# 2차원 광결정 슬랩 구조에서 광모드 특성

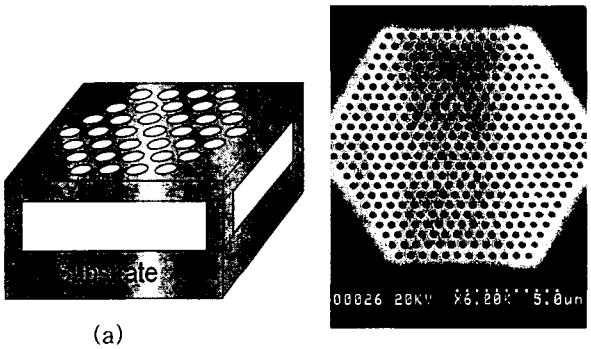
# Optical Mode Properties of the 2-D Photonic Crystal Slab

류한열, 황정기, 이용희
한국과학기술원 물리학과
rhy@cais.kaist.ac.kr

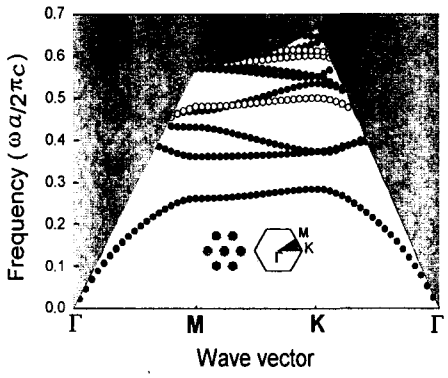
광결정(photonic crystal)은 빛의 파장 크기 정도의 격자 상수를 지닌 1차원, 2차원, 또는 3차원의 주기적인 구조이다. 광결정에는 광밴드갭(photonic bandgap)이라는 빛의 자발 방출이 억제된 진동수의 영역이 존재하는데, 이 영역을 이용하여 빛의 자발 방출을 조절하고 빛의 흐름을 제어할 수 있다.[1]

지난 10여년간 2차원, 3차원의 광결정 구조에 대한 연구가 많이 이루어져 왔는데, 최근에는 슬랩 도파관(slab waveguide)에 2차원 광결정을 만든 구조에 대한 연구가 활발하게 진행중이다. 이 구조는 평면 방향으로는 광밴드갭 효과로 광모드를 가둘 수 있고 수직 방향으로는 전반사를 이용하여 모드를 가둘 수 있어서 3차원적인 모드 confinement 효과를 얻을 수 있다. [그림 1]의 (a)에 air-bridge 형태의 2차원 광결정 슬랩(photonic crystal slab) 구조를 도식적으로 나타내었고, (b)에는 본 연구실에서 제작한 구조 표면의 scanning electron micrograph을 나타내었다. 현재 몇몇 연구 그룹에서 이와 같은 광결정 슬랩 구조를 이용한 반도체 레이저를 실현하는데 성공하였다.[2,3]

본 연구에서는 2차원 광결정 슬랩 구조에서의 광밴드갭과 공진 모드에 대한 이론적인 분석을 하고자 한다. 수직 방향으로 무한한 2차원 광결정 구조와는 달리 2차원 광결정 슬랩 구조는 유한한 두께를 가지고 있으므로 3차원적인 분석을 수행하여야 한다. 광결정 슬랩에서의 광밴드 특성을 조사하기 위해서 conjugate gradient minimization을 이용한 평면파 전개(plane-wave expansion) 방법을 이용하였다. 그리고, 광결정 슬랩 공진기 구조에서 resonant frequency, Q-factor 등을 계산하기 위해 FDTD(Finite Difference Time Domain) 방법을 이용하였다.




[그림 1] 2D photonic crystal slab.
(a) Schematic diagram
(b) SEM of a fabricated structure



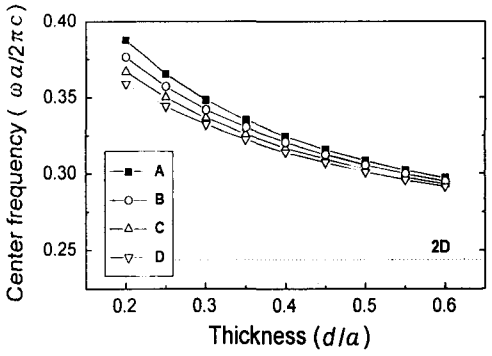

[그림 2] Photonic band structure for TE-like modes of a 2D photonic crystal slab.

2차원 광결정 슬랩에서 TE-like 모드에 대한 광밴드 구조를 [그림 2]에 나타내었다. 광결정 구조는 공기 구멍이 삼각형 격자로 배열되어 있는 형태이다. 이 계산에서 슬랩 두께는 0.4$a$, 공기 구멍 반경은 0.3$a$, 굴절률은 3.4로 하였다.($a$는 격자 상수) y축은 진공에서 빛의 파장에 대한 격자 상수의 비를 나타낸다. 그 비가 대략 0.29와 0.36 사이에서 TE-like 모드에 대한 광밴드갭이 존재함을 볼 수 있다. 위쪽에 open circle로 나타낸 밴드는 1차 도파 모드로서 슬랩 중심에 대해 반대칭적인 모드 분포를 가진다.

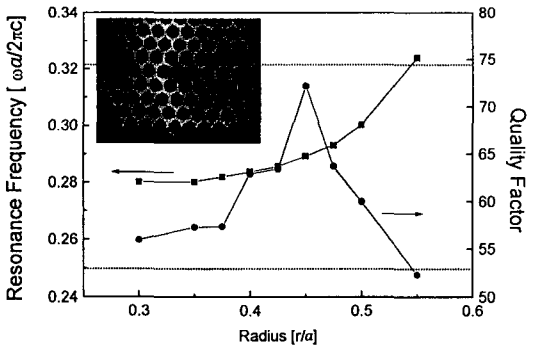
이러한 슬랩 구조로 광소자를 제작할 때에는 열특성과 구조적 안정성을 개선하기 위해 AlO나 $SiO_2$와 같은 산화물(oxide)을 슬랩 cladding으로 사용하기도 한다. 이러한 슬랩 *cladding*의 영향을 분석하기 위해 네 가지 다른 cladding의 경우에서 두께에 따른 밴드갭 중심 파장의 변화를 계산하였다. [그림 3]의 A는 양쪽이 모두 공기인 경우, B와 C는 각각 한쪽, 또는 양쪽이 oxide인 경우, D는 슬랩 아래쪽이 etching 되지 않은 oxide plate인 경우이다. 모든 경우에 있어서 밴드갭 중심 파장은 별로 변화가 없다. 즉, oxide의 굴절률(1.5)은 슬랩의 굴절률(3.4)에 비해서 매우 작아서 air-bridge 형태의 광결정 스랩에서와 비슷한 결과를 준다는 것을 알 수 있다.

광결정 슬랩에서 가운데 하나의 공기 구멍을 막아서 *single cell* 공진기 구조를 만든 경우, 그 구조에서의 공진 모드와 각 모드의 Q-factor를 FDTD 방법으로 계산하였다.[그림 4] 이 때, 슬랩의 두께는 0.73$a$, 반경은 0.3$a$이고 슬랩 아래쪽에는 굴절률 1.5인 oxide가 있다고 가정하였다. 공진 모드의 진동수를 조절하기 위해 single cell 공진기에 바로 이웃한 두 공기 구멍의 반경을 바꾸어가면서 공진 진동수와 Q-factor를 계산하였다. 그림에서 점선 사이가 광밴드갭에 해당한다. 공진 모드가 밴드갭의 가운데에 있을 때에 Q가 가장 커지는 것을 볼 수 있다.

이상, 평면파 전개법과 FDTD 방법으로 2차원 광결정 슬랩 구조의 광모드 특성을 조사해 보았다. 이 계산 결과를 실제 실험에 이용하여 다양한 형태의 2차원 광결정 광소자를 디자인 할 수 있을 것이다.




[그림 3] Variation of the band gap center frequency with slab thickness for several slab cladding structures




[그림 4] Resonant frequency and Q-factor versus the radius of the nearest air holes of a single cell cavity

[참고 문헌]

[1] J. D. Joannopoulos, P. R. Villeneuve, and S. Fan, Nature 386, 143 (1997).

[2] O. Painter, R. Lee, A. Scherer, A. Yariv, J. O'Brien, P. Dapkus, and I. Kim, Science 284, 1819 (1999).

[3] J. K. Hwang, H. Y. Ryu, D. S. Song, I. Y. Han, H. W. Song, H. G. Park, Y. H. Lee, and D. H. Jang, LEOS'99, WD2, San Francisco.