

광자결정의 제작과 광특성

Fabrication of Photonic Crystal and Optical Characteristics

우정원

이화여자대학교 물리학과

jwwu@ewha.ac.kr

유전율이 공간적으로 빛의 파장에 비금가는 주기적인 분포를 가지고 있는 광학매질을 광자결정이라고 한다. 이러한 광자결정은 전자기파가 통과할 때 유전율의 주기분포에 따라 특정한 파장의 빛은 투과하지 못하는 특성을 갖는다. 빛이 투과하지 못하는 에너지영역을 광자결정의 광밴드갭이라고 부른다. 광자결정의 제작은 벌크형태의 광학매질은 top-down 방식으로 식각하여 유전율의 주기분포를 얻는 방식과 나노크기의 광학매질을 bottom-up 방식으로 자기조립(self-assembly)하여 유전율의 주기분포를 얻는 방식으로 대별된다. 콜로이드 광자결정은 나노크기의 유전체구를 자기조립하여 제작할 수 있다. 또한 콜레스테릭(cholesteric) 액정의 경우 피치가 광파장에 비금가는 경우 광자결정의 특성을 보인다.

콜로이드 광자결정의 제작을 실리카(silica)볼과 폴리스타리렌(polystyrene)볼의 경우에 대하여 살펴본다. 실리카볼을 에타놀에 분산시킨 분산액에 기판을 넣는다. 에타놀을 서서히 증발시키면 기판 위에 실리카볼이 면심입방체(face-centered-cubic)로 자기조립하게 된다. 자기조립된 구조는 주사전자현미경사진과 원자힘현미경사진으로 확인할 수 있다. 실리카볼로 만들어진 광자결정은 에타놀의 증발 방향을 따라 마이크로 크기의 골을 형성한다. 반사스펙트럼을 측정하여 광밴드갭을 확인하고, 스칼라파 근사를 이용한 광밴드갭 계산결과와 비교할 수 있다. 형성된 골을 이용하여 네마틱(nematic) 액정을 배열할 수 있다. 네마틱 액정의 배열방향을 편광현미경으로 관찰 할 수 있으며, 또한 막대모양의 아조분자를 도핑하여 흡수이방성을 측정하여 배열방향을 확인할 수 있다. 광자결정 위에 액정이 배열되는 성질을 이용하여 꼬인 네마틱액정셀(twisted nematic liquid crystal cell)을 만들 수 있다. 이렇게 제작된 꼬인 네마틱액정셀이 갖는 전기-광학적 특성을 확인할 수 있다. 나아가 두 개의 콜로이드 광자결정막을 반사막으로 하는 공진기를 제작할 수 있다. 이것은 패브리-페로 공진기 형태인데, 공진기 내부에 네마틱 액정을 주입하여 외부 전기장으로 투과특성을 조절할 수 있는 공진기 제작이 가능하다. 네마틱액정은 강한 이등방성을 갖고 있으므로, 외부 전기장으로 네마틱 액정의 정렬방향을 조절함으로써 공진기 내부의 복굴절을 조절할 수 있고, 이는 공진기의 유효 광학적 길이를 조절할 수 있음을 뜻한다. 이것을 이용하면 광필터의 기능이 가능하다.

폴리스타이렌볼의 경우 수용액을 10마이크론 정도의 간극을 갖는 셀에 주입하고, 원심분리법을 이용하여 침전시킬 수 있다. 침전되어 자기조립된 폴리스타이렌볼은 면심입방체 구조를 갖는데, 이러한 구조는 주사전자현미경사진으로 확인 가능하다. 다양한 크기의 폴리스타이렌볼을 이용하면 밴드갭의 위치와 볼의 직경과의 관계를 알 수 있다. 표면에 염료로 채색된 폴리스타이렌볼의 경우에도 광자결정의 제작이 가능하다. 채색된 폴리스타이렌볼의 경우 광자결정의 밴드갭은 볼의 크기 뿐 만 아니라 염료의 흡수에 의한 반사증가가 광밴드갭의 모양에

영향을 미친다. 이러한 관계는 스칼라파 근사를 이용하여 구해낼 수 있다. 특히 염료의 흡수파장이 광밴드갭의 파장과 겹치는 경우 광밴드갭은 특이한 모양을 갖게된다. 이것을 이용하면 기능성을 갖는 광자결정의 제작방식에 대한 힌트를 얻을 수 있다.

콜레스테릭 액정의 경우, 원편광에 대하여 완전한 광자결정의 특성을 보인다. 에너지-운동량 분산관계식 (dispersion relation)으로부터 액정의 피치와 광밴드갭의 상호관계를 얻을 수 있다. 액정은 3차 비선형광학효과를 갖고 있다. 광자결정의 경우 비선형광학효과는 광밴드갭의 가장자리에서 크게 증가한다. 이것은 가장자리에서 전자기파의 상태밀도가 증가하기 때문이다. 특히 광자결정 구조의 경우 공진주파수에서 매우 먼 곳에 존재하는 실수값의 비선형광학효과가 광밴드갭 부근에서는 허수값의 유효 비선형광학효과로 드러난다. 펄스초레이저를 이용한 Z-스캔 (Z-scan) 방법으로 이러한 현상을 밝힐 수 있다. 3차비선형광학효과를 이용하면 빛의 세기에 따른 광밴드갭의 변화를 측정할 수 있다. 콜레스테릭 액정을 이루는 네마틱 액정의 정상굴절율과 비정상굴절율의 비선형광학계수에 따라 광밴드갭의 변화가 다양하게 바뀐다. 즉 밴드갭의 폭과 밴드갭의 위치 변화를 3차 비선형광학효과로 조절할 수 있다.

밴드갭이 서로 다른 두개의 광자결정과 비등방성매질로 광다이오드구조를 제작할 수 있다. 광자결정의 이중 접합 사이에 반파장판 비등방성매질을 넣으면, 특정한 파장영역의 입사하는 빛의 편광에 따라 빛의 전파가 한쪽 방향으로만 가능해진다. 두 개의 광밴드갭에서 1번째에서는 투과가능하고 2번째에서는 투과불가능한 편광을 가진 파장의 빛이 1번째 광자결정을 투과한 후 반파장판을 지나면서 편광방향이 바뀌고 이 빛은 2번째 광자결정에서 광밴드갭의 영역에 있으나 편광방향이 바뀌었기 때문에 투과 가능해진다. 역으로 이러한 빛을 2번째 광자결정에서 1번째 광자결정으로 보내는 경우는 투과가 처음부터 불가능하다. 콜레스테릭 액정을 사용하면 이를 실험적으로 쉽게 구현할 수 있다. 또한 반파장 비등방성매질의 굴절율을 외부의 전기장으로 조절할 수 있는 경우 전기적으로 조절이 가능한 광다이오드 구조가 된다. 레이저 발진에 대해서도 광다이오드의 특성을 확인할 수 있다.

참고문헌

- [1] N.Y. Ha, J.W. Wu, and Byungchoo Park, "Fabrication and Optical Characterization of 3-D Polystyrene Colloidal Photonic Crystal", Journal of the Korean Physical Society, vol. 45, No.1, pp.108-111 (2004) (15 July, 2004)
- [2] Jisoo Hwang, N. Y. Ha, H. J. Chang, Byoungchoo Park and J. W. Wu, "Enhanced optical nonlinearity near photonic bandgap edges of a cholesteric liquid crystal", Optics Letters, vol. 29, No. 22, pp.2644-2646 (15 November, 2004)
- [3] N.Y. Ha, Y.K. Woo, Byoungchoo Park, H. Takezoe, and J.W. Wu, "Self-assembled silica photonic crystal as a liquid crystal alignment layer and its electro-optic application in Fabry-Perot cavity structure", Advanced Materials, vol. 16, Issue 19, pp. 1725-1729 (October, 2004)
- [4] Jisoo Hwang and J.W. Wu, "Determination of optical Kerr nonlinearity of a photonic bandgap structure by Z-scan measurement", Optics Letters, vol. 30, No. 8, pp. 875-877 (15 April, 2005)
- [5] Jisoo Hwang, Myoung Hoon Song, Byoungchoo Park, J. W.Wu, Suzushi Nishimura, Takehiro Toyooka, and Hideo Takezoe, "Electro-tunable optical diode using an anisotropic layer sandwiched by hetero-photonic bandgap cholesteric liquid crystal films", Nature Materials, vol. 4, pp. 383-387 (2005) 1 May 2005