

Actinometry를 이용한 Ta 미세 패턴 식각 특성에 관한 연구

김상훈 · 안진호
한양대학교 재료공학과

Study on the Etching Characteristics of Fine Ta patterns by Actinometry Method

Sang Hoon Kim and Jinho Ahn

Department of Materials Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

초 록 : Electron cyclotron resonance 플라즈마 식각 장비를 이용하여 순수 chlorine 플라즈마로 Ta 박막의 식각 특성에 관해 조사하였다. Ta 박막의 식각 기구를 연구하기 위해 Optical emission actinometry (OEA) 를 사용하였고 OEA 조사를 통하여 최적의 공정 조건을 얻었다. 이것에 기초하여 2단계 식각을 수행하였고 마이크로 로딩 현상을 성공적으로 제어하면서 0.15 μm L & S 의 우수한 단면을 얻었다.

Abstract: The etching characteristic of a tantalum thin film with pure chlorine plasma was studied using an electron cyclotron resonance etcher system. Optical emission actinometry (OEA) was used for the study of the etching mechanism of a tantalum thin film and optimum process condition was achieved by OEA study. Based on this mechanism, double step etching was performed and 0.15 μm L & S was acquired successfully suppressing the microloading effect.

Key words: Electron cyclotron resonance, Etching, Optical emission spectroscopy, microloading effect

1. 서 론

차세대 반도체 기술은 0.1 μm 급 이하의 패턴 형성을 필요로 하며, 이를 실현하기 위한 다양한 차세대 노광 기술에서는 silicon process를 이용한 새로운 구조의 마스크를 필요로 한다. 최근 이와 같은 차세대 노광 공정용 마스크를 구성하는 중요한 요소 중 하나인 광흡수 혹은 광산란 패턴에 대한 연구가 활발히 진행 되어 오고 있다.¹⁾ 그러나, 위와 같은 패턴의 형성을 위해서는 high aspect ratio의 금속막에 대한 이방성(anisotropic) 식각 기술을 필요로 하고, 패턴의 밀도가 증가할 때 발생하는 microloading 현상²⁾을 제어할 수 있는 공정에 대한 연구가 요구되고 있다. 본 연구에서는 차세대 노광 마스크의 패턴물질로 많이 연구되고 있는 Ta 금속막에 high aspect ratio의 미세패턴을 형성하기 위하여 Electron Cyclotron Resonance (ECR) plasma etcher system을 이용하여 식각 공정을 수행하였다. 또한 Cl_2 gas를 이용한 식각 공정 중

생성되는 부산물인 TaCl_5 의 끓는점(242°C)은 다른 일반적인 Si 공정에서 생기는 식각 부산물보다 높기 때문에 Ta의 식각은 ion에 의한 sputtering이 주요인자로 작용하는 ion-assisted 공정이라 알려져 있으며 이에 따라 loading effect가 줄어들어 Ta 금속의 미세패턴을 형성시키기 위해서는 Cl plasma가 적합하다고³⁾ 받아들여지고 있어 Cl을 식각 gas로 이용하였다. 한편 스퍼터링 증착된 Ta 막은 columnar 구조를 통한 산소 확산에 의해 산화막이 형성된다는 보고가 있어⁴⁾ 이 표면의 native oxide의 존재에 따른 식각 공정의 최적화가 필요한 실정이며 이러한 Ta 박막의 식각 기구를 규명하기 위해 optical emission actinometry (OEA) 법을 사용하였다.

2. 실험 방법

Si (100) 기판 상에 etch stop layer 로 SiO_2 (300Å)를 증착하였고, Ta 박막은 DC magnetron sputter를 사용하여

3000 Å 두께로 증착하였다. Ta 박막의 패터닝을 위해 hard mask 재료로 SiO₂를 RF sputter로 500 Å 증착시켰다. SiO₂ hard mask는 SF₆와 N₂ 가스를 사용하여 ECR etcher 로 식각하였다. Ta 박막은 Cl₂ gas (15 sccm), microwave power (750-1200 W), RF power (0-150 W) 그리고 공정 압력 (3-15 mTorr)로 변화를 주면서 그에 따른 식각 특성을 조사하였다. 그리고 각 변수들간의 상관관계를 정성적으로 파악하기 위해 Optical Emission Spectroscopy (OES)를 이용하여 Ta 표면의 native oxide 제거시간 경향성을 관찰하였는데, 이는 Ta 식각시에는 Cl radical의 양이 오히려 증가하게 된다는 사실³⁾을 이용한 것으로 최초 공정시작부터 Cl radical의 emission intensity가 갑자기 증가하게 되는 시간까지를 native oxide 제거시간이라 할당하였고, 플라즈마 내의 원소 양의 변화는 total flow (15 sccm)의 4%에 해당하는 Ar을 actinometer로 사용한 Ar actinometry 방법으로 atomic Cl density 변화를 관찰하였으며⁵⁾, 그에 따른 식각 profile의 변화는 Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)을 이용하여 관찰하였다. Ta 박막을 식각하는 동안 패턴 폭이 감소하면서 0.2 μm 패턴 형성시 microloading 현상이 관찰되었는데 이의 개선을 위해 step 식각을 시도하였다. 이때의 조건은 첫 단계에서는 microwave power 900 W, RF power 150 W, 공정 압력 3 mTorr로 하였고, 두 번째 단계에서는 microwave power를 1200 W로 증가시켰다. 그리고 두 step 사이에 5분 동안 진공을 유지시켜 주었다.

3. 실험 결과

식각에 영향을 주는 인자로는 sheath 영역에서의 self bias에 의해 형성된 electric field에 의한 가속과 scattering등의 상호 작용에 의한 momentum 변동에 크게 영향을 받는 ion의 물리적인 효과와, 전기적으로는 중성이지만 화학적으로 불안정 상태에 있는 radical 에 의한 화학적 효과에 영향을 미치는 두 가지 종류로 분류될 수 있다. ECR plasma etcher system에서는 RF power, working pressure 변화 등이 물리적 식각에 주요하게 작용하는 변수이며 microwave power, 식각 gas 종류 등은 화학적 식각에 주요하게 작용하는 변수이다. Ta 박막 식각 동안에 atomic chlorine intensity의 변화를 Fig. 1(a)의 모식도에 나타내었다³⁾. Ta 박막의 식각이 진행 되는 동안에는 atomic Cl intensity가 급격하게 증가하는 것을 관찰할 수 있고 박막이 식각 되기 전과 후에 있어서는 intensity의 변화가 거의 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있는데 이것을 통해 Ta 박막의 식각 기구를 규명할 수 있

었다. Ta 박막의 표면 상에 있는 자연 산화막은 스퍼터링 공정에 의해 제거가 되고 자연 산화막 아래에 있는 Ta 박막은 chlorine radical과 반응하여 TaCl_x의 비휘발성 물질을 만들게 되며 이러한 TaCl_x 비휘발성 물질은 chlorine 양이온에 의해 다시 휘발성 물질인 TaCl_{x-1}와 Cl로 분해가 이루어져 식각 된다. 따라서 이 때 발생하는 Cl radical의 증가로 인해 atomic Cl intensity가 증가하게 되고 자연 산화막이 아닌 Ta 박막이 식각되는 것을 알 수 있다. Ta 자연 산화막 제거 시간은 플라즈마를 ignition 한 후에 atomic chlorine intensity의 급격한 증가가 시작되는 점까지 걸리는 시간으로 정하게 되었다. Fig. 1(b)는 전체 flow rate를 15 sccm으로 고정시킨 상태에서 4%(0.6 sccm)의 Ar을 첨가하여 plasma discharge가 일어나게 한 후, plasma가 안정화 상태에 이르면 atomic Cl radical의 경우에는 725.6 nm에서, Ar의 경우에는

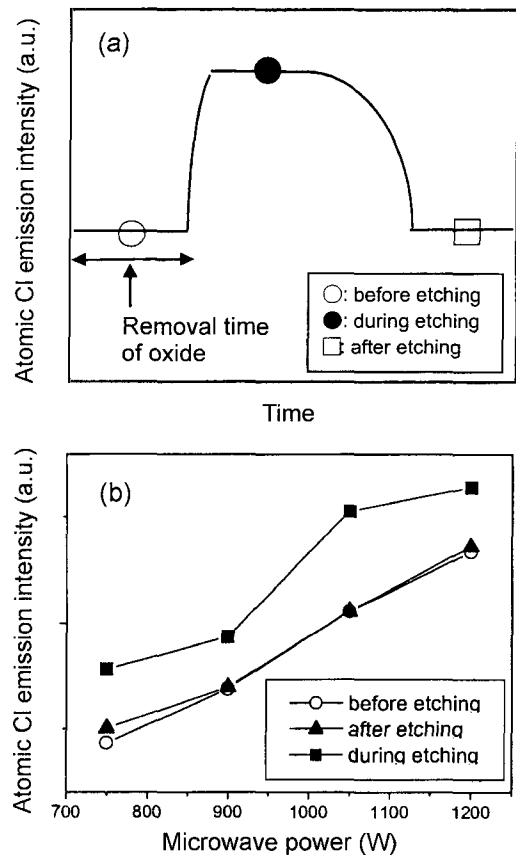
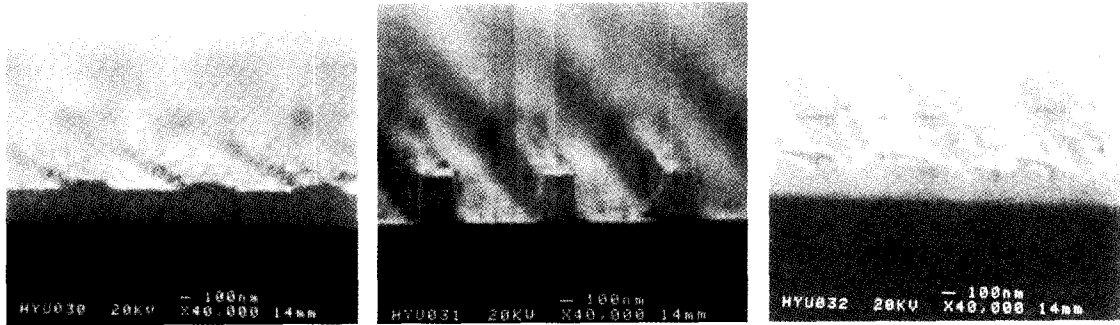


Fig. 1. Cl emission intensity at 725.6 nm in OES spectra (a) Schematic diagram of Cl emission intensity during tantalum etching process (b) as a function of microwave power measured before, during and after tantalum etching process.



(a) pressure=3mTorr, RF=0W (b) pressure=3mTorr, RF=150W (c) pressure=15mTorr, RF=150W

Fig. 2. Etch profile of a tantalum thin film with various RF bias power and process pressure at fixed Cl₂ flow of 15 sccm and microwave power of 900 W.

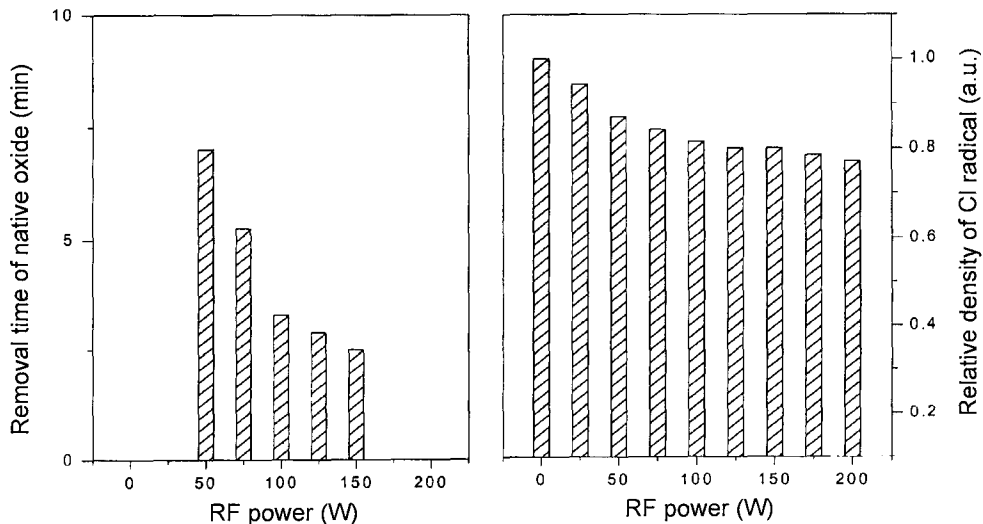


Fig. 3. Removal time of tantalum oxide and relative Cl radical density measured by Ar actinometry in ECR plasma with various RF bias power.

750.4 nm에서 각각의 emission intensity를 측정 한 후, 다음의 식 1과 같은 actinometry 식에 대입하여 atomic Cl radical density를 구하게 된다⁶⁾.

$$[Cl] \propto P \times I_{Cl} / I_{Ar} \quad (\text{식 1})$$

[Cl]는 atomic Cl radical density이고 P는 공정압력, I_{Cl}와 I_{Ar}는 Cl과 Ar actinometer 각각의 OES peak intensities이다. Fig. 2에서는 RF power와 공정 압력 변화에 따른 식각 profile을 나타내었다. 그림에서 보여진 바와 같이 높은 RF power에서와 낮은 공정 압력에서 더 좋은 식각 프로파일과 높은 식각률을 나타내게 되었다. RF power의 증가는 물리적 sputtering에 의한 식각을 활성화시킨다.^{4),7),8)} 공정 압력 증가에 따라 식각률이 감소하게 되었는데 이것은 식각에 기여하는 이온의 평균 자

유 행로가 압력증가에 의해 짧아지게 되고, 자연 산화막 제거에 필요한 충분한 물리적 에너지를 공급하지 못하게 되므로 식각률이 감소하게 되는 것으로 사료된다. Fig. 3과 4의 자연 산화막 제거 시간은 RF power가 증가하고 공정 압력이 낮을수록 감소하게 되었는데 이것은 이온의 평균 자유 행로와 에너지를 증가시킴으로 ion-assisted 식각 공정을 증가시켜 자연 산화막 제거가 용이하였음을 나타낸다. 위의 결과로부터 식각의 최적 조건을 RF 150 W과 공정압력 3 mTorr와 microwave power 900 W로 정하게 되었으나 같은 식각 조건에서 패턴의 폭을 0.2 μm로 감소시켰을 때는 Fig. 5와 같은 micro-loading 현상이 발견되었다. 이러한 microloading 현상은 패턴 폭의 감소와 밀도의 증가에 의해 plasma 입자들의 진행을 가로 막는 geometrical shadowing이 지배적이 되

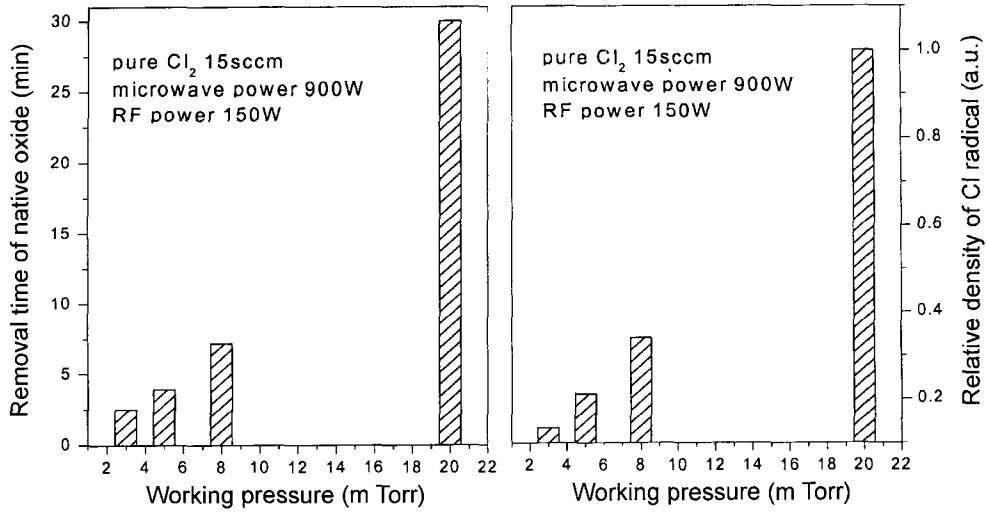


Fig. 4. Removal time of tantalum oxide and relative Cl radical density measured by Ar actinometry in ECR plasma at various process pressure.

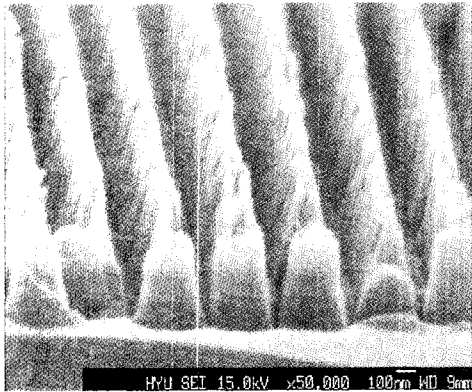


Fig. 5. Etch profile of 0.2 μm L & S patterns by continuous etching showing microloading effect.

면서 radical이 bottom trench에 도달할 수 있는 확률이 감소되어, ion에 의한 물리적 식각이 지배적이 되고⁹⁾ 반응생성물의 배출이 어렵게 되어 이에 따른 passivation의 활성화로 식각이 방해받기 때문이라고 알려져 있다¹⁰⁾. 이러한 microloading 현상을 극복하기 위하여 본 실험에서는 double step 식각공정을 도입하여 단계별로 microwave power를 바꾸어 가며 식각을 수행하였다. Double step 식각공정을 도입한 목적은 Ta 박막 식각시 초기 산화막 제거를 위해서는 물리적인 식각이 주요 인자로 작용하고, 실제 Ta 박막의 식각시에는 화학적 식각이 주요 인자로 작용하게 된다는 기본적인 식각 원리를 이용하여 최적의 식각 profile을 구현해 내기 위함이다. 첫 단계 식각에서는 물리적 식각이 지배적이 되도록 하여 Ta 박막 표면상의 oxide 제거 및 식각 초기조건을 마

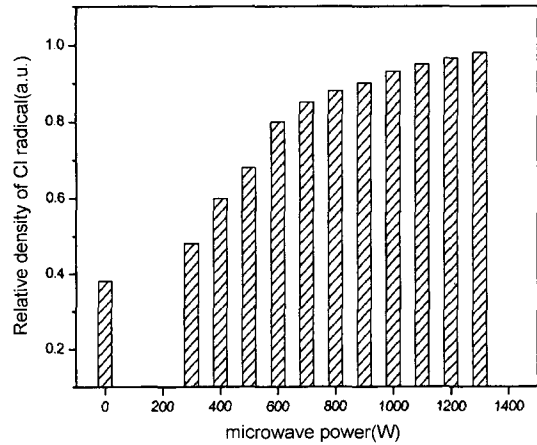


Fig. 6. Cl radical density measured by Ar actinometry as a function of microwave power at Cl₂ flow of 15 sccm, process pressure of 3 mTorr and RF bias power of 150 W.

련하기 위해 RF power를 150 W로 진행하였다. 그리고 공정을 멈춘 상태에서 진공을 5분간 유지시켜 반응생성물의 배출을 유도하였고, 두 번째 단계의 식각은 Ta 박막의 profile 개선을 위해 화학적 식각이 지배적이 되도록 공정 조건을 변화시켰다. 또한 이와 동시에 Ta의 식각 특성이 ion에 의한 bombardment가 식각 부산물의 분해를 유발시켜 휘발성의 원소로 전환시키는 물리적 식각효과를 동반해야 한다는 난점이 있다. 즉, RF bias에 의한 물리적 sputtering은 유지하면서 atomic Cl radical의 활성화율을 유도해야 하기 때문에 본 실험에서는 microwave power의 증가를 통한 많은 양의 radical 형성을 유도하였

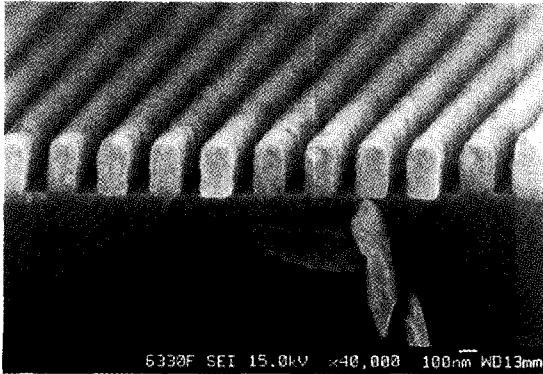


Fig. 7. Etch profile of 0.15 μm L & S patterns by double step etching.

다. 이를 바탕으로 microwave power를 900 W에서 1200 W로 증가시켜, 보다 많은 양의 radical 형성을 유도하였고^{11,12)}, 이는 Ar actinometry를 이용한 Fig. 6의 결과를 통하여 확인할 수 있다. Microwave power의 증가에 의해 생성된 다량의 Cl radical은 패턴 입구뿐만 아니라 바닥까지 충분한 화학반응을 일으켜 저휘발성의 Ta chloride막을 형성하였는데, 방향성을 갖는 이온의 충돌에 의해 바닥부분의 Ta chloride는 휘발성 물질로의 분해가 일어나는 연속적인 식각이 활성화 되었다고^{3),11)} 볼 수 있다. 이에 비해 측벽에 생긴 Ta chloride막은 식각에 대한 보호막으로 작용하여 pattern의 왜곡을 막아줌으로써 microloading effect를 개선한 Fig. 7의 0.15 μm L & S 패턴을 정확히 구현할 수 있었다.

4. 결 론

Electron Cyclotron Resonance (ECR) etcher system을 이용한 0.25 μm 이상의 Ta 박막 식각은 RF power 150 W, microwave power 900W, 공정 압력 3 mTorr, 다른 가스를 첨가하지 않은 순수한 Cl₂의 경우에서 최적의 식각 profile을 얻었다. 그러나 0.2 μm 이하의 미세한 패턴으로 식각을 진행할 경우 높아진 aspect ratio와 패턴의 고집적화로 인해 microloading 현상이 발생하였는데, 이를 해결하기 위해 double step 식각을 수행하였다. 첫 단계 식각에서는 물리적 식각이 지배적이 되도록 하였고, 두 번째 식각에서는 화학적 식각이 지배적이 되도록 microwave power를 증가시켰으며, 그 두 단계 사이에만 반응 식각물 배출을 위한 5분간의 진공 유지를 통해 microloading effect를 극복한 0.15 μm L & S의 우수한 식각 profile을 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. Y. Iba, F. Kumasaka, I. Aoyama, T. Taguchi and M. Yamabe, "Precise Stress Control of Ta Absorber using Low Stress Alumina Etching Mask for X-ray Mask Fabrication." *Jpn. J. Appl. Phys.*, 35, 6463 (1996)
2. R. A. Gottscho, C. W. Jurgensen and D. J. Vitkavage, "Microscopic uniformity in plasma etching." *J. Vac. Sci. Technol.*, B10(5), 2133 (1992)
3. M. Yamada, M. Nakaishi and K. Sugishima, "An Etching Mechanism of Ta by Chlorine-Based Plasma." *J. Electrochem. Soc.*, 138(2), 496 (1991)
4. K. Kim, S. Lee, C. Park and J. Ahn, "Comparative Study of Ta and Its Compounds for Next Generation Lithography Mask Applications." *J. Kor. Phys. Soc.*, (to be published)
5. K. Ono, M. Tuda, K. Nishikawa, T. Oomoni and K. Namba, "Chemical Kinetics of Chlorine in Electron Cyclotron Resonance Plasma Etching of Si." *Jpn. J. Appl. Phys.*, 33, 4424 (1994)
6. C. K. Hanish, J. W. Grizzle and F. L. Terry, "Estimating and Controlling Atomic Chlorine Concentration via Actinometry." *IEEE. Trans. Semiconduct. Manufact.*, Vol 12, No 3, 323, (1999).
7. N. N. Efrechow, M. W. Geis, R. W. Mountain, G. A. Lincoln, J. N. Randall and N.P. Economou, "Anisotropic etching of Al by a directed Cl₂ flux." *J. Vac. Sci. Technol.*, B4(1), 337(1986)
8. R. Hsjiao and D. Miller, "Etching of Tantalum in Fluorine-Containing High Density Plasmas." *J. Electrochem. Soc.*, 143(10), 3266 (1996)
9. R. J. Xie, J. D. ava and M. Siegel, "Aspect ratio dependent etching on metal etch: Modeling and experiment." *J. Vac. Sci. Technol.*, A14(3), 1067 (1996)
10. M. Nakaishi and K. Sugishima, "Precise Reactive Ion Etching of Ta Absorber on X-ray Masks." *Jpn. J. Appl. Phys.*, 30(11B), 3065 (1991)
11. S. Samukawa and H. Ohtake, "Pulse-time-modulated electron cyclotron resonance plasma discharge for highly selective, highly anisotropic, and charge-free etching." *J. Vac. Sci. Technol.*, A.14(6), 3049 (1996)
12. J. Asmussen, T. A. Grotjohn, P. Mak and M. A. Perrin, "The Design and Application of Electron Cyclotron Resonance Discharges." *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 25(6), 1196 (1997)