

RFI ionized magnetron sputtering에서 radial uniformity 문제

주정훈

군산대학교 공과대학 재료공학과
(1996년 7월 12일 접수)

Radial uniformity problem in RFI ionized magnetron sputtering

Jung Hoon Joo

Department of Materials Science & Engineering, Kunsan National University,
Miryong-dong Mt.68, Kunsan 573-701 Korea

(Received July 12, 1996)

요 약 - 32 cm 직경의 $\text{AlCu}_x(x=0.5\%)$ 음극 타겟과 회전 자석을 이용한 상용 마그네트론 스퍼터링 장치에서 부가적인 플라즈마 여기 방법으로 스퍼터링된 입자들을 이온화시킨 후, 수십 볼트의 직류 기판 바이어스로 이온의 방향성과 에너지를 조절하여 작은 트렌치나 via를 채울 수 있는 공정을 개발하였다. 여기에서, 반경방향의 이온 플럭스비의 균일도 문제를 개선하기 위하여, 입자들의 가시광선 영역의 방출선을 이용한 플라즈마 진단과, 패터닝된 웨이퍼에 대한 직접 채우기로 플라즈마 내의 입자 분포와의 상관 관계를 찾고, RF 코일 설계의 개선을 도모하였다. 가시광 방출 분광에서 Ar^0 , Ar^+ , Al^0 , Al^+ 입자들의 방출선 세기는 $1 \mu\text{m}$ 이하의 크기를 갖는 트렌치와 via의 바닥과 top 두께비와 밀접한 관련이 있었다. RF 코일의 직경을 29 cm에서 32 cm로 증가시키고, RF 입력부에 의한 비대칭을 개선하여 이온 플럭스비의 척도가 되는 via 채우기의 바닥과 top의 두께비에서 7.5%에서 1.5%로의 균일도 향상을 얻었다.

Abstract - A new ionized sputtering process was developed to fill small trench or via using additional ionizing mechanism of sputtered particles from 32 cm $\text{AlCu}_x(x=0.5\%)$ cathode target with rotating magnet, then drawn toward substrate by small negative DC potential. The radial uniformity in RFI magnetron sputtering was studied by plasma diagnosis and appropriate RFI coil design to improve it. Optical emission intensities of excited species, Ar^0 , Ar^+ , Al^0 , Al^+ are measured across the radial direction and showed close correlation with deposit's bottom to top thickness ratios in trenches and vias of submicron opening and 1.5 aspect ratio. After increase of the diameter of RF coil from 29 cm to 32 cm and improved the power leading feedthrough symmetry by removal of asymmetric single turn region, there was an increase of uniformity from 7.5% to 1.5% in bottom to top thickness ratio in 0.6 μm vias.

1. 서 론

금속 배선 공정은 현재까지 스퍼터링이 주류를 이루고 있다. 대면적화가 용이하고, collimator를 사용하면 입자들에게 방향성을 주어서 aspect비 1정도, 개구부의 직경 $1 \mu\text{m}$ 수준의 작은 트렌치나 via에도 채워넣기를 할 수 있기 때문이다[1].

그러나 그 이하의 작은 트렌치나 via에는 W-plugging, 고압 스퍼터링, damascene processing 등이 사용되어야 하는데[2], damascene process는 기계-화학적 연마

방법을 조합하여 전반적인 평탄화를 동반하므로 아주 유리한 공정이 될 수 있다. 스퍼터링이 생산 효율적인 관점에서 가장 경제적인 수단이 되지만, 중성 입자들의 각도 분포가 무질서하여, via나 트렌치의 입구가 막히는 현상이 발생하므로 collimator를 사용하여 방향성을 주어왔으나, 박막 성장 속도의 현격한 저하, collimator 자체의 막힘, 플레이킹(flaking)에 의한 입자의 발생 등의 문제가 노출되어서 $1 \mu\text{m}$ 이하, aspect ratio 2정도의 1Gbit DRAM 수준 이상의 소자 생산에 적용하기에는 문제가 있다. 반면 이온화 마그네트론 스퍼터링에서는

기판의 쉬스에 의한 직진성을 이용하여 채우기를 하므로 작은 크기의 구멍이나, 트렌치를 채우기에 유리하다. 또한 압력과 인가하는 RF 전력에 따라서 이온 플럭스의 양을 100%에 가깝게 할 수 있으므로 박막의 집합 조직 또한 electromigration에 유리한 (111) 방향으로 성장한다[3].

그러나 일반적인 마그네트론 스퍼터링에서는 이온화에 참여하는 전자들이 모두 음극에 장치된 자석의 누출 자계에 속박되어서 기판이 존재하는 곳까지 비행하지 못하므로, 기판에 음의 바이어스를 인가하여도 가속 효과를 얻는 이온의 수가 기판 근처에서 아주 작기 때문에 이온에 의한 효과가 거의 없다. 따라서 음극 부근의 플라즈마를 기판 주위까지 연장하기 위한 보조적인 수단이 필요하다. 이런 노력으로는 비대칭 마그네트론 스퍼터링, 중공 음극형 방전식 마그네트론 스퍼터링, 전자 회전 공명 플라즈마 스퍼터링[4] 등이 있으며, 본 연구에서 사용한 유도 결합 플라즈마 마그네트론 스퍼터링이 있다. 이 방법은 플라즈마 내에 직접 RFI(Radio Frequency Inductively coupled) 코일을 설치하여 마그네트론 스퍼터링에 의해 방출된 입자들을 2차적으로 이온화시키는 역할을 한다. 식각 등에 사용되는 일반적인 유도 결합 플라즈마 발생 방법에서는 절연물인 석영창을 사용하여 RFI 코일과 플라즈마를 격리시키지만, 이온화 마그네트론 스퍼터링에서는 직접 RFI 코일이 플라즈마에 함침되므로 코일 물질이 과도하게 스퍼터링 되지 않도록 코일의 용량성 결합을 최대한 작게 유지 해야 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 3 콘덴서 정합 네트워크를 사용하여, 코일을 전기적으로 부유 시킴으로써 코일에 유기되는 자기 바이어스 전압을 최저로 유지할 수 있도록 하였다. 일반적인 실험 조건이 RFI 코일에 1kW RF, 음극 타겟에 1kW DC, 35 mTorr Ar 가스 압력, -10V 기판 바이어스 인데, 이때 코일에 유기되는 자기 바이어스 전압은 약 -200V 정도이다. 2회 감은 코일에 의한 유도 전장의 방향은 원주 방향이 되므로 코일 주변에서 가장 강한 전계가 발생된다. 따라서 이온의 주 생성원도 코일의 주변이 된다. 본 연구에 사용한 마그네트론 음극은 균일도를 위하여 회전하는 영구자석이 음극 타겟 뒤에 장착되어 있으므로, 여기에서 누출되는 자계의 강도가 RFI 코일에 의해서 유기되는 자계의 강도인 수 가우스를 훨씬 초과하므로 실제 육안으로도 마그네트론 누출 자계와 RFI 코일 사이의 지역에 고농도의 플라즈마 영역이 형성되는 것을 볼 수 있다. 그러나 이

것은 반경 방향의 플라즈마 균일도에 부정적인 영향을 끼치는 것으로 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 가시광 방출 분광법을 사용하여, 아르곤과 알루미늄의 반경 방향의 플라즈마 균일도를 측정하고 각 조건에서 직접 패터닝 된 웨이퍼에 박막을 제작하여 이온과 중성 입자가 모두 입사하는 영역인 top surface와 오직 직진성을 갖고 있는 입자만이 통과할 수 있는 0.6 μm 크기의 트렌치와 via의 바닥부분 증착 두께를 이온과 중성 입자간의 플럭스 비의 척도로 선정하여 단면 주사 전자 현미경 사진으로 조사하였다. 그리고 이와 같은 반경 방향의 균일도를 이온의 확산과 RFI 플라즈마 모델을 사용하여 설명을 시도하였다.

2. 실험 방법

그림 1에 보인 바와 같은 32 cm 직경의 자계 회전식 직류 마그네트론 스퍼터링 음극과 이로부터 4.5 cm 떨어진 곳에 위치한 3/8" 구리관으로 만들어진 수냉식 2 turn RFI 안테나, 높이가 조절되는 기판 (8" wafer 홀더), MDX-magnetron drive(Advanced Energy), 3kW RF 전원 장치(Plasma-Therm), 유도 결합형 정합 회로로 구성되어 있다. 정합 회로는 RFI 코일과 RF 전원 사이에 직,병렬로 하나씩의 가변식 진공 콘덴서가 설치되어 있고, RFI 코일의 접지단과 진공조 본체의 접지단 사이에 직렬로 3번째 콘덴서가 설치되어서 과도한 자기 유도 전압이 RFI 코일에 유기되는 것을 막는다. 진공 배기계는 cryopump, 유회전 펌프, 게이트 밸브로 구성되어 있으며, 기저 압력은 8×10^{-8} Torr이다. 실제 스퍼터링시의 Ar 가스의 압력은 10 mTorr에서 45 mTorr 사이로 하였다. 정합 회로는 수동식이며, 가장 높은 기판 전

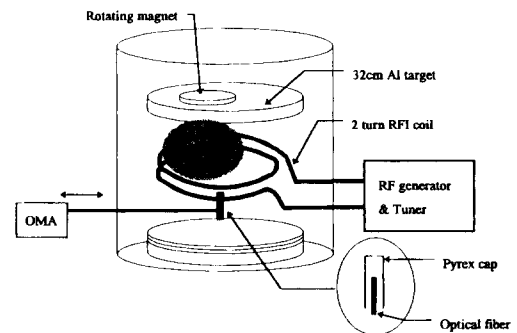


그림 1. Experimental setup.

류를 갖도록 조정되었다. 방출선 분광 측정은 EG&G PARC Optical Multichannel Analyser를 사용하였으며, 음극 후면의 자석의 회전으로 인한 영향을 배제하기 위하여 자석 회전 주기의 20배 이상의 측정 시간을 사용하였다. 측정 부위의 공간 분포 해상도를 위하여 직경 1mm의 구멍을 사용하여 광파이버에 접속이 되도록 하였으며, 금속의 증착으로 신호가 감소하는 것을 막기 위해 편향과 파이렉스 프로브 헤드와의 거리를 30 mm 가량 유지하였다. 이와 같은 방법으로 측정 시작과 측정 후의 grating의 전반사 강도의 변화를 1%이내로 할 수 있었다. 모든 측정은 6번 측정된 결과를 평균하여 사용하였으며, 이때의 표준 편차는 평균 대비 5%에서 10%내의 었다. 오히려 RFI 코일과 음극간 거리의 차이, 유희전 펌프 등에서 기인하는 기계적 진동에 의한 RFI 코일의 위치 변화에 기인하는 플라즈마 밀도 변화가 더 큰 오차로 작용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 스퍼터링 가스 압력에 따른 광방출 세기의 반경 방향 균일도

그림 2에 Ar⁰의 반경 방향의 방출선 강도를 나타내었다. 광방출 세기는 공간에 존재하는 입자들의 밀도를 직접 나타내지 않고, 이들 중 주로 전자에 의해서 충돌, 여기 되었다가 실험에서 측정하는 가시 광선 영역의 방출선을 내는 입자들에 의해서만 결정되므로 다른 전자 온도를 갖는 영역의 플라즈마에 대해서는 동일한 측정 강도를 갖는다고 하여도 같은 입자 밀도를 상정할 수 없다. 이를 보정하기 위해서 고안된 방법이 actinometry이며, 이는 거의 근접한 방출선을 갖는 입자를 일정량 희석하고, 이 입자의 방출선을 기준으로 상대적인 비교를 하여 입자의 밀도를 결정하는 방법이다. 그러나 본 실험과 같이 Ar을 주방전 가스로 사용하는 경우에는 적당한 actinomer를 결정하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 Ar 중성 입자 및 이온, Al 중성 입자 및 이온의 방출선이 가장 근접한 곳의 방출선을 사용하여 반경 방향의 균일도를 측정하였다. Ar⁰(6955.4Å, 13.32 eV), Ar⁺(4657.9Å, 19.8 eV), Al⁰(3944.7Å, 3.14 eV), Al⁺(3900.7Å, 10.6 eV)이 본 실험에서 사용한 방출선의 파장과 해당 흡수 에너지이다. 모노크로메터는 He-Ne 레이저와 표준 가스 방전관을 사용하여 보정하였다. 검출기로는 선형 게이트 어레이를 사용하였으며, 3가지의

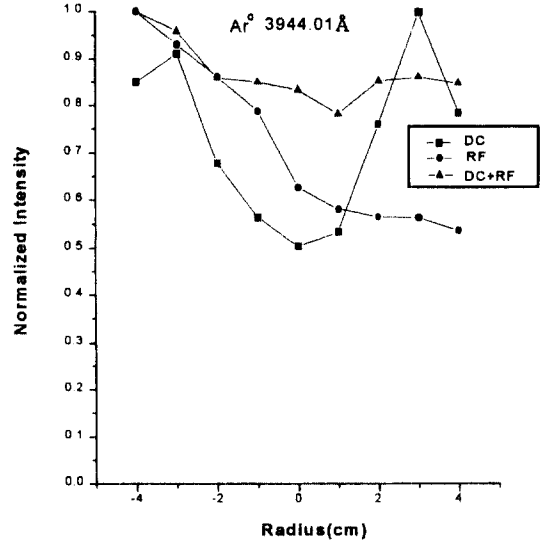


그림 2. Ar⁰ emission intensity distribution in DC, RF, DC+RF plasma (35 mTorr, 1 kW DC, 1 kW RF).

grating을 선별적으로 사용하여 측정하였다. 광섬유 케이블의 길이는 약 1 m이며, 이온을 제외하고는 아주 높은 강도를 나타내어서 측정의 최소 오차는 약 1% 내외로 유지되었다.

또한 그림 2에 음극을 동작시키지 않고 RFI 플라즈마만 측정된 결과를 첨부하고 있는데, 중심에서 왼쪽 부위가 오른쪽보다 2배 가량 높은 Ar⁰ 방출선 강도를 보이고 있다. 이는 오른쪽 부위에 두 RF 입력단 사이가 약 8 cm 정도 떨어져 있기 때문에 비대칭 부위가 발생하여서 전류 x 감은 수의 J₀가 감소하기 때문으로 생각된다. RF 코일 위 표면과 음극의 거리가 변화한 경우에 Hopwood에 따르면[5] 석영창을 사용한 원통형 RFI 플라즈마 시스템에서 코일과 석영창과의 미소한 거리 변화가 기관에서의 Ar⁺ 전류 밀도에 중심부 기준으로 약 25% 가량 나는 것으로 보고하고 있다. 그러나, 이 데이터는 석영창에서 4 cm 떨어진 곳의 측정치이므로 이보다 먼 거리인 12 cm에서 박막을 입히는 본 연구에서는 확산에 의한 균일도의 개선이 기대된다. 실제 음극을 동작시키면서 스퍼터링 되는 Al⁰, Al⁺의 방출선 강도를 측정하여 보면 그림 3의 경우와 같이 회전 자석에 의한 heart 모양을 그대로 나타내고 있다. 여기에 RFI 플라즈마가 중첩되면 변화를 보이게 된다. 그러나 이때의 강도 변화는 약 10%가 최대이다. 실제 쉬스를 지난 후의 이온 플럭스 비는 Bohm 쉬스의 특성에 의해서

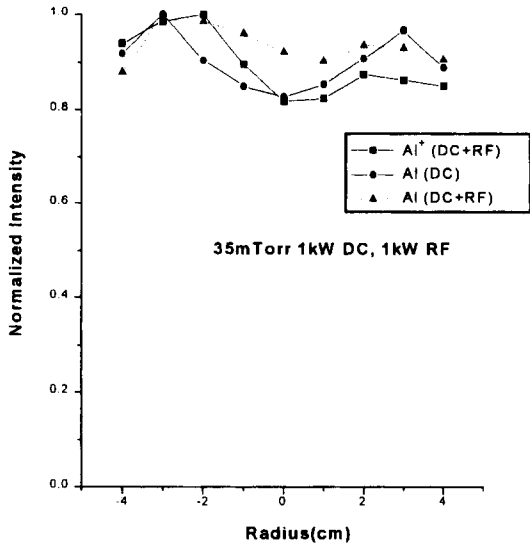


그림 3. Al⁺, Al⁰ emission intensity distribution in DC, DC + RF plasma (35 mTorr, 1 kW DC, 1 kW RF).

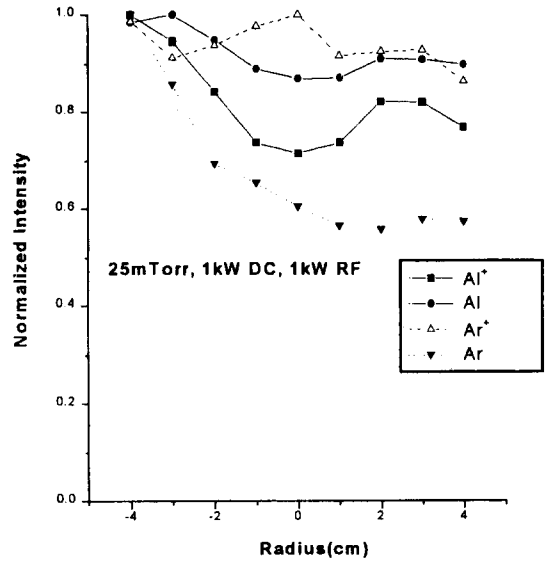


그림 5. OES line intensities at different radial positions at 25 mTorr 1 kW DC, 1 kW RF.

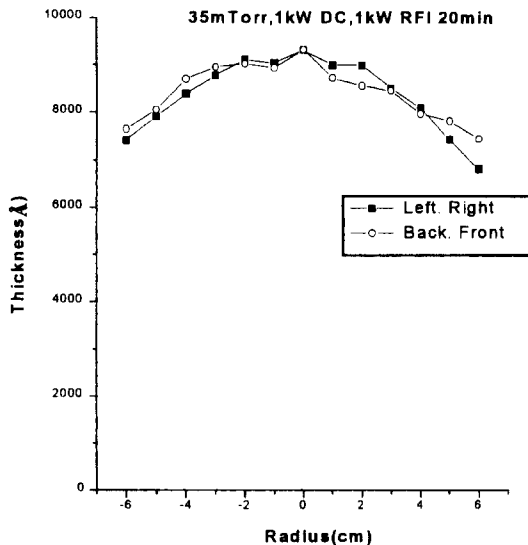


그림 4. Thickness distribution obtained at 35 mTorr 1 kW DC, 1 kW RF, 20 min, AlCu₂(0.5 w/o).

$j_i = 0.6 en_r [kT_e/m_i]^{1/2}$ [5] 이므로 플라스마내에 존재하는 이온의 밀도보다 높은 이온 플럭스비를 나타내게 된다. 웨이퍼상의 패턴 중 개방된 평면에 도달하는 (이온 + 중성)의 분포를 보면 그림 4와 같이 중심부와 6 cm 떨어진 곳의 차이가 (7200Å/9000Å)으로 20%를 나타내고 있으며 오른쪽이 왼쪽, 후면, 전면 등에 비해

(714Å/7200Å)으로 10%가량 낮게 나온 것도 RFI 코일의 형상에 의한 것으로 보인다. 따라서 Al이 스퍼터링된 후 이온화가 발생하는 빈도의 공간적 분포는 마그네트론 플라스마와 RFI 플라스마가 중첩되어 일어나는데 마그네트론 방전이 고리가 회전하는 형태를 가지고 있어서 축에서 약간 벗어난 곳에 최대 밀도를 보이는 반면 RFI 플라스마는 중심부에 강한 원주 방향의 전계를 가지고 있으므로[7] 이온 확산 거리에 따라서 균일도가 결정된다. 그림 5에 25 mTorr에서의 OES 결과가 나타나 있는데 Al⁺의 경우 35 mTorr에서보다 5% 정도 나빠진 것을 알 수 있다. 그러나 Ar⁰는 거의 같은 값을 나타내는 것으로 미루어 Al의 탄성 충돌이 더욱 큰 영향을 받는 것으로 보인다. 이는 압력을 높일 수록 증착 속도가 감소하는 것으로도 알 수 있다. 플라스마 함침형 RFI 코일에 대한 모델링 연구 결과는 발표된 것이 많지 않다. 이 중 J.Hopwood[8]의 연구 결과에서도, 축 방향에 대한 고려만 이루어졌을 뿐이다. 이 공정을 상용화하는데 중요한 반경 방향의 균일도 문제도 향후 이론적 고찰의 좋은 과제라고 생각된다.

3.2 주사 전자 현미경 단면 사진 관찰

플라스마 진단 결과는 RF 코일 하부에서 음극쪽을 향하여 축정향 축 방향으로 적분 된 강도이므로 기관에서

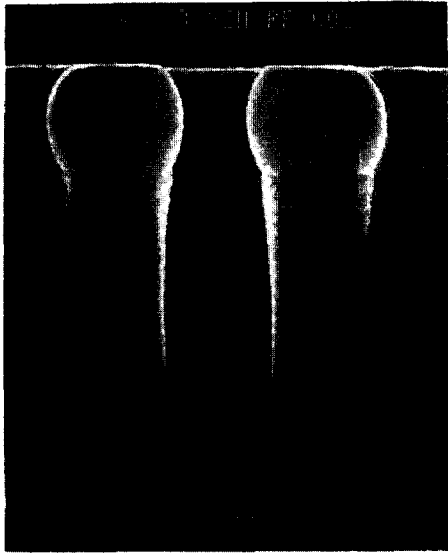


그림 6. SEM photo of deposits on small via.

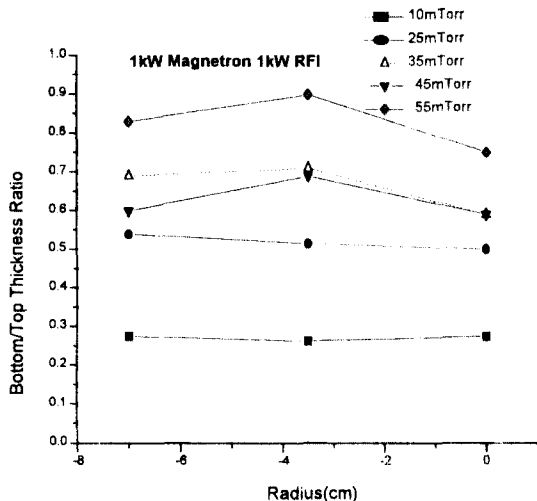


그림 7. Radial uniformity of bottom to top thickness ratios at different sputtering pressures.

쉬스를 통하여 입사하는 이온과 중성 입자의 플럭스를 직접 증착층의 두께를 통하여 확인할 필요가 있다. 실리 콘 웨이퍼에 약 $1\ \mu\text{m}$ 크기의 oxide 트랜치/via 시험 패턴을 제작하여 동일한 top 두께를 갖도록 증착 시간을 조절한 후 via의 top/bottom 두께를 주사 전자 현미경으로 측정하였다. 이는 Joo 등의 연구[9]에서 밝힌 바와 같이 이온/(이온 + 중성) 플럭스 비의 척도가 되기 때문이다. 그림 6에 보인 것과 같은 단면 구조에서 주사 전자

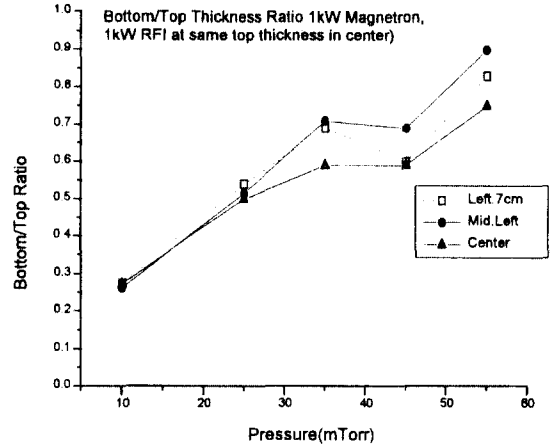


그림 8. Pressure effects on bottom to top thickness ratio.

현미경 사진상에서 bottom과 top의 두께를 측정하였다. 그림 7에 스퍼터링 압력을 10 mTorr에서 55 mTorr까지 바꾸어가면서 측정한 균일도를 나타내었는데, mid-center(중심에서 3.5 cm부위)의 이온 플럭스 비가 45 mTorr의 압력에서는 중심부나 가장자리 부위보다 더 높은 것을 알 수 있다. 이는 Al 스퍼터링이 가운데 부위에서 제일 높은 증착 속도를 갖고, 이에 따라 RFI 플라즈마의 전자 온도가 낮아지므로 중앙부에서 이온 플럭스 비가 mid center보다 낮은 것으로 생각된다. 그러나 압력이 아주 낮아져서 10 mTorr 근처가 되면 Al^+ 농도가 낮고 확산 거리가 증가하여 전체적으로 균일한 이온 플럭스 비를 갖게 된다. 압력 증가에 대해서는 그림 8에 보인 것처럼 위치에 관계없이 전체적으로 이온 플럭스 비가 증가한다. Rossnagel이 발표한 자료에 의하면[10] 35 mTorr 정도 이상에서는 약 80%의 이온 플럭스 비를 보인다고 하는데, 본 결과의 bottom to top 두께 비와 거의 직선적인 상관 관계가 보인다.

3.3 RFI 코일의 설계 개선

그림 1의 실험 장치 중에서 2-turn RFI 코일의 RF 전원 공급 부분이 원주 방향으로 약 8 cm 가량 떨어져 있으므로 대칭이 깨지는 것을 방지 하기 위하여 이 부분을 서로 교차하도록 만들어서 single turn이 되는 부위를 없앤 후 측정한 bottom to top 두께 비를 그림 9에 나타내었다. 음극에서의 거리도 45 mm, 75 mm 두 가지로 바꾸어서 측정한 결과 45 mm에서 1.5%의 균일도를 갖는 것이 관찰되었다. 즉 기존의 RF 코일에서보다 중심

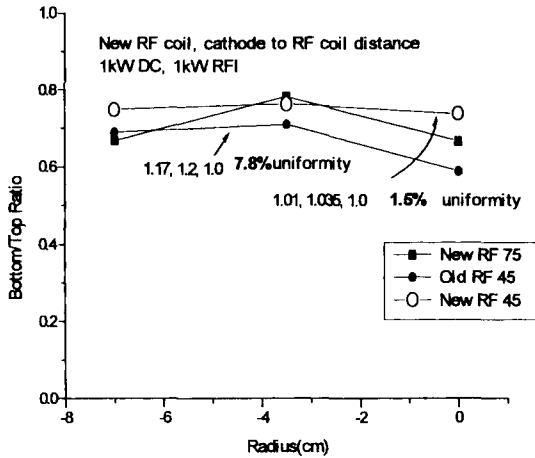


그림 9. Uniformity improvement by new RFI coil design.

부위의 이온 플럭스 비가 20%나 증가했음을 알 수 있다. 그러나 이때에도 기관과 음극 사이의 거리를 75 mm로 증가시키면 다시 mid-center부위가 다른 곳보다 높은 이온 플럭스 비를 갖는다. 이는 Ar, Al의 이온 및 중성 입자들의 충돌과 전자의 온도, 밀도 등을 모두 고려한 전체적인 식을 세우고 그 해를 구해야만 완전한 이론적 이해가 가능함을 시사하고 있다.

4. 결 론

상용 규모의 8" 웨이퍼용 회전 마그네트론 스퍼터링 장치에 13.56 MHz의 2 turn RFI 코일을 사용하여 이온 플럭스 비를 85%까지 증가시킨 상태에서 반경 방향의 이온 플럭스 균일도를 OES를 사용하여 플라즈마 진단을 통하여 가늠하고, 이 결과가 실제 서브미크론 via 채우기의 bottom to top 두께 비와 높은 상관 관계를 갖는 것을 확인함으로써 플라즈마의 공간 균일도가 기관 입사 입자의 이온 플럭스 비를 결정하는 것임을 밝혔다.

플라즈마 균일도를 더욱 개선하기 위하여 RFI 코일의 직경을 증가시키고, 전원 입력 부분에 비대칭이 되는 부분을 줄인 결과 1.7%의 반경 방향 균일도를 얻었다.

감사의 글

이 실험에 장치를 제공해주신 IBM T.J. Watson Research Center와 S.M. Rossnagel, 그리고 중요한 기술적 토의를 해 준 Northeastern University의 J. Hopwood에 감사드립니다.

참고문헌

1. S.M. Rossnagel, J. Vac. Sci. Technol. B13, 125 (1995).
2. S.M. Rossnagel and J. Hopwood, J. Vac. Sci. Technol. B13, 183 (1995).
3. Y.W. Kim, I. Petrov, J.E. Greene and S.M. Rossnagel, J. Vac. Sci. Technol. A Vol. 14, No. 2, 346 (1996).
4. K. Veno, K. Ohto, K. Tsurenari, K. Kojiyama, K. Kikuta, and T. Kikkawa, Proc. IEDM, 305, (1992).
5. N. Forgotson, V. Khemka and J. Hopwood, J. Vac. Sci. Technol. B14(2), 732 (1995).
6. M. Dickson, F. Qian, and J. Hopwood, IEEE Plasma Conference, Boston, 1996.
7. J. Hopwood, C.R. Guarnieri, S.J. Whitehair, and J.J. Cuomo, J. Vac. Sci. Technol. A, Vol. 11, No. 1, 147 (1993).
8. J. Hopwood and F. Qian, J. Appl. Phys. 78(2), 758 (1995).
9. Junghoon Joo and S.M. Rossnagel, Asia Pacific Conference on Plasma Science and Technology 96, Univ. of Tokyo, July 16 (1996).
10. S.M. Rossnagel and J. Hopwood, Appl. Phys. Lett. 63, 3285 (1993).