이차원 광 결정 박막에서 식각 기울기에 따른 공진기 Q값의 변화

김명기, 황인각, 양진규, 이용희
한국과학기술원 물리학과
kmk1852@kaist.ac.kr

이차원 광 결정 박막은 일반적으로 광 밴드갭 효과를 얻기 위해 높은 굴절률을 가지는 반도체 물질에 공기구멍을 뚫어서 제작한다. 즉, 이차원 광 결정 박막을 제작하기 위해서는 반드시 식각작업을 사용하게 된다. 이상적으로 90°의 식각 기울기(그림 1-a)로 제작이 가능하다면 우리가 이론적으로 예상하였던 결과를 실험을 통해서도 얻을 수 있을 것이다. 하지만, 실제 제작에는 필연적으로 90°이하의 식각 기울기(그림 1-b)를 가지기 마련이다. 이는 식각 장비의 조건 및 샘플의 종류에 따라 달라지게 된다.

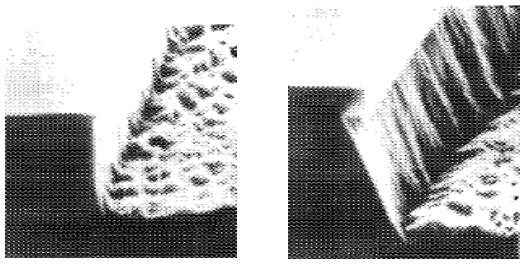

그림 1[(3)]. GaAs by hot jet etching
(a) etched through a mask
(b) etched with a mask

이번 연구에서는 이차원 광결정 박막내 공진기의 Q값(Quality factor)이 이러한 식각 기울기에 대해 어떻게 변하고 왜 그렇게 변하는 지에 대해 연구해보았다. 또한, 이러한 식각 기울기에 의해 변화된 공진기의 Q값을 실험적으로 측정해 보고, 실제 이론(시뮬레이션)결과와 그 값이 얼마나 일치하는 지에 대해 조사해보았다.

■ 광결정 공진기 내 Q값의 변화에 대한 이론적 접근

이차원 광 결정 박막 구조는 하나의 축에 대해 대칭인 구조를 가진다. 하나의 축에 대해 대칭 구조를 가지기 때문에 박막 중심에 대한 전기장 혹은 자기장의 대칭성에 따라 두 개의 모드(TE 모드, TM 모드)로 나누어지게 된다. 식각이 90°로 이루어지면 이러한 대칭성은 여전히 유효하게 되지만, 식각이 90°가 아닌 다른 값을 가지게 되면 박막 중심에 대한 대칭성은 깨지게 된다. 즉, 우리가 생각했던 특정 주파수에 대한 TE모드와 TM모드간의 결합이 발생하게 된다.

이차원 광 밴드 구조(Photonic Band Structure)는 TE 모드와 TM 모드에 대해 다른 특성을 가지고 있다. 즉, 각각의 모드 특성에 따라 물질 내에서 빛의 성질이 다르게 나타난다. 하지만, 식각의 기울기에 의해 TE모드와 TM모드의 성질이 변하게 되고, 이러한 모드의 성질 변화는 광 밴드 구조의 변화를 필연적으로 가져오게 한다. 결국 이러한 광 밴드 구조의 변화는 공진기 내의 빛의 생존기간(Life-Time)을 변화시키고, 이는 공진기의 품위값(Q-value)을 변화시키는 결정적인 요인이 된다.

이번 연구에서는 이차원 광 결정 박막의 공진기 Q값의 변화 원인을 광 밴드 구조와 공진기내 TE 및 TM 모드의 구성정도의 차이를 이론적으로 살펴보고, FDTD 시뮬레이션을 통해 그 결과를 확인해보았다.

이론의 분석을 위해 선택한 공진기는 높은 Q값을 가지는 5개의 Defect의 막대형 공진기(그림 2)를 사용하였고, 식각 기울기의 변화에 따른 Q값의 변화는 다음과 같다(그림 3).

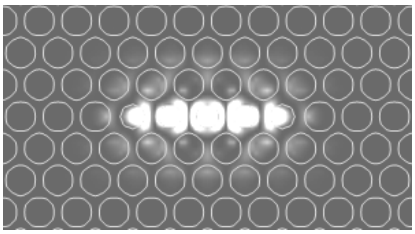

그림 2. 막대형 공진기(Q=87,000)
($r = 0.35a$, $r_m = 0.25a$)

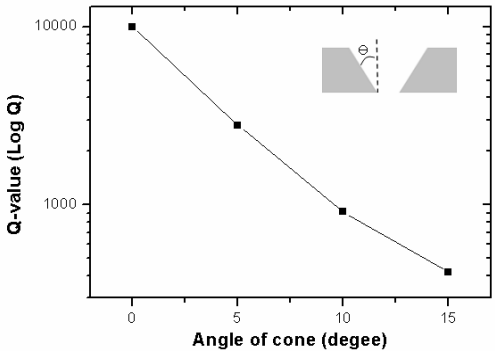

그림 3. 식각의 기울기에 대한 Q값의 변화

■ 광섬유가 결합된 이차원 광 결정 박막 구조를 이용한 공진기 Q값 측정

이론적으로 분석된 결과를 바탕으로 SOI 웨이퍼에 샘플을 제작 후 샘플의 식각 기울기를 측정하고, 그 기울기에 대한 이차원 광결정 박막 공진기의 Q값을 광섬유를 통해 나온 신호의 공명너비(FWHM)를 통해 Q값을 확인하였다(그림4,5). 실험 결과 Q값은 1400으로 측정되었고, 이 결과는 시뮬레이션 결과인 식각 기울기 각도 8°와 실제 측정 각도 8~10°가 유사하게 나타났음을 확인할 수 있다.

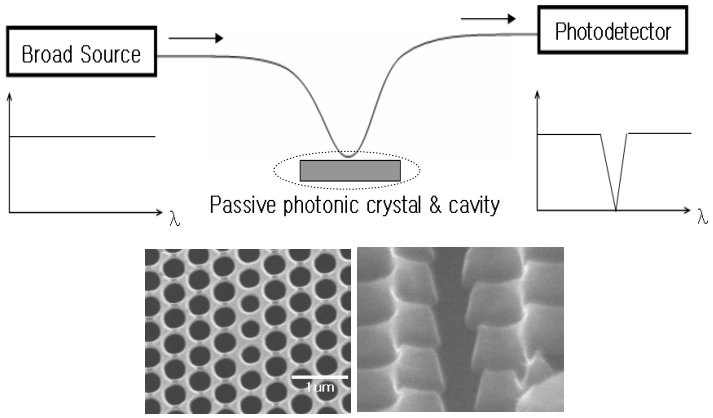

그림 4. 광섬유를 이용한 기울어진 식각 구조를 가진 이차원 광 결정 박막 내의 공진기 Q값 측정

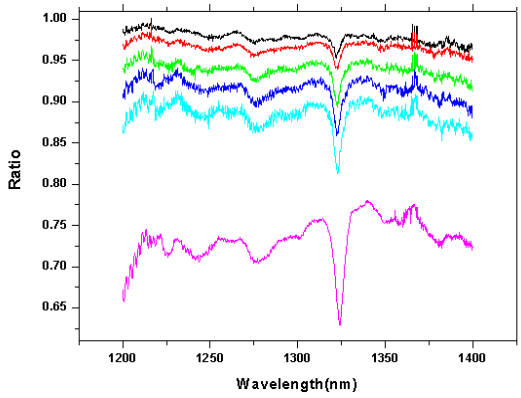

그림 5. 광섬유와 공진기사이의 거리에 따른 스펙트럼 결과

1. I. K. Hwang et al, "Curved-microfiber coupling for photonic crystal light emitter," Appl. Phys. Lett. 87, 131107 (2005)
2. Yoshinori Tanaka et al, "Theoretical investigation cf a two-dimensional photonic crystal slab with truncated cone air holed", Appl. Phys. Lett. 82, 1661 (2003)
3. S. W. Pang et al, "Pattern transfer by dry etching through stencil masks", Journal of Vacuum Science &Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures 6, Issue 1, pp. 249-252 (1988)