

2차원 준광결정 결함의 공진 모드 분석

Analyses for resonant modes of two dimensional photonic quasi-crystals

이지혜, 김선경, 김세현, 이용희

한국과학기술원 물리학과

xellos@kaist.ac.kr

광결정의 결함을 이용한 레이저는 낮은 발진 문턱값과 작은 모드 부피로 인해 많은 부분이 연구되어왔다⁽¹⁾. 광결정의 구조적 특성에서 나타나는 띠틈(band gap) 현상이 그 원인인데, 완벽하게 규칙적인 구조를 갖지 않은 준광결정(photonic quasi-crystal)에 결함을 도입했을 때에도 공진 모드가 발견된 보고가 있다⁽²⁾.

준광결정은 일반적인 광결정의 정의에 입각해서 볼 때 병진대칭성(translational symmetry)이 성립하지 않으므로 브릴로앙 영역(Brillouin zone)을 정의할 수 없다. 그러나 회전대칭성(rotational symmetry)과 준병진대칭성을 가진 준광결정의 경우 역격자(reciprocal lattice)에서 에발드 구(Ewald sphere)를 정의할 수 있고, 회절 조건을 예측할 수 있다. 준광결정은 공진모드가 속박되는 정도가 광결정보다 작기 때문에 도파로를 제작할 경우에 구부러짐 손실이 작다⁽³⁾. 또한 높은 회전대칭성을 갖는 준광결정의 경우 역격자 공간에서의 대칭성으로 인해 빛의 회절 방향에 대해 영향을 적게 받기 때문에, 주로 단일 경로를 겪으면서 외부로 빛이 방출되어 LED로의 가능성이 연구되고 있다⁽⁴⁾.

병진대칭성이 성립하지 않기 때문에 띠틈을 정의할 수 없지만 굴절률 차이가 클 경우 투과율이 0에 가까운 주파수 범위가 존재하며 결함을 생성시켰을 경우에 FDTD로 계산한 공진 주파수가 그 범위에 속하는 것을 관찰할 수 있었다. 일반적인 광결정 공진기의 경우와 마찬가지로 결정을 구성하는 구조적 인자들을 바꾸면서, 공진 모드의 주파수와 품위값(quality factor)을 조절할 수 있었다. FDTD 계산 결과 준광결정 단일 결함 구조(H1 공진기)에서는 홀극(monopole) 모드, 육중극(hexapole) 모드, 사중극(quadrupole) 모드, 이중극(dipole) 모드가 나타났다. 단일 결함의 경우, 준광결정 결함 주위의 첫 번째 층이 여섯 방향의 회전 대칭성을 가지고 있기 때문에 광결정 삼각 격자(triangular lattice)와 유사한 공진 모드를 찾을 수 있었다. 그 중 속삭이는 회랑 모드(whispering gallery mode) 형태를 가지며, 전기장의 대부분이 유전체 부분에 집중되어 있는 육중극 모드에 대해서 논의하도록 하겠다.

여기서 연구한 준광결정은 2차원 박막 가운데 구멍을 중심으로 12방향으로 준회전 대칭성을 가지는 구조이며, 구멍 사이의 간격은 모두 동일하다. 구멍 하나를 제거함으로써, 공진기를 형성하였으며 구멍에서 가장 가까운 6개의 구멍의 반지름을 변화시켰다. 격자의 크기가 a 일 때, 육중극 모드에 대해 구멍의 크기는 $0.25a$ 이며 결함에서 가장 가까운 구멍의 크기는 $0.36a$ 일 때, 품위값은 약 3000이었다.

그림 1은 FDTD로 그린 구조를 푸리에 변환해서 얻은 역격자 구조이다. 가운데 점을 중심으로 12개의 점들이 고리형으로 배치된 모습을 볼 수 있다. 이런 고리형 역격자의 경우 빛의 입사각이 Bragg 회절에 영향을 주는 정도가 작아지므로 빛의 입력방향에 따른 차이를 줄일 수 있고, 위에서 언급한 단일 회절 방출 효과가 나타난다.

그림 2, 그림 3은 FDTD를 이용해서 육중극 모드를 계산한 모습이다. 결합을 중심으로 가장 가까운 구멍에 대해 돌아가면서 자기장의 부호가 바뀌는 속삭이는 회랑 모드의 형태를 지니며, 전기장의 세기가 가장 큰 곳이 굴절률이 큰 부분에 걸쳐져 있기 때문에 레이저를 제작하는 데 있어 이득을 얻기에 유리하다. 자기장을 좀더 자세히 살펴보면, 자기장이 결합에서 두 번째로 가까운 구멍들에도 분포되어 있기 때문에 이 구멍들의 반지름이나 위치 또한 모드에 영향을 주리라고 예측할 수 있으며, 일반적인 광결정에 비해 평면 방향으로 모드가 넓게 분포함을 알 수 있다. 이는 준광결정의 경우, 거울을 형성하기 위해서는 더 많은 층이 필요하다는 것을 의미한다.

그림 4는 전자빔 리소그래피를 이용해서 제작한 박막의 전자현미경 사진이다. 이득 매질은 다중 InGaAsP 양자우물 구조이며, 굴절률은 3.4이고, 박막의 두께는 300 nm이다. 그림에서 격자의 크기는 500 nm이고, 구멍의 크기는 0.35a이다.

이번 발표에서는 지금까지 언급한 단일 결합에 대한 전산 모사 결과 외에 단일 결합에서 한 층을 더 제거한 H7 공진기의 결과들을 보고할 것이다. H7 공진기의 경우, 12방향 회전 대칭성에 더 가까워지기 때문에, 준광결정의 성질을 더 자세히 볼 수 있으리라 생각된다. 또한, 실제로 전자빔 리소그래피를 이용해 제작한 실험 결과들을 보고할 것이다.

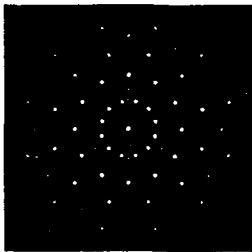


그림 1

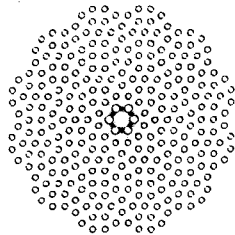


그림 2



그림 3

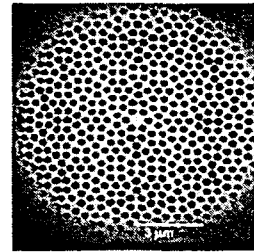


그림 4

1. H. G. Park, J. K. Hwang, J. Huh, H. Y. Ryu, Y. H. Lee and J. S. Kim, *Appl. Phys. Lett.* 79, 3032 (2001).
2. Y. S. Chan, C. T. Chan and Z. Y. Liu, *Phys. Rev. Lett.* 80, 956 (1998)
3. Samuel S. M. Cheng et al., *Phys. Rev. B.* 59, 4091 (1999)
4. M. Rattier et al., *Appl. Phys. Lett.* 83, 1283 (2003)