

4MHz I-PVD장치에서 정합회로를 이용한 플라즈마 제어

주 정 훈

군산대학교 공과대학 재료공학과
(1998년 8월 12일 접수)

Plasma control by tuning network modification in 4MHz ionized-physical vapor deposition

Junghoon Joo

Department of Materials Science & Engineering Kunsan National University,
Mt.68 Miryong-dong Kunsan, 573-701 Korea
(Received August 12, 1998)

요 약 - 내부 삽입형 유도결합 플라즈마를 이온화원으로 하는 I-PVD장치를 이용하여 박막을 형성하는데 중요한 요소의 하나가 이온의 입사에너지이며, 이는 플라즈마 전위와 기판 전위의 차이에 의해서 결정된다. 이를 감소시킬 목적으로 안테나 여기 주파수를 4 MHz의 중간주파수에서, 안테나의 정합 회로를 변형형, 부동형의 2가지로 변화시키고, 부동형에서는 바이어스 저항의 값을 가변시켰다. 그 결과 Ar 플라즈마에서 4 MHz RF 전력 600 W에서 5 mTorr에서 30 mTorr의 넓은 압력 범위에서 5 V 미만의 낮은 평균 플라즈마 전위와 60V의 안테나 전압을 얻었다. 또한 출력측에 설치한 RLC회로의 조절을 통해서 RF전력 500 W에서 RF 입력 및 출력단의 RF 안테나 유기 전압을 50 V의 아주 낮은 값으로 유지시킬 수 있었다. 이때의 안테나 및 플라즈마의 총 임피던스는 약 10 Ω이었으며, 리액턴스를 0.05 Ω수준으로 유지하였을 때 가장 낮은 전압을 얻었다.

Abstract - Ion energy is one of the crucial property in thin film deposition by internal ICP assisted I-PVD. As ion energy is determined by the difference between the plasma potential and the substrate bias potential, ICP excitation frequency was tested with medium frequency of 4 MHz and two types of tuning circuits, alternate and floating LC network with a biasing resistor, were tested. The results showed that plasma potential was less than 5 V in a range of Ar pressures, 5mTorr to 30 mTorr, at 4 MHz RF 600 W and 60 V of maximum RF antenna voltage was maintained either at RF input or output terminal. By proper control of RLC circuit installed after RF antenna, 50V of RF induced voltage on RF antenna was obtained at 500W input power. The total impedance of RF antenna and plasma was around 10 Ω, and minimum RF voltage was obtained with a condition of lowest reactance at most 0.05 Ω.

1. 서 론

고속의 작은 크기의 반도체 소자에서 필요로 하는 금속 배선은 우선 낮은 전기저항과 높은 전기이동(electromigration)내성을 가지고 있어야 하고, 0.25 μm 이하의 초미세 패턴을 채울수 있는 장비를 필요로 한다. 이와 같은 목적으로 개발된 I-PVD(Ionized Physical Vapor Deposition)는 Applied, Novellus 등 몇몇 장비 회사들에 의해서 상품화 단계에 들어가 있다. 이들이 사용하는 플라즈마원의 종류는 내부 삽입형 유도 결합 플라

즈마[1], 중공 음극형 마그네트론(Hollow Cathode Magnetron Discharge)등이며[2], 이보다 앞서 ECR을 사용한 일부 연구자들이 있다[3]. 이들 장비는 모두 높은 이온화율을 근본으로 하고 있다. 즉 Bohm presheath condition을 만족하는 이온들은 쉬스의 전기장에 의하여 직진 가속되어 기판에 입사하므로 낮은 에너지에서도 스퍼터링이 잘 발생하는 금속의 경우, 또는 대면적 평판 디스플레이에 사용될 다결정 박막의 경우와 같이 결정 결함을 줄이기 위해 낮은 이온에너지가 아주 필수적일 때는, 플라즈마 전위가 상당히 넓은 공정 조건에서 일정

한 낮은 범위내에 있던지 기관 바이어스를 오히려 양극성으로 가해주어야 하는데 플라즈마의 준중성 때문에 전자에 의한 양극성 확산(ambipolar diffusion)으로 인가한 양의 전위만큼 양이온의 에너지를 감소시켜 주지는 못한다. 또한 이온화 마그네트론 스퍼터링의 경우에는 30 mTorr 이상으로 가스의 압력이 높아야 이온화율이 높는데, 전하교환충돌을 거친 중성 입자들의 운동 에너지가 열운동 에너지보다 높아서 본래 목적하는 방향성 저에너지 입자 충돌을 달성하기가 어렵다. 이에 대한 해결책으로는 Ohmi[4] 등의 180 MHz대역의 고주파 사용이 한 가지 방법이 된다. 이온이 쉬스를 지나는 동안 고주파의 주기 변화에 의한 가속 효과가 이온 에너지 분포의 폭을 넓히는 것을 방지하기 위함이다. 그러나 Ohmi의 경우에는 고주파를 직류를 사용한 마그네트론 스퍼터링의 음극에 중첩해서 가하고 있으므로 효과적으로 스퍼터된 입자들을 이온화할 수 없었다. 대개의 이온들은 Ar^+ 였을 확률이 높다. 스퍼터링 가스의 압력이 10 mTorr 이하면 Yamashita의 질량분석기를 이용한 결과에서도 Ar^+ 가 금속 이온보다 훨씬 많은 양을 차지하나, 100 mTorr 수준에서는 거의 100%에 가까운 금속 이온의 피크를 보인다. 물론 이것은 sampling orifice를 지나오는 양이 쉬스에서 이동도에 의해서 영향을 받고 크기가 작은 금속 이온이 더 높은 이동도를 가지므로(Ar^+ : $1.6 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [5], Al^+ : $2.7 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [6]) 플라즈마 공간에서도 같은 양 만큼 금속 이온의 농도가 증가 했다고는 할 수 없으나 이온화 분턱에너지가 Ar보다 상대적으로 낮은 금속 이온들이 더 많이 이온화 되었으리라고 보는 것은 타당하다. 내부 삽입형 ICP의 가장 큰 문제의 하나가 코일에 인가되는 RF voltage에 의해서 발생하는 용량성 결합(capacitively coupling)의 크기가 커서 코일에 유도되는 자기 바이어스 전압이 평균적으로 상당히 큰 음의 값을 가지고 있다는 것이다. 이는 이동도가 큰 플라즈마내의 전자가 코일에 양의 RF 전압이 걸리는 반주기 동안 아주 빠른 속도로 코일을 통해서 접지쪽으로 전도되어 나가기 때문이다. 따라서 진공 챔버에 RF 전력을 연결하는 두 곳의 접합을 모두 접지 전위에서 절연하여 capacitor로 연결하면 코일의 스퍼터링 억제와 플라즈마 전위의 안정적인 조절이 가능할 것으로 예상된다. 또한 여기 고주파의 주파수를 13.56 MHz에서 4 MHz로 낮춤으로써 전자와 이온의 이동도의 차이를 줄여주어 용량성 결합을 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 고주파의 주파수를 기존의 13.56 MHz에서 중간주파수인 4 MHz

로 바꾸어 보고 안테나의 정합 회로를 변형형, 부동형(floating type), 부동형에 바이어스 저항을 삽입한 형태로 나누어서 압력과 전력의 비율에 따른 기관 전류의 변화와 Ar , Ar^+ , Ag , Ag^+ 의 OES (Optical Emission Spectroscopy)를 관찰함으로써 실제로 플라즈마 공간 및 기관에 입사하는 입자들중 이온의 분율이 증가하였는지 조사하였다. 또한 기관의 물질이 유리와 같은 부도체일 때 발생하는 초기의 전하 축적 현상이 기관과 직류 바이어스 전원 사이에 설치된 Low Pass Filter의 C값에 따라서도 영향을 받는지 조사하였다. 이는 Electrostatic chuck을 사용하는 system의 경우 아주 중요한 변수가 된다.

2. 실험 방법

그림 1에 본 연구에 사용한 장치의 개략도를 나타내었다. 자세한 설명은 기발표한 논문에서 나와있으며[7-8]

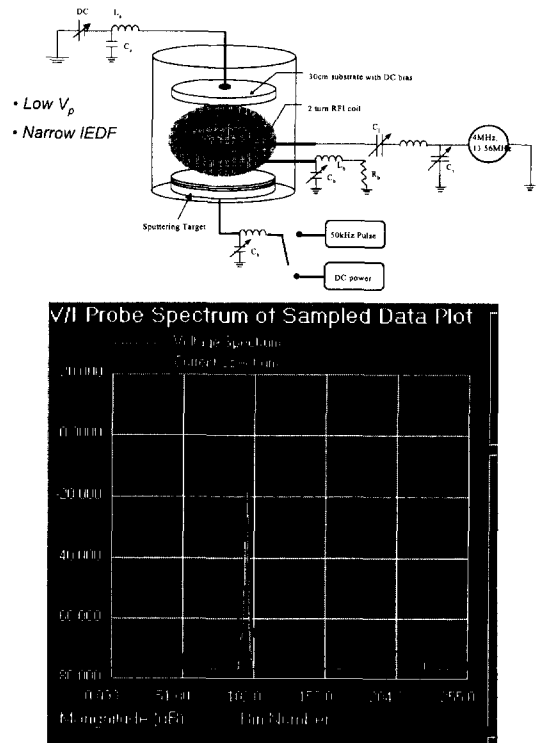


Fig. 1. (a) Experimental system. 4 or 13.56 MHz rf generator is used for ICP generation with 3 different types of matching network (standard, alternate, floating). (b) Voltage and current spectra show pure 4 MHz output is obtained with less than 60 dB harmonic output level.

여기에서 RF antenna의 RF전력이 챔버에서 나가는 쪽의 정합 회로만이 다르다. RF antenna와 병렬로 진공 콘덴서(7-1000pF)와 RF choke coil(84 μ H-2.2 mH), 저항(0, 4.1, 8.2, 16.4 k Ω)이 연결되어 있다. 이 저항의 삽입 목적은 플라즈마와 접촉하고 있는 RF coil에 양의 전압이 인가되는 동안 RF antenna 주변 플라즈마내의 전자가 전도되어 접지되어 있는 antenna의 다른쪽 끝으로 나가는 것을 방지하여 큰 음의 자기 바이어스 전압이 RF antenna에 유기 되지 않도록 하기 위함이다. $1/\omega C_0$ 를 7-1000 pF에 대해서 계산해 보면, 5.68k Ω -39.8 Ω 이 된다. RF antenna에 유기되는 음의 전위는 용량성 결합을 증대 시키고 플라즈마 전위를 증가시키므로 기판을 접지 전위로 유지하여도 플라즈마 전위에 해당하는 이온의 운동에너지가 부가되므로 이온의 에너지가 작은 크기의 contact이나 via의 입구 부분 증착층의 형상과 두께를 결정 짓는 I-PVD나 낮은 이온 에너지의 영역에서 결정 결합이 없는 박막을 형성시켜야 하는 TFT-LCD의 저온 poly-Si 공정 등에서는 아주 불리하다. 또한 RF coil 물질이 스퍼터 되어 성장 중인 박막에 혼입되면 불순물의 문제를 일으킨다. 이런 정합회로의 차이가 미치는 영향을 분석하기 위하여 투입한 고주파 전력, 스퍼터 전력, 가스의 압력, 기판의 바이어스등의 조건에서 기판 전류, Langmuir probe로 부유전위, 플라즈마 전위등을 측정하고, OES(Optical Emission Spectroscopy)를 사용하여 종합적으로 정합회로의 구성이 플라즈마의 RF 전력 전달 및 기판 입사 이온의 행동에 어떻게 반영되고 있는지 조사하였다. 또한 기존에 사용하던 13.56 MHz 전용의 impedance probe(RFZ-60, Advanced Energy)대신 광대역 임피던스 측정기(0.2-60 MHz, ENI, V/I probe)를 사용하여 부하의 전압, 전류, 임피던스를 각각의 방전 조건에 대하여 조사하였다. 본 연구에 사용한 4 MHz RF generator는 13.56 MHz용 650 W generator (ENI-OEM-650A)를 oscillation circuit, final drive amplifier의 input impedance circuit, output band pass filter unit등을 4 MHz에 맞게 개조하여 만든 것으로서 generator와 matching network사이에 watt meter (Bird thurline model 43)로 출력을 교정하여 사용하였다. ENI V/I probe에 내장되어 있는 FFT기능을 이용하여 출력 전압과 전류의 스펙트럼을 측정할 결과 이차고조파 성분은 정상적인 방전 조건에서 -70 dB 이하로 나타났다(그림 1b).

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 정합회로 구성에 따른 Ar 압력과 고주파 출력의 영향

먼저 일정한 ICP 투입 전력에서 금속 타겟의 스퍼터링 전력을 증가시키면서 기판에 흐르는 전류를 측정하였다. 기판에 입사하는 이온의 에너지가 높으면 이차전자의 발생량이 많아서 모두 이온 전류라고 단정짓기가 어렵다. 따라서 기판 전위를 0 V와 -20 V에서 측정하여 비교하였다. 기판 전위에 따라서 측정한 기판 전류는 0 V의 바이어스 전위에서는 아주 조금 흐르다가 기판 전위를 -3 V~-5 V를 인가하면 급격히 증가하여 -10 V이상에서는 완전한 포화 상태를 보였다(그림 2a의 내부삽입). 그런데 스퍼터링 전력을 증가시켜가면 바이어스 저항이 0 Ω 인 경우에는 급격히 플라즈마 전위가 감소하는데(그림 2a), Ar 압력 5 mTorr에서 30 mTorr영역에서 78V가 ICP power 400 W이상에서의 중단값이다. 그러나 바이어스 저항을 4.1 k Ω 으로 증가시키면(그림 2b) 전 가스 압력 영역에서 최대 5 V의 낮은 플라즈마 전위를 유지하고 있다. Ar 압력이 증가함에 따라 중단값을 보이는 ICP power가 250 W, 300 W, 350 W, 370 W, 390 W, 450 W으로 증가하고 있는데 이는 가스 압력 증가에 따른 전자 온도의 감소로 해석이 가능하다. 바이어스 저항을 8.2 k Ω 으로(그림 2c) 증가시켰을때는 같은 경향을 보이거나 압력에 따라서는 10 mTorr이상에서 플라즈마 전위만 0.5 V씩 차이날 뿐 중단값을 나타내는 ICP power에서는 300 W로 거의 차이가 없었다. 용량성 결합 플라즈마에서는 대개 가스의 압력이 증가하면 플라즈마 전위가 감소하는 것이 보편적인데, 여기에서는 압력을 증가시키면 상당히 낮은 값이기는 하나 증가를 보이고 있다. 이를 정확히 해석하기는 어려우나 내부 삽입형 ICP에서는 유도성 결합과 용량성 결합이 투입 전력을 배분하여 소모하는데 압력이 증가할수록 스퍼터된 입자들의 이온화가 증가하고 이에 따른 임피던스의 감소로 유도성 결합에 의한 전력 전달의 효율이 증가한 것으로 생각된다. 이는 바이어스 저항을 ∞ 로(그림 2d) 했을때에도 같은 경향을 보이며 다만 전위가 최고치 3.5 V로 매우 낮은 값을 보이고 있다는 것이다. 그러나 바이어스 저항을 사용하는 경우 고주파 전력의 소모가 안테나/플라즈마 조합이 아닌 바이어스 저항쪽에서 많은 양을 소모한다면 비효율적이다. 이 부분을 조사하기

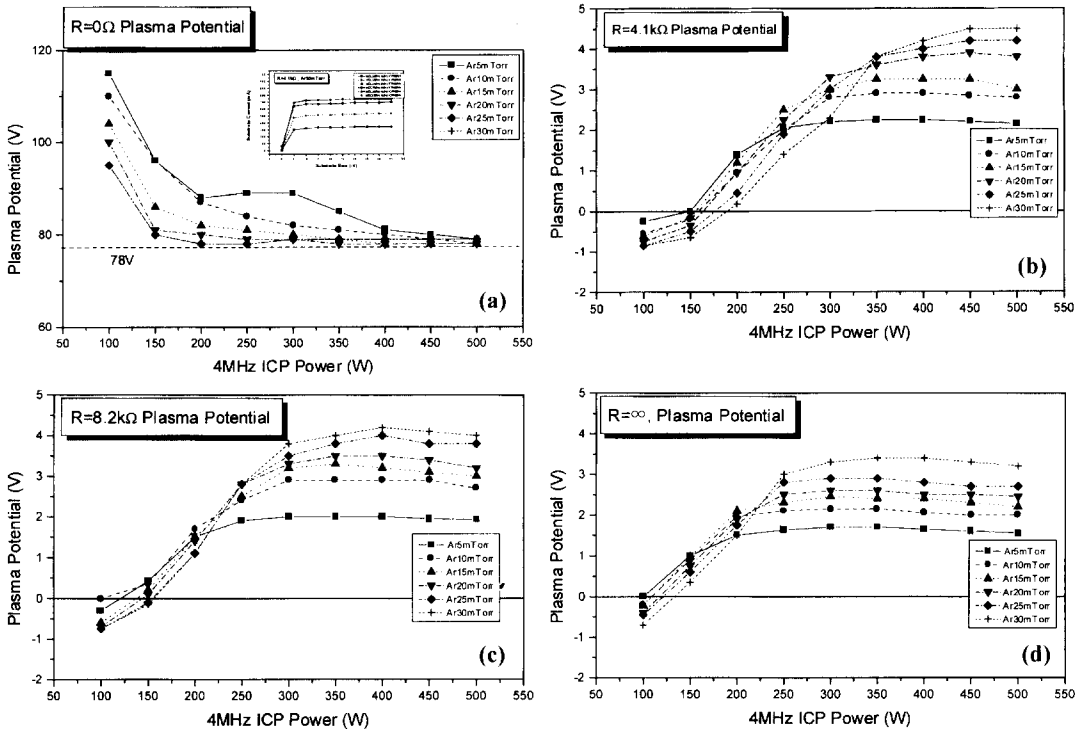


Fig. 2. Plasma Potential measured at different ICP powers with fixed Ag sputtering under different Ar gas pressures (5, 10, 20, 30 mTorr) and bias resistance (a) 0 Ω, (b) 4.1 kΩ, (c) 8.2 kΩ, (d) ∞ Ω).

위하여 ENI V/I probe를 고주파 전원과 정합회로 사이, RF antenna와 바이어스 저항회로사이에 설치하여 각각의 경우 전력과 임피던스를 측정하였다. 이렇게 측정된 결과 RF antenna의 출력단에 설치한 RLC 회로로 소모되는 전력은 출력 500 W에서 최대 7.8 W(1.56%)로 나타났다. RF antenna에 유기되는 전압은 500 W에서 최대 104 V, 최소 57.5 V였다. chamber에 고주파전력이 투입되는 곳에 V/I probe를 설치하여 측정하면 부하의 임피던스는 $10.0 + j 0.02 \Omega$ 으로 거의 저항 성분만을 가지고 있는 것으로 나타났다. 이 때 고주파 전원에서 관찰되는 반사파는 진행출력 500 W인 경우 5 W 미만이다. 전원쪽에서 관찰되는 반사파를 거의 측정할 수 없으므로 할 수 있는 정합점은 단일하지 않는데, 같은 진행출력에서 육안으로도 붉은 빛의 방전과 아주 밝은 흰빛의 방전을 식별할 수 있다. 그러나 Ar만을 사용하는 경우에는 기관 전류값은 이 두 가지의 방전에서 거의 차이가 없었다. 스퍼터수율이 큰 금속인 Ag를 높은 속도로 스퍼터할 때의 기관 전류를 바이어스를 가하지 않고 측정된 결과를 그림 3에 나타내었다. 압력이 30 mTorr로

높은 때 170 mA를 나타내었으나 ICP 투입 전력을 400 W로 고정했을때 Ag sputtering power가 300 W를 넘으면 급격히 전류가 감소하고 450 W에서는 거의 0으로 측정되었다. 기관 바이어스가 0 V이므로 플라즈마 전위가 수백 Volt만 아니라면 이차전자에 의한 전류증가분

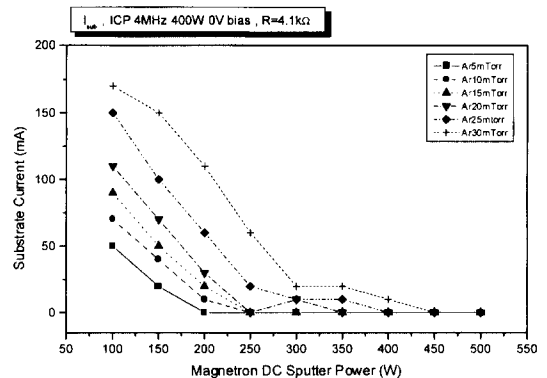


Fig. 3. Substrate current measured at 0 V bias with various Ar sputtering power. It shows heavily sputtered metal quenches ICP.

은 그리 크지 않은 것으로 생각할 수 있다. 따라서 쉬스를 통한 이온전류의 최대치를 Bohm의 presheath model을 사용하면 $j_i = 0.6 \cdot n_e \cdot (kT_e/m_e)^{0.5}$ 가 되는데 압력증가에 따른 전자밀도와 전자온도의 변화가 기판 전류를 감소시킨 주요 원인으로 생각된다. 5 mTorr에서 30 mTorr까지의 변화에서 기판전류를 0으로 감소시키는데 필요한 metal sputtering power는 각각 0 W, 250 W, 250 W, 350 W, 400 W, 450 W였다. 여기서 고려할 수 있는 또 한가지의 가능성은 일부 이온화된 금속 이온이 -300 V에서 -400 V가 인가되어 있는 스퍼터 타겟으로 다시 되돌아가는 것이다. Ar 가스 압력이 증가하면서 스퍼터된 입자와 background gas와의 탄성 충돌이 증가하고 이온화가 된 후에도 RF coil의 위치가 스퍼터링 타겟으로부터 평균 자유비행거리 내에 있다면 기판보다 훨씬 더 음의 바이어스를 띠고 있는 스퍼터 타겟으로 돌아갈 확률도 상당하다고 Graves는 Monte Carlo simulation방법으로 보고하고 있다[10]. Bohm 조건에서 170 mA에서 25 mA으로 기판 전류가 감소할 때에 전자 밀도는 동일하다고 본다면 전자 온도가 2%수준으로 낮아져야 하는데 이는 열운동 에너지(0.025 eV) 수준이므로 통상적인 글로우 방전에서는 불가능하다. 즉 금속의 다량 유입으로 전자 밀도와 전자 온도가 함께 감소하였고, 타겟으로 역확산한 이온이 상당수 발생하였다고 볼 수 있다. Global model을 사용한 Hopwood의 결과를 보면[11] Al의 밀도가 10^{13} cm^{-3} 일때 전자 온도가 1.45 eV에서 1.05 eV로 28% 감소하였으므로 나머지는 전자밀도의 감소 또는 중성 입자및 이온의 가열에 따른 에너지 손실이 원인이라고 보는 것이 타당하다고 보고하고 있다. 이는 Ar보다 낮은 이온화 문턱 에너지를 가지고 있는 금속의 다량 유입에 따른 것으로 보인다(Ar:15.7eV[12], Ag:7.57eV, Al:5.98eV[13]). 그림 4에 나타난 400 W의 스퍼터링 전력에서 ICP power와 Ar pressure에 따른 기판 전류의 변화는 낮은 압력과(5 mTorr) 높은 압력(20 mTorr이상)에서 ICP power에 따라서 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보여주고 있다. Penning 이온화 기구의 단면적을 문헌에서 구해보면 Ag에대한 것은 직접 구할 수 없고, Zn과 Cd에대한것이 Riseberg, Parks, and Shearer가[14] $5.28 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ 와 $6.54 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ 로 보고하고 있으므로 원자 반경의 제곱을 이용하여 추정하면 Ag의 경우 약 $7.1 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ 이 된다. 가스압력이 증가함에 따라 상대적으로Penning ionization이 증가하여 주 이온이 Ar⁺에서 Ag⁺로 변화하는 것을 고려하면[15] 이온

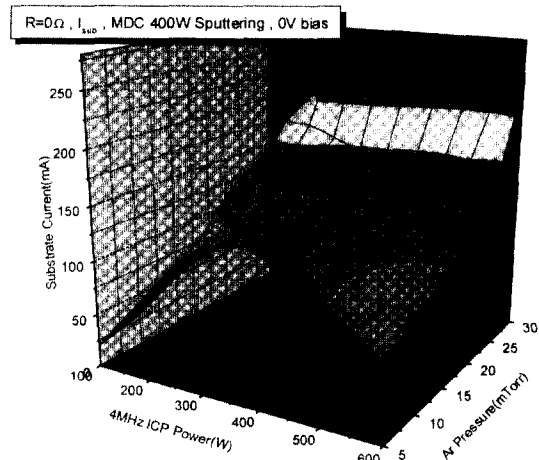


Fig. 4. Substrate current measured at 0 V bias, bias resistor 0 Ω, and Ag sputtering power 400 W. It shows maximal point at low background gas pressure of 5 mTorr. But substrate current here looks relatively small, because bias voltage is 0 V. Considering secondary electron coefficient around 0.1, the ion current by random motion might be 90% of listed values

화 반응의 형태가 높은 전자밀도에서는 전자충격 이온화가 주된 반응이 되고 낮은 전자밀도에서는 Penning ionization이 주된 반응이 되는것으로 해석할 수 있다. 표 1에 나타난 impedance characteristic은 ENI V/I probe를 RF antenna의 입력단에 설치하여 측정된 것으로써 출력단에 설치한 정합회로의 바이어스 저항을 0 Ω으로 맞추고 병렬로 연결된 진공콘덴서를 조절하여 부하의 용량성분을 거의 0으로 맞추었을때의 값을 비교하고 있다. Foster[16]등이 RF antenna의 sputtering을 조사할 목적으로 13.56 MHz로 여기되는 internal ICP system의 결과를 보면 1.5 turn, 19 cm diameter, 0.6 cm cross section

Table 1. Impedance characteristics and induced rf voltage at RF antenna show much reduced voltage of RF antenna by modified matching network with bias resistor (500 W)

P _{Ar} (mTorr)	Z Impedance (Ω)	Load Voltage (V _{mc})	Current (I _{mc})	cos φ	P _{abs} (W)
30 ¹	9.99 6.17+j7.86	84.3	8.55	0.617	445
30 ²	8.38 8.38-j0.36	60.0	7.11	0.999	426.2
20	8.35 8.35+j0.03	60.0	7.13	0.999	427.8
10	7.74 7.73+j0.46	57.5	7.42	0.999	425
5	8.51 8.48+j0.77	60.8	7.16	0.999	433

*1,2 these two conditions are equivalent in reflected power level at RF generator. But the 2nd one was obtained by moving the output impedance to lower capacitance point.

의 RF antenna형상에서 500 W의 전력을 투입하였을 때 -310V의 자기바이어스 전압을 얻었다고 보고하고 있다. 300 eV와 100 eV에서의 AI의 스퍼터수율을 살펴보면[17] 각각 0.7과 0.17로 4.1배의 차이가 난다. 본 연구 결과에서는 출력측의 정합회로에 연결한 진공 콘덴서의 용량과 바이어스 저항을 조절하여 84V에서 60V로 약 28%의 상대적 감소를 얻었고, 거의 AI의 스퍼터 문턱에 너지인 50eV부근에 근접하고 있음을 알 수 있다. 이 두 경우의 흡수 전력을 비교해보면 역률이 0.617인 경우와 0.99인 경우가 약 4% 밖에 차이가 나지 않고 있다. 이 두 정합 조건의 차이는 육안으로도 관찰이 가능한데, 전자의 경우 RF power가 투입되는 쪽의 coil 표면에 쉬스와 밝은 negative glow 영역이 생겨있는 것을 볼 수 있으나, 두번째의 정합조건에서는 RF antenna 표면에서 용량성 국부 방전을 관찰할 수 없었다.

2. Ar압력과 기판 바이어스의 영향

성장하는 박막의 표면 침원자의 이동도를 증가시키고 이에 따른 박막의 치밀화를 달성하면서도 결정결함을 최소화 하기위해서는 낮은 에너지의 이온을 이용할 수 있도록 장치 및 공정 조건을 조절할 필요가 있으므로, 기판에 바이어스를 인가하여 그에 따른 기판 전류의 변화와 플라즈마 volume내의 입자들의 밀도 변화를 측정하여 지표로 이용하였다. OES로 측정한 Ag^0 , Ag^+ 의 강도를 비교치로 하여 계산한 ionization ratio는 기판에 -20 V의 바이어스를 인가했을 때 급격한 감소를 보였다 (그림 5). 이는 금속 이온은 기판에서 모두 증착되어 소모된 반면 Ar^+ 는 기판과의 충돌후 중성화되어 다시 플라즈마 영역으로 들어오기 때문인 것으로 생각되며 Ar의 경우 거의 영향을 받지 않는 것으로 측정되는 것으로 미루어 전절에서 서술한대로 전자의 온도 강하가 그렇게 심하지 않음을 알 수 있다. 높은 기판 전류만을 얻는 것이 목적이라면 플라즈마 전위를 높여주는 방법들(예를 들면 RF antenna에 인가되는 전압을 정합회로의 tuning point를 고의적으로 capacitive coupling을 유발하는 쪽으로 옮겨서 전자 온도를 증가시키는 등)을 사용할 수 있지만 낮은 이온에너지를 정확히 제어하는 것을 목표로 하는 공정에서는 전자 밀도를 증착속도와는 무관하게 일정한 값을 갖도록 유지시키는 것이 중요한 공정 방법이다. -20 V의 직류 바이어스에서 플라즈마 공간에 대해서 측정된 ionization ratio가 큰 차이를 보이는

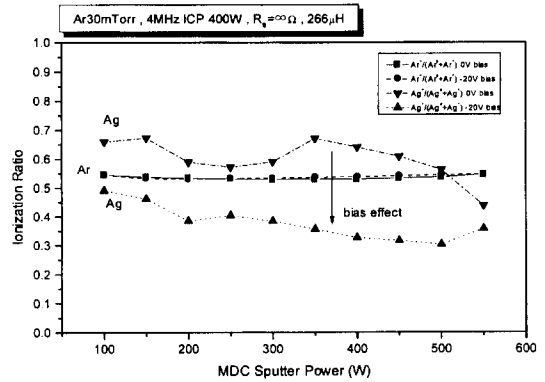


Fig. 5. Ionization based on OES shows small negative bias (-20V) pumps out metal ions from plasma region. Note that Ar is not affected so much as Ag, because Ar⁺ hits the substrate and comes back into the plasma region.

것은 고밀도 플라즈마에서 관찰되는 ion pumping effect의 하나라고 해석할 수 있다. 이는 각 이온의 확산 속도와 밀접한 관계를 갖으며 가스의 압력과 투입 이온화 전력이 따라서 변화하게 된다. Ar의 경우에 Ag의 heavy sputtering이 있을 때 ICP power의 변화에대한 반응을 보기위하여 그림 6에 Ar 압력에 따른 Ar과 Ag의 OES 결과를 보였는데 스퍼터된 Ag입자가 Ar과 탄성 충돌하여 thermalization이 효율적인 20 mTorr이상에서는 ICP power에 따라서 거의 선형적으로 기판 전류가 증가하는 것을 볼 수 있는데 capacitance manometer (MKS Baratron 127)로 측정되는 같은 압력에서 Ar의 유량만을 7 sccm에서 18 sccm으로 바꾸어도 전류값에는 변화가 없었다. 즉 유량에 따른 Ar입자의 평균 체류시

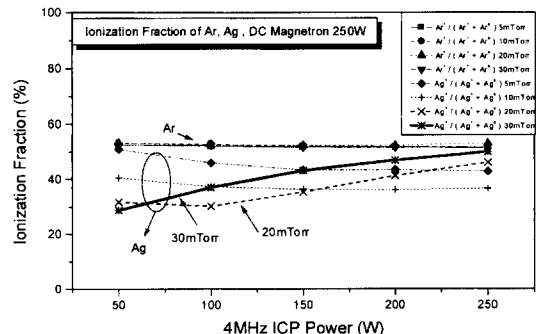


Fig. 6. Ionization fraction based on OES shows constant value for Ar but large pressure dependence for Ag. This might be due to higher mobility of Ag⁺ than Ar⁺, so Ag⁺ is readily pumped out toward substrate and chamber wall.

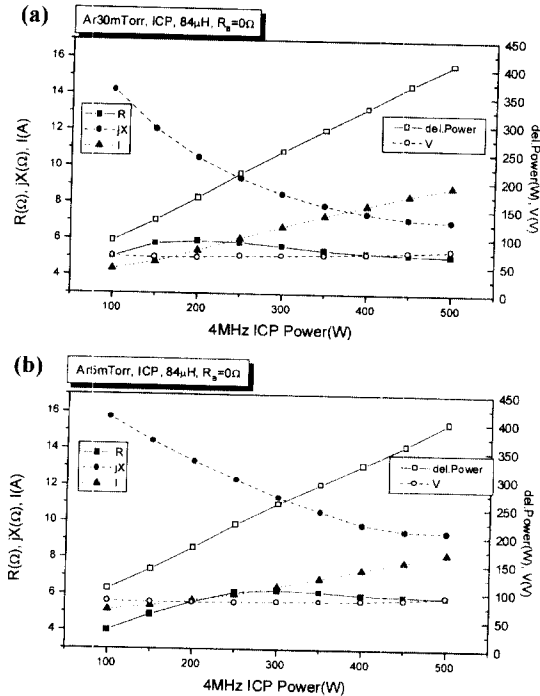


Fig. 7. Impedance characteristics of 4 MHz Ar ICP discharge were measured by ENI V/I probe at RF input point under (a) 30 mTorr, (b) 5 mTorr.

간 감소는 입자들의 이온화율에 별 영향이 없다는 것이다. 오히려 압력이 5 mTorr로 낮을 때 ICP power의 증가에 따라서 오히려 Ag 입자의 공간 이온화율이 감소하는데 이는 주로 낮은 ICP power에서 RF antenna와 챔버 벽면사이의 용량성 결합의 증가에 기인하는 것으로 보인다. 효과적인 ICP coupling, 즉 전력전달 효율을 높이려면 RF 전류가 일정값 이상이 되어야 한다는 이론적 근거와 일치한다[18]. 이에 대한 근거를 impedance probe로 측정된 안테나와 플라즈마의 리액턴스(jX)의 변화와 총 임피던스의 절댓값, RF 전압등을 측정하여 비교하였다(그림 7). 압력이 30 mTorr인 경우에는 RF전압도 500 W의 진행파 출력에서 75 V로 낮고, 리액턴스도 6.5Ω 이나, 5 mTorr로 압력이 낮을 때는 RF전압이 87 V로 높고(16%), 리액턴스는 9.5Ω 으로 46% 높다. 안테나와 출력단의 정합회로가 갖는 임피던스를 측정하기 위하여 impedance probe를 사용하여 10 W정도의 아주 작은 시험 RF출력을 이용하여 측정하면 RF입력단에서 $0.66-j3.96 \Omega$ 로 측정되었으며, 출력단의 임피던스는 RF choke로 사용하는 coil의 인덕턴스 값에 따라서 주로 변

화하게 된다. $84 \mu\text{H}$ 에서 손실이 없는 RLC회로를 가정할 때 자연공진 주파수는 $2\pi/\sqrt{LC}$ 가 되므로 4 MHz에 맞추려면 이에 맞는 C는 18.75 pF 이 된다. L이 2.2 mH로 증가하면 C는 $1/26.2$ 로 감소하여야 하는데 0.72 pF 이 되므로 실제로는 거의 기생 용량성분의 크기 이하이므로 조절이 곤란하다. 즉 RF전압이 접지로 흐르는 것을 방지하기 위한 choke의 목적을 달성하기 위해서는 L을 키워야 하지만 전력 손실을 최소화 하면서 공진을 이용한 플라즈마 전위 조절을 위해서는 100 μH 수준을 유지하는 것이 바람직하다. 바이어스 저항의 크기에 대해서는 $R_b = 4.1 \text{ k}\Omega$ 일 때 100 W와 400 W일 때의 플라즈마 전위 차이는 최대 4.5 V이며 이 값의 차이가 전자 손실에 지대한 영향을 가져온다고 보기는 어렵다고 보인다. $R_b = 0 \Omega$ 일 때와 $4.1 \text{ k}\Omega$ 일 때의 플라즈마 전위의 차이에서 오는 플라즈마 밀도의 차이는 기판 전류로 지표를 삼을 수 있는데 0 Ω , 4.1 $\text{k}\Omega$, 8.2 $\text{k}\Omega$, $\infty \Omega$ 에서 4 MHz ICP 400 W, Ag sputtering 300 W, substrate bias -20 V에서 측정한 결과는 290 mA, 590 mA, 460 mA, 780 mA로 바이어스 저항이 증가할 수록 기판 전류도 증가하였으므로 플라즈마 밀도가 증가하였음을 알 수 있다. 앞으로의 연구에서는 챔버내부에서 발생하는 고조파에 의한 영향을 분석하고 이들이 이온의 에너지 분포에 주는 영향을 직접 에너지 분석장치가 부가된 질량 분석기를 사용하여 Ar과 증착 원자들의 이동도 차이에 따른 에너지 분포의 차이가 공정 변수들, Ar 압력, RF전력, 정합 회로의 구성등에 대해서 조사할 필요가 있다.

4. 결 론

이온화 마그네트론 스퍼터링을 결합이 없는 박막의 형성에 사용할 수 있도록 개발하려는 목적으로, 이온의 에너지를 결정짓는 플라즈마 성질을 유도결합 플라즈마의 여기 주파수를 4MHz로 낮추고 RF antenna출력단의 RLC 회로의 적절한 조정으로 용량성분을 거의 0Ω 으로 만든 결과, Ar 30 mTorr, RF 500 W에서 60 V내의 아주 낮은 RF induced voltage를 얻었으며, 기판에 -20 V의 낮은 전압을 가하는 경우, 플라즈마 공간내에서 금속 이온의 농도가 급격히 감소하는 이온 펄프 효과를 관찰하였고, Ag 입자의 스퍼터링에서 ICP 전력에 비례하는 이온화 증대는 Ar 압력 20 mTorr이상에서 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 이는 임피던스 특성 측정에서 리액턴스의 압력에 따른 변화로 해석하였다.

후 기

이 연구는 교육부 학술연구 조성비 신소재 분야 (1997)와 서울대학교 반도체공동연구소의 교육부 반도체 분야 학술연구조성비(과제번호 ISRC 97-E-1034) 및 통상산업부 차세대 평판표시장치 기반기술 사업(1997)의 연구비 지원으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Technical documents for Technical Symposium, Applied Materials, 1996.
2. Proceedings of American Vacuum Society National Symposium, 1997, San Jose, U.S.A.
3. W. M. Holber, J. S. Logan, J. J. Grabarz, J. T. C. Yeh, J. B. O. Caughman, A. Sugeran, and F. E. Turene, *J. Vac. Sci. Technol. A* **11**, 2903 (1993).
4. Y. H. Jang, W. S. Park, M. Takeya, G. S. Jong, and T. Ohmi, *J. Electrochem. Soc.* **144**, 3973 (1997)
5. L. M. Chanin and M. A. Biondi, *Phys. Rev.* **107**, 1219 (1957)
6. K. B. McAfee, D. Siple and D. Edelson, *Phys. Rev.* **160**, 130 (1967).
7. 주정훈, 한국진공학회지 **6**, 85 (1997).
8. 주정훈, 한국진공학회지 **7**, 255 (1998).
9. M. Dickson, F. Qian, and J. Hopwood, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **15**, 340 (1997)
10. M. Li, D. B. Graves, *Proceedings of American Vacuum Society National Symposium*, 1997, San Jose, U.S.A, p. 180.
11. J. Hopwood and F. Qian, *J. Appl. Phys.* **78**, 758 (1995).
12. Sanborn C. Brown, *Basic Data of Plasma physics*, AIP Press, 1994, New York, U.S.A., p. 140.
13. C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics, 5ed*, John Wiley & Sons, 1976, New York, U.S.A., p. 75.
14. L. A. Riseberg, W. F. Parks and L. D. Scheerer, *Phys. Rev. A* **8**, 1962 (1973).
15. M. Yamashita, *J. Vac. Sci. Technol. A*, **7**, 151 (1989).
16. J. E. Foster, W. Wang, A. E. Wendt, and J. Booske, *J. Vac. Sci. Technol. B* **16**, 532 (1998).
17. Rointan F. Bunshah, *Handbook of deposition technologies for films and coatings*, NoYes Pub., New Jersey, U.S.A., 1994, p. 260.
18. Michel A. Lieberman and Allan J. Lichtenberg, *Principles of plasma discharges and materials processing*, 1994, John Wiley & Sons, New York, U.S.A., p. 397.