

2차원 광결정 레이저

Two-Dimensional Photonic Crystal Laser

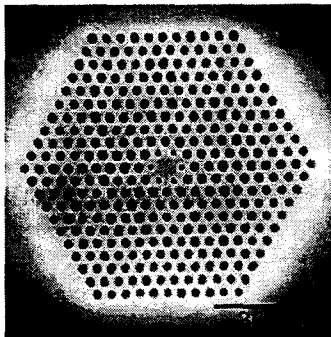
류한열*, 박홍규, 김세현, 이용희

한국과학기술원 물리학과

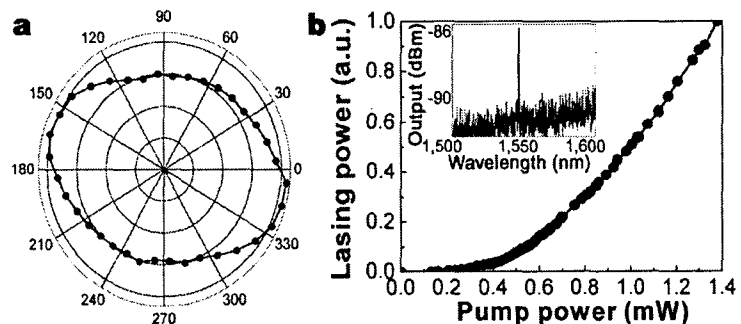
hyryu@mail.kaist.ac.kr

지난 10여년간 광결정 구조에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔고, 이미 광결정 구조의 레이저, 발광다이오드, 도파관 등으로의 응용이 이루어지고 있다. 최근에 몇몇 그룹에서 2차원 광결정 구조에서 레이저 발진 결과를 보고해 왔다. 2차원 광결정 레이저는 기존의 수직공진 표면광 레이저(VCSEL), 분산피트백(DFB) 레이저 등의 2차원적인 형태로서, 새로운 형태의 2차원 레이저의 특성을 보여주고 있다. 2차원 광결정 레이저에서는 레이저의 문턱이 0에 가깝게 낮아질 수 있을 것으로 기대되고 있고, 광결정을 이용한 광전자집적회로(OEIC)에서 중요한 광원의 역할을 할 수 있을 것이라는 가능성으로 많은 관심을 받고 있다. 지금까지 여러 가지 형태의 2차원 광결정 레이저가 발표되었다. 단일셀 광결정 레이저(photonic crystal single-cell laser),⁽¹⁻³⁾ 광결정 디스크 레이저(photonic crystal disk laser),⁽⁴⁾ 광결정 고리형 레이저(photonic crystal ring laser),⁽⁵⁾ 광결정 밴드 에지 레이저(photonic crystal band edge laser)⁽⁶⁻⁸⁾ 등이 그 예로서 각각은 기존의 레이저인 VCSEL, 미세 원반 레이저(microdisk laser), 고리형 레이저(photonic wire laser), DFB 레이저와 관련성이 있다. 본 연구에서는 실제 제작한 단일셀 광결정 레이저, 광결정 링 레이저, 밴드 에지 레이저의 특성을 발표한다.

단일셀 광결정 레이저는 1999년에 Caltech 그룹에서 최초로 발표되었으며,⁽¹⁾ 이후의 광결정 레이저 연구에 큰 영향을 주었다. Caltech 그룹의 단일셀 광결정 레이저는 1.55 μm 부근에서 빛을 내는 InGaAsP 능동 매질을 이용하여 삼각형 격자의 air-bridge 슬랩 구조에서 제작되었으며 쌍극(dipole) 형태의 모드가 이 레이저의 발진 모드였다. 그런데, 이 쌍극모드 레이저는 공진기의 Q가 수백 정도로 상당히 낮고 기본적으로 축퇴되어 있다는 사실 때문에 낮은 문턱의 궁극적인 레이저의 실현에는 한계를 가지고 있었다. 이러한 이유에서 본 연구그룹에서는 삼각형 격자구조에 존재하는 새로운 형태의 모드인 홀극



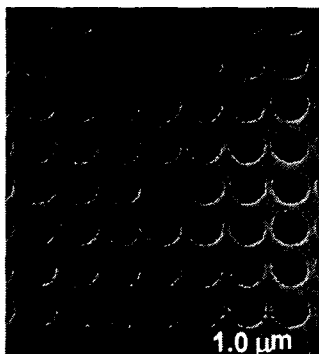
[그림 1] 삼각형 격자 광결정 슬랩 홀극모드 레이저의 전자현미경 사진



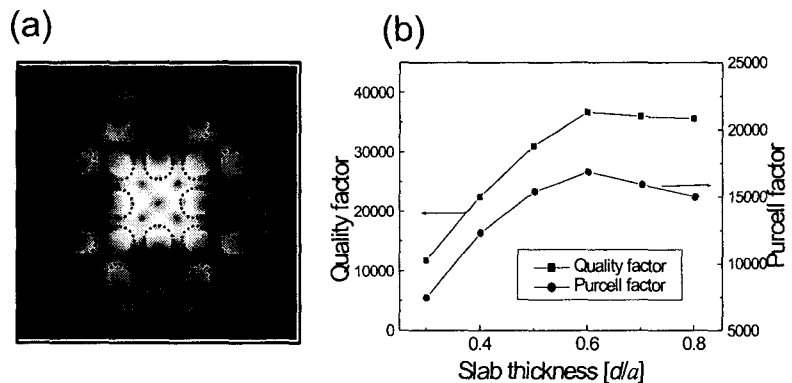
[그림 2] 홀극모드 레이저의 발진 특성 (a) 편광 특성 (b) L-L curve 및 spectrum

(monopole) 모드에 관심을 가졌다. 이 모드는 기본적으로 비축되 되어있어서 빛의 자발방출 계수가 상당히 클 것으로 기대되고, 따라서 문턱을 더 낮출 수 있을 것으로 예상이 된다. 또한, 3차원 시간영역유한차분(FDTD : Finite-difference time-domain) 방법으로 계산한 Q 값이 3000 정도로 기존의 쌍극모드에 비해 상당히 크다는 것도 레이저 발진에 유리한 점이다. 실제로 [그림 1]과 같은 단일셀 광결정 레이저 구조를 제작하여 레이저 발진을 실현하였다.⁽²⁾ 사실, 가운데 단일셀 부근이 완전한 단일셀 공진기 형태에서 변형이 되어 있는데, 이는 홀극모드가 높은 Q 값을 갖도록 최적화를 시도한 결과이다. InP/InGaAsP wafer에 전자선 리소그라피와 건식 식각으로 광결정 패턴을 제작한 후 염산을 이용한 습식 식각으로 InP 층을 선택적으로 식각해 주면 [그림 1]과 같은 air-bridge 형태의 InGaAsP 광결정 슬랩이 완성된다. 레이저의 발진 특성은 980-nm 레이저 다이오드로 상온에서 펌핑하여 조사하였다. Air-bridge구조의 열 전도 특성이 좋지 않아 10ns의 짧은 펄스를 1%의 duty cycle로 펌핑하여 열발생 영향을 줄였다. 측정된 레이저의 L-L curve, 스펙트럼, 편광 특성 등을 [그림 2]에 나타내었다. 레이저의 문턱이 0.5mW 이하로서 기존의 쌍극모드 레이저의 문턱 1.5mW에 비해 세 배 이상 낮은 값을 얻었다. 이는 발표된 단일셀 레이저의 문턱으로는 가장 낮은 값으로서, 쌍극 모드의 높은 Q 값과 비축특성, 그리고 좀 더 늘어난 단일셀의 크기에서 기인한 비발광 결합의 감소 등이 문턱을 낮춘 것으로 판단된다.

단일셀 공진기에 존재하는 공진모드의 광손실은 광결정 슬랩 구조의 아래위쪽으로 주로 일어나기 때문에 광밴드갭의 크기보다는 공진모드의 형태가 모드의 Q에 중요한 영향을 끼치게 된다. 따라서, 광밴드갭이 작은 구조에서도 광손실이 작은 공진모드가 존재할 가능성이 있다. 이런 의미에서, 다른 광결정 형태인 정방형 격자 단일셀 구조를 연구하게 되었다.⁽³⁾ 정방형 격자 단일셀 구조는 [그림 3]에 나타나 있다. 정방형 격자는 한쪽 방향으로 굴절률의 변화가 삼각형 격자보다 더 크므로 모드의 구속력 (confinement)은 더 클 것으로도 예상이 된다. 사실, 정방형 격자는 광밴드갭의 크기가 삼각형 격자에 비해 매우 작아서 이때까지 거의 연구가 이루어지지 않았다. 먼저 정방형 격자 광결정 슬랩에서 단일셀의 모드의 특성을 FDTD 방법으로 조사해 보았다. 두 가지 형태의 모드가 존재하는데, 하나는 이중 축된 쌍극모드(dipole mode)이고 다른 하나는 비축된 사중극모드(quadrupole mode)이다. 사중극모드 형태를 [그림 4]의 (a)에 나타내었다. 모드 분석 결과, 사중극 모드는 모드의 차수가 2인 가장 낮은 차수의 whispering gallery mode 특성을 가지고 있었다. 각각의 모드의 Q를 계산해 본 결과, 홀극모드는 수백 정도로 그다지 크지 않지만, 사중극 모드는 상당히 크다. [그림 4]의 (b)에 계산된 사중극모드의 Q를 슬랩의 두께에 따라 나타내었다. 계산에서 공기 구멍의 반경은 주기의 0.38배, 물질의 굴절률은 3.4로 하였고, 계산 영역은 11×11개의 격자를 포함한다. 슬랩의 두께가 주기의 0.6배 정도일 때 Q가 37000에까지 이른다. 또한, 이 모드의 Purcell 인자는 10000 이상인데, Purcell 인자는 빛의 자발 방출율이 증가하는 정도로서 공진기 양자전자학에서 큰 의미를 가지는 값이다. 이와 같은 Q와 Purcell 값들은 이때까지



[그림 3] 사각형 격자 광결정 단일셀 레이저의 전자현미경 사진

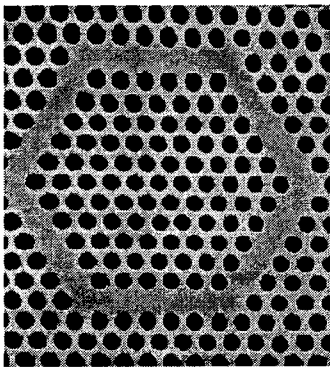


[그림 4] 사각형 격자 단일셀의 whispering gallery mode 특성 (a) 모드 패턴 (b) 슬랩 두께에 따른 Q 값 및 Purcell 인자

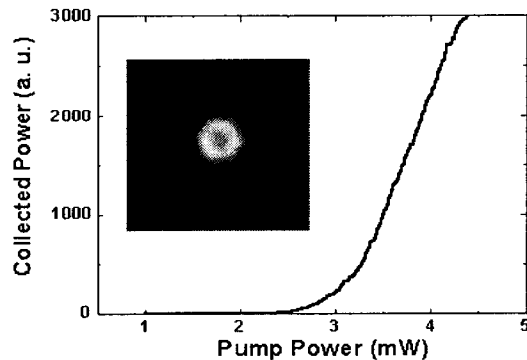
발표된 단일셀 광결정 공진 모드의 값으로서는 가장 큰 값이다. 실제로 정방형 광결정 단일셀 구조를 제작하여 광펌핑 실험을 하였다. 제작방법과 펌핑 조건은 앞의 삼각형 격자 구조의 홀극 모드の場合와 같다. 홀극모드와 사중극모드 모두 레이저 발진이 이루어졌고, whispering gallery 모드의 경우 문턱이 0.8mW 정도이다. 실험으로 측정된 모드의 Q는 2000 정도인데, 이는 사용한 spectrometer의 분해능 한계에 의해 제한된 값이다.

다음으로 소개할 2차원 광결정 레이저는 고리형 공진기 레이저인데,⁽⁵⁾ 역시 air-bridge 슬랩 형태로 제작되었다. [그림 5]에 있는 전자현미경 사진에서 알 수 있듯이 이 공진기 구조는 삼각형 격자에서 6각형의 고리 모양으로 형성되어 있다. 이 공진기는 6개의 광결정 도파로를 연결한 형태로 해석할 수 있으며, 능동 구조이므로 외부 광원으로부터 빛을 넣어줄 필요가 없어서 광결정 도파로에서 발생하는 광손실에 대한 정보를 얻을 수 있게 된다. 또한, 이 공진기와 광결정 도파로와의 광결합이 상당히 효율적으로 이루어질 수 있을 것으로 기대된다. 그리고, 기본적으로 광결정 슬랩 도파로에서 손실없이 전파되는 도파 모드가 공진 모드로 형성될 것으로 공진기의 광손실도 상당히 적을 것으로 예상된다. [그림 6]에 측정 결과를 나타내었다. 1620nm의 파장에서 발진하는 레이저이고 대략 3mW 정도의 문턱 펌핑 파워를 보인다. 적외선 camera로 관찰한 레이저광의 패턴을 보면 고리형 공진기에서 발진하는 것을 알 수 있다. 공진 모드의 Q 값 측정을 통해 광손실을 대략 60cm^{-1} 정도로 계산하였는데, 이 값은 기존의 결과와 비슷한 정도이다.

마지막으로 소개할 레이저는 2차원 광결정 밴드 에지 레이저이다. 광결정 밴드 에지 레이저는 이 레이저의 1차원적인 예인 DFB 레이저에서도 볼 수 있듯이 공진기 구조가 없는 주기적인 격자 구조로 형성되어 있다. 이러한 종류의 레이저는 광밴드의 가장자리 에지에서 빛의 군속도 감소에 근거하여 동작한다. 군속도의 감소는 광자의 상태밀도(density of state)가 증가하는 것을 의미하고 또한 유효 이득(gain)이 증가하는 것을 의미하므로 광손실이 충분히 작다면 레이저 발진이 가능하게 된다. 지금까지 발표된 광밴드 에지 레이저는 유효 굴절률의 변화가 0.1 정도로 작아서 레이저 구조의 면적이 $(100\mu\text{m})^2$ 이상으로 상당히 컸다.^(6,7) 따라서, 고출력 레이저로서의 가능성은 있으나 레이저의 문턱은 상당히 높았다. 본 연구에서는 광밴드 에지 레이저를 air-bridge slab 형태로 제작하여 굴절률의 변화가 2 이상이 되도록 상당히 높였고, 따라서 강한 유효 이득 증가 효과를 얻을 수 있어서 문턱이 낮을 것으로 예상된다. 앞에서 언급한 것과 동일한 방법으로 레이저 구조를 제작하였고, 제작한 구조의 전자 현미경 사진을 [그림 7]에 나타내었다. 이 레이저의 특성은 80K의 저온에서 관찰하였다. 상온에서는 레이저 발진이 이루어지지 않았는데, 그 이유로는 저온에서는 능동 매질의 이득이 증가하고 표면 비발광 효과가 크게 감소하기 때문으로 생각된다. 400nm에서 1200nm까지 다양한 격자 상수에서 레이저 발진이 관찰되었고, 각

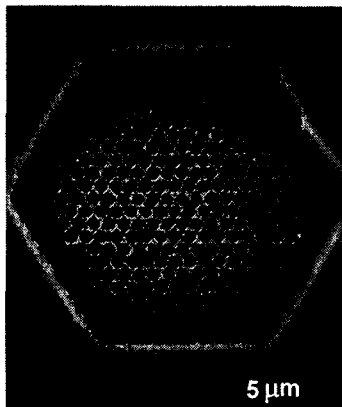


[그림 5] 광결정 슬랩 고리형 공진기 레이저의 전자현미경 사진

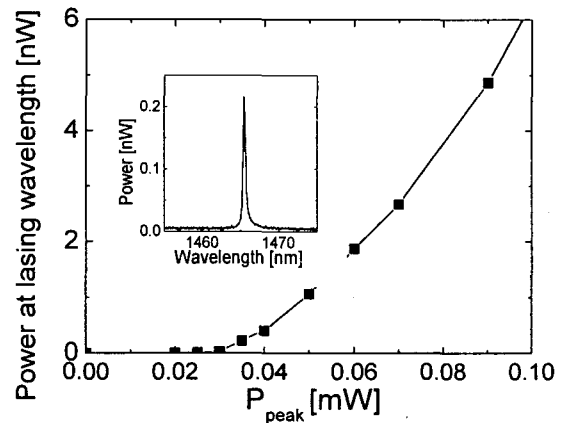


[그림 6] 광결정 고리형 레이저의 L-L curve 및 mode pattern image

레이저의 발진 파장은 밴드 구조의 에지부분에 해당한다. 가장 낮은 문턱값을 보이는 밴드 에지 레이저의 특성을 [그림 8]에 나타내었다. 이 레이저는 [그림 7]에 보인 것과 동일한 구조로서 격자 상수는 1000 nm이고 반경은 격자 상수의 0.35배이다. [그림 8]의 L-L curve를 보면 문턱이 대략 35 μ W이다. 양자 우물 능동 매질에 흡수된 문턱 펌프 파워 밀도는 대략 25W/cm²이다. 이 정도의 문턱값은 이 온도에서 이때 까지 보고된 반도체 레이저의 문턱으로서 가장 낮은 값 중의 하나이다. 이와 같이 낮은 문턱이 얻어진 이유는 밴드 에지에서 광손실이 매우 작고, 저온에서 운반자의 비발광 결합이 크게 줄어든 것에 기인한다고 생각되며, 본 연구에서 실현한 광결정 밴드 에지 레이저는 새로운 형태의 마이크로 레이저로서 매우 낮은 문턱의 레이저로 동작할 강한 잠재력을 가지고 있다.



[그림 7] 광결정 슬랩 밴드 에지 레이저의 전자현미경 사진



[그림 8] 광결정 슬랩 밴드 에지 레이저의 L-L curve 및 0.035mW의 펌프 파워에서 스펙트럼

[참고 문헌]

1. O. Painter, R. Lee, A. Scherer, A. Yariv, J. O'Brien, P. Dapkus, and I. Kim, Science 284, 1819 (1999).
2. H. G. Park, J. K. Hwang, J. Huh, H. Y. Ryu, Y. H. Lee, and J. S. Kim, Appl. Phys. Lett. 79, 3032 (2001).
3. H. Y. Ryu, S. H. Kim, H. G. Park, J. K. Hwang, J. S. Kim, and Y. H. Lee, LEOS 2001, MJ4 (2001).
4. 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, Appl. Phys. Lett. 76, 2982 (2000).
5. S. H. Kim, H. Y. Ryu, H. G. Park, Y. S. Choi, K. H. Kim, Y. H. Lee, and J. S. Kim, Photonics Conference 2001, Korea, T3C5 (2001).
6. M. Meier, A. Mekis, A. Dodabalapur, A. Timko, R. E. Slusher, J. D. Joannopoulos, and O. Nalamasu, Appl. Phys. Lett. 74, 7 (1999).
7. S. Noda, M. Yokoyama, M. Imada, A. Chutinan, and M. Mochizuki, Science 293, 1123 (2001).
8. H. Y. Ryu, S. H. Kwon, Y. J. Lee, Y. H. Lee, and J. S. Kim, Appl. Phys. Lett. (submitted).