

IC용 초정밀 박막저항소자의 제조와 특성연구

논문

8-1-3

Preparation of Precision Thin Film Resistor Sputtered by Magnetron

하홍주*, 장두진*, 조정수*, 박정후*

(Hong-Ju Ha, Du-Jin Jang, Jung-Soo Cho, Chung-Hoo Park)

Abstract

To develop a high precision TiAlN thin film resistor, TiAlN films were deposited on Al_2O_3 substrates by reactive planar magnetron cosputtering from Ti and Al targets in an $Ar-N_2$ atmosphere. The characteristics of the TiAlN thin film were controlled by changing of the R.F. power on Ti and Al targets, and the N_2 partial pressure.

The high precision TiAlN thin film resistor with TCR(Temperature Coefficient of Resistance) of less than 10ppm/ $^{\circ}C$ was obtained under the R.F. power condition of 160(w)/240(w) to Ti and Al targets at the N_2 partial pressure of 7×10^{-5} Torr. The composition of these films were investigated by XRD, SEM and EDS.

Key Words : TiAlN, Precision Thin Film Resistor(박막정밀저항), TCR(저항온도계수), Reactive Cosputtering(반응성 동시 스파터링).

1. 서 론

반도체 회로의 고집적화와 고정밀화의 추세로 저항소자의 고품위화는 더욱 절실히 요구되고 있으며, 사무기기의 초박막의 경향에 따라 박막가열소자(thermal heating element)로서도 박막저항체의 응용이 더욱 증가하고 있다. 이와같은 고품위의 박막저항소자가 갖추어야 할 조건으로는 첫째, 전극과의 기계적 접촉 및 마찰에 의한 부분적 손상이나 마모 없이 장시간 견뎌야 하고, 고온에서 산화하지 않아야 한다. 둘째, 비저항이 높고, 저항온도계수(TCR : Temperature Coefficient of Resistance)가 zero에 가까운 재료여야 한다.^{1,2)}

본 연구에서 대상으로 하고 있는 질화 티타늄과 질화 알루미늄의 복합물인 질화 티탄 알루미늄(TiAlN)은 내마모성과 내산화 특성이 극히 우수한 것으로 보고되고 있다.^{3,4,5)} 특히 질화티탄(TiN)은 비저항이 약 $200 \mu\Omega\text{-cm}$ 이고 TCR이 약 +300ppm

/ $^{\circ}C$ 인데 반하여 질화알루미늄(AlN)은 비저항이 약 $2000 \mu\Omega\text{-cm}$ 로서 TCR이 약 -400ppm/ $^{\circ}C$ 인 것으로 알려져 있다. 따라서 Ti와 Al타겟을 $Ar-N_2$ 분위기 속에서 동시에 반응성 스파터링하여 양의 TCR를 나타내는 TiN과 음의 TCR을 나타내는 AlN을 복합하면 TCR이 매우 낮은 고품위 박막저항체를 제작할 수 있을 것으로 사료된다.^{6,7)}

본 연구에서는 우수한 내열성과 기계적 특성을 가진 TiAlN을 비저항이 크고 TCR이 극히 낮은 초정밀 박막저항소자로 이용하기 위하여, 반응성 분위기에서 Ti와 Al 두개의 타겟을 동시에 스파터링할 수 있는 장치를 제작하여, 최적의 박막형성조건을 규명하고, 그 특성을 연구하였다.

2. 실험 방법

그림 1은 본 연구에서 사용한 R.F. 평판형 마그네트론 스파터링 프로세스의 개략도를 나타내고 있다. 이 그림에서 두개의 타겟은 기관의 중심을 향하여 중심축에서 동일한 거리와 각도를 가지도록 설계되어 있으며, 드라이빙 모터(driving motor)에 의하여 기관은 최고 10cm까지 상하 이동이

* : 부산대학교 공대 전기공학과

접수일자 : 1994년 10월 30일

심사완료 : 1994년 12월 24일

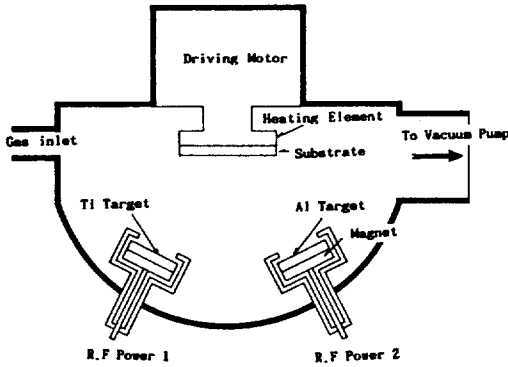


그림 1. R.F.평판형 마그네트론 동시 스파터링 프로세스의 개략도.

Fig. 1. The Schematic Diagram of Experimental Set-up.

가능하다. 또한 N_2 와 Ar 가스의 유량을 MFC (Mass Flow Meter)에 의하여 각각 0.2 SCCM에서 100 SCCM까지 정밀 조절할 수 있으며, 5×10^{-7} Torr까지 진공이 가능하다. 더우기 독립된 두 개의 R.F. 전원 및 두 개의 타겟(3 inch)을 동시 혹은 독자적으로 운전할 수 있어 여러종류의 재료를 동시에 스파터링할 수 있다. 기판은 PTC(Positive Temperature Coefficient)소자에 의하여 $800^\circ C$ 까지 가열할 수 있으며, 박막의 평활도를 증가시키기 위하여 기판은 증착중에 분당 20회 까지 회전할 수 있다.

본 연구에서는 Ar 가스를 동작가스로 N_2 가스를 반응성 가스로 이용하여 Ar 가스에 대한 질소분압과 Ti와 Al 타겟에 인가되는 R.F. 전력들을 변수로 하여 각종 박막을 제작하였다. 사용된 기판은 알루미늄, 실리콘웨이퍼(111) 및 고속도강(high speed steel)이며, 이들을 동시에 원판상으로 배치하여 각 기판에 $TiAlN$ 박막을 형성한 후, 저항특성과 물성연구(EDS : Electron Diffraction Spectroscopy, XRD : X-Ray Diffraction Patterns)에 이용하였다. 표 1은 본 연구에서의 실험조건 및 실험범위의 적용범위를 나타내고 있다.

한편 박막저항체의 전기전도는 주로 격자의 열운동과 전자의 상호작용에 의하여 정해지므로 저항률 ρ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁸⁾

$$\rho = Const. \times \frac{T}{M\theta^2} \quad (1)$$

여기서, T는 절대온도, M은 열운동원자의 질량이며, θ 는 Debye 격자온도이다. (1)식에서 다음식을

표 1. 실험조건

Table 1. The experimental condition.

박막제작의 실험조건	Ti/Al타겟 R.F. 인가전력	증착시간	기판온도	질소분압
	160-240(W)	60 및 12(분)	100-600($^\circ C$)	$7-35 \times 10^{-3}$ Torr
예비 스파터링 : 20분 기판회전 주파수 : 15회/분 박막제작시의 진공도 : 2.5×10^{-3} Torr 기판 냉각 : 진공중에서 $80^\circ C$ 까지 자연 냉각				

얻을 수 있다.

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (2)$$

여기서 α 는 TCR을 나타내고 있다. 박막의 저항 측정은 4 단자법으로 질소분위기의 항온 항습조에서 $25^\circ C$ 에서 $125^\circ C$ 까지 온도를 변화시키면서 측정하였다.

박막의 제작조건에 따른 박막 배향성과 박막의 표면구조를 연구하기 위하여 SEM과 XRD를 이용하였으며, EDS에 의하여 박막을 구성하는 물질의 원소비율과 질량비를 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 기판온도 $300^\circ C$, 진공도 2.5×10^{-3} Torr에서 Ti와 Al타겟에 인가되는 전력과 질소분압을 변수로 하여 제작된 각종 시료의 저항률 특성변화를 나타내고 있다. 일반적으로 질소분압의 상승과 Al 타겟에 인가되는 R.F. 전력의 증가에 따라 저항률이 증가하는 경향이 있음을 알 수 있다. 특히, Ti와 Al 타겟에 가해지는 R.F. 전력이 각각 160W 및 240W 인 경우(이하 160/240 등으로 표기함) 질소분압의 증가에 따라 급격하게 저항률이 상승하는 것을 관찰할 수 있으며, 이것은 질소분압이 낮을 때는 거의 질화되지 않고 금속상으로 스파터링되던 Al이 질소분압의 증가에 따라 질화가 진행되어, 저항률이 매우 높은 AIN의 특성이 박막의 성질을 지배하기 때문인 것으로 사료된다. 한편 200/200과 240/160의 두 특성곡선은 곡선 160/240의 경우에 비하여 저항률의 증가는 적게 나타나고 있다. 그 이유는 Ti타겟에 인가되는 R.F. 전력이 Al 타겟에 비하여 같거나 크기 때문에 형성된 박막내에 존재하는 AIN의 양이 약 50% 이상이 되지 못하여, 전도에 기여하는 대부분의 전자가 AIN에 크게 영향을 받지않고 TiN을 통하여 이동하기 때문인 것으로 사료된다.^{6,8)}

표 2는 질소분압 7×10^{-5} Torr에서 얻어진

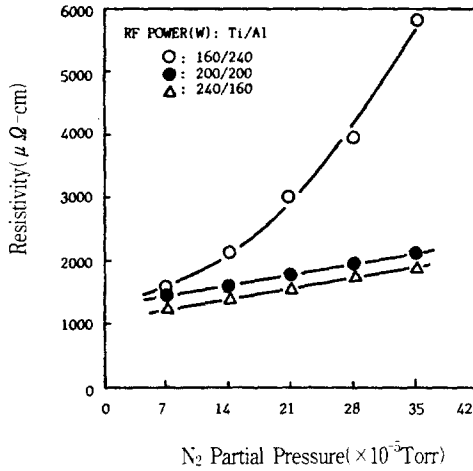


그림 2. 질소분압에 따른 TiAlN박막의 저항을 특성.

Fig. 2. The resistivity as a function of N_2 partial pressure for TiAlN thin films.

표 2. R.F. 출력에 대한 TiAlN의 원자 조성비.
Table 2. The atomic ratio in TiAlN as the R.F. Power.

Ti:Al	160:240	200:200	240:160
Atom(%) Ti:Al	41.98:58.02	51.14:48.86	54.69:45.31
Wt(%) Ti:Al	56.23:43.77	65.02:34.94	68.18:31.82

TiAlN 박막내 Ti와 Al의 원소비율과 질량비를 EDS로 분석한 결과를 나타내고 있다. TiAlN 박막내 포함된 Al과 Ti 원소의 양은 타겟에 인가되는 R.F. 전력에 거의 비례하고 있음을 알 수 있다.

그림 3은 질소분압 7×10^{-5} Torr에서 타겟에 인가되는 R.F. 전력을 변수로 하여 제작된 시료의 온도변화에 따른 저항율의 변화를 25°C의 저항율을 기준하여 나타내고 있다. 온도가 상승함에 따라 저항율은 약간 증가하고 있는데 비하여 Al에 대한 R.F. 전력의 증가에 따라 저항율의 변화는 다소 줄어드는 것을 알 수 있다. 그 이유는 낮은 질소분압으로 인하여 금속상의 Ti와 Al이 TiN 및 AlN과 같이 증착하고 있기 때문에 박막내에서 AlN의 특성이 크게 영향을 미치지 못하지만, Al타겟에 인가되는 R.F. 전력이 가장 큰 곡선 160/240에서는 AlN의 증착량이 증가하여 음의 TCR을 나타내는

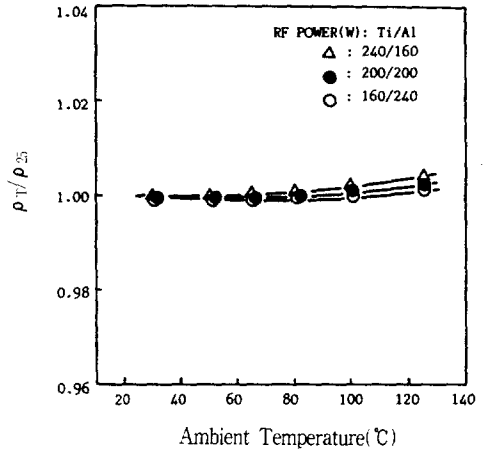


그림 3. 주위 온도변화에 따른 TiAlN박막의 저항율특성($N_2=7 \times 10^{-5}$ Torr).

Fig. 3. Variation of resistivity as a function of ambient temperature for TiAlN thin films. (N_2 partial pressure= 7×10^{-5} Torr)

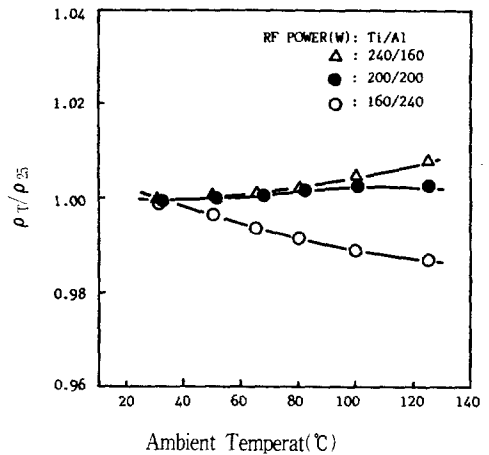


그림 4. 주위 온도변화에 따른 TiAlN박막의 저항율특성($N_2=21 \times 10^{-5}$ Torr).

Fig. 4. Variation of resistivity as a function of ambient temperature for TiAlN thin films. (N_2 partial pressure= 21×10^{-5} Torr)

AlN의 특성이 다른 곡선에 비하여 다소 크게 나타나고 있기 때문인 것으로 사료된다.⁴⁾

그림 4는 그림 3의 조건에서 질소의 분압만을 증가하여 질소분압 21×10^{-5} Torr에서 제작된 시료의 저항율특성을 나타내고 있다. 곡선 240/160에서는 주위 온도증가에 따라 저항율이 증가하고 있으며, 곡선 160/240에서는 온도증가에 따라 저항율은

오히려 감소하고 있는데 반하여 곡선 200/200에서는 온도증가에 따른 저항율의 변화는 거의 없이 두 곡선의 중간에 위치하고 있음을 알 수 있다. 이와같이 R.F. 전력 및 질소분압에 따라 주위온도변화에 따른 저항율변화가 상이하게 나타나는 것은 R.F. 전력 및 질소분압이 변화하면 질화정도가 변화하여 양의 TCR를 나타내는 TiN과 음의 TCR을 나타내는 AlN의 특성이 명확하게 구별되기 때문인 것으로 사료된다.

그림 5는 질소의 분압비를 더욱 증가시켜서 35×10^{-5} Torr에서 제작된 시료의 저항율 변화를 나타내고 있다. 그림 4에 비하여 전체 저항율변화 특성이 1이하의 영역으로 이동한 것을 알 수 있다. 그림 3,4,5의 결과를 종합하면 질소의 분압비 증가로 인하여 질화가 증가함에 따라 TiN의 TCR은 감소하여 일정한 양(+)의 값으로 포화되는 특성을 나타내지만 AlN의 TCR은 질화의 증가에 따라 음(-)의 값으로 급격하게 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와같은 변화를 더욱 명확히 하기 위하여 TiN과 AlN만의 TCR 특성을 고찰하였다.

그림 6은 TiN과 AlN만의 TCR(TCR)특성을

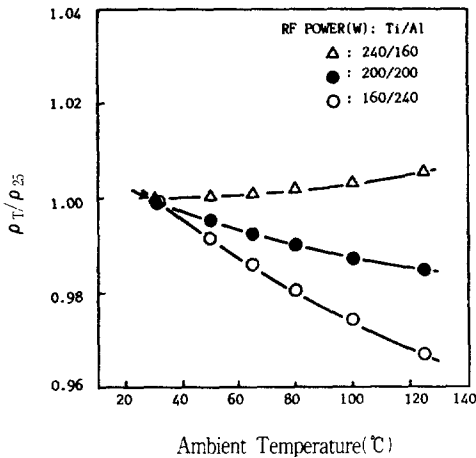


그림 5. 주위 온도변화에 따른 TiAlN 박막의 저항율특성($N_2=35 \times 10^{-5}$ Torr).

Fig. 5. Variation of resistivity as a function of ambient temperature for TiAlN thin films. ($N_2=35 \times 10^{-5}$ Torr)

나타내고 있다. 그림에서 AlN의 TCR을 질소분압 21×10^{-5} Torr 이상 나타내지 않은 것은 이 이상의 질소분압에서는 저항율이 너무 상승하여 절연체의 특성을 나타내고 있기 때문이다. 이 그림에서 TiN의 TCR은 질소분압의 증가에 따라 약 1500ppm/°C에서 포화하고 있으나, AlN의 TCR은 질소분압

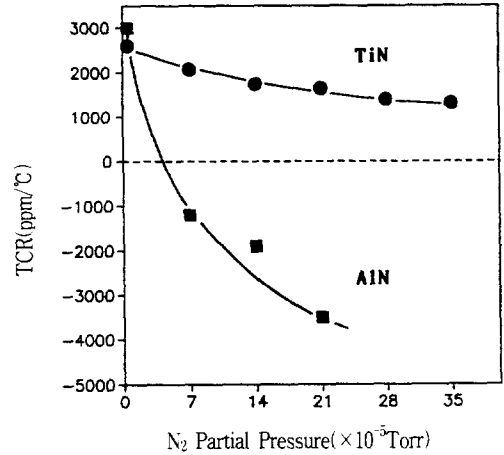


그림 6. 질소분압에 대한 TiN과 AlN의 TCR특성.
Fig. 6. The characteristics of TCR of TiN and AlN as a function of N_2 partial pressure.

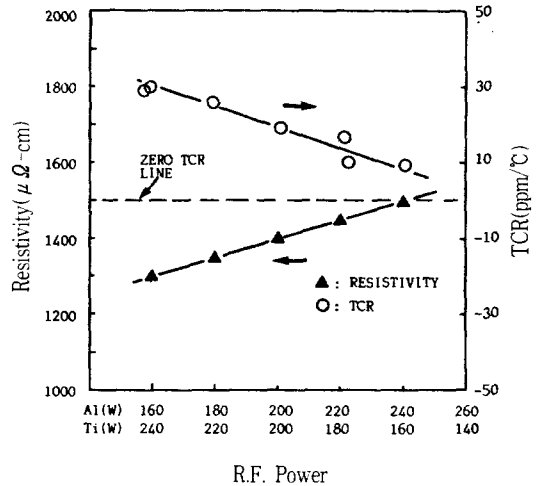


그림 7. R.F. 전력을 변수로하여 제작된 TiAlN의 TCR과 저항율특성($N_2=7 \times 10^{-5}$ Torr).

Fig. 7. TCR and resistivity as a function of R.F. power to targets. (N_2 partial pressure $=7 \times 10^{-5}$ Torr)

의 증가에 따라 약 -4000ppm/°C 까지 감소하고 있음을 알 수 있다. 이 결과는 3,4,5에서 나타나는 저항율의 변화와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 7,8,9는 질소분압과 R.F. 전력을 변화하여 얻을 수 있는 저항율과 최소 TCR의 범위를 정리한 것이다.

그림 7은 기판온도 300°C, 질소분압 7×10^{-5} Torr

에서 Ti와 Al타겟에 인가되는 R.F. 전력을 달리하여 제작한 시료의 저항율과 TCR의 특성을 나타내고 있다. Al 타겟에 인가되는 R.F. 전력의 증가에 따라 저항율은 증가하고 TCR는 감소하고 있다. 특히 R.F. 전력 240/160의 영역에서 9ppm/°C의 매우 낮은 TCR을 가진 시료를 얻을 수 있었다.

그림 8은 그림 7에서 질소분압을 21×10^{-5} Torr로 증가한 경우의 저항율과 TCR의 특성을 나타내고 있다. R.F. 전력 200/200 근처에서 저항율이 크게 증가하고 있으며 TCR도 양의 영역에서 음의 영역으로 이동하면서 ZERO TCR Line을 통과하고 있다. 이 그림은 타겟으로 Ti와 Al금속을 사용하지 않고 질화된 세라믹 타겟인 TiN과 AlN을 사용하여 동시에 스파트링한 결과와 매우 비슷한 양상을

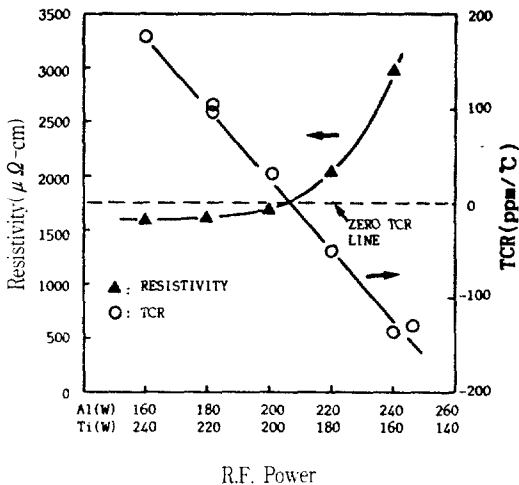


그림 8. R.F. 전력을 변수로 하여 제작된 TiAlN의 TCR과 저항율특성($N_2=21 \times 10^{-5}$ Torr).
Fig. 8. TCR and Resistivity as a function of R.F. power to targets. (N_2 partial pressure= 21×10^{-5} Torr)

보이고 있다.⁶⁾ 질소분압 21×10^{-5} Torr에서는 Ti와 Al에 인가되는 전력이 비슷한 영역에서 우수한 TCR의 특성을 얻을 수 있었다.

그림 9는 질소분압을 더욱 증가하여 35×10^{-5} Torr에서 얻어진 시료의 저항율과 TCR의 특성을 나타내고 있다. TCR의 곡선이 그림 8에 비하여 왼쪽으로 이동되어 있으며, 저항율이 상승하는 지점도 약간 왼쪽으로 이동되어 있고, 전체적인 저항율의 값은 더욱 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 그림 7,8,9의 결과로 질소분압의 상승에 따라 TCR이 영(0)이 되는 영역은 Al타겟에 인가되는 R.F.

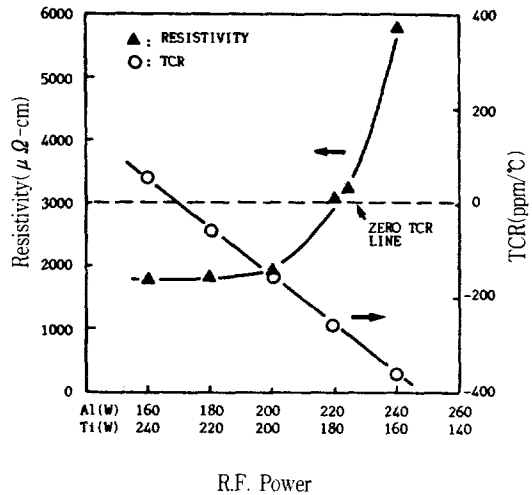


그림 9. R.F. 전력을 변수로 하여 제작된 TiAlN의 TCR과 저항율특성($N_2=35 \times 10^{-5}$ Torr).
Fig. 9. TCR and Resistivity as a function of R.F. power to targets. (N_2 partial pressure= 35×10^{-5} Torr)

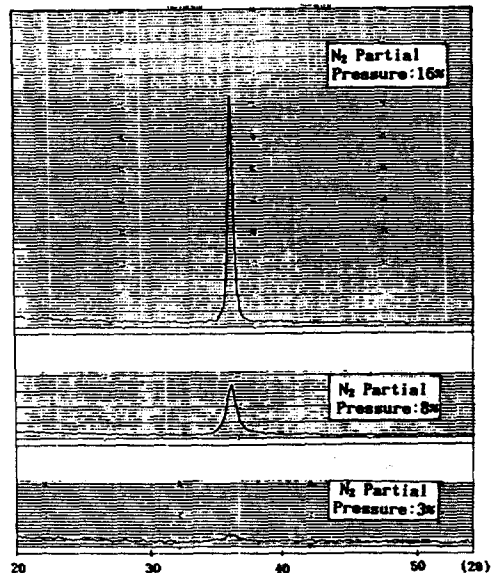


그림 10. 질소분압을 변수로 하여 제작된 TiAlN의 XRD특성(Ti : Al=200 : 200W)
Fig. 10. XRD patterns of the films deposited with various N_2 partial pressure.

전력이 감소하는 영역으로 이동하며, 저항율은 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 주로 질화의 증가로 인하여 AlN의 저항율이 증가하여 음의 TCR값이 더욱 크게 나타나기 때문인 것으로 사료된다.

AlN이 이와같이 음의 TCR특성을 나타내는 것은 6.2eV의 밴드갭을 가진 반도체의 구조를 하고 있기 때문인 것으로 사료된다.⁹⁾

그림 10은 기판온도 300℃, R.F. 전력 200/200(W)에서 질소분압을 변수로 제작된 시료의 XRD 패턴의 변화를 나타내고 있다. 질소분압이 증가함에 따라 (111)의 배향성을 가진 TiAlN의 피크가 매우 분명하게 나타나는 것을 알 수 있다. 질소분압 7×10^{-5} Torr에서 거의 TiAlN의 피크를 관찰할 수 없는 것은 질화에 기여하는 질소의 양이 적어서 질화물이 충분히 형성되지 못하고, 금속상과 혼재하여 아몰퍼스상을 형성하기 때문인 것으로 사료된다.

그림 11은 기판온도 300℃, 질소분압비 35×10^{-5} Torr에서 Ti와 Al타겟에 인가되는 R.F. 전력을 변수로 하여 제작된 시료의 XRD 특성을 나타내고 있다. 곡선 240/160, 200/200에서 (111)면의 TiAlN의 피크가 크게 나타내고 있으나 160/240에서는 거의 피크를 관찰할 수 없다. 이것은 일반적으로 격자간격이 작은 AlN이 TiN의 결정구조속으로 들어가서 TiAlN을 구성하기 때문에 AlN이 과잉되면 기본이 되는 TiN의 결정구조를 형성하지 못하

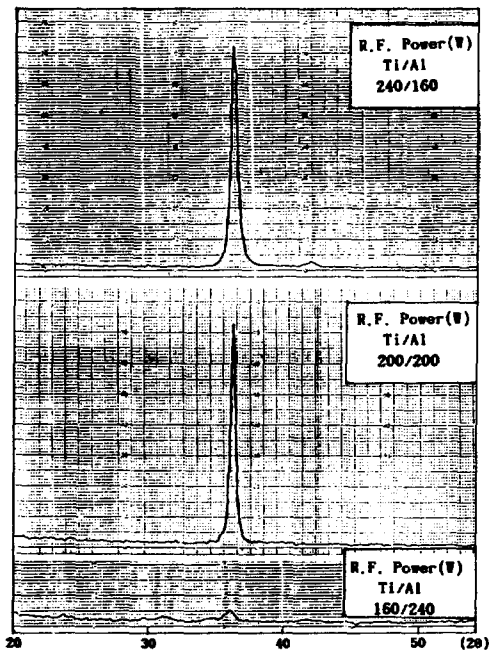
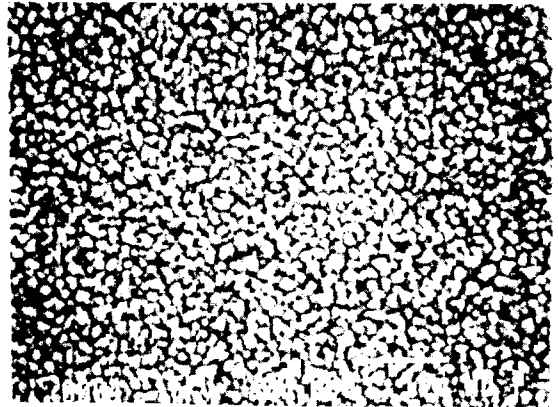
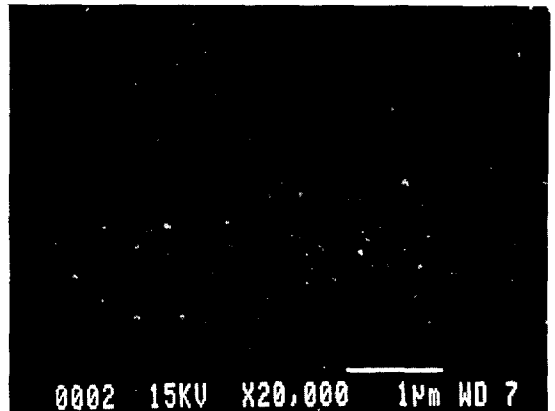


그림 11. R.F. 전력을 변수로 하여 제작된 TiAlN의 XRD특성($N_2=35 \times 10^{-5}$ Torr).

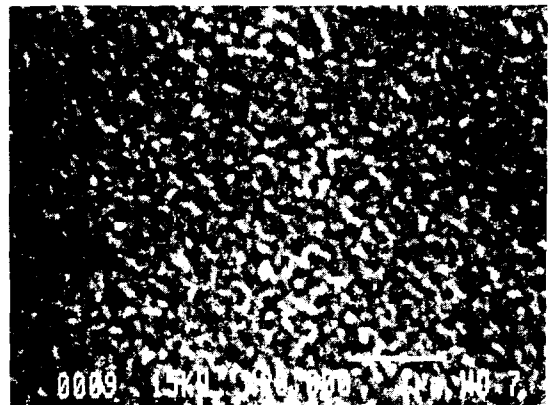
Fig. 11. XRD patterns of the films deposited with various R.F. Power conditions.



(a) Ti : Al=240 : 160



(b) Ti : Al=200 : 200



(c) Ti : Al= 160 : 240

그림 12. R.F. 전력을 변수로 하여 제작된 TiAlN의 표면사진($N_2=35 \times 10^{-5}$ Torr).

Fig. 12. The surface SEM image of the TiAlN films(N_2 partial pressure= 35×10^{-5} Torr).

고, 따라서 AlN은 TiN과 통일된 격자구조를 구성하지 못하여, 그레인의 크기가 매우 작은 비정형에

가까운 격자구조를 가지고 있기 때문인 것으로 사료된다.⁴⁾ 결국 160/240에서는 AlN이 TiN보다 우세하여 매우 큰 저항율을 나타내고, -300ppm/°C 이상의 TCR을 나타내고 있다. 이 결과는 그림 9의 특성과 잘 일치하는 것이며, 그림 12의 표면 SEM 사진에서도 잘 나타나 있다. 이 SEM 사진에서 240/160의 경우에는 0.1-0.3 μ m 정도의 직경을 가진 그레인을 관찰할 수 있다. 200/200에서는 240/160에 비하여 그레인의 크기는 크게 감소했으나 그레인과 그레인의 경계는 구별할 수 있다. 그러나 160/240에서는 그레인의 경계를 구별할 수 없는 표면 형상을 하고 있는것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 그림 11의 XRD의 결과와 같이 AlN의 과잉에 의하여 통일된 격자구조를 가지지 못하는 아몰퍼스상을 나타내고 있기 때문인 것으로 사료된다.

4. 결 론

Ti와 Al 타겟을 동시에 반응성 평판형 마그네트론 스파터링하여 제작된 TiAlN 박막의 저항특성과 물성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 요약할 수 있었다.

1. Ar에 대한 질소분압비 및 Al타겟에 대한 R.F. 출력이 증가할수록 TiAlN의 박막 저항이 증가하고, 부(-)의 TCR을 나타낸다.
2. 성막온도 300°C, 진공도 2.5×10^{-3} Torr, 질소분압 7×10^{-5} Torr, Al타겟과 Ti타겟에 각각 인가되는 R.F.출력비 240 : 160(W)에서 9ppm/°C의 낮은 TCR을 가진 초정밀 저항박막을 얻을 수 있었다.
3. Al타겟에 대한 R.F. 출력이 증가할 수록 박막표면의 그레인의 크기는 감소하였다.
4. R.F. 스파터링에 의한 박막의 배향은 거의 (111)면에만 집중되고 질소분압의 증가와 Ti타겟의 R.F. 출력 증가에 따라 더욱 뚜렷한 배향성을 나타낸다.

※ 이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. W. Bruckner, A. Heinrich, H. Schreiber, H. Vinzelberg, "Degradation of CrSi(W)-O resistive films" Thin Solid Film, Vol. 214, pp. 24-91, 1992.
2. John Watkins, "Modern Electronic Materials", London Butterworth & Co. Ltd., pp. 22-24, 1971.
3. R. Brown and M.N. Alias, "Effect of composition and thickness on corrosion behavior of TiN and ZrN thin films", Surface and Coatings Technology, Vol. 62, pp. 467-473, 1993.
4. Y. Tanaka, T. Ikeda, M. Kelly, "Structure and properties of (Ti_{1-x}Al_x)N films prepared by reactive sputtering", Thin Solid Film, Vol. 240, pp. 238-241, 1991.
5. H. Ichimura and Atsuo Kawana, "High-temperature oxidation of ion-plated TiN and TiAlN films", J. Mater. Res., 8, No. 5, pp. 1093-1100, 1993.
6. 早川 茂, 和佐清孝, "薄膜化技術" pp. 174-175, 1988.
7. N. Kuramoto, H. Taniguchi, I. Aso, "Development of translucent Aluminum Nitride ceramics", Ceramics Bull, Vol. 68, No. 4, 1989.
8. John Watkins, "Modern Electronic Materials", London Butterworth & Co. Ltd., pp. 26-34, 1971.
9. H. Maiwa, K. Okazaki, "Preparation of AlN thin films by reactive sputtering and optical emission spectroscopy during sputtering", Ferroelectrics, Vol. 131, pp. 83-89, 1992.