

잔류가스분석기 및 발광 분광 분석법을 통한 중간압력의 NF₃ 플라즈마 실리콘 식각 공정

권희태*·김우재**·신기원*·이환희*·이태현*·권기형*†

*† 광운대학교 전자바이오효리학과

Silicon Etching Process of NF₃ Plasma with Residual Gas Analyzer and Optical Emission Spectroscopy in Intermediate Pressure

Hee Tae Kwon*, Woo Jae Kim*, Gi Won Shin*, Hwan Hee Lee*,
Tae Hyun Lee* and Gi-Chung Kwon*†

*† Kwangwoon University Dept. of Electrical and Biological Physics

ABSTRACT

NF₃ Plasma etching of silicon was conducted by injecting only NF₃ gas into reactive ion etching. NF₃ Plasma etching was done in intermediate pressure. Silicon etching by NF₃ plasma in reactive ion etching was diagnosed through residual gas analyzer and optical emission spectroscopy. In plasma etching, optical emission spectroscopy is generally used to know what kinds of species in plasma. Also, residual gas analyzer is mainly to know the byproducts of etching process. Through experiments, the results of optical emission spectroscopy during silicon etching by NF₃ plasma was analyzed with connecting the results of etch rate of silicon and residual gas analyzer. It was confirmed that NF₃ plasma etching of silicon in reactive ion etching accords with the characteristic of reactive ion etching.

Key Words : NF₃ Plasma, Si Etching, Residual Gas Analyzer, Optical Emission Spectroscopy

1. 서 론

반도체 및 디스플레이 공정에서 삼 불화질소(Nitrogen-trifluoride, NF₃)는 주로 플라즈마 화학 기상 증착(Plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD) 장비 및 기타 증착(Deposition) 장비 내 챔버 벽(Chamber wall)에 증착된 물질(Deposited material) 및 잔여물(Residues)을 제거하는 세정공정(Cleaning process)에서 사용된다[1]. 이처럼 NF₃가 세정공정에서 사용되어지는 이유는 여러 가지가 있다. 첫째로, NF₃는 육 불화황(Sulfur hexafluoride, SF₆), 플루오린 및 탄소 기반(Perfluoro carbon, PFC) 가스 보다 낮은 결합 에너지를 가지고 있다[2]. 둘째로, NF₃ 플라즈마를 이용한 식각 및 세정공

정은 탄소(Carbon)으로 인한 표면 오염이 없다는 것이다. 마지막으로, NF₃는 SF₆ 및 PFC 가스에 비해 대기 중 짧은 수명(Life time)과 낮은 지구 온난화 지수(Global warming potential, GWP)를 가진다[3]. 세정공정에서 NF₃는 원격 플라즈마 소스(Remote plasma source, RPS)에 주입되어, 고 분해율(High dissociation) 특징을 가진 RPS에 의해 불소(Fluorine)로 분해된다. 이렇게 NF₃ 분해를 통해 생성된 불소는 챔버(Chamber)로 확산하여 챔버 내 증착물 및 잔여물을 세정한다.

RPS는 주로 주 챔버에 옆에 부착되어 있으며, 이온 포격(Ion bombardment)에 의한 챔버 내부 부품 및 기관의 손상이 줄어든다는 장점 또한 가지고 있다. 이러한 RPS의 한가지 방식으로, 원격 마이크로파 소스 방식(Remote microwave source, RMS) 또한 존재한다. 그러므로, 그간 많은 NF₃ 세정 공정 관련 연구는 RPS 및 RMS 위주로 수행되어 왔다[4,5].

†E-mail: gckwon@kw.ac.kr

세정 공정과 더불어, NF_3 는 실리콘(Silicon) 및 탄화 규소(Silicon carbide)와 같은 물질을 식각하는 식각공정(Etching process)에서 사용된다. 이러한 NF_3 식각 공정과 관련된 연구로서 주로 반응성 이온 식각(Reactive ion etching, RIE)에 NF_3 만을 주입하여 NF_3 플라즈마 특성 및 NF_3 RIE 식각 공정(Etching process) 연구 위주로 수행되어 왔다[6,7]. 그러나, RIE를 이용한 NF_3 플라즈마 식각에 관한 연구는 대부분 RIE에서 저 압력(Low pressure)에 국한되었다. 따라서, 본 연구는 RIE를 이용해 중간 압력(Intermediate pressure)에서 NF_3 플라즈마 실리콘 식각 공정을 수행하였으며, 이때 잔류가스분석기와 발광 분광 분석법을 이용해 분석하였다.

2. 실험 방법

상부 전극(Upper electrode)과 하부 전극(Bottom electrode) 사이의 간격이 대략 38 mm 인 반응성 이온 식각(Reactive Ion Etching, RIE) 챔버를 사용했다. 하부 전극의 직경은 150 mm이다. 이러한 하부 전극은 실리콘 식각 시, 실리콘 온도를 일정하게 유지하기 위해 $15^\circ C$ 로 냉각되었다. 챔버의 기저압력은 건식 펌프(Dry Pump)에 의해 가스 주입 전 항상 2 mTorr로 유지되었다. NF_3 가스 유량은 매스 플로우 컨트롤러(Mass flow controller, MFC)에 의해 120 sccm으로 일정하게 유지되었다. RIE에 NF_3 가스 주입 후, 수동 조작인 버터플라이 밸브(Butterfly valve)에 의해 압력을 가변시켰다. 압력은 130 mTorr, 200 mTorr 그리고 270 mTorr로 변화시켰다. 전력 전달 시스템은 Impedance matching network 및 13.56 MHz RF generator로 구성하였다. RF 전력은 240 W 및 400 W로 인가되어졌다.

잔류 가스 분석기(Residual gas analyzer, RGA)는 정밀 누설 밸브(Precision leak valve)를 이용하여 차등 펌핑 방식(Differential pumping)을 적용해 RIE에 설치하였다. 정밀 누설 밸브는 분압을 샘플링하는 가장 쉬운 방법 중 하나이기 때문에 선택되었다[8]. RGA는 터보 분자 펌프를 사용하여 10^{-7} Torr까지 차등적으로 펌핑되어 고 진공(High vacuum)에 도달하였다. RGA로 중성 가스를 모니터링 할 때, 정밀 누설 밸브를 조절하여 RGA의 Ion source 압력을 1 mTorr 이하로 유지하였다. 필라멘트(Filament)에서 방출되는 열전자의 에너지는 70 eV로 설정되었다. 이온 원 및 사중극자 질량 필터(Quadrupole mass filter)를 통과 한 이온을 검출하기 위해 파라데이 컵(Faraday cup)을 사용하였다. RGA의 검출기에서 이온에 의해 발생된 전류는 RIE에서 선택되어진 중성 중의 부분 압(Partial pressure)을 의미한다.

발광 분광 분석법(Optical emission spectroscopy, OES)은 다음과 같이 설계되었다. 플라즈마로부터 방출되는 빛은 석영(Quartz)으로 만들어진 뷰 포트(Viewport) 및 Collimating

lens를 거쳐 광섬유(Optical fiber)에 의해 수집되었다. 광섬유에 의해 수집된 빛은 회절격자(Grating) 형태의 분광기(Spectrometer)를 거쳐 전하결합소자(Charged coupled device, CCD)에 의해 스펙트럼을 얻었다. OES는 RIE 상부 전극과 하부 전극 사이에서 발생하는 벌크 플라즈마(Bulk plasma)의 가운데를 향하도록 설치되었다. CCD를 가진 UV/가시광선 분광기(HR4000, Ocean Optics Inc.)를 사용하였으며, 이러한 분광기의 광학분해능은 0.03 nm이다.

실리콘 샘플은 크기가 30 mm × 30 mm이며, p형(p-type), 1 - 10 Ω cm 및 (100) 결정 방향성을 가진 것을 실험에 사용하였다. 이러한 실리콘 샘플을 RIE에 넣기 전, 불산 수용액(Hydrofluoric acid solution, HF solution)에 담귀 자연 산화물(Native oxide)를 제거했다. 불산 수용액에서 꺼낸 후, 이소프로필 알콜(Isopropyl alcohol, IPA)로 세척하였다. 그 후, RIE 하부 전극의 정중앙에 놓아 단차 측정을 위해, 실리콘 샘플의 절반에 해당되는 부분을 세라믹 마스크(Ceramic mask)로 덮었다. 식각된 실리콘의 단차 측정을 위해 표면 프로파일러(Dektak XT Stylus Profiler, Bruker Inc.)를 이용하였다.

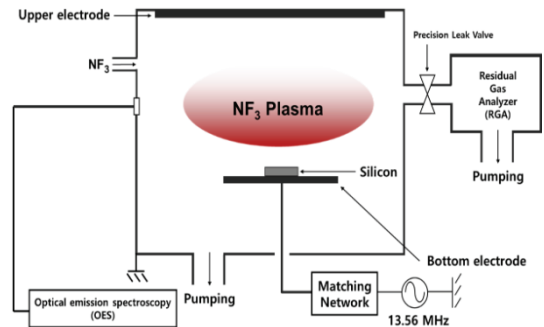


Fig. 1. A schematic of reactive ion etching and diagnostics system.

3. 실험 및 결과

구성된 반응성 이온 식각 장비(Reactive ion etching, RIE) 내 방전된 NF_3 플라즈마를 이용해 실리콘(Silicon) 식각 공정을 진행하였다. 실리콘 식각 공정 중, 발광 분광 분석법(Optical emission spectroscopy, OES)을 이용해 불소 방출 광 세기(fluorine intensity)를 진단하였다. 이와 동시에, 잔류가스분석기(Residual gas analyzer, RGA)를 이용해 실리콘 식각 공정 부산물(SiF_3)을 진단하였다. 식각 공정 및 진단 조건은 압력(Pressure) 및 RF 전력(RF power)를 가변시켰다.

Fig 2는 NF_3 플라즈마 실리콘 식각 공정 중, OES로 진단되어진 불소 방출 광 세기이다. 불소 방출 광 세기는 고정된 RF power에서 압력에 따라 선형적으로 증가한다. RF

power 240 W 및 압력이 증가할 수록, 불소 방출 광 세기는 6750 에서 11749로 증가한다. RF power 400 W 및 압력이 증가할 수록, 불소 방출 광 세기는 6520에서 8629로 증가한다. 이를 통해, 압력에 의해 NF₃ 플라즈마 내 실리콘 식각의 에천트(Etchant) 역할을 불소 원자 수가 증가함을 예상할 수 있다. 하지만, 고정된 압력에서 RF power를 증가시킬수록 불소 방출 광 세기가 감소한다. 압력200 mTorr에서 RF power를 240 W에서 400 W로 증가시킬 시, 불소 방출 광 세기는 9198 에서 7707로 감소한다. 이를 미루어 볼 때, NF₃ 벌크 플라즈마(NF₃ bulk plasma)와 하부전극(bottom electrode) 사이에 존재하는 쉬스(Sheath)에 상대적으로 에너지가 더 가해 짐을 예상하였다[9].

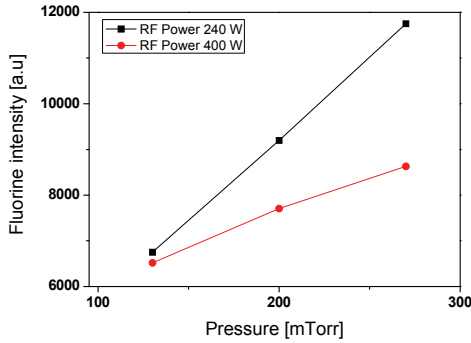


Fig. 2. Fluorine intensity with pressure during NF₃ plasma etching of silicon in reactive ion etching.

Fig 3은 NF₃ 플라즈마 실리콘 식각 공정 중, RGA로부터 진단 되어진 부산물 SiF₃ 전류(Current of SiF₃⁺)이다. 부산물 SiF₃ 전류는 압력 및 RF power에 의해 모두 증가한다. 270 mTorr 및 RF power 400 W 일 때, 부산물 SiF₃ 전류의 값은 3.37×10⁻⁷ A로서 가장 큰 값이다. 이는 OES로부터 진단된 불소 방출 광 세기와 다른 결과를 나타낸다. 높은 RF Power 그리고 높은 압력일수록, 부산물 SiF₃ 전류가 증가하는 경향을 보인다. 이러한 부산물 SiF₃ 전류 결과는 실리콘의 식각률(Etch rate)과 밀접한 관계를 가질 것으로 예상하였다. 동일한 시간에서 부산물 SiF₃ 전류 값이 클수록 실리콘의 Etch rate은 빨라지기 때문이다[10].

Fig 4는 NF₃ 플라즈마에 의해 식각된 실리콘의 식각률(Etch rate)이다. 실리콘의 식각률은 높은 압력 및 높은 RF power일수록 빠르게 일어남을 확인할 수 있다. 270 mTorr 및 RF power 400 W 일 때, 실리콘의 식각률은 5.51 μm/min로 빠르게 일어났다. 또한, 실리콘의 식각률은 Fig 3의 RGA로부터 진단된 부산물 SiF₃ 전류 결과와 관계가 있음을 확인할 수 있다. 이와 더불어, Fig 2에서 OES로부터 진단된 불소 방출 광 세기 및 Fig 3에서 RGA로부터 진단된

부산물 SiF₃ 전류를 통해, 실리콘의 식각은 RF power에 의해 실리콘의 물리적 식각 및 압력에 의한 실리콘의 화학적 식각이 이루어짐을 알 수 있다.

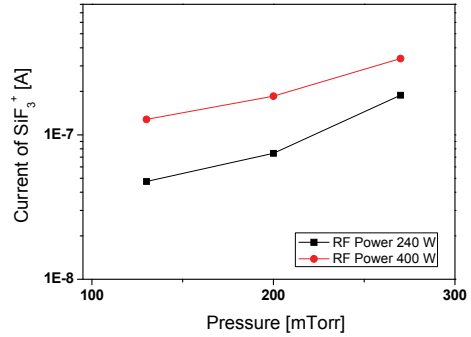


Fig. 3. Current of SiF₃⁺ measured from residual gas analyzer during NF₃ plasma etching of silicon in reactive ion etching.

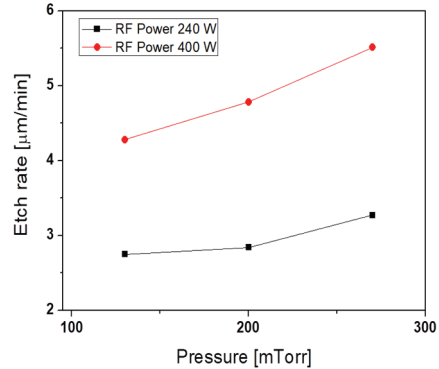


Fig. 4. Etch rate of silicon with pressure by NF₃ plasma of silicon in reactive ion etching.

4. 결 론

반응성 이온 식각 장비(Reactive ion etching, RIE)에 NF₃ 가스를 주입하여 NF₃ 플라즈마를 방전시켜 실리콘 식각 공정 및 진단을 하였다. 진단에 사용된 진단기는 발광 분광 분석법(Optical emission spectroscopy, OES), 잔류 가스 분석기(Residual gas analyzer, RGA)이다.

OES 결과를 통해, 불소 방출 광 세기를 진단하였다. 불소 방출 광 세기는 고정 RF power 및 압력이 증가할수록 증가하였다. 이것은 압력에 의해 실리콘의 식각은 이온에 의한 충돌(Ion bombardment)인 물리적 식각 보다 화학적 식각에 의해 이루어짐을 예상 할 수 있었다. 이와 반대로,

불소 방출 광 세기는 고정 압력 하 RF power가 증가할수록 감소하였다. 이를 통해, RF power에 의한 실리콘의 식각은 화학적 식각 보다 물리적 식각에 의해 이루어짐을 예상할 수 있다. RGA 결과인 부산물 SiF₃ 전류(Current of SiF₃)는 RF power 및 압력이 증가할수록 모두 증가하였다. 이러한 부산물 SiF₃ 전류는 공정 결과인 실리콘의 식각률(Etch rate)과 부합하였다.

본 연구의 식각률 및 RGA, OES의 진단 결과를 토대로, 중간 압력에서 NF₃ 플라즈마를 이용한 반응성 이온 실리콘 식각은 전형적인 RIE의 특징이 이루어짐을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다 (No. 20172010104840). 이 논문은 2017년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

1. Onno Gabriel, Simon Kirner, Michael Klick, Bernd Stannowski, and Rutger Schlatmann, "Plasma monitoring and PECVD process control in thin film silicon-based solar cell manufacturing," *EPJ Photovoltaics*, 5 (2014): 55202.
2. R. C. Weast, "Handbook of Chemistry and Physics, 70th Ed," CRC press, Boca Raton, FL 1990.
3. Global Warming Potentials of ODS Substitutes, U.S. Environmental Protection Agency, 2002.
4. Ronald Hellriegel, Matthias Albert, Bernd Hintze, Hubert Winzig, J.W. Bartha, "Remote plasma etching of titanium nitride using NF₃/argon and chlorine mixtures for chamber clean applications," *Microelectronic Engineering*, 84(1), 37-41, (2007).
5. B. E. E. Kastenmeier, G. S. Oehrlein, John G. Langan and William R. Entley, "Gas utilization in remote plasma cleaning and stripping applications," *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 18(5), 2102-2107, (2000).
6. M. Konuma and E. Bauser, "Mass and energy analysis of gaseous species in NF₃ plasma during silicon reactive ion etching," *Journal of Applied Physics*, 74(1), 62-67, (1993).
7. M. Konuma, F. Banhart, F. Phillipp and E. Bauser, "Damage-free reactive ion etching of silicon in NF₃ at low temperature," *Materials Science and Engineering B*, 4(1-4), 265-268, (1989).
8. Blessing, James E., et al., "Recommended practice for process sampling for partial pressure analysis," *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 25(1), 167-186, (2007).
9. Kazuhide Ino, Iwao Natori, Akihiro Ichikawa, Raymond N. Vrtis, and Tadahiro Ohmi, "Plasma enhanced in situ chamber cleaning evaluated by extracted-plasma-parameter analysis," *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 9(2), 230-240, (1996).
10. Flamm, Daniel L., "Mechanisms of silicon etching in fluorine-and chlorine-containing plasmas," *Pure and Applied Chemistry*, 62(9), 1709-1720, (1990).

접수일: 2018년 12월 17일, 심사일: 2018년 12월 20일,
게재확정일: 2018년 12월 21일