

비접촉 SPL기법을 이용한 단결정 실리콘 웨이퍼 표면의 극초단파 펄스 전기화학 초정밀 나노가공

이정민*, 김선호⁺, 김택현⁺⁺, 박정우⁺⁺⁺

(논문접수일 2011. 05. 04, 수정일 2011. 07. 18, 심사완료일 2011. 07. 20)

Nanomachining on Single Crystal Silicon Wafer by Ultra Short Pulse Electrochemical Oxidation based on Non-contact Scanning Probe Lithography

Jeong Min Lee*, Sun Ho Kim⁺, Tack Hyun Kim⁺⁺, Jeong Woo Park⁺⁺⁺

Abstract

Scanning Probe Lithography is a method to localized oxidation on single crystal silicon wafer surface. This study demonstrates nanometer scale non contact lithography process on (100) silicon (p-type) wafer surface using AFM(Atomic force microscope) apparatuses and pulse controlling methods. AFM-based experimental apparatuses are connected the DC pulse generator that supplies ultra short pulses between conductive tip and single crystal silicon wafer surface maintaining constant humidity during processes. Then ultra short pulse durations are controlled according to various experimental conditions. Non contact lithography of using ultra short pulse induces electrochemical reaction between micro-scale tip and silicon wafer surface. Various growths of oxides can be created by ultra short pulse non contact lithography modification according to various pulse durations and applied constant humidity environment.

Key Words : Atomic force microscope(원자현미경), Oxidation(산화), Silicon oxide(실리콘 산화물), Electrochemical process(전기화학적 공정), Pulse(펄스)

1. 서론

최근 나노 및 마이크로 단위를 기초로 하는 과학기술들이 발달함에 따라 정밀한 가공 기술의 개발을 위해 나노 단위의 가공 방법이 필요하게 되었다. 대표적인 나노 및 마이크로 단위의 가공방법은 전자 빔(Electron beam lithography)⁽¹⁾방법, X-ray(X-ray lithography)⁽²⁾방법 같이 빔을 이용하여 나노 단위의 가공에 관한 연구가 진행 중이며⁽³⁾, 미세 탐침을 사용하여 대상물

표면의 마이크로 단위 이하 면적이 측정 가능한 SPM(Scanning probe micro scope)⁽⁴⁾을 이용하여 가공하는 방법이 있다. SPM은 크게 AFM(Atomic force microscope) 과 STM(Scanning tunneling microscope)이 있는데 이 기기들을 이용하여 마이크로 / 나노 단위의 구조물을 생성하는 방법을 SPL(Scanning probe lithography)이라고 한다⁽⁵⁾. SPL은 일반적으로 반도체 및 금속 표면에 전도성이 부여된 탐침과 대상물 사이에서 전기 화학적 반응을 통해 정밀한 나노 단위의 산화물을 가공 할 수

*+ 조선대학교 일반대학원 첨단부품소재공학과(정밀기계설계공학전공)

++ 조선대학교 기계설계공학과

+++ 교신저자, 조선대학교 기계설계공학과 (jwoopark@chosun.ac.kr)

주소: 501-759 광주광역시 동구 서석동 375번지

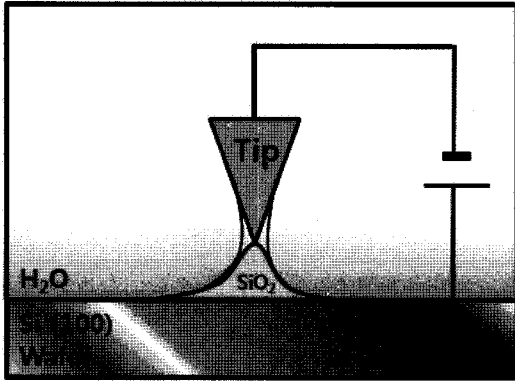


Fig. 1 Principle of electrochemical lithography

있다는 장점이 있다.

Fig. 1과 같이 현재 탐침과 대상물 표면과의 물리적 접촉을 통해 표면을 측정하는 SPM의 하나인 AFM을 이용한 SPL기법은 기본적으로 일정 습도를 유지한 상태에서 탐침과 웨이퍼에 전류를 통하게 한다. 이때 비전도성을 띠는 단결정 실리콘 웨이퍼 표면에 전류가 통하기 위해 매개물인 H₂O가 필요하므로 일정 습도를 유지한 상태에서 SPL을 실시한다. 이때 웨이퍼 표면에서 다음과 같은 화학적 반응을 통해 실리콘 산화물을 웨이퍼 표면에 생성 할 수 있다.



생성된 산화물은 전압 및 주파수 등 전류의 변화에 따라 산화물의 성장률 또한 변하는데 이를 통해 인가하는 전류의 조건 변화가 산화물의 성장에도 영향을 줄 수 있다는 것을 알 수 있다⁽⁶⁾. 이를 통해 펄스의 인가시간의 변화가 산화물 성장에도 변화를 줄 수 있는지 알아보려고 한다.

2. 실험과정

본 실험은 SPM의 하나인 PSIA 사의 AFM(XE - 100)을 기반으로 하는 SPL실험이다. 기본적 원리로는 Fig. 2와 같이 비접촉 상태에서 전도성을 가지는 NSC18 Ti-Pt 코팅 캔틸레버(Mikromasch, 3.5N/m, 75kHz)와 단결정 실리콘 웨이퍼인 (100) p-type(Silicon technology corporation, 1~10.Ω·cm) 사이에 HP사의 8116A(50MHz, 16V p-p) 펄스 전원 공급기를 이용하여 미세 펄스를 이용해 전기화학적 반응을 일으켜 실리콘 웨이퍼 표면에 나노 단위의 산화물을 가공하는 것이다. 이때 발생하는 전기화학적 반응으로 생성된 산화물의 성장 변화를 통해 극초단파 펄스의 인가시간과 산화물생성 사이의 관계를 이용해 나노 단위의 구조물 가공 방법을 찾아보고자 한다. 실험 전 웨이퍼 표면의 오염물질 및 유기물 제거를 위하여 다음과 같이 세척을 실시하였다. 1차적으로 산화물의 성장에 영향을 줄 수

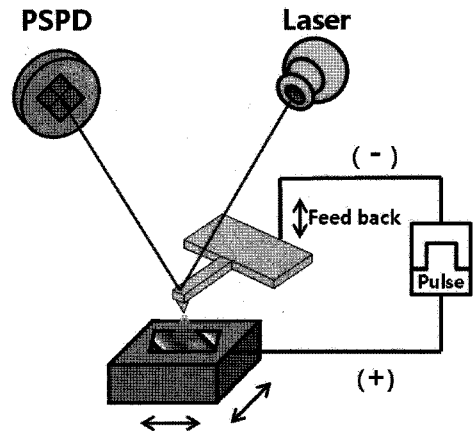


Fig. 2 Scheme of experimental procedure

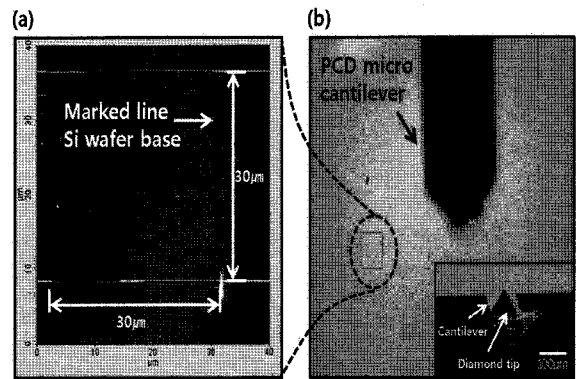


Fig. 3 Preparation of micro patterning area with mechanical micro scale marking by lab made PCD tool (a) AFM scan image, (b) CCD image of marked area.

있는 자연 산화물의 제거를 위해 Piranha cleaning(H₂SO₄ : H₂O₂ = 1 : 0.9)을 1시간동안 실시하였다. 그 후 표면에 잔류하고 있는 용액을 제거하기 위해 Human RO 180초 순수 제조기(Human corporation, 5MΩ·cm)를 이용해 만든 초순수에 웨이퍼를 침지시킨 후, 200W 급 초음파 세척 장치(KODO NXPC - 2010, 40kHz)를 이용해 3분 동안 세척한 후 웨이퍼 표면의 수분을 제거시키기 위해 데시케이터 안에서 건조시켰다. 건조시킨 웨이퍼 표면에 실험 후 결과를 확인을 위해 Fig. 3과 같이 자체 개발한 PCD(Poly crystal line diamond) 미세 공구⁽⁷⁾를 이용해 물리적 힘으로 가공하여 웨이퍼 표면에 사각형(30µm × 30µm) 형상을 표시 하였다. 실험 부분이 표시된 웨이퍼를 가공 후에 남아있는 부산물들을 제거하기 위해 초순수에 침지시킨 후 초음파 세척을 3분 동안 실시하였다. 그 후 아세톤에 침지시킨 상태로 3분 동안의 초음파 세척을 통해 웨이퍼 표면의 유기용매를 제거한 후 웨이퍼 표면의 잔류 아세톤 제거를 위해 초음파를 이용한 초순수 세척을 3분 동안 실시하였다. 다음으로 웨이퍼 표면의 유기화합물 제거를 위해 5%의 DHF(Diluted hydro fluoric)용액에 1분 동안 침지시킨 후 잔류하는 DHF용

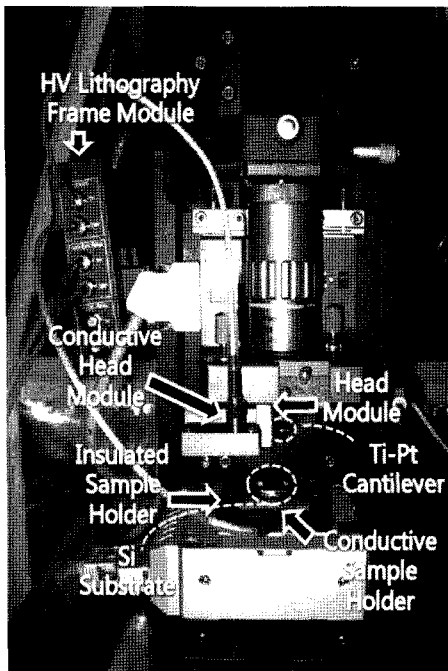


Fig. 4 Electrical connecting apparatuses in AFM modification cell

액을 없애기 위해 초순수를 표면에 흐르게 하였다. 마지막으로 초음파를 이용한 초순수 세척을 3분 동안 실시 후 표면의 수분 제거를 위해 다시 데시케이터 내부에서 건조를 실시하였다. 건조된 실리콘 웨이퍼는 표면에 전류가 흐를 수 있도록 실버 페이스트를 이용하여 샘플 디스크에 접착 후 AFM 샘플 스테이지에 장착 하였다. AFM외부의 펄스 전원 공급기를 통해 공급되는 전류를 탐침과 샘플 사이에 흐르게 하기 위하여 Fig. 4와 같이 PSIA사의 외부 연결 단자(External connection toolkit)를 장착하였다. 외부에서 공급된 극초단파 펄스는 고전압 리소그래피 프레임 모듈(HV lithography frame module)을 통해 AFM의 Head에 설치되어 있는 헤드모듈(Head module)로 공급되어 탐침에 전류를 흐르게 한다. 탐침에 인가된 펄스는 단결정 실리콘 웨이퍼 표면을 흐르게 되고 실버페이스트와 샘플 디스크를 통해 스테이지에 있는 비전도성 샘플 홀더(Insulated sample holder)로 흐른 후 다시 고전압 리소그래피 프레임 모듈과 만나게 된다. 이와 같이 공급되는 펄스의 흐름을 확인하기 위하여 AFM 외부에 DSO1024A 오실로스코프(Agilent technologies, 200MHz, 2GSa/s)를 설치하였고, 전압 및 전류의 측정을 위해 N2863 전압 프로브(Agilent technologies, 300V)와 CT - 2 전류 프로브(Tektronix, 1mV/mA, 50Ω)를 사용하였다. 전기 화학적 반응이 작용하기 위해서는 펄스 인가 시 비접촉 상태에서 탐침과 비전도성 단결정 실리콘 웨이퍼 표면 사이에 전류가 흐를 수 있도록 중간 매개물이 필요하므로 실험 시 일정 온도 및 습도를 유지하였다. 실험 시 NSC18 Ti-Pt 코팅 캔틸레버(Mikromasch, 3.5N/m, 75kHz)를 이용하여 PCD 공구로 표시했던 실험부분을 측정하여 실험 부분 표면을 확인

후, 산화 반응이 일어날 수 있도록 AFM 내부에 적정 습도를 유지하였다. 적정 습도를 유지한 상태에서 탐침을 실리콘 웨이퍼 샘플 표면으로 근접시키고 산화반응을 일으킬 위치에 이동시킨 후 실리콘 웨이퍼 샘플의 표면에서 0.1μm의 일정한 간격을 유지한 상태로 펄스 전원 공급기를 이용하여 극초단파 펄스를 공급했다. 이와 동시에 탐침은 일정 시간 동안 외부에서 공급되는 극초단파 펄스에 의해 가공 부분에서 전기화학적 반응이 발생되어 국부적인 산화 구조물을 생성시킨다. 실험 후 웨이퍼 표면의 결과물 확인을 위해 Mikromasch사의 측정용 NSC36C 캔틸레버(0.95N/m, 105kHz)를 이용하여 실험 부분 측정을 실시하였다.

3. 실험결과

비 접촉 상태의 전기화학적 방법을 이용한 실리콘 산화물 가공 공정에 대한 실험은 주로 전압과 가공 시 습도 그리고 가공 시간의 변화에 따라 산화물의 성장률 또한 변하는 결과를 보이고 있다. 이 같은 결과와 마찬가지로 극초단파 펄스를 이용한 단결정 실리콘 웨이퍼 표면의 국부 산화가공 또한 비슷한 양상을 보이는지 확인하기 위해 일정 전압과 주파수 상에서 동일한 습도를 유지한 상태로 공급되는 펄스 인가시간을 조정함에 따라 변화되는 산화물을 측정해 보았다.

실험 시 4개의 고정된 가공 위치에서 1kHz, 8V의 동일한 전기적 조건을 기준으로 실험을 실시하였다. AFM 내부 환경은 반응이 잘 일어날 수 있도록 습도 72 ~ 76%, 온도 30.4 ~ 33.7℃를 유지한 상태에서 각 가공 부분 마다 동일하게 3분30초 동안 펄스를 공급하였다. 그 결과 Fig. 5와 같이 4개의 가공 위치에서 나노단위의 미세한 산화물을 발견 할 수 있었다. 각 산화물들은 펄스의 인가시간이 500μs에서 0.5μs로 변화됨에 따라 생성된 산화물의 폭과 높이 또한 점차 변화되는 것을 확인 할 수 있었다. 1kHz 전체시간에서 펄스 공급시간이 50%의 펄스 점유율을 가지는 500μs의 실험결과, 생성된 산화물은 높이 35.7nm에 폭이 300nm로 측정되었고 5%의 펄스 점유율을 가지는 50μs의 경우 높이 21.9nm에 폭이 210nm인 산화물이 생성되었지만 5μs와 0.5μs의 경우 1% 미만의 매우 미소한 펄스 점유율을 가지게 되고 폭이 115nm, 104nm에 높이가 6.5nm, 3.1nm인 산화물이 생성되었다. 이와 같이 500μs와 50μs의 경우 수십 나노미터의 높이를 가지는 산화물이 생성된 반면에 5μs와 0.5μs 경우 미세한 높이의 산화물을 확인 할 수 있었다. 일반적으로 SPL실험의 산화물 성장률은 실험 시 환경 유지 및 기존의 공급되는 전류의 전압과 주파수의 변화에 따라 생성되는 산화물의 성장률 또한 변하는데 이와 마찬가지로 본 실험결과 또한 외부에서 펄스공급기를 통해 공급되는 극초단파 펄스의 인가시간이 증가 될수록 생성되는 산화물의 폭과 높이도 증가됨을 확인 할 수가 있었다. 비접촉 SPL기법을 이용한 본 실험

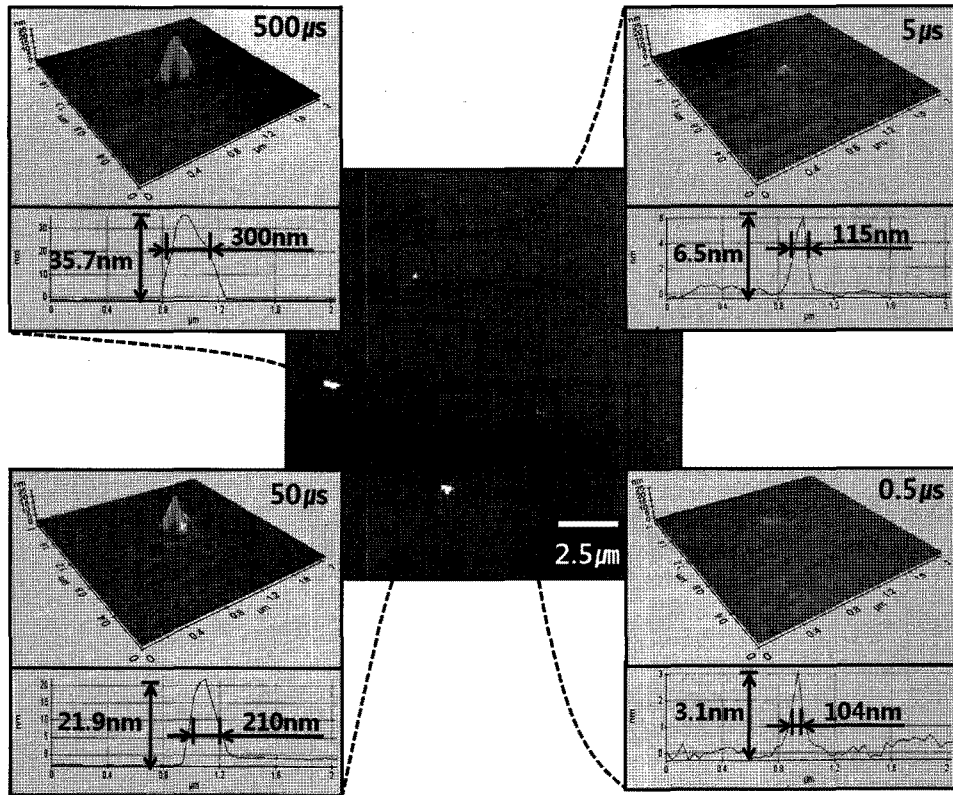


Fig. 5 AFM image of electrochemical oxidation using various ultra short pulses oxide image (8 V, 1 kHz)

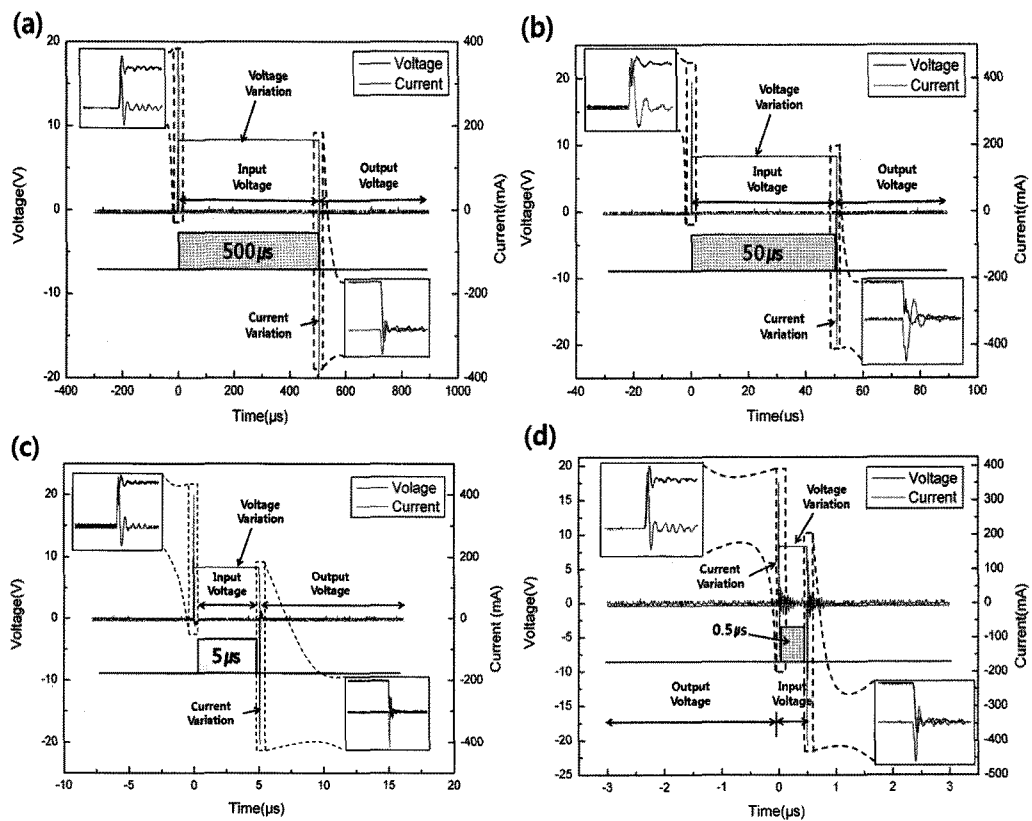


Fig. 6 Acquired Pulse signal variation duration electrochemical nano oxidation 1kHz, 8V (a) 500 μ s(Duty factor 50%), (b) 50 μ s(Duty factor 5%), (c) 5 μ s(Duty factor 0.5%), (d) 0.5 μ s(Duty factor 0.05%)

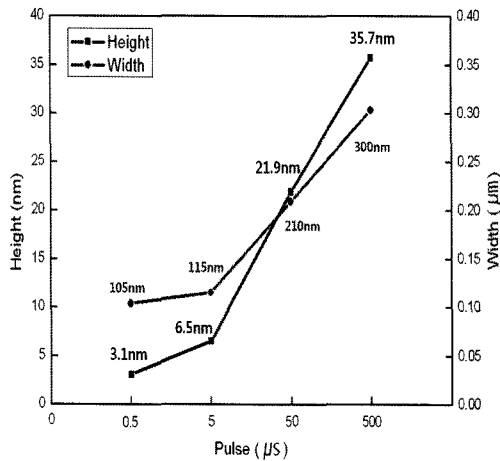


Fig. 7 Growth variation graph of fabrication oxide according to pulse duration

험은 외부의 전원 공급기를 통해 극초단파 펄스를 실리콘 웨이퍼 표면에 공급한다. 이때 사용된 전류는 실리콘 표면에만 산화물을 생성하기 위해 한 쪽 방향으로만 흐르는 직류를 이용하였다. 교류의 경우 직류보다 높고 폭이 좁은 나노 단위의 산화물을 가공 할 수 있다는 장점이 있으나 산화 반응 시 웨이퍼뿐만 아니라 탐침의 표면에도 산화반응이 발생하게 되어 탐침의 성능에 저하를 가져올 수 있는 단점이 있기 때문에 본 실험에서는 직류를 사용하게 되었다. Fig. 6은 실험 시 인가한 펄스를 오실로스코프로 측정 한 결과 값이다. 4개의 경우 모두 1kHz, 8V의 일정 주파수와 전압을 기준으로 하여 인가시간에 변화에 따른 펄스폭의 변화를 보여주고 있다. Fig. 6(a)의 경우 1kHz 동안 500μs를 인가함으로써 펄스 점유율이 전체의 50%를 차지하게 되어 입·출력 시간이 1:1의 비율로 오랜 시간 동안 펄스가 공급되지만 50μs를 인가했을 경우 Fig. 6(b)과 같이 전체 입·출력 시간에서 입력시간이 5% 점유율을 가지게 되어 500μs 비해 공급 시간이 상당히 짧다는 것을 알 수 있다. 5μs와 0.5μs의 경우 입·출력 전체에서 1% 미만의 점유율을 가지기 때문에 전체 1kHz 주파수내에서 공급시간이 하나의 수직선 형태로 나타난다. 수직선으로 나오는 펄스공급 시간을 확인하기 위하여 Fig. 6(c), (d)와 같이 확대 측정하였다. 확대 측정한 결과 Fig. 6(d)의 그래프에서 펄스를 공급할 때 입·출력 시의 전압과 전류의 변화를 확인 할 수가 있었는데 다른 인가시간들의 입출력 부분을 확대 측정한 결과 4가지 펄스 공급시간 모두 공급 시간에 의한 점유율의 변화는 있지만 입·출력 시 전압과 전류 모두 비슷한 패턴으로 펄스가 진행 된다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 실험은 AFM을 기반으로 나노 단위의 미세 패턴가공을 하는 일반적인 비접촉 SPL가공방법에서 AFM 외부의 초단파

펄스 공급을 통하여 단결정 실리콘 웨이퍼 표면에 전기화학적 반응으로 나노단위의 산화물 패턴을 가공하기 위한 실험으로써 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 펄스를 이용하여 실리콘 웨이퍼 표면에 국부적 가공을 실시한 결과 비접촉 상태인 팁과 웨이퍼 사이에서 펄스 공급으로 인한 웨이퍼 표면 매니스커스의 전기분해를 통해 가공 부분에 전기화학적 반응으로 나노단위의 산화 구조물 (SiO₂)이 생성됨을 확인 하였다.
- (2) 본 실험의 주된 변수로는 인가되는 펄스의 인가시간 변화에 의한 실험으로써 최소 0.5μs에서 최대 500μs의 인가시간의 변동에 따른 실험결과 Fig. 7에서 보이는 바와 같이 산화물의 높이 및 폭이 변화됨을 확인 할 수 있었다.
- (3) 이를 통해 비접촉 SPL기법을 일정한 전압 및 주파수에서 인가시간 변경이 산화물의 성장률에 영향을 준다는 것을 알 수 있었고, SPM을 기반으로 초 정밀한 나노 단위의 가공 파라미터 확립 가능성을 확인 할 수 있었다.

후기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2010-0015241)을 받아 수행된 연구임

참고 문헌

- (1) Oh, S. K., Kim, S. J., Kim, D. H., Park, K., and Jang, D. Y., 2006, "Pattern Shape Modulation by Scanning Methods in E-beam Lithography," *Journal of the KSMTE*, Vol. 18, No. 6, pp. 558-564.
- (2) Rousseaux, F., Haghiri-Gosnet, A. M., Chen, Y., Ravet, M. F., and Launois, H., 1994, "X-ray lithography: an overview and recent activities at super-ACO" *Journal de Physique IV*, Vol. 4, No. C9, pp. 237-244.
- (3) Kang, B. C., Kim, G. W., Cho, S. H., Park, J. K., and Yang, M. Y., 2010, "The Effects of Ultrasonic Vibration on Surface Finish in Nano-second Laser Machining," *Journal of the KSMTE*, Vol. 19, No. 3, pp. 402-406.
- (4) Bonnell, D. A., 2001, *Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy: Theory, Techniques, and Applications 1st ed*, Wiley-VCH, New York.
- (5) Stephan, K., Ryan, R. F., and Christopher, B. G., 2003, "Scanning Probe Lithography using Self Assembled Monolayers," *American Chemical Society*, Vol. 103, No. 11, pp. 4367-4418.

- (6) Calleja, M., Anguita, J., Garcia, R., Birkelund, K., Perez-Murano, F., and Dagata, J. A., 1999, "Nanometre-scale Oxidation of Silicon Surfaces by Dynamic Force Microscopy: Reproducibility, Kinetics and Nanofabrication," *Nanotechnology*, Vol. 10, No. 1, pp. 34~38.
- (7) Park, J. W., Kawasegi, N., Morita, N., and Lee, D. W., 2004, "Tribonolithography of Silicon in Aqueous Solution based on Atomic Force Microscopy," *Applied Physics Letters*, Vol. 85, No. 10, pp. 1766~1768.