

## 광자결정과 발광소자

이용희

한국과학기술원 물리학과

대전시 유성구 구성동 373-1, 305-701

yhlee@kaist.ac.kr

### 1. 빛의 제어

20세기의 과학문명을 지배한 것은 전자를 바탕으로 한 트랜지스터라고 할 수 있다. 수많은 트랜지스터 연산소자를 아주 작은 면적 속에 집적시킨 IC회로를 근간으로 하여 현대 문명의 총아인 컴퓨터가 탄생하였다. 하지만 전자들의 강력한 상호작용에 바탕을 두고 구현된 고집적 IC의 특성 자체가 정보 전달이라는 관점에서는 피할 수 없는 약점이 되어서 그 물리학적 한계를 드러내고 있다. 하지만 우리가 일상 생활에서 매일 함께하는 빛을 이루는 기본입자인 광자가 아주 우수한 정보전달 특성을 지니고 있음은 주목할만한 일이다. 따라서, 트랜지스터를 이용하여 전자의 동작을 제어한 것과 같이, 빛의 제 특성을 인위적으로 제어할 수 있다면, 새로운 기능성 초고속 광소자를 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

실제로 과학자들은 광자 제어의 가능성을 광자결정에서 찾고 있다. 일반적으로 전자기파가 반파장 정도의 굴절률 주기성을 지닌 공간을 진행하는 경우, 강력한 간섭현상을 겪으면서 그 전파 특성이 엄청나게 바뀔 수 있다는 것은 잘 알려진 사실이다. 빛의 입장에서 볼 때, 주기적인 구조의 광자결정은 아주 이상한 새로운 광학적인 매질이 되는 것이다.

1946년 Purcell은 '원자에서의 발생하는 광자의 자발 방출 특성은 그 원자를 둘러싸고 있는 공간의 형태에 따라서 변하는 것이지 불변이 아니다'고 주장하였다. 즉, 주기적인 구조인 광자결정을 통하여 광자의 가장 중요한 두 가지 특성인 빛의 발생과 전달에 대한 인위적인 조작과 제어가 가능해질 수 있다는 얘기가 되며<sup>(1)</sup>, 실제로 광자결정의 공간을 3차원으로 확대시키고, 구조와 주기를 잘 조절하면 빛이 이론적으로 존재할 수 없는 금지 대역인 '광밴드갭'을 원하는 파장 대역에 인위적으로 '설계'할 수 있다. 이런 광밴드갭을 이용한 빛의 감금 특성을 적극적으로 활용하면 새로운 개념을 지닌 인공적인 특성을 지닌 광학물질을 창조할 수도 있게 된다.

### 2. 2차원 박막형 광자결정

2차원 박막형 광자결정의 경우, 평면 방향으로의 광밴드갭을 지닌 삼각형 광자결정 또는 사각형 광자결정 구조를 도입하여 광자를 2차원 평면에서 공간적으로 구속하고 있으며, 면에 수직한 방향으로 고굴절률에 의한 전반사 효과를 적극적으로 활용한다. 모든 형태의 2차원 광자결정 구조는 반도체 박막 물질에 주기적으로 구멍이 형성되어 있는 모습을 가지고 있기 때문에 결정 면이 자주 단절되면서 공기 와 접촉하고 있다. 따라서 비발광 결합률이 작은 물질을 선택하는 것이 효율적인 광 방출을 위해서는 대부분의 광자결정 구조의 경우 매우 중요하다. 현재 광통신에 널리 사용되는 1,550 nm의 빛을 발생시키는 InGaAsP 계열의 능동 매질의 경우 GaAs 계열의 물질들 보다 표면 비발광 결합 속도가 10배 이상 작기 때문에 이러한 조건을 상대적으로 잘 만족시키고 있다.

2차원 박막형 삼각형 광자결정 구조는 TE-like 모드에 대하여 광밴드갭을 가지기 때문에 널리 사

용되고 있다. 실제로 InGaAs 양자섀를 성장할 때 약간의 compressive strain을 주어서 양자섀에서 방출되는 빛이 주로 TE 편광을 가지게 하면, TE-like 모드와는 결합 효율을 최대한 증대시킬 수 있다. 현실적으로 볼 때 1,550nm 근처에서 동작하는 InGaAs 양자섀에 대한 연구는 광통신의 중심 파장으로서 오랫동안 계속되어 왔기 때문에 고품질의 반도체 양자섀 웨이퍼를 비교적 쉽게 얻을 수 있다는 점이 실험을 진행하는 데에 큰 도움이 되고 있다. 광자 제어에 못지않게 중요한 것이 바로 운반자의 공간적인 구속이라고 할 수 있는데, 이를 위하여 크기가 나노레이저의 능동 매질로 수십 나노미터 정도의 화합물 반도체 양자점을 사용하자는 논의와 실험이 활발하게 진행되고 있다. 양자점을 도입할 경우 양자 에너지에 의한 운반자 구속효과로 운반자의 횡방향으로의 확산을 최소화시킬 수 있을 것으로 예상할 수 있으나, 현실적으로 크기가 균일한 양자점의 반복적인 성장, 상대적으로 작은 광이득 등의 어려움이 해결되어야 할 과제로 남아있다.

### 3. 세상에서 가장 작은 레이저

문턱 없는 궁극적인 극미세 레이저의 구현을 위해서는 레이저 공진기의 크기가 빛의 반파장 정도가 되게 아주 작아야 하며, 동시에 레이저 공진기에서의 광학적 손실이 매우 작아야 한다. 레이저 공진기의 크기는 이 공진기 내부에 존재 가능한 공진 모드의 숫자를 결정한다. 예를 들어서 단 한 개의 공진 모드만이 존재하는 공진기의 경우, 이 공진기 배부에서 발생된 광자는 이 한 개의 모드와의 결합을 통해서만 외부로 방출될 수 있다. 따라서 레이저 공진기 내부에서 발생된 광자를 보다 효율적으로 사용할 수 있게 된다. 또한, 광손실이 작으면 극미세 공진기 내부의 광자 밀도가 더욱 높아져서 강한 유도 방출이 가능케 되는 이점이 있다. 이와 같이 아주 작으면서도 아주 높은 Q값을 지니는 광자결정 공진기는 양자공진기 역학적인 면에서도 흥미로운 주제가 될 가능성을 지니고 있을 뿐 아니라, 최근 많은 연구가 진행되고 있는 비밀 양자정보 통신에서 요구되는 효율적인 단광자 발생기로서의 가능성도 매우 중요한 응용 분야 중의 하나라고 본다.

현실적으로 광자결정 구조에서 가능한 가장 작은 공진기의 모습은 단 하나의 구멍만을 채워 넣은 구조에 가까울 것으로 예상된다. 이러한 단일 세포 공진기는<sup>(2,3)</sup> 자연이 허용하는 가장 작은 레이저 공진기에 근접하는 것이기 때문에 학문적으로도 흥미로운 구조이다. 본 연구실에서 연구하고 있는 구조는 공진기의 중심을 통하여 전류 주입이 가능하면서도 실제 제작이 가능한 구조이다. 이렇게 발견 제작된 것이 Monopole mode의 단일 세포 광자결정 나노 레이저이다<sup>(4)</sup>. 이 구조의 특징은 중심에 있는 구멍 6개의 크기를 약간 작게 만들면서 바깥쪽으로 밀어내면서 이 모드의 공진주파수를 광밴드갭의 중앙 부근으로 가져 왔다는데 있다. 이 모드는 원천적으로 비축퇴 모드이기 때문에 문턱 없는 발진을 위한 기본 여건의 하나를 만족시키고 있다. 뿐만 아니라 공진기의 중앙 부분의 전기장의 에너지 분포가 0이므로 그 부분을 통하여 전기를 흘려줄 수 있는 전극부착이 가능하다는 장점을 지니고 있다.

본 실험실에서는 최근 단세포 광자결정 공진기의 중앙 부분에 sub-micron 크기의 반도체 기둥을 세운 구조가 실현 가능하다는 것을 실험적으로 증명한 바 있다. 이 구조로부터 광펌핑 실험을 통한 레이저 동작을 확인하였으며, 그림 1에서 보는 것과 같은 구조의 공진기의 중앙에 위치시킨 미세 반도체 기둥을 통한 전류 펌핑에 의한 레이저 동작을 성공시킨 것은 매우 고무적인 현상이라고 생각한다<sup>(5)</sup>. 이러한 전류펌핑의 단세포 광결정 레이저는 반도체에서의 공진기 양자동역학을 연구할 수 있는 기본 소자로서의 가능성과 단광자 발생원으로서의 가능성을 내포하고 있는 차세대의 광원이다.

#### 4. 공진기 없는 특이한 광자결정 레이저

광자결정 구조를 이용하면 물리적으로 정의된 공진기 없이도 레이저가 발진되는 특이한 경우를 발견할 수도 있다. 최근 2차원 광자결정에서 공진기 없는 광자결정 레이저가 몇 개의 그룹에서 보고 되었다. 이 구조는 주로 약하게 구속되는 굴절률 차이가 작은 광도파로를 기본 구조로 하여 제작되었으며, 대면적에서 단일 모드, 고출력 레이저로서의 가능성을 기대하고 있다. 이론적으로는 굴절률의 차이가 큰 광도파로 구조가 공진모드의 밀도가 더 높고 군속도가 작기 때문에 박막형의 2차원 광자결정 도파로 구조는 밴드엣지 레이저(Band edge laser)로서 유리하다고 할 수 있다. 본 연구실에서는 최근 효율이 높고, 문턱이 아주 작은 밴드엣지 레이저를 InP 계열의 삼각형 박막 광자결정 구조로부터 성공시켰으며<sup>(6)</sup>, 이 경우 실제로 동작하는 레이저 공진기의 전체 크기가 약  $5\mu\text{m}$ 에 지나지 않기 때문에 고속 동작도 가능할 것으로 기대된다. 또한, 최근 두 가지의 결정 구조를 가진 복합 광자결정 구조를 도입한 도파로 구조의 광밴드엣지 레이저를 제안하고 실험적으로 보고 되었다.

#### 5. 저전력 고효율 광자결정 광원

광자결정 구조의 주요 응용 분야 중의 하나는 새로운 형태의 저전력 고효율 광원의 개발이다. 반도체 발광 다이오드 (Light Emitting Diode, LED)의 능동 매질은 반도체이며 내부 광변환 양자 효율은 90% 이상이 된다. 즉, 외부에서 주입해주는 대부분의 전류가 빛으로 아주 효율적으로 변환된다는 말이다. 하지만 굴절률이 3.0 이상으로 크기 때문에 일반적으로 광자 100개가 내부에서 발생되었을 경우, 겨우 2-4개만이 공기 중으로 빠져 나올 수 있다. 이것은 반도체의 높은 굴절률에 의한 전반사 때문에 내부에서 발생된 빛이 반복적으로 반사를 계속하다가 다시 매질에 흡수되어서 열로 바뀌기 때문이다.

그럼에도 불구하고 LED의 수명은 반영구적이기 때문에 가시광 영역의 LED는 교통신호등에 도입되기 시작하고 있다. 이러한 LED의 경우 광자결정 구조를 도입시키면 빛의 외부 방출 효율을 개선시킬 수 있다. 현재까지 반도체 LED의 경우 23%의 외부 방출효율을 얻어낸 결과가 보고 되었으며, 광자결정의 개념을 적극적으로 발전시키면 효율이 더욱 증가될 수 있다고 예상된다.<sup>(7)</sup> 빛의 회절 현상을 보다 적극적으로 이용하자는 것으로 보아도 좋다. GaN 계열의 청색 LED구조에 이와 같은 광자결정 나노구조를 적용하여 외부 광추출 효율을 향상시킨 실험 결과도 여러 연구 그룹에서 활발하게 보고되기 시작하고 있다. 또한, 광자결정을 이용한 외부 광추출 효율의 증가는 반도체를 이용한 LED에서뿐만 아니라, 유기 발광 매질의 LED에도 활용되기 시작하고 있다.<sup>(8)</sup>

#### 6. 끝내며

광자결정 구조를 도입하면 빛의 통제가 어느 정도 가능하다는 점을 인식하면, 발광소자와 광자 결정의 결합은 새로운 광소자를 창조를 가능하게 한다는 점도 이해할 수 있다. 본 원고에서는 다양한 능동형 광자결정 소자들과 고효율 광결정LED 등의 예를 본 실험실에서 일어난 일들만을 중심으로 하여 살펴 보았지만, 실제로 빛의 발생시키는 능동소자와 광자 결정과의 결합은 여러 실험실에서 활발히 수행되고 있으며 흥미로운 결과를 계속 도출하고 있다는 점을 강조하고 싶다. 또한, 신개념의 광소자 뿐만 아니라 기존의 발광소자, 조명소자 등 빛을 방출하는 대부분의 광소자의 특성을 한 단계 개선시키는 데에도 널리 사용될 수 있을 것으로 예상된다. 정리하자면, 광자결정 구조를 통하여, 자연적인 물질로는 구현이 불가능하였던 여러 가지의 광학적인 특성을 인위적으로 설계 제작할 수 있다는 점이 연구자들에게

새로운 가능성을 던져주고 있다고 볼 수 있다.

## 7.참고문헌

- (1) Y. H. Lee and H. Y. Ryu, "Custom crystals control photons," *IEEE Circuit and Devices Magazine*, 18, 8 (2002).
- (2) O. Painter, R. K. Lee, A. Scherer, A. Yariv, J. D. O'Brien, P. D. Dapkus, and I. Kim, "Two-dimensional photonic band-gap defect mode laser," *Science* 284, 1819 (1999).
- (3) H. Y. Ryu, S. H. Kim, H. G. Park, J. K. Hwang, Y. H. Lee and J. S. Kim, "Square-lattice photonic band-gap single-cell laser operating in the lowest-order whispering gallery mode," *Appl. Phys. Lett.* 80, 3883 (2002).
- (4) H. G. Park, J. K. Hwang, J. Huh, H. Y. Ryu, Y. H. Lee and J. S. Kim, "Nondegenerate monopole-mode two-dimensional photonic band gap laser," *Appl. Phys. Lett.* 79, 3032 (2001).
- (5) H. G. Park, S. H. Kim, S. H. Kwon, Y. G. Ju, J. K. Yang, J. H. Baek, S. B. Kim, and Y. H. Lee, "Electrically Driven Single-Cell Photonic Crystal Laser" *Science* , 305 1444 (2004).
- (6) H. Y. Ryu, S. H. Kwon, Y. J. Lee, Y. H. Lee and J. S. Kim, "Very low-threshold photonic band edge lasers from free-standing triangular photonic crystal slabs," *Appl. Phys. Lett.* 80, 3476 (2002).
- (7) H. Y. Ryu, Y. H. Lee, R. L. Sellin and D. Bimberg, "Over 30-fold enhancement of light extraction from free-standing photonic crystal slabs with InGaAs quantum dots at low temperature," *Appl. Phys. Lett.* 79, 3573 (2001).
- (8) Y. J. Lee, S. H. Kim, J. Huh, G. H. Kim, Y. H. Lee, S. H. Cho, Y. C. Kim, and Y. R. Do, "A high-extraction-efficiency nanopatterned organic light-emitting diode," *Appl. Phys. Lett.* 82, 3779 (2003).

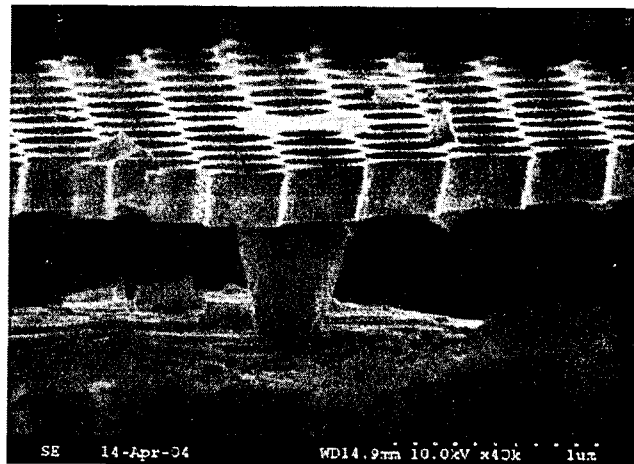


그림 1. 전류 주입 단세포 광자결정 레이저