

## Ti 또는 Ti/TiN underlayer가 Al 박막의 배향성 및 면저항에 미치는 영향

이 원 준 · 나 사 균\*

현대반도체 연구소

\*대전산업대학교 재료공학과, 반도체기술연구소

### Effects of Ti or Ti/TiN Underlayers on the Crystallographic Texture and Sheet Resistance of Aluminum Thin Films

Won-Jun Lee and Sa-Kyun Rha\*

Research Center, Hyundai Microelectronics, 1, Hyangjeong-dong, Hungduk-gu, Cheongju, 361-725, Korea

\*Department of Materials Engineering, Taejon National University of Technology, 305-3,

Samsung-2-dong, Dong-gu, Taejon, 300-717, Korea

(1999년 9월 11일 받음, 1999년 12월 6일 최종수정본 받음)

**초 록** Underlayer의 종류 및 두께가 Al 박막의 배향성 및 면저항 변화에 미치는 영향을 연구하였다. Al의 underlayer로는 sputtering 방식으로 증착되는 Ti와 Ti위에 TiN이 적층된 구조인 Ti/TiN이 사용되었으며, 각각에 대해 두께를 변화시키면서 Al 박막의 배향성, 면저항을 조사하였고, 400°C, N<sub>2</sub> 분위기에서 열처리하면서 면저항의 변화를 조사하였다. Ti만을 Al의 underlayer로 사용한 경우, Ti두께가 10nm 이상이면 우수한 Al <111> 배향성을 나타냈으며 Al-Ti 반응 때문에 열처리 후 Al 배선의 면저항이 크게 상승하였다. Ti와 Al사이에 TiN을 적용함에 의해 Al <111> 배향성은 나빠지나 Al-Ti 반응에 의한 면저항의 증가는 억제할 수 있었다. Ti/TiN underlayer의 경우, 우수한 Al <111> 배향성을 확보하기 위한 Ti의 최소두께는 20nm이었고, Al-Ti 반응을 억제하기 위한 TiN의 최소두께는 20nm이었다.

**Abstract** The effects of the type and thickness of underlayers on the crystallographic texture and the sheet resistance of aluminum thin films were studied. Sputtered Ti and Ti/TiN were examined as the underlayer of the aluminum films. The texture and the sheet resistance of the metal thin film stacks were investigated at various thicknesses of Ti or TiN, and the sheet resistance was measured after annealing at 400°C in a nitrogen ambient. For the Ti underlayer, the minimum thickness to obtain excellent texture of aluminum <111> was 10nm, and the sheet resistance of the metal stack was greatly increased after annealing due to the interdiffusion and reaction of Al and Ti. TiN between Ti and Al could suppress the Al-Ti reaction, while it deteriorated the texture of the aluminum film. For the Ti/TiN underlayer, the minimum Ti thickness to obtain excellent texture of aluminum <111> was 20nm, and the minimum thickness of TiN to function as a diffusion barrier between Ti and Al was 20nm.

**Key words** : texture, aluminium, sputtering, titanium, annealing

### 1. 서 론

반도체 소자의 미세화가 진행됨에 따라 금속배선의 특성은 반도체 소자의 성능과 신뢰성에 중요한 영향을 미치게 되었다. 금속배선의 저항은 미세화에 따른 단면적 감소와 chip 크기 증가에 따른 길이 증가 때문에 큰 폭으로 증가하고 있으며, 배선저항의 증가에 의한 신호 지연 현상이 소자의 속도를 제한하게 되었다.<sup>1)</sup> 또한, 미세화에 따른 배선단면적의 감소에 의해 배선의 전류밀도 및 응력이 증가함에 따라 배선의 신뢰성 역시 문제가 되고 있다.<sup>2, 3)</sup>

Al의 underlayer는 Al의 미세구조, 특히 배향성과 결정립의 크기를 결정하여 Al 배선의 신뢰성에 지대한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.<sup>4~6)</sup> 일반적으로 sputtering 법으로 제조된 Al 박막은 <111> 면이 substrate 표면에

평행하게 배열되어 있는데<sup>7)</sup>, Al 배선의 electromigration lifetime은 <111> 배향성의 세기에 비례하여 증가하는 것으로 보고되고 있다.<sup>8~10)</sup> 이는 Al grain 간의 misorientation이 적을수록 Al 원자의 결정립계를 통한 확산속도가 느려지며, hillock이나 void와 같이 electromigration에 의한 failure가 <111> 방향이 아닌 결정립 부근에서 일어나기 때문이다.<sup>11, 12)</sup> <002> 방향으로 배향된 Ti는 Al의 <111> 배향성 측면에서 매우 우수한 underlayer이다.<sup>5, 6)</sup> 또한, Ti 위에 증착된 Al은 결정립이 매우 작아서 열처리에 의한 결정립 성장이 매우 빠르고 균일한 장점이 있다.<sup>13)</sup> 이와 같은 이유들로 인해 Ti underlayer를 적용한 경우에 그렇지 않은 경우에 비해 electromigration lifetime이 증가하는 것이 보고되고 있다.<sup>14, 15)</sup> 그러나, Ti를 underlayer로 사용할 경우에는 Al과 Ti와의 반응에 의해 TiAl<sub>3</sub>와 같

은 금속간 화합물이 형성되는데,<sup>16)</sup> Al-Ti 반응에 의해 Al의 단면적이 감소하기 때문에 배선의 저항 및 전류밀도가 증가한다. 또한, Al-Ti 반응에 의한 부피수축(약 6%)이 배선의 tensile stress를 증가시켜 stress-induced voiding 혹은 stressmigration을 촉진시킨다. 다층배선공정에서는 배선 형성과 intermetal dielectric (IMD)의 형성을 반복하기 때문에 하층배선이 IMD 증착공정의 heat cycle을 거치게 되므로, 다층배선의 층수가 증가할수록, 배선이 하층으로 내려갈수록 후속열공정에 의한 Al-Ti 반응이 심하게 일어나 배선저항의 증가와 신뢰성 감소가 심각해진다. TiN을 underlayer로 사용한 경우의 Al <111> 배향성에 대해서는 연구자에 따라서 여러 가지 상반된 결과들이 보고되고 있는데,<sup>17~19)</sup> 이는 공정조건에 따라서 TiN의 미세구조가 달라지기 때문으로 <111> 방향으로 배향된 TiN에 대해서는 비교적 우수한 Al <111>이 보고되었다. Ti와 TiN을 적층하여 underlayer로 사용할 경우에는 Ti <002> 위에 TiN <111>이 성장하여 우수한 Al <111> 배향성을 얻을 수 있었으며<sup>4,6)</sup>, TiN이 Al-Ti 반응을 억제하여 배선 저항 증가를 줄여줄 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 이러한 보고들은 주로 수십-수백 nm의 비교적 두꺼운 underlayer들에 대한 것으로서, metal stack의 유효비저항을 낮추기 위해서는 metal stack 내에서 Al의 유효단면적을 최대로 확보해야 하는 최소선폭 0.18 $\mu$ m 이하의 초고집적소자에 적용하기에는 부적합한 결과들이다. 또한, Al 박막의 <111> 배향성을 확보하기 위한 Ti 또는 Ti/TiN underlayer의 최소두께에 대해서는 조사된 바가 없다.

따라서, 본 연구에서는 underlayer의 종류 및 두께에 따른 Al의 배향성의 변화와 열처리에 의한 배선저항의 변화를 조사하고, 그 결과를 바탕으로 underlayer의 최소 필요 두께를 알아내고자 하였다. Underlayer로서는 sputtering 방식으로 증착되는 Ti와 Ti위에 TiN이 적층된 구조인 Ti/TiN이 사용되었으며, 각각에 대해 두께를 5에서 20nm 범위에서 변화시키면서 underlayer를 준비하고 동일한 조건에서 Al 박막을 증착하여 특성을 조사하였다. 또한 underlayer의 종류 및 두께를 달리하면서 만든 시편들에 대해 열처리 시간에 따른 면저항의 변화를 측정하여 소자제조시 다층배선공정에 의해 발생하는 Al-Ti 반응을 고찰하였다.

## 2. 실험 방법

Metal thin film stack을 준비하기 위해 사용된 공정 step을 표 1에 정리하였다. Substrate로는 PETEOS가 증착된 Si wafer를 사용하였다. Metal stack 증착은 cluster tool인 Applied Materials사의 Endura system을 사용하여 Ti 및 TiN은 두께를 변화시키면서 증착하였다. Al 증착은 각각의 underlayer 증착후 air break없이 실시되었는데 system의 substrate heater를 400 $^{\circ}$ C로 하여 실제 wafer 온도가 380 $^{\circ}$ C를 유지하도록 하였고, Al 두께는 500nm으로 고정하였다.

한편, 일반적인 양산용 장비에서 Ti와 TiN을 각각의 전용 chamber에서 증착하는 것과는 달리, 본 실험에서 사용된 system에서는 Ti와 TiN을 한 chamber에서 증착하고 있다. 따라서, TiN을 증착한 직후 Ti target의 표면이 nitridation된 상태에서 Ti 박막을 증착하면 Ti 박막은 증착초기에 N을 포함하게 되어, Ti와 TiN을 별도의 chamber에서 증착하는 경우의 Ti 박막과는 특성이 달라질 수 있다. 특히, 현재 사용하고 있는 Ti의 두께가 비교적 얇은 수십 nm 내외이기 때문에 이와 같은 효과를 무시할 수 없다. 따라서, 본 실험에서는 dummy wafer 증착을 test wafer 증착과 교대로 반복하여 test wafer 증착을 시작할 때 Ti target의 표면이 깨끗하게 유지되도록 하였다.

이렇게 하여 준비된 Al 박막은 as deposited 상태에서 분석되었고, 후속공정의 thermal cycle에 의한 Al의 특성 변화 조사를 위해서는 Al 박막 위에 anti-reflective coating (ARC) 층으로 Ti(5nm)/TiN(60nm) 또는 TiN(60nm)을 증착한 다음, furnace에서 N<sub>2</sub> 분위기 400 $^{\circ}$ C에서 anneal되었다. Anneal을 위해 ARC를 증착한 것은 실제 소자제조공정에서의 배선구조와 동일하게 sample을 제작하여 열처리시 ARC에 의해 면저항이 증가하는 효과를 포함시키는 한편, Al에 의한 furnace의 오염을 막기 위함이다.

Film의 두께는 X-ray fluorescence (XRF)에 의해 측정하였고 (5 points), Al의 반사율은 Tencor사의 UV-1250을 이용하여 480nm파장에서 측정하였다 (9 points). 일반적으로 금속박막의 반사율은 박막 "quality"를 비교적

Table 1. Process flow for the sputtered Ti/TiN splits.

Process	Method	Power(kW)	Gas flow(sccm)	Temperature( $^{\circ}$ C)	Pressure(Torr)
PETEOS	PECVD	0.4	TEOS, O <sub>2</sub> , He	400	6
Under layer	Ti	Sputtering	Ar, 60	300	3.3m
	TiN	Sputtering	Ar, 19; N <sub>2</sub> , 56	300	3.5m
Al	Sputtering	12	Ar, 51	400*	2.2m
ARC	Ti	Sputtering	Ar, 60	300	3.3m
	TiN	Sputtering	Ar, 19; N <sub>2</sub> , 56	300	3.5m
Anneal	Furnace	-	N <sub>2</sub>	400	1ATM

\*Wafer temperature was approximately 380 $^{\circ}$ C.

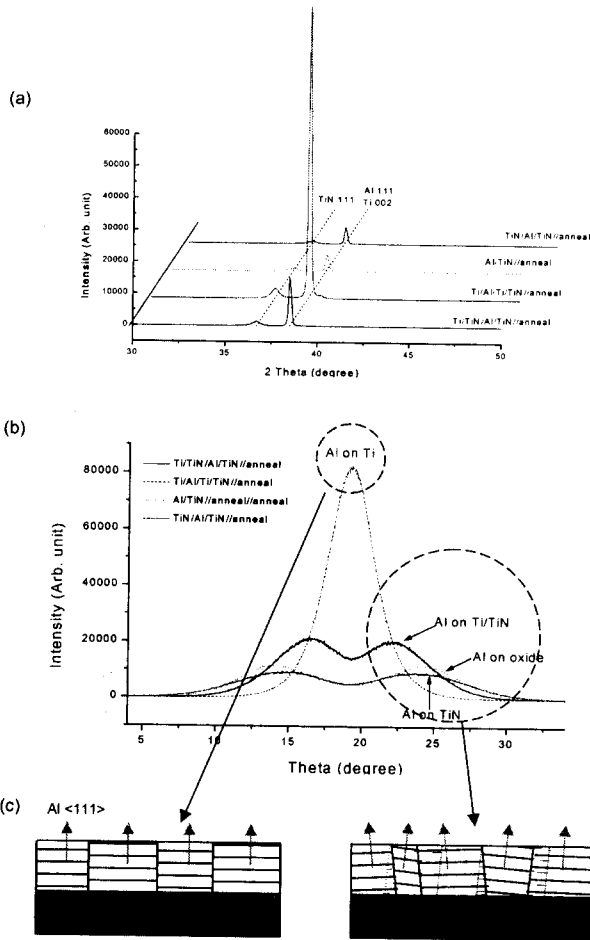


Fig. 1. (a) XRD  $\theta$ - $2\theta$  scan and (b) rocking curve of Al on various underlayer; (c) schematics of Al microstructure showing that underlayer affects the orientation of Al grains. All layers were deposited by sputtering, and the thicknesses of Ti, TiN and Al were fixed at 100, 10 and 500 nm, respectively.

간단하고 비파괴적으로 in-line monitor하는데 이용되고 있는데, 이는 대개의 경우 박막표면의 거칠기가 작을수록, 배향성이 좋을수록 반사율이 높기 때문이다. Metal film stack의 면저항은 4-point probe를 이용하여 측정하였고, Al의 배향성 분석을 위해 X-ray diffraction ( $\theta$ - $2\theta$  scan, rocking curve)을 이용하였다.

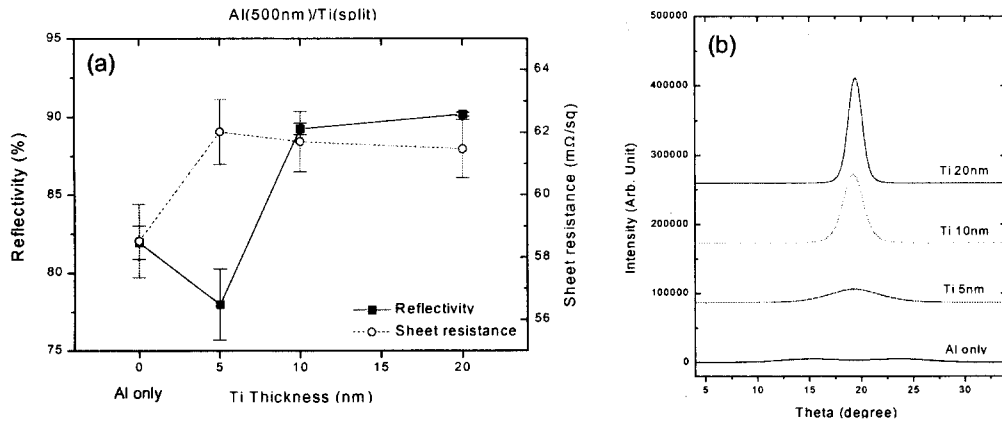


Fig. 2. (a) Reflectance, sheet resistance, and (b) XRD Al <111> rocking curve of Al/Ti as a function of Ti thickness. The thickness of Al was fixed at 500nm.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. Underlayer에 따른 Al의 특성변화

먼저, 대략적인 경향을 파악하기 위해 oxide, Ti, TiN, 그리고 Ti/TiN 위에 Al을 증착하고 XRD 분석을 통해 Al 박막의 배향성을 조사하였는데, 그 결과를 그림 1에 나타내었다. 이때 Ti 및 TiN의 두께는 10 nm로, Al 두께는 500nm으로 고정하였다. 그림 1 (a)에서 볼 수 있듯이 oxide, Ti, TiN, Ti/TiN의 모든 underlayer 위에서 Al 박막은 <111> 방향으로 배향되었고, Al <111> peak의 크기는 Ti >> Ti/TiN > TiN~oxide의 순이었다. (b)의 rocking curve에서는 특이한 점이 관찰되었는데, Ti underlayer의 경우를 제외하고는 모두 두 개의 peak이 나타난 것이다. 이는 (c)에 나타난 것과 같이 Al <111> 결정면에 수직인 방향이 wafer 표면에 수직인 방향과 일치하지 않고 약 5-6° 가량 tilt된 결정립들이 많기 때문으로 볼 수 있으며, 이 때문에 (a)의  $\theta$ - $2\theta$  scan에서도 Al <111> peak의 크기가 작게 나타난 것으로 판단된다.

앞에서 기술한 바와 같이 Al 박막의 배향성은 electromigration 저항성과 밀접한 관련이 있다.<sup>8~10)</sup> Al 결정립 사이의 각도에 따라서 결정립계를 통한 원자의 확산 내지는 electromigration 속도가 결정되므로 결정립들이 일정한 방향으로 배열되어 있으면 결정립계를 통한 확산속도도 작아지고 확산속도의 divergence 역시 작아지게 되어 electromigration 저항성이 향상된다. 따라서, rocking curve가 두 개의 peak으로 나타나는 현상은 electromigration 저항성 측면에서 치명적일 것으로 예상되며, TiN (10nm)이나 Ti (10nm)/TiN (10nm)은 Al의 underlayer로 적합하지 않을 것으로 판단되었다.

Sputtering법에 의해 증착되는 Ti 및 Ti/TiN underlayer에 대해서 각 layer의 두께를 변화시키면서 Al 박막의 반사율, 면저항 및 XRD pattern을 조사하여 그림 2부터 5까지에 나타내었다. 먼저, Al/Ti 구조에서 Ti underlayer의 두께를 변화시켰을 때 (그림 2)에는 Ti 두께 10nm 이상이면 반사율과 Al <111> 방향의 배향성이 우수한 것으로 나타났다. Ti 5nm의 경우에는 underlayer없이 oxide 위에 증착한 Al보다도 반사율이 나쁜 것으로 나타났

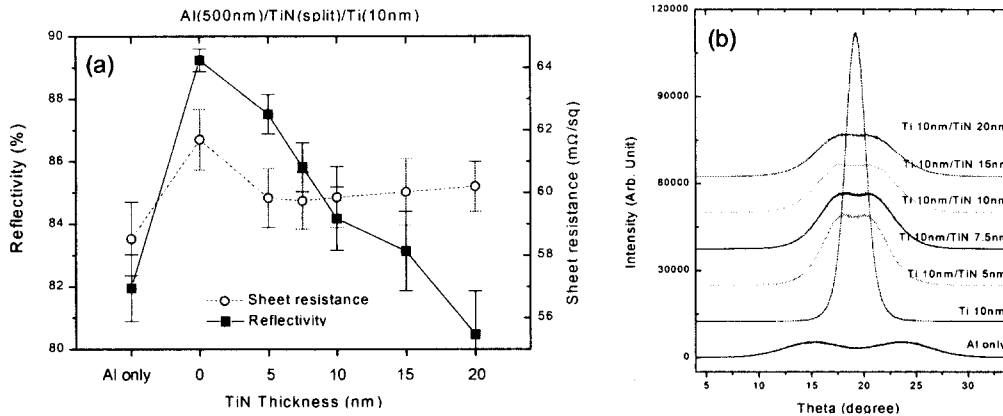


Fig. 3. (a) Reflectance, sheet resistance, and (b) XRD Al <111> rocking curve of Al/TiN/Ti as a function of TiN thickness. The thicknesses of Ti and Al were fixed at 10 and 500nm, respectively.

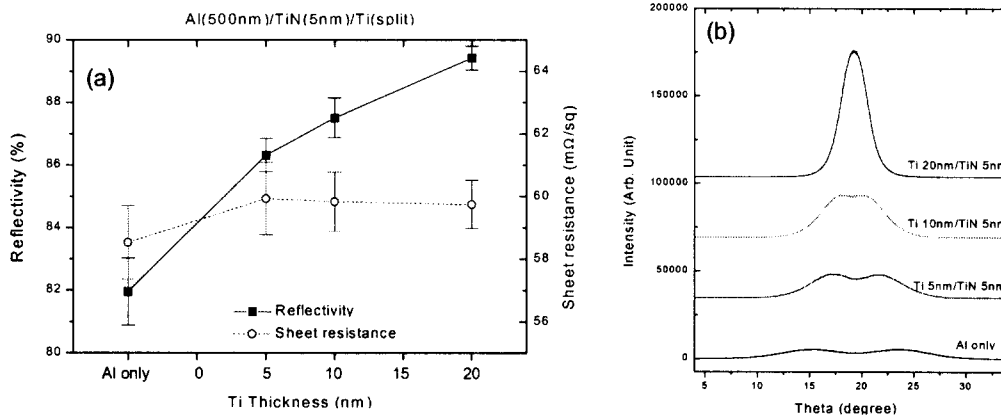


Fig. 4. (a) Reflectance, sheet resistance, and (b) XRD <111> rocking curve of Al/TiN/Ti as a function of Ti thickness. The thicknesses of TiN and Al were fixed at 5 and 500nm, respectively.

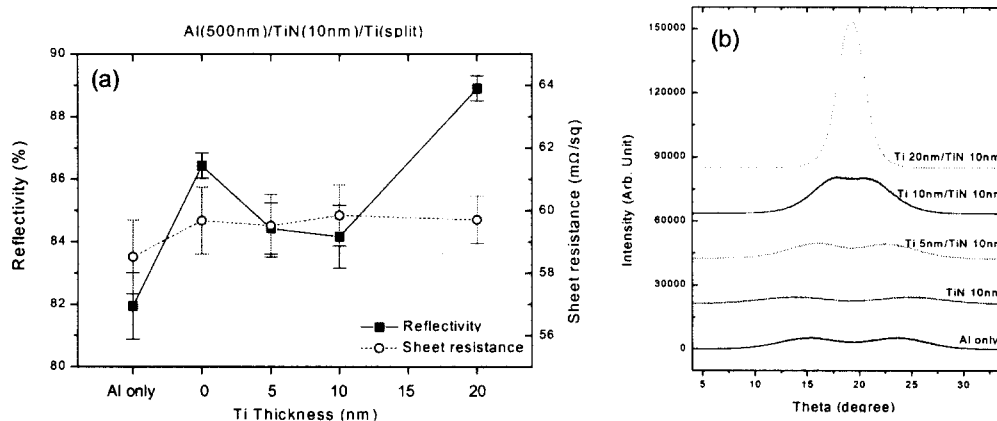


Fig. 5. (a) Reflectance, sheet resistance, and (b) XRD Al <111> rocking curve of Al/TiN/Ti as a function of Ti thickness. The thicknesses of TiN and Al were fixed at 10 and 500nm, respectively.

고, 배향성도 그다지 좋지 않았다. 따라서, underlayer로서 역할을 하기 위한 최소의 Ti 두께는 10nm로 판단된다. Ti underlayer 위에 증착한 Al은 Al-Ti 반응 때문에 underlayer가 없는 경우에 비해 면저항이 높았으나, Ti 두께 증가에 따라 면저항이 크게 증가하지는 않았다.

Al/TiN/Ti 구조에서 Ti 두께를 10nm으로 고정하고 TiN 두께를 변화시켰을 때 (그림 3)에는 TiN 두께가 증가할수록 반사율 및 배향성이 나빠지는 것으로 나타났다. 특

히, TiN 두께가 5nm로 비교적 얇은 경우에도 여전히 Al의 rocking curve는 두 개의 peak을 보여주고 있다. 면저항은 TiN 적용에 의해 감소하였다.

Al/TiN/Ti 구조에서 TiN 두께를 5nm으로 고정하고 Ti 두께를 변화시켰을 때 (그림 4)에는 Ti 두께가 증가할수록 반사율 및 배향성이 좋아지는 것으로 나타났다. 또한, Ti 두께가 5, 10nm일 때에는 rocking curve가 두 개의 peak을 보여주고 있으나, Ti 두께가 20 nm일 때는 TiN이 없을

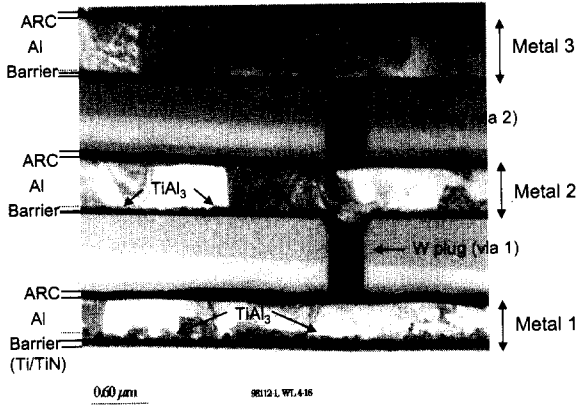


Fig. 6. Cross-sectional TEM micrograph of the typical 3-level metallization structure.

때와 마찬가지로 rocking curve가 한 개의 peak을 나타내었다. 따라서, Ti/TiN을 Al의 underlayer로 적용할 경우에는 Ti의 두께가 최소 20nm 이상이 되어야 함을 알 수 있다. 먼저 저항 측면에서는 underlayer가 없는 경우보다 약간 높은 값을 보였으나 Ti 두께에 따라서 크게 변화하지는 않았다. Al/TiN/Ti 구조에서 TiN 두께를 10nm으로 고정하고 Ti 두께를 변화시켰을 때 (그림 5)에도 Ti 5nm의 경우와 동일한 경향을 보였다.

이상으로부터 sputtering에 의해 제조된 Ti, TiN 및 Ti/TiN 중에서 TiN은 Al의 underlayer로 사용하기 곤란하고, Ti의 경우 Ti 두께가 최소 10nm 이상, Ti/TiN의 경우 Al의 배향성 측면에서 고려하면 Ti의 두께가 최소 20nm이 되어야 함을 알 수 있었다.

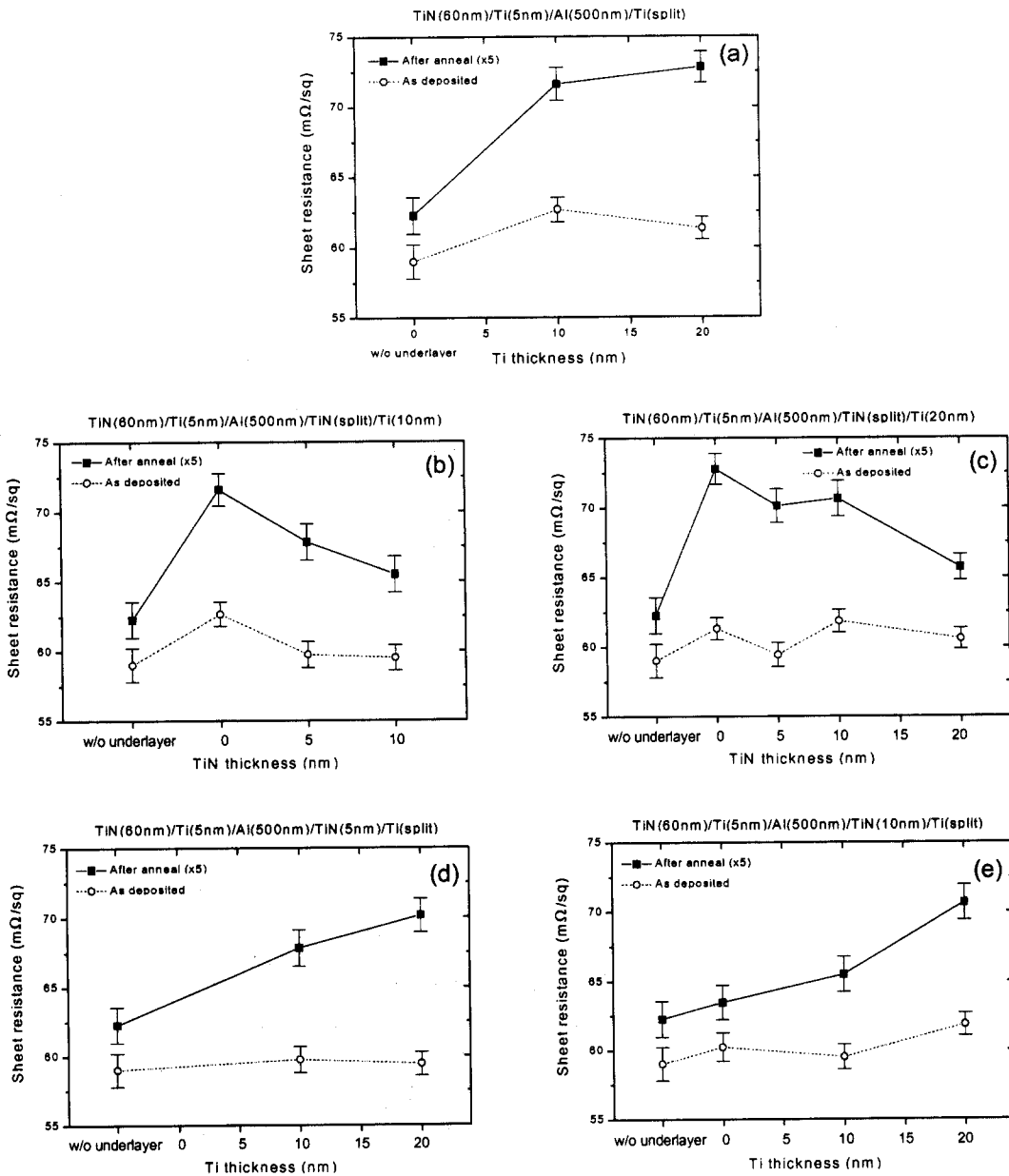


Fig. 7. Sheet resistance of Al/TiN/Ti thin film stack as a function of Ti or TiN layer thickness, as deposited and after annealing in an N<sub>2</sub> ambient at 400°C for 250min.

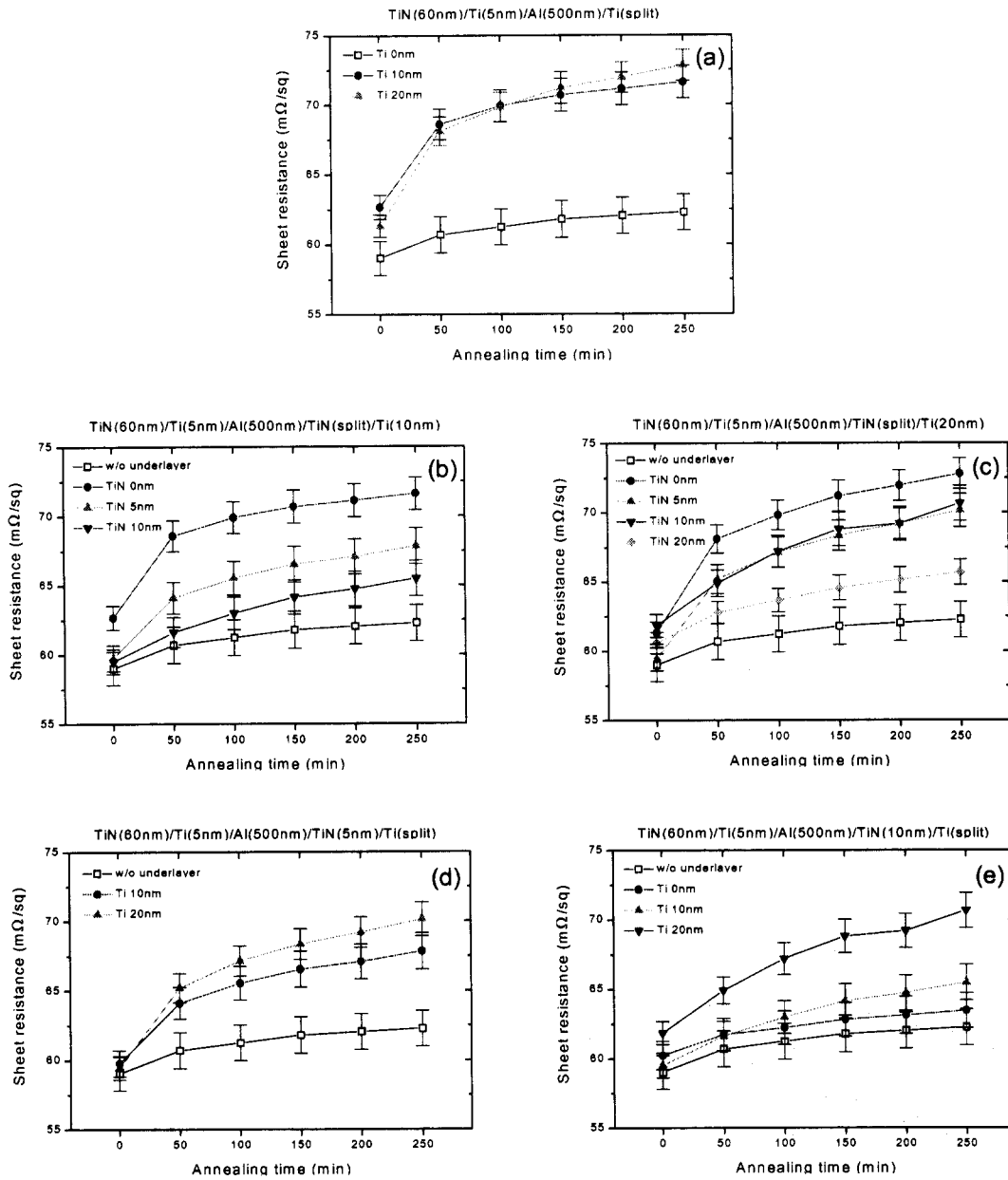


Fig. 8. Sheet resistance of Al/TiN/Ti thin film stack as a function of underlayer thickness and annealing time. The samples were annealed in an N<sub>2</sub> ambient at 400°C.

3.2. 열처리에 따른 metal thin film stack의 면저항 변화 앞에서 기술한 바와 같이 Ti를 underlayer로 사용한 경우에는 다층배선을 형성하는 과정에서 low level 배선에서 Al-Ti 반응이 일어나는 것이 문제점으로 지적되고 있다. 그림 6에 3층 배선의 단면 TEM 사진을 나타내었는데, 배선의 아래부분에 어둡게 나타나는 부분이 Al-Ti 반응에 의해 형성된 Al-Ti 층이다. 1층 배선에서 가장 두꺼운 Al-Ti 층이 형성되었으며, 윗층으로 갈수록 얇은 Al-Ti 층이 형성되었음을 볼 수 있다. Ti/TiN underlayer의 경우에는 TiN이 Ti와 Al사이에서 diffusion barrier로 작용할 것으로 기대되나, TiN의 두께가 얇은 경우에는 Ti-Al 반응을 효과적으로 막을 수 없을 것이다. 따라서, 본 연구에서는 Ti 및 Ti/TiN underlayer에 대해서 underlayer의 두께가

열처리에 의한 배선저항의 증가에 미치는 영향을 조사해 보고자 하였다. 그림 7에는 Ti 및 TiN 층의 두께를 변화시키면서 준비된 metal stack의 증착직후 상태 및 400°C, 250분 동안 열처리된 상태의 면저항 값을 비교해서 나타내었다. 전체적으로 보아, 증착직후 상태에서는 면저항 값이 큰 차이를 보이지 않고 있어서 경향이 뚜렷하지 않으나, 열처리 후에는 Ti 두께가 두꺼울수록(그림 7 (a), (d), (e)), TiN 두께가 얇을수록(그림 7 (b), (c)) metal stack의 면저항이 크게 증가하였다. Underlayer가 없는 경우에도 면저항이 증가한 것은 ARC Ti/TiN의 Ti 5nm와의 반응에 의한 것이다.

그림 3과 4에 의하면 Ti가 두꺼울수록 TiN이 얇을수록 배향성 및 반응율이 우수한 것으로 나타났으므로, 열처리

후의 배선저항과 배향성 및 반사율 사이에는 trade off 관계가 있음을 알 수 있었다. 특히, Ti/TiN 구조에서 우수한 배향성을 얻기 위해서는 Ti가 최소 20nm 이상이 되어야 하는데, 이 경우 TiN을 5nm, 10nm 적용하여도 배선저항은 크게 향상되지 않았다. (그림 7 (c)) 따라서, Ti/TiN을 underlayer로 쓰기 위해서는 Ti, TiN 각각 최소 20nm 씩을 적용하여야 하나, 이 경우 Al 배선의 단면적에서 underlayer가 차지하는 비율이 커지고 식각공정이 힘들어지는 문제점이 있어서 Ti 10nm만을 underlayer로 사용하는데 비해 큰 장점이 없는 것으로 사료된다.

그림 8에는 열처리 시간에 따른 여러 가지 metal stack의 면저항 변화를 나타내었다. 열처리 시간이 증가함에 따라서 면저항이 saturation됨이 없이 계속 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 다층배선에서 저층일수록 배선저항이 높게 나타나는 것과 잘 일치하는 결과이다. Ti만을 적용하거나 TiN이 얇을 때에는 열처리 초기에 면저항이 급격하게 증가한 다음, 열처리를 계속 실시함에 따라서 점차 증가하는 경향을 보였다. (그림 8 (a), (d)) 이는 Al-Ti 반응속도가 Si 위에서의 열산화막의 성장<sup>20)</sup>과 마찬가지로 열처리 초기에는 Al-Ti 반응에 의해 제한되나 (reaction controlled) 일정시간이 지난 후부터는 TiAl<sub>3</sub>를 통한 Al 또는 Ti의 확산 속도에 의해 제한됨을 (diffusion controlled) 보여준다.<sup>21)</sup> 한편, TiN이 20nm인 경우에는 열처리 초기에도 면저항이 급격하게 증가하지 않았고, ARC에 의한 면저항 증가를 제외한다면 underlayer에 의한 면저항 증가는 비교적 적은 것으로 판단된다. (그림 8 (c)) 그림 8 (e)에서 볼 수 있듯이 TiN만을 underlayer로 적용한 경우에는 면저항 증가가 underlayer가 없는 경우와 차이 없으므로, Ti/TiN underlayer에 의한 면저항 증가는 TiN을 통한 Ti 또는 Al의 상호확산 및 반응에 의한 것으로 판단되며, TiN이 20nm이 되어야 Al과 Ti 사이의 효과적인 확산방지막로서 작용함을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

Ti만을 Al의 underlayer로 사용한 경우 underlayer를 사용하지 않은 경우에 비해 우수한 Al <111> 배향성을 나타내었고, 후속열처리 과정에서 TiAl<sub>3</sub>가 형성되어 Al배선의 면저항이 급격히 상승하였다. Sputtered Ti/TiN underlayer의 경우, Ti가 두꺼울수록, TiN이 얇을수록 Al의 배향성과 반사율은 우수해지나 열처리후 저항은 나빠지는 경향을 보여서 배향성과 열처리후 저항 사이에 trade-off가 있음을 알 수 있었다. Al의 배향성을 확보하기 위한 Ti의 최소두께는 20nm이었고, 열처리후 저항증가를 억제할 수 있는 TiN의 최소두께는 20nm이었다. 열처리시간에 따른 저항변화로부터 Al-Ti 반응속도가 초기에는 Al-Ti 반응에 의해 제한되나 약 50분 이후에는 TiAl<sub>3</sub>를 통한 Al 또는 Ti의 확산에 의해 제한됨을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. H. B. Bakoglu, IEEE Trans. Electron Devices **32**, 903 (1985).
2. J. E. Sanchez, Jr., J. W. Morris, Jr., and J. R. Lloyd, JOM September, 41 (1990).
3. H. Okabayashi, Mater. Sci. Eng., **11**, 191 (1993).
4. D. P. Tracy, D. B. Knorr and K. P. Rodbell, J. Appl. Phys. **76**, 2671 (1994).
5. J. M. E. Harper and K. P. Rodbell, J. Vac. Sci. Technol. B **15**, 763 (1997).
6. D. B. Knorr, S. M. Merchant, M. A. Biberger, J. Vac. Sci. Technol. B **16**, 2734 (1998).
7. D. B. Knorr, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. **309**, 75 (1993).
8. S. Vaidya and A. K. Sinha, Thin Solid Films **75**, 253 (1981).
9. D. B. Knorr, D. P. Tracy, and K. P. Rodbell, Appl. Phys. Lett. **59**, 3241 (1991).
10. D. B. Knorr and K. P. Rodbell, J. Appl. Phys. **79**, 2409 (1996).
11. J. L. Hurd, K. P. Rodbell, D. B. Knorr, and N. L. Koligman, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. **343**, 653 (1994).
12. W. C. Shih, A. Ghiti, K. S. Low, A. L. Greer, A. G. O'Neill, and J. F. Walker, Mater. Res. Soc. Symp. Proc. **428**, 249 (1996).
13. D. S. Gardner, T. L. Nichalka, K. C. Saraswat, T. R. Barbee, Jr., J. P. Macvittie, and J. D. Meindl, IEEE Trans. Electron Devices **32**, 174 (1985).
14. K. Hashimoto, K. Touchi, and H. Onoda, 32th IEEE/IRPS Conf. Proc., 185 (1994).
15. E. M. Atakov, J. Ling, J. Maziarz, A. Shepela, B. Miner, C. England, W. Harris, and D. Dunnell, 33rd IEEE/IRPS Conf. Proc., 342 (1996).
16. R. W. Bower, Appl. Phys. Lett. **23**, 99 (1973).
17. K.Y. Fu, H. Kawasaki, J. O. Olowolafe, and R.E. Pyle, Proc. SPIE **1805**, 263 (1993).
18. M. Kageyama, K. Hashimoto, and H. Onoda, 29th IEEE/IRPS Conf. Proc., 97 (1991).
19. K. Hinode and Y. Homma, 28th IEEE/IRPS Conf. Proc., 25 (1990).
20. B. E. Deal and A.S. Grove, J. Appl. Phys. **36**, 3770 (1965).
21. R. K. Nahar, N. M. Devashrayee, and W. S. Khokle, J. Vac. Sci. Technol. B **6**, 880 (1988).