

SPM(Scanning Probe Microscopy)을 이용한 국소영역에서 실리콘 나노크리스탈의 전기적 특성 분석

최민기, 김정민, 강치중*, 강운호**, 김용상
명지대학교 전기공학과, 명지대학교 물리학과*, 삼성종합기술원**

Electrical property analysis of Si nanocrystal by SPM(Scanning Probe Microscopy) on insulating substrate

Min-Ki Choi, Jung-Min Kim, Chi-Jung Kang*, Yoon-Ho Khang**, Young-Sang Kim
Dep. of Electrical eng., Dep. of Physics*, Myongji University
Devices Lab**, Samsung Advanced Institute of Technology

Abstract - 본 연구에서는 Scanning Capacitance Microscopy (SCM)와 Electrostatic Force Microscopy (EFM)을 이용하여 국소영역에서 실리콘 나노 크리스탈의 전기적 특성을 분석하였다. 실리콘 나노 크리스탈은 에어로솔 방식으로 P-type 실리콘 웨이퍼 위에 10~40 nm의 크기와 약 10^{11} /cm²의 밀도를 갖도록 제작하였다. 실리콘 나노 크리스탈에서 전자와 정공의 trapping 현상은 EFM, SCM 이미지를 통하여 관찰하였고 이러한 나노 크리스탈의 국소영역 특성을 MOS 캐패시터 구조의 C-V 특성을 비교 분석 하였다. 또한, 나노 크리스탈에 trapping된 전하의 detrapping 과정을 스트레스 조건에 따라 분석하였다.

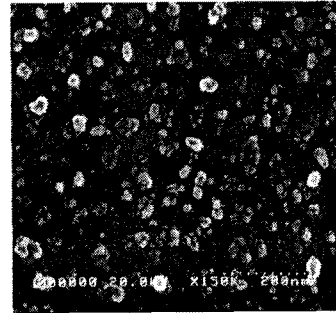


그림 1. 에어로솔 방식으로 제작된 실리콘 나노크리스탈의 SEM 이미지

1. 서 론

메모리 소자의 능력을 향상시키는 나노 크기의 구조는 현재 많은 연구가 진행 중이고 많은 관심이 집중되고 있다. 단일 전자를 이용한 비 휘발성 메모리의 실현을 위한 하나의 중간과정으로서 플로팅게이트를 이용한 비 휘발성 메모리는 가장 실현가능한 응용방법 중 하나이다. gate oxide내에 나노 크기의 입자를 위치시키는 이 방식은 현 메모리 구조를 대체 할 수 있다. 본 연구에서는 나노 크기의 입자로서 실리콘 나노 크리스탈을 이용하였다 [1-4]. 이 구조는 전하를 저장할 때 몇 가지 장점을 가진다 [5]. 기존의 구조에서보다 낮은 동작 전압으로 구동되기 때문에 얇은 터널 oxide 증착이 가능하고, punchthrough 현상이 감소하여 채널길이를 짧게 할 수 있다. 그러므로 작은 셀 영역에서 누설전류를 억제할 수 있다. 일반적으로 이러한 소자들은 나노 크리스탈이 충전되는 동안 전하 이동 시간이 보여진다. 그러나 이런 현상의 전기적, 물리적 원인을 완전히 설명할 수 없지만, 나노 크리스탈과 기판 사이의 oxide barrier의 두께, 나노 크리스탈에서의 계면상태 또는 나노 크리스탈의 크기 변화에 따른 전하에너지 또는 전기적 준위에서의 이동과 연관이 있을 수 있다. 따라서 gate oxide 내에 위치한 단일 나노 크리스탈의 특성을 규명하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 conducting tip을 이용한 SPM으로 [6-19] 각각의 실리콘 나노 크리스탈의 전기적인 특성을 측정하였다. 또한 EFM을 이용하여 실리콘 나노 크리스탈의 충전 현상을 관찰하였다. 이 실험은 절연 기판 위에 위치한 실리콘 나노 크리스탈이 충전될 수 있다는 것을 보여준다. 이 방식으로 각각의 실리콘 나노 크리스탈의 전기적 특성을 볼 수 있으며, 전자 주입 변수를 더욱 정밀하게 더욱 정확하게 제어할 수 있다.

2. 본 론

2.1 실험

SPM 측정 샘플을 만들기 위하여, 열적으로 성장시킨 직경 2.5 nm 실리콘 나노 크리스탈을 터널 oxide 위에 증착한 후, 8 nm 두께의 control oxide를 다시 증착하였다. 나노 크리스탈 제작을 위해, 실리콘 에어로솔은 희석된 silane의 열분해 방법을 이용하여 생성하였다. 동종 가스 핵형성에 의해 입자를 생성하고 기상 증착에 의해 성장시켰다. 1.5 nm의 oxide 층을 형성하기 위하여 산화시킨 후, 10~40 nm의 크기와 10^{11} /cm²의 밀도를 갖는 나노 크리스탈을 4" p-type 실리콘 웨이퍼 위에 증착하였다 (그림 1). 이 실험에서는 0.6 N/m의 스프링 상수 값을 가지는 금으로 코팅된 실리콘 질소화물 캔틸레버를 이용한 scanning probe microscope (PSIA corp., Korea, XW-100)을 사용하였다. 또한 Probe station을 이용하여 열분해 방식으로 생성된 나노 크리스탈의 C-V 곡선을 측정하였다.

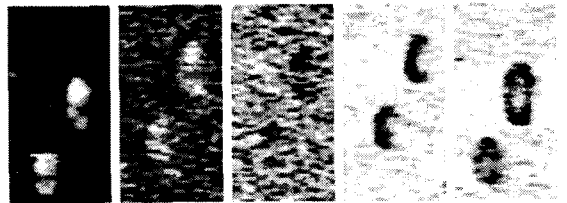


그림 2. 인가전압에 따른 EFM 이미지 (왼쪽에서부터 Vs = -4V, -2V, 0V, +2V, +4V)

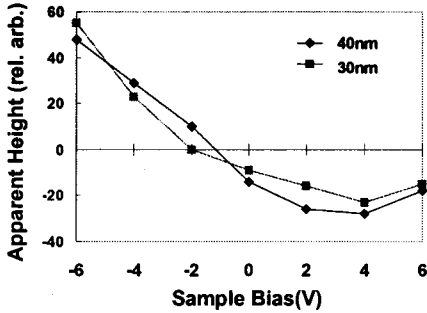


그림 3. 샘플에 인가한 전압에 따른 팁과 샘플 사이의 높이 변화

2.2 결과 및 토론

나노 크리스탈의 과잉 전하들은 SPM 팁과 샘플 사이의 정전기적 힘에 관계된다. SPM 피드백은 캔틸레버의 초기 휨 상태를 유지하게 하고, SPM 이미지에서 전하가 충전되는 것을 높이의 증가로 나타낸다. 나노 크리스탈을 충전하기 위하여, 전압이 인가된 SPM 팁으로 나노 크리스탈 위를 스캔하면, 전하는 충전된다. 그림 2는 인가된 전압에 따른 EFM 이미지를 보여준다. 전하 주입은 일정한 직류 전압이 인가된 팁을 샘플에 스캔하는 동안 이루어진다. 높이와 명암의 확연한 변화는 SPM이 전하 주입에 민감하게 반응하는 것을 나타낸다. 샘플에 인가된 전압에 따라 팁과 샘플 사이의 높이 변화는 그림 3에 보여진다. 실험에 사용된 샘플은 나노 크리스탈 하단에 2.5 nm의 터널 oxide와 p-type 실리콘 기판 위에 8 nm의 게이트 oxide로 제작되었다. 이것은 팁으로부터 전자를 주입하는 것보다 기판으로부터 전자를 주입하는 것이 더 효과적이라는 것을 그림 3에서 볼 수 있다. 샘플에 마이너스 전압을 인가하면 실리콘 기판의 공핍 현상 때문에 나노 크리스탈에 적은 전계를 인가해도 양의 전압을 인가할 때보다 높이 차는 더 커진다. 또한, 나노 크리스탈의 크기가 클수록 트랩된 전하로 인해 EFM의 측정 값이 더 높은 충전 특성을 그림 3에서 보여준다. 전자 주입을 위하여 높은 전계를 인가한 팁의 높이를 감소시켜 oxide 층의 나노크리스탈을 충전시킨다. 본 실험에서는 단일 실리콘 나노 크리스탈의 충전 현상도 측정하였다. 팁으로부터 나노 크리스탈에 -10 V 전압 스트레스를 인가한 후, 0 V의 전압을 인가한 샘플에서 측정된 이미지로부터 나노 크리스탈은 사라진다 (그림 4). 이것은 팁 아래에 나노 크리스탈의 유무에 따라 정전기적 힘의 기울기가 약간 변화한다는 것을 의미한다. 단일 나노 크리스탈의 충전 효과를 좀더 자세히 분석하기 위하여 capacitance microscopy를 이용하여 측정하였다. 감도가 좋은 캐패시턴스 센서(10^{-18} F/V) 이용하여 나노 크리스탈의 캐패시턴스 값을 측정하였다 (그림 5). 전압 스트레스를 인가하기 전에는 하나의 나노 크리스탈 입자 이미지만 나타났지만 전압 스트레스를 인가한 후에는 주변 다른 입자들의 충전으로 인하여 여러 나노 크리스탈 입자의 SCM 이미지가 나타났다.

그림 6은 단일 나노 크리스탈의 캐패시턴스 spectroscopy를 나타낸다. 이 결과로부터 샘플에 인가된 -2.0 V 부근에서 약간의 변화가 발생하였는데, 이것은 나노 크리스탈에 전자들이 충전된다는 것을 의미한다. 나노 크리스탈이 존재하지 않으면 공핍 층이 증가하

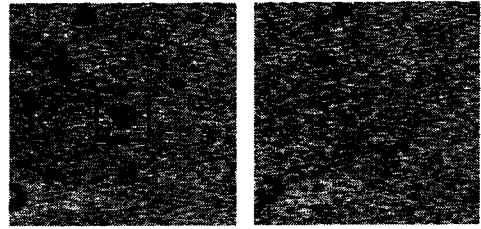


그림 4. -10 V의 전압 스트레스를 인가하기 전(좌)과 인가한 후 (우)의 EFM 이미지

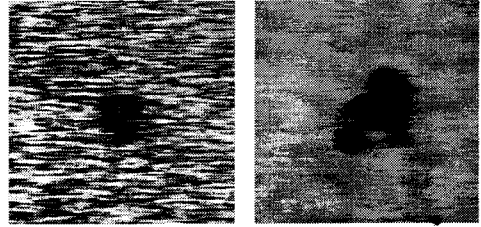


그림 5. 0.5 V의 전압 스트레스를 인가하기 전(좌)과 인가한 후 (우)의 SCM 이미지

기 때문에 인가된 전압이 감소된 만큼 포화되어진다. 그러나 마이너스로 충전된 나노 크리스탈은 샘플에 마이너스 전압을 인가하여 공핍 층의 넓이가 증가하는 비율을 줄일 수 있다. 이것은 캐패시턴스 spectroscopy에서 작은 변화를 야기시키며 나노 크리스탈의 충전효과를 확실하게 보여준다.

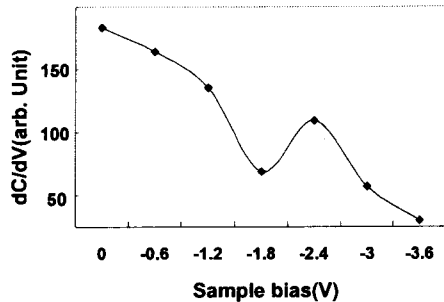


그림 6. 나노 크리스탈의 캐패시턴스 spectroscopy

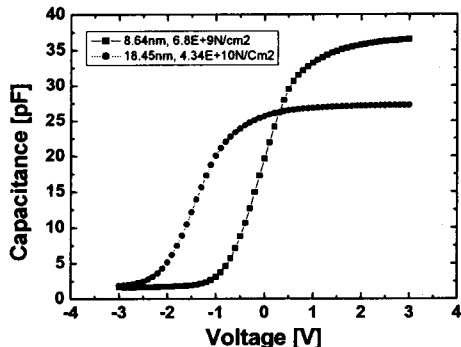


그림 7. 열분해 방식에 의해 생성된 나노 크리스탈의 C-V 곡선

그림 7은 열분해 방식에 의해 생성된 나노 크리스탈의 C-V 곡선을 측정 한 것이다. 샘플들은 HP 4284A를 이용하여 hysteresis 모드로 측정하였다. 열분해 방식에 의해 생성된 나노 크리스탈의 C-V 곡선은 생성된 실리콘 나노 크리스탈 입자 크기와 밀도에 의해 다른 특성을 보였다. 생성된 나노 크리스탈 입자의 크기와 밀도는 열분해 시간과 기체 상태, 온도에 따라 제어되어진다. 나노 크리스탈 입자의 크기와 밀도에 의해 C-V 곡선이 이동되는 것을 볼 수 있다. 이것은 나노 크리스탈 입자의 크기와 밀도가 클수록 입자들이 더 많이 충전되어 flat band 전압 형성에 영향을 주기 때문이다.

3. 결 론

본 연구에서는 절연 기관위에 에어로솔 방식으로 나노 크리스탈을 형성시켰다. 단일 실리콘 나노 크리스탈의 전기적 특성을 분석하기 위하여 SPM 팁을 이용하여 단일 실리콘 나노 크리스탈에 전하를 주입하였고 샘플에 인가된 전압에 따른 EFM 이미지도 측정하였다. 충전현상에 의해 야기된 나노 크리스탈 이미지의 뚜렷한 명암과 높이 차이를 통하여 효과적인 충전 변수 제어를 위한 나노 크리스탈의 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**, 1377 (1996)
- [2] L. Guo, E. Leobandung, and S. Y. Chou, Science **275**, 649 (1997)
- [3] Q. Ye, R. Tsu, and E. H. Nicolian, Phys. Rev. B **44**, 1806 (1991)
- [4] S.-H. Choi and R. G. Elliman, Appl. Phys. Lett. **75**, 968 (1999)
- [5] S. Tiwari, F. Rana, K. Chan, L. Shi, and H. Hanafi, Appl. Phys. Lett. **69**, 1232 (1996)
- [6] L. Burgi, H. Sirringhaus, and R. H. Friend, Appl. Phys. Lett. **80**, 2913 (2002)
- [7] T. Hassenkam, D. R. Greve, and T. Bjørholm, Adv. Mater. **13**, 631 (2001)
- [8] T. Melin, H. Diesinger, D. Deresmes, and D. Stievenard, Phys. Rev. B **69**, 035321 (2004)
- [9] T. Melin, D. Deresmes, and D. Stievenard, Appl. Phys. Lett. **81**, 5054 (2002)
- [10] K. M. Mang, Y. Kuk, J. Kwon, Y. S. Kim, D. Jeon, and C. J. Kang, Europhys. Lett. **67**, 261 (2004)
- [11] C. C. Williams, J. Slinkman, W. P. Hough, and H. K. Wickramasinghe, Appl. Phys. Lett. **55**, 1662 (1989)
- [12] R. C. Barret and C. F. Quate, J. Appl. Phys. **70**, 2725 (1991)
- [13] Y. Huang, C. C. Williams, and H. Smith, J. Vac. Sci. Technol. B **14**, 433 (1996)
- [14] J. J. Kopanski, J. F. Marchiando, and J. R. Lowney, J. Vac. Sci. Technol. B **14**, 242 (1996)
- [15] G. Neubauer, A. Erickson, C. C. Williams, J. J. Kopanski, M. Rodgers, and D. Adderton, J. Vac. Sci. Technol. B **14**, 426 (1996)
- [16] C. J. Kang, G. H. Buh, S. Lee, C. K. Kim, K. M. Mang, C. Im, and Y. Kuk, Appl. Phys. Lett. **74**, 1815 (1999)
- [17] G. H. Buh, H. J. Chung, J. H. Yi, I. T. Yoon, and Y. Kuk, J. Appl. Phys. **90**, 443 (2001)
- [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**, 698 (1998)
- [19] J. W. Hong, S. M. Shin, C. J. Kang, Y. Kuk, and Z. G. Khim, Appl. Phys. Lett. **75**, 1760 (1999)