

실리콘에 Local Anodic Oxidation으로 만든 산화물의 영향

정승우^{1,2}, 변동욱¹, 신명철¹, Michael A. Schweitz¹, 구상모¹ 

¹ 광운대학교 전자재료공학과 반도체나노소자연구실

² 나고야 공업대학 전기기계공학과

Influence of Oxide Fabricated by Local Anodic Oxidation in Silicon

Seung-Woo Jung^{1,2}, Dong-Wook Byun¹, Myeong-Cheol Shin¹, Michael A. Schweitz¹, and Sang-Mo Koo¹

¹ Semiconductor Nano Device Laboratory, Department of Electronic Materials Engineering,

Kwang-woon University, Seoul 01897, Korea

² Department of Electrical and Mechanical Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya 466-8555, Japan

(Received March 30, 2021; Revised April 26, 2021; Accepted April 27, 2021)

Abstract: In this work, we fabricated oxide on an n-type silicon substrate through local anodic oxidation (LAO) using atomic force microscopy (AFM). The resulting oxide thickness was measured and its correlation with load force, scan speed and applied voltage was analyzed. The surface oxide layer was stripped using a buffered oxide etch. Ohmic contacts were created by applying silver paste on the silicon substrate back face. LAO was performed at approximately 70% humidity. The oxide thickness increased with increasing the load force, the voltage, and reducing the scan speed. We confirmed that LAO/AFM can be used to create both lateral and, to some extent, vertical shapes and patterns, as previously shown in the literature.

Keywords: Silicon, Local anodic oxidation, Atomic force microscopy

1. 서론

재료의 표면 특성을 분석하는 atomic force microscopy (AFM)은 크게 마이크로미터부터 적게는 수 나노미터까지 측정 가능한 장비로 널리 알려져 있다. AFM에는 contact 모드와 non-contact 모드가 있으며, 두 가지 모드는 지정된 영역의 스캔이 가능하다. 각 모드에서는 세부적으로 추가 모드가 존재하는데 재료 위에 산화물을 형성시키거나, scratch를 내는 lithography 모드와 재료에 전압을 가해 측정하는 scanning kelvin probe microscope (SKPM)

모드가 있다. Scratch 모드는 다이아몬드 등 높은 강도의 코팅이 된 tip을 이용해 샘플의 표면을 긁는 방식으로, 수십 나노미터의 트렌치 또는 홈을 제작할 수 있어 나노 도트, 나노 와이어와 같은 나노 장치에 사용될 가능성이 있다 [1]. SKPM은 일반적으로 샘플과 금속의 전위 차이를 측정하여 일함수를 구하는 것으로 알려졌으며 전자의 수송 특성을 이해하거나 이종 구조, 트랜지스터 접합, 태양전지 등의 분석에 사용된다 [2,3]. 산화물의 형성이 가능한 lithography 모드는 local anodic oxidation (LAO)라고 하며 기계적·열적·전기적인 방법으로 샘플의 표면에 수 나노의 미세 패턴을 제작 가능하다. 현재 소자는 제작 시에 패턴 마스크의 사용이 필요하여 이를 만드는 데 소요하는 시간, 비용 등의 단점을 가지고 있다. 하지만 LAO는 기존 반도체 공정에서 마스크를 만들어야 하는 제작 공정 시간과 비용도 감소한다는 장점을 가지고 있다. 이와 같은 이유

✉ Sang-Mo Koo; smkoo@wk.ac.kr

Copyright ©2021 KIEEME. All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

로 나노 스케일 공정에 있어 중요한 기술 중 하나로 주목받고 있다 [4]. 하지만 산화물의 형성에는 여러 가지 요소들이 영향을 미치며 그로 인해 공정에 어려움을 겪는데 대표적인 요소는 tip의 load force, scan speed, 그리고 샘플과 tip에 가해 주는 전압, 샘플 주변의 습도가 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 [5]. 본 연구에서는 나노 스케일 공정에서 중요한 기술인 LAO를 통해 실리콘 위에 산화물을 형성시켜 load force, scan speed, 전압이 산화물의 높이에 미치는 영향에 대해 실험 및 분석을 진행했다.

2. 실험 방법

다이싱 된 실리콘 웨이퍼에 back ohmic을 형성하기 위하여 back face에 scratch를 내었다. 그 후 particle과 먼지 등 표면에 존재할 오염물 제거를 위해 아세톤, 메탄올, Di-water과 황산과 과산화수소를 4:1 비율로 섞은 sulfuric acid peroxide mixture (SPM)을 통해 세척했으며, LAO는 샘플 표면에 native SiO₂의 여부에 따라 증착에 영향을 미칠 가능성이 있으므로 6:1 비율인 buffered oxide etch (BOE) 용액 세척을 진행하여 공기 중에서 형성된 native SiO₂ 제거를 진행했다. 클리닝을 실시한 후 scratch가 난 back face에 Ag paste 얇게 도포하여 전류가 흐를 수 있게 back ohmic을 형성했다. 준비된 실리콘 시료에 AFM 장비의 contact 모드를 이용해 LAO 공정을 진행했으며, load force와 전압에 따라 형성되는 산화물의 높이에 대해 AFM scanning을 이용해 분석했다. 산화물은 전류가 흐를 수 있게 Pt 코팅이 된 AFM tip (PR-E75)을 사용하였다. LAO 실험은 AFM의 scanning probe microscopy controller를 통해 전압을 인가했고 실리콘 샘플에 5~10 V의 전압이 가해진다. 본 실험에서는 AFM의 scanning probe microscopy controller를 이용해 전압

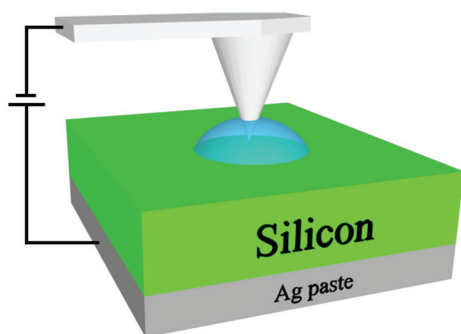


Fig. 1. Schematic method of local anodic oxidation.

을 인가하여 load force, scan speed, 전압에 따라 샘플의 표면에 형성되는 산화물의 높이에 미치는 영향을 집중 분석했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Voltage

실리콘 위 LAO를 통해 증착된 산화물은 AFM에서 바꿀 수 있는 변수 중에서 특히 load force, scan speed, 전압이 산화물 높이에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 그림 2(a)는 실리콘 위에 voltage를 5, 8, 10 V로 올리며 LAO를 통해 나노 패턴을 형성시켰으며, 그림 2(b)는 산화물에 cutline을 그려 얻은 profile을 통해 그 높이와 두께 차이를 볼 수 있다. 산화물의 높이와 두께는 voltage이 5 V에서 8 V가 될 때 약 0.4 nm가 커지고, 10 V에서는 0.8 nm 이상 더 커지는 것이 확인된다. 그림 2(c)에서 전압이 바뀔 때 산화물의 높이와 두께를 에러바와 같이 그래프로 나타

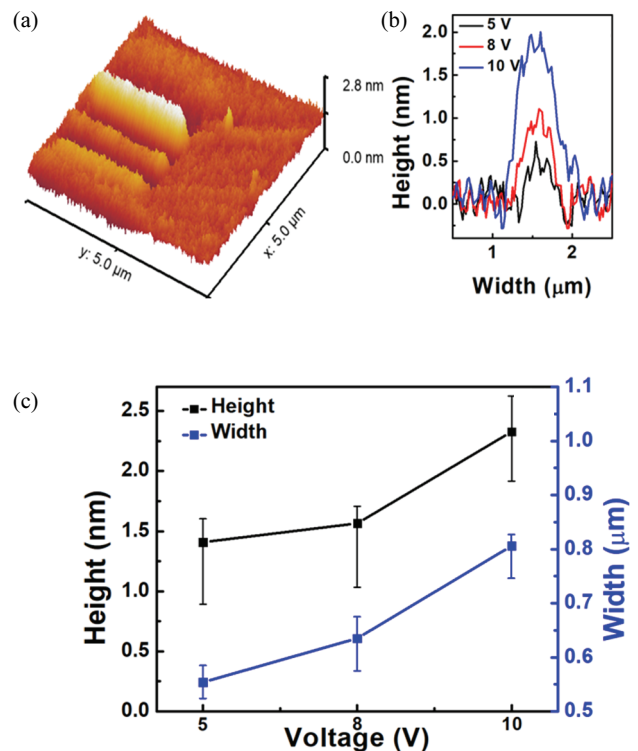
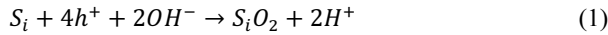


Fig. 2. AFM images and profiles of oxide (a) AFM 3D image of applied voltage, (b) oxide shape, and (c) oxide height and width of voltage by LAO.

내었다. 에러바는 LAO를 통해 여러 번 형성시킨 산화물에 cutline을 그렸을 때 평균값을 기준으로 산화물의 최대, 최소 높이를 나타내며 load force, scan speed, 전압이 바뀔 때 따라 산화물의 높이에 변화가 있음을 나타낸다. N-type 실리콘에 LAO가 진행되고 샘플에 5 V를 인가하였을 때 ~1.4 nm의 산화패턴이 형성되었으며, 8 V가 인가됐을 때 ~1.6 nm, 10 V가 인가되었을 때는 ~2.3 nm로, 인가되는 voltage이 커질수록 산화물의 높이가 더 커지는 것을 알 수 있다. 이는 AFM tip과 샘플 사이에 적절한 전압이 인가되면, 물을 H^+ 와 OH^- 이온으로 분리시키고, OH^- 이온들을 샘플 쪽으로 유도하여 샘플의 표면을 산화시킨다 [6]. 이를 통해 실리콘은 아래의 전기화학식으로 SiO_2 로 변형될 수 있다는 점을 확인할 수 있다.



따라서 전압이 커질수록 더 많은 OH^- 이온과 물 원자가 화학반응을 일으켜 산화물의 높이가 커지는 것으로 추정된다.

3.2 Load force 와 voltage

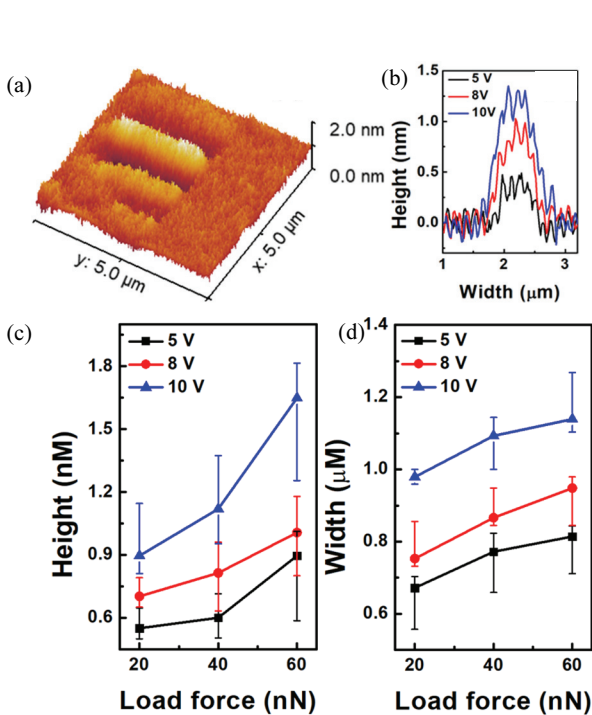


Fig. 3. AFM patterns and profiles on sample. (a) Described 3D image, (b) load force and voltage dependent oxide profile, and (c), (d) difference load force and voltage.

그림 3(a)는 실리콘 표면에 tip load force를 60 nN으로 5 V, 8 V, 10 V의 전압을 가했을 때 산화물이 형성되었음을 보여준다. 또한, 산화물의 높이가 증가하는 것을 그림 3(b)의 profile을 통해서 확인할 수 있다. 그림 3(c)와 (d) 전압이 5, 8, 10 V로 증가함에 따라 산화물의 높이가 크게 형성되는데, load force가 20 nN일 때 전압이 5 V에서 10 V로 증가할 때 ~0.5 nm에서 ~0.9 nm로, 40 nN일 때, ~0.7 nm에서 ~1 nm로, 60 nN일 때, ~0.9 nm에서 ~1.6 nm로 증가함을 볼 수 있다. 이는 전압이 증가하면서 H^+ 와 OH^- 이온의 분리가 많이 되며, load force가 증가하면서 tip과 샘플이 가까워짐에 따라 OH^- 이온이 더 쉽게 샘플의 표면으로 이동하여 산화가 많이 되는 것으로 판단된다.

3.3 Scan speed

그림 4는 실리콘 위에 scan speed를 ~8.4, ~6.3, ~4.2 $\mu\text{m/s}$ 로 LAO를 통해 산화물을 형성시켰으며, cutline을 그려 추출한 profile을 통해 scan speed에 따른 크기 차이를 볼 수 있다. N-type 실리콘에 LAO를 진행했을 때 scan speed가 점차 느려짐에 따라 ~8.4 $\mu\text{m/s}$ 에서 ~1.2 nm,

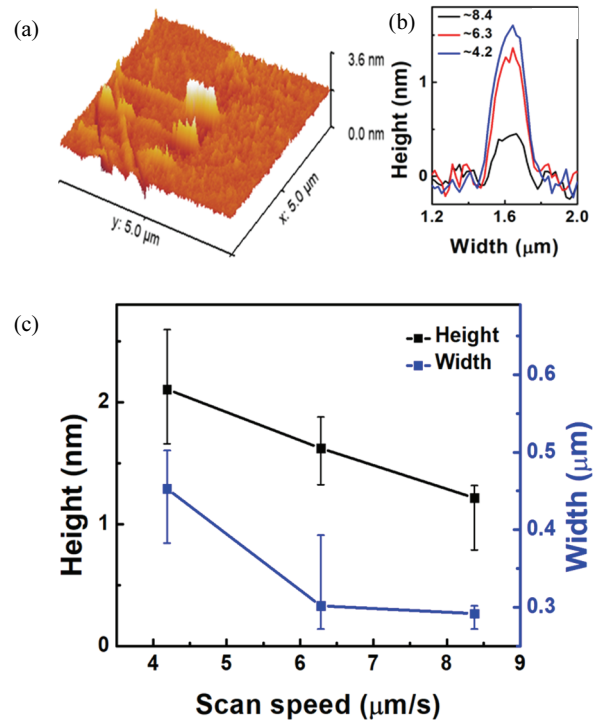


Fig. 4. Scan speed dependence of oxide nanopatterns deposited by LAO. (a) AFM 3D schematic, (b) oxide shape by scan speed, and (c) height, width versus scan speed with error bar.

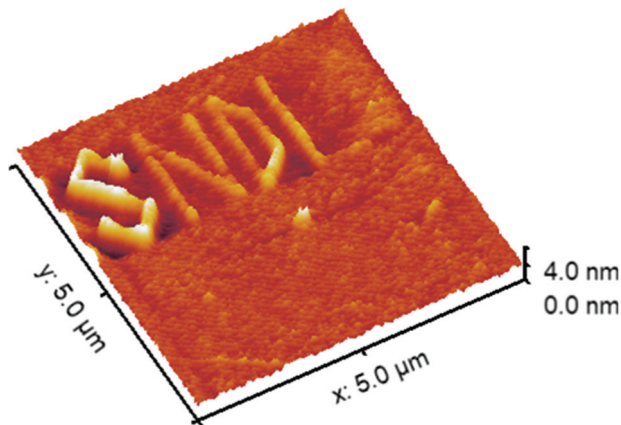


Fig. 5. Example different pattern of formed oxide on silicon by LAO.

~6.3 $\mu\text{m/s}$ 에서 ~1.6 nm로 산화물의 높이가 커졌으며, ~4.2 $\mu\text{m/s}$ 가 되었을 때 ~2.1 nm로 더 큰 높이의 산화물이 형성된 것을 확인할 수 있다. 또한, 앞선 실험들 로 LAO를 통해 산화물을 형성한 후 양옆에 홈이 파인 이유는 화학 반응에 의해서 OH^- 와 H^+ 가 분해되고 OH^- 이온이 실리콘 표면을 산화시키며 실리콘 원소들이 같이 결합이 되어 구덩이같이 형성되며 이는 산화물의 높이가 크고, 밀접할수록 더 깊게 파이는 것으로 생각할 수 있다.

그림 5는 LAO를 이용해 산화물 증착 시 패턴으로 사용이 가능한 예시를 보여준다. N-type 실리콘 위에 형성시켰으며, scan speed는 ~8.4 $\mu\text{m/s}$, load force 40 nN, 10 V의 전압과 약 17.3°C 온도, 그리고 48%의 습도에서 진행되었다. AFM을 통한 LAO는 스캔한 지점에서 좌표를 지정하여 tip을 이동할 수 있으며 좌표 지정에 따라 다양한 패턴의 제조가 가능하다. 이를 통해 세로로 그리는 LAO를 응용하여 구조를 가지는 패턴 또한 구현이 가능한 것을 설명할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 실리콘 기판 위에 AFM을 이용하여 LAO를 진행하였다. 실리콘 기판은 N 타입 기판을 사용하였으며 contact 모드로 샘플에 5, 8, 10 V의 전압과 tip에 ~8.4, ~6.3, ~4.2 $\mu\text{m/s}$ 의 scan speed, 20, 40, 60 nN의 load force 변화를 주며 화학반응을 통해 산화물을 형성하였다. 전압이 10 V로 증가함에 따라 산화물은 ~2.3 nm의 높이

로 형성되었으며, load force와 전압이 같이 증가할 때 산화물의 높이는 ~1.7 nm로 형성되었다. 또한, scan speed가 ~4.2 $\mu\text{m/s}$ 일 때 산화물은 ~2.1 nm의 높이로 형성되는 것을 확인하였다. 이는 load force와 scan speed, 전압이 물의 H^+ 와 OH^- 이온을 더 많이 분리시키고 OH^- 이온이 샘플 표면으로 이동하는 데 영향을 주게 되면서 산화물의 높이가 증가하는 것으로 생각된다. 이를 통해 실리콘 위에 형성된 산화 패턴의 높이를 조건에 따라 조절할 수 있는 것이 확인되었다.

ORCID

Sang-Mo Koo

<https://orcid.org/0000-0002-9827-9219>

감사의 글

This work was supported by the Excellent researcher support project of Kwangwoon University in 2021 and the KETEP Global Education Program (20194010000050). The authors thank Prof. Ichimura at Nagoya Institute of Technology for allowing Research-Visit collaboration of graduate students.

REFERENCES

- [1] X. Jiang, G. Wu, J. Zhou, S. Wang, A. A. Tseng, and Z. Du, *Nanoscale Res. Lett.*, **6**, 518 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-518>]
- [2] M.G.Z. Khorasani, D. Silbernagl, D. Platz, and H. Sturm, *Polymers*, **11**, 235 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11020235>]
- [3] M. Salerno and S. Dante, *Materials*, **11**, 951 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11060951>]
- [4] J. H. Lee, J. J. Ahn, and S. M. Koo, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 294 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2012.25.4.294>]
- [5] X. Wang, B. Theogene, H. Mei, J. Zhang, C. Huang, X. Ren, and M. Xu, *Ferroelectrics*, **549**, 70 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1080/00150193.2019.1592545>]
- [6] A. J. Ulrich and A. D. Radadia, *Nanotechnology*, **26**, 465201 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/26/46/465201>]