

1. 서론

가) 광자결정에서 형성되는 광밴드갭

광자결정은 굴절률이 다른 광학매질이 빛의 파장에 버금가는 주기성을 갖고 규칙적으로 교대로 배열되어 있는 광학계를 가리킨다. 이 경우 +방향과 -방향으로 진행하는 전자기파의 간섭에 의하여 생긴 정상파는 굴절률이 큰 쪽에 구속되는 파와 굴절률이 작은 쪽에 구속되는 파의 2개의 파로 나눌 수 있다. 이 때 굴절률이 큰 쪽에 구속되는 파는 낮은 쪽에 구속되는 파보다도 낮은 에너지를 가지며, 이에 따라 두 개의 정상파가 갖는 에너지는 일정한 크기의 차이를 갖는다. 이러한 에너지 차이를 광밴드갭이라고 부른다. 이는 반도체에 나타나는 전자밴드와 유사하

전자가 만족하는 슈뢰딩어 방정식과 규칙적으로 배열된 서로 다른 굴절률의 광학매질을 전파하는 광자의 전자기파가 만족하는 맥스웰 방정식은 수학적으로 그 성질이 동일하다. 이를 수식으로 살펴보면 다음과 같다. 슈뢰딩어 방정식에서 전자의 파동함수가 시간에 따른 조화성을 가진다면 파동함수를 $\Psi(\vec{x}, t) = \Psi(\vec{x})e^{i\omega t}$ 와 같이 쓸 수 있고, 전자가 있는 물질계의 해밀토니안은 $H = -\hbar^2 \frac{\nabla^2}{2m} + V(\vec{x})$ 이므로, 고유치 방정식은 아래와 같다.

$$H\Psi = E\Psi$$

이 때 물질파가 진행하는 계에서 위치함수 $V(\vec{x})$ 가 주기성을 가지면, 즉 $V(\vec{x}) = V(\vec{x} + \vec{a})$ 꼴이 되면, 전자의 파동함수 고유에너지는 밴드구조를 갖고 이에 따라 전자

특집 ─ 비선형광학

광자결정의 비선형 광학성질

우정원*

며, 광자결정의 여러 가지 성질에 관한 연구는 1987년 당시 벨연구소의 야블로노비치(Yablonovich)가 광밴드갭의 이론적 예측을 발표함으로써 시작되었다.

규칙적으로 배열된 원자핵의 쿨롱 포텐셜에 놓여있는

가 갖는 에너지에 그림 1과 같이 밴드갭이 존재한다.

이제 맥스웰 방정식에서 전자기파 파동함수가 시간에 따른 조화성을 가진다면 자기장 함수를 $\vec{H}(\vec{x}, t) = \vec{H}(\vec{x})e^{i\omega t}$ 와 같이 쓸 수 있고, 연산자 $\theta = \nabla \times \left(\frac{1}{\epsilon(\vec{x})} \right)$

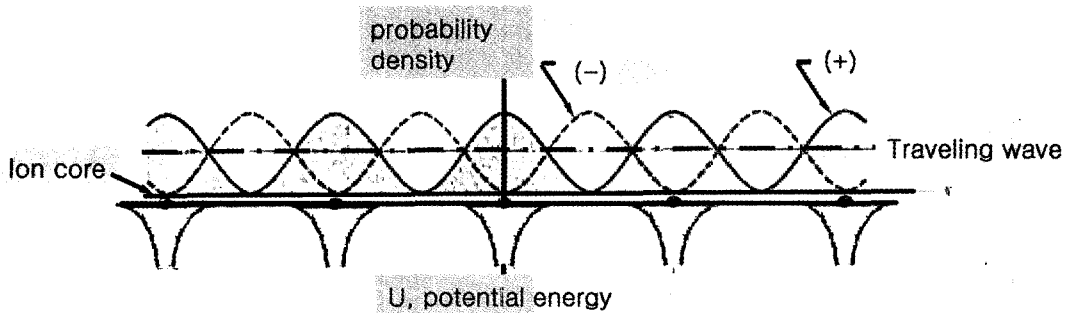


그림 1. 원자핵이 규칙적으로 배열된 격자 구조에서 전자밴드갭을 보이는 예

* 이화여자대학교 물리학과

$\nabla \times$)를 도입하여 맥스웰 방정식의 파동방정식을 다시 쓰면 아래와 같은 고유치 방정식이 된다.

$$\theta \vec{H} = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \vec{H}$$

이 때 자기장 또는 전자기파가 진행하는 계에서 유전율 함수 $\epsilon(\vec{x})$ 가 주기성을 가지면 즉 $\epsilon(\vec{x}) = \epsilon(\vec{x} + \vec{a})$ 꼴이 되면, 자기장 함수 또는 전자기파의 고유에너지는 밴드구조를 갖고 이 때 빛이 가지는 에너지에 그림 2와 같이 광밴드갭이 존재한다.

실제 광자결정에서 밴드갭이 존재한다는 실험적 입증은 마이크로파 영역에서 성공하였으며, 그 후 가시광선 영역에서 그 존재가 입증되었다. 작금에 들어서서 광자결정에 관한 연구는 선형광학적 성질 뿐 만 아니라, 외부에서 입사하는 빛의 세기에 따라 광학성질이 변하는 비선형광학 성질에 대한 연구가 중요하게 대두되고 있다. 비선형광학이란 매질의 광학성질이 빛의 세기에 따라 비선형적으로 변하는 현상을 가리킨다.

나) 비선형광학

선형성이란 어떤 물체에서 나타나는 반응이 외부에서 가한 변화에 선형적으로 비례하며 일어난다는 것을 의미한다. 즉 중첩(重疊, superposition)원리가 성립함을 의미한다. 대표적인 예로 맥스웰의 방정식을 보면, 모두가 전기장과 자기장에 대한 일차식(一次式)으로 이루어져 있다. 따라서 전기장의 세기를 두 배로 할 경우, 나타나는 편극도 비례하여 두 배로 나타난다. 그러나 실제 자연에서 관찰되는 많은 현상이 항상 이러한 선형성을 만족하는

것은 아니다. 한 예로 피리를 부는 경우를 생각해 보자. '도'라는 소리를 잘 내기 위해서는 입술에서 나오는 공기의 세기를 아주 잘 조절하여야 한다. 무턱대고 피리를 세게 분다고 해서 맑은 '도'라는 음이 나오지는 않는다. 우리는 여러 경험에서 피리를 너무 세게 불면, 한 옥타브 높은 '도'가 나오거나 바람이 새는 소리가 나오는 것을 알 수 있다. 이는 바로 피리 내부에 있는 공기기둥의 진동이 더 이상 선형으로 움직이는 것이 아니라, 비선형적인 호트러짐이 나타나기 때문이다. 물이 흘러가는 모양에서도 비선형성의 예를 볼 수 있다. 배가 천천히 강물을 지나갈 때는 수면에 생기는 파는 고르다. 그러나 배가 아주 빠른 속도로 움직일 때는 소위 터블런스(turbulence, 난류 亂流)가 일어나고 이를 예측해내기란 쉽지 않다. 이러한 비선형성이 광학현상에서 관찰될 때 이를 비선형광학(非線型光學, nonlinear optics)이라고 한다. 비선형광학현상은 약 30여년 전 레이저가 처음 발견된 이후 새롭게 관찰된 현상이다.

비선형광학현상은 크게 짝수차수와 홀수차수로 나눌 수 있다. 홀수차수의 현상은 비선형광학 특성을 지닌 물질의 공간적 대칭구조와 관계없이 항상 존재하나, 짝수차수의 현상, 예를 들어 제2차 고조파 발생이나 전기광학효과는 중심대칭성을 갖지 않는 물질의 경우에만 가능하다. 홀수차수의 비선형광학현상 중 가장 낮은 차수인 제3차 비선형 효과로 인하여 생기는 여러 가지 재미있는 현상을 살펴보자. 먼저 외부에서 진동수 ω 를 가진 빛이 어떤 광학매질을 통과한다고 하자. 제3차 비선형효과가 존재한다면 물질에 유도되는 비선형편극 P^{NL} 은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P^{NL} = \chi^{(3)}[E_0 \cos \omega t]^3$$

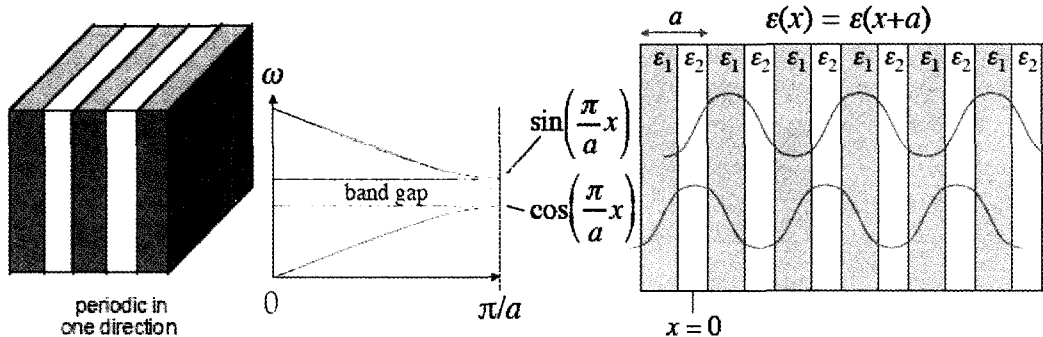


그림 2. 광자결정에서 전자기파가 광밴드갭을 형성하는 예

광자결정의 비선형 광학성질

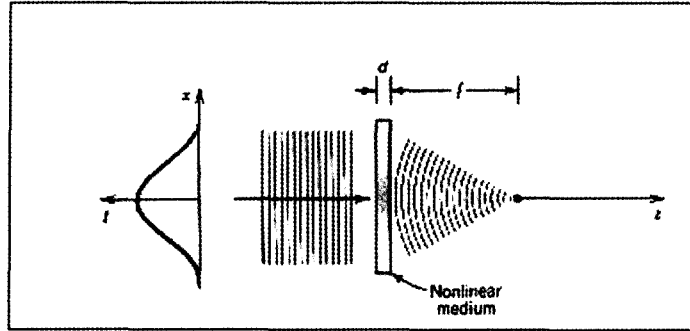


그림 3. 3차 비선형 효과를 가진 매질에서 일어나는 자기집광 효과

그런데 광학현상은 시간에 따른 변화가 진동수로 관찰되기 때문에, $4\cos^3\theta = 3\cos\theta + \cos 3\theta$ 라는 코사인함수의 성질을 이용하여 푸리에 변환(Fourier transformation)을 취할 수 있다. 즉 제3차 비선형효과에 의하여 나타나는 비선형편극 P^{NL} 은 두 가지의 진동수를 가짐을 알 수 있다. 그 가운데 입사한 파와 같은 진동수를 갖는 경우를 살펴보면 매우 흥미있는 사실을 발견하게 된다. 입사한 파에 선형비례하는 편극, 즉 선형광학에 의한 편극을 함께 고려하면 진동수 ω 를 가진 편극은 다음과 같이 주어진다.

$$P^\omega = \chi^{(1)}E_0 \cos \omega t + \left[\frac{3}{4}\chi^{(3)}E_0^2\right] \cos \omega t = \chi_{eff}E_0 \cos \omega t$$

놀랍게도 물질의 유효감수를 χ_{eff} 이 입사파의 세기에 비례하게 되고 따라서 물질의 유효굴절률은 빛의 세기에 따라 변할 수 있다는 사실이다. 이러한 효과가 나타내는 현상으로는 빛의 자기집광(self-focusing)이라는 현상이 있다. 빛의 공간적 세기 분포가 가우시안수포를 가진 경우, 빛이 진행하는 광축의 중앙부분으로 갈수록 빛의 세기가 세어진다. 이러한 빛이 비선형광학 매질을 통과하는 경우 중앙부분의 굴절률이 가장자리의 굴절률보다 커지게 되고 따라서 빛의 진행속도가 중앙부분에서 상대적으로 느리게 된다. 다른 말로 표현하면 같은 시간에 빛의 위상면이 중앙부분에서는 가장자리에 비해 상대적으로 천천히 진행하며, 이는 평면파가 볼록렌즈를 통과하여 진행하는 것과 같이 비유할 수 있다. 즉 비선형광학매질을 통과하면서 빛이 스스로 집광되는 현상이 그림 3과 같이 일어난다.

2. 광결정에서 비선형광학효과

광자결정에서 일어나는 비선형광학 현상은 아직 많은 연구가 되어 있지 않은 분야로서, 광자결정 제조 시 처음부터 벌크상태에서 비선형광학성이 큰 물질로 제조하거나, 혹은 광자결정 제조 시 빈 공간에 비선형광학성이 큰 비등방성 유기물을 채우는 방법으로 비선형 광자결정을 제조할 수 있다. 이 때 외부 전기장을 걸어 주거나 강한 빛을 비추면 광밴드갭의 깊이와 폭을 변화시킬 수 있다.

가) 외부 전기장에 의해 광자결정에 주입된 액정의 배열을 이용하여 광밴드갭을 조절하는 예

실리카 나노구를 이용하여 자기조립법으로 광자결정을 제조한다. 이 때 제조된 광자결정은 면심입방체를 이루고 있다. 또한 제조된 광자결정의 표면에는 규칙적인 골이 형성되며 이것은 액정의 배향막 구실을 한다. 이러한 광자결정으로 액정셀을 제작하고 액정을 주입하면 그림 4와 같이 패브리-페로 공진기를 만들 수 있다. 외부에서 공진기를 가로질러 전기장을 가하면 액정의 배향으로 공진기의 광학적 유효길이를 조절할 수 있다. 이는 결과적으로 패브리-페로 공진기의 투과스펙트럼을 전기장으로 조절할 수 있다는 것을 의미한다. 그림 4와 같은 구조에서 외부 전기장에 따른 스펙트럼의 조절은 액정의 정렬 방향이 전기장에 평행한 경우와 수직인 경우에 따라 이방적인 굴절률을 갖기 때문에 가능하다.

그림 5에는 이러한 투과스펙트럼의 조절이 나타나 있다. 외부 전기장이 0인 경우 x-편광된 빛과 y-편광된 빛의 투과 스펙트럼은 서로 다르지만, 외부 전기장이 100volt

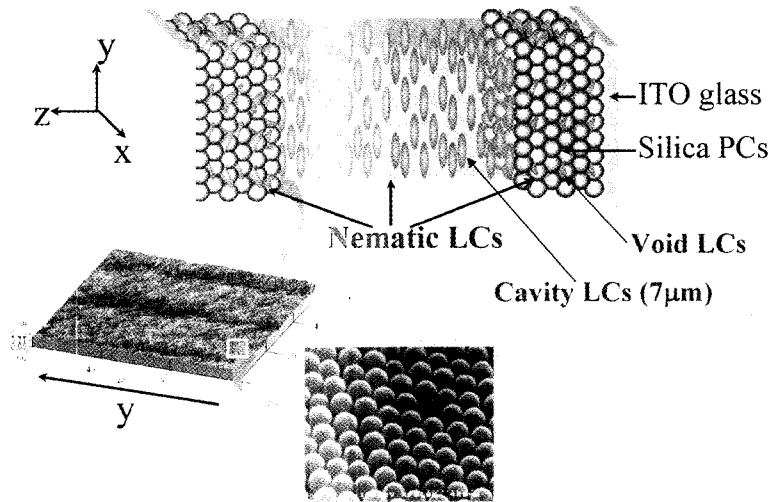


그림 4. 광자결정으로 만들어진 패브리-페로 공진기

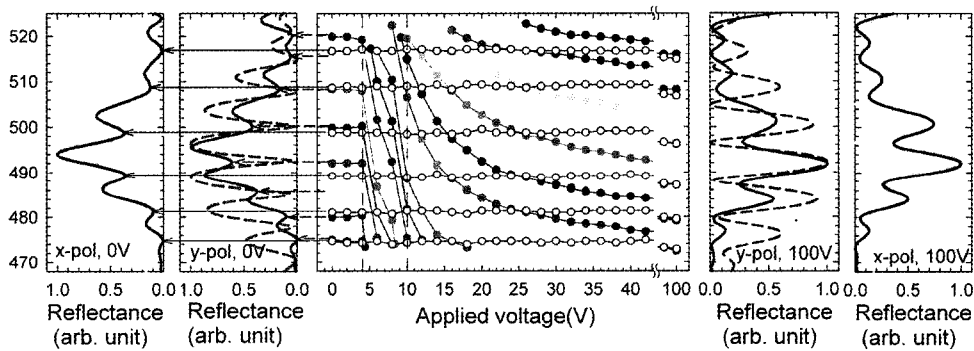


그림 5. 패브리-페로 공진기의 투과 스펙트럼을 외부의 전기장으로 조절하는 예

에 해당하는 경우 x-편광과 y-편광의 투과 스펙트럼은 차이가 없이 등방성을 가짐을 알 수 있다.

나) 3차 비선형효과를 이용하여 빛의 세기에 따른 광밴드갭의 변화를 조절하는 예

3차비선형 효과를 갖는 광학매질을 이용하여 광자결정을 만드는 경우를 생각해 보자. 이 경우 두 매질 가운데 한 매질만 3차 비선형효과를 가지는 경우에는 굴절률의 변화에 따른 광밴드갭의 위치 변화가 가능하다. SiO_2 와 TiO_2 를 솔-젤 방법으로 제작하면 주기적인 1차원 구조를 쉽게 얻을 수 있다. 이 가운데 이 경우 3차 비선형효과가 매우 큰 것으로 알려져 있다. 그림 6에는 355nm로 펌프한 경우 532nm에서 일어나는 3차 비선형효과와 시간의

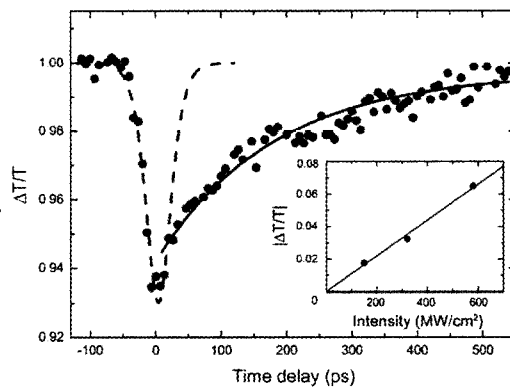


그림 6. TiO_2 에서 일어나는 3차 비선형광학 효과

존도를 보여주고 있다. 피코초 레이저의 펄스모양보다도 더 느리게 감쇠하는 투과반응을 볼 수 있다.

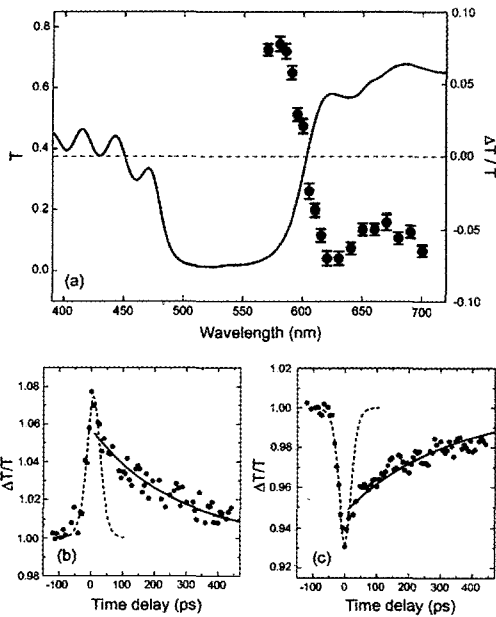


그림 7. 355nm로 펌프한 광자결정에서 일어나는 광밴드갭의 변화

이제 이러한 SiO₂와 TiO₂로 얻어진 광자결정에서 밴드갭의 변화를 역시 355nm로 펌프한 경우 밴드갭의 긴 파장 쪽에서 일어나는 변화를 측정할 것을 보자. 그림 7의 (b)와 (c)는 각각 580nm과 620nm에서 측정한 비선형 반응의 시간의존도를 보여 주고, (a)는 560nm와 700nm 사이에서 측정한 비선형 반응의 분산을 보여주고 있다. 즉 밴드갭의 긴 파장 쪽에서 중간부분의 양쪽에서 각각 다른 반응을 보이는 것을 알 수 있다. 이것은 밴드갭 전체가 오른쪽으로 이동한 것을 뜻한다. 즉 밴드갭의 투과스펙트럼의 위치보다 상당히 먼 355nm 영역에서 강한 빛을 보내어 밴드갭의 위치를 조절할 수 있음을 보여 주고 있다.

3. 결론

광자결정은 광밴드갭 때문에 여러 가지 흥미있는 광학성질을 갖고 있다. 이러한 광밴드갭을 전기장이나 빛의 세기로 조절하는 것을 광스위칭 응용에 매우 중요하다. 특히 전광스위칭(All Optical Switching)의 현상을 볼 수 있다는 것은 초고속 정보처리에 매우 중요한 의미를 갖는다. 산화물로 만들어진 광자결정 이외에 반도체로 만들어진 광자결정에서도 전자-홀이 차지하는 위상공간의 조절을 통한 비선형광학 반응이 존재하므로 이를 이용한 광스위칭은 중요한 연구가 될 전망이다.

약 력



우정원

학력
 84.9.-89.8. 미국 펜실베이니아 대학교 물리학과 박사
 79.3.-81.2. 한국과학기술원 물리학과 석사
 75.3.-79.2. 서울대학교 자연과학대학 물리학과 학사

경력
 92.3.-현재 이화여자대학교 물리학과 조교수, 부교수, 교수
 89.9.-92.2. 미국 록히드 연구소(캘리포니아) 연구원
 82.3.-84.8. 영남대학교 물리학과 전임강사 및 조교수
 81.3.-82.2. 아주대학교 물리학과 조교