

2차원 단일 셀 광결정 슬랩에서 홀극 모드의 Q값에 관한 연구

Quality factor for Monopole Mode in a Single Cell

Two-dimensional Photonic Crystal Slab Cavity

허 준, 황정기*, 류한열*, 박홍규*, 이용희*

국방과학연구소, *한국과학기술원 물리학과

jinhuh@sunam.kreonet.re.kr

광결정(photonic crystal)은 서로 다른 유전체가 규칙적으로 배열되어 있는 구조로서, 빛이 진행할 수 없는 진동수 영역인 광밴드갭(photonic bandgap)이 존재한다. 광밴드갭 특성으로 부터 빛의 자발 방출⁽¹⁾과 진행 방향이 조절될 수 있기 때문에, 광결정은 나노 레이저, 광도파관, LED(Light Emitting Diode) 등의 광소자 개발에 응용되고 있다. 지금까지 2차원, 3차원의 광결정에 대한 많은 연구가 수행되어 왔으며, 현재에는 2차원의 슬랩(slab) 구조에 대해 활발하게 연구되고 있다. 이 구조에서는 수직 방향으로의 전반사를 이용하고, 수평 방향으로의 공기 기둥의 격자 배열에 의한 광밴드갭을 이용하여 모드를 3차원적으로 가둘 수 있다. 공기 기둥을 많이 배열시키면 수평 방향의 빛은 거의 반사되지만 수직 방향으로 빛이 슬랩 외부로 빠져나가는 diffraction 손실이 발생된다. 따라서 광결정 슬랩 공진기가 높은 Q값(quality factor)을 갖기 위해선 이러한 손실을 감소시켜야 한다.

나노 레이저 연구에 적용되는 2차원 광결정 슬랩 공진기 구조는 cladding 조건에 따라 크게 2가지 방식이 이용되고 있다. 하나는 굴절율이 3.4인 core의 위 아래 cladding이 모두 공기인 형태⁽²⁾이고 다른 하나는 위쪽 cladding은 공기, 아래쪽은 낮은 굴절율의 Al_2O_3 또는 SiO_2 를 사용하는 형태⁽³⁾이다. 전자는 core와 cladding 사이의 높은 굴절율 차이 때문에 diffraction 손실이 적지만 제작하기 어렵고, 또한 열전도성이 낮다는 단점이 있다. 반면에 낮은 굴절율의 cladding은 열적, 구조적 특성이 우수할 뿐만 아니라 전기 펌핑에도 유리하기 때문에 이 구조에 대한 관심이 높아지고 있다. 최근에 아래쪽 cladding이 낮은 굴절율일 때 단일 셀 공진기에서 축퇴된 모드의 Q값이 분석⁽⁴⁾된 바 있다. 이처럼 파장 크기의 단일 셀 광결정 슬랩 공진기는 레이저의 문턱⁽⁵⁾을 크게 낮출 수 있기 때문에, 광통신에 적합한 고속 변조 능력이 만족될 수 있다. 본 연구에서는 2차원 광결정 슬랩에서 cladding의 굴절율 및 형태에 따라 비축퇴된 홀극(monopole) 모드를 중심으로 모드의 Q값을 분석하였다.

본 분석에 적용된 광결정 구조는 수평 방향으로 공기 기둥이 삼각형 격자 형태로 배열되어 있고, 위 아래 cladding의 굴절율이 변화하는 반파장 정도 두께의 2차원 광결정 슬랩으로서 중앙에 한 개의 공기 기둥을 제거시킨 단일 셀 공진기이다. 광결정 공진기에서 공진 모드와 Q값을 분석하기 위하여 FDTD(Finite Difference Time Domain) 방법을 사용하였으며, 경계 조건으로는 PML(Perfectly Matched Layer)를 적용하였다. 공기 기둥의 반경을 $0.35a$, 단일 셀에 이웃한 기둥 반경 r' 을 $0.25a$, 슬랩의 두께를 $0.4a$ 로 놓고 cladding의 굴절율 n_c 을 변화시키면서 홀극 모드의 Q값을 계산한 결과가 (그림 1)과 같다. 굴절율이 증가할 때 수직 방향의 Q값은 지수적으로 감소하고 있다. 따라서 core와 cladding 사이의 굴절율 차이가 작을수록 diffraction 손실이 크다는 사실을 알 수 있다. 이와 같은 결과로부터 모드 에너지 손실을 줄이는 방안으로는 위쪽 cladding을 공기로 유지시키고 아래쪽을 낮은 굴절율의 cladding을 사용하는 비대칭적인 광결정 구조를 살펴보았다. 이때 아래쪽 cladding의 유효 굴절율 효과를 분석하기 위하여

여 공기 기둥의 깊이를 변화시켰다. (그림 2)에서 보는 바와 같이 공기 기둥의 깊이가 증가할수록 Q값이 증가하고 있으며, 약 700의 수직방향 Q값을 얻을 수 있었다. 단일셀에서 공진 모드가 레이저로 동작되기 위해선 보다 높은 Q값이 요구되며, 이에 대한 연구가 진행중에 있다.

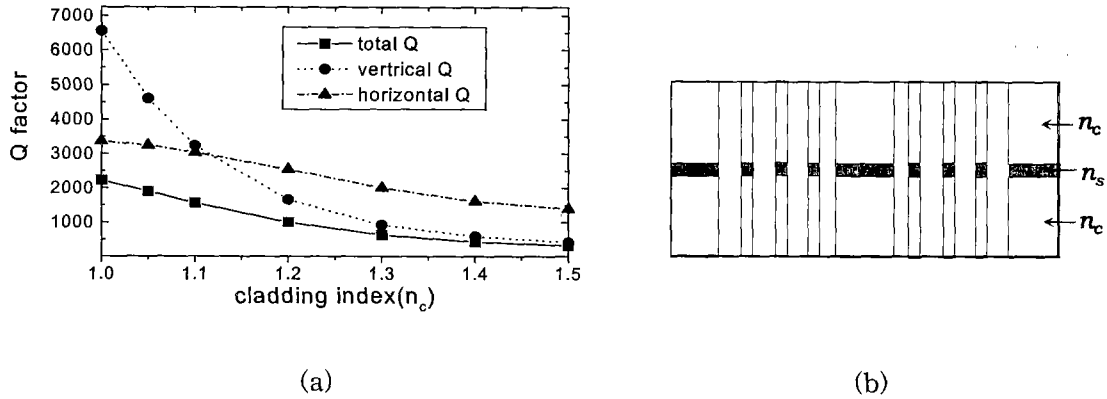


그림 1. (a) 공기기둥의 반경이 $0.35a$ 이고 셀에 가장 이웃한 기둥 반경이 $0.25a$ 일때 단일 셀 삼각형 광결정 슬랩 공진기에서 cladding의 굴절율(n_c) 변화에 따른 홀극 모드의 Q값. 여기서 n_s 는 core의 굴절율이다. (b) (a)에 대한 계산 영역의 광결정 단면도

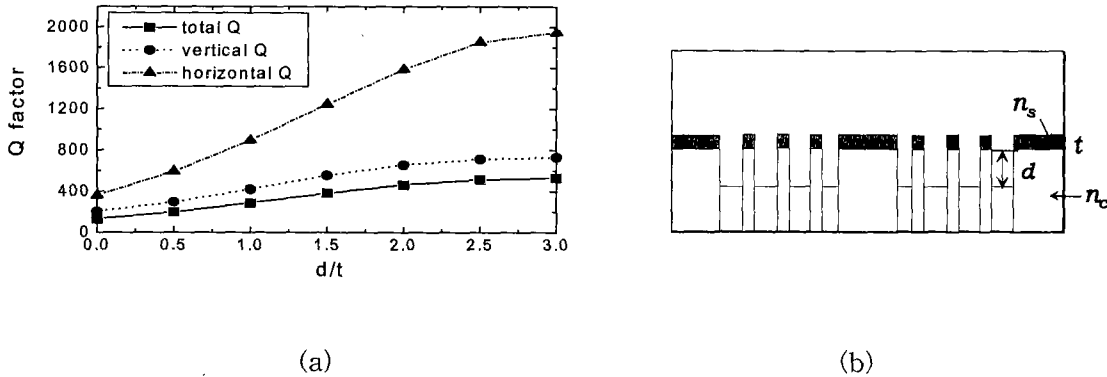


그림 2. (a) 공기기둥의 반경이 $0.35a$ 이고 셀에 가장 이웃한 기둥 반경이 $0.25a$ 일때 단일 셀 삼각형 광결정 슬랩 공진기에서 cladding의 공기기둥 깊이(d)에 따른 홀극 모드의 Q값. 여기서 t 슬랩의 두께이다. (b) (a)에 대한 계산 영역의 광결정 단면도

[참고 문헌]

[1] J. K. Hwang, H. Y. Ryu, and Y. H. Lee, Phys. Rev. B 60, 4688~4695(1999)
 [2] O. Painter, R. K. Lee, A. Scherer, A. Yariv, J. D. O'Brien, P. D. Dapkus, and I. Kim, Science 284, 1819~1821(1999)
 [3] J. K. Hwang, H. Y. Ryu, D. S. Song, I. Y. Han, H. K. Park, D. H. Jang, and Y. H. Lee, IEEE Photon. Tech, Lett. 12, 1295~1297(2000)
 [4] E. Miyai and K. Sakoda, Optics Letters, 26, 740~742(2001)
 [5] T. Baba, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron, 3, 808~830(1997)

