

## 반도체 나노레이저

### 들어가며

레이저 및 양자광학에서 오래된 중요 화두 중의 하나인 문턱(Threshold) 없는 이상적인 레이저 구현을 위해서는 광자를 극히 제한된 공간에 오래 동안 가두어 둘 수 있는 효과적인 방법을 찾아야 한다. 이러한 목적을 위해서는, 크기가 빛의 반파장 정도가 됨과 동시에 광학적 손실도 매우 작은 레이저 공진기가 필요하다.

지난 20여 년을 되돌아 볼 때, 매우 작은 반도체 레이저 공진기에 대한 학계의 실질적인 관심이 급속히 늘어나기 시작하는 시점은 1989년 미국의 벨 연구소에서 반도체 레이저의 새로운 모습인 수직공진 표면광 레이저(Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL)를 실험적으로 성공시켰을 때라고도 보는 것이 타당할 것이다. 세 방향 모두 수 마이크로 정도 길이를 가지는 VCSEL은 현재 단거

으로 나눈 값) 값을 비교적 쉽게 실현시킬 수 있다는 현실적인 점이 받아들여진 것이다. 고품위 광결정 레이저에 대한 연구 결과는 초저전력 반도체 레이저나 효율적인 단광자 발생에 대한 관심이 현실적으로 표현된 것으로 볼 수도 있다. 단광자 발생기는 최근 관심이 커지고 있는 양자정보 통신의 핵심소자로 중요하게 인식되고 있다. 학문적인 면에서 보더라도, 반도체 박막을 사용하여 큰 Q/V 값의 공진기를 쉽게 제작할 수 있다는 사실은 공진기 양자동역학적 연구를 반도체 칩 형태에서 수행하게 하는 새로운 기초연구 분야 창출의 가능성을 열어주고 있으므로 아주 고무적이다.

흥미롭게도 그로부터 또 다시 10년에 지난 2008-2009년에는 공진 모드의 체적은 더욱 작으면서 Q값도 아주 큰 나노사다리 공진기가 제안되고 구현되어서 학계의 주목을 끌고 있다 [3]. 아주 가는 직선 형태의 나노사다리 공진기

# 특집 ■ 레이저 50주년특집 – 레이저의 발전과 응용

## 반도체 나노레이저

이용희\*

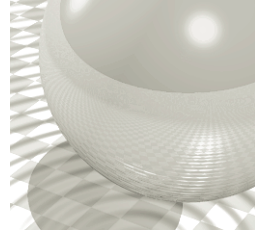
리 광연결용 광소자로 산업계에서 널리 사용되고 있을 뿐 아니라, 공진기 양자 동역학 연구의 대표적인 반도체 미세 구조로 받아들여져서 현재도 많은 연구가 수행되고 있다.

이로부터 10년 후인 1999년에는 California Institute of Technology의 Scherer 교수 연구팀이 화합물 반도체인 InP 박막형의 2차원 광결정 공진기로부터 레이저 발진을 최초로 관찰하는 개가를 이루게 된다 [2]. 이에 힘입어서 VCSEL보다 더 작으며, 빛의 반파장의 삼승 정도의 모드 체적을 가지는 고품위 광결정 레이저 공진기 연구가 새로운 전환점을 맞이하게 되었다. 즉, 반도체 기반의 광결정 공진기를 사용하면 큰 Q/V(Quality factor를 모드 체적(V

는 폭이 좁은 1차원 광결정의 모습을 취하고 있다. 그리고, 나노사다리 공진기는 전체 질량 자체가 이전의 구조들과 비교하여 아주 작다(picogram)는 흥미로운 특성을 지니고 있어서 공진기 광자역학(Cavity Optomechanics) 이라는 이름으로 새로이 창출된 연구분야의 핵심소자로 많은 관심을 끌고 있다 [4].

위에서 간단히 설명한 바와 같이 반도체 미세공진기의 형태가 1차원 --> 2차원 --> 1차원 광결정으로 순환하며 발전해 가는 모습은 한번 천천히 음미해 볼만하다고 생각한다. 본 논고에서는 1차원 광결정의 수직공진 표면광 레이저를 제 1세대, 2차원 광결정 레이저를 제2세대, 나노사다

\* 한국과학기술원 물리학과



리 레이저를 제3세대로 분류로 보고, 순서를 따라서 각 세대별로 대표적인 레이저 공진기의 구조와 특성을 살펴보고자 한다.

### 1. 제 1 세대: 1차원 수직공진 표면광 레이저

주기적으로 반복되는 유전체 구조는 광학다층박막, 수직공진 표면광 레이저(VCSEL), Distributed Feedback 레이저, Distributed Bragg Reflector(DBR) 레이저 등 여러 가지의 광소자에 널리 사용되어 왔다. 고반사율 다층박막은 두 가지의 유전체 박막을 교대로 반복해서 쌓은 모습을 가지고 있으며, 설계 중심 파장 부근에서 빛을 강하게 반사시키는 특성을 지닌다. 유전체 다층 박막을 1차원 광결정 구조로 본다면, 고반사율 파장영역은 개념 상 광밴드갭이라 불러도 좋을 것이다. VCSEL은 1차원 광결정 구조에 약간의 변형을 주어서 결정의 주기성을 국소적으로 깨뜨려 준 형태로 해석할 수 있다. 이렇게 주기성이 잘 변형된 1차원 광결정 공진기를 사용하여 광자를 좁은 공간에 구속시키면 유도방출율이 증가하며, 레이저 발진이 쉬워진다.

역사적으로는 1979년 일본의 Iga 교수에 의해서 발표된 77K에서 동작하는 InGaAsP 기반의 평면형 레이저 다이오드가 VCSEL의 원시적인 형태라고 볼 수 있다[5]. 능동매질로는 두께가 1마이크론 정도가 되는 덩어리(bulk) 결정을 사용하였으며, 반사경으로는 유전체 다층박막을 사용하였다. 당시에는 높은 문턱 전류, 저온 동작 등 만족스럽지 못한 특성들 때문에 거의 주목 받지 못하였다. VCSEL 구조가 실질적인 관심을 끌면서 화려하게 등장한 시점은 1989년 AT&T Bell 연구소에서 상온에서 동작하는 저 문턱전류 980-nm InGaAs VCSEL[2]에 대한 연구를 성공

시키는 개가를 얻은 때부터 라고 볼 수 있다. 그림 1에서 보는 것과 같이, MBE(Molecular Beam Epitaxy)를 이용하여 단결정으로 성장된 이 VCSEL 구조는 능동매질로 8nm의 두께를 가지는(그 때까지의 다른 구조에 비하여 10배 이상 얇은) 3개의 InGaAs 양자우물과 아주 높은 반사율(>99.5%)을 지닌 두 개의 GaAs/AlAs DBR으로 구성되어 있다. 상온 연속 동작과 저 문턱전류 및 2차원적인 생산성 등으로 요약되는 VCSEL의 우수한 특성들이 학계 및 산업계에서 폭넓은 인정 받은 것이다. 또한, 단결정성(monolithic)으로 성장되어야 하는 VCSEL은 MBE, MOCVD(Metal Vapor Chemical Vapor Deposition) 등의 정밀 결정성장 기술의 인상적인 발전에 힘입어서 괄목할만한 성장을 하게 된다. 1990년대 후반에 와서는 복잡한 구조의 VCSEL 기판을 화합물 반도체 결정성장 전문 업체로부터 쉽게 주문 생산을 할 수 있는 정도가 되었다.

AT&T Bell 연구소의 첫번째 InGaAs VCSEL은 화학적 건식식각 방식에 의해서 원통형의 메사 형태로 제작되었다. 하지만 공기에 노출된 반도체 능동 매질 표면에서 발생하는 강한 비발광 재결합 문제 때문에 실질적으로 사용가능한 레이저로 발전하지는 못하였다. 하지만 반도체 양자점을 결합시킨 메사 형태의 VCSEL 구조는 현재에도 공진기 양자동역학 연구의 주요 소자로 여러 그룹에서 실험에 사용되고 있다[6].

1990년에는 양성자 주입형 전면 발광형 VCSEL[7]이 발표되며, 상온 연속 발진, 수 mW급의 출력 등 저 동작 특성들이 기존의 반도체 레이저 다이오드에 대한 비교우위를 주장하는 단계에 까지 도달하게 된다. 첫번째로 상용화되었던 VCSEL은 당시로는 가장 안정적인 출력특성을 지녔으며, 양산이 가능했던 양성자 주입형 VCSEL이었다. 그

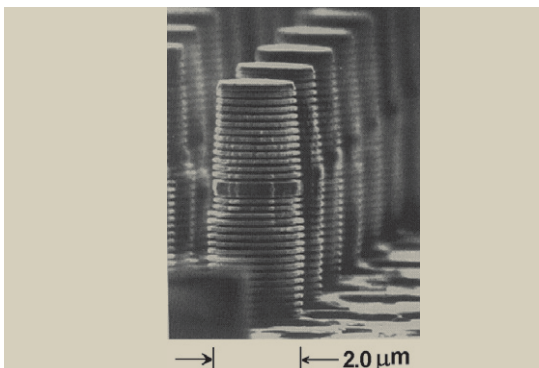


그림 1. AT & T Bell 연구소에서 제작된 Mesa 형태의 980-nm VCSEL(1).

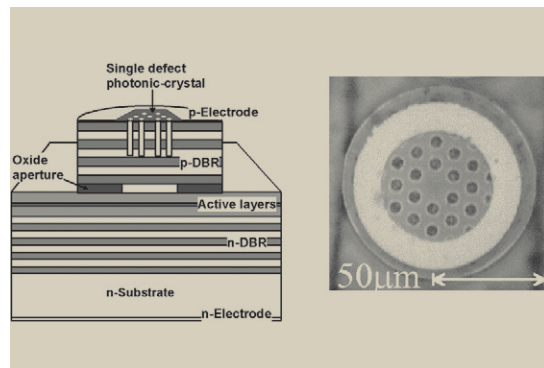


그림 2. 단일 모드 광결정 VCSEL(9). 표면에 2차원 광결정 구조가 도입되어있다.

## 반도체 나노레이저

후AlAs나 AlGaAs를 습식 산화시켜 AlO<sub>x</sub> 산화막을 만들 수 있다는 것이 알려지면서, 산화막 VCSEL이 등장하였다 [8]. 이 산화막이 광도파로와 전류제한 막으로의 역할을 훌륭하게 수행하면서 VCSEL의 성능을 한 차원 더 높여 주었다. 즉, 저 문턱전류, 고효율의 광원으로로서의 가능성이 현실적인 수준에서 더욱 강력한 경쟁력을 제공하게 된 것이다. 그 후, VCSEL 표면에 광결정 구조를 융합시켜서 높은 출력의 단일 횡모드 동작을 구현한 광결정 VCSEL도 보고되었다[9]. 이 PC-VCSEL의 개략도와 전자현미경 사진은 그림 2에서 볼 수 있다.

발전 파장으로 살펴보면, InGaAs QW 980-nm 파장으로 시작하여 AlGaAs 계열의 700-1000 nm 근처 대부분의 파장 영역에서의 발전이 레이저 계속하여 보고되어 왔다. 이들 중에서 GaAs 양자 우물을 도입한 다중 모드850-nm VCSEL은 단거리 광연결 시스템의 광원으로서 현재 각광을 받고 있으며, 단일모드 850-nm VCSEL은 PC용 레이저 마우스 광원으로 사랑을 받고 있다. 최근에 와서는 광통신 파장 대역의 VCSEL의 성능도 많이 향상되어서 1mW 급 출력을 단일 모드에서 얻어낼 정도에 도달하여 산업적인 응용을 기다리고 있다. 또한 GaN를 능동 매질로 하는 청록색 계열의 VCSEL도 최근 보고되기 시작하고 있으나 실용적인 구조로 인정받기에는 아직 부족한 면이 많다고 본다.

### 2. 제 2 세대: 2차원 광결정 레이저

Z-방향으로 무한히 긴, 이상적인 2차원 광결정은 이론적으로 해석하기가 쉽다는 장점이 있으나 구조를 실제로 구현하기는 불가능하다. 따라서 굴절률이 높은 반도체 박막에 공기 구멍 격자를 도입한 2차원 광결정 구조를 바탕으로 하여 연구가 주로 진행되어 왔다. 박막형 2차원 광결정의 경우, 평면 방향으로 TE-like모드에 대한 광밴드갭을 지닌 삼각형 광결정 또는 사각형 광결정 구조를 도입하여 광자를 박막 면에서 2차원적으로 구속하고 있다. 박막 면에 수직인 방향의 광구속은 고굴절률에 의한 전반사 효과를 적극적으로 활용하여 얻어낸다. 광도파로의 두께를 빛의 반 파장 정도로 만들어 주면 반도체 박막이 단일모드 광도파로가 된다. 이 단일모드 박막 구조에서 단 한 개의 모드만이 허용되기 때문에, 이상적인 2차원 광결정에서와 같이 물리적인 해석이 아주 간단해 진다는 점이 매력적이다.

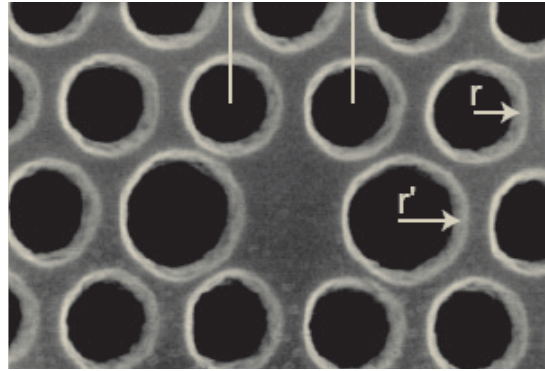


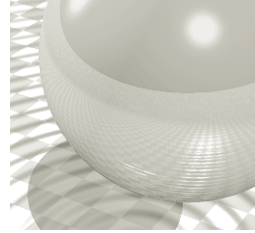
그림 3. Caltech에서 구현된 최초의 쌍극모드 광결정 레이저 (2).

현재 사용 가능한 표준 반도체 공정을 이용하면 근적외선에서 동작하는 2차원 박막형 광결정 구조를 어렵지 않게 제작할 수 있다는 점도 박막형 광결정 구조가 학계에서 널리 받아들여지고 있는 중요한 이유가 된다.

현실적으로 실현 가능한 가장 작은 광결정 공진기의 모습은 단 하나의 공기 구멍 격자만을 막아 놓은 미세 구조와 크게 다르지는 않을 것으로 예상된다. 이러한 단세포 광결정 공진기는 자연이 허용하는 가장 작은 레이저 공진기에 근접한다는 점에서 물리적으로 흥미로운 구조이다. 실제로 이런 단일 세포 광결정 나노공진기의 유효 체적은 대부분  $(\lambda/n)^3$  정도이다. 미국의 Caltech 그룹이 광범핑을 통하여 세계 최초로 구현하였던 삼각형 광결정 쌍극 모드(Dipole mode)의 InGaAsP 단세포 광결정 레이저[2]는 그림 3에서 볼 수가 있다. 그 크기가 그 때까지의 다른 미세 레이저들보다도 10배 이상 더 작았으며, '세상에서 가장 작은 레이저'라는 점에서 많은 사람들의 관심을 끌었다. 공진기 모드의 유효 체적은 이론적 최소값의 수배 정도에 지나지 않을 정도로 작다. 하지만 이중으로 축퇴된 쌍극 모드의 Q값은 수백 정도에 지나지 않아서 미래 공진기 양자동역학 연구에는 불리한 점이 없지 않다.

한편 KAIST 나노레이저 연구실에서는 공진기의 중심의 광강도가 0이 되는 홀극 모드(Monopole mode) 단세포 삼각형 광결정 나노레이저를 제안하였으며 광범핑으로 레이저 발전을 관찰하였다[10]. 이 구조는 중심부 6개 구멍 크기를 약간 작게 만들면서 바깥쪽으로 밀어내는 방법으로 공진기 주파수를 광밴드갭의 중앙 부근으로 가져 왔다. 이 홀극 모드는 이론적으로 쌍극 모드보다 훨씬 큰 Q값을 지니고 있다. 또한 이 모드는 원천적으로 비축퇴 모드이기 때문에 문턱 없는 발전을 위한 기본 여건 중의 하나를





만족시키고 있다. 삼각형 광결정뿐 아니라 사각형 광결정 구조에서도 광밴드갭 레이저 공진기가 가능하다는 것이 KAIST에서 보고되었다. 사중 대칭성을 가지는 사각형 광결정 단세포 레이저는[11] 회랑모드(Whispering Gallery Mode)에서 동작하고 있다. 기존의 Microdisk 레이저의 경우 반경이 파장 크기에 근접하면 광 손실이 많아져서 발진이 불가능하지만, 사각형 광결정의 회랑모드는 광밴드갭 효과로 레이저 발진이 가능함이 관찰되었다. 이 결과는 광밴드갭을 이용한 광자 구속이 전반사를 이용한 경우보다도 효과적임을 보여주는 좋은 예이다. 이 공진모드는 중심부의 전기장 세기가 0이므로 전류 주입의 가능성이 열려있는 구조이다. 삼각형 광자결정에서는 육극모드(Hexapole mode)가 이러한 회랑 모드 특성을 지니고 있다. 육극모드의 Q-factor는 이론적으로 2,000,000 이상의 값을 가질 수 있다.

파장 크기의 광결정 레이저가 '사용가능한 광소자'로 인정을 받기 위해서는 전류 구동이 가능함을 보여줘야 한다. 전류 구동이 가능한 광결정 레이저 구현에서 힘든 현실적인 문제 중의 하나가 전류 주입을 위한 아주 가는 전선을 공진기와 연결하는 것이다. 공진기 중심의 광강도가 영인 사각형 광결정기반의 육극 모드는 전류 주입용 미세기둥을 중심부에 도입하더라도 공진기의 광손실이 크게 증가하지 아니한다. 전기 저항을 줄이려면 반도체 미세기둥을 크게 만드는 것이 좋지만, 광학적 손실이 커지게 된다. 2004년 KAIST 연구팀은, 그림 4에서 보는 것과 같이, 너무 작지도 않고 너무 크지도 않은 미세 기둥을 공진기 중심부에 도입하여 삼각 광결정 육극모드에서 발진하는 전류 구동 단세포 광결정 레이저를 발표하였다[12]. 발진 파장은 광통신의 중심 대역인 1550nm이며, 레이저 발진특성에서 레이저 발진 문턱 부분이 일반적인 레이저 다이오드보다는 훨씬 부드럽게 변화하고 있다. 이 레이저의 큰 자발 방출계수(Spontaneous emission factor) 0.25는 전형적인 극미세 레이저에서만 관찰 가능한 특성이다. 실험 데이터 해석의 신빙성 확보를 위하여 실 제작된 소자의 전자현미경 사진으로부터 추출한 기하학적 구조 데이터를 그대로 컴퓨터에 입력하여 3차원 Contour FDTD 계산을 수행하였으며, 실제 실험에서 관찰된 비대칭성까지도 비슷하게 재현됨을 확인하였다. 전류로 구동되는 단세포 광결정 레이저의 구현은 '사용가능' 한 이상적인 극미세 레이저 광원을 향한 작은 첫 걸음일 수도 있다는 점에서 그 의미를 찾

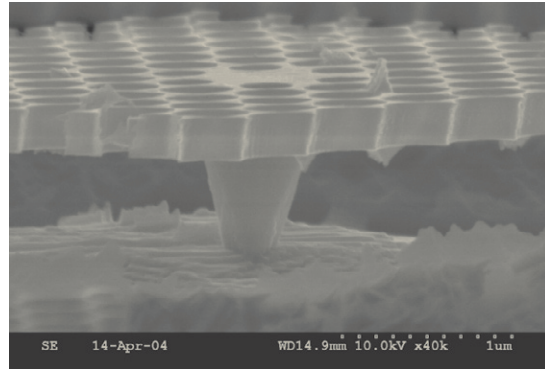


그림 4. 전류구동 단세포 광결정 레이저. 전류 주입을 위하여 중앙에 작은 기둥이 형성되어 있다 (12).



그림 5. 고품위 선형 광결정 공진기 (13)

을 수 있다고 본다.

2003년에는 공진기의 Q factor는  $10^6$ 을 넘으면서도 모드 유효 체적은  $0.5(\lambda/n)^3$ 에 지나지 않는 그림 5에서 보는 것과 같은 선형 광결정 공진기가 일본의 Noda 교수 그룹에서 보고되어서 공진기 양자동역학을 연구하는 사람들의 관심을 끌었다[13]. 이후 높은 Q/V 값의 반도체 광결정 공진기의 실험적인 구현에 대한 보고가 잇따라 나오면서, 파장 크기의 공진기 내부에 '인공 원자'라고 말할 수 있는 반도체 양자점을 도입한 공진기 양자동역학관련 연구가 더욱 가속도를 받게 된다[14]. 이렇게 높은 Q/V 값의 광결정 공진기와 양자점의 결합이 안정적으로 이루어질 수 있다면, 지금까지 진공 챔버를 이용하여 대규모로 수행하여야만 했던 공진기 양자동역학 연구를 광결정 반도체 칩에서도 수행 가능케 한다는 점에서 공진기 양자동역학 연구의 획기적인 전환점이 될 것으로 예상된다. 하지만 빛의 파장 크기의 공진기와 양자점을 제대로 결합시키는 일은 결코 쉬운 일이 아니다. 물리적으로 볼 때, 양자점과 공진기의 결합은 두 가지의 서로 다른 특성을 지닌 공진 현상의 결합이라고 본다면 두 가지의 공진 파장을 먼저 일치시켜야 한다. 뿐만 아니라, 공진 모드의 광강도가 가장 높은 장소에 양자점을 정확하게 위치시켜야만 공진 모드가 양자점의

반도체 나노레이저

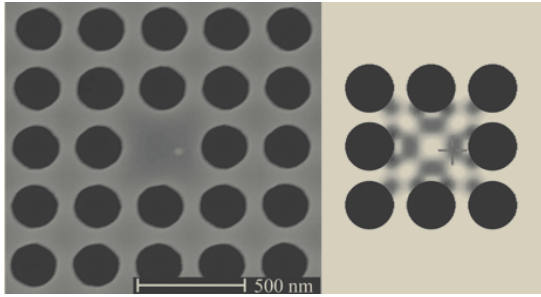


그림 6. 양자점과 결합된 사각형 광결정 공진기(15). 좌측 그림 중앙에서 약간 오른쪽에 보이는 밝은 점이 양자점이며, 우측 그림에서는 십자기로 표시되어 있으며, 광강도가 큰 지점에 위치하고 있다.

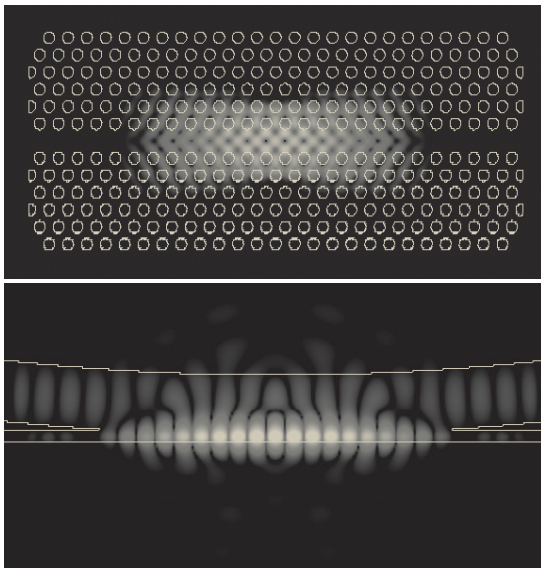


그림 7. 휘어진 광섬유와 결합된 광결정 도파로 위에 형성된 재구성 공진기. 미세 광섬유와 접촉된 광결정 도파로 부근에 광자 우물이 형성된다.

존재를 최대한 느끼면서 작동할 수 있다. 즉, ‘최적의 양자점’을 골라서 ‘최적의 장소’에 정확하게 위치시키는 작업이 만만치 않은 실험적인 어려움을 주고 있음을 예상할 수 있다.

양자점 광결정 공진기에 관한 UCSB 그룹의 데모에서는 그림 6에서 보는 바와 같이[15] 사각형 회랑모드를 가지는 단세포 광결정 공진기를[11] 도입하였다. 양자점의 공진파장을 먼저 확인한 후, 이 파장과 정확하게 일치하도록 광결정 공진기의 공진파장을 소위 ‘디지털 식각기법’이라는 후공정의 도움을 받아서 미세 조정하였다. 이 방법에서 요구되는 광결정 공진기와 양자점의 공진파장의 일치 정확도는 <math><1.0\text{ nm}</math>이며, 실제 나노공정에서는 이보다 세배 정도 작은 정밀도가 요구되기 때문에 제대로 된 시료를 얻을

확률이 극도로 작다. ‘최적의 양자점’을 ‘최적의 장소’에 위치시키기 위한 노력으로 KAIST 나노레이저 연구실에서는 심하게 휘어진 미세 광섬유와 광결정 공진기를 결합시킨, ‘공간적 재구성’이 가능한 광결정 공진기를 최근 개발하였다[16]. 이러한 재구성이 가능한 공진기는, 그림 7의 개략도에서 볼 수 있듯이, 극도로 휘어진 미세광섬유를 광결정 도파로에 접촉시키는 간단한 방법으로 원하는 위치에 파장크기의 고품위 공진기를 자유자재로 형성시킬 수 있다는 장점을 지니고 있다. 즉, 원하는 양자점의 존재만 발견되면 바로 그 위에 광결정 공진기를 직접 위치시킬 수 있다. 또한, 광섬유의 곡률반경을 조정하는 간단한 방법으로 공진기의 중심 파장을 쉽게 제어할 수도 있다. 상기한 공진기의 유연한 위치제어 및 파장제어 기능을 잘 활용하면, 원하는 양자점을 높은 확률로 미세공진기와 결합시킬 수 있기 때문에 효율적인 단광자 발생기로 발전될 가능성이 크다고 본다.

3. 제 3 세대: 나노사다리 공진기

최근에는 공진 모드의 체적은 더욱 작고, 가벼우면서도, Q값은 아주 큰 나노사다리 공진기가 제안되고 구현되어서 학계의 주목을 끌고 있다. 2차원 광결정 공진기 구조가 2차원 평면으로는 광밴드갭 효과에, 수직인 방향으로는 전반사 효과에 의존하여 광자의 공간적인 구속을 취하고 있는 것과 비교하여, 그림에서 보이는 나노사다리 공진기는 광결정 구조는 1차원적으로만 사용하고, 나머지 두 방향으로 전반사 효과를 적극적으로 이용하는 점이 특징이다. 일반적으로는 2차원 광결정 도입이 큰 Q/V값을 얻는데 더 유리할 것이라는 상식에 반하여, 일본 NTT연구소의 Notomi는 1차원 분산곡선을 지닌 나노사다리를 기본으로

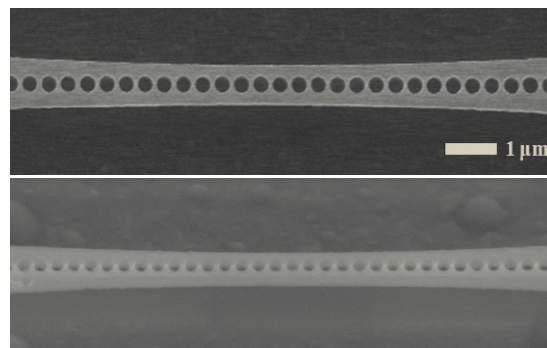


그림 8. 포물선형 나노사다리 레이저 공진기(17).

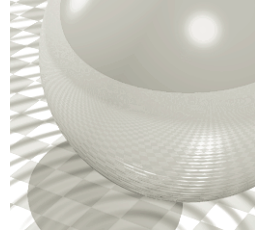


그림 9. VCSEL, 광결정 레이저, 나노사다리 레이저. 그림의 크기는 각 구조의 설계 파장으로 규격화(normalize)하였음. 광결정 레이저와 나노사다리 레이저의 두께는 빛의 반파장 정도이다.

하는 도파모드에 대한 연구 분석을 통하여  $10^6$  이상의 Q 값과  $0.25(\lambda/n)^3$ 의 유효체적을 지닌 나노사다리 공진기가 가능함을 이론적으로 보고하였다[3]. 즉 큰 Q/V값을 얻기 위해서는 1차원 광밴드갭만 있어도 충분하다는 말이 된다. 또한, 나노사다리 공진기에서는 기존의 1차원적인 분석기법이 그대로 적용되기 때문에 설계, 제작, 분석이 모두 상대적으로 간단하다는 것이 매력적이다. 그 후 실험으로 측정된 Q 값이  $10^6$ 이 넘는 나노사다리 공진기도 보고되었다. 나노사다리 공진기는 광손실이 아주 작기 때문에 그림 8에서 보는 것과 같이 1차원 포물선 형태로 너비가 완만하게 변형된 구조를 사용하면 레이저 발진을 얻을 수 있음도 KAIST에서 보고되었다[17]. 그림 9에서는 포물선형 나노사다리 레이저의 크기를 메사형태의 VCSEL, 단세포의 광결정 레이저, 각 해당 파장으로 규격화하여 z 축 방향으로는 비슷하게 조정한 후에 바로 옆에 세워서 비교하여 보았다. 나노사다리의 크기가 다른 두 가지 형태보다 작은 것을 쉽게 알 수 있다. 즉, VCSEL과 비교하면 y축 방향으로 두께가 빛의 반파장 정도인 아주 얇은 판형 VCSEL의 형상으로 해석될 수도 있으며, 2차원 광결정 레이저와의 비교에서는 x 축 방향으로 축소된 모습으로 볼 수 있다.

나노사다리 공진기는 질량이 수십 picogram에 지나지

않고 탄성계수는 아주 크기 때문에 수 MHz 정도의 공진주파수를 지닌 다수의 역학적 공진모드가 존재하고 있음이 알려졌다. Caltech 그룹에서는 두 개의 나노사다리 공진기를 아주 가까이 붙여놓은 Zipper cavity 구조를 사용하여 광학적 주파수를 지닌 고품위 광학적 공진모드와 8-9MHz의 역학적 공진모드와의 모드 결합에 대한 흥미로운 연구를 수행하였다 [4]. 나노사다리 공진기는 제작이 간단하다는 장점에 힘입어 microfluidics와 결합된 공진기나 전자광학적 변조기의 [18] 형태로 생물물리계의 응용도 기대되고 있다.

## 정리하며

반도체를 기반으로 하는 나노레이저의 형태가 제1세대를 대표하는 1차원 광결정의 수직공진 표면광 레이저를 지나서, 제2세대의 2차원 광결정 레이저로 발전한 후에, 제3세대에 와서는 다시 1차원으로 보이는 나노사다리 레이저로 순환하며 진화해 가는 모습은 흥미롭다.

이 중에서 VCSEL은 단거리 광통신용 광원, PC용 레이저 마우스 등 산업적으로 받아들여져서 널리 사용되고 있다. 2차원 광결정 공진기를 양자 정보 통신에 적용될 수 있는 '사용가능한' 단광자 발생기로 만들기 위해서는 앞으로 많은 문제들을 해결하여야 한다. 즉, 최적의 양자점'을 '최적의 장소'에 위치시키는 만만치 않은 실험적인 어려움이 아직 우리를 기다리고 있다. 뿐만 아니라, 이렇게 아주 작은 레이저로부터 방출되는 빛을 효율적으로 수집하여 광섬유나 광검출기로 보내는 일들도 매우 중요하며 많은 연구가 필요한 부분이다.

나노사다리 공진기는 picogram, nanometer 공진기라는 정도에 흥미로운 특성을 지니고 있으며, 공진기 광자 역학 (Optomechanics) 이라는 이름으로 창출된 연구 분야의 핵심소자로 폭발적인 관심을 끌고 있다. 또한, 본 원고에서는 다루지 않았으나 금속 박막을 이용한 광자 구속 효과를 얻는 아주 작은 플라즈모닉스 공진기와 레이저에 대한 연구도 최근 많은 관심 속에 경쟁적으로 수행되고 있음도 밝혀둔다.

참고 문헌

- (1) J. L. Jewell, A. Scherer, S. L. McCall, Y. H. Lee, S. Walker, J. Harbison, L. Florez, "Low-threshold electrically pumped vertical cavity surface emitting microlasers," *Electron. Lett.* 25, 1123 (1989).
- (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) M. Notomi, E. Kuramochi, H. Taniyama, "Ultra-high-Q nanocavity with 1D photonic gap," *Opt. Express* 16, 11095 (2008).
- (4) M. Eichenfield, R. Camacho, J. Chan, K. Vahala, O. Painter, "A picogram- and nanometer-scale photonic crystal optomechanical cavity," *Nature* 459, 559 (2009).
- (5) H. Soda, K. Iga, C. Kitahara, Y. Suematsu, "GaInAsP/InP surface emitting injection lasers," *Jpn. J. Appl. Phys.* 18, 2329 (1979).
- (6) J. P. Reithmaier, G. Seck, A. Löffler, C. Hofmann, S. Kuhn, S. Reitzenstein, L. V. Keldysh, V. D. Kulakovskii, T. L. Reinecke, A. Forchel, "Strong coupling in a single quantum dot-semiconductor microcavity system," *Nature* 432, 197 (2004).
- (7) Y. H. Lee, B. Tell, K. Brown-Goebeler, J. L. Jewell, "Top-surface-emitting GaAs 4-quantum-well lasers emitting at 0.85  $\mu\text{m}$ ," *Electron. Lett.* 26, 710 (1990).
- (8) K. D. Choquette, K. M. Geib, H. C. Chui, B. E. Hammons, H. Q. Hou, T. J. Drummond, Robert Hull, "Selective oxidation of buried AlGaAs versus AlAs layers," *Appl. Phys. Lett.* 69, 1385 (1996).
- (9) D. S. Song, S. H. Kim, H. G. Park, "Single-fundamental-mode photonic crystal vertical cavity surface emitting lasers," *Appl. Phys. Lett.* 80, 3901 (2002).
- (10) H. G. Park, J. K. Hwang, J. Huh, H. Y. Ryu, Y. H. Lee, J. S. Kim, "Nondegenerate monopole-mode two-dimensional photonic bandgap laser," *Appl. Phys. Lett.* 79, 3032 (2001).
- (11) H. Y. Ryu, S. H. Kim, H. G. Park, J. K. Hwang, Y. H. Lee, 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).
- (12) H. G. Park, S. H. Kim, S. H. Kwon, Y. G. Ju, J. K. Yang, J. H. Baek, S. B. Kim, Y. H. Lee, "Electrically Driven Single-Cell Photonic Crystal Laser" *Science*, 305, 1444 (2004).
- (13) Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, S. Noda, "High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal," *Nature* 425, 944, 2003.
- (14) D. Englund, A. Faraon, I. Fushman, N. Stoltz, P. Petroff, J. Vuckovic, "Controlling Cavity Reflectivity With a Single Quantum Dot," *Nature* 450, 857 (2007).
- (15) A. Badolato, K. Hennessy, M. Atature, J. Dreiser, E. Hu, P. M. Petroff, A. Imamoglu, "Deterministic Coupling of Single Quantum Dots to Single Nanocavity Modes," *Science* 308, 1158, 2005.
- (16) M. K. Kim, I. K. Hwang, M. K. Seo, Y. H. Lee, "Reconfigurable microfiber-coupled photonic crystal resonator," *Opt. Express* 15, 17241, 2007.
- (17) B. H. Ahn, J. H. Kang, M. K. Kim, J. H. Song, B. Min, K. S. Kim, Y. H. Lee, "One-dimensional parabolic-beam photonic crystal laser," *Opt. Express* 18, 5654 (2010).
- (18) B. Schmidt, Q. Xu, J. Shakya, S. Manipatruni, M. Lipson, "Compact EO modulator on silicon-on-insulator substrate using cavities with ultra-small volumes," *Opt. Express*, 15, 3140 (2007).