광결정 나노레이저

이 용 희
(한국과학기술원 물리학과 교수)

1. 서 론

초고속 광정보화 사회에서 핵심적인 역할을 하게 될 미래형의 첨단 소자는 초소형이며 아주 에너지 효율적인 광원의 형태를 가져야 한다. 왜냐하면, 미래 고속 정보 사회에서의 초고속 광정보 처리나 광컴퓨터 등에 핵심 소자가 되리라 예상되는 광원들은 단일 광원의 경우도 있을 것이나, 더 일반적으로는 행렬의 모습을 가지게 될 것이다. 따라서 개개 광원의 전력 소모가 극히 적어야만 열역학적인 제한 조건을 현실적으로 만족시킬 수 있다. 이런 조건을 만족시킬 수 있는 이상적인 광원이 바로 문턱 전류가 0인 레이저이다. 현재 존재하고 있는 것들 중에서 이에 가장 근접해 있는 것이 수직공진 표면광 레이저일 것이다. 1989년 낮은 문턱전류 수직공진 표면광 레이저가 처음으로 제안된 후, 최근 문턱 전류가 100μA 정도까지 감소되었다. 이제 겨우 10년된 수직공진 표면광 레이저가 벌써 본격적으로 상용화되기 시작하는 것을 목격하면서, 다음 단계로의 도약을 위한 궁극적인 광원 연구가 시급해지고 있다는 것을 실감할 수 있다.

궁극적인 차세대 레이저의 모습은 단원자나 양자점과 같은 극한적인 능동 매질들을 물리적으로 가능한 아주 작은 초미세 공진기에 집적을 시킨 형태가 되리라 생각한다. 이런 공진기 체적의 한계는 궁극적으로 빛의 반파장의 삼승 정도가 된다. 즉, 실질적인 레이저 공진기의 크기는 수백 나노미터 정도가 될 것으로 예상된다. 그리고, 이 공진기를 아주 고품위가 되도록 구현시킬 수 있다면, 공진기의 광 손실이 극소화되어서 극소량의 능동 매질에서 획득 가능한 미세 이득만으로 나노레이저(Nanolaser)가 실현될 수 있으리라 기대한다.

물리적으로는 파장 크기의 초고품위 공진기 내부의 나노미터 스케일 공간 내에 많지 않은 숫자의 광자들이 가두어져 있으며, 이들이 물질과 상호 작용을 하는 상황이 될 것이다. 이 경우 새롭고 다양한 공진기 양자광학적 현상이 발생하리라 생각되며, 나노레이저의 실체를 보다 근본적으로 이해하려면 조직적인 연구가 필요하리라 본다. 또한 기술적인 면에서 보면 수십 내지 수백 나노미터 스케일의 2-차원 또는 3-차원 구조를 제작하는 방식을 확립해야 한다.

아주 작은 문턱 없는 레이저에 대한 지금까지의 연구를 통하여 공진기를 작게 만드는 것은 필요 조건일 뿐 충분 조건은 아니어서, 광자를 제한된 공간 내에 효과적으로 구속시킬 수 있는 새로운 방법을 찾아야 한다는 것을 인식하였다. 이를 위해서는 광밴드갭(Photonic Band Gap) 구조를 통한 능동적인 광자 제어(Photon control)의 개념이 접목되어야 한다. 광밴드갭 물질은 그 내부에서 전자기파의 존재 자체를 부정하고

있어서 빛의 자발 방출이 조절될 수 있으며 그 구조에서의 빛의 흐름이 원하는 방식으로 제어될 수 있다[1]. 이러한 광밴드갭의 특성을 이용하면 저문턱 전류와 저전력 소비의 미세 레이저와 고효율의 발광 다이오드 등의 능동 소자의 실현이 가능해진다.

현재 UCLA에 있는 E. Yablonovitch는 광밴드갭을 가진 광자 결정체를 이용하면 3 차원적인 광자 제어가 가능하다고 제안하고 실험적으로 이 구조를 구현하였다[2]. 유전률이 서로 다른 두 가지 물질을 반파장 간격으로 주기적으로 배치하면 전자기파가 존재할 수도 없고, 전파할 수 없는 주파수 대역이 존재할 수 있다는 것이다. 이 제안은 파장이 수 내지는 수십 mm 정도인 마이크로파에서의 실험을 통해서 확인되었다. 하지만, 빛의 파장 영역에서 광밴드갭 구조의 구현은 예상보다도 훨씬 더디게 진행되어 왔으나, 최근에는 근적외선 영역에서의 실험 결과 계속적으로 발표되고 있다. UCLA 그룹은 최근 광결정 구조를 이용하여 근적외선 파장 영역에서 Light Emitting Diode(LED)의 효율을 5-6 배정도 증가시키는 실험 결과를 보고하고 있다. 근적외선 대역에서 광밴드갭을 가지는 3차원 구조 제작을 최초로 성공시킨 바 있는 A. Scherer 교수의 Caltech 그룹은 광자 결정체 제작에 관한 미세식각과 나노 레이저 연구를 진행하고 있으며, 최근에는 단일 결함 광결정 나노레이저의 발진을 Science지에 보고하여 학계의 주목을 끈 바 있다[3]. 또한, AT&T Bell Lab의 R. Slusher 그룹과 Northwestern University 의 S. Ho 그룹은 최첨단의 건식 식각 기술을 사용한 마이크로디스크 레이저(Microdisk laser)와 마이크로링 레이저(Microring laser)를 제작하여 마이크로 레이저의 가능성을 보고하고 있다. 이 경우 직경이 수 마이크론 정도가 되는 미니 디스크나 링의 주위를 따라서 유한한 개수의 원형 모드가 발생된다. 이들이 원하는 것은 원을 아주 작게 만들어서 원형의 공진기 내부에 존재할 수 있는 고유 모드의 숫자를 양자역학적인 고유 상태의 숫자 정도까지 줄여서 문턱 조건을 향상시켜보고자 하는 것이다. 하지만 구조 자체가 역학적으로 불안정하고, 아주 정밀한 식각 기술이 필요하며, 전류에 의한 펌핑이 어렵다는 단점이 있다. 일본에서는 교토 대학(S. Noda) 요코하마 대학(T. Baba) 등에서 광밴드갭 관련 능동 소자인 LED와 광결정 레이저 연구, 그리고, 미세 원반 레이저에 대한 연구를 활발하게 수행하고 있다.

2. 2차원 광결정 나노 레이저

3차원 광결정 구조를 근적외선 영역에서 실제로 제작하는 것은 쉬운 일이 아니며, 펌핑은 더욱 힘든다. 이 때문에 3차원 광결정을 이용한 근적외선 나노 공진기에 대한 연구 결과는 주목할 만한 것이 아직 발표되지 않고 있는 실정이다. 실제적으로는 2차원의 얇은 박막 형태의 광도파로에 2차원광결정 구조를 구현하는 방향으로 실험이 활발하게 진행되고 있다. 이 경우 2차원 평면 방향으로는 삼각형 광결정 또는 사각형 광결정 구조를 도입하여 광자를 공간적으로 구속하고 있으며, 면에 수직한 방향으로는 고굴절률에 의한 전반사 효과를 적극적으로 활용한다. 특히 광도파로의 두께를 빛의 반파장 정도로 만들어 주면 이 도파로가 단일 모드광도파로가 되며, 이 경우 이 단일 도파모드에 대하여는 광밴드갭이 존재함이 알려져 있으며, 현재 구현된 2차원 광결정 나노 공진기에 대한 결과는 모두 이런 구조를 바탕으로 하고 있다.

2.1 박막형 광결정 레이저의 능동 매질

레이저광을 발생시키는 능동 매질의 선택에 있어서 고려해야 할 중요한 요소 중의 하나는 운반자(전자와 정공)의 비발광 결합 효율이다. 일반적으로 2차원 광결정 구조는 반도체 박막 물질에 주기적으로 구멍이 형성되어 있는 모습을 가지고 있기 때문에 결정면이 자주 단절되면서 공기와 접촉하고 있다. 이 단절된 면에 운반자가 도달하면 결정과 공기의 경계 면에 많은 수의 비발광 결합원이 존재하게 되어서 운반자가 빛을 발생시키기 전에 열을 발생시키면서 손실된다. 따라서 비발광 결합률이 작은 물질을 선택하는 것이 효율적인 광 방출을 위해서는 매우 긴요하다. 중심 파장을 현재 광통신에 널리 사용되는 1,550nm로 생각을 할 경우, InGaAsP 계열의 능동 매질의 경우 GaAs 계열의 물질들 보다 표면 비발광 결합 속도가 10배 이상 작기 때문에 이러한 조건을 잘 만족시키고 있다. 그래서 InGaAs 양자샘 층이 널리 사용되고 있다. 특히 2차원의 삼각형 광결정 구조는 TE-like한 모드에서 완전한 밴드갭을 가지며, TM-like한 모드에서는 광밴드갭이 존재하지 않는다. 따라서, InGaAs 양자샘을 성장할 때 약간의 compressive strain을 주어서 양자샘에서 방출되는 빛이 주로 TE 편광을 가지게 하면, TE-like한 모드와는 결합 효율을 최대한 증대시킬 수 있다는 장점이 있다.

또한, 현실적으로 볼 때 1,550nm 근처에서 동작하는 InGaAs 양자샘에 대한 연구는 광통신의 중심 파장으로서 오랫동안 계속되어 왔기 때문에 고품질의 양자샘 웨이퍼를 비교적 쉽게 얻을 수 있다는 점이 실험을 진행하는 데에도 큰 도움이 되고 있다. 이러한 장점들 때문에 지금까지 광결정 능동 구조에 대한 연구는 대부분 InGaAs 양자샘 물질을 능동 매질로 이용하고 있다.

그림 1은 박막형 2차원 광도파로 구조에 의한 광결정 공진기의 개념도와 양자샘을 보여주고 있다. 이 경우 박막의 두께는 동작 파장의 반파장 정도의 두께를 가지게 하여 단일 도파로가 자연적으로 구성되게 하며, 능동 매질로는 0.6%의 compressive strain이 인가된 InGaAs 양자샘을 도파로의 중심 부분에 위치시켜서 TE 모드와의 결합효율을 극대화시킨다. 실제로 InGaAsP 계열의 물질로서 굴절률이 작은 물질이

존재하지 않으므로 아래쪽에는 AlGaAs 계열의 AlAs 층을 도입한 후에 이를 습식 산화시켜서 사용하는 방법을 택하는 것이 좋다. 이 때 습식 산화된 Al_xO_y는 굴절률이 1.5 정도가 되는 물질이어서 강한 광도파 효과를 얻을 수 있다.

광자 제어에 못지 않게 중요한 것이 바로 운반자(carrier)의 공간적인 구속이라고 할 수 있는데, 이를 위하여 크기가 나노메이저의 능동 매질로 수십 나노미터 정도의 화합물 반도체 계열의 양자점(quantum dot)을 사용하자는 논의가 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 등의 어려움이 해결되어야할 과제로 남아있다.

2.2 2차원 박막형 광결정 구조와 광밴드갭

광결정 구조에 대한 전파 및 분산 특성은 광밴드 구조에서 개략적인 성질을 알 수 있다[4]. 중심 파장이 주어지면 이 파장 영역에서 밴드갭을 가지는 광결정 구조의 격자 상수와 구멍의 크기는 3차원의 평면파 전개 방법으로 구할 수 있다. 그림 2에서의 예는 원형 공기 구멍이 삼각형 결정을 이루고 있는 경우, 격자 상수를 a로 하고, 구멍의 반경을 0.3a로 하고, 도파로의 두께는 0.725a로 잡아주었을 경우의 TE-like 모드의 광밴드 구조이다. 기판과 산화막의 두께는 3.4와 1.5로 하였다. 그림에서 알 수 있듯이 도파 모드가 존재하지 않는 광밴드갭 영역이 0.25-0.32 $\omega a/2\pi c$ 에 걸쳐서 존재함을 확인할 수 있다. 실제 도파로의 두께가 320nm이므로 격자 상수는 440nm가 된다. 따라서, 광밴드갭 영역을 파장으로 환산하면 1.38-1.76μm가 된다. 즉, 광밴드갭의 중심 파장은 1.57μm가 되고 이는 InGaAs 양자샘의 photoluminescence의 중심 위치인 1.55μm와 비슷한 위치이다.

그림 3은 광밴드갭의 중심 파장을 격자 상수의 함수로 몇 가지의 구멍 크기에 대하여 계산한 결과를 보여주고 있다. 하지만 실질적인 2차원 공진기의 제 특성을 알기 위해서는 Finite Difference Time Domain Method를 사용하여 Maxwell 방

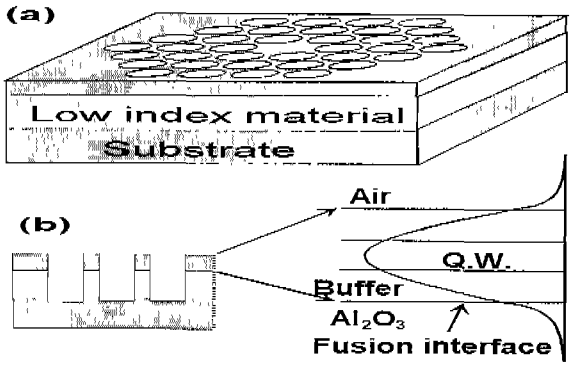


그림 1. (a) 2차원 박막형 광결정 공진기의 개념도
(b) 광강도 분포가 표시된 광도파로 구조.

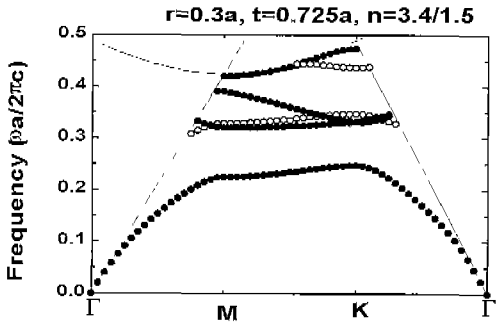


그림 2. TE-like 모드에 대한 광밴드 구조.

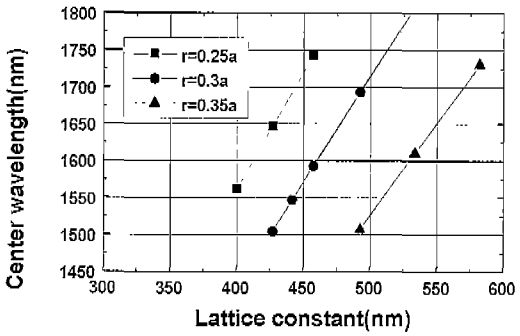


그림 3. TE-like 모드의 중심 파장의 변화.

정식을 시간의 함수로 자세히 분석하여야 한다. 이 분석에서는 나노 공진기의 quality Factor, 공진 모드의 확인 등 나노 레이저로서의 가능성을 좀 더 구체적으로 확인할 수 있다.

2.3 2차원 박막형 광결정 레이저: 기판 용융 구조

그림 1에서 제시된 구조는 GaAs와 InGaAs 양자샘이 성장된 InP 기판을 기판용융시켜서 구현시킬 수 있다[5-6]. 발진에 성공한 광결정 공진기 구조의 SEM 사진과 spectrum, L-L 곡선을 그림 4에 나타내었다. 이 레이저의 경우 대각선 방향으로 7개의 공기 구멍을 제거하여 형성한 공진기에 대한 것이다. 즉, 공진기의 한쪽 방향으로의 길이는 ~3㎛ 이다. 레이저 발진은 980-nm 레이저 다이오드를 공진기 구조에 수직인 방향으로 펌핑하여 이루어졌다. (b)에 점선으로 표시된 문턱 이전의 스펙트럼을 보면 여러 개의 공진기 모드가 존재하는 것을 볼 수 있는데, 그 중 약 1.54㎛의 모드가 레이저 발진하는 것을 알 수 있다.

발진하는 레이저의 특성을 이해하기 위하여 공진기에 존재하는 모드를 평면파 전개 방법으로 계산해 보았고, 그 중 몇 가지 모드를 그림 5에 나타내었다. (a)에서 (d)까지는 1차원적인 모드의 형태를 띄고 있고, (e)와 (f)는 6각형의 대칭을

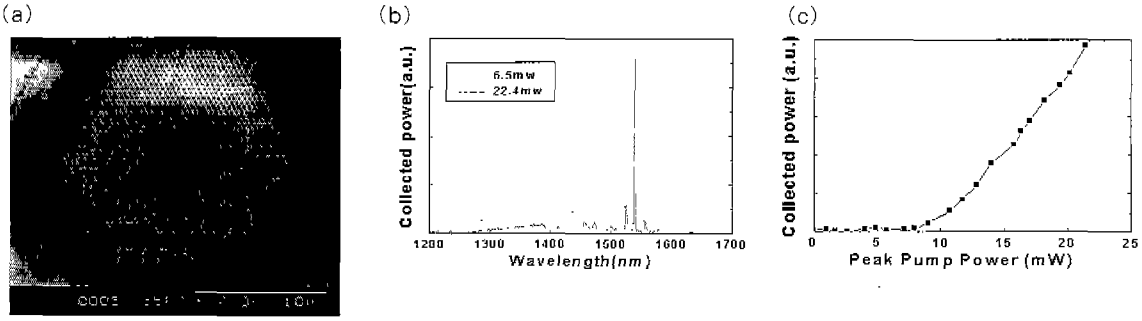


그림 4. (a) 2차원 광결정 공진기, (b) 스펙트럼 (점선은 문턱 이전, 실선은 문턱 이후), (c) 펌핑광의 세기에 따른 광결정 공진기에서 방출된 빛의 세기 (L-L 곡선).

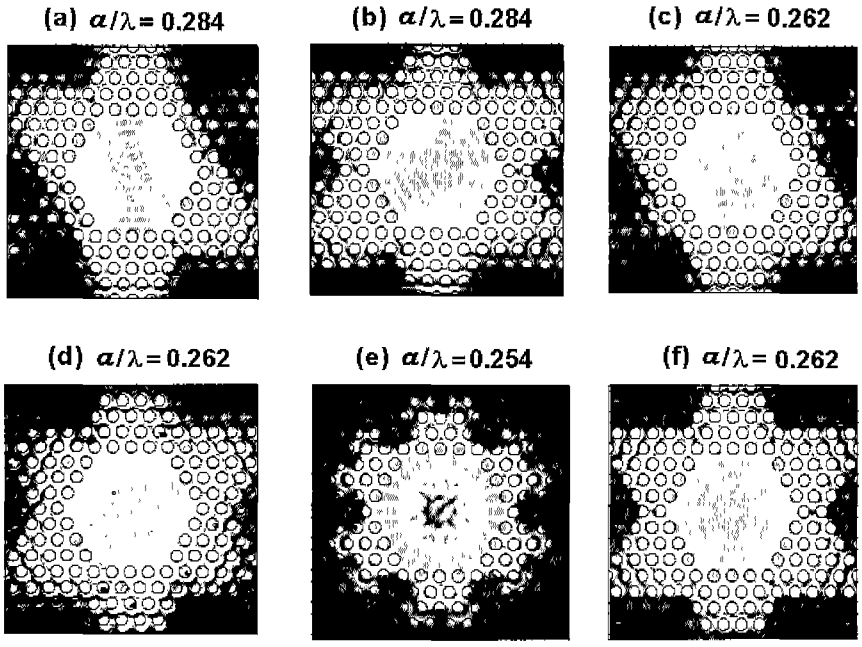


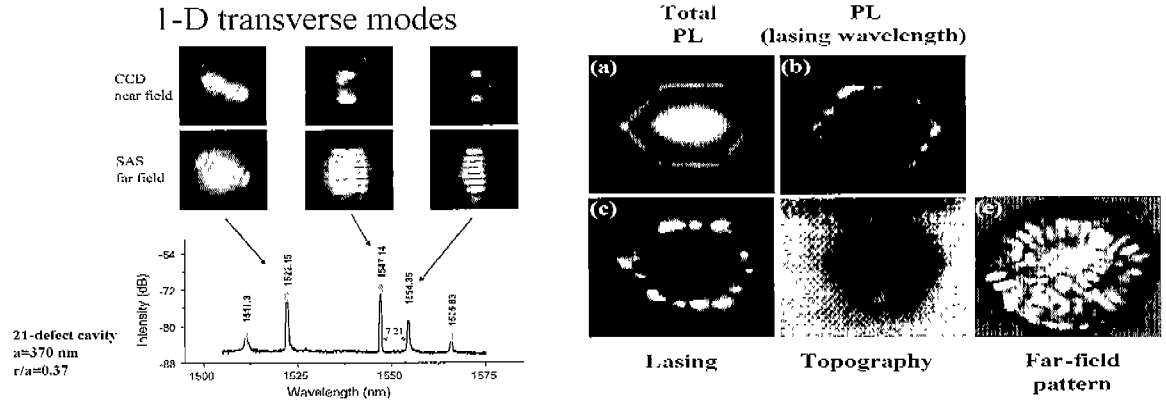
그림 5. 광결정 공진기에 존재하는 모드의 여러 가지 형태.

가지는 2차원적인 모드이다. 특히 (e)는 디스크 레이저에서 볼 수 있는 속삭이는 회랑 모드(whispering gallery mode)와 비슷한 형태이다. (a)와 (c), 그리고 (b)와 (d)는 자유 분광 영역 (free spectral range) 관계에 있으며 진동수 차이로부터 얻어낸 공진기의 길이는 실제 공진기 길이와 비슷하다.

이러한 광결정 공진기의 경우 공진기의 크기를 증가시키면 상온 연속 레이저 발진도 가능함을 실험적으로 관찰하였다. 이 레이저의 모드를 측정 분석하기 위하여는 근접장(near field)과 far field의 측정 장치가 필요하며, 이를 이용하여 측정된 먼장과 먼장의 모습이 그림 6에 나타나 있다.

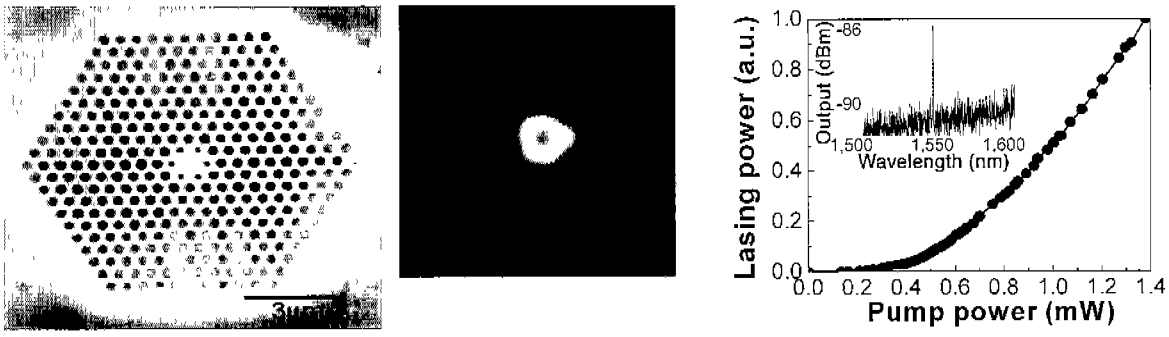
2.4 2차원 박막형 단일세포 광밴드갭 레이저: Air-slab 구조

기판 용융법으로 만든 구조는 그 열 특성이 좋고 구조적으로 튼튼하다는 장점을 지닌 반면, 공진기로서의 손실이 비교적 크기 때문에 Q-factor(Quality factor)가 큰 공진기의 구현에서는 불리한 점이 많다. 한편 아래 위기 공기 층으로 둘러 쌓인 Air-slab 구조는 그 제작이 상대적으로 간단하고, 손실이 아주 작은 공진기의 구현이 쉽다는 장점을 지니고 있다. 본 절에서 다루는 모든 레이저 공진기는 Air-slab 구조를 지니고 있다. 현실적으로 광결정 구조에서 가능한 가장 작은 공진기의 모습은 단 하나의 격자점(Lattice Point)만이 제거된 구조이다. 이러한 단일 세포 공진기는 자연이 허용하는 가장 작은 레이저 공진기에 근접하는 것이기 때문에 학문적으로도 흥미로운 구조이다. 실제로 이러한 구조의 경우 레이저의 크기는 약 $(\lambda/2)^3$ 정도가 된다. 이 때 광자와 극미세 레이저 공진기와의 상호작용은 양자광학적 공진기 이론을 도입하여 설명하여야 한다. 이러한 단일 세포 광결정 나노 레이저를 삼각형 결정 구조와 사각형 광결정 구조에 제작을 한 모습이 그림 7과 8에 나타나 있다. 단일 세포 광결정 레이저는 일반적으로 아주 작은 문턱을 지니고 있다.



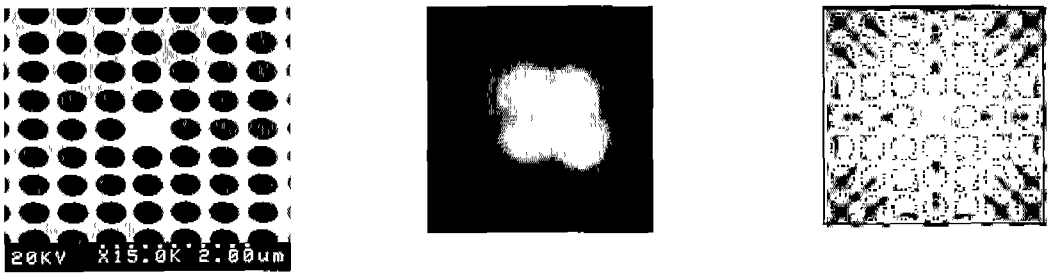
(a) (b)

그림 6. 광밴드갭 레이저의 먼장(a)과 근접장의 모습(b)



(a) (b) (c)

그림 7. Monopole mode single cell PBG nanolaser. (a) SEM picture, (b) Mode profile(Measured), (c) Output curve.



(a) (b) (c)

그림 8. Unit-cell square lattice PBG nanolaser
(a) SEM Picture, (b) Mode profile(Measured),
(c) Mode profile(Caculated).

그림 7(a)에 보이고 있는 삼각형 광결정 공진기 구조에서는 Monopole mode의 단일 세포 광결정 나노 레이저의 상온 발진이 처음으로 관찰되었다. 이 구조의 특징은 중심에 있는 구멍 6개의 크기를 약간 작게 만들어서 이 모드를 광밴드갭의 중앙 부근으로 가져 왔다는데 있다. 이 Monopole mode 공진기에서는 2000 정도가 되는 아주 큰 값의 Q-factor(Quality factor)가 실험적으로 관찰되었다. 또한 이 모드는 원천적으로 비축퇴 모드이기 때문에 문턱 없는 발진을 위한 기본 여건의 하나를 만족시키고 있다. 뿐만 아니라 공진기의 중앙 부분의 전기장의 분포가 0이므로 그 부분을 통하여 전기를 흘려줄 수 있는 전극부착이 가능하다는 장점을 지니고 있다.

이러한 극미세 레이저 공진기의 형태는 삼각형의 광결정뿐 아니라 사각형 광결정 구조에서도 가능하다. 그림 8에서 보여주고 있는 사각형 결정의 단일 세포 광결정 나노 레이저는 회랑모드(Whispering Gallery Mode)에서 동작하고 있다. 이 레이저의 경우 중앙에 위치한 미세 공진기를 들아가며 전자기파가 존재하는 특이한 모습을 가지고 있다. 실제로 이 레이저는 회랑모드 레이저의 궁극적인 모습을 보여주고 있다고 볼 수 있다. 기존의 Microdisk 레이저의 경우 디스크의 반경이 파장 크기에 근접하면 광손실이 많아져서 발진이 불가능하였으나, 이 광결정 회랑모드의 경우에는 광밴드갭의 효과로 쉽게 레이저 발진이 됨을 저자의 실험실에서 처음으로 관찰되었다. 이 결과는 또한 광벤드갭을 이용한 광자의 구속이 전반사를 이용한 경우보다도 훨씬 더 효과적임을 보여주는 좋은 예가 되기도 한다. 이 구조도 앞의 Monopole Mode와 같이 중앙부분의 전기장의 세기가 0이므로 전류 펌핑이 추후 가능할 것으로 예상됨으로 실용적인 극미세 레이저로서의 가능성이 크다고 볼 수 있다. 이 회랑모드의 경우 Q-factor가 약 30,000 이상까지 가능함이 계산되었으며, 이 값은 지금까지 보고된 값들 중에서 가장 큰 값으로 알고 있다.

3. 광결정 교효율 LED

광결정 구조의 주요 응용 분야 중의 하나는 새로운 형태의

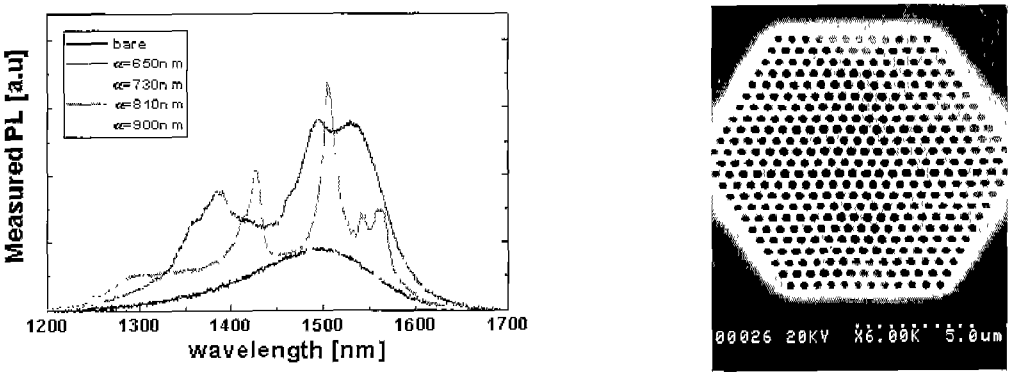


그림 9. 광결정 구조에서의 외부 광방출 효율 증가와 공진기 없는 LED의 SEM 사진.

저전력 고효율 광원의 개발이다. 반도체 발광 다이오드(Light Emitting Diode, LED)의 경우를 생각해 보자. LED의 능동 매질은 대부분 반도체이다. 반도체는 가장 효율적으로 빛을 발생시키는 물질이며, 이의 내부 광변환 효율은 99% 이상이 된다. 즉, 외부에서 주입해주는 대부분의 전류가 빛으로 발생된다는 말이다. 하지만 굴절률이 3 이상으로 크기 때문에 일반적인 LED의 경우 빛의 외부 방출 효율은 약 2-4% 정도에 지나지 않는다. 이것은 반도체의 높은 굴절률에 의한 전반사 때문에 발생된 빛이 공기 중으로 전달되지 못하고 반도체 내부에서 반복적으로 반사를 계속하다가 다시 흡수되어서 열로 바뀌기 때문이다.

그럼에도 불구하고 LED의 수명은 반영구적이기 때문에 현재 고휘도의 LED는 교통신호등에 도입되기 시작하고 있다. 이러한 LED의 경우 광결정 구조를 도입시키면 빛의 외부 방출 효율을 획기적으로 증가시킬 수 있다. 현재 23%의 외부 방출효율을 얻어낸 결과가 보고되었으며, 이 개념을 적극적으로 발전시키면 효율이 더욱 증가될 수 있다고 예상된다.

광밴드갭의 중심 파장에서 빛이 발생되게 만드는 구조를 2차원의 바깥에 형성시키면 평면 방향으로는 광밴드갭 때문에 빛이 전파하지 못하고, 이에 수직한 제3의 방향으로만 빛이 방출되게 될 수 있다. 이 경우는 비발광 결합 등의 다른 문제들을 함께 해결해야 하기 때문에 실험적으로 구현되지 않았다.

실제적으로 더욱 많이 사용되는 방법은 광밴드갭 위에 존재하는 방출 모드 (*Leaky mode*)를 사용하여 빛을 도파관 밖으로 빠져나가게 하는 방법이다[7]. 이 경우 그림 9에서 보는 바와 같이 외부 광방출효율이 광결정을 도입하지 않은 구조와 비교하여 5-6배정도 증가하는 것을 실험적으로 관찰할 수 있다[8-9]. 실제적으로 반도체 LED의 경우 광방출효율이 5-6배에 그치는 이유는 유한자의 비발광결합 때문이라고 알려져 있다. 최근 본 실험실에서는 비발광 결합을 최소화하기 위하여 이 구조의 능동 매질로 양자점(Quantum dot)을 도입하고, 80K 정도의 저온 실험을 하여 외부 방출효율이 약 30 배까지 증가함을 관찰하였다. 광결정을 이용한 외부 광방출효율의 증가는 반도체를 이용한 LED에서뿐만 아니라, 유기 발광 매질의 LED에도 적극적으로 활용하면 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상한다.

4. 결 론

광결정 구조를 근간으로 하는 Nanophotonics에 관한 연구는 최근 세계적으로 치열한 경쟁 속에서 활발하게 진행되고 있다. 본 기고에서는 나노 레이저와 LED를 간단하게 소개하였으나, 이 외에도 여러 가지의 광소자로서의 가능성이 지속적으로 발견되고 있다. 전체적으로 볼 때 광결정 구조를 통하여, 자연적으로 자연적인 물질에서는 불가능하였던 여러 가지의 광학적인 성질을 설계할 수 있다는 잠재적인 가능성이 여러 연구자와 산업체의 연구자들의 흥미를 끌고 있다고 볼 수 있다. 최근의 2차원 DFB 형태의 광결정 레이저도 레이저의 새로운 형태로 주목받고 있으며, 광결정 구조를 다른 디스플레이와 같은 장치에 응용을 하고자 하는 시도도 꾸준히 추구되고 있다. 여기서는 언급하지 않았지만 빛의 파장 크기 정도의 초소형 광도파로 구조도 광결정 구조를 통하여 가능함도 실험적으로 증명되어 있다. 즉, 현재 재래식의 광도파로를 근간으로 하는 광집적 소자들의 그 크기가 수내지 수십 mm 정도로 비교적 크다. 하지만 광결정의 개념을 도입한 광도파로를 사용할 경우에는 이 크기가 수내지 수십 마이크론까지 줄어들 수 있게 된다. 따라서 광결정 구조를 근간으로 하는 나노포토닉스의 발전 가능성은 초고속 정보 통신의 시대가 진행될수록 더욱 더 증가할 것으로 예상된다.

참고 문헌

[1] J. D. Joannopoulos, P. R. Villeneuve, and S. Fan, "Photonic crystals: putting a new twist on light," Nature, Vol. 386, p. 143, 1997.

[2] E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics," Phys. Rev. Lett., Vol. 58, p. 2059, 1987.

[3] 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, Vol. 284, p. 1819, 1999.

[4] H. Y. Ryu, J. K. Hwang, and Y. H. Lee, "Conditions of single guided mode in two-dimensional triangular photonic crystal slab waveguides," J. Appl. Phys., Vol. 88, p. 4941, 2000.

[5] J. K. Hwang, H. Y. Ryu, D. S. Song, I. Y. Han, H. W. Song, H. K. Park, Y. H. Lee, and D. H. Jang, "Room-temperature triangular-lattice two-dimensional photonic band gap lasers operating at 1.54 μm," Appl. Phys. Lett, Vol. 76, p. 2982, 2000.

[6] J. K. Hwang, H. Y. Ryu, D. S. Song, I. Y. Han, H. K. Park, D. H. Jang, and Y. H. Lee, "Continuous room temperature operation of optically-pumped two dimensional photonic crystal lasers at 1.6 μm," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 12, p. 1295, 2000.

[7] S. Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos,

and E. F. Schubert, "High extraction efficiency of spontaneous emission from slabs of photonic crystals," Phys. Rev. Lett., Vol. 78, p. 3294, 1997.

[8] J. K. Hwang, H. Y. Ryu, and Y. H. Lee, "Spontaneous emission rate of an electric dipole in a general microcavity," Phys. Rev., B. Vol. 60, p. 4688, 1999.

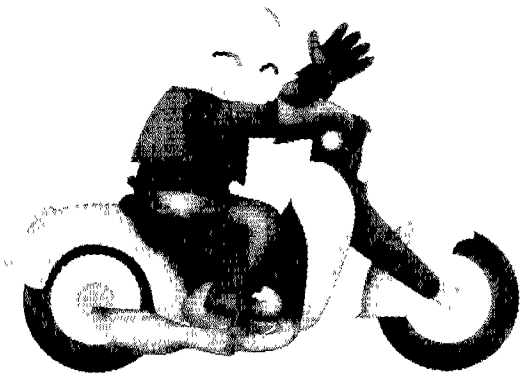
[9] H. Y. Ryu, J. K. Hwang, D. S. Song, I. Y. Han, Y. H. Lee, and D. H. Jang, "Effect of nonradiative recombination on light emitting properties of two-dimensional photonic crystal slab waveguides," Appl. Phys. Lett., Vol. 78, p. 1174, 2001.

저 자 약 력

성 명 : 이 용 희

❖ **학 력**

- 1977년 서울대 물리학 B.S.
- 1979년 한국과학기술원 물리학 M.S.
- 1986년 University of Arizona 광 학 Ph.D.

❖ **경 력**

- 1987년 - 1991년 AT & T Bell Laboratories Member of Technical Staff
- 1986년 - 1987년 University of Arizona Post Doc.
- 1979년 - 1982년 국방 과학 연구소 연구원
- 1999년 - 현재 한국과학기술원 물리학과, 조교수/부교수/교수
- 1999년 국가지정연구실 : 수직공진 표면 광레이저 (나노레이저) 연구실.