

SPM (Scanning Probe Microscopy)을 이용한 SiO₂ layer 에서의 실리콘 나노 크리스탈의 전기적 특성 분석

김정민, 허현정, 손정민, 이은혜*, 강유호*, 강치중*, 김용상
명지대학교 전기공학과, *명지대학교 물리학과, **삼성종합기술원

Characterization of Electrical Properties of Si Nanocrystals Embedded in a SiO₂ Layer by Scanning Probe Microscopy

Jung-Min Kim, Hyun-Jung Her, J. M. Son*, Eun-Hye Lee**, Yoon-Ho Khang**, Chi-Jung Kang*, Yong-Sang Kim
Dept. of Electrical Eng., *Dept. of physics, Myongji University, **Material Lab, Samsung Advanced Institute of Technology

Abstract - 본 연구에서는 scanning probe microscopy (SPM)을 이용하여 국소영역에서 silicon nanocrystal (Si NC)의 전기적 특성을 분석하였다. Si NCs은 압축된 silicon powder를 laser로 분해하는 laser ablation 방식으로 제조 되었고, sharpening oxidation 과정을 통하여 Si NC 주변에 oxide shell을 형성시켰다. 이 과정에서 Si NCs은 10-50 nm의 크기와 약 10¹¹ /cm²의 밀도로 SiO₂ 층에 증착 되었다. SPM의 conducting tip을 통하여 전하는 각각의 Si NC로 주입되게 되고, 이로 인하여 발생하는 SCM image와 dC/dV curve의 변화를 통하여 Si NC에서 전하 거동을 모니터 하였다. 또한 국소영역에서 Si NC의 전기적 특성을 MOS capacitor 구조에서의 C-V 특성과 비교 분석하였다.

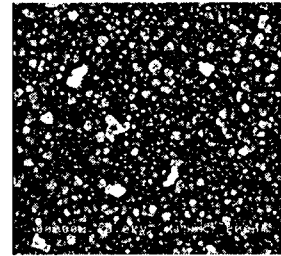


그림 1. Laser ablation 방법으로 제작된 Si NCs의 SEM image

1. 서 론

메모리 소자의 집적도 향상을 위해서 나노 구조에 대한 연구가 활발히 진행 중이며 많은 관심이 집중되고 있다. 이 중에서 단전자 비 휘발성 메모리 제작 실현을 위한 방법 중 하나로 floating gate에 나노 입자를 이용하는 방안이 제시되고 있다. SiO₂층 내에 나노 크기의 입자를 위치시키는 이 방식은 전하를 저장 할 때 많은 장점을 가지고 있다. 기존의 구조에서보다 낮은 동작 전압으로 구동되기 때문에 얇은 tunnel oxide 증착이 가능하고, punch through 현상이 감소하여 채널 길이를 짧게 할 수 있다. 또한 작은 셀 영역에서 누설전류를 억제할 수 있어 소자 집적도를 향상시킬 수 있다. 이런 여러 가지 장점으로 인하여 Si nanocrystals (NCs)은 현 메모리 구조를 대체 할 수 있을 것으로 본다. 본 연구에서는 나노 크기의 입자로서 Si NCs을 이용하였다 [1-4]. Si NCs은 laser ablation방법을 이용하여 크기 10-50 nm, 밀도 약 10¹¹ /cm²를 갖도록 만들었다. Si NCs은 size와 density에 따라 여러 가지 다른 전기적 특성을 갖게 된다. 따라서 이런 전기적 특성을 분석하기 위하여 Si NCs의 C-V를 측정하였다. 하지만 일반적으로 이러한 측정은 gate 아래 Si NCs들의 전체적인 특성만을 보여 준다. 따라서 본 연구에서는 SiO₂층 내에 증착된 단일 Si NC의 특성을 규명하기 위하여 conducting tip을 이용한 SPM을 사용하여 [5-19] 국소영역에서 Si NC의 전기적 특성을 측정하였다. Electrostatic force microscopy (EFM)를 이용하여 Si NC의 충전 현상을 관찰하였고, scanning capacitance microscopy (SCM)을 이용하여 dC/dV curve 이동과 image 변화를 측정함으로써 단일 Si NC에 나타나는 충전 현상과 절연 기관 위에 위치한 Si NC이 충전될 수 있다는 것을 관찰하였다. 이 방식으로 각각의 Si NC의 전기적 특성을 더욱 정밀히 관찰할 수 있었으며, 전자 주입 변수를 더욱 정밀하고 더욱 정확하게 제어하였다.

2. 본 론

2.1 실험

SPM sample을 만들기 위하여, thermal oxidation을 이용하여 증착한 3 nm tunnel oxide 위에 Si NCs을 증착한 후, 얇은 gate oxide를 LPCVD 방법으로 다시 증착하였다. Si NCs 제작은 압축된 silicon 파우더를 laser로 분해하는 laser ablation 방법을 이용하여 생성하였다. 동종 가스 핵 형성에 의해 입자를 생성하고 기상증착 방식으로 성장시켰다. Si NC 바깥쪽에 1-2 nm oxide shell을 형성하는 sharpening oxidation 공정을 실시한 후, 10-50 nm의 크기와 약 10¹¹/cm²의 density를 갖는 Si NCs을 4" Si wafer 위에 증착 하였다 (그림 1). 또한 C-V 측정을 위하여 100 um×100 um 크기의 Al gate를 gate oxide 위에 증착하여 MOS 구조를 만들었다. 만들어진 sample은 Keithley와 HP LCR meter를 이용하여 C-V를 측정하였고, 이를 통하여 Si NCs의 전기적 특성을 분석하였다. 또한 이 실험에서는 단일 Si NC의 충전 효과를 분석하기 위하여 atomic force microscope (XE-100, PSIA crop.)에 매우 민감한 capacitor sensor를 부착한 SCM을 이용하여 국소영역에서의 Si NC의 전기적 특성을 분석 하였다 (그림 2).

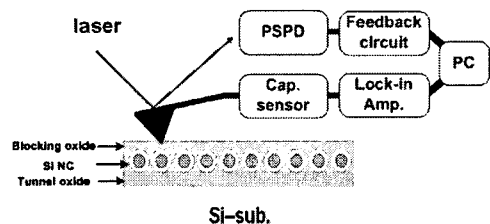


그림2. Scanning capacitance microscopy (SCM) 개략도

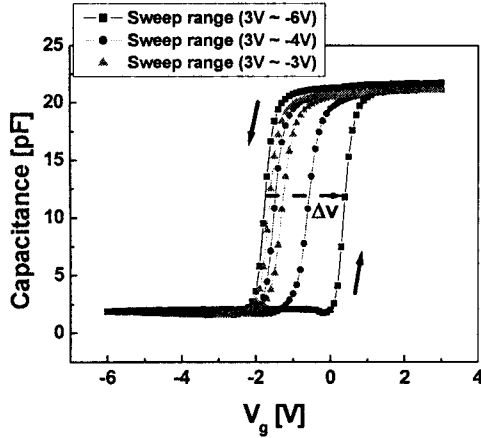


그림 3. Sweep range에 따른 Si NCs의 C-V 곡선 (100 um×100 um)

2.2 결과 및 토론

C-V 특성 분석은 MOS 구조에서 1 MHz high frequency로 실시하였다. Bias는 0.1 V/s로 gate에 인가되어 accumulation에서 inversion 되는 방향으로 측정하였다. 얇은 gate oxide로 인하여 gate에 음의 전압이 인가되면 gate에서 Si NC로 전자가 충전되고 반대로 양의 전압이 인가되면 Si NC는 방전된다. 그림 3은 동일한 Si NC sample에서 sweep range에 따른 Si NC의 충전 효과를 보여주고 있다. Sweep 시작 전압을 +3 V로 고정하고 끝나는 전압을 각각 -3 V, -4 V, -6 V로 증가를 시켰다. 이때 hysteresis curve의 ΔV 값은 음의 전압이 클수록 더 크게 변하는 것을 볼 수 있었다. 이는 높은 음의 전압을 가할수록 더 많은 전자가 Si NC로 충전되기 때문이다. 좀더 자세하게 Si NC의 충전 효과를 관찰하기 위하여 우리는 EFM과 SCM를 이용하여 단일 Si NC의 충전 효과를 관찰하였다. Si NC의 파인 전하들은 SPM tip과 sample사이의 정전기적 힘에 관계된다. SPM 피드백은 cantilever의 초기 휨 상태를 유지하게 하고, SPM image에서 전하가 충전되는 것을 높이의 증가로 나타낸다. Si NC를 충전하기 위하여, 전압이 인가된 SPM tip으로 Si NC 위를 scan하면, 전하는 충전된다. 그림 4는 인가된 전압에 따른 EFM image를 보여준다. 전하 주입은 일정한 직류 전압이 인가된 tip을 sample에 scan하는 동안 이루어진다. 높이와 명암의 확연한 변화는 SPM이 전하 주입에 민감하게 반응하는 것을 나타낸다. 단일 Si NC의 충전 효과를 더욱더 정밀하게 관찰하기 위하여 매우 감도가 좋은 capacitance sensor ($\sim 10^{18}$ F/V)가 부착된 SCM을 이용하여 Si NC에서의 dC/dV 변화량과 SCM image 변화를 관찰 하였다. SCM은 Si

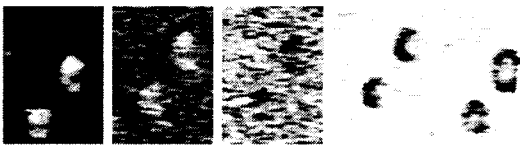
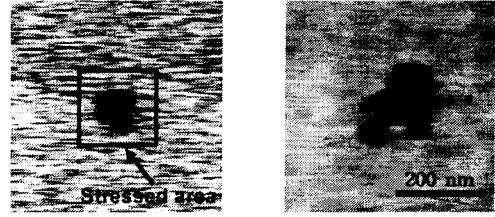


그림 4. 인가전압에 따른 EFM image (왼쪽에서부터 Vs = -4V, -2V, 0V, +2V, +4V)



(a) (b)

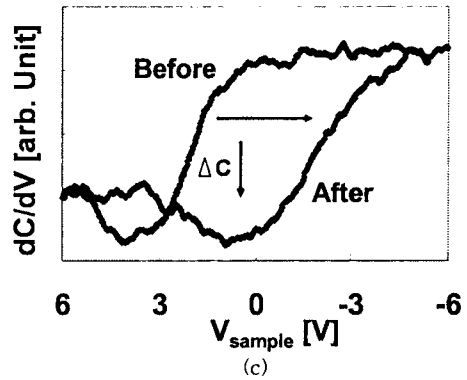


그림 5. -10 V 스트레스 전압을 인가하기 전 (a)과 인가 후 (b)의 SCM image, 그리고 각각의 Si NC의 spectroscopy (c)

NC에 전하의 충전과 충전된 전하의 시간에 따른 거동을 모니터 하는데도 유용한 툴로 이용될 수 있다. Si NC의 충전은 dC/dV curve의 이동으로 측정할 수 있는데 Si NC의 크기, 전하의 종류 그리고 충전량에 따라 이동 방향과 그 크기가 달라진다. 그림 5는 단일 Si NC의 크기에 따른 충전 효과를 보여주고 있다. 스트레스 전압 인가 전의 SCM image (그림 5-(a))에서는 약 90 nm 크기의 Si NC 만이 보이고 나머지 작은 Si NC는 묻혀서 보이지 않는다. 하지만 스트레스 전압을 이부분에 인가하게 되면 tip에서 Si NCs들로 전하가 이동하게 된다. 따라서 묻혀 있던 작은 Si NCs들 역시 충전 되어 SCM image로 보이게 된다 (그림 5-(b)). 또한 스트레스 전압 인가 전에 보였던 Si NC SCM image 역시 스트레스 전압 인가 후 더욱더 여덱게 보이게 된다. 이는 스트레스 전압으로 인하여 기존 전하보다 더 많은 전하가 Si NC에 충전되기 때문이다. 그림 5-(c)에 나타난 spectroscopy의 변화는 이런 SCM image 변화를 잘 보여주고 있다. 스트레스 전압 인가로 인하여 Si NC이 충전 되면 dC/dV curve는 오른쪽으로 이동하게 되고, ΔC 의 값은 스트레스 전압 인가 전 보다 낮아지게 된다. 이로 인하여 Si NC의 SCM image는 더욱더 어두워지게 된다. 또한 Si NC의 크기에 따라 spectroscopy 역시 작은 크기의 Si NC 보다 크기가 큰 Si NC의 dC/dV curve가 더 오른쪽으로 이동하고 ΔC 값도 더 작게 된다. 이는 작은 크기의 Si NC보다 상대적으로 크기가 큰 Si NC에 더 많은 전하가 충전되기 때문에 더 어둡게 보이게 되는 것이다. 이 실험에서 image 측정은 0 V에서 진행 되었다. 스트레스 전압 인가 후 변화는 SCM image를 통하여 깊게 묻혀 있거나 크기가 작은 Si NC를 더욱더 쉽게 관찰 할 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서는 절연 기판위에 laser ablation 방법으로 Si NC를 형성시켰다. 단일 Si NC의 전기적 특성을 분석하기 위하여 SPM tip을 이용하여 단일 Si NC에 전하를 주입하였고 인가된 전압에 따른 EFM image와 SCM image를 측정하였다. 또한 SCM을 이용하여 dC/dV curve를 측정함으로써 Si NC에서 일어나는 충전 효과를 관찰하였다. 이 결과는 MOS 구조에서 C-V 특성과 비교 분석 하였다. 충전현상에 의해 야기된 Si NC image의 뚜렷한 명암 차이를 통하여 효과적인 충전 변수 제어를 위한 Si NC의 크기와 주입 방향을 대략적으로 측정하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Tiwari, F. Rana, H. Hanafi, A. Hartstein, E. F. Crabbe, and K. Chan, Appl. Phys. Lett. **68** (1996) 1377
- [2] L. Guo, E. Leobandung, and S. Y. Chou, Science **275** (1997) 649
- [3] Q. Ye, R. Tsu, and E. H. Niccolian, Phys. Rev. B **44** (1991) 1806
- [4] S.-H. Choi and R. G. Elliman, Appl. Phys. Lett. **75** (1999) 968
- [5] S. Tiwari, F. Rana, K. Chan, L. Shi, and H. Hanafi, Appl. Phys. Lett. **69** (1996) 1232
- [6] L. Burgi, H. Sirringhaus, and R. H. Friend, Appl. Phys. Lett. **80** (2002) 2913
- [7] T. Hassenkam, D. R. Greve, and T. Bjørholm, Adv. Mater. **13** (2001) 631
- [8] T. Melin, H. Diesinger, D. Deresmes, and D. Stievenard, Phys. Rev. B **69** (2004) 035321
- [9] T. Melin, D. Deresmes, and D. Stievenard, Appl. Phys. Lett. **81** (2002) 5054
- [10] K. M. Mang, Y. Kuk, J. Kwon, Y. S. Kim, D. Jeon, and C. J. Kang, Europhys. Lett. **67** (2004) 261
- [11] C. C. Williams, J. Slinkman, W. P. Hough, and H. K. Wickramasinghe, Appl. Phys. Lett. **55** (1989) 1662
- [12] R. C. Barret and C. F. Quate, J. Appl. Phys. **70** (1991) 2725
- [13] Y. Huang, C. C. Williams, and H. Smith, J. Vac. Sci. Technol. B **14** (1996) 433
- [14] J. J. Kopanski, J. F. Marchiando, and J. R. Lowney, J. Vac. Sci. Technol. B **14** (1996) 242
- [15] G. Neubauer, A. Erickson, C. C. Williams, J. J. Kopanski, M. Rodgers, and D. Adderton, J. Vac. Sci. Technol. B **14** (1996) 426
- [16] C. J. Kang, G. H. Buh, S. Lee, C. K. Kim, K. M. Mang, C. Im, and Y. Kuk, Appl. Phys. Lett. **74** (1999) 1815
- [17] G. H. Buh, H. J. Chung, J. H. Yi, I. T. Yoon, and Y. Kuk, J. Appl. Phys. **90** (2001) 443
- [18] H. Edwards, R. McGlothlin, R. S. Martin, Elisa U, M. Gribelyuk, R. Mahaffy, C. K. Shih, R. S. List and V. A. Ukraintsev, Appl. Phys. Lett. **72** (1998) 698
- [19] J. W. Hong, S. M. Shin, C. J. Kang, Y. Kuk, and Z. G. Khim, Appl. Phys. Lett. **75** (1999) 1760