

원자현미경을 이용한 탄화규소 (SiC)의 국소산화

Local Oxidation of 4H-SiC using an Atomic Force Microscopy

조영득¹, 방 옥², 김상철², 김남균², 구상모^{1,a}

(Yeong-deuk Jo¹, Wook Bahng², Sang-Cheol Kim², Nam-Kyun Kim², and Sang-Mo Koo^{1,a})

Abstract

The local oxidation using an atomic force microscopy (AFM) is useful for Si-based fabrication of nanoscale structures and devices. SiC is a wide band-gap material that has advantages such as high-power, high-temperature and high-frequency in applications, and among several SiC polytypes, 4H-SiC is the most attractive polytype due to the high electron mobility. However, the AFM local oxidation of 4H-SiC for fabrication is still difficult, mainly due to the physical hardness and chemical inactivity of SiC. In this paper, we investigated the local oxidation of 4H-SiC surface using an AFM. We fabricated oxide patterns using a contact mode AFM with a Pt/Ir-coated Si tip (N-type, 0.01-0.025 Ωcm) at room temperature, and the relative humidity ranged from 40 to 50 %. The height of the fabricated oxide pattern (1-3 nm) on SiC is similar to that of typically obtained on Si ($10^{15}\text{-}10^{17}\text{ cm}^{-3}$). We perform the 2-D simulation to further analyze the electric field between the tip and the surface. We demonstrated that a specific electric field ($4 \times 10^7\text{ V/m}$) and a doping concentration ($\sim 10^{17}\text{ cm}^{-3}$) is sufficient to switch on/off the growth of the local oxide on SiC.

Key Words : Atomic force microscopy (AFM), Local oxidation, Silicon carbide, 2-D simulation

1. 서 론

원자현미경(AFM)은 수 마이크로에서 수 나노 스케일에 이르는 미세구조를 분석 가능한 첨단 분석 장비로써 기발표 된 연구들을 보면 분석 장비뿐만 아니라 전자적인 특성을 측정하거나 나노 패턴을 구현하는 등의 장비로써 그 응용분야가 확대되고 있다. 이러한 응용분야의 한가지로써 원자현미경을 이용한 국소산화(Local Oxidation)는 텀과 시료 사이에 전계를 걸어 줌으로써 특정 시료에 나노 스케일의 패턴을 생성시키는 패터닝 기술이다. 현재의 소자 제작에서는 광식각 방법을 이용한 패턴 공정이 널리 사용되고 있다. 이러한 패턴 기술은 단기간 내에 대량의 패턴을 만들 수 있다

는 장점을 갖고 있지만 마스크의 제작에 소모되는 비용과 시간 등의 큰 단점이 존재한다. 이와는 달리 원자현미경을 이용한 패터닝 기술은 마스크가 필요없고, 광식각 패턴 기술에 비해 미세한 패턴을 제조할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 이와 같은 장점 때문에 원자현미경 국소산화는 나노 스케일 반도체 산업에서 주목하고 있는 공정기술 중 하나이다.

탄화규소(SiC)는 높은 열전도와 임계전압 등의 장점을 갖고 고전력, 고온, 고압의 조건에서 동작이 가능한 고에너지점 물질로 현재의 실리콘(Si) 기반의 전력반도체 산업을 대체할 전도유망한 물질 중의 하나이다. 여러 가지 폴리타입 중에서 전자이동도 면에서 가장 유리한 4H-SiC를 기반으로 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 원자현미경을 이용한 SiC의 나노 패터닝은 SiC 물질의 물리적 강도와 화학적인 비활성 때문에 어려움이 보고되고 있다. 이미 Si를 기반으로 국소산화를 성공시키거나 개선시킨 연구는 많이 발표되어 왔다. 예를

1. 광운대학교 전자재료공학과
(서울시 노원구 월계동 447-1)
2. 한국전기연구원 재료응용연구단 고집적전원연구그룹
a. Corresponding Author : smkoo@kw.ac.kr
접수일자 : 2009. 6. 12
심사완료 : 2009. 7. 10

들어, 기관 위에 얇은 Au를 코팅하여 국소산화를 성공하거나, UV광원을 패터닝 할 국소 부위에 조사하여 산화물 증가시켰다는 연구가 보고되고 있다. 하지만 여전히 SiC 기반으로 국소산화 성공시킨 사례는 거의 없다. X. N. Xie 그룹의 연구에서는 SiC의 흑연화(graphitization)로 인하여 일반적인 원자현미경 국소산화에서는 산화가 형성되지 않는다는 보고가 있었고, 그에 따라 바이어스를 약 1000배 이상 길게 인가했을 경우에 산화가 생성되었다는 연구결과가 발표 되었다[1-7].

본 연구에서는 원자현미경 국소산화를 이용하여 4H-SiC 위에 나노 스케일의 패턴 형성을 성공하였다. 그뿐만 아니라 그때의 전계값을 2-D 시뮬레이션을 통하여 비교 분석하였고, 추가적으로 도핑 농도의 조건과 관련된 전계값에 대해서도 분석, 논의하였다.

2. 실험 및 결과 토의

본 연구에서는 습도 40~50 %의 실온에서 원자현미경(Surface Imaging Systems GmbH, 독일)의 contact mode을 이용하여 국소산화를 수행하였고, tapping mode를 이용하여 표면분석을 수행하였다. 이때 사용된 팁은 실리콘(N-type, 0.01~0.025 Ωcm)에 Pt/Ir으로 코팅된 팁으로 탄성계수는 $\sim 3 \text{ N/m}$ 이고, 50~70 kHz의 공진주파수 값을 갖는다.

그림 1은 국소산화의 기본원리를 간략하게 나타낸 개념도이다. 팁은 (-) 바이어스가 흐르는 음극(cathode)의 역할을 하고 기관은 (+) 바이어스가 흐르는 양극(anode)의 역할을 한다. 이때 전계가 형성되면 대기 중의 음이온(OH⁻)들이 양극의 시료 쪽으로 터널링하여 이동하게 된다. 이러한 음이온들이 대기 중의 물 분자와 시료와 동시에 반응하게 되면 연쇄적인 화학반응이 일어나면서 산화물이 형성되게 된다. 산화 패턴을 형성시킨 이후에는 동일한 대기조건에서 시료 표면을 분석하였다. 실험에서 사용된 웨이퍼는 도핑농도 $\sim 10^{15}$ 에서 $\sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 범위의 n-type, p-type 4H-SiC이다. 추가적으로 2-D 시뮬레이션(Atlas, Silvaco Inc.)을 이용하여 전계 분포를 알아보았다.

그림 2는 원자현미경 국소산화를 사용하여 p-type 4H-SiC(도핑 농도 : $\sim 7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) 표면 위에 전압을 증가시키면서 나노 패턴을 형성시킨 topography의 3-D 이미지이다. 가장 좌측부터 5, 7, 9 V 순으로 시료에 전압을 인가하여 패턴을 형

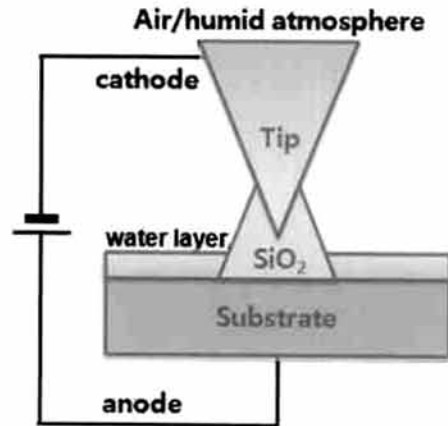


그림 1. 국소산화의 개념도.

Fig. 1. The Schematic of Local oxidation using an atomic force microscopy.

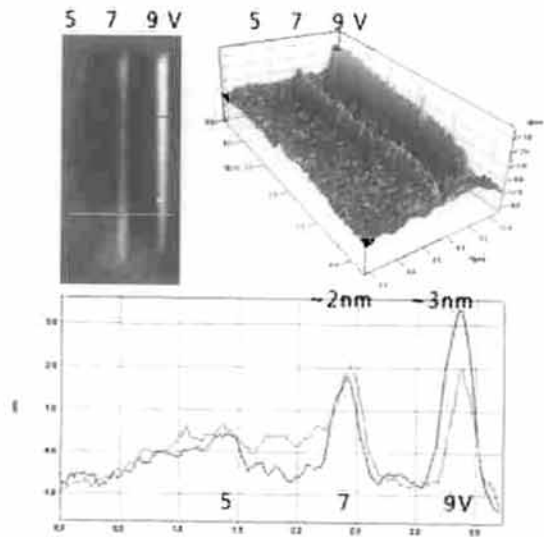


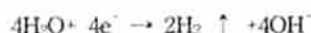
그림 2. p-type 4H-SiC 위에 원자현미경을 이용해 전압 (5, 7, 9 V)에 따라 형성된 패턴의 3-D 그림.

Fig. 2. The 3-D Schematic of oxide patterns on a p-type 4H-SiC using an atomic force microscopy at different voltages (5, 7, 9 V).

성하였다. 5 V를 인가했을 경우, 약 1 nm 미만의 높이로 산화 패턴이 형성되었다. 7 V를 인가했을 경우의 산화 패턴 높이는 약 2 nm이었고 9 V를

인가한 경우, 약 3 nm 높이의 산화 패턴이 생성되었다. 인가한 전압이 증가할수록 산화패턴의 높이가 증가함을 알 수 있다.

전압이 증가되면 시료 표면과 팁의 끝단이 맞닿는 부분의 전계가 증가하게 되는데, 전계가 증가하면 팁과 시료사이에서 음이온(OH⁻)의 터널링이 증가하게 되고, 다음과 같은 화학반응이 가속화된다. 전계가 걸린 상태에서 팁에서의 화학반응은 다음과 같다.



연쇄적인 반응으로 다음과 같이 수소 이온(H₂)과 수산화 이온(OH⁻)의 결합으로 H₂O가 생성된다.



생성된 물은 샘플 표면에서 다음과 같은 화학반응을 일으키며 산화물을 생성하게 된다.



또한 터널링 된 음이온(OH⁻)들은 이러한 화학반응을 더욱 활발하게 만들어 더 높은 산화 패턴을 만들게 된다.

그림 3은 각각 도핑이 다른 SiC 기판 위에 9V의 일정한 전압을 인가했을 때, 생성된 산화 패턴의 높이를 나타낸 그래프이다. 약 $7.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 의 도핑 농도 이상에서 패턴이 형성되는 것을 확인할 수 있었다.

그림 4는 2-D 시뮬레이션을 이용하여 9V의 일정한 인가전압과 일정 도핑 범위($10^{16} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)에서 시료 표면의 전계값을 비교한 그래프이다. 도핑 농도가 10^{16} cm^{-3} 에서 10^{18} cm^{-3} 의 범위로 증가할 때, Si의 경우는 시료 표면에서 일정한 전계값(약 $5 \times 10^7 \text{ V/m}$)을 볼 수 있지만, p-type SiC의 경우는 Si에 비해 증가함을 알 수 있었다. 실제 국소산화의 결과를 보더라도 p-type 4H-SiC는 약 $9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 의 도핑 농도 이상에서는 산화패턴이 잘 형성됨을 보였다. 저농도 기판에서는 SiC가 Si보다 고에너지밴드갭이므로 그만큼 캐리어 이동에 필요한 에너지가 크기 때문에 전계가 낮게 걸리고 고농도 기판에서는 그 효과가 감소하기 때문에 전계값이 유사함을 알 수 있다.

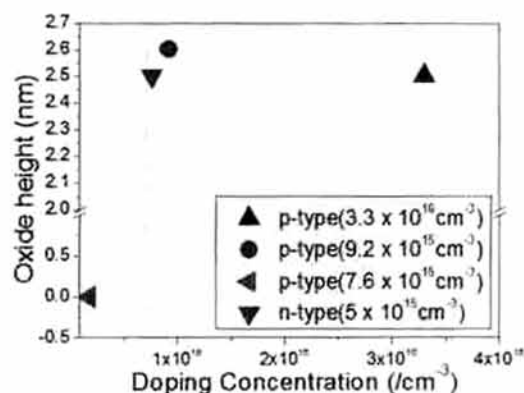


그림 3. $10^{15} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 의 도핑농도를 갖는 SiC에 실험적으로 생성된 산화 패턴의 높이를 나타낸 그래프.

Fig. 3. The experimental values of the oxide height on the SiC surfaces in the range of doping concentration from 10^{15} cm^{-3} to 10^{16} cm^{-3} .

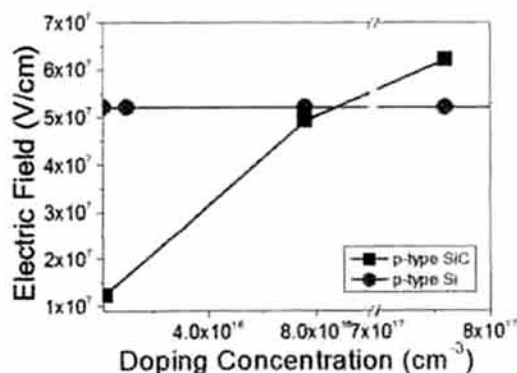


그림 4. p-type SiC (도핑농도 : $10^{16} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)에서 시뮬레이션을 이용한 전계분포 그래프.

Fig. 4. The simulated electric field distribution on the p-type surface in the range of doping concentration ($10^{16} \sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$).

그림 5는 팁과 기판 사이의 전계분포를 2D 시뮬레이션을 사용하여 나타낸 단면도이다. 팁은 실제 실험에서 코팅한 물질과 동일한 Pt로 정의하였다. 그림 5-(a)는 저농도 기판(10^{15} cm^{-3})에서의 전계분포를 나타내었고, 그림 5 (b)는 기판은 고농도 기판(10^{17} cm^{-3})에서의 전계분포를 나타내었다. 팁과 기판 사이에 2 nm의 자연산화막(native oxide

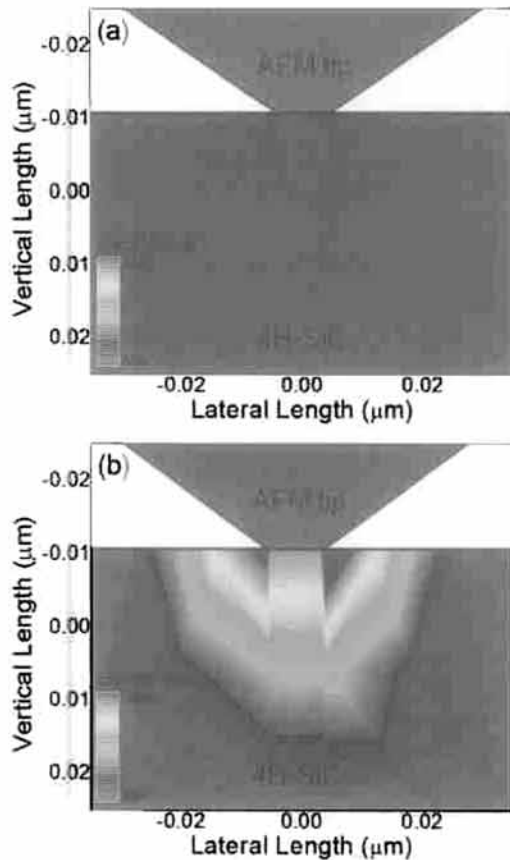


그림 5. 팁과 (a) $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (b) $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 의 도핑농도를 갖는 p-type SiC에서의 2D 시뮬레이션 전계분포 단면도.

Fig. 5. The 2D cross-sectional simulation of the electric field distribution on the tip and the p-type 4H-SiC ((a) $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ (b) $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$).

layer)을 갖는 구조를 고려하였다. 기판에 +10 V의 바이어스를 가하였을 때, 팁과 맞닿는 기판 표면에서의 전계값이 최대값을 갖는 것을 확인하였다. 전계가 최대치를 갖는 영역에서부터 앞에서 설명한 OH의 터널링이 증가하게 되고, 그에 따라 화학반응이 발생한다. 이러한 전계 효과에 의해 산화물이 생성됨을 알 수 있다.

3. 결론

Si 기반의 원자현미경 국소산화 연구는 현재까지 활발히 발표되어 왔다. 고에너지벤드랩 물질인

4H-SiC 기반의 원자현미경 국소산화 연구는 물질의 특성상 성공 사례가 거의 없었다. 본 연구에서는 특정 도핑 농도와 전계 조건을 연구, 분석하여 4H-SiC에 원자현미경 국소산화를 성공하였다. 추가적으로 2-D 시뮬레이션을 이용하여 전계와 기판 도핑 농도가 국소산화에 미치는 영향을 분석하였다. 전압에 비례하여 전계가 높아짐에 따라 팁과 기판 사이의 화학작용이 증가하게 되므로 결과적으로 산화 높이가 증가함을 보였다. 약 $9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 이상에서의 도핑 농도값을 갖는 SiC 기판에서 약 $4 \times 10^7 \text{ V/m}$ 이상의 문턱 전계값을 가해주면 산화패턴이 생성됨을 보였다. 아직 SiC의 원자현미경 국소산화 연구가 활발히 진행되지 않는 현 상황에서, 전계와 산화패턴 생성 메커니즘의 연구는 나노 소자 공정을 위한 중요한 역할을 할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 논문은 산업자원부가 지원하는 국가 반도체 연구사업인 "시스템집적반도체기반기술개발사업 (시스템IC2010)"을 통해 개발된 결과임을 밝힙니다.

참고 문헌

- [1] J. S. Hwang, Z. S. Hu, Z. Y. You, T. Y. Lin, Chin L. Hsiao, and L. W. Tu, "Local oxidation of InN and GaN using an atomic force microscope", *Nanotechnology*, Vol. 17, p. 839, 2006.
- [2] J. S. Hwang, Z. Y. You, S. Y. Lin, Z. S. Hu, C. T. Wu, C. W. Chen, and K. H. Chen, "Effect of gold coating on local oxidation using an atomic force microscope", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 86, p. 161901, 2005.
- [3] J. S. Hwang, Z. S. Hu, T. Y. Lu, L. W. Chen, S. W. Chen, T. Y. Lin, C.-L. Hsiao, K.-H. Chen, and L.-C. Chen, "Photo-assisted local oxidation of GaN using an atomic force microscope", *Nanotechnology*, Vol. 17, p. 3299, 2006.
- [4] X. N. Xie, H. J. Chung, C. H. Sow, and A. T. S. Wee, "Native oxide decomposition and local oxidation of 6H-SiC (0001) surface by

- atomic force microscopy", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 84, p. 4914, 2004.
- [5] Howell, R. S., Buchoff, S., Van Campen, S. McNutt, T. R. Ezis, A., Nechay, B., Kirby, C. F., Sherwin, M. E., Clarke, R. C., and Singh, R., "A 10-kV large-area 4H-SiC power DMOSFET with stable subthreshold behavior independent of temperature", *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 55, No. 8, p. 1807, 2008.
- [6] E. Dubois, P. A. Fontaine, and D. Stievenard, "Characterization of scanning tunneling microscopy and atomic force microscopy-based techniques for nanolithography on hydrogen-passivated silicon", *J. App. Phys.*, Vol. 84, No. 4, p. 1776, 1998.
- [7] P. Mazur, M. Grodzicki, S. Zuber, and A. Ciszewski, "Current patterning of 6H-SiC(0 0 1) surface by AFM", *Appl. Surface Science*, Vol. 254, p. 4332, 2008.