

광자결정 발광소자

이 용 희

한국과학기술원 물리학과

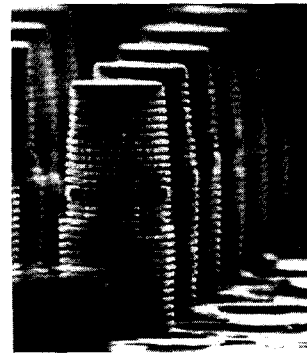
I. 서 론

미래의 초고속 정보통신망은 근본적으로 '광자'를 바탕으로 설계 제작되어야만 계속 늘어나는 막대한 정보량을 취급할 수 있다. 따라서 지금까지의 '전자공학'이 전자의 성질을 이해하고 제어 하면서 급속한 발전을 한 것과 같은 맥락에서 볼 때, 광자의 제 성질에 대한 이해와 제어를 위한 '광자공학'에 대한 연구는 그 의의가 매우 크며 시급하다고 볼 수 있다. 1946년 Purcell은 '원자에서의 발생하는 광자의 자발 방출 특성은 그 원자를 둘러싸고 있는 공간의 형태에 따라서 변하는 것이지 불변이 아니다'고 주장하였으며, 그 후 이 제안의 타당성은 여러 실험을 통하여 증명되어 왔다. 광자의 특성에 대한 이러한 인위적인 조작을 가능케 하는 구조 중의 하나로 최근 각광을 받고 있는 것이 광자결정이며^[1], 광자결정의 광자 제어 능력을 잘 활용하면 새로운 특성을 지닌 많은 신기능 광소자를^[2] 창출할 수 있을 것으로 기대된다. 본 원고에서는 이러한 가능성들 중에서 빛의 발생과 관계되는 능동형 광밴드갭 발광소자를 위주로 하여 광자결정의 잠재력과 응용성을 다루어 볼 예정이다.

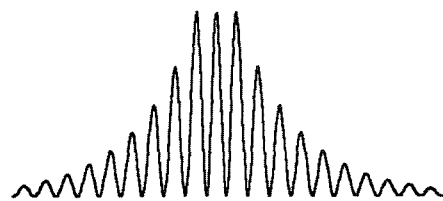
II. 1차원 광자결정 공진기 : VCSEL

1차원 광자결정이란 사실상 레이저 반사경으로 널리 사용되고 있는 다층박막의 다른 표현이라고

보는 것이 이해에 도움이 될 것이다. 기판 위에 두 가지의 서로 다른 층으로 반복적으로 쌓은 다층 박막은 설계 중심 파장 부근에서 빛을 강하게 반사시키는 특성을 지닌다. 이 경우 이 고반사율



(a)



(b)

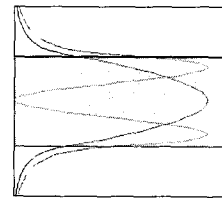
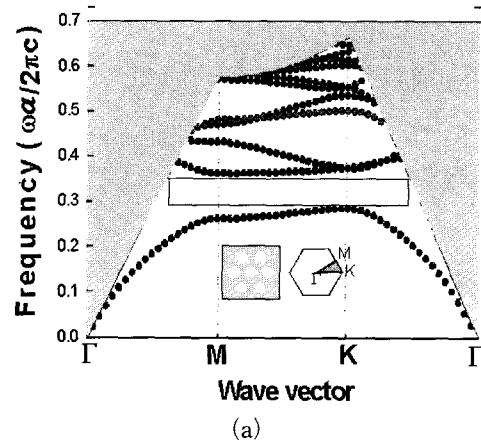
〈그림 1〉 (a) 1차원 광자결정 공진기 : Vertical Cavity Surface Emitting Laser
(b) 1차원 광자결정 공진기에서의 광자 구속 (Photon localization)

영역은 1차원 광밴드갭을 말해도 좋다.

이러한 1차원 구조에 약간의 변형을 주어서 결정의 주기성을 국소적으로 깨뜨려 주면, <그림 1>에 보인 VCSEL과 같은 1차원 레이저 공진기가 되며, 이 주기성이 파손된 공진기 내부에 광자가 공간적으로 구속되는 효과를 얻을 수 있다. 역사적으로 볼 때, 주기적인 구조는 VCSEL, DFB 레이저, DBR 레이저, 다층 박막 등 여러 가지의 광소자에 성공적으로 사용되어 왔다. 특히 1차원 광결정 레이저인 VCSEL의 경우에는 최초로 구현된 지 10여년 정도 밖에 지나지 않았지만, 이미 광통신 시장에서 널리 사용되고 있는 실정이다.

III. 박막형 2차원 광자결정 레이저

1차원 광결정 레이저의 성공적인 구현을 2차원으로 확장 적용시키기 위해서는 2차원 광결정의 도움을 얻는 것이 필요하다. 이상적인 2차원 광결정은 이론적으로 취급하기가 간단하다는 장점이 있으나 현실적으로 구현하기는 쉽지가 않다. 따라서, 실제적으로는 2차원의 얇은 박막 형태의 광도파로에 2차원 광결정 구조를 구현하는 방향으로 실험이 현재 활발하게 진행되고 있다. 이 경우 2차원 평면 방향으로 삼각형 광결정 또는 사각형 광결정 구조를 도입하여 광자를 공간적으로 구속하고 있으며, 면에 수직인 방향으로 고굴절률에 의한 전반사 효과를 적극적으로 활용한다. 특히 광도파로의 두께를 빛의 반 파장 정도로 만들어 주면 이 도파로가 단일 모드 광도파로가 되며, 이 경우 이 단일 도파모드에 대하여는 <그림 2>에서 보는 바와 같이 광밴드갭이 존재함이 알려져 있다. 또한, 현재 적용 가능한 표준 반도체 공정을 이용하면 근적외선에서 동작하는 2차원 광결정 구조를 어렵지 않게 제작할 수 있기 때문에 지금까지 구현되어서 보고된 2차원 광결정 나노 공진기에^[3] 대한 연구결과는 대부분 이런 구조를 바탕으로 하고 있다.



<Guided mode profiles>
(b)

<그림 2> (a) 2차원 박막형 삼각형 광자결정의 광밴드 구조, (b) 박막 내부의 광장도 분포

1. 광자결정 레이저 능동 매질

레이저 광을 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 필요하다. 중심 파장을 현재 광통신에 널리 사용되는 1,550 nm로 생각을 할 경우, InGaAsP 계열의 능동 매질의 경우 GaAs 계열의 물질들 보다 표면 비발광 결합 속도가 10배 이상 작기 때문에 이러한

조건을 상대적으로 잘 만족시키고 있다. 그래서 InGaAs 양자샘 층이 널리 사용되고 있다. 특히 2차원의 삼각형 광결정 구조는 TE-like 모드에서 완전한 밴드갭을 가지며, TM-like 모드에서는 광밴드갭이 존재하지 않는다. 따라서, InGaAs 양자샘을 성장할 때 약간의 compressive strain을 주어서 양자샘에서 방출되는 빛이 주로 TE 편광을 가지게 하면, TE-like 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.

박막형 2차원 광도파로 구조의 경우 박막의 두께는 동작 파장의 반파장 정도의 두께를 가지게 하여 단일 도파로가 자연스럽게 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 산화시키거나, 식각을 통해서 InP 층을 선택적인 제거하여 공기 층을 형성하는 방법을 택하고 있다. 습식 산화된 Al_xO_y (1.5)이나 공기 (1.0)는 화합물 반도체 (~3.0)에 비하여 굴절률이 작은 물질이어서 강한 광도파로 효과를 얻을 수 있다.

광자 제어에 못지 않게 중요한 것이 바로 운반자(carrier)의 공간적인 구속이라고 할 수 있는데, 이를 위하여 크기가 나노레이저의 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 양

자점의 반복적인 성장 등의 어려움이 해결되어야 할 과제로 남아 있다.

IV. 2차원 단일 세포 광밴드갭 레이저

현재 사용되고 있는 반도체 레이저는 이미 매우 작고, 효율적일 뿐 아니라, 경제적으로 경쟁력이 있다. 그렇다면 광자결정 레이저가 정말로 필요한 것인가? 현재 VCSEL의 경우 문턱 전류는 0.1~1.0mA 정도가 되고, 광출력은 1mW 정도가 되기 때문에 대부분의 시스템에서 요구하는 조건들을 이미 잘 충족시키고 있다고 본다. 그러나, 궁극적인 광원 모습에 이르기에는 아직도 개선시켜야 될 점들이 존재하고 있다. 예를 들어 문턱전류가 $1\mu A$ 이고, 50% 정도의 효율로 $10\mu W$ 의 출력을 내는 미세 광원이 존재한다고 가정해보자. 이런 광원은 10-Gbps의 속도로 컴퓨터 내부의 실리콘 IC 간의 고속 광연결에 사용될 수 있다. 이 경우 시스템에서의 광손실을 10dB로 잡는다 하더라도 한 비트의 정보를 약 400개 정도의 광자로 전달할 수 있다. 아주 많은 수의 이러한 광원을 필요로 하는 시스템의 경우에는 문턱 전류에 의한 열적인 부하가 아주 결정적인 문제가 된다. 이러한 이유 때문에 궁극적인 레이저에 대한 연구는 지금까지 많은 연구자들의 관심을 끌어온 분야이다. 문턱 없는 이상적인 레이저의 구현을 위해서는 다음과 같은 두 가지의 조건이 충족되어야 한다.

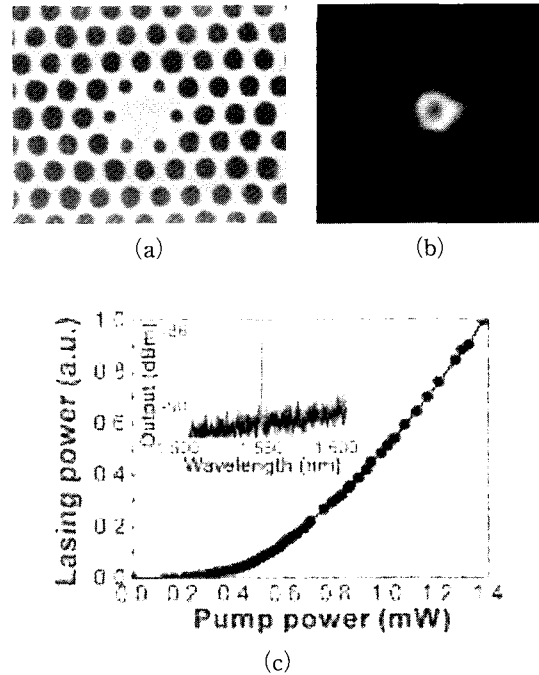
1. 레이저 공진기의 크기가 빛의 반파장 정도가 되게 아주 작아야 한다.
2. 레이저 공진기에서의 Q-값(Quality factor)가 아주 커야 한다. 즉, 이 공진기에서의 광학적 손실이 매우 작아야 한다.

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

모드를 통해서만 외부로 방출될 수 있다. 또한, 광손실이 작으면 공진기 내부의 광자 밀도를 높이는 효과를 주게 되어서 강한 유도 방출이 가능케 되는 이점이 있다. 2차원 광결정 공진기 구조의 경우 전기적인 펌핑 문제가 비교적 쉽게 해결될 수 있다는 점도 2차원 광결정 구조 연구를 촉진하는 다른 또 하나의 이유가 되고 있다.

1. 삼각형 광결정 단세포 레이저

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 근접하는 것이기 학문적으로도 흥미로운 구조이다. 실제로 이러한 구조의 경우 레이저의 크기는 $(\lambda/2)^3$ 정도이다. 이러한 단일 세포 광결정 나노 레이저를 삼각형 결정 구조에 제작을 한 모습이 <그림 3>에 나타나 있다. 삼각형 광결정 단세포 레이저가 처음 구현된 것은 미국의 Caltech 그룹에서 보고한 쌍극자 모드 발진이 그 효시를 이루고 있다^[4]. 하지만 이 구조는 공진기의 Q값이 작다는 점과 이중으로 축퇴되어 있다는 점이 궁극적인 레이저 구현이라는 점에서 불리하다. 또한 공진기의 중심에서의 광강도가 최대가 되고 있기 때문에 전류 펌핑 구조로 가져가는데 근본적인 문제점도 내포하고 있다. 본 연구실에서 찾고 있는 구조는 공진기의 중심을 통하여 전류 주입이 가능한 좀 더 제작 가능한 구조이다. 이러한 노력의 일환으로 발견 제작된 것이 <그림 3>에 보이고 있는 Monopole mode의 단일 세포 광결정 나노 레이저이며^[5], 이 광결정 레이저로부터 상온 발진이 처음으로 관찰되었다. 이 구조의 특징은 중심에 있는 구멍 6개의 크기를 약간 작게 만들어서 이 모드를 광 밴드갭의 중앙 부근으로 가져 왔다는데 있다. 이 Monopole mode 공진기에서는 2000 정도가 되는 비교적 큰 Q값이 실험적으로 관찰되었다. 또한 이 모드는 원천적으로 비축퇴 모드이기 때문에 문턱 없는 발진을 위한 기본 여건의 하나를 만족시키고 있다. 뿐만 아니라 공진기의 중앙 부

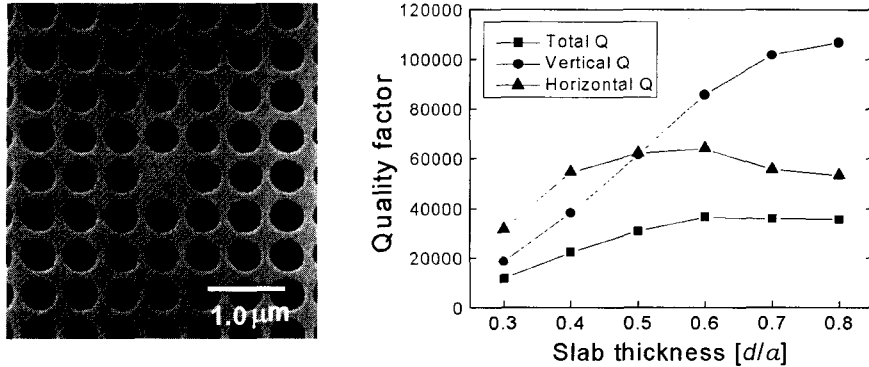


<그림 3> 삼각형 광결정 단세포 나노 레이저.
(a) 전자현미경 사진,
(b) Monopole mode의 광강도 분포,
(c) 광출력 특성

분의 전기장의 분포가 0이므로 그 부분을 통하여 전기를 흘려줄 수 있는 전극부착이 가능하다는 장점을 지니고 있다.

2. 사각형 광결정 단세포 레이저

이러한 극미세 레이저 공진기의 형태는 삼각형의 광결정뿐 아니라 사각형 광결정 구조에서도 가능하다. <그림 4>에서 보여주고 있는 사각형 결정의 단일 세포 광결정 나노 레이저는^[6] 회랑 모드(Whispering Gallery Mode)에서 동작하고 있다. 이 레이저의 경우 중앙에 위치한 미세 공진기를 돌아가며 전자기파가 존재하는 특이한 모습을 가지고 있다. 실제로 이 레이저는 회랑 모드 레이저의 궁극적인 모습을 보여주고 있다고 볼 수 있다. 기존의 Microdisk 레이저의 경우 디스크의 반경이 파장 크기에 근접하면 광 손실이 많아져서 발진이 불가능하였으나, 이 광결정 회랑모드의 경우에는 광밴드갭의 효과로 쉽게 레



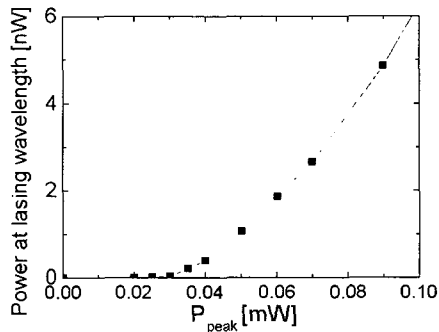
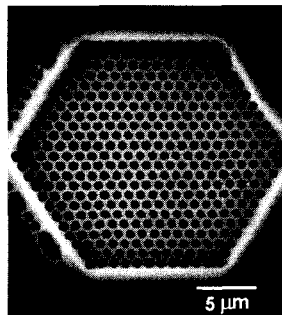
〈그림 4〉 사각형 광자결정 단세포 레이저의 모습과 Q값.

이러한 레이저 발진이 됨을 저자의 실험실에서 처음으로 관찰되었다. 이 결과는 또한 광밴드갭을 이용한 광자의 구속이 전반사를 이용한 경우보다도 훨씬 더 효과적임을 보여주는 좋은 예가 되기도 한다. 이 구조도 앞의 Monopole Mode와 같이 중앙 부분의 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.

V. 공진기 없는 광결정 레이저

광결정 구조를 이용하면 물리적으로 정의된 공

진기 없이도 레이저가 발진되는 특이한 경우를 발견할 수도 있다. 실제 1차원의 경우 현재 사용되고 있는 DFB 레이저가 이러한 부류에 속한다고 볼 수도 있다. 최근 2차원 광결정에서도 공진기 없는 광결정 레이저가 몇 개의 그룹에서 보고되었다. 이 구조는 주로 약하게 구속되는 광도파로를 기본 구조로 하여 제작되었으며, 대면적에서 단일 모드, 고출력 레이저로서의 가능성을 기대하고 있다. 이론적으로는 굴절률의 차이가 큰 광도파로 구조가 공진모드의 밀도가 더 높기 때문에 이와 같은 광결정 레이저에 더 유리한 것으로 알려져 왔다. 즉, 본 연구에서 추진하고 있는 박막형의 2차원 광결정 도파로 구조는 큰 굴절률 차이를 지니기 때문에 밴드끝 레이저(Band edge laser) 동작이 용이할 것으로 기대할 수 있다. 본 연구실에서는 최근 효율이 높고, 문턱이 아주 작은 그림에서 보는 것과 같은 밴드끝 레이저를^[7]



〈그림 5〉 광자결정 밴드 끝 레이저의 모습과 광출력 특성.

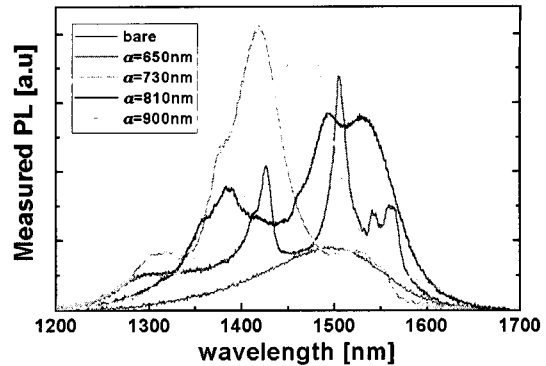
InP 계열의 삼각형 박막 광결정 구조로부터 성공시켰다. 실제로 동작하는 시료의 경우 직경이 약 5에 지나지 않는 30-40개의 구멍으로부터 레이저 발진이 일어나기 때문에 고속 동작도 가능할 것으로 기대된다. 이 구조의 경우에서도 전류 펄핑에 의한 레이저 동작은 가능하다.

VI. 광결정 고효율 LED

광결정 구조의 주요 응용 분야 중의 하나는 새로운 형태의 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 고회도의 LED는 교통 신호 등에 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.

실제로 많이 사용되는 방법은 광밴드갭 위에 존재하는 방출 모드 (Leaky mode)를 사용하여 빛을 도파관 밖으로 빠져나가게 하는 방법이다. 이 경우 <그림 6>에서 보는 바와 같이 외부 광방출 효율이 광결정을 도입하지 않은 구조와 비교하여 5-6배 정도 증가하는 것을 실험적으로



<그림 6> 삼각형 광결정 구조에서의 외부 광방출 효율 증가. 각 곡선은 서로 다른 격자 상수를 가진 광결정 구조에서의 Photoluminescence spectrum을 나타내고 있다.

관찰할 수 있다. 실제적으로 반도체 LED의 경우 광방출효율이 5-6배에 그치는 이유는 운반자의 비발광결합 때문이라고 알려져 있다. 최근 본 실험실에서는 비발광 결함을 최소화하기 위하여 이 구조의 능동 매질로 양자점을 도입하고, 80 K 정도의 저온 실험을 하여 외부 방출효율이 약 30배까지 증가함을 관찰하였다¹⁸⁾. 광결정을 이용한 외부 광방출 효율의 증가는 반도체를 이용한 LED에서뿐만 아니라, 유기 발광 매질의 LED에도 적극적으로 활용하면 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

VII. 요약 및 전망

광결정 구조를 근간으로 하는 나노포토닉스에 관한 연구는 최근 세계적으로 치열한 경쟁 속에서 활발하게 진행되고 있다. 본 기고에서는 광자결정을 발광소자와 접목시킨 초소형 단세포 광자결정 레이저와 고효율 LED 등의 예를 본 실험실에서 일어난 일들을 중심으로 하여 다루어 보았다. 전체적으로는 광자결정 구조를 통하여, 자연적인 물질에서는 구현이 불가능하였던 여러 가지의 광학적인 특성을 인위적으로 설계 제작할 수 있다는 가능성이 여러 연구자와 산업계의 흥

미를 끌고 있다고 볼 수 있다. 광자결정 구조를 유기물 디스플레이와 같은 장치에 응용하고자 하는 시도도 꾸준히 추구되고 있으며, 어느 정도의 가능성이 보고되고 있다. 광자결정 구조를 통하여 빛의 제 성질의 통제가 어느 정도 가능할 수 있기 때문에, 특히 발광소자와 광자 결정의 결합은 새로운 광소자를 창출케 할 뿐 아니라, 기존의 발광소자, 조명소자 등 빛을 방출하는 여러 광소자의 성능을 한 단계 올리는 데에도 많은 기여를 할 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] J. D. Joannopoulos, P. R. Villeneuve, and S. Fan, "Photonic crystals: putting a new twist on light," *Nature* 386, 143 (1997).
- [2] Y. H. Lee and H. Y. Ryu, "Custom crystals control photons," *IEEE Circuit and Devices Magazine*, 18, 8 (2002).
- [3] H. Y. Ryu, H. G. Park, and Y. H. Lee, "Two-dimensional photonic crystal semiconductor lasers: Computational design, fabrication, and characterization," *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal on*, 8, 891 (2002)
- [4] 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).
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 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).

저 자 소 개



李用熙

1973-1977 서울대학교 물리학 (B.S.), 1977-1979 한국과학기술원물리학(M.S.), 1982-1986 University of Arizona 광학 (Ph.D.), 1987~1991: AT&T Bell Laboratories(Member of Technical Staff), 1986~1987: University of Arizona(Post Doc.), 1979~1982: 국방과학연구소연구원, 현재: 한국과학기술원 물리학과, 조교수/부교수/교수, 1999년도 국가지정연구실: 수직공진 표면광 레이저(나노레이저) 연구실, 2002년 9월: 대한민국 학술원상(자연과학 부문) 수상