

통계적 실험 방법에 의한 Ta 박막의 증착 특성 연구

서유석*, 박대규 · 정철모 · 김상범 · 손평근 · 이승진 · 김한민 · 양홍선 · 박진원

*하이닉스반도체(주), 메모리 연구소, SRAM 공정팀, 선행공정 3팀

Characteristics of Sputtered Ta films by Statistical Method

*You-Seok Suh, Dae-Gyu Park, Chul-Mo Jeong, Sang-Beom Kim, Pyung-Keun Sohn,
Seung-Jin Lee, Han-Min Kim, Hong-Sun Yang, and Jin-Won Park

*North Carolina State University, Room # 327, EGRC Building, Centennial Campus,
1010 Main Campus Drive, Campus Box 7920, Raleigh, NC 27695, USA, E-mail: ysuh@unity.ncsu.edu

E-mail: danpark@hanmail.net

Memory research and development Division, SRAM process, Advanced process # 3,
Hynix Semiconductor Inc., San 136-1, Ami-ri, Ichon-si, Kyounki-do, Korea 467-701

(2000년 5월 8일 받음, 2001년 5월 15일 최종수정본 받음)

초 록 통계적 방법을 사용하여 스퍼터 증착한 Ta 박막의 증착속도, 비저항, 면저항 균일도, 반사도, 응력 등의 물성을 측정하고 분석하였다. RS/1의 표면 반응 분석법에 의해 독립변수와 종속변수간의 함수관계를 예측하였으며, 이때 비저항과 면저항의 균일도 측면에서 최적조건은 증착 압력 2 mTorr, 증착 전력 8 W/cm² 및 기판온도 20°C였다. 실험 모델의 신뢰성(fitness)은 풀링(pooling)하지 않은 경우 0.85~0.9의 값을 얻었다. 본 조건하에서 증착된 박막은 비저항 180 $\mu\Omega\text{cm}$ 와 면저항 균일도 ~2%의 값을 가졌다. 투과전자 현미경과 X선 회절법을 이용하여 분석한 결과 증착된 박막은 100~200 Å 정도의 결정립 크기를 갖는 β -Ta임을 확인하였다.

Abstract We report the characteristics and the dependence of sputter-deposited Ta films on the process parameters. The properties of as-deposited Ta films such as deposition rate, resistivity, Rs uniformity, reflectivity, and stress were investigated and analyzed as a function of process parameter using a statistical experimental method. The functional relationships between the independent and dependent variables were predicted by surface response. The optimal deposition condition of DC magnetron sputtered Ta films was obtained at the chamber pressure of 2 mTorr, power density of 8 W/cm², and substrate temperature of 20°C by means of resistivity and Rs uniformity. The fitness value for quadratic model as evaluated by the R-square was 0.85~0.9 without pooling. The as-deposited Ta films exhibited the resistivity of ~180 $\mu\Omega\text{cm}$ with Rs uniformity of ~2%. The transmission electron microscopy and x-ray diffractometry identified that the phase of as-deposited film was β -Ta having the grain size of 100~200 Å.

Key words: Ta films, Resistivity, Statistical Method, RS/1, fitness

1. 서 론

반도체 소자의 집적도가 증가함에 따라, 배선의 폭은 감소하고 배선내의 전류밀도는 증가하게 된다. 이러한 소자에서 RC time delay가 소자 특성을 결정하는 주요 요인이 되었으며 전기적 이동(electromigration)과 응력이동(stress migration)에 대한 저항성이 소자의 신뢰도(reliability)를 결정하게 되었다. 현재 배선재료로 Al이 비교적 낮은 비저항(2.7 $\mu\Omega\text{cm}$)과 공정의 용이성 등의 이유 때문에 널리 사용되고 있다. 최근 microprocessor와 같은 고속 고밀도 로직 소자를 중심으로 Cu 배선의 사용이 채용 되었으며¹⁾, damascene gate 구조를 이용한 Cu 전극의 연구가 주를 이루고 있다.²⁾ 이는 Cu의 낮은 비저항(1.7 $\mu\Omega\text{cm}$)과 전기적 이동 및 응력이동에 대한 우수한 저항성 등의 장점에 기인된 것이다. 그러나 이러한 많은 장점에도 불구하고

Cu 배선의 적용이 어려운 이유로는 산화 막내의 빠른 확산 및 산화성, 산화 막과의 불량한 접착특성, 식각 공정의 어려움 등의 문제가 있기 때문이다.³⁾ 따라서, 이러한 문제를 해결하기 위해서는 Cu의 확산 방지막, passivation layer, damascene 공정 등의 사용은 필수적이라 하겠다.^{4,5)}

최근, Si 반도체 소자에서 Cu에 대한 확산 방지막으로 tantalum 및 tantalum nitride를 사용하여 많은 연구가 진행되고 있다.^{6,7)} 이는 Ta이 낮은 비저항과 oxide와 우수한 접착력을 가지며, Ta과 Cu가 접촉할 때 열역학적으로 안정하여 새로운 상을 형성하지 않을 뿐 아니라 Ta내에서 Cu의 확산속도는 매우 낮기 때문이다($D_0=9 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$ at 400~700°C).^{8,9)} 이러한 Ta박막은 증착조건에 따라 낮은 비저항(30~40 $\mu\Omega\text{cm}$)을 갖는 체심 입방구조의 Ta과 높은 비저항(180~200 $\mu\Omega\text{cm}$)을 갖는 준 안정상의 β -Ta이 형성된다고 알려져 있다. 두 상의 결정요인에 대한 많은

연구 중에서 β -Ta의 형성은 주로 표면의 불순물에 의해 야기된다고 보고 되었으며¹⁰⁾, 최근에는 과도하게 높은 에너지를 갖는 이온의 충돌에 의한 결합등에 기인하여 형성된다고 보고된 바 있다.¹¹⁾

본 연구에서는 Cu 배선의 확산 방지막으로 사용하기 위한 Ta 박막의 증착 특성을 통계적 실험법을 이용하여 조사하고자 하였다. 본 실험에 사용된 통계적 실험 방법은 반응 표면분석(response surface analysis) 방법으로 독립변수들과 종속변수 간의 함수관계를 실험 결과로부터 추정하여, 독립변수 값의 변화에 따라서 반응량이 어떻게 달라지는가를 예측하고 입의 독립변수들의 값에서 반응량의 최적 조건을 찾아내는 방법이다.^{12,13)} 이를 위해 통계적 실험 package software인 RS/1 (RS: research system)을 이용하여 실험을 진행하였다.¹⁴⁾ 공정 변수로는 증착 온도, 증착 압력, 증착 전력으로 선정하였고 이 공정 변수에 따른 비저항, 면저항의 균일도, 증착속도, 반사도(reflectivity), 응력(stress) 등의 증착 특성을 조사하여 각 공정변수가 공정결과에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1. 통계적 실험 방법

본 실험에 사용된 반응 표면분석법은 통계적 실험 package software인 RS/1 (RS: research system)을 이용하여 실험을 진행하였으며¹⁴⁾, 실험 순서를 Table 1에 나타내었다. 먼저 공정 독립 변수를 증착 온도, 증착 압력, 증착 전력으로 선정하였고 이 변수에 대한 종속변수를 비저항, 면저항의 균일도, 증착속도, 반사도(reflectivity), 응력(stress) 등으로 선정하였다. 실험의 specification에 있어서 objective는 "RSM (response surface method)"으로 설정하였다. 실험의 model은 각 factor와 response는 곡선 관계이므로 "Quadratic model"을 사용하였고 design type은 변수간의 관계를 최소화 하는 "D-optimal"을 사용하였다. 이후 프로그램을 실행하여 실험 계획 worksheet를 생성시켰고(Table 2), 이에 따라 실험을 진행한 후 측정된 결과를 RS/1에 입력하였다. 실험 결과의 분석에서 공정 결과에 대한 quadratic의 계수를 얻을 수 있다. 이 계수들을 이용하여 공정 변수 X_i 와 X_j 에 대한 증착 특성 Y 의 경험식을 다음 식에 의해 얻을 수 있다.

$$Y = \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{j=1+1}^n \sum_{i=1}^{n-1} b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} X_i^2 + \epsilon$$

이 식은 X_i 의 일차항(X_i), $X_i X_j$ 의 이차항(X_i^2) 및 또 다른 변수와의 상호작용($X_i X_j$)의 항으로 구분된다. b_i , b_{ij} , b_{ii} 는 회귀 계수(regression coefficient)로서 공정변수가 증착특성에 미치는 영향을 나타내며, ϵ 는 잔류 오차(residual value)를 나타낸다. 상기식을 이용하여 공정변수에 대한 증착 특성을 분석할 수 있으며 가시적인 등고선(contour plot)으로 나타낼 수 있었다. 이러한 분석에 사용하는 식들은 참고 문헌에 상세히 설명되어 있다.^{12,13)} 분석 결과에 대한 신뢰도는 Quadratic model에 대한 R-square (R-sq.)

Table 1. Sequences of Experiment by RS/1 method.

Designing the experiment	
1. factor define	Temperature, pressure, power
2. define specification	Objective-RSM
3. define the responses	Deposition rate, resistivity, Rs uniformity, reflectivity, stress
4. generate the model, design	D-optimal, Quadratic
5. generate the worksheet	
Perform the experiment	
1. input the data	
Analyze the data	
1. fitting the model	
2. refine the model	Remove the unnecessary terms
3. checking the fit	
4. interpreting the model	
Interpreting the result	
1. predicting the response	
2. graphing the prediction	Producing the contour plots
3. performing the optimization	

Table 2. Experimental Worksheet.

	증착 변수		
	Temperature (°C)	Pressure (mTorr)	Power (kW)
1	400	1	5
2	20	2	5
3	400	2	3
4	20	3	3
5	200	3	5
6	400	3	1
7	20	1	5
8	400	3	5
9	20	1	1
10	400	1	1
11	200	1	3
12	200	2	1
13	20	3	5
14	200	1	5
15	20	3	1

값으로 나타낼 수 있으며, R-sq.는 총 변동(Sum of square of total)중에서 회귀선에 의하여 설명되는 변동(Sum of square of regression)이 차지하는 비율이다. 이를 통해 본 실험에서 유도된 경험식의 신뢰성을 검증하였다. 이상과 같은 순서에 의해 실험을 진행하였고 공정변수가 공정결과에 미치는 영향은 다음 절에서 자세히 설명하도록 하겠다.

2.2. 실험 방법

Ta 박막은 collimator가 장착된 DC magnetron sputter를 이용하여 증착하였다. 하지층으로 200mm 직경을 갖는 Si(100) 위에 thermal oxide 1000Å 성장시켜 사용하였으며 증착한 Ta 두께는 500Å 이었다. Ta 증착시 공정 변수로는 증착 온도, 압력, 증착 전력으로 선정하였고, 각 변수의 범위는 각각 25~400°C, 1~3mTorr, 1.3~8W/cm²로 설정하였다. 증착조건은 Table 2에 나타낸 바와 같이 통계적 실험방법(RS/1 통계 package software)를 이용하여 선정하였다. 각 시편의 증착상태의 특성을 조사하기 위해 4 point probe를 이용하여 면저항(sheet resistance: Rs) 및 면저항 균일도(Rs uniformity, 3σ)를 측정하였다(49 points/wafer). 박막 증착 이후 야기된 기판의 곡률 변화를 이용하여 박막의 응력(stress)을 측정하였으며 365nm 파장에서 빛의 반사 정도를 측정하여 박막의 반사도(reflectivity)를 조사하였다. 이후 RS/1 통계 package software를 이용하여 공정 변수에 대한 비저항, 면저항의 균일도, 증착속도, 반사도, 응력 등의 증착 특성을 조사하였으며 공정변수가 공정결과에 미치는 영향을 파악하였다. X-ray diffractometry(XRD) 분석을 통하여 Ta 박막의 상(phase)분석 및 박막의 우선 방위를 관찰하였다. Cross-sectional transmission electron microscopy(XTEM)을 사용하여 두께를 측정하였으며 이를 통해 Ta 박막의 증착속도 및 비저항을 환산하였다. Plan-view TEM을 이용하여 Ta 박막의 결정립의 크기를 조사하였고 selected area diffraction(SAD) pattern의 상 분석결과와 XRD 결과를 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 공정 변수가 Ta 박막 물성에 미치는 영향

증착 온도, 증착 압력, 증착 전력의 공정변수 변화에 따른 비저항, 면저항 균일도, 증착속도, 반사도, 응력 등의 증착 특성 변화를 Fig. 1~5에 나타내었다. 각 그림은 실제 실험 결과를 반응 표면분석법으로 처리했을 때 생성되는 등고선(contour map)을 나타낸 것이며 실제 데이터 point들이 "*"로 표시 되어있다. Fig. 1에 증착 전력에 따른 증착속도의 변화를 나타내었다. 증착속도는 일반적인 sputtering 결과에서 볼 수 있듯이 음극에 인가되는 증착 전력이 증가할수록 직선적으로 증가하였으며, 증착압력이 1mTorr → 3mTorr로 증가하는 경우 각 증착전력에서 2~3Å/sec씩 조금 증가하였다. 그러나 증착속도에 대한 증착 온도의 영향은 거의 나타나지 않았다.

Fig. 2에 증착변수에 따른 면저항 균일도를 나타내었다. 증착전력이 1.3W/cm²에서 8W/cm²로 증가될수록 균일도가 전반적으로 개선됨을 알 수 있었고 증착압력이 2~3mTorr 범위에서 가장 낮은 ~2% 미만의 균일도를 보였다. 이는 이 영역에서 가장 안정한 plasma 상태를 유지하여 박막의 면저항 균일도가 개선된 것으로 생각되며 본 실험의 모든 시편에서 면저항 균일도는 5% 미만의 양호한 값을 보였다.

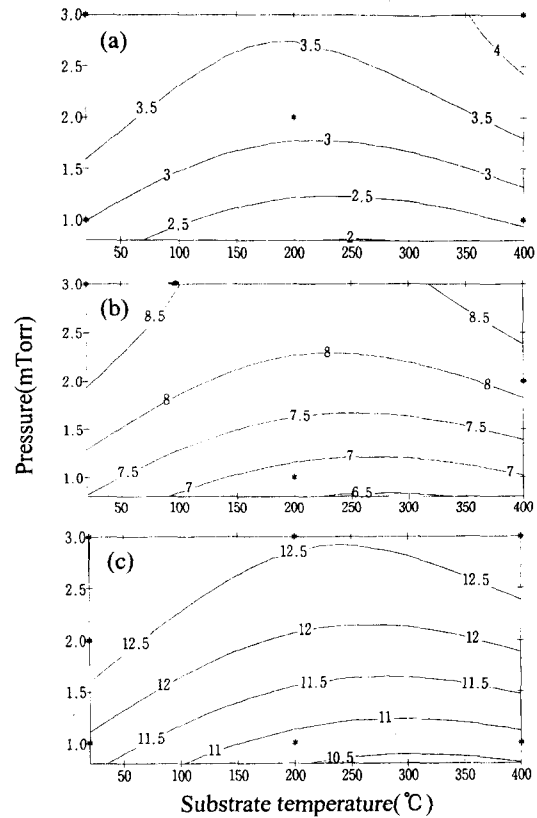


Fig. 1. Contour plots of deposition rate (Å/sec) as a function of pressure and temperature at the deposition power of (a) 1.3 W/cm², (b) 3.9 W/cm², and 8 W/cm².

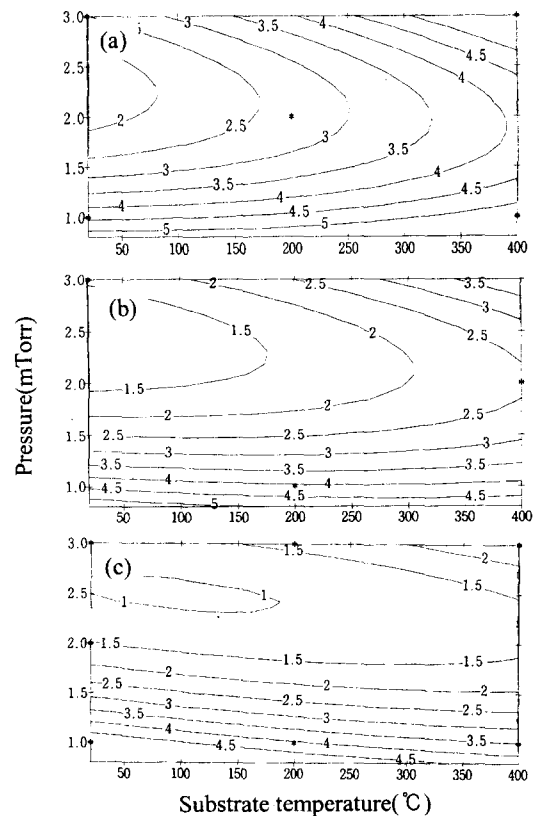


Fig. 2. Contour plots of Rs uniformity (%) as a function of pressure and temperature at the deposition power of (a) 1.3 W/cm², (b) 3.9 W/cm², and 8 W/cm².

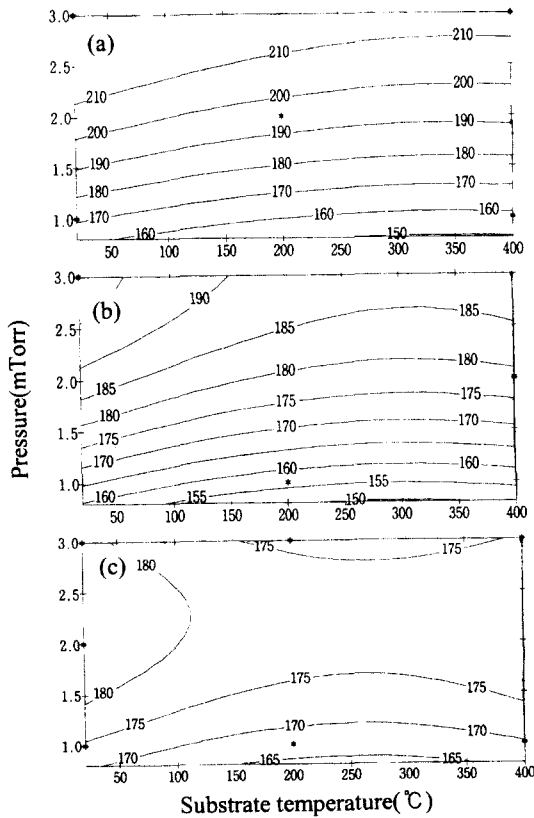


Fig. 3. Contour plots of resistivity ($m\Omega cm$) as a function of pressure and temperature at the deposition power of (a) $1.3 W/cm^2$, (b) $3.9 W/cm^2$, and $8 W/cm^2$.

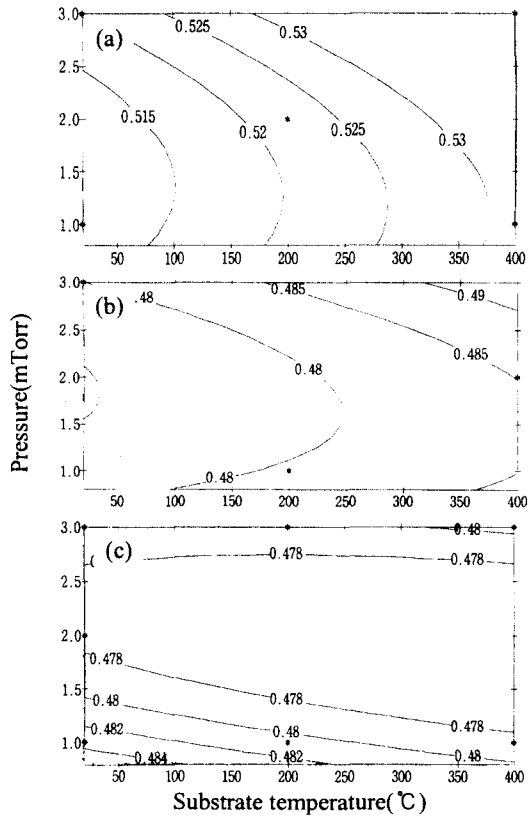


Fig. 4. Contour plots of reflectivity as a function of pressure and temperature at the deposition power of (a) $1.3 W/cm^2$, (b) $3.9 W/cm^2$, and $8 W/cm^2$.

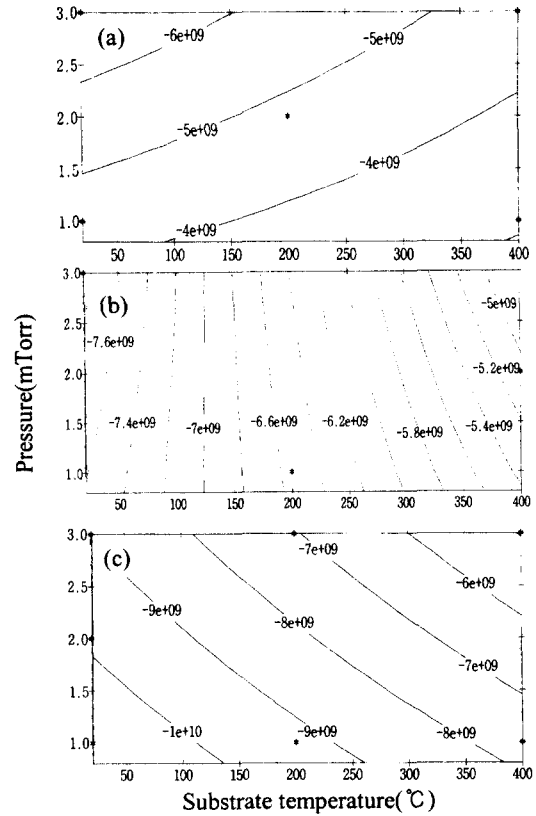


Fig. 5. Contour plots of stress ($dynes/cm^2$) as a function of pressure and temperature at the deposition power of (a) $1.3 W/cm^2$, (b) $3.9 W/cm^2$, and $8 W/cm^2$.

박막의 비저항 특성은 Fig. 3에 나타내었는데 증착전력이 $1.3 \rightarrow 8 W/cm^2$ 로 증가하는 경우 비저항이 $10 \sim 20 \mu\Omega cm$ 정도 감소하는 것을 알 수 있었으며 본 실험 조건에서 비저항은 $175 \sim 210 \mu\Omega cm$ 의 범위를 가졌다. 일반적으로 증착전력의 증가시 입자의 에너지가 증가되므로 표면 이동도 (mobility)가 제한되어 불균일한 박막형성 가능성이 많아 지나 본 실험의 조건에서는 표면 이동도를 제한할 정도의 빠른 증착속도가 아닌 것으로 생각된다. 반면 증착전력이 작은 경우, 즉 증착속도가 감소시 박막내의 Ar과 같은 내재 불순물이 증가되어 비저항이 커진 것으로 사료된다. 참고로 증착 온도가 증착 물질의 녹는점 $1/2$ 이상 일 때 columnar 구조에서 equiaxed grain 구조로 변하게 된다.¹⁵⁾ Ta의 경우 녹는점이 $2980^\circ C$ 인 것을 고려하면 증착온도가 $\sim 400^\circ C$ 에서는 박막의 물성에 큰 변화가 없으리라 생각된다. 증착상태에서 측정된 반사도는 $365nm$ 의 파장의 빛에서 ~ 0.5 의 값을 나타냈으며 증착변수에 따른 변화는 크지 않았다 (Fig. 4).

증착변수에 따른 응력의 변화를 Fig. 5에 나타내었는데 증착상태의 박막은 $-4E+09 \sim -1.1E+10 dynes/cm^2$ 범위의 압축응력을 보였다. 압축응력 (compressive stress)은 스퍼터된 박막의 일반적인 특성인데 주로 argon 및 oxygen과 같은 불순물의 내재에 기인한다.¹⁶⁾ Thornton 등에 의하면 스퍼터된 금속 박막에 있어서 Ar의 박막내 농도

Table 3. Fitness for Quadratic model.

	Dep. rate	Resitivity	Rs uniformity	Reflectivity	Stress
R-sq.	0.9160	0.8554	0.8599	0.9011	0.8384

R-sq = Sum of square of regression/ Sum of square of total

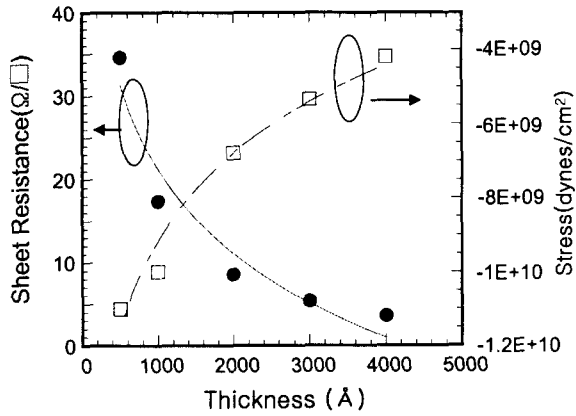


Fig. 6. Sheet resistance and stress changes as a function of Ta thickness.

는 금속의 원자 질량 (atomic mass) 에 의존한다고 보고하였는데 Ti (atomic mass = 47.88) 박막의 경우 Ar의 atomic percent가 ~0.03인 반면, Ta (atomic mass = 180.95) 박막은 ~1.5로 Ta 내부의 Ar 함량이 많음을 보고한 바 있다.¹⁰⁾ 본 시편의 RBS 측정 결과 박막의 Ar 함량 (%) 이 1.1~1.4의 값을 가졌다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 증착전력이 증가되거나 증착온도가 감소될수록 상대적으로 높은 압축응력을 보였으며, 8W/cm² 전력과 상온에서 증착한 경우 -1.1E+10 dynes/cm²으로 가장 높은 값을 보였다. Ta 박막의 두께에 따라 측정된 면저항과 응력의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 두께가 4000 Å에서 500 Å으로 감소될수록 응력은 -4E+09 dynes/cm²에서 -1.1E+10 dynes/cm²로 증가되는 일반적인 경향을 확인하였다.

3.2. Quadratic model에 대한 신뢰도

공정 변수의 함수에 의한 model의 경험식의 신뢰성은 실제 데이터와 경험식간의 fitness를 이용하여 검증하였다. 즉, 각 증착특성에 대한 공정변수 또는 공정변수간의 상호작용에 따른 신뢰도는 quadratic model에 대한 R-square 값으로 나타낼 수 있는데, R-sq.는 총 변동 (Sum of square of total) 중에서 회귀 (regression) 에 의하여 설명되는 변동 (Sum of square of regression) 이 차지하는 비율이다. R-sq.의 범위는 0 ≤ R-sq. ≤ 1 로서, 모든 측정값들이 회귀선상에 위치한다면 1이 된다.¹²⁾ 이때의 R-sq.의 각 항목들은 증착 온도 (X₁), 증착 압력 (X₂), 증착 전력 (X₃) 및 이들의 상호작용 (X₁², X₂², X₃², X₁X₂, X₁X₃, X₂X₃) 이며, 처음 model에 의한 회귀 분석 결과를 얻은 후, 낮은 영향을 주는 각 변수 상호작용에 의한 항목 (X₁X₂, X₁X₃, X₂X₃, X₁², X₂², X₃²) 의 회귀를 제거함 (pooling) 으로써 회귀 분석시 R-sq 값을 1에 근접시킬 수 있다. 본 실험에서 각 공정 변수의 상호작용에 대한 풀링 (pooling) 을 실시

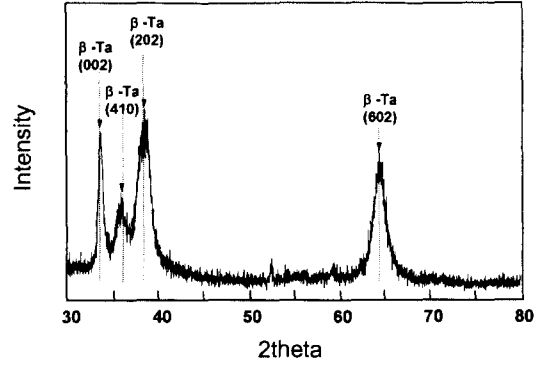


Fig. 7. Low-angle XRD peaks of sputtered Ta film.

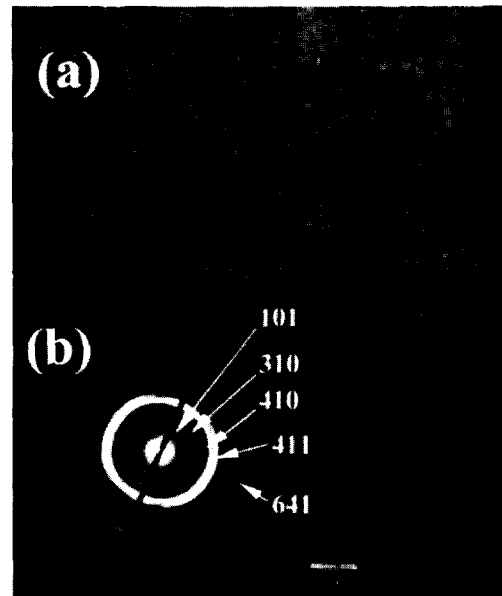


Fig. 8. Plan-view TEM micrographs of β-Ta film: (a) bright field image and (b) selected area diffraction pattern.

하지 않은 model의 R-sq 값을 Table 3에 나타 내었으며, 분석 결과는 0.85~0.9의 R-sq. 값을 얻을 수 있었다.

3.3. Ta 박막의 상분석과 미세구조 관찰

통계적 실험법을 이용하여 비저항과 면저항 균일도 측면에서 가장 낮은 비저항과 면저항 균일도를 갖는 최적 조건은 증착 온도 20℃, 증착 압력 2mTorr, 증착 전압 8 W/cm²로 선정 되었다. 위 조건으로 증착한 박막의 XRD 결과를 Fig. 7에 나타내었다. low-angle XRD결과에서 β-Ta peaks 만을 관찰하였으며 bcc-Ta의 peak은 전혀 관찰되지 않았다. 낮은 비저항을 갖는 bcc-Ta 박막을 얻기 위해서 증착시 N₂를 소량 첨가하는 경우 격자내부의 질소첨가에 따라 격자상수가 증가되어 β-Ta (teragonal a=10.194, c=5.313)에서 bcc-Ta (a=3.3058)으로 상변태를

야기시킨다고 보고된 바 있는데¹⁷⁾ 본 실험조건에서는 증착된 Ta 박막은 모든 경우 β -Ta 임을 알 수 있다.

Fig. 8에 Ta 박막의 TEM 분석에 의한 명시야상(bright field image)과 회절무늬(selected area diffraction pattern)를 나타내었다. 증착한 시편에서 평면 TEM 사진을 관찰해보면 결정립 크기는 100~200 Å 정도임을 알 수 있었다. 정확한 상분석을 하기 위해 SAD pattern 회절무늬를 관찰하여 각환의 직경을 전후 면간 거리 d 를 계산하여 JCPDS card의 데이터와 비교하였다. SAD pattern에서 관찰된 각 환들은 β -Ta에 의한 것이었으며 XRD한 결과와 동일한 결과를 얻었다. 향후, 통계적 실험법을 이용하여 선정된 조건에 대한 추가 최적화 작업이 필요하리라 사료된다.

4. 결 론

Ta 박막의 증착 전력이 1.3 W/cm²에서 8 W/cm²로 증가할수록 증착속도는 증가하였으며, 비저항은 10~20 $\mu\Omega$ cm 정도 감소하는 경향을 보였다. 본 실험 조건에서 Ta 박막의 비저항은 175~210 $\mu\Omega$ cm 의 범위를 가졌다. 면저항의 균일도는 증착 압력이 2mTorr인 경우 가장 안정한 값을 보였다. 본 실험 조건에서 반사도는 ~0.5 정도의 값을 보였으며 용력은 압축 용력 특성을 나타내었다. 실험의 신뢰도를 파악 하기 위한 model의 fitness를 회귀 분석을 통한 R-sq.로 나타내었는데 각 공정 변수의 상호작용에 대한 풀링(pooling)을 실시하지 않은 model의 R-sq.값은 0.85~0.9였다. 본 실험에서 선정된 최적 조건으로 증착 압력 2mTorr, 증착 전압 8W/cm², 증착 온도 20°C였으며, 본 조건하에서 증착된 박막은 β -Ta (tetragonal, $a = \sim 180 \mu\Omega$ cm, R_s uniformity = ~2%)로 결정립의 크기는 100~200 Å의 분포를 나타내었다.

참 고 문 헌

1. M. Igarashi, A. Harada, H. Amishiro, H. Kawashima, N. Morimoto, Y. Kusumi, T. Saito, A. Ohsaki, T. Mori, T. Fukada, Y. Toyoda, K.

- Higashitani and H. Arima, IEDM Technology Digest, 829 (1998).
2. T. Matsuki, K. Kishimoto, K. Fujii, N. Itoh, K. Yoshida, K. Ohto, S. Yamasaki, T. Shinmura, N. Kasai, IEDM Technology Digest, 261 (1999).
3. M.A. Nicolet, Thin Solid Films 52, 415 (1978).
4. Jian Li, T.E. Seidel, J.W. Mayer, MRS bulletin 19, 15 (1994).
5. J.M.E Harper, E.G. Colgan, C-K. Hu, J.P. Hummel, L.P. Buchwalter, C.E. Uzoh, MRS bulletin 19, 23 (1994).
6. E. Kolaha, J.S. Chen, J.S. Reid, P.J. Pokela, M-A. Nicolet, J. Appl. Phys. 70, 1369 (1991).
7. K. Holloway, P.M. Fryer, C. Cabral Jr., J.M.E. Harper, P.J. Bailey, K.H. Kelleher, J. Appl. Phys. 71, 5433 (1991).
8. H. Ono, J. Appl. Phys. 64, 1511 (1994).
9. Binary Phase Diagram, edited by T.B. Massalski, Material Park (1990).
10. A. Schauer and M. Roschy, Thin Solid Films 12, 313 (1972).
11. K. Ino. T. Ushiki, K. Kawai, I. Oshima, T. Shinohara, T. Ohmi, J. Vac. Sci. Technol. A15, 2627 (1997).
12. 현대 실험 계획법, 박성현, 민영사 (1995).
13. 응용 실험 계획법, 박성현, 영지문화사 (1995).
14. RS/discover manual, BBN software products (1995).
15. J. A. Thornton, J. Vac. Sci. Technol. 11, 666 (1974).
16. J. A. Thornton, D.W. Hoffman, Thin Solid Films 64, 111 (1979).
17. B. Mehrotra and J. Stimmell, J. Vac. Sci. Technol. B5, 1763 (1987).