

실리콘 나노결정 / 실리카 마이크로디스크의

제작과 광발광 특성분석

Fabrication and Photoluminescence Characterization

of Si nanocrystal/silica Microdisk

성주연, 최용석, 이용희, 신중훈

한국과학기술원 물리학과

jysung@kaist.ac.kr

실리콘은 반도체 산업에 이용되는 주된 물질로, 원가, 기능성, 신뢰도 등의 면에서 이점을 가지고 있기 때문에 실리콘칩 위에 기존의 전기적 소자와 광전기적 소자들을 집적하고자 하는 노력이 계속되고 있다. 특히 실리콘 나노결정 (nc-Si)으로부터 가시광 방출을 관측한 이래⁽¹⁾, 이를 기반으로 한 광학적 능동매질에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 최근에는 nc-Si을 이용한 LED⁽²⁾와 어븀이 첨가된 nc-Si을 이용한 nc-Si/silica 광 도파로 광증폭기에서의 광학적 이득⁽³⁾이 보고 된 바 있다. 이러한 연구들을 통해 실리콘을 기반으로 한 레이저의 실현 가능성이 제기되고 있다.

마이크로공동 구조는 low-threshold 발광 소자나 레이징 소자 구현에 대한 전망 때문에 오래 전부터 연구되어 왔다. 그 중에서 마이크로디스크 구조의 공진기는 십여 년 전, 얇은 반도체 마이크로디스크의 가장자리 둘레의 whispering-gallery mode (WGM)를 이용한 광학적 이득에 관한 연구가 보고⁽⁴⁾된 이래, 다양한 화합물 반도체를 이용한 마이크로디스크들이 제작되었고^{(5),(6)} 광펌핑과 전기적 펌핑을 통한 마이크로디스크 레이저들이 보고 되었다. 본 실험에서는 지름이 15 μm 인 nc-Si/silica 마이크로디스크를 제작하고, 광발광 특성을 분석해 보고자 한다.

우선 active layer인 nc-Si/silica 박막을 형성하기 위해서 <100> 실리콘 기판 위에 ECR-PECVD 방법을 이용하여 200 nm 두께의 silicon-rich silica 박막을 증착하였다. 이 후 증착한 박막을 950 $^{\circ}\text{C}$ 로 5 분 동안 열처리하여 nc-Si을 silica matrix 내에 형성시켰고, 또 forming gas에서 700 $^{\circ}\text{C}$ 로 1 시간 동안 수소화처리 하여 defect을 passivate 하였다. 이렇게 처리한 박막의 잉여 실리콘 함량은 7.45 at. % 이고, 이 값을 이용해 계산한 박막의 굴절률은 1.64 이다. 그림 1은 nc-Si/silica 박막을 488 nm Ar-ion 레이저로 펌핑하여 얻은 광발광 스펙트럼을 보여준다. 이러한 스펙트럼은 700—1000 nm 영역에서 gaussian 분포를 가지는 전형적인 nc-Si 의 광발광 스펙트럼으로, 박막 내의 nc-Si의 크기는 3—5 nm 정도로 추정할 수 있다.⁽⁷⁾

형성된 active layer 위에 포토리소그래피를 이용하여 지름 15 μm 인 포토레지스트 디스크를 제작하였다. 이를 buffered oxide etch에 담가서 nc-Si/silica 층을 실리콘 기판이 드러날 때까지 식각하고, 이 후 아세톤으로 포토레지스트 디스크를 제거하여 실리콘 기판 위에 지름 15 μm 인 nc-Si/silica 디스크만을 남긴다. 마지막 과정으로 시편을 70—74 $^{\circ}\text{C}$ 의 30 % KOH 용액에 담가서 실리콘 기판을 식각한다. KOH 용액은 실리콘의 <100> 면을 우선적으로 식각하기 때문에, 실리콘 기판은 표면에 대해 54.7 $^{\circ}$ 의 각을 갖는 이방성의 V형을 만들면서 식각된다. 그러나 실리카 박막은 KOH 용액에 의해 식각되지 않으므로

로. 마이크로디스크의 가장자리를 따라서 역 피라미드 형태로 실리콘 기판이 식각된다. 그림 2는 제작한 마이크로디스크의 주사전자현미경 사진이다. 실리콘 받침대를 가지는 지름 15 μm 의 nc-Si/silica 마이크로디스크 구조가 형성되었음을 확인할 수 있다.

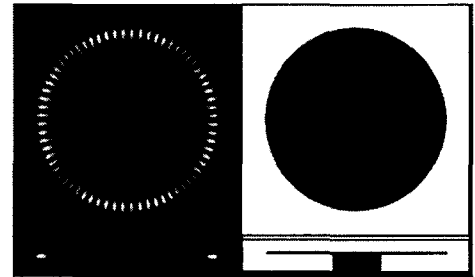
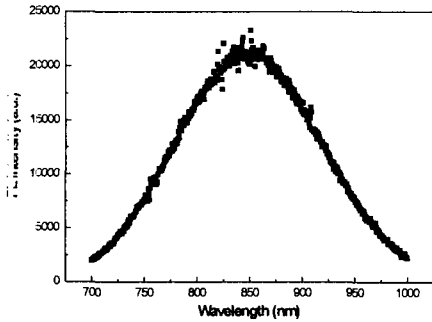


그림1. nc-Si/silica 박막의 광발광 스펙트럼 그림2. 주사전자현미경 사진 그림3. WGM 계산 결과

그림 3은 제작한 nc-Si/silica 마이크로디스크의 TE-편광된 WGM의 Hz 성분을 finite difference time domain method를 이용하여 계산한 결과로, r 방향의 모드 차수는 1, ϕ 방향의 모드 차수는 68이다. 제작된 nc-Si/silica 마이크로디스크와 같이 크기 파라미터($x = 2\pi R/\lambda$)가 55인 경우, 모드의 간격은 약 10 nm 이다. 계산 결과를 통해 예상한 WGM을 실제로 확인하기 위해서는 분해능과 집광효율이 우수한 setup으로 마이크로디스크의 광발광 측정을 시행해야 한다. 발표에서는 nc-Si/silica 박막과 nc-Si/silica 마이크로디스크 구조의 광발광 스펙트럼을 측정하여 비교 분석한 결과를 함께 논의할 것이다.

1. L. T. Canham, "Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers", Appl. Phys. Lett. 57, 1046-1048 (1990).
2. A. Irrera, D. Pacifici, M. Miritello, G. Franzo, F. Priolo, F. Iacona, D. Sanfilippo, G. Di Stefano, and P. G. Fallica, "Excitation and de-excitation properties of silicon quantum dots under electrical pumping", Appl. Phys. Lett. 81, 1866-1868 (2002).
3. H.-S. Han, S.-Y. Seo, J. H. Shin, and N. Park, "Coefficient determination related to optical gain in erbium-doped silicon-rich silicon oxide waveguide amplifier", Appl. Phys. Lett. 81, 3720-3722 (2002).
4. S. L. McCall, A. F. J. Levi, R. E. Slusher, S. J. Pearton, and R. A. Logan, "Whispering-gallery mode microdisk lasers", Appl. Phys. Lett. 60, 289-291 (1992).
5. Toshihiko Baba, "Photonic Crystals and Microdisk Cavities Based on GaInAsP-InP System", IEEE J. Sel. Top. Quan. 3, 808-830 (1997).
6. H. Cao, J. Y. Xu, W. H. Xiang, Y. Ma, S.-H. Chang, S. T. Ho, and G. S. Solomon, "Optically pumped InAs quantum dot microdisk lasers", Appl. Phys. Lett. 76, 3519-3521 (2000).
7. *Light Emission in Silicon: From Physics to Devices*, Semiconductors and Semimetals, 49, 272