

Ta/TaN 복합 다층 피막의 기계적 특성

강영권 · 이종무 · 최상욱
인하대학교 재료공학부

Mechanical Properties of Ta/TaN Multilayer

Young-kwon Kang, Chongmu Lee and S.W. Choi
School of Materials Science and Engineering, Inha University, Incheon 402-751

(1999년 4월 24일 받음, 1999년 6월 30일 최종수정본 받음)

초 록 Ta/TaN 다층피막구조는 경도는 떨어지지만 연성이 큰 Ta 막과 취성을 가지며 경도가 높은 TaN 막을 교대로 반복하여 만든 다층구조로서 경도와 연성의 장점이 잘 조화되어 높은 인성을 나타낼 것으로 기대된다. 본 연구에서는 고속도강 기판위에 Ta/TaN 복합다층피막과 compositional gradient Ta-TaN 막을 각각 반응성 스퍼터링에 의하여 증착하고 열처리에 따른 경도 및 접착성을 조사하였다.

N₂/Ar 유량비가 0.4일 때 결정성이 가장 우수한 TaN 막이 얻어지며, Ta/TaN 복합다층피막의 경도 및 스크래치 테스트 결과도 가장 우수하였다. 또한 Ta/TaN 복합다층피막 증착후의 어닐링 처리 시 어닐링 온도가 증가할수록 피막의 경도와 접착성이 악화되었으며, compositional modulation wavelength가 감소함에 따라 Ta/TaN 복합다층피막의 경도는 증가하지만 접착성은 wavelength에 대한 의존성이 약하게 나타났다. 그리고 compositional gradient Ta-TaN 막 증착후의 어닐링 처리 시 경도와 스크래치 테스트 값은 각각 200°C와 400°C에서 최대값을 나타내었다.

Abstract The Ta/TaN multilayer structure with repeating layers of a poly-crystalline Ta layer of high ductility and a TaN layer of high hardness is expected to exhibit toughness. This paper reports the results on the hardness and the adhesion strength of Ta/TaN multilayers and compositional gradient Ta-TaN¹ layers deposited on the high speed steel substrate by reactive sputtering as a function of annealing temperature.

The TaN film deposited with the N₂/Ar ratio of 0.4 in the reactive sputtering process exhibits the highest crystallinity, and the highest hardness and the results of scratch test of the Ta/TaN multilayers. The hardness and adhesion strength of the Ta/TaN multilayers becomes deteriorated with increasing the annealing temperature in the heat treatment right after depositing the layers. Therefore, post-annealing treatments are not desirable in the case of the Ta/TaN multilayers from the standpoint of mechanical properties. Also the hardness of Ta/TaN multilayers increases with decreasing the compositional modulation wavelength, but the adhesion property of the layers is nearly independent of the wavelength. On the other hand, the compositional gradient Ta-TaN film exhibits the highest hardness and the value of scratch test for the post-annealing temperatures of 200°C and 400°C, respectively. This tendency of the compositional gradient Ta-TaN films differs from that of the Ta/TaN multilayers.

1. 서 론

고속도강은 비교적 낮은 오스테나이트화 온도에서 경화되기 때문에, 지나친 가열로 인한 결정립의 성장은 일어나지 않는다. 따라서 절삭기, 공구, 금형 다이 등에 많이 사용되고 있다.¹⁾ 한편, 절삭 공구의 성능과 수명을 향상시키기 위해 공구 표면에 보호 피막을 코팅하는 방법에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며, 일부는 실용화 단계에 있다.²⁾ 높은 경도, 내마모성, 윤활 성능 등의 특성을 가진 경질피막은 절삭공구와 같은 마모 부품의 마찰, 마모특성을 향상시키기 위한 내마모 윤활, 보호코팅의 용도로 이용되고 있다. 경질피막 재료로서는 높은 용점과 경도를 가지며, 화학적 성질도 비교적 안정한 천이금속 질화물에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 최근에는 코팅층의 기계적 성질을 향상시

키기 위하여 그들의 혼합물이나 다층박막법 등이 많이 이용되고 있다.³⁻⁶⁾ 다층의 경질피막은, 단일층의 경질피막에 비해, 내마모 특성이 더 우수한 것으로 보고된 바 있다.^{7,8)} 다층박막은 표면에서의 높은 경도와 인성, 피삭재와의 약한 접착력과 모재-박막층간의 계면에서 좋은 밀착성을 얻고자 할 때 가장 좋은 절충안이라고 할 수 있겠다. 그 중 다결정질 다층피막구조는, 금속/질화물과 같이, 경도는 떨어지나 연성을 가진 재료(금속)의 막과 취성을 가지며 경도가 높은 재료(질화물)의 막을 교대로 반복하여 만든 다층구조로서 경도와 연성의 장점이 잘 조화되어 높은 인성을 얻을 수 있으며, 금속이 모재와 질화물의 중간층 역할을 하여 우수한 밀착성을 가질 수 있다.⁹⁾ 지금까지 연구결과가 보고된 예로는 Ti/TiN,¹⁰⁾ Hf/HfN,¹¹⁾ W/WN,¹¹⁾ Ti/BN¹²⁾ 등이 있으며, Ta/TaN 다층피막에 관한 연구와 응용은 상대적으

Table 1. Chemical composition of SKH 9.

SKH 9	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	W	V
	0.80/0.90	≤0.4	≤0.4	≤0.03	≤0.03	3.80/4.50	4.50/5.50	5.50/6.70	1.60/2.20

(wt. %)

로 적은 편이다.

TaN은 경도가 높기 때문에 인성만 개선된다면 내마모성 경질막 재료로 유력하게 사용될 수 있을 것이다. Ta/TaN 복합구조는 Ta의 연성이 TaN의 취약한 특성을 보완하여 TaN에 비해 훨씬 더 우수한 인성을 나타낼 것으로 기대된다. 이러한 배경에서 본 연구에서는 반응성 스퍼터링법에 의한 Ta/TaN 복합다층피막 증착 시, 증착공정 조건과 층 두께(compositional modulation wavelength)가 전체 경질막층의 경도와 연성등의 기계적 특성에 미치는 효과에 관하여 조사하였다.

2. 실험 방법

SKH 9의 고속도강(표 1)을 레이저로 잘라서 20 mm × 20 mm × 2 mm 크기의 시편들을 만들었다. 코팅 전에 시편의 표면 산화를 최소화하기 위하여 경화 열처리를 실시하였다. 이 열처리는 560°C에서 6분간 예열한 다음 850°C에서 18분간 경화시키고, 이어서 180°C에서 1시간동안 tension 어닐링 처리하였다. 이 시편들을 기계적으로 연마한 다음, 1 μm 다이아몬드 페이스트를 사용하여 표면을 매끄럽게 하였다. 그리고, 시편 표면의 유기 오염물질을 제거하기 위하여 아세톤과 트리클로로에틸렌을 사용하여 각각 10분간 초음파 세정을 하였다. 또한, 스퍼터 챔버 내에서 10분간 Ar 스퍼터 에칭을 실시하여 기판 표면을 한번 더 세정하였다. 스퍼터 장비내의 진공도는 로터리 펌프와 터보 분자펌프를 사용하여 10⁻⁶ Torr 수준으로 유지하였으며, 공정 압력은 5 mTorr로 유지하였다. 또한, dc-power는 100 W였으며, 기판 회전 속도는 30 rpm으로 고정하였다.

Ta/TaN 복합다층피막의 증착은 질소 없이 아르곤 분위기에서 스퍼터링을 시작하여 먼저 Ta 막을 증착하고, 이어서 질소를 공급하여 반응성 스퍼터링을 실시하였다. 이 과정을 반복함으로써 층 두께가 500 nm 정도인 기판/Ta/TaN/Ta/TaN/... 복합다층피막을 얻었다. 이 때에 스퍼터링 공정조건과 시간을 조절함으로써 Ta와 TaN 층의 두께가 다른 여러 종류의 시편을 제작하였다. 그 밖의 중요한 공정 매개변수로는 질소와 아르곤의 유량비(F_{N_2}/F_{Ar})와 compositional modulation wavelength가 있는데, 이 둘은 여러 가지로 변화시켰다. 먼저 F_{N_2}/F_{Ar} 는 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5로, wavelength는 20 nm, 80 nm, 140 nm, 200 nm로 변화를 주었다.

한편, Ta/TaN의 compositional gradient 막은 질소 없이 먼저 스퍼터링을 시작하여 Ta 막을 증착한다. 이어서 스퍼터링을 중단하지 않고 계속하면서 mass flow controller를 조절하여 아르곤에 대한 질소의 유량비를 0.1로 바꾼다. 같은 요령으로 유량비를 0.2, 0.3으로 변화시켜 0.5까지 증가시킴으로써 Ta 완충층과 5종류의 TaN_x 막층을 얻

었다.

이상과 같은 방법으로 준비한 Ta/TaN 및 compositional gradient 막들이 증착된 시편들을 진공도가 10⁻⁶ Torr 수준인 진공 열처리기에 넣고 200°C, 400°C, 600°C, 800°C에서 2시간 동안 어닐링 처리를 하였다. 열처리가 끝난 시편들에 대해 고속도강 위에 생성된 Ta/TaN 복합막의 상 및 결정성을 알아보기 위해 XRD(X-ray diffraction) 분석을 하였으며, 경도와 밀착성을 알아보기 위하여 마이크로 비커스 경도와 스크래치 테스트를 각각 실시하였다. 또한, AES(Auger Electron Spectroscopy) depth profiling을 통해 박막 조성의 깊이 균일도 및 박막/기판 계면의 조성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

고속도강 표면에 증착된 Ta/TaN 복합다층피막에서 스퍼터링 공정에서의 질소/아르곤 유량비, 막 증착직후 어닐링 시의 열처리온도 및 Ta/TaN 복합층에서의 한 Ta+Ta_xN_y 층의 두께, 즉 compositional modulation wavelength의 변화에 따른 비커스 경도값을 그림 1에 나타내었다. 그림 1(a)에서 질소/아르곤 유량비가 증가함에 따라 Ta/TaN 복합다층피막의 경도도 증가하여 유량비가 0.4일 때 최대경도를 나타낸 다음, 유량비가 0.5로 증가함에 따라 경도값이 다시 저하되는 경향을 볼 수 있다. 이러한 경향의 원인은 그림 2의 X선 회절분석 결과로부터 쉽게 찾을 수 있다. 그림 2를 보면, 질소/아르곤 유량비가 0일 때에는 Ta 피크들만 나타남으로써 100% 순수한 Ta 막이 증착됨을 알 수 있다. 질소/아르곤 비가 0.1과 0.2인 경우에는 폭이 넓고 높이가 낮은 X선 회절피크가 1개만 나타남으로써 TaN_x에서 X<1인 nonstoichiometric 막이 형성되었음을 암시한다. 그러나 질소/아르곤 비가 0.3인 경우에는 폭이 비교적 넓고 높이가 낮은 TaN(111), TaN(200), TaN(220), TaN(311) 피크들이 모두 나타나 결정성이 약간 떨어지기는 하나 다결정 TaN 막이 증착되었음을 알 수 있다. 질소/아르곤 유량비가 0.4와 0.5인 경우에는 이 네 가지 TaN 피크들이 모두 예리하게 나타나 완전한 다결정질 TaN 막이 얻어졌음을 알 수 있다. 따라서 그림 1과 그림 2로부터 결정성이 가장 우수한 질소/아르곤 유량비 0.4에서 막의 경도도 최대가 된다고 결론 내릴 수 있다.

그림 1(b)는 질소와 아르곤의 유량비가 0.4, compositional modulation wavelength, λ는 20 nm 일 때의 열처리 온도에 따른 경도의 변화를 나타낸 것이다. 막의 경도는 막 증착 후의 열처리에 의하여 크게 좌우되며, 어닐링 온도의 증가에 따라 막의 경도가 급격히 떨어지는 것을 알 수 있다. 따라서, Ta/TaN 복합층의 경우에는 열처리를 하지 않는 편이 더 낫다고 할 수 있다. Ta의 산화반응에 대한

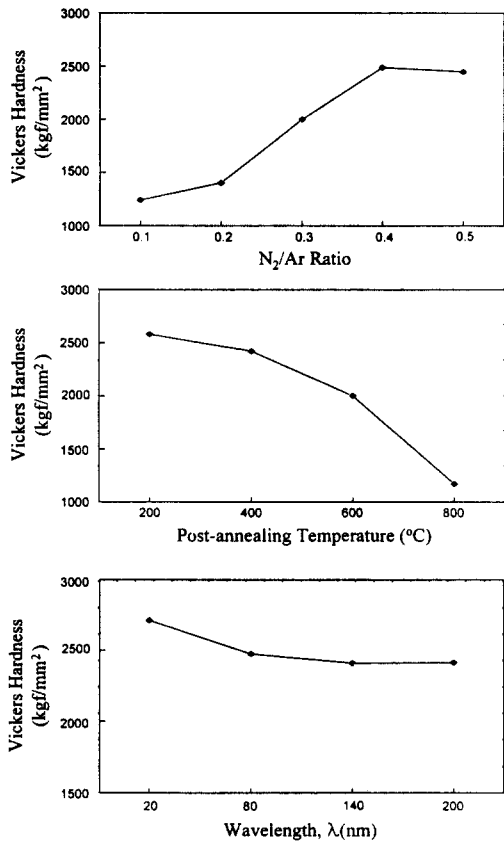


Fig. 1. Microhardness of the Ta/TaN composite multilayer as a function of (a) N₂/Ar flow ratio, (b) post-annealing temperature, and (c) compositional modulation wavelength of (Ta+TaN).

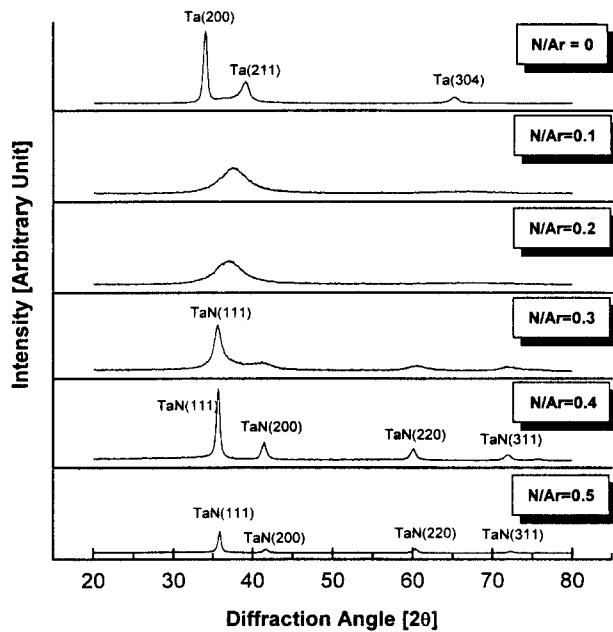


Fig. 2. XRD spectra for the TaN film as a function of N₂/Ar ratio.

298 K에서의 Gibb's free energy, ΔG° 는 -457 kcal/mole이다. 이는 Ti와 Zr에 대한 ΔG° 가 각각 -212 kcal/

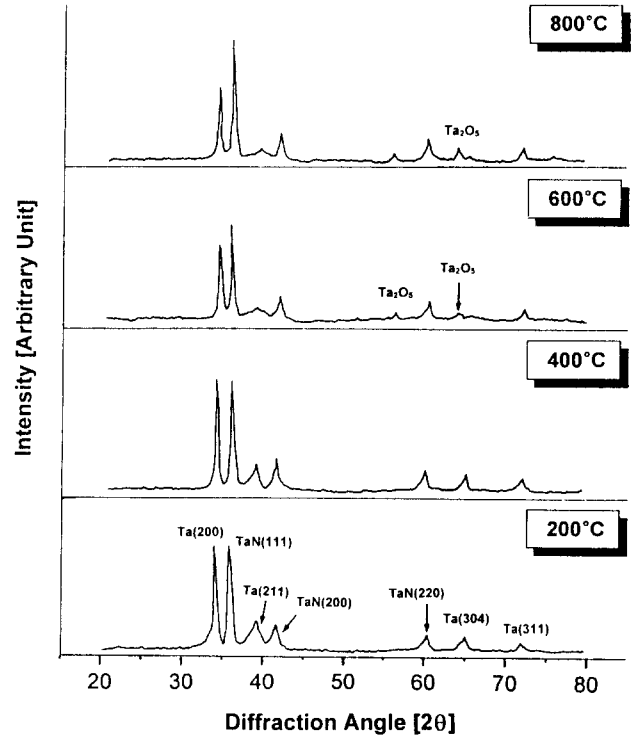


Fig. 3. XRD spectra for the Ta/TaN composite multilayer as a function of post-annealing temperature.

mole과 -249 kcal/mole인 것에 비추어 Ta의 산화성향이 얼마나 강한지를 보여준다. 따라서 Ta/TaN 복합층 시편을 열처리할 때 Ta와 TaN이 산화되며, 특히 Ta 층은 TaN 층보다 더 많이 산화될 것으로 사료된다. TaN 층의 Ta 원자들은 대부분 N 원자들과 결합을 이루고 있는 반면, Ta 층의 Ta 원자들은 인접한 Ta 원자들과 결합되어 있는데, Ta 층이 산화되려면 Ta-Ta 원자간 결합이 끊어져야 하며 TaN 층이 산화되기 위해서는 Ta-N 결합이 끊어져야 한다. Ta-Ta의 결합에너지(88 kcal/mole)가 Ta-N 결합에너지(146 kcal/mole)보다 더 작기 때문에 Ta-Ta 결합이 더 쉽게 끊어지므로 Ta 층이 더 잘 산화된다. 그림 3의 Ta/TaN 복합다층피막에 대한 X선 회절분석 결과를 보면, 어닐링 온도 200°C의 경우에는 Ta에 대한 주피크인 Ta(200) 피크와 TaN에 대한 주피크인 TaN(111) 피크의 높이가 비슷한 반면, 800°C에서는 Ta(200) 피크가 TaN(111) 피크보다 높이가 더 낮으며, 다른 Ta 회절피크인 Ta(211) 및 Ta(304) 피크도 TaN 피크들에 비해 상대적으로 높이가 더 낮음을 알 수 있다. 또한, Ta 피크들의 높이가 낮아짐과 더불어 새로운 Ta₂O₅ 피크가 나타났음도 알 수 있다. X선 회절 패턴에서의 이러한 변화는 고온에서 열처리할 때 TaN 층에 비해 Ta 층의 산화가 더 많이 일어난다는 증거이다.

어닐링처리에 따른 또 다른 한가지 변화는 질소원자들의 이동이다. 그림 4(a)-(c)의 AES depth profile을 보면, as-deposited 시편에서는 Ta 층과 TaN 층에서의 Ta 및 N의 농도차이가 뚜렷하다. Ta 층에서는 Ta의 농도가 절대적으로 높은 반면, TaN 층에서는 Ta의 농도와 N의 농도

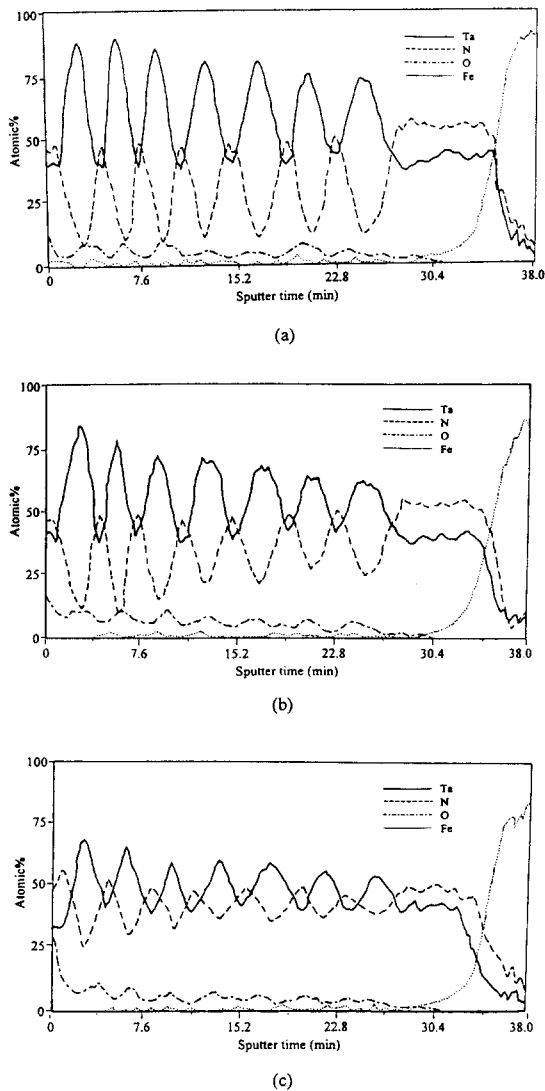


Fig. 4. Auger depth profiles of the Ta/TaN composite multilayer for various post-annealing temperatures : (a) as-deposited, (b) 600°C, and (c) 800°C

가 비슷하여 대체로 Ta : N = 1 : 1의 stoichiometric ratio를 갖는 조성을 갖고 있음을 알 수 있다. 그러나 어닐링 온도 600°C에서는 TaN 층 내의 질소원자들이 Ta 층 내로 확산이동하여 Ta 층 내에도 질소가 상당량 존재함을 알 수 있다. 이러한 변화는 800°C에서 더욱 심하게 나타나고 있는데, TaN 층 내의 질소가 Ta 층으로 다량 이동하여 TaN과 Ta 층간의 질소농도의 차이가 크게 줄어든 결과 전반적으로 Ta : N = 5.5 : 4.5 정도의 조성을 갖는 TaN 막이 형성되었다. 800°C에서 막의 경도가 200°C의 그것보다 훨씬 더 낮음을 볼 때 800°C 정도의 고온 어닐링 처리는 막의 경도를 저하시키고, 복합다층구조를 단층구조화 시킴으로써 원래 다결정질 복합다층피막의 목적인 인성의 개선에 역행하는 효과를 가져온다.

그림 1(c)는 compositional modulation wavelength, 즉 한 쌍의 Ta 층과 TaN 층의 두께 변화에 따른 경도의 변화를 보인 것이다. Wavelength가 20 nm인 경우에는 경

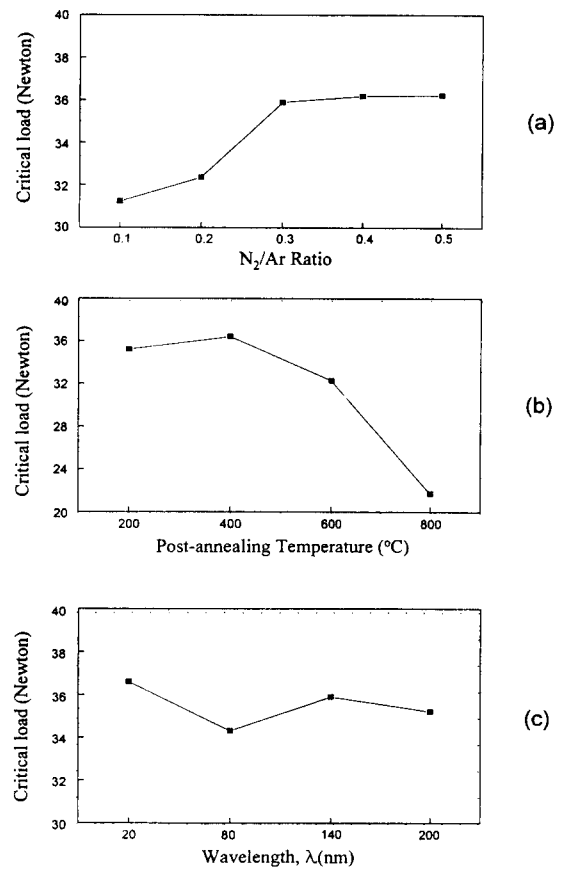


Fig. 5. Adhesion strength of the Ta/TaN composite multilayer as a function of (a) N₂/Ar flow ratio, (b) post-annealing temperature, and (c) compositional modulation wavelength of (Ta/TaN).

도가 2700 kgf/mm² 정도인 반면, wavelength를 80 nm로 증가시킴에 따라 경도가 2500 kgf/mm² 정도로 약간 감소한다. 그러나 wavelength를 140과 200 nm로 더욱 증가시킬 경우에는 경도가 거의 변하지 않는다. 이러한 경향은 compositional modulation wavelength, λ가 짧을수록 복합다층 피막의 경도가 더 높다는 일반적인 경향과 일치한다.¹¹⁾ Shih등의 보고에 의하면 Ti/TiN 복합다층피막의 경우, λ를 감소시킴에 따라 막의 경도가 증가하여 λ=9 nm 정도에서 경도값이 최대치를 나타내며, λ를 더욱 감소시킬 경우 경도가 오히려 감소한다고 한다.¹¹⁾

그림 5는 고속도강 표면에 증착된 Ta/TaN 복합다층피막의 접착강도를 스퍼터링 공정에서의 질소와 아르곤의 유량비, 막증착후의 어닐링 온도 및 Ta/TaN 복합층에서의 compositional modulation wavelength의 함수로 나타낸 것이다. 먼저 그림 5(a)에서 피막의 스크래치 테스트 값은 질소/아르곤 비가 증가함에 따라 대체로 증가하여 N₂/Ar = 0.4와 0.5에서 36 N 정도의 최대값을 보인다. 이것은 그림 2에서 보듯이 N₂/Ar 비가 0.4와 0.5에서 TaN의 결정성이 가장 우수한 데에 기인하는 것으로 생각된다.

그 다음, 그림 5(b)에서 막 증착후의 어닐링 온도가 증가함에 따라 막의 스크래치 테스트 값이 급격히 감소하는 경향을 보이는데, 이것은 그림 5(b)에서 본 막의 경도의 변화

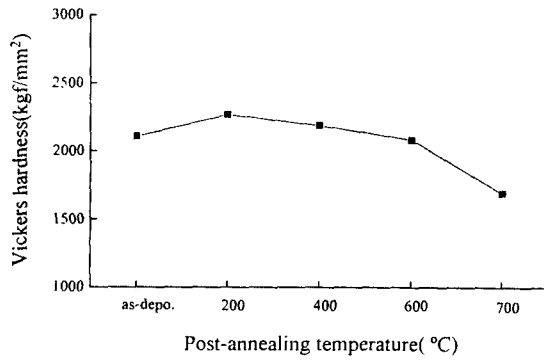


Fig. 6. Microhardness of the compositionally gradient Ta-TaN film as a function of post-annealing temperature.

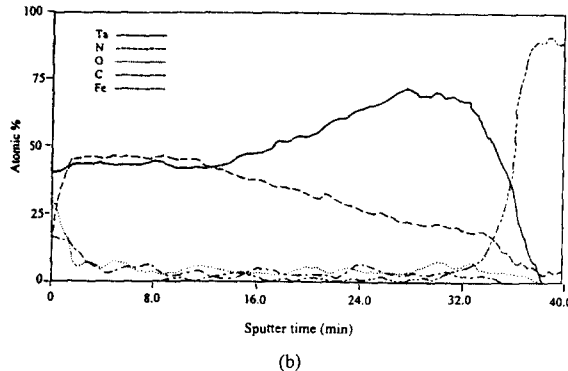
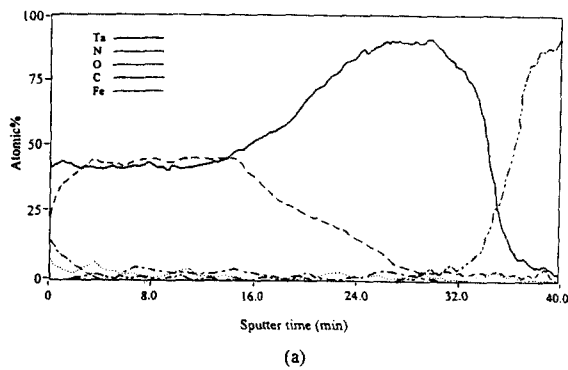


Fig. 7. Auger depth profiles of the compositionally gradient Ta-TaN film : (a) as-deposited, (b) annealed at 800°C.

와 매우 유사한 경향이다. 경도와 마찬가지로 접착강도 역시 열처리온도의 증가에 따라 Ta의 산화가 심화됨으로써 저하된 결과로 사료된다.

그림 5(c)에서는 wavelength λ 가 증가함에 따라서 스크래치 테스트 값이 약간 변하지만, 전체적으로 경향성이 없으며 실험오차를 $\pm 5\%$ 로 잡을 때 변화량이 실험오차의 범위를 벗어나지 못하는 것으로 보인다. 그림 5(c)의 data들은 모두 막 증착 후 400°C에서 post-annealing 처리한 시편들에 대한 것들이다. 따라서 이 어닐링 공정중 Ta/TaN 계면에서 TaN 층으로부터 Ta 층으로 질소원자들이 확산이동하여 Ta/TaN 계면이 rough해지게 되는데, λ 가 감소할 경우 Ta와 TaN 층이 더욱 빈번히 반복되어 전체 피막의 Ta/TaN 계면들에서 Ta와 TaN 층들간의 inter-

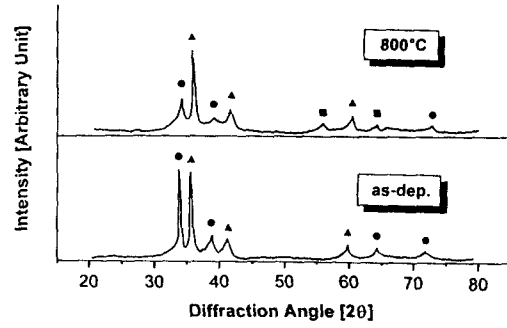


Fig. 8. XRD spectra for the compositionally gradient Ta-TaN film : (a) annealed at 800°C, and (b) as-deposited (● : Ta, ▲ : TaN, ■ : Ta₂O₅).

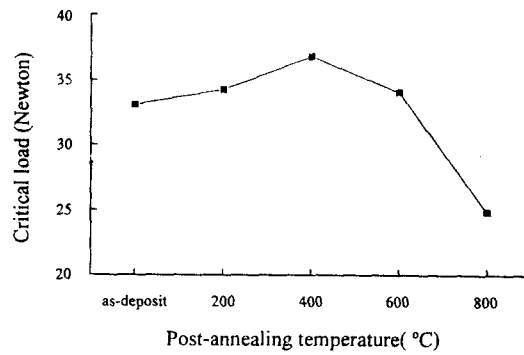


Fig. 9. Adhesion strength of the compositionally gradient Ta-TaN film as a function of post-annealing temperature.

locking 효과가 증대되고, 그 결과 Ta 층과 TaN 층간의 접착강도가 더 증가하게 된다. 그러므로 접착강도 측정을 위한 스크래치 테스트 시 Ta/TaN 계면에서가 아니라 Ta과 강(steel)기판간의 계면에서 buckling이 시작될 것이다. 그런데 피막/기판간의 계면에서의 접착성은 Ta/TaN modulation wavelength와 직접적인 관계가 없기 때문에 λ 의 증가에 따라 접착강도(critical load)가 별로 변하지 않은 것으로 생각된다.

또한, Ta-TaN compositional gradient 막의 경도는 그림 6에 보인 바와 같다. 어닐링 온도가 증가함에 따라 피막의 경도가 저하되는 경향은 앞의 Ta/TaN 복합다층피막의 경우와 같다. 그림 7(a)와 (b)의 AES depth profile에서 볼 수 있듯이 열처리에 의하여 TaN 층의 N 원자들이 Ta 층 내로 확산이동하게 된다. 그림 8의 XRD spectra에서 800°C에서 열처리한 후 Ta 피크들의 높이가 낮아지고 폭이 더 커진 것도 TaN 층의 질소원자들이 Ta 층으로 이동하여 Ta의 결정성이 저하된 것을 암시하는 분석결과이다. 이러한 질소원자들의 이동으로 인하여 TaN 층들 내에서 N/Ta의 농도비는 저하되지만 Ta 층 내에서의 N/Ta 농도비는 증가하게 되는데, 이러한 농도의 변화에 의하여 TaN 층들의 경도가 저하되는 효과보다는 Ta 층이 TaN 층으로 바뀔 때 따라 경도가 상승되는 효과가 더 큰 것으로 보인다. 이것이 바로 그림 6의 as-deposited 상태에서의 경도보다 200°C에서 어닐링 처리 했을 때의 경도가 더 높은 원인으로 판단된다. 그러나 어닐링 온도가 더욱 증가함에 따라 경

도가 뚜렷이 저하되고, 특히 800°C에서의 경도값이 낮은데, 그것은 질소원자의 확산으로 인하여 Ta 층이 TaN화됨으로써 전체피막의 경도가 향상되는 효과보다 피막이 산화됨으로써 경도가 저하되는 효과가 더 크기 때문인 것으로 생각된다. 앞에서 기술한 바와 같이 Ta의 산화경향이 매우 크기 때문에 미처 질소원자와 Ta-N 결합을 이루지 못한 Ta 원자들이 산소원자와 Ta-O 결합을 형성한다. 따라서 Ta(약 1600 kgf/mm²)이 경도가 낮은 Ta₂O₅(약 1000 kgf/mm²)화 하여 전체 피막의 경도를 낮추는 것이다. 그림 7(b)의 800°C에서의 산소농도가 그림 7(a)의 as-deposited에서의 산소농도보다 더 높으며, 특히 어닐링 처리한 시편에서 피막의 표면부와 Ta 층에 산소가 많이 분포하고 있는 것이 눈에 띈다. 이러한 경향은 그림 9의 어닐링 온도에 따른 스크래치 테스트 결과의 변화에서도 볼 수 있는데, 어닐링 온도가 400°C로 증가함에 따라 스크래치 테스트 값이 증가하는 것은 Ta 층과 고속도강 기판 계면에서 Ta와 Fe 간의 상호확산에 의하여 interlocking 효과가 증대되기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 어닐링 온도가 600°C 및 800°C로 계속 증가함에 따라 스크래치 테스트 값이 오히려 저하되는 것은 열처리 온도의 증가에 따른 interlocking 효과의 증대효과보다 Ta이 산화됨으로써 피막과 강 기판간의 접착성이 악화되는 효과가 더 크기 때문으로 보인다.

4. 결 론

고속도강(HSS) 기판 위에 Ta/TaN 복합다층피막과 compositional gradient Ta-TaN 막을 각각 반응성 스퍼터링법에 의하여 증착하고 열처리에 따른 경도 및 접착성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 질소/아르곤 유량비가 0.4일 때 결정성이 가장 우수한 TaN 막이 얻어지며, Ta/TaN 복합다층피막의 경도와 스크래치 테스트 결과도 가장 우수하다.
- 2) Ta/TaN 복합다층피막 증착후의 어닐링 처리 시 어닐링 온도가 증가할수록 피막의 경도가 저하하며 스크래치 테스트 값도 감소한다. 따라서 Ta/TaN 복합피막의 경우에

는 post-annealing 처리를 하지 않는 편이 더욱 우수한 기계적 특성을 나타낸다.

3) compositional modulation wavelength가 감소함에 따라 Ta/TaN 복합다층피막의 경도는 증가한다. 그러나 접착성은 wavelength에 대한 의존성이 약하다.

4) compositional gradient Ta-TaN 막 증착후의 어닐링 처리 시 경도와 스크래치 테스트 결과는 각각 200°C와 400°C에서 최대값을 갖는다. 이것은 Ta/TaN 복합다층피막의 경우와 다른 경향이다.

감사의 글

본 논문은 (1998년) 한국학술진흥재단의 대학부설 연구소 연구비에 의하여 지원되었으므로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. E. Horvath and A.J. Perry, *Wear*, **48** (1978) 217
2. J.E. Sundgren and H.T.G. Hentzel, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A4** (1986) 2259
3. J. S. Koehler, *Phys. Rev.*, **B2** (1970) 547
4. H. Holleck, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A4** (1986) 2661
5. J.M. Molarius, A.S. Korhonen, E. Harju and R. Lappaainen, *Surface and Coating Technol.*, **33** (1987) 117
6. O.A. Johansen, J.H. Dontje and R.L.D. Zenner, *Thin Solid Films*, **153** (1987) 75
7. W.D. Sproul, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A4** (1986) 2874
8. R.G. Duckworth, *Thin Solid Films*, **73** (1980) 275
9. J.H. Han and S.G. Oh, *Tech. paper*, (1991)
10. R.F. Huang, L.S. Wen, L.P. Guo, J. Gong and B.H. Yu, *Surface Coat. Technol.*, **50** (1992) 97
11. K.K. Shih and D.B. Dove, *Appl. Phys. Lett.*, **61** (1992) 654
12. M. Shinn, L. Hultman and S.A. Barnett, *J. Mater. Res.*, **7** (1992) 901