

어븀이 첨가된 실리콘/실리카 초격자의 양자효율 측정과 광결정공진기 양자전기동력학의 응용

Measurement of Quantum Efficiency of Er-doped Si/SiO₂ Superlattices and Application to the Photonic-Crystal Cavity-QED Experiments

최용석, 성주연, 신중훈, 이용희
한국과학기술원 물리학과
yongseok@mail.kaist.ac.kr

실리콘을 기반으로 한 광학적 능동매질에 대한 연구는 학문적으로나 산업적으로 큰 중요성을 갖고 있다. 최근 실리콘 양자점을 이용한 연구에서는 상온에서도 활용 가능한 광학적 이득^[1]을 얻게 되었는데, 이를 이용한 LED^[2]가 보고되었으며 실리콘을 기반으로 한 레이저의 실현 가능성도 제기되고 있다^[1].

실리콘 양자점에서 나오는 빛을 이용하는 것은 양자점이 제공하는 크기 효과를 이용하여 원하는 영역에서 원하는 광학적 이득을 얻을 수 있다는 장점이 있으나, 기술적으로는 고난도의 크기 제어가 필요하다. 실리콘 양자점 물질의 대안으로 양자점-희토류 원소 혼합체를 기반으로 하는 광학적 능동매질^[3]이 연구되고 있다. 이러한 혼합체는 양자점이 제공하는 특성 제어 능력과 함께 희토류 원소의 고유한 발광 특성을 갖게 되므로 순수 실리콘 양자점과 같이 고난도의 제어기술 없이도 균일하고 재연성이 있는 광학적 특성을 얻을 수 있다는 장점이 있다. 특히 희토류 원소들은 기술적으로 중요한 파장대역 (Er: 1.5 μm , Pr: 1.3 μm , Tm: 1.4, 1.6 μm , 등)에서 안정적인 발광 성질을 갖고 있다.

양자점-희토류 원소 혼합체의 광학적 특성을 개선시키기 위해서는, 양자역학적인 크기 효과가 실리콘 계열 박막에 첨가된 희토류 원소의 발광에 미치는 영향을 실험적으로 엄밀히 규명하는 것이 필요하다. 즉, 결정성이 없는 박막에서 발생할 수 있는 여러 가지 비발광 결합들은 희토류 원소의 발광 효율을 저하시키게 되므로 제작된 박막의 발광 효율을 측정하고 비발광 결합의 원인을 규명하는 일은 대단히 중요하다. 이를 위해 본 실험에서는 양자점 대신 막의 두께가 수 나노미터 단위로 제어된 Er-doped Si/SiO₂ 초격자 박막을 제작하였다. 제작된 박막을 여러 시편으로 나누고 그 위에 서로 다른 굴절률을 갖는 물질들을 증착한 뒤 희토류 원소의 자발방출 시간을 측정하였다. 막 내부에 존재하는 어븀의 자발방출 시간은 막 외부의 광학적 환경에 의해 변화되므로 이로부터 어븀의 양자효율, 즉 자발방출율을 유추해 낼 수 있다^{[4][5]}. 이와 같은 방법은 박막 주변의 광학적 환경만을 변화시킬 뿐 막 자체의 구조적인 특성은 보존시킬 수 있다는 장점이 있다.

Er-doped Si/SiO₂ 초격자 박막은 ECR-PECVD를 이용하여 제작되었다^[6]. 초격자는 2nm 두께의 Si 층과 3nm 두께의 SiO₂ 층으로 이루어져 있으며 총 두께는 500 nm 이다. 어븀은 SiO₂ 층에 첨가되어 있으며 그 함유량은 Rutherford backscattering spectroscopy로부터 0.18 at.%임을 확인하였다. 실험을 위해서 photo resist(PR)와 SiN, Si 등을 증착한 시료와 기준으로 아무 것도 증착하지 않은 시료를 준비하였다. PR은 스핀 코팅하였으며 SiN와 Si 막은 ECR-PECVD로 증착하였다.

펌핑광으로는 488nm Ar 레이저를 사용하였다. Acousto-optic modulator(AOM)을 이용하여 7 Hz 주기로 시료를 펌핑하였으며, 1/4m monochromator를 이용하여 측정되는 스펙트럼 영역을 Er³⁺의 ⁴I_{13/2} - ⁴I_{15/2} 천이선 중심 위치 1536 \pm 1nm 로 제한하였다. 강력한 펌핑광을 제거하기 위해 monochromator 앞에 두께가 1cm인 실리콘 필터를 놓았다. 신호는 1.5 μm 에서 민감도가 높은 InGaAsP 광검출기를 이용하였으며 측정하였으며 300MHz 디지털 오실로스코프를 이용하여 PL 감쇠시간을 기록하였다. 측정되는 PL 감쇠시간은 자발방출율과 비발광방출율을 모두 반영하게 된다.

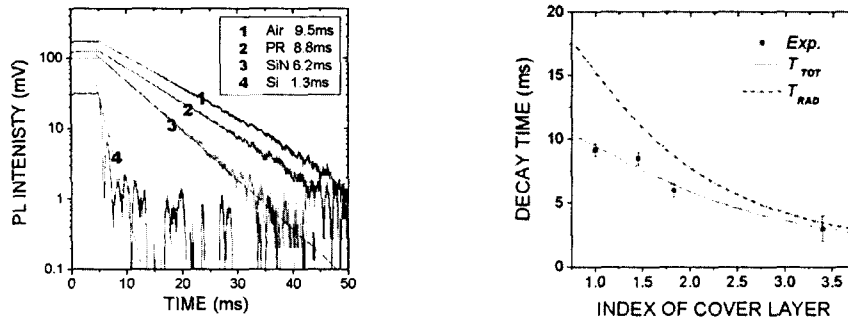


그림1 (a)어븀(Er^{3+}) PL 의 감쇠시간 변화 (b) Er-doped Si/SiO₂ 초격자의 자발방출율

그림1(a)는 어븀(Er^{3+})의 PL 감쇠시간 변화를 측정된 결과이다. 굴절률이 큰 막을 초격자 위에 증착 하였을 때 감쇠시간이 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 초격자의 구조나 온도 등은 모든 시료에 대해 거의 일정하기 때문에 비발광결합율도 시료마다 다르지 않다는 점을 고려하면, 굴절률이 큰 막을 증착하였을 때 어븀의 자발방출율이 커진다는 것을 알 수 있다. 고전적인 모델에 따르면 자발방출 시간과 굴절률은 $\tau_{RAD} \approx (n_{in}/n_{out})^2$ 의 관계를 갖는다^[5]. 실험결과를 굴절률에 대해 나타내면 그림 1(b)를 얻게되는데, 앞의 식을 이용해 fitting 하였을 때 실험에 사용된 초격자의 양자효율은 $80 \pm 5\%$ 정도가 됨을 알 수 있었다.

어븀이 첨가된 Si/SiO₂ 초격자 박막은 LED^[2]나 레이저 집적화 된 광증폭기^[3]와 같은 응용 외에 캐비티 전기동력학 연구에도 활용될 수 있다. 특히 광결정 구조를 이용하면 모드 부피가 반파장의 삼승 정도로 작으면서도 높은 품위값을 갖는 공진기가 가능하므로^{[7][8]}, 이번 연구 결과와 같이 작은 굴절률 변화에 의한 자발방출율 변화 효과보다 더 강력한 빛과 물질의 상호작용 효과를 관찰할 수 있을 것으로 기대된다. 발표에서는 이와 관련하여 공진기 설계 및 실험에 대한 논의도 이루어질 것이다.

1. L. Pavesi, L. Dal Negro, C. Mazzoleni, G. Franzo, and F. Priolo, Nature, "Optical gain in silicon nanocrystals", 408, 440-444 (2000).
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, 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. E. Snoceks, A. Lagendijk, and A. Polman, "Measuring and Modifying the Spontaneous Emission Rate of Erbium near an Interface", Phys. Rev. Lett. 74, 2459-2462 (1995),
5. E. Yablonovitch, T. J. Gmitter, and R. Bhat, "Inhibited and Enhanced Spontaneous Emission from Optically Thin AlGaAs/GaAs Double Heterostructures", Phys. Rev. Lett. 61, 2546-2549 (1988)].
6. J. H. Shin, W.-H. Lee, H.-S. Han, "1.54 μm Er^{3+} photoluminescent properties of erbium-doped Si/SiO₂ superlattices", Appl. Phys. Lett. 74, 1573-1575 (1999).
7. O. Painter, R. K. Lee, A. Scherer, A. Yariv, J. D. O'Brien, P. D. Dapkus, and I. Kim, "Two-dimensional photonic bandgap defect laser", Science, 284, 1819-1821 (1999).
8. H.-Y. Ryu, S.-H. Kim, H.-G. Park, J.-K. Hwang, Y.-H. Lee and J.-S. Kim, "Square-lattice photonic band-gap single-cell laser operating in the lowest-order whispering gallery mode", Appl. Phys. Lett. 80, 3883-3885 (2002).