

저진공 축전결합형 SF₆, SF₆/O₂, SF₆/CH₄ 플라즈마를 이용한 아크릴의 반응성 건식 식각

박연현 · 주영우 · 김재권 · 노호섭 · 이제원[†]
인제대학교 나노공학부

Capacitively Coupled SF₆, SF₆/O₂, SF₆/CH₄ Plasma Etching of Acrylic at Low Vacuum Pressure

Yeon-Hyun Park, Young-Woo Joo, Jaek-Won Kim, Ho-Seob Noh and Je-Won Lee[†]

School of Nano Engineering, Inje University, Gimhae, GY, 621-749, Korea

(2008년 11월 27일 접수 : 2008년 12월 19일 최종수정 : 2008년 12월 23일 채택)

Abstract This study investigated dry etching of acrylic in capacitively coupled SF₆, SF₆/O₂ and SF₆/CH₄ plasma under a low vacuum pressure. The process pressure was 100 mTorr and the total gas flow rate was fixed at 10 sccm. The process variables were the RIE chuck power and the plasma gas composition. The RIE chuck power varied in the range of 25~150 W. SF₆/O₂ plasma produced higher etch rates of acrylic than pure SF₆ and O₂ at a fixed total flow rate. 5 sccm SF₆ / 5 sccm O₂ provided 0.11 μm/min and 1.16 μm/min at 25 W and 150 W RIE of chuck power, respectively. The results were nearly 2.9 times higher compared to those at pure SF₆ plasma etching. Additionally, mixed plasma of SF₆/CH₄ reduced the etch rate of acrylic. 5 sccm SF₆/5 sccm CH₄ plasma resulted in 0.02 μm/min and 0.07 μm/min at 25 W and 150 W RIE of chuck power. The etch selectivity of acrylic to photoresist was higher in SF₆/O₂ plasma than in pure SF₆ or SF₆/CH₄ plasma. The maximum RMS roughness (7.6 nm) of an etched acrylic surface was found to be 50% O₂ in SF₆/O₂ plasma. Besides the process regime, the RMS roughness of acrylic was approximately 3~4 nm at different percentages of O₂ with a chuck power of 100 W RIE in SF₆/O₂ plasma etching.

Key words polymer etching, plasma etching, RIE, acrylic.

1. 서 론

고분자 소재는 향후 전자 소재, MEMS 소재 및 의료용 바이오 칩 등으로 사용할 수 있다. 특히 초소형 소자 제작을 위해 고분자 박막의 증착 및 식각 기술을 이용하여 미세 패턴을 만드는 것은 중요한 기술이다.¹⁻⁴⁾ 본 연구에서 사용한 아크릴(Acrylic)의 경우 쉽게 구할 수 있고 상대적으로 저렴하며 투명한 특징이 있어 다양한 초소형 소자를 만드는 재료로 사용될 수 있다.⁵⁻⁶⁾

일반적으로 식각 공정은 습식 식각과 건식 식각으로 구분한다. 아크릴의 미세 패턴을 제작할 수 있는 습식 및 건식 식각 기술은 지금까지 그리 많이 연구되지 않은 분야이다. 먼저 아크릴의 습식 식각을 위해서는 다음의 문제들을 생각해 보아야한다. 첫째, 아크릴을 습식 식각할 수 있는 적절한 용액을 찾아야 한다. 둘째, 습식 식각에 견디는 마스크로 사용할 수 있는 적절한 소재를 개발해

야 한다. 아크릴의 식각용 용액으로는 NaCl 등이 시도되고 있다.⁷⁾ 그러나 본 연구팀의 기초 실험에 따르면 NaCl을 사용하는 경우 흔히 식각 마스크로 쓰이는 감광제(Photoresist)를 이용하기가 어렵다. 즉, NaCl 수용액은 식각 하고자 하는 고분자뿐만 아니라 감광제까지 훼손하여 정밀한 미세 패턴을 만들지 못했다. 또 다른 용액으로 생각할 수 있는 것은 아세톤 등의 용매이다. 이 경우에도 역시 감광제를 식각 마스크로 사용 하는 데는 제약이 따르게 된다. 즉, 아세톤 등의 용매는 아크릴 기판뿐만 아니라 식각 마스크인 감광제도 역시 손상시킬 수 있다. 따라서 식각 마스크로 감광제가 아닌 보다 많은 공정이 필요한 유전 박막이나 금속 박막 등을 사용해야만 한다. 이러한 경우, 습식 식각을 진행하는 전후에 추가적인 작업이 필요하다.

플라즈마를 이용한 아크릴 기판 건식 식각에 관한 문헌은 이미 보고 되어있다.⁸⁻⁹⁾ 그 자료를 살펴보면 플라즈마를 이용한 아크릴의 건식 식각 공정 개발에서도 중요한 것은 역시 식각 마스크와 식각 가스의 선택이다. 또한 가지 중요한 것은 플라즈마 식각 중에서도 어떤 식

[†]Corresponding author

E-Mail : jwlee@inje.ac.kr (J. W. Lee)

각 시스템을 이용하는가 하는 것이다. 본 연구에서는 향후 산업과 연구에서 널리 사용될 수 있는 저진공 축전결합형 플라즈마(Capacitively Coupled Plasma) 시스템을 사용해서 식각을 하였다. 식각용 시스템은 축전형 플라즈마 시스템 이외에도 고밀도의 플라즈마를 발생시킬 수 있는 유도결합 플라즈마(Inductively Coupled Plasma) 시스템과 전자 사이클로트론 공진(Electron Cyclotron Resonance) 시스템 그리고 트라이오드(Triode) 시스템 등이 있지만, 이러한 시스템들은 수 십 미리토르 이하의 고진공 공정 압력을 사용하여야 제대로 된 효과를 얻을 수 있다. 그러나 축전 결합형 플라즈마 시스템은 30-300 mTorr의 비교적 높은 가스 압력 또는 저진공에서도 쉽게 플라즈마를 발생시키며 사용에 용이하여 향후 고분자의 건식 식각에서 널리 이용할 것으로 생각한다.¹⁰⁻¹¹⁾

본 연구에서는 불소성분을 포함한 SF₆ 가스와 고분자를 식각하는데 효과적인 O₂ 가스를 각각 개별적으로 또는 혼합하여 사용하였다. 불소를 포함한 가스는 CF₄, CHF₃ 등도 있지만 인체에 상대적으로 안정한 SF₆ 가스를 사용하였다. 또한 식각 선택비를 비교하기 위하여 SF₆ 가스에 CH₄ 가스를 혼합하여 추가 실험을 진행하고 그 결과를 비교 분석 하였다.¹²⁻¹³⁾

2. 실험 방법

본 연구에 사용한 시스템은 축전 결합형 플라즈마 시스템이다. Fig. 1은 본 연구에 사용한 시스템의 개요이다. 플라즈마 반응기에 사용한 RF(Radio Frequency) 파워는 영신 플라즈마의 13.56 MHz 600 W용 공냉식 전원 공급기와 매칭 네트워크를 사용하였다. 샘플 지지대는 직경 150 mm의 크기였다. SF₆, O₂와 CH₄ 가스는 가스 질량 조절기를 이용하여 반응기로 유입하였다. 식각 시스템은 한 개의 기계적 펌프(우성 automa 600 l/min)만을 사용하여 진공을 유지하고 공정을 진행하였다. 기계적 펌

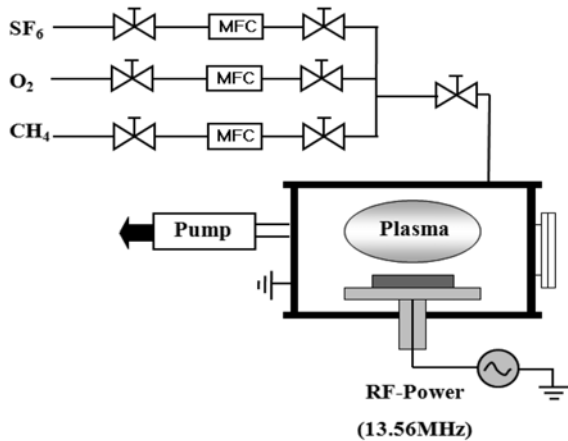


Fig. 1. A schematic of Capacitively Coupled Plasma system.

프만을 사용하였을 때, 가스를 공급하지 않은 상태에서의 최저 진공 압력은 약 30 mTorr이었다. 진공 압력은 열전대 진공 게이지와 바라트론 게이지(Baratron Gauge)를 사용하여 측정하였다. 공정압력은 100 mTorr 이었다.

아크릴 샘플은 두께 1 mm의 소재를 준비하였다. 아크릴 샘플의 크기는 3.6 × 3.6 cm²로 자른 후 스핀 코터(Spin Coater)를 사용하여 그 위에 감광제(AZ GXR-601(46CP))를 3 μm의 두께로 도포하였다. 그 후 컨택 얼라이너(Contact Aligner)를 사용하여 자외선 조사 후 현상액으로 처리하여 감광제의 미세 패턴을 형성하였다. 패턴 된 샘플을 1.8 × 1.8 cm²로 조각내어 실제 실험에 사용하였다. 식각 실험에서 감광제에 대한 식각 선택비를 얻기 위해 먼저 식각 실험 전에 미세 패턴 두께의 초기 값을 측정하고, 플라즈마 식각을 5분 한 후에 다시 미세 패턴의 총 두께를 측정하였다. 그 후 감광제를 제거한 후에 다시 측정해서 계산을 통하여 식각 선택비를 구하였다.

샘플의 미세 패턴 두께 및 플라즈마 식각 두께는 표면 단차 측정기(Tencor alpha step IQ)를 이용하였다. 또한 아크릴의 플라즈마 식각 전후의 표면 거칠기 값도 표면 단차 측정기의 표면 거칠기 프로그램을 이용하여 측정하였다. 식각된 패턴 및 표면의 형상은 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy)을 사용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 10 sccm SF₆, 5 sccm SF₆ / 5 sccm O₂와 5 sccm SF₆ / 5 sccm CH₄ 가스성분의 플라즈마 식각에서 RIE 척 파워를 25 W에서 150 W까지 변화 시켰을 때 아크릴의 식각률을 나타낸 것이다. 10 sccm SF₆, 5 sccm

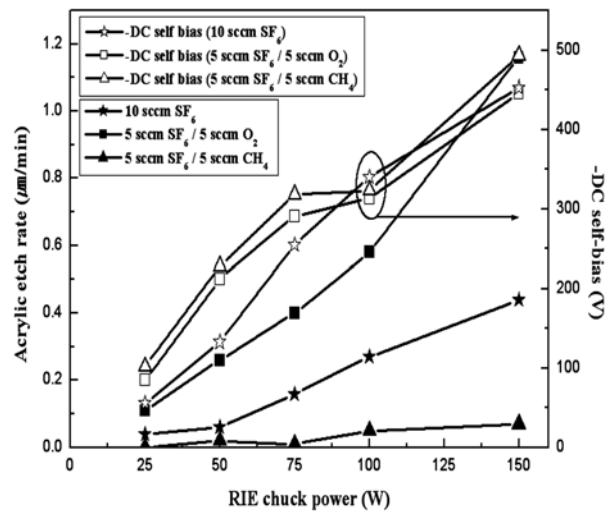


Fig. 2. Etch rate of acrylic and -DC self-bias as a function of RIE chuck power at 10 sccm SF₆, 5 sccm SF₆ / 5 sccm O₂, and 5 sccm SF₆ / 5 sccm CH₄ plasma.

SF₆ / 5 sccm O₂와 5 sccm SF₆ / 5 sccm CH₄ 모든 경우에 있어서 RIE 척 파워가 증가함에 따라 -DC self-bias가 증가함을 확인할 수 있었다. RIE 척 파워가 증가함에 따라 아크릴의 식각률 또한 증가함을 알 수 있는데 이때 주목해 보아야 할 것은 다음과 같다. 첫째, RIE 척 파워가 25 W에서 150 W로 증가함에 따라 10 sccm SF₆를 주입하였을 때의 식각률은 0.04 μm/min에서 0.44 μm/min로 증가 하는 것을 알 수 있었다. 둘째, 같은 조건에서 5 sccm SF₆ / 5 sccm O₂를 주입 하였을 때는 식각률이 0.11 μm/min에서 1.16 μm/min으로 증가하였다. 즉, 10 sccm SF₆ 플라즈마를 사용하였을 때 보다 평균 2.9배 정도 크게 증가된 결과 값을 얻었다. 셋째, 그에 반해 5 sccm SF₆ / 5 sccm CH₄를 주입하였을 때는 0.02 μm/

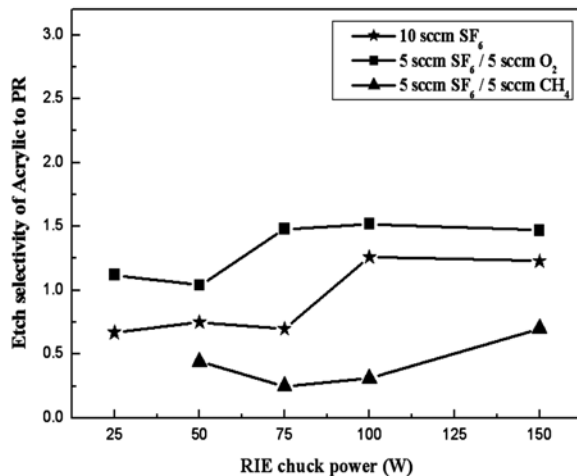


Fig. 3. Etch selectivity of acrylic as a function of RIE chuck power at 10 sccm SF₆, 5 sccm SF₆ / 5 sccm O₂, and 5 sccm SF₆ / 5 sccm CH₄ plasma.

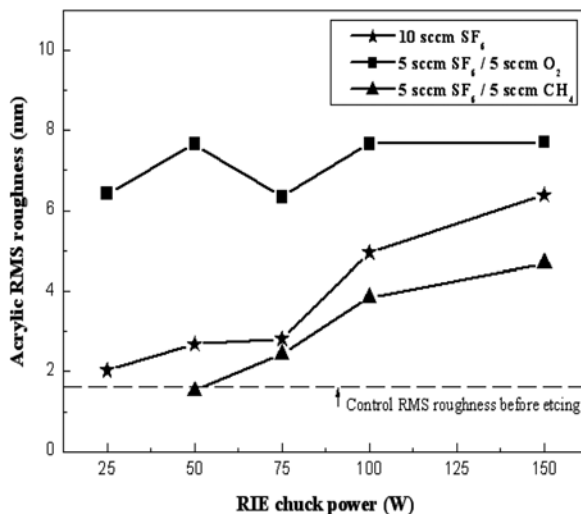


Fig. 4. RMS roughness of acrylic surface as a function of RIE chuck power at 10 sccm SF₆, 5 sccm SF₆ / 5 sccm O₂, and 5 sccm SF₆ / 5 sccm CH₄ plasma.

min에서 0.07 μm/min로 10 sccm SF₆를 주입하였을 때보다 전체적으로 식각률이 크게 감소하였다. 또한 5 sccm SF₆ / 5 sccm CH₄ 플라즈마의 경우, 25 W의 RIE 척 파워에서는 아크릴이 전혀 식각되지 않았다.

Fig. 3은 10 sccm SF₆, 5 sccm SF₆ / 5 sccm O₂와 5 sccm SF₆ / 5 sccm CH₄ 가스성분비의 플라즈마 식각에서 RIE 척 파워에 따른 아크릴의 감광제에 대한 플라즈마 식각률 선택비를 나타낸 것이다. 5 sccm SF₆ / 5 sccm O₂의 경우, 플라즈마 식각에서는 식각 선택비가 RIE 척 파워가 증가함에 따라 50 W의 경우 약 1:1에서 75 W의 경우 약 1.5:1로 증가하였다. 10 sccm SF₆의 경우에는 식각 선택비는 75 W 이하의 경우 0.7:1에서 100 W 이상에서는 1.2:1로 증가하였다. 그러나 5 sccm SF₆ / 5 sccm CH₄ 가스성분비의 플라즈마 식각에서는 식각 선택비가 전체 RIE 척 파워 조건(25-150 W)에서 0.7:1 이하로 낮은 값을 보였다. 이는 5 sccm SF₆ / 5 sccm CH₄ 플라즈마 식각에서는 아크릴 기판보다 식각 마스크인 감광제가 더 많이 식각되었음을 의미했다.

Fig. 4는 10 sccm SF₆, 5 sccm SF₆ / 5 sccm O₂와 5 sccm SF₆ / 5 sccm CH₄ 가스성분비의 플라즈마 식각에서 RIE 척 파워에 따른 아크릴의 식각 후 표면 거칠기를 나타낸 것이다. 10 sccm SF₆와 5 sccm SF₆ / 5 sccm CH₄ 가스성분비의 경우에는 RIE 척 파워가 증가함에 따라 표면 거칠기가 비례하여 증가하였다. 그러나 5 sccm O₂ / 5 sccm SF₆ 가스성분비의 경우에는 RIE 척 파워의 크기와는 큰 관계없이 식각 후 표면 거칠기가 6~8 nm로 아크릴의 표면이 상대적으로 거칠게 식각되었다. 이는 식각 전 아크릴 컨트롤 샘플의 표면 거칠기인 1.5 nm와는 약 4~5배 차이가 나는 높은 값이었다.

Fig. 5는 SF₆/O₂와 SF₆/CH₄ 플라즈마 상태에서 % SF₆의 성분비에 따른 아크릴의 건식 식각률을 나타낸 그래

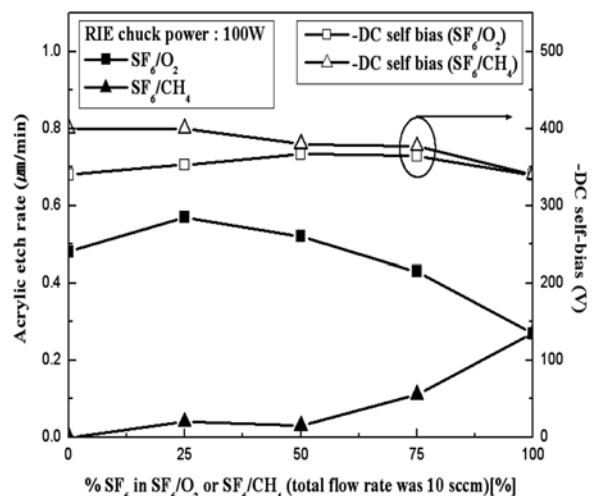


Fig. 5. Etch rate of acrylic as a function of % SF₆ in SF₆ / O₂, or SF₆ / CH₄ capacitively coupled plasma.

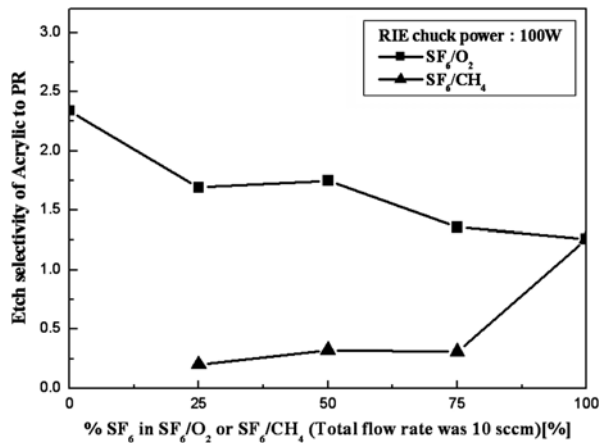


Fig. 6. Etch selectivity of acrylic to photoresist as a function of % SF₆ in SF₆/O₂ or SF₆/CH₄ capacitively coupled plasma.

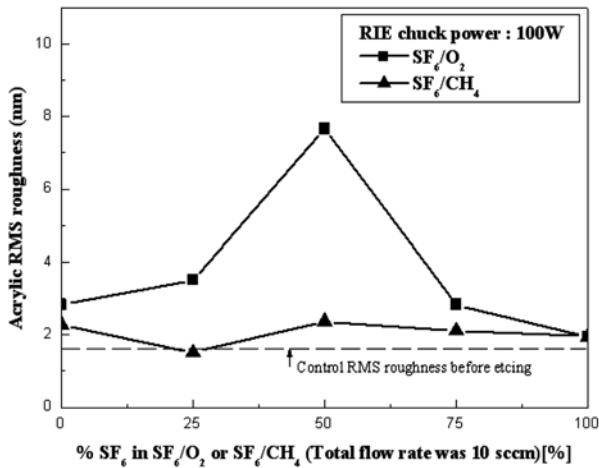


Fig. 7. RMS roughness of acrylic surface as a function of % SF₆ after SF₆/O₂ or SF₆/CH₄ capacitively coupled plasma etching.

프이다. 반응기에 들어오는 총 가스 유량은 10 sccm이었다. 그 결과를 살펴보면 10 sccm O₂ (즉, 100% O₂) 조건에서 아크릴은 0.48 μm/min의 속도로 식각되었으며, 10 sccm SF₆의 조건에서는 식각 속도가 0.27 μm/min이었다. 즉, 아크릴 식각에서 SF₆/O₂의 경우에 100% O₂의 식각률이 100% SF₆ (즉, 10 sccm SF₆)의 식각률보다 더 높았다. 또한 SF₆/O₂ 혼합 조건에서 아크릴의 플라즈마 식각의 경우 최고 식각률은 0.57 μm/min으로 75% O₂와 25% SF₆를 이용한 7.5 sccm O₂ / 2.5 sccm SF₆ 가스 성분비 일 때 얻을 수 있었다. 그러나 SF₆/CH₄ 플라즈마 식각에서는 SF₆가 50 % 이하일 때 식각률이 0.03 μm/min 미만으로 낮았다.

Fig. 6은 SF₆/O₂와 SF₆/CH₄ 플라즈마 상태에서 % SF₆의 성분비에 따른 아크릴의 식각 선택비를 나타낸 그래프이다. SF₆/O₂ 플라즈마 상태에서 SF₆의 성분비가 증가

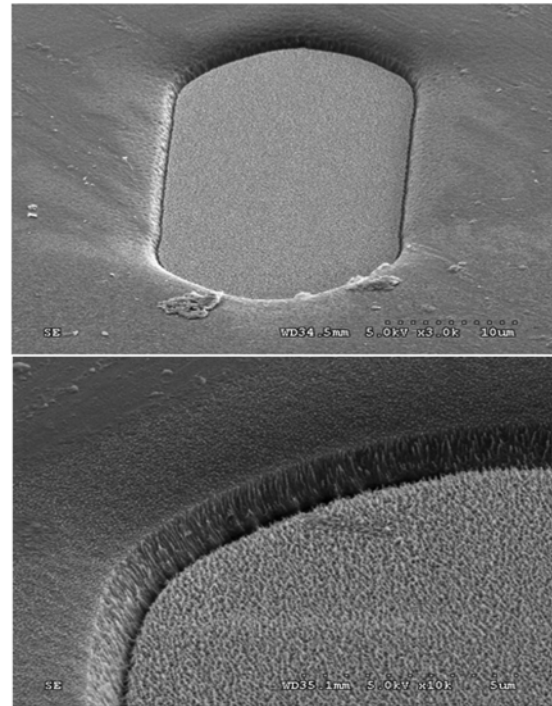


Fig. 8. SEM images of acrylic etched at 7.5 sccm SF₆ / 2.5 sccm O₂ capacitively coupled plasma. The photoresist was still on the place.

함에 따라 아크릴의 식각 선택비는 2.34 : 1에서 1.26 : 1로 감소함을 알 수 있었다. 10 sccm O₂ 플라즈마에서 가장 높은 식각 선택비를 나타내었다. SF₆/CH₄ 플라즈마 상태에서는 100% SF₆ 조건을 제외하고는 1 : 1 이하의 낮은 값으로 마스크로 쓰인 감광제가 아크릴 보다 많이 식각되었다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 7은 SF₆/O₂ 와 SF₆/CH₄ 플라즈마 상태에서 % SF₆의 성분비에 따른 아크릴 식각 후의 표면 거칠기를 나타낸 그래프이다. 표면 단차 측정기를 사용하여 표면 거칠기를 측정했을 때 샘플 표면의 전체 측정 거리는 1000 μm이었다. 식각 전의 아크릴 컨트롤 샘플의 표면 거칠기는 1.5 nm이었다. 그것과 비교하면 SF₆/O₂ 플라즈마 식각의 경우에 100 W RIE 척 파워에서 아크릴의 표면 거칠기는 대부분의 가스 비율에서 약 3~4 nm 정도이었으나, 50%의 O₂ 부근에서는 아크릴의 표면 거칠기는 7.6 nm로 최대값을 보였다. 그러나 SF₆/CH₄ 혼합 플라즈마 경우에는 SF₆/O₂ 플라즈마와는 대조적으로 모든 혼합 조건에서 표면 거칠기가 약 2 nm로 거의 변하지 않았다.

Fig. 8은 7.5 sccm SF₆ / 2.5 sccm O₂ 플라즈마 조건에서 식각한 아크릴 샘플을 각각 3,000배(위), 10,000배(아래)로 확대한 주사전자현미경 사진이다. 그림 7을 참고하면 7.5 sccm SF₆ / 2.5 sccm O₂ 플라즈마에서 식각한 아크릴의 표면 거칠기는 2.84 nm이었다. 그림 8의 10,000 배로 확대해서 얻은 사진을 보면 식각된 아크릴 표면이

약간 거친 모습임을 알 수 있었다. 또한 식각 표면에는 트렌치(trench)가 약간 보였으나 식각 벽면의 언더컷은 눈에 띄지 않았다.

4. 결 론

SF₆, SF₆/O₂, SF₆/CH₄ 가스와 기계적 펌프에 기초한 저진공 축전 결합형 유도결합 플라즈마를 사용하여 아크릴의 건식 식각을 실험하고 그 결과를 분석하였다. 그 결과를 살펴보면 첫째, SF₆/O₂의 혼합 플라즈마가 순수한 SF₆나 O₂ 플라즈마보다 아크릴의 식각 속도를 높였다. 특히 5 sccm SF₆ / 5 sccm O₂의 플라즈마에서 RIE 척 파워가 25 W에서 150 W 증가할 때 아크릴의 식각 속도는 0.11 μm/min에서 1.16 μm/min으로, 10 sccm SF₆ 플라즈마를 사용하였을 때 보다 평균 2.9배정도 크게 증가된 결과 값을 얻을 수 있었다. 둘째, SF₆ 플라즈마에 CH₄가 25% 이상 혼합되면 아크릴의 식각 속도와 식각 선택비를 급격히 감소시켰다. 즉, 5 sccm SF₆ / 5 sccm CH₄를 주입하였을 때는 0.02 μm/min 에서 0.07 μm/min 로, 10 sccm SF₆를 주입하였을 때보다 전체적으로 식각률이 크게 감소하였다. 식각 선택비와 식각 후 표면 거칠기 역시 SF₆/O₂ 플라즈마에서 가장 높았다. 특히 SF₆/O₂의 경우에 100 W RIE 척 파워에서 아크릴의 표면 거칠기는 대부분의 가스 비율에서 약 3~4 nm 정도이었으나 50%의 O₂ 부근에서는 아크릴의 표면 거칠기는 7.6 nm 로 최대값을 보였다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 인제대학교 학술 연구 지원 사업에 의해 수행하였음.

참 고 문 헌

1. T. James, M. Mannoor and D. Ivanov, *Sensors*, **8**, 6077 (2008).
2. H. Fujikake, H. Sato and T. Murashige, *Displays*, **25**, 3 (2004).
3. E. Huitema, G. Gelinck, B. Putten, E. Cantatore, E. Veenendaal, L. Schrijnemakers, B. Huisman and D. Leeuw, *Organic & Nanoscale Tech.*, 21 (2003).
4. G. Ryu, M. Lee and C. Song, *IMID/IDMC '06 DIGEST*, 1178 (2006).
5. H. Becker and C. Gartner. *Electrophoresis*, **21**, 12 (2000).
6. P. B. Chinoy, *Manufacturing Tech.*, **20**, 199 (1997).
7. J. J. Ritter and J. Kruger, *J. De Physique*, **12**, C10-225 (1983).
8. C. H. Steinbruchel, B. J. Curtis, H. W. Lehmann and R. Widmer, *Tran. Plasma Sci.*, **PS-14**, 137 (1986).
9. B. Neppert, B. Heise and H.-G. Kilian, *Colloid & Polymer Sci.*, **261**(7), 577 (1983).
10. M. Sugawara, *Plasma Etching*, p.180, Oxford University Press, NewYork, USA, (1998).
11. M. A. Libermann and A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges & Materials Processing*, p.604, John Wiley & Sons, New Jersey, USA, (2005).
12. S. H. Kim, S. J. Woo, J. H. Ahn, *J. Appl. Phys.*, **39**, 7011 (2000).
13. R. Knizikevičius, *Sens. Actuators*, **A132**, 726 (2006).