

높은 Q값을 가지는 표면 플라즈몬 위스퍼링 갤러리 공진기

High-Q Surface-Plasmon-Polariton Whispering-Gallery Microcavity

민범기^{1,2,3}, Eric Ostby², Volker Sorger³, Erick Ulin-Avila³, Lan Yang², Xiang Zhang³, Kerry Vahala²
¹한국과학기술원 기계공학과, ²Caltech, ³UC Berkeley
 bmin@kaist.ac.kr

축대칭(axisymmetry)을 가지는 원판 혹은 토로이드 형태의 위스퍼링 갤러리 광공진기는 높은 Q값과 상대적으로 작은 광학모드부피(V)로 인하여 비선형광학, 양자광학, 레이저광학, 광기계학 등의 여러 분야에서 집중적으로 연구되어 왔다^(1,2). 하지만 표면/채널 플라즈몬을 이용한 광공진기 연구는 주로 광학모드부피를 최소화 하려는 목적으로 진행되어왔고 결과적으로 금속자체의 손실보다는 광공진기의 작은크기로 인해 공진기 표면에서 이차적으로 야기되는 산란이나 방사 혹은 공진기를 구성하는 거울의 낮은 반사율 때문에 상대적으로 낮은 Q값을 가진 표면/채널 플라즈몬 공진기들만이 제작되어져왔다⁽³⁻⁵⁾. 이로 인해 가시광선이나 적외선 파장에서 금속자체의 흡수손실에만 의하여 Q값이 한계를 가지는 표면 플라즈몬 공진기를 개발해야할 필요성이 제기되어져 왔다. 본 발표에서 우리는 기존의 원판형 실리카 미소원판 공진기를 활용/변형하여 현재까지 알려진 가장 높은 표면 플라즈몬 Q값(1376±65)을 가지는 표면 플라즈몬 미소공진기를 개발하였다. 이러한 특성을 가지는 표면 플라즈몬 위스퍼링 갤러리 미소공진기를 제작하기 위해서 우선 기존에 알려진 방법으로 실리카 미소원판 공진기를 제작한다. 이런 실리카 미소원판 공진기의 경우 보통 비스듬한 가장자리를 가진 형태로 만들어지며 낮은 레벨의 표면산란덕분에 일반적으로 10⁶이상의 Q값이 보고되어 있다. 이렇게 제작된 실리카 미소원판 공진기에 고주파

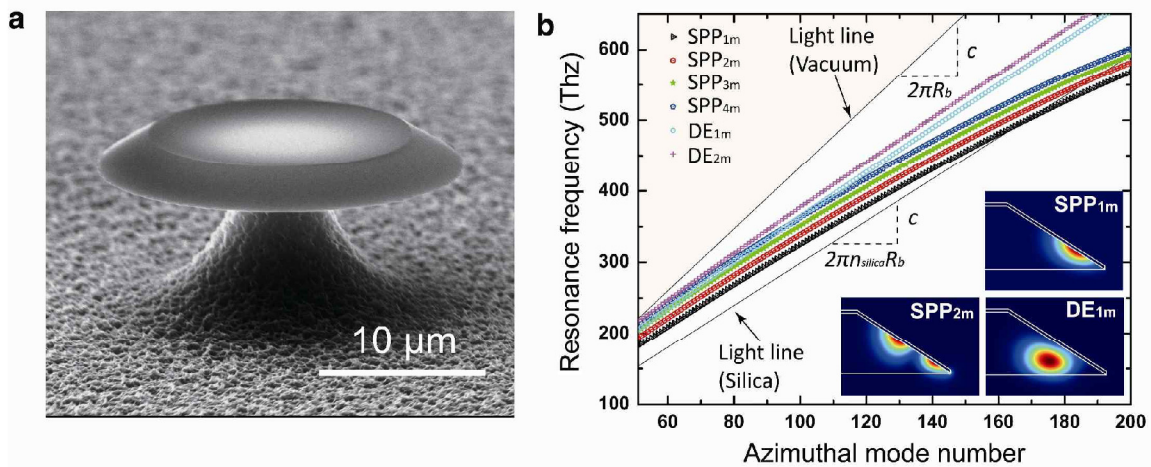


그림 1 (a) 제작된 원판형 표면 플라즈몬 광공진기의 전자현미경 사진. (b) 유한요소법으로 계산된 공진기의 방위 모드수 (azimuthal mode number)에 따른 고유주파수

(RF) 스퍼터링을 사용하여 은을 원판위에 대략 수십나노미터 이상을 코팅한다. 그림 1(a)는 이런 과정을 거쳐 제작된 표면 플라즈몬 미소공진기의 전자현미경 사진을 보여준다.

제작된 표면 플라즈몬 광공진기의 이론적 해석을 위하여 유한요소 고유치 계산을 실행하면 각각의 모드의 이론적 고유주파수와 Q값을 구할 수 있다. 이렇게 얻어진 표면 플라즈몬 위스퍼링 갤러리 공진기의 고유모드(eigenmode)는 SPP_{qm}으로 표기가 가능한 표면 플라즈몬 고유모드와 DE_{hm}으로 표기가 가능한 유전체모드 두가지의 종류로 구분지어 지며 그림 1(b)의 삽입된 그림(inset)에 각 모드의 자기장(H-field)의 패턴을 표시했다 (q: 플라즈몬 모드수, h: 유전체 모드수, m: 방위 모드수). 그림 1(b)에서 볼 수 있듯이 표면 플라즈몬 모드와 유전체 모드는 모드의 형태와 분산관계식 모두에서 확연히 구분되어지는 특성을 지니고 있다. 이론적으로 계산되어진 표면 플라즈몬과 유전체 모드의 존재를 실험적으로 증명하기 위하여 표면 플라즈몬 광공진기를 광섬유(tapered fiber)를 이용하여 1550nm 대역에서 광공진기의 투과특성을 측정하고 이로부터 각각의 모드의 고유파장과 Q값을 실험적으로 도출하였다. 그림 2(a)의 투과 스펙트럼에서는 기본 표면 플라즈몬 모드(Q~1376)와 기본 유전체모드(Q~4025)의 공진을 확인할 수 있으며 하단에 삽입된 그림에서는 전체 측정영역(1520-1570 nm)에서의 투과특성을 볼 수 있다. 이러한 스펙트럼에서 높은 Q의 유전체 모드와 상대적으로 낮은 그러나 플라즈몬모드로서는 높은 Q의 표면 플라즈몬 모드가 공존함을 알 수 있고 이론적으로 계산되어진 Q의 경향과 정성적/정량적으로 상당히 근접했음을 확인할 수 있다. 그림 2(b)는 통계적으로 얻어진 Q값의 분포를 각각의 표면 플라즈몬과 유전체 모드에 대하여 보여주며 이 그림에서 다른 범위의 Q값을 가지는 표면 플라즈몬 모드와 유전체 모드를 확인할 수 있다.

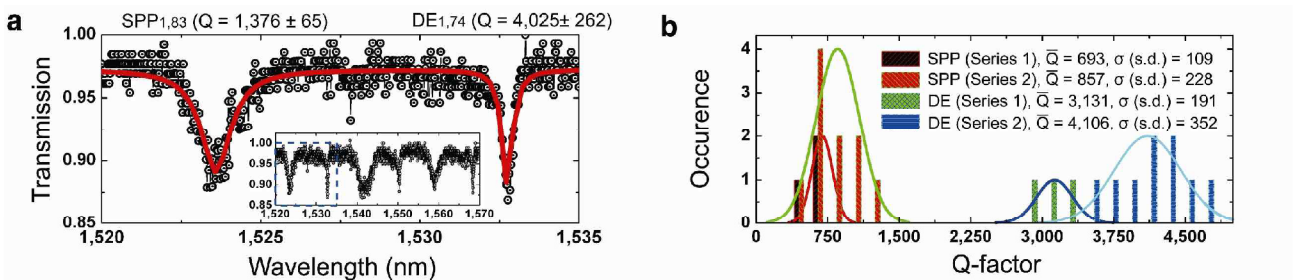


그림 2 (a) 파장의 함수로 측정된 투과율 (b) 통계적으로 얻어진 Q값의 분포

1. Vahala, K. J. "Optical microcavities". Nature 424, 839-846 (2003).
2. Armani, D. K., Kippenberg, T. J., Spillane, S. M. & Vahala, K. J. "Ultra-high-Q toroid microcavity on a chip", Nature 421, 925-929 (2003).
3. Bozhevolnyi, S. I., Volkov, V. S., Devaux, E., Laluet, J.-Y. & Ebbesen, T. W. "Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators", Nature 440, 508-511 (2006).
4. Miyazaki, H. T. & Kurokawa, Y. "Squeezing visible light waves into a 3-nm-thick and 55-nm-long plasmon cavity", Phys. Rev. Lett. 96, 097401 (2006).
5. Ditlbacher, H. et al. "Silver nanowires as surface plasmon resonators", Phys. Rev. Lett. 95, 257403 (2005).