

Si-O 초격자 구조의 포토루미네스스 특성

정소영, 서용진, 박성우, 이경진, 김철복*, 김상용**

대불대학교 나노정보소재연구소, 동성 A&T, 아남반도체 주식회사*

Photoluminescence Characteristics of Si-O Superlattice Structure

So-Young Jeong, Yong-Jin Seo, Sung-Woo Park, Kyoung-Jin Lee, Chul-Bok Kim*, Sang-Yong Kim**

Nano-Information Materials & Devices Lab. DAEBUL University, Dong Sung A&T, ANAM Semiconductor*

Abstract

The photoluminescence (PL) characteristics of the silicon-oxygen(Si-O) superlattice formed by molecular beam epitaxy (MBE) were studied. To confirm the presence of the nanocrystalline Si structure, Raman scattering measurement was performed. The blue shift was observed in the PL peak of the oxygen-annealed sample, compared to the hydrogen-annealed sample, which is due to a contribution of smaller crystallites. Our results determine the right direction for the fabrication of silicon-based optoelectronic and quantum devices as well as for the replacement of silicon-on-insulator (SOI) in high-speed and low-power silicon MOSFET devices in the future.

Key Words : Photoluminescence(PL), nanocrystalline silicon/adsorbed oxygen(nc-Si/O) superlattice, Molecular Beam Epitaxy (MBE), Raman scattering

1. 서론

반도체 소자는 현대 전자 시스템에서 빠질 수 없는 매우 중요한 요소이다. 실리콘과 III-V 족 화합물 반도체 계열인 GaAs 등은 가장 널리 사용되고 있는 반도체 물질이다. 이들 중에서 실리콘은 오늘날 우리의 일상생활에 지대한 영향을 주고 있는 마이크로일렉트로닉스 혁명을 지배하고 있는 IC 전자산업에서 괄목할 만한 위치를 차지하고 있다. 그 이유는 MOS 소자의 기본이 되는 SiO₂막을 Si 웨이퍼 위에 쉽게 성장할 수 있고, 또한 실리콘은 비교적 값이 싸며, CMOS-ULSI 회로 공정과 잘 호환되며, 공정이 용이하여 새로운 소자 개발을 위한 중요한 잠재력을 갖고 있기 때문이다. 따라서 차세대 나노 CMOS 소자에도 적용하기 위해서는 무엇보다도 현재의 실리콘 집적기술과 호환되어야 한다는 것이다. 실리콘은 GaAs와 같은 화합물 반

도체보다 더 느린 이동도(mobility)를 갖고 있을 뿐만 아니라 기존의 III-V족 고속 소자의 기본이 되는 헤테로접합 장벽(hetero-junction barrier)이 없으며, 간접 천이형 밴드 갭 구조를 가지고 있어서 광학 소자에 중요한 역할을 하지 못했었다.

그러나 1990년 다공성 실리콘(porous silicon)으로부터 가시광선 영역의 포토루미네스스 발견[1]은 광전자 산업에 커다란 자극을 주어 실리콘 집적회로 공정과도 호환이 될 수 있는 새로운 공정이 가까운 장래에 광소자에도 적용될 수 있을 것으로 보인다. 지금까지 다결정 실리콘[2], 마이크로결정질의 실리콘[3], 단결정 실리콘[4] 또는 비정질 실리콘[5]으로 이루어진 양자우물과 초박막의 SiO₂ 장벽과 같은 이중장벽 구조에서의 캐리어 전송 특성, 또한 공명 터널링에 의한 전도 특성의 변화에 대한 연구가 보고되어왔다. 최근, Tsu 등은 인접한 반도체 층 사이에 산소원자, CO 분자와 같은 단원

자층을 갖는 새로운 개념의 초격자 구조를 제안하였으며, 흡착된(adsorbed) 산소 단원자 층 사이에 샌드위치 되어 있는 나노결정 실리콘을 통한 공명 터널링 특성을 보고한 바 있다.[6, 7]

본 논문에서는 Si-based 광전자 소자 개발을 향한 몇 가지 가능성을 조사하기 위해 분자선 에피택시 (molecular beam epitaxy) 시스템으로 형성된 다층의 나노결정(nanocrystalline) Si-O 초격자의 포토루미네스스 특성에 대해 연구하였다. 포토루미네스스 특성을 조사하기 위해 Raman scattering 측정을 수행하였다. 실험결과 다층의 Si-O 초격자 구조는 안정된 포토루미네스스 특성을 나타내었다. 이는 Si-based 광전자 소자의 제작이 가능하며, 기존의 Si ULSI 공정으로도 쉽게 집적될 수 있음을 보여주는 것이다.

2. 실험

결정방향이 (100)이고, 저항율이 $\rho \approx 0.01 \sim 0.1 \Omega \cdot \text{cm}$ 인 단결정 n형 실리콘 기판을 사용하였다. 시료들은 성장 챔버의 베이스 압력이 $\sim 10^{-10}$ Torr인 UHV(Ultra High Vacuum) MBE (Molecular Beam Epitaxy) 시스템을 사용하여 준비하였다.

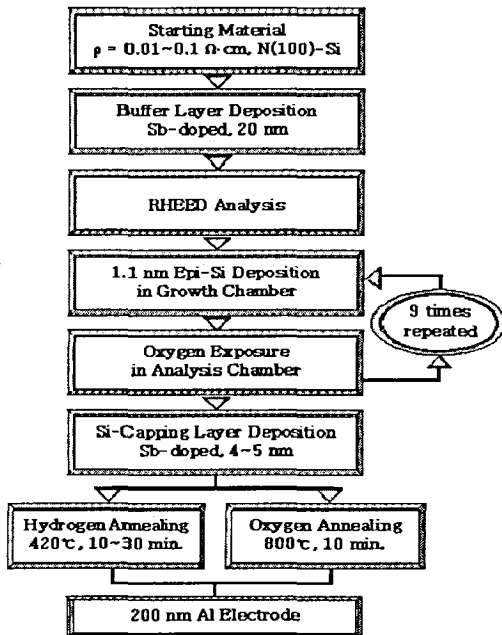


그림 1. Si/O 초격자 제조를 위한 공정 흐름도

본 실험을 위해 7개의 시료가 제작되었다. 첫 번째 시료는 10 nm의 Si 층 두께를 갖도록 실온(RT)에서 성장되었다. 다음 3개의 시료들은 Si 층 두께가 모두 1.1 ~ 1.2nm가 되도록 각각 RT(실온), 300 °C, 500 °C에서 성장되었다. 마지막으로 3개의 시료들은 RT, 300 °C, 500 °C에서 각각 다시 성장되었다. 그러나 이때 Si 층 두께는 2.0 nm로 증가시켰다. 즉, 산소 노출이 20분 동안 RT에서 수행되었고, 전체 9층이 성장되었다. Si 증착율은 0.5 Å/s를 유지하였다. MBE 증착이 완료된 후에 시료는 H₂+N₂ (1:10), 420°C, 10, 20, 30분 동안 어닐링 되었고, 나머지 샘플들은 O₂+N₂ (2:1), 800°C, 10분 동안 어닐링 되었다. 그림 1은 본 실험의 공정 흐름도를 개략적으로 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

as-deposit된 시료의 포토루미네스스를 확인한 결과, 매우 약한 포토루미네스스 특성을 보이거나, 그 특성이 전혀 나타나지 않았다. 또한, 실온에서 증착된 실리콘은 여전히 비정질 상태로 남아있음을 Raman scattering을 통해서 확인 할 수 있었다. 따라서 시료들은 수소 분위기에서 420°C, 산소 분위기에서 800°C로 각각 어닐링을 수행하였다. 그림 2는 as-deposit된 시료의 457.9 nm의 Ar 이온 레이저를 사용한 Raman scattering을 보인 것이다. 비정질 실리콘의 대표적인 라만 스펙트럼은 480 cm⁻¹에서 broad한 peak가 관찰되었다.

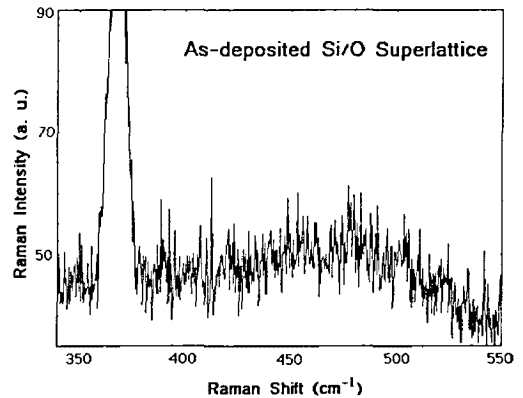


그림 2. as-deposit된 Si/O 초격자 시료의 Raman scattering 스펙트럼

그림 3은 산소와 질소 분위기에서 800 °C로 20 분 동안 어닐링한 후, 라만 스펙트럼을 나타낸 것이다. 516 cm^{-1} 에서 peak를 보이고 있다.

그림 4는 550°C에서 성장되고, 1.1~1.2nm 두께의 Si층을 갖는 시료의 포토루미네스스 스펙트럼을 나타낸 것이다. 시료는 수소 분위기에서 420°C, 산소 분위기에서 800°C로 각각 10분씩 어닐링되었다. 그림 4에 보인 것처럼, 수소 어닐링된 시료로부터 측정된 포토루미네스스는 매우 강한 특성을 나타내었다. 이는 수소 어닐링이 산소 어닐링보다 더 효과적인 패시베이션(passivation)을 제공했음을 알 수 있다. 또한, 그림 4에서 산소 어닐링된 시료의 포토루미네스스 스펙트럼이 대략 250 meV 정도의 blue shift함을 보였는데, 이는 산소 어닐링의 결과 입자 크기가 더 감소했음을 지적하는 것이다.

그림 5는 1.2nm 두께의 Si층을 가지며, 실온(RT), 300°C, 550°C의 각기 다른 온도에서 증착된 3개의 시료에 대한 포토루미네스스 스펙트럼을 나타낸다. 모든 시료는 420°C의 수소 분위기에서 20 분 동안 어닐링되었다. 실온에서 증착되고, 420°C에서 수소 어닐링을 수행한 실리콘은 주로 비정질 상태로 남아있음을 알 수 있다. Raman scattering은 부분적인 결정화만을 나타내었다. 그러므로, 포토루미네스스 스펙트럼이 blue shift 될 것으로 예상되었다. 실제로 2.3eV의 광자 에너지에서 포토루미네스스 peak는 참고문헌 [8]에서 보고되었던 것

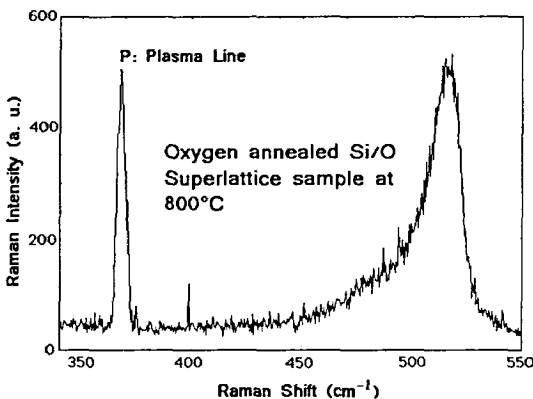


그림 3. 800°C에서 산소 어닐링된 Si/O 초격자 시료의 Raman scattering 스펙트럼

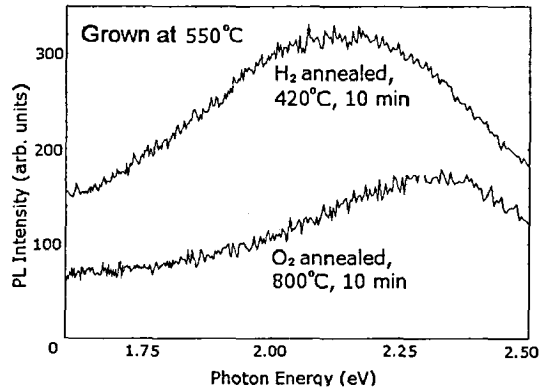


그림 4. 550°C에서 성장한 후, 수소와 산소에서 각각 어닐링된 Si/O 초격자 시료의 포토루미네스스 스펙트럼

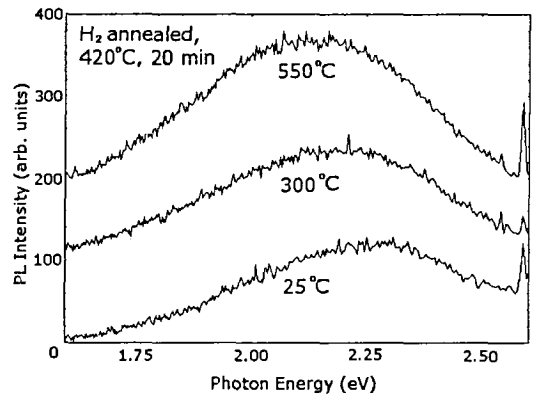


그림 5. 550°C, 300°C, 25°C에서 각각 성장한 nc-Si/O 초격자 시료의 포토루미네스스 스펙트럼. 모든 시료는 420°C의 수소, 질소 분위기에서 20분 동안 열처리됨.

과 거의 비슷하였다. 또한 550°C에서 증착되었던 시료의 포토루미네스스는 red shift되었다. red shift는 클러스터 크기의 연속적인 증가와 증가된 결정화에 의한 것으로 설명될 수 있다. 이 시료에서의 Raman scattering은 상당한 결정화를 보였다. 게다가, 550°C에서 성장된 시료의 포토루미네스스 세기는 다른 두 시료의 것보다 눈에 띄게 더 높음을 알 수 있다. 이는 결정화가 더 강한 루미네스스를 유도했음을 지적하는 것이다. 300°C에서 성장된 시료의 포토루미네스스 스펙트럼은 포토루미네스스 세기와 광자 에너지 peak에서 둘 다 중간 정도로 나타났다.

4. 결 론

나노결정의 Si-O 초격자 구조의 포토루미네스스 특성이 각기 다른 증착 온도와 어닐링 조건에서 연구되었다. as-deposit된 시료의 경우 포토루미네스스 특성은 약하고, Raman scattering 결과 실온에서 증착된 실리콘은 여전히 비정질 상태로 남아 있음을 알 수 있었다. 그러나 수소 어닐링된 시료로부터 측정된 PL은 매우 강한 특성을 나타내었다. 산소 어닐링된 시료의 포토루미네스스 스펙트럼은 대략 250 meV 정도의 blue shift를 보였다. 또한 실온에서 증착되고 420 °C에서 수소 어닐링된 시료의 경우도 실리콘은 주로 비정질 상태로 남아 있었고, Raman scattering은 부분적인 결정화만을 나타내었다. 550 °C에서 증착된 시료로부터 얻은 PL은 red shift를 나타내었는데 이는 결정화가 증가하였음을 의미하며, Raman scattering은 상당한 결정화를 보였다. 게다가 550 °C에서 성장된 시료의 포토루미네스스 세기는 매우 높은 값을 나타내었다. 결론적으로, 550 °C에서 증착된 후에 수소 어닐링한 결과가 가장 양호한 특성을 나타내었고, PL 피크에서의 blue shift는 더 작은 결정질을 갖고 있음을 의미하는 것임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2002-000-00565-0) 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] L. T. Canham: Appl. Phys. Lett. Vol.1 57 p. 1046, (1990).
- [2] M. Hirose, M. Morita and Y. Osaka: Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 16, Suppl. 16-1, p. 561, 1977.
- [3] Q. Y. Ye, R. Tsu and E. H. Nicollian: Phys. Rev. Vol. B 44, p. 1806, 1991.
- [4] K. Yuki, Y. Hirai, K. Morimoto, K. Inoue, M. Niwa and J. Yasui: Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 34, p. 860, 1995.
- [5] E. H. Nicollian and R. Tsu: J. Appl. Phys. Vol. 74, p. 4020, 1993.
- [6] R. Tsu, A. Filios, C. Lofgren, K. Dovidenko, and C. G. Wang, Electrochem and Solid State Lett., Vol. 1, No. 2, p. 80, 1998.
- [7] R. Tsu, E. H. Nicollian, and A. Reisman, Appl. Phys. Lett., Vol. 55, p. 1897, 1989.
- [8] Z. H. Lu, D. J. Lockwood, and J. M. Barlbeau, Appl. Phys. Lett., Vol. 71, p. 2124, 1996.