Atomic Force Microscopy을 이용한 4H-SiC의 Local Oxidation

조영득[1], 방욱[2], 김상철[2], 김남균[2], 구상모[1*]
[1]광운대학교, [2]한국전기연구원 (KERI)

Local oxidation of 4H-SiC using an atomic force microscopy

Yeong-deuk Jo[1], Wook Bahng[2], Sang-cheol Kim[2], Nam-kyun Kim[2], and Sang-mo Koo[1*]
[1]Kwangwoon Univ., [2]Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

*Corresponding author : smkoo@kw.ac.kr

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}~10^{17} cm^{-3}). We perform the 2-D simulation to further analyze the electric field between the tip and the surface. Whereas the simulated electric field on Si surface is constant (5 x 10^7 V/m), the electric field on SiC surface increases with increasing the doping concentration from ~10^{15} to ~10^{17} cm^{-3}. We demonstrated that a specific electric field (4 x 10^7 V/m) and a doping concentration (~10^{17} cm^{-3}) is sufficient to switch on/off the growth of the local oxide on SiC.

Key Words : Atomic Force Microscopy (AFM), Local oxidation, Oxide pattern, Silicon Carbide, 2-D Simulation

1. 서 론

Atomic Force Microscopy (AFM)은 수 마이크로에서 수 나노 스케일에 이르는 미세구조를 분석 가능한 첨단의 분석 장비로써 기발표 된 연구들을 보면 분석 장비뿐만 아니라 전자적인 특성을 측정하거나 나도 패턴을 구현하는 등의 장비로써 그 응용분야가 확대되고 있다. 이러한 응용분야의 한가지로써 AFM을 이용한 Local Oxidation (LO)은 팁과 시료 사이에 전계를 걸어 줌으로써 특정 시료에 나노 스케일의 패턴을 생성시키는 패터닝 기술이다. 이러한 패터닝 기술은 나노 스케일의 반도체 산업에서 주목하고 있는 공정기술 중 하나이다.

실리콘 카바이드 (SiC)는 높은 열전도와 임계전압 등의 장점을 갖고 고전력, 고온, 고압의 조건에서 동작이 가능한 고에너지갭 물질로 현재의 실리콘 (Si) 기반의 전력반도체 산업을 대체할 전도유망한 물질 중의 하나이다. 그 중에서 전자이동도 면에서 가장 유리한 4H-SiC를 기반으로 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 AFM을 이용한 실리콘 카바이드의 나노 패터닝은 실리콘 카바이드 물질의 물리적 강도와 화학적인 비활성적인 특성으로 어려움이 보고되고 있다. 이에 따라, 본 논문에서는 4H-SiC 위에 나노 높이의 패턴을 형성 시켰고, 나노 패턴이 형성되었을 때, 2-D 시뮬레이션을 통하여 적정 전계값을 비교 분석하였고, 추가적으로 도핑농도의 조건과 관련된 전계값에 대해서도 분석하였다.

2. 실험 및 결과 토의

본 연구에서는 습도 40~50%의 실온에서 AFM (Surface Imaging Systems Gmbh, 독일)의 contact mode을 이용하였고, Pt/Ir으로 코팅된 실리콘 캔틸레버 (N-type, 0.01~0.025 Ωcm)를 사용하여 LO를 수행하였다. 패턴을 형성시킨 이후에는 동일한 대기조건에서 tapping mode를 이용하여 시료 표면을 분석하였다. 실험에서 사용된 웨이퍼는 도핑농도 ~10^{15}에서 ~$10^{16}$$cm^{-3}$ 범위의 n-type, p-type 4H-SiC이다. 추가적으로 2-D 시뮬레이션 (Atlas, Silvaco Inc.)을 이용하여 시료 표면에 흐르는 전계의 분포를 알아보았다.

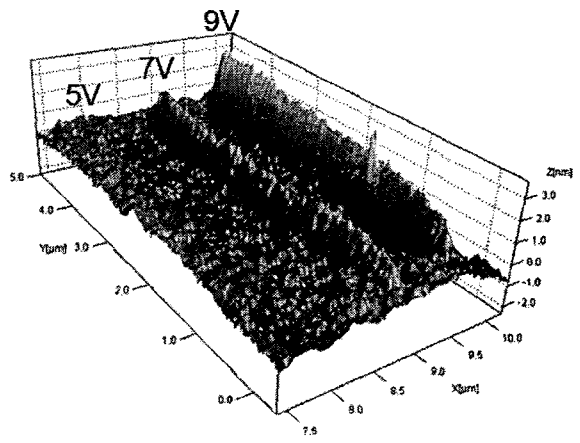

그림 1. p-type 4H-SiC 위에 AFM을 이용해 전압 (5, 7, 9V)에 따라 형성된 패턴의 3-D 그림.

FIG. 1. The 3-D Schematic of oxide patterns on a p-type

4H-SiC using an atomic force microscopy at different voltages (5, 7, 9V).

그림 1은 AFM LO를 사용하여 p-type 4H-SiC (도핑 농도 : ~ 7 x 10^{16} cm^{-3}) 표면 위에 전압을 증가시키면서 나노 패턴을 형성시킨 topography의 3-D 이미지이다. 가장 좌측부터 5, 7, 9V 순으로 시료에 전압을 인가하여 패턴을 형성하였다. 5V를 인가했을 경우, 약 1nm 미만의 산화 패턴 높이로 인해 잘 보이진 않지만 7V를 인가했을 경우의 산화 패턴 높이는 약 2nm이었고 9V를 인가한 경우, 약 3nm 높이의 산화 패턴이 생성되었다. 인가한 전압이 증가할수록 산화패턴의 높이가 증가함을 알 수 있다. 전압이 증가되면 시료 표면과 캔틸레버의 끝단이 맞닿는 부분의 전계가 증가하게 되는데, 전계가 증가하면 캔틸레버와 시료사이에서 전자의 터널링이 증가하게 되고 다음과 같은 화학반응이 활발해진다 ($SiC+ 2H_2O \rightarrow SiO_2 + 4H^+ + C^{4+}$).

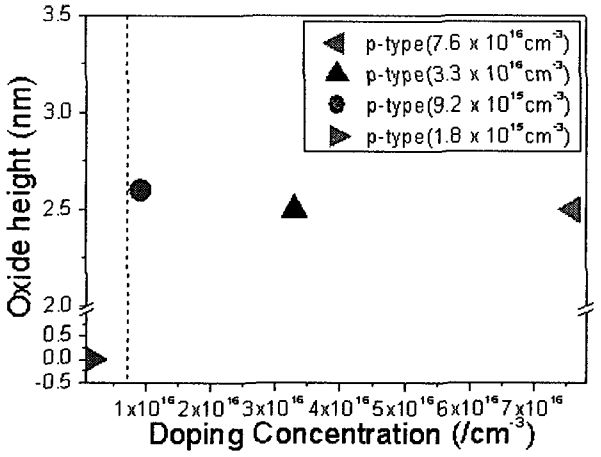

그림 2. 10^{15} ~10^{16} cm^{-3}의 도핑농도를 갖는 SiC에 실험적으로 생성된 산화 패턴의 높이를 나타낸 그래프.

FIG. 2. 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}.

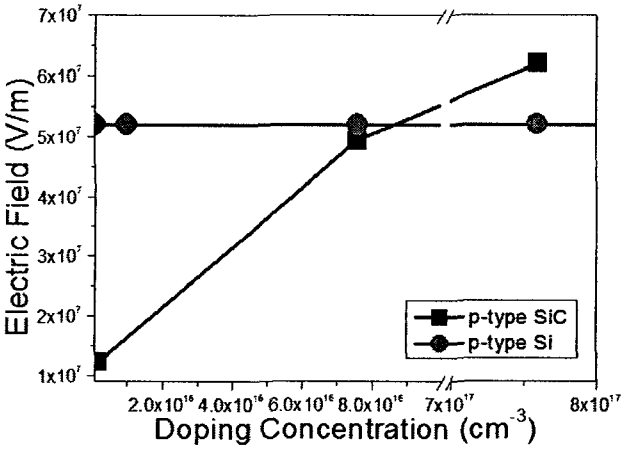

그림 3. 도핑농도 범위 (~10^{16} ~10^{18} cm^{-3})의 p-type의 시료 표면에서 시뮬레이션 된 전계분포를 나타낸 그래프.

FIG. 3. The simulated electric field distribution on the p-type surface in the range of doping concentration (~10^{16} ~10^{18} cm^{-3}).

그림 2는 각각 도핑이 다른 SiC 기판 위에 9V의 일정한 전압을 인가했을 때, 생성된 산화 패턴의 높이를 나타낸 그래프이다. 약 9 x 10^{15} cm^{-3}의 도핑 농도이상에서 패턴이 형성되는 것을 확인할 수 있었다.

그림 3은 2-D 시뮬레이션을 이용하여 9V의 일정한 인가전압과 일정 도핑 범위 (~10^{16} ~10^{18} cm^{-3})에서 시료 표면의 전계값을 비교한 그래프이다. 그림 3은 p-type SiC와 Si의 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 x 10^7 V/m)을 볼 수 있지만, p-type SiC의 경우는 Si에 비해 증가함을 알 수 있었다. 실제 LO의 결과를 보더라도 p-type 4H-SiC는 약 9 x 10^{15} cm^{-3}의 도핑 농도이상에서는 산화패턴이 잘 형성됨을 보였다. 이와 같은 결과는 SiC가 Si보다 도핑 농도에 따라 전계값이 민감하게 반응하여 문턱 전계값 (약 4 x 10^7 V/m)의 범위에서 벗어나기 때문이라는 것을 보여준다.

3. 결 론

일반적으로 기발표 된 AFM LO의 산화패턴은 전압, 습도, 온도 등의 조건에서 생성되지만, 본 연구에서는 2-D 시뮬레이션을 이용하여 SiC에서의 산화 패턴은 전압에 비례하여 산화 높이가 증가함을 보였고, SiC 시료 위에서는 약 9 x 10^{15} cm^{-3}의 도핑 농도와 약 4 x 10^7 V/m의 문턱 전계값 이상에서 패턴이 생성됨을 보였다. AFM LO를 이용하여 4H-SiC 표면 위에 나노 패터닝을 구현했고, 이것은 나노 소자 공정을 위한 중요한 역할을 할 수 있을 것이다.

감사의 글

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

참고 문헌

[1] Zhan Shuo Hu Jih Shang Hwang, Zen Yu You, Tai Yuan Lin, Chin Lian Hsiao and LiWei Tu, Nanotechnology, Vol. 17, p.859-863, 2006.

[2] Howell, R.S. Buchoff, S. Van Campen, S. McNutt, T.R. Hearne, H. Ezis, A. Sherwin, M.E. Clarke, R.C. and Singh, R., IEEE Transactions on electron devices, Vol. 55, No. 8, 2008.

[3] E. Dubois P. A. Fontaine, and D. Stievenard, Journal of Applied Physics, Vol. 84, No. 4, 1776-1781, 1998.