

< 논문 >

이온식각공정의 재증착 현상을 이용한 니켈 마이크로 나노 구조물 제작

정필구* · 황성진* · 이상민** · 고종수†
(2006년 6월 5일 접수, 2006년 11월 8일 심사완료)

Fabrication of Nickel Nano and Microstructures by Redeposition Phenomena in Ion Etching Process

Phill Gu Jung, Sung Jin Hwang, Sang Min Lee and Jong Soo Ko

Key Words : Nickel(니켈), Nanowall(나노벽), Microchannel(마이크로채널), Ion Etching(이온 식각), Redeposition(재증착)

Abstract

Nickel nano and microstructures are fabricated with simple process. The fabrication process consists of nickel deposition, lithography, nickel ion etching and plasma ashing. Well-aligned nickel nanowalls and nickel self-encapsulated microchannels were fabricated. We found that the ion etching condition as a key fabrication process of nickel nanowalls and self-encapsulated microchannels, i.e., 40 sccm Ar flow, 550 W RF power, 15 mTorr working pressure, and 20 °C water cooled platen without using He backside cooling unit and with using it, respectively. We present the experimental results and discuss the formational conditions and the effect of nickel redeposition on the fabrication of nickel nano and microstructures.

1. 서론

최근 미세유체역학, 바이오 기술 등의 Bio-MEMS 응용분야에서 나노/마이크로 채널을 비롯한 기능성 초미세 구조물들의 필요성이 증대되고 있다. 바이오 기술에서 일반적으로 사용되는 폴리머 기반의 초미세 구조물은 생체적합성, 낮은 제조원가 및 간단한 제조공정 등의 장점을 가지고 있다.^(1,2) 하지만 미세 바늘, 마이크로 열교환기 등의 기계적인 열전도도, 강도 및 경도 등의 특성이 필요한 곳에서는 폴리머 기반의 미세 구조물은 적

용이 어려워, 그 대안으로서 미세 금속 구조물을 이용한 많은 연구가 진행 중이다. 일반적으로 미세 금속 구조물을 형성하는 방법으로는 알루미늄 박막을 양극산화시켜 표면으로부터 수직으로 수 마이크로미터 깊이의 나노/마이크로 채널을 형성하는 알루미늄 양극 산화(anodic aluminum oxide; AAO),⁽³⁾ 금속과 폴리머 이중 막의 열적 스트레스 불일치를 이용해 표면에 생성되는 미세주름을 이용하는 자가굽힘(self-buckling),⁽⁴⁾ 마이크로 주형(microcoining),⁽⁵⁾ 마이크로 펀칭(micropunching),⁽⁶⁾ 및 마이크로 드릴링(microdrilling)⁽⁷⁾ 등과 같은 여러가지 가공방법들이 연구되었으나, 복잡한 제조공정과 더불어 일정 길이 이상의 나노/마이크로 구조물의 제작이 어려운 문제점이 있다.

본 논문에서는 상용 반응성이온식각(RIE: Reactive Ion Etching) 장비의 식각공정 중 발생하는 비휘발성 식각부산물의 재증착 현상을 이용하여 니켈 나노벽과 마이크로 텅 및 마이크로 채널을 형성하는

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부
부산대학교 정밀정형및금형가공연구소(ERC/NSDM)
E-mail : mems@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-2488 FAX : (051)514-0685

* 부산대학교 기계공학부

** 부산대학교 미세기계전자시스템협동과정

매우 간단한 제조방법을 제안한다. 또한 최적화된 이온식각공정을 통해 공정 중 기판 온도변화에 따른 공정 결과의 특성변화에 관하여 논의한다.

2. 미세 니켈 구조물의 형성원리

1960년대 후반부터 반도체 제조공정에 적용된 RIE 장비는 각종 박막의 이방성 건식식각 공정용으로 사용되어 왔다. RIE 공정은 물리적 식각반응과 화학적 식각반응이 동시에 일어난다. 물리적인 식각반응인 스퍼터링 식각(sputtering etching)은 플라즈마 입자와 식각대상의 충돌에너지를 이용하여 식각대상을 표면에서 떼어내는 공정이며, 화학적인 식각은 플라즈마 내부의 반응성 입자들과 식각대상과의 화학반응을 통해 식각대상을 제거한다. 하지만 때때로 RIE 공정 중 발생하는 비휘발성 식각부산물은 RIE 장비의 펌프를 통하여 전체가 배기 되지않고 반응기 내부에 존재하게 된다.

H. W. Lehmann 등은 RF 식각공정 중 비휘발성 입자들에 의한 재증착 효과에 대해 보고하였다.^(8,9) 이에 따르면 RIE 공정 중에 형성된 비휘발성 식각부산물 입자는 Fig. 1에서와 같이 스퍼터링되어 감광막 구조물에 직접 재증착되거나 플라즈마에 의해 후방산란되어 간접 재증착 될 수 있다. Fig. 1에서 직선으로 표시된 직접 재증착 현상은 방향성을 가지는 스퍼터링된 입자들이 감광막 구조물의 옆면에 증착되는 것을 의미하는 반면, 점선으로 표시된 간접 재증착 현상은 스퍼터링된 입자가 감광막 구조물에 바로 증착되지 못하고 플라즈마 상으로 튀어 나가서 플라즈마 기상 입자와의 충돌에 의해 다시 후방산란(backscattering)되어 위쪽에서 아래방향으로 증착되는 것을 의미한다. 직접 및 간접 재증착 현상은 상용 RIE 및 ICP-RIE(Inductively Coupled Plasma RIE) 등의 건식식각 장비에서 나타날 수 있는 일반적인 현상이다.

이러한 재증착 현상은 식각효율을 저해하고 식각균일도 및 식각정밀도를 떨어뜨리는 좋지 않은 영향을 미치므로, 통상 이를 없애는 방향으로 공정조건을 확립한다. 특히 식각공정 중 재증착 현상이 원인으로 알려진 마이크로마스크(micromasking) 현상은 공정에 매우 나쁜 영향을 미친다.⁽¹⁰⁾

본 논문에서는 니켈 건식식각을 위하여 RIE 장비에서 Ar 이온의 물리적인 식각반응만을 유도하므로, 이후 정확한 표현을 위하여 이온식각공정으로 명기한다.

3. 미세 니켈 구조물 제작

3.1 실험 장치 및 재료

본 연구를 진행하기 위한 기본재료로서 니켈박막은 전자빔증착기(Cliotek)를 이용하여 증착하였다. 사진식각 공정을 위하여 양성감광재(AZ5214E, Clariant)와 접착식노광기(MA6/BA6, SUSS microtek)를 사용하였다. 니켈 건식식각을 위하여 RIE 장치(plasmalab80plus, Oxford Instrument Plasma Technology)를, 잔여 감광막 제거를 위하여 플라즈마 애싱장치(V-15G, Plasma Finish GmbH)를 사용하였다. 이온식각공정 중 웨이퍼의 표면온도 측정을 위하여 온도감지라벨(Thermo label 5E series, Nichiyu Giken Kogyo)을 사용하였다. 미세 구조물 촬영을 위하여 전자방출형 주사전자현미경(FE-SEM, S-4200, HITACHI)을 사용하였으며, 아울러 재증착된 니켈막의 물성을 분석하기 위하여 이차이온질량분석기(IMS 6f, CAMECA)를 사용하였다. Figure 2는 식각공정에 사용된 상용 RIE 장치의 모식도이다. 바닥전극(최대 600 W)은 13.56 MHz RF 전원과 연결되어 있으며, 웨이퍼의 냉각을 위하여 물냉각과 헬륨가스냉각을 동시에 사용할 수 있다.

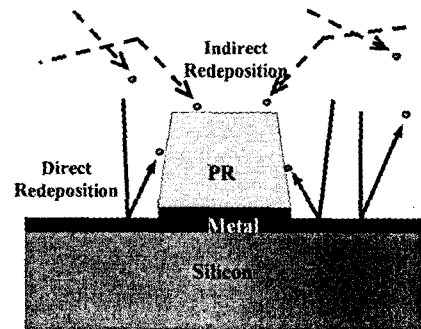


Fig. 1 Schematic of the redeposition process during dry etching process

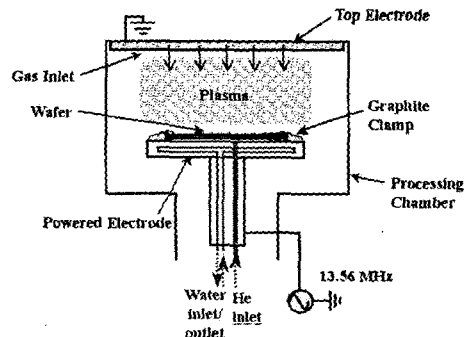


Fig. 2 Schematic of a RIE reactor

3.2 제작공정

이온식각공정에서 발생하는 재증착현상을 이용한 초미세 구조물의 제작 공정도를 Fig. 3 에 도시화 하였다. 제작공정은 6 인치 실리콘 웨이퍼 위에 전자빔증착기로 2000Å 두께의 니켈박막을 증착한 뒤, 사진식각공정으로 1.2 μm 높이의 감광막 구조물을 형성한다[Fig. 3(a)]. 이후 니켈 식각공정으로 재증착 현상을 유도하여 니켈 미세 구조물을 형성한다[Fig. 3(b)]. 마지막으로 산소 플라즈마 앓싱으로 잔여의 감광막을 제거하여 니켈 나노벽[Fig. 3(c)]과 마이크로 채널[Fig. 3(d)]을 형성한다. 니켈 식각을 위하여 본 연구에서는 Table 1 에서와 같은 두 가지의 이온식각공정조건을 사용하여 공정을 수행하였고, 그 결과를 비교하였다. 공정번호 1 과 2 는 공히 물냉각을 사용하였으며, 공정번호 2 에서는 보다 강한 냉각을 위하여 헬륨을 부가적으로 사용하였다. 이러한 냉각조건을 제외한 여타 공정 조건은 큰 차이가 없다.

4. 결과 및 고찰

4.1 니켈 나노 벽과 나노 돌기

공정번호 1 의 이온식각공정조건을 이용하여 Fig. 4 와 5 에서 보는 바와 같은 나노 벽과 나노 돌기를 제작하였다. Figure 4(a)는 사진식각 공정을 거쳐 형성된 감광 막 구조물을 나타내며, Fig. 4(b) 는 공정번호 1 의 이온식각공정이 수행된 후 내부 감광막 구조물이 남아있는 FE-SEM 사진이다. Fig. 4(c) 는 플라즈마 앓싱 후 내부 감광막 구조를 제거하여 폭이 2 μm 으로 제작된 니켈 나노 벽을 나타내며, Fig. 4(d)는 배열된 2 μm 니켈 나노 벽들의 FE-SEM 사진이다. 재증착된 니켈 나노 벽의 두께는 100 nm 이며, 완성된 니켈 나노 벽의 전체 길이는 사진식각 공정시 형성된 감광막 구조물의 길이인 1 cm 와 같았다. 특히 Fig. 4(c)의 기울어진 벽면은 재증착 공정 시 감광막 구조물의 열변형 결과를 나타낸다. Fig. 4(e)와 4(f) 역시 공정번호 1 의 공정 결과로서 지름 10 μm 의 음각, 양각으로 형성된 감광층 원형구조를 이온식각하여 형성된 니켈 마이크로 팁을 나타내는 FE-SEM 사진이다. 니켈 마이크로 팁 형성공정은 높은 웨이퍼 표면온도로 인한 감광막의 열변형과 반응초기 간접재증착효과로 인해 증착된 니켈층의 마이크로마스킹 현상의 상호작용 결과로 사료된다. 공정번호 1 의 공정결과에서 니켈의 식각률은 100 Å/min 이지만 강한 재증착 효과의 영향으로 실제 식각률은 측정된 값보다 더 높을 것으로 예측된다.

공정번호 1 의 공정에서 식각공정 중 실리콘 웨이퍼 냉각을 위해 물을 사용하였으며, 공정 중 웨이퍼의 표면온도는 약 200 °C 로 측정되었다. 이는 550 W 의 높은 RF power 조건에서 강한 Ar 이온충돌의 영향으로 공정 중 웨이퍼의 표면온도가 매우 높음을 나타내며, 사용된 물 냉각방식이 이러한 높은 RF power 공정조건에서 웨이퍼 표면의 온도를 제어하는데 적절치 못함을 알 수 있다. 사용된 감광제(AZ 5214E)의 물질보건안전자료(MSDS)에

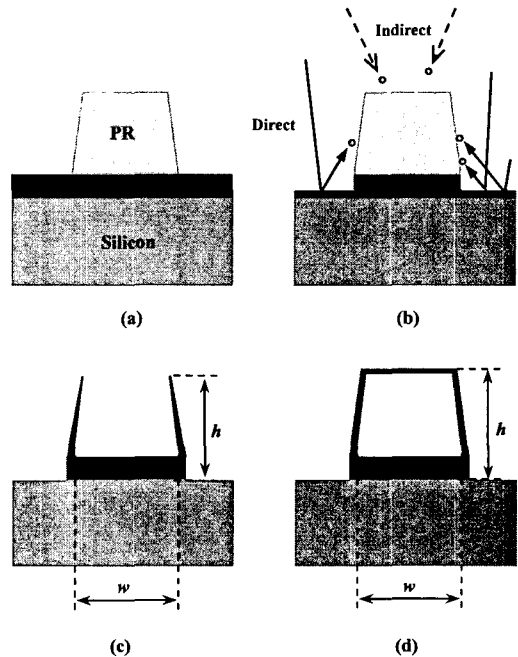


Fig. 3 Microfabrication process for nickel micro and nanostructures: (a) Ni deposition by E-beam evaporation and photoresist patterning by photolithographic process; (b) ion etching process; (c) & (d) O2 plasma ashing to remove sacrificial photoresist. While nickel nanowalls (c) are built by run #1, microchannels (d) are formed by run #2

Table 1 Ion etching process conditions; run #1 (without He backside cooling) and run #2 (with He backside cooling)

Run No.	Ar (sccm)	Pressure (mTorr)	RF (W)	He (mTorr)	Time (min.)	-dc (V)
1	40	15	550	0	20	860
2	40	15	550	10	20	906

따르면 표준상태에서 134 °C 의 비등점을 가지는 것을 알 수 있다. 따라서 높은 RF power 로 인하여 공정 중인 웨이퍼의 표면온도가 크게 높아지게 된다. 고온의 영향으로 감광막은 열변형과 증발이 일어나게 되며, 이와 동시에 니켈 재증착이 이루어지기 때문에 Fig. 4 에서와 같은 나노 구조물이 형성되는 것으로 사료된다.

4.2 니켈 마이크로 채널 형성

Table 1 에서 공정번호 2 의 이온식각공정조건으로 자체밀봉된 마이크로 채널을 형성하였으며, 제작된 결과물은 Fig. 5 에서 보는 바와 같다. Fig. 5(a)-(c)는 공정번호 2 의 공정조건에서 제작된 폭이 각각 1, 2, 10 μm 이고 감광막이 부분적으로 제거된 니켈 마이크로 채널의 FE-SEM 사진이다.

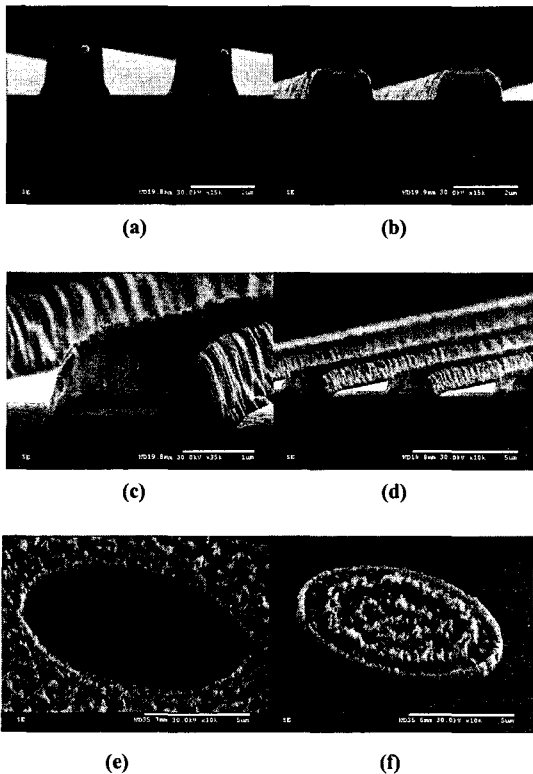


Fig. 4 Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) images of fabricated nickel nanowalls and microtips pattern by run #1: (a) AZ 5214E photoresist patterning by photolithographic process; (b) 2 μm wide nanowalls before plasma ashing; (c) a pair of nanowalls with 2 μm wide; (d) 2 μm wide nanowalls array; (e) microtips pattern of 10 μm diameter depression; (f) microtips pattern of 10 μm diameter prominence

Fig. 5(d)는 10 μm 폭을 가지는 자체밀봉된 마이크로 채널 어레이를 나타내고 있다. 재증착된 채널의 윗면의 두께는 100 nm 이며 옆면의 두께는 높이에 따라 102 ~ 179 nm 의 값으로 측정되었다. 채널 옆면과 윗면의 두께가 차이 나는 부분은 감광막 구조물의 영향으로 간접재증착효과에 영향을 받는 평면의 재증착율과 직접/간접재증착효과에 영향을 동시에 받는 경사면의 재증착율의 차이가 반영된 결과이다. 공정결과에서 니켈의 식각률은 100 Å/min 이었다.

공정번호 2 의 공정에서는 실리콘 웨이퍼의 냉각을 위해 물과 헬륨가스를 동시에 사용하였으며, 공정 중 웨이퍼의 표면 온도는 약 80 °C 로 측정되었다. 제작된 마이크로 채널의 형태는 Fig. 4 의 결과와 많은 차이를 보인다. 이는 헬륨냉각으로 웨이퍼 표면의 온도가 낮아짐으로 인해 공정 중 감광막 구조물의 열변형 정도가 매우 작아졌음을 의미한다. 즉, 공정번호 1 의 공정조건에서 200 °C 까지 상승하였던 웨이퍼의 표면온도를 헬륨가스를 사용하여 약 80 °C 까지 낮추어 감광막 구조물의 열변형 및 타는 현상을 막아 고른 형태의 자체밀봉된 마이크로 채널의 제작이 가능하였다. 그러므로 니켈 재증착으로 감광막 구조물을 둘러싸는 니켈 박막을 형성하기 위해서는 공정 중 웨이퍼 표면온도의 제어가 반드시 필요함을 알 수 있다.

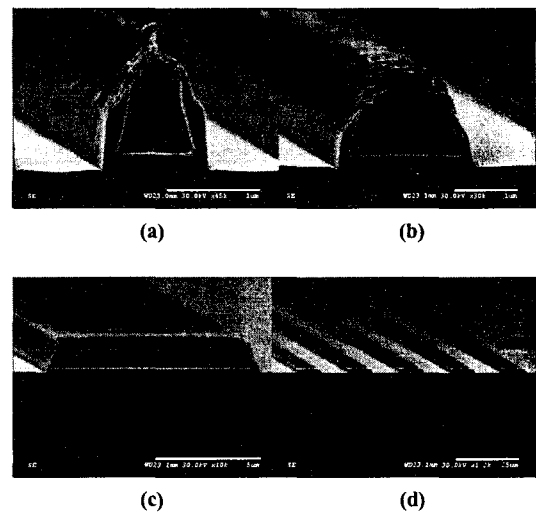


Fig. 5 FE-SEM images of fabricated self-encapsulated nickel microchannels by run #2: (a) 1 μm-wide microchannel; (b) 2 μm-wide microchannel; (c) 10 μm-wide microchannel; (d) 10 μm-wide microchannel array

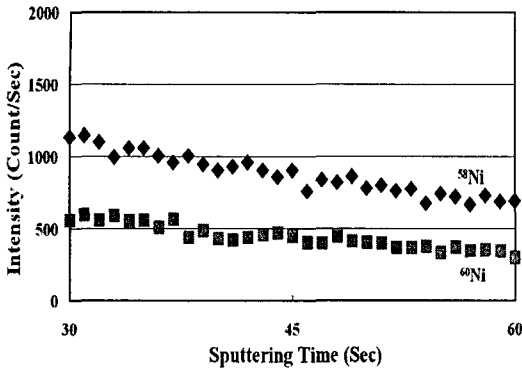


Fig. 6 Secondary Ion Mass Spectrometry (SIMS) profiles at the top of the self-encapsulated microchannels

이온식각공정 중 재증착된 박막의 조성을 확인하기 위해 이차이온질량분석기(SIMS)에서 7.5 keV, 50 nA 조건의 O^+ 을 이용하여 깊이에 따른 최적화된 분석을 실시하였다. 그 결과 재증착된 박막은 Fig. 6 에서와 같이 니켈 동위원소(^{58}Ni , ^{60}Ni)만 측정되어, 제작된 박막은 순수 니켈 박막으로 확인되었다.

5. 결론

이온식각공정의 재증착현상을 이용하여 니켈 나노 벽, 나노 돌기 및 자체밀봉된 마이크로채널을 형성하였다. 제작공정은 니켈 증착, 사진식각, 이온식각 및 산소 플라즈마 앓트와 같은 4 가지 공정을 순차적으로 사용하였다. 니켈 재증착 현상을 유도하기 위하여 500 W 의 강한 RF power 조건 하에서 공정을 수행하였다. 공정 중인 웨이퍼의 냉각을 위하여 물을 공히 사용하였으며, 보다 강한 냉각을 위하여 헬륨을 선택적으로 사용하였다. 물 냉각만을 사용하였을 경우 웨이퍼의 표면온도는 200 °C 까지 상승한 반면, 헬륨냉각을 추가하였을 경우에는 80 °C 까지 낮아졌다.

웨이퍼의 표면온도가 200 °C 로 높아질 경우 감광막이 변형되고 증발되므로 감광막 구조물의 윗면에 니켈이 재증착되기 힘들다. 이로 인해 감광막 구조물의 옆면에만 니켈이 증착되어 니켈 나노 벽과 나노 돌기가 형성되었다. 반면, 헬륨가스의 사용으로 인해 웨이퍼의 표면온도가 80 °C 로 낮아졌을 때는 감광막 구조물이 원형 그대로 유지되기 때문에 감광막 구조물의 옆면과 윗면에 골고루 니켈이 증착되어 마이크로 채널이 형성되었다.

니켈 재증착을 이용한 마이크로 나노 구조물 제작은 니켈 식각과 동시에 미세 니켈 구조물이 형

성되는 독특한 제작특성을 가진다. 이러한 제작방법을 이용한 미세 니켈 구조물 제작방법은 기계적인 특성을 필요로 하는 마이크로 나노 소자제작에 응용될 수 있다. 특히 식각을 통한 소자분리 (isolation)와 자체밀봉(self-encapsulation) 현상이 동시에 이뤄지는 특성을 이용한 패키징 분야에도 적용가능 할 것으로 판단된다.

후기

이 논문은 2003 년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2003-003-D00036)

참고문헌

- (1) Quake, Stephen R. and Scherer, Axel, 2000, "From Micro to Nanofabrication with Soft Materials," *Science*, Vol. 290, pp. 1536~1540.
- (2) Ko Jong Soo, Yoon Hyun C., Yang Haesik, Pyo Hyeon-Bong, Chung Kwang Hyo and Kim Youn Tae, 2003, "A Polymer-Based Microfluidic Device for Immunosensing Biochips," *Lab Chip*, Vol. 3, pp. 106~113.
- (3) Routkevitch Dmitri, Tager, A. A., Haruyama Junji, Almawlawi Diyaa, Moskovits Martin and Xu Jimmy M., 1996, "Nonlithographic Nano-Wire Arrays: Fabrication, Physics, and Device Applications," *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol. 43, pp. 1646~1658.
- (4) Yoo Pil Jin, Suh Kahp Y., Park S. Young and Lee Hong H., 2002, "Physical Self-Assembly of Microstructures by Anisotropic Buckling," *Adv. Mat.*, Vol. 14, pp. 1383~1387.
- (5) Böhm, J., Shubert, A, Otto T. and Burkhardt, T., 2001, "Micro-Metalforming with Silicon Dies," *Microsyst. Technol.*, Vol. 7, pp. 191~195.
- (6) Joo Byung-Yun, Rhim Sung-Han and Oh Soo-Ik, 2005, "Micro-Hole Fabrication by Mechanical Punching Process," *J. Mater. Process Technol.*, Vol. 170, pp. 593~601.
- (7) Sen Mohan and Shan, H. S., 2005, "A Review of Electrochemical Macro- to Micro-hole Drilling Processes," *Int. J. Mach. Tool Manu.*, Vol. 45, pp. 137~152.
- (8) Lehmann, H. W., Krausbauer, L. and Widmer, R. 1977, "Redeposition-A Serious Problem in rf Sputter Etching of Structures with Micrometer Dimensions," *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol. 14, pp. 281~284.
- (9) Robinson, R. S. and Rossmagel, S. M., 1982, "Ion-Beam-Induced Topography and Surface Diffusion," *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol. 21, pp. 790~797.
- (10) Vossen, J. L., 1971, "Control of Film Properties by rf-Sputtering Techniques," *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol. 8, pp. s12~s30.