60% 정도이다. 이는 실리카입자 표면에 anchoring 되어있는 액정분자들이 실리카 구 안에 형성된 기하학적인 결합들과 강한 상호작용을 하고 있음을 보여준다. 표면 근처의 분자들로 이루어진 층은 재배열을 위해 실험치보다 높은 강한 전계 ( $E \gg 70\text{V}/\mu\text{m}$ )를 필요로 한다. 또한, 액정분자 배열  $n(r)$ 이 외부전계  $E$  방향에 평행하고, ITO 유리판에 수직인 방향으로 재배열함은, PCH5의 정의 유전율이방성 ( $\Delta\epsilon = 12.7$ )[10]과 일치한다. 즉, 광학적 전계가 대부분  $n(r)$ 에 수직이므로  $n_{LCeff}$  값이  $n_o$ 에 접근한다.

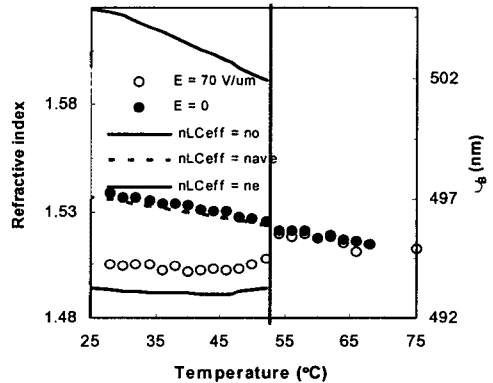


그림 4. Bragg반사 peak 파장  $\lambda_B$  과 상응하는 액정의 유효굴절률  $n_{LCeff}$ 의 온도변화. 실선은  $\lambda_B$ 과  $n_{LCeff}$ 의 최대범위를 나타내고, 점선은 bulk에서의 액정의 평균 굴절률  $n_{avg}$ 을 나타낸다. 그림중의 세로선은 PCH-5 액정의 상전이를 나타내고 있다.

### 3. 결론

실리카 opal과 그 빈 공간에 네마틱 액정을 침투시킨 광자결정에서, Bragg 반사 peak 파장의 움직임은 전계의 변화에 따른 네마틱 액정의 유효굴절률 변화에 의해서 나타났다. 실리카 opal의 빈 공간 내에 있는 액정 분자들은 초기에 실리카구 표면에 평행하게 배열되어 있으며 외부전계에 의해서 집합적으로(collectively) 반응하였다. 요약하면 네마틱 액정-오파 광자결정에 외부전계를 인가하여 비록 적은 폭이지만 Bragg peak 파장을 조절할 수 있었고, 이는 가시광선 영역의 3차원 tunable 광자밴드갭 구조를 형성에 응용할 수 있다.

### [참고 문헌]

- [1] E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics," Phys. Rev. Lett., vol. 58, pp. 2059-2062, 1987.
- [2] S. John, "Strong localization of photons in certain

disordered dielectric superlattices," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, pp. 2486-2489, 1987.

- [3] A. A. Zakhidov, R. H. Baughman, Z. Iqbal, C. Cui, I. Khayrullin, S. O. Dantas, J. Marti, and V. G. Ralchenko, "Carbon Structures with Three-Dimensional Periodicity at Optical Wavelengths," *Science*, vol. 282, pp. 897-901, 1998.
- [4] Daeseung Kang, J.E. Maclennan, N.A. Clark, A. A. Zakhidov, and R. H. Baughman, "Electro-optic Behavior of Liquid-Crystal-Filled Silica Opal Photonic Crystals: Effect of Liquid-Crystal Alignment," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 86, pp. 4052-4055, 2001.
- [5] J.-M. Lourtioz, A. de Lustrac, F. Gadot, S. Rowson, A. Chelnokov, T. Brillat, A. Ammouche, J. Danglot, O. Vanbesien, and D. Lippens, "Toward controllable photonic crystals for centimeter- and millimeter wave devices," *IEEE Trans. J. of Light. Tech.*, vol. 17, issue 11, pp. 2025-2031, 1999.
- [6] K. Yoshino, Y. Shimoda, Y. Kawagishi, K. Nakayama, and M. Ozaki, "Temperature tuning of the stop band in transmission spectra of liquid-crystal infiltrated synthetic opal as tunable photonic crystal," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 75, pp. 932-934, 1999.
- [7] K. Yoshino, K. Nakayama, Y. Kawagishi, S. Tatsuhara, M. Ozaki, A.A. Zakhidov, "Properties of liquid crystals in photonic crystal, synthetic opal," *Mol. Cryst. Liq. Cryst. A*, vol. 329, pp.1045-1052, 1999.
- [8] K. Busch and S. John, "Liquid-Crystal Photonic-Band-Gap Materials: The Tunable Electromagnetic Vacuum," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 83, pp. 967-970, 1999.
- [9] S.W. Leanord, J. P. Mondia, H. M. van Driel, O. Toader, and S. John, K. Busch, A. Birner, U. Gsele, and V. Lehmann, "Tunable two-dimensional photonic crystals using liquid-crystal infiltration," *Phys. Rev. B*, vol. 61, pp. R2389-R2392, 2000.
- [10] U. Finkenzeller, T. Geelhaar, G. Weber, and L. Pohl, "Liquid-crystalline reference compounds," *Liq. Cryst.*, vol. 5, pp. 313-321, 1989.