

## 이차원 광결정 박막의 절개면에서의 측면 모드 발진

## Lasing From Slab Edge Mode of Free-standing

## Two-dimensional Photonic Crystals

양진규, 김국현, 김세헌, 이용희

한국과학기술원

jin9ya@mail.kaist.ac.kr

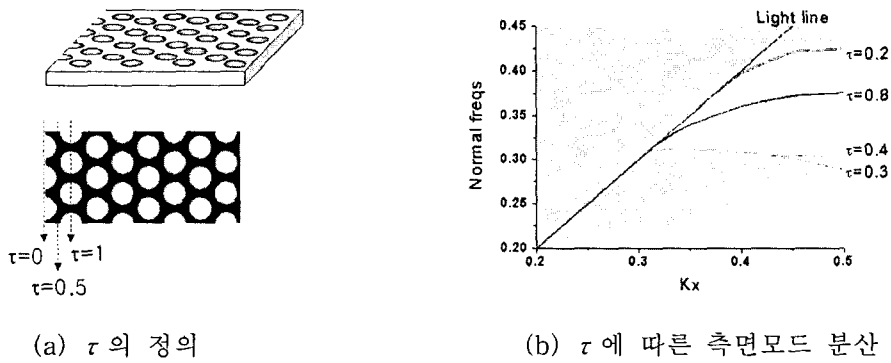
주기적인 유전율의 변화를 가지는 광결정에 대한 연구가 최근 10여년간 활발하게 이루어지고 있다. 광결정에 존재하는 특성인 광 밴드갭(photonic bandgap) 효과를 이용한 단일 결함 구조의 레이저나 선 결함의 도파로에 응용성이 활발하게 이루어지는 가운데 새로운 시도로 표면파(surface wave)를 이용한 광결정의 응용성을 고찰해 보았다. 주기적으로 층이 진 물질과 균일한 물질의 경계면에서 전자기파가 구속 될 수 있다는 것이 보고된 바 있다<sup>(1)</sup>. 광결정의 주기적인 부분이 끝나는 부분에서도 역시 표면파가 존재<sup>(2)</sup>할 수 있는데 전자기장의 구속은 굴절율의 차이에 의한 전반사 효과와 광결정에 의한 광 밴드갭 효과에 기인한다. 우리는 이차원 광결정 박막 구조에서 박막이 끝나는 절단면에서의 레이저 발진을 통해 최초로 광결정 박막에서의 표면 모드를 확인하였다.

먼저 박막이 잘린 형태를 표시하는 변수  $\tau$ 를 도입하여 이차원 광결정 박막의 절개면에서의 측면모드를 분석하기로 한다. 그림 1-(a)은 삼각형 공기 구멍의 광결정 박막에서  $\Gamma-K$  방향으로 절단되었을 경우에  $\tau$ 에 대한 설명이다. 그림 1-(b)에는 평면파 전개법을 이용하여 투영 밴드 구조(projected band structure)에서  $\tau$ 에 따른 측면 모드의 분산 곡선을 나타내었다. 회색 영역은 빛이 투과하는 부분이고, 흰색 지역은 빛이 존재할 수 없는 영역이다. 그림에서 보듯이, 광결정 박막의 측면 모드가 투영 밴드 구조에서 광 밴드갭 내에 존재하는데 특히  $\tau$ 가 0.8 근처인 경우에 넓은 파수 영역대에서 광 밴드갭의 가운데 부분에 존재한다. 따라서 이 값을 가지는 구조에서의 광결정 박막 측면모드가 보다 크게 밴드갭 효과를 느낄 것으로 추측된다. 광결정 박막의 측면모드를 시간의 영역에서 분석하기 위해 3차원 시간영역 차분법(FDTD)을 이용한 모의실험이 수행되었다. 유한한 크기의 계산 영역에서 사각형 박막 절단 형태와 육각형 박막 절단 형태의 경우에 대해  $\tau$ 를 변화시켜가며 실험한 결과 0에서 0.8로 변할 경우 2~3배 정도의 품위값(Q value)이 증가되는 것을 보았다. 이 결과는 평면파 전개법의 결과와도 일치한다.

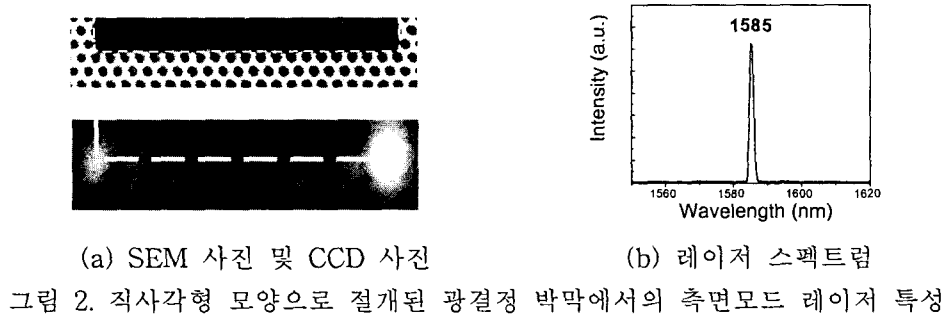
1.5  $\mu\text{m}$ 의 파장을 방출하는 InGaAsP 양자 우물 구조의 능동매질을 이용하여 시료를 제작하였다. 이차원 광결정 박막의 제작에는 전자선 리소그래피, 이온 빔 식각, 그리고 묽힌 염산 용액을 이용한 습식 식각이 사용되었다<sup>(3)</sup>. 제작된 시료의 박막 두께는 200nm로 기본 모드만이 존재하도록 하였다<sup>(4)</sup>. 제작된 시료는 상온에서 990nm의 파장을 내는 레이저 다이오드를 이용하여 펄스 형태의 광펄핑을 하였다. 특별히 박막의 열 효과를 고려하여 1% 정도의 주기로 광펄핑 하였다. 1477nm에서 1589nm까지 넓은 파장 영역에서 다양한 형태의 레이저 발진이 관찰되었다. 그림 2-(a)는 직각형 모양으로 절개된 광결정 박막 시료의 전자 현미경 사진이다. 주기는 544nm이고 공기 구멍의 반경은 주기의 0.35배 정도이며  $\tau$ 는 0.8 정도이다. 이 경우에 레이저 발진 파장은 1585nm로 표준화된 파장(Normalized frequency)으로는  $0.34 \omega a/2\pi c$ 에 해당한다. 이 값은 계산 결과와 비교해 볼 때 오차범위 내의 값이다. 그림 2-(b)는 레이저

발진 시 CCD 사진이다. 흰 점선은 박막의 절단 부분을 의미한다. 레이저 빛이 측면 모드가 진행을 멈추는 부분인 박막 절단이 꺾이는 부분에서 강하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그림 3-(a)는 육각형 모양의 광결정 박막 절개 형태의 시료에 대한 전자 현미경 사진이다. 주기는 525nm, 공기 구멍의 반경은 주기의 0.37배 정도이며  $\tau$ 는 0.78 정도이다. 이 시료의 경우 레이저 발진 파장은 1500.3nm로 표준화된 파장으로 환산하면  $0.34 \omega a/2\pi c$ 인데 이 값을 계산 결과와 비교해 볼 때 오차 범위 내에서 이론값과 일치한다. 그림 3-(b)는 레이저 발진 시 CCD 사진이다. 레이저 빛이 육각형 절개면의 구석에서 밝게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이것은 광결정 박막의 측면모드가 절개면을 따라 진행을 하다가 더 이상 진행하지 못하는 구석에서 산란되는 것으로 추측된다. 이상에서 우리는 광결정 박막 구조의 절개면에서의 측면모드의 존재를 레이저 발진을 통해 알아보았다.

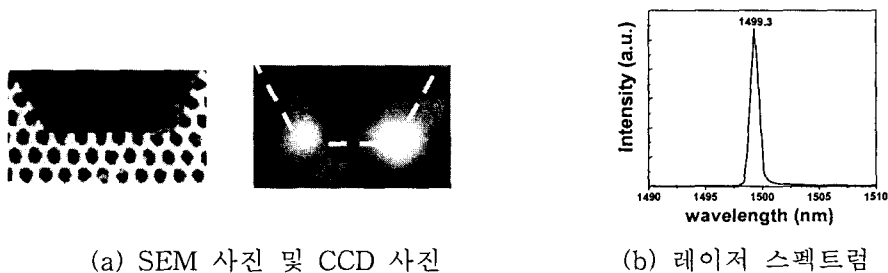
1. D. Kossel, *J. Opt. Soc. Am.* **56**, 1434 (1969).
2. R. D. Meade, *et al. Phys. Rev. E* **44**, 10961 (1991).
3. H. Y. Ryu, *et al. IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, **8**, 891 (2002).
4. H. Y. Ryu, *et al. J. Appl. Phys.* **88**, 4941 (2000).



(a)  $\tau$ 의 정의 (b)  $\tau$ 에 따른 측면모드 분산  
그림 1. 평면파 전개법에 의한 모의 실험 결과



(a) SEM 사진 및 CCD 사진 (b) 레이저 스펙트럼  
그림 2. 직사각형 모양으로 절개된 광결정 박막에서의 측면모드 레이저 특성



(a) SEM 사진 및 CCD 사진 (b) 레이저 스펙트럼  
그림 3. 육각형 모양으로 절개된 광결정 박막에서의 측면모드 레이저 특성