

Cu 박막과 SiO₂ 절연막사이의 TaN_x 박막의 접착 및 확산방지 특성

김용철 · 이도선 · 이원종*

KAIST 신소재공학과

Adhesion and Diffusion Barrier Properties of TaN_x Films between Cu and SiO₂

Yong-Chul Kim, Do-Seon LEE and Won-Jong Lee*

Department of Materials Science & Engineering, KAIST, Gusung-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-701, Republic of Korea

(2009년 4월 29일 접수: 2009년 7월 30일 게재확정)

초 록: 3차원 패키지용 고종횡비 TSV(through-Si via)를 이용한 배선 공정에서 via 충진을 위한 대표적인 방법중의 하나가 via 내부에 SiO₂ 절연막을 형성한 다음 sputtering법으로 접착/확산방지막 및 씨앗층을 형성하고 전해도금법으로 Cu를 충진하는 방법이다. 본 연구에서는 Cu 박막과 SiO₂ 절연막 사이에 reactive sputtering법으로 증착한 TaN_x 박막의 조성에 따른 접착특성 및 확산방지막특성을 연구하였다. TaN_x 박막의 질소함량에 따른 Cu 박막과 SiO₂ 절연막 사이의 접착력을 180° peel test와 topple test를 이용하여 정량적으로 측정하였다. TaN_x 박막 내 질소함량이 증가함에 따라 접착력은 더욱 증가하였는데, 이는 질소함량이 증가함에 따라 TaN_x 박막과 SiO₂ 절연막사이의 계면에서 계면반응물의 생성이 증가하였기 때문으로 해석된다. 고온에서 열처리를 통하여 Cu에 대한 확산방지막으로서의 특성을 조사한 결과, TaN_x 박막은 Ta 박막에 비하여 우수한 Cu에 대한 확산방지 특성을 보였으며 N/Ta 성분비 1.4까지는 TaN_x 박막 내 질소함량의 증가에 따라 확산방지특성도 향상되었다.

Abstract: Formation of an adhesion/barrier layer and a seed layer by sputtering techniques followed by electroplating has been one of the most widely used methods for the filling of through-Si via (TSV) with high aspect ratio for 3-D packaging. In this research, the adhesion and diffusion-barrier properties of the TaN_x film deposited by reactive sputtering were investigated. The adhesion strength between Cu film and SiO₂/Si substrate was quantitatively measured by 180° peel test and topple test as a function of the composition of the adhesive TaN_x film. As the nitrogen content increased in the adhesive TaN_x film, the adhesion strength between Cu and SiO₂/Si substrate increased, which was attributed to the increased formation of interfacial compound layer with the nitrogen flow rate. We also examined the diffusion-barrier properties of the TaN_x films against Cu diffusion and found that it was improved with increasing nitrogen content in the TaN_x film up to N/Ta ratio of 1.4.

Keywords: TSV, adhesion, diffusion barrier, TaN, Cu

1. 서 론

최근 전자제품들의 발전과 함께 고집적 패키지 기술이 요구되면서 TSV(through-Si via)를 배선으로 하는 3차원 적층 방법이 활발히 연구되고 있다.^{1,2)} TSV를 통하여 층간 연결길이를 최소화 할 수 있으며 보다 많은 input/output 수를 가능하게 하므로 전자제품의 고속, 소형화를 이룰 수 있다. TSV를 전도성이 좋은 물질로 완벽히 채우는 것은 3차원 패키지에 있어서 가장 중요한 핵심기술 중 하나이다. TSV의 충진방법은 크게 전해도금법과 화학기상증착법으로 나눌 수 있는데, 일반적으로 종횡비 10이하의 TSV는 경제성이 우수한 전해도금법으로 Cu 충진을 수행하고 있다. RIE(reactive ion etching)법으로 형성시킨 deep via에 SiO₂ 절연층을 형성시킨 다음 전해도금을 위

한 Cu 씨앗층을 증착 후 Cu 전해도금법으로 via를 채우게 된다. 그런데 Cu 씨앗층과 SiO₂ 절연막 사이의 접착력이 충분히 크지 않은 경우 전해도금법으로 via를 채우는 공정, CMP(chemical mechanical polishing)와 같은 후속 공정 또는 소자의 사용 중에 열적, 기계적 응력을 받아 Cu 박막의 탈락이 발생할 수 있다.

따라서 Cu 씨앗층과 SiO₂ 절연막 사이의 접착력을 향상시키기 위한 접착층이 필요하다. 또한 Cu 원자가 Si내로 확산되어 갈 경우 Cu 원자가 band gap 내에서 deep level dopant로 작용하여 소자의 특성을 저하시키기 때문에 Cu의 확산을 방지하기 위한 확산방지막의 사용이 요구된다. 이러한 확산방지막으로서 탄탈륨(Ta), 질화탄탈륨(TaN_x), 질화타이타늄(TiN_x) 등이 연구되고 있는데, 이중 질화탄탈륨(TaN_x)은 용점이 높은 내화성재료이며 재

*Corresponding author
E-mail: wjlee@kaist.ac.kr

료 내에서 Cu의 확산속도가 매우 느리므로 Cu의 확산방지막으로써 유망한 물질이다.³⁾

본 연구에서는 Cu 박막과 SiO₂/Si 기판 사이의 접착력을 증진시키고 Cu의 확산을 방지하기 위하여 TaN_x 박막을 증착층으로 도입하였다. Reactive sputtering 법에 의한 증착공정 중 질소의 부분압을 변화시켜 TaN_x 박막의 조성을 변화시켰으며, TaN_x 조성에 따른 접착 및 확산방지 특성의 변화를 연구하였다.

2. 실험방법

p-type(100) Si 기판에 두께 300 nm의 SiO₂ 절연막을 열산화법으로 형성시킨 후 TaN_x 박막을 reactive sputtering 법으로 증착하였다. TaN_x 박막 증착시 Ta 금속 타겟을 사용하였으며 증착압력은 1 mTorr로 유지하였고 증착기체는 Ar과 N₂를 사용하였다. N₂/(Ar+N₂) 유량비를 0~0.25로 변화시킴으로써 TaN_x 박막 내 질소함량을 조절하였다. 증착된 박막의 조성은 WDS(wavelength dispersion spectroscopy)로 분석하였으며 증착속도는 증착된 박막에 단차를 형성한 후 surface profiler로 박막의 두께를 측정하여 구하였다.

본 연구에서는 SiO₂/Si 기판에 증착된 Cu/TaN_x 박막의 접착력을 180° peel test와 topple test를 사용하여 정량적으로 측정하였다. Cu 박막과 SiO₂ 절연막 사이의 접착층으로써 두께 40 nm의 여러 조성을 갖는 TaN_x 박막을 SiO₂/Si 기판 위에 형성시켰다.

180° peel test는 측정 방법이 간단하여 널리 사용되고 있는 기계적 측정법으로서 기판에 접착되어 있는 박막을 기판과 180°를 이루면서 떼어 내는 방법이다. 이 때 peel strength는 기판으로부터 박막을 peeling시키는데 요구되는 힘 즉, peeling force에 의하여 결정된다. Peeling force는 peeling시키는 박막의 폭에 비례하므로, peel strength는 peeling force를 박막의 폭으로 나눈 값으로 정의되며 단위는 N/m 이다. Fig. 1에 180° peel test의 개략도와 실험결과 얻어진 전형적인 peel curve를 나타내었다. 180° peel test용 시편은 폭 17 mm의 길다란 SiO₂/Si 기판 위에 reactive sputtering법과 magnetron sputtering법으로 두께 40 nm의 TaN_x 박막과 두께 1.16 μm의 Cu 박막을 증착한 후, Cu 박막 위에 3M tape를 붙여서 제작하였다. Peel test는 이 3M tape를 180° 방향으로 잡아당겨서 Cu/TaN_x 박막을 SiO₂/Si 기판으로부터 박리시킴으로써 진행하였다. Peel test시 측정되는 peeling force는 박막과 기판 사이의 접착력을 이겨내어 박막을 기판으로부터 박리시키는데 필요한 힘과 박막을 소성변형시키는데 필요한 힘의 합이다. 이 때 peeling force에 미치는 박막의 소성변형의 영향을 줄이려면 가급적 박막의 두께를 감소시키는 것이 바람직하나, 박막의 두께가 너무 얇을 경우 작은 load에서도 쉽게 박막이 파열되어 접착력 측정이 어렵게 된다. 따라서 본 연구에서는 두께 62.5 μm의 3M plastic tape를 Cu/

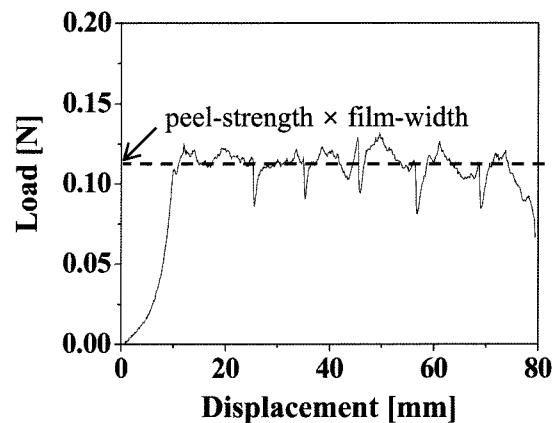
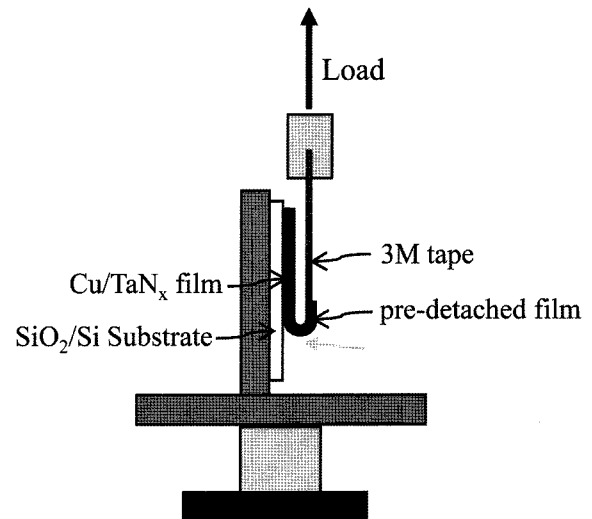


Fig. 1. A schematic diagram of the 180° peel test system and a typical peel curve.

TaN_x 박막 위에 붙여 peel test를 수행함으로써 박막의 소성변형에 따른 기여를 최소화시키면서도 박막이 파열되지 않도록 하였다. 기판에 Cu/TaN_x 박막을 증착하기 전 기판의 한 쪽 부분에 ink를 칠하여 Cu/TaN_x 박막의 일부를 미리 벗겨지게 함으로써 peel test시 grip을 용이하게 하였다. 각 조건마다 5개의 시편을 제작하였으며 최대하중 5 N의 load cell을 이용하여 1 mm/min의 loading rate 조건하에서 180° peel test를 수행하였다.

Topple test는 Butler⁴⁾에 의해 처음 제안된 방법으로서 금속기둥을 박막 위에 접착제로 붙인 후 시편 표면과 평행한 방향으로 금속기둥에 힘을 가하여 박막이 기판으로부터 박리시키는데 필요한 힘을 측정하는 방법이다.

Fig. 2에 Topple test의 개략도와 실험결과 얻어진 전형적인 topple curve를 나타내었다. Topple test시 접착력의 척도인 topple strength는 박막을 박리시키는데 필요한 최대 힘과 계면과 응력 point사이의 거리의 곱으로 표현되며 단위는 N·m가 된다. 이 방법은 pull test에 비하여 재현성이 우수하고 보다 작은 load로 측정 가능하다는 장점이 있다. Topple test용 시편은 20×20 mm² 크기의 SiO₂/Si 기판 위에 두께 40 nm의 TaN_x 박막과 두께 160 nm의 Cu 박

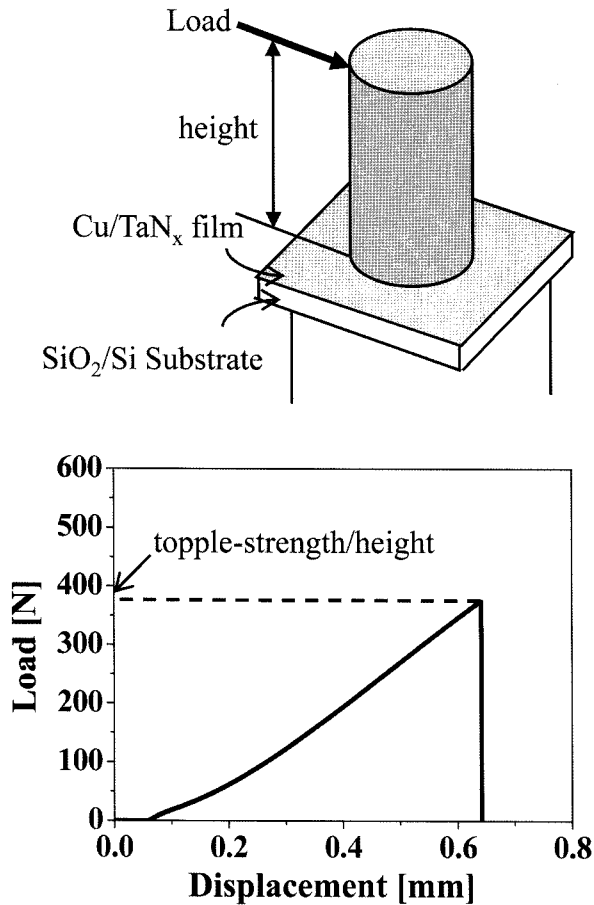


Fig. 2. A schematic diagram of the tople test system and a typical tople curve.

막을 연속증착한 후 박막윗면에 지름 15 mm의 원기둥형태의 금속기둥을 epoxy로 접착시켜 제작하였다. TaN_x 박막은 reactive sputtering법으로 체임버내의 질소 부분압을 조절하여 여러 가지 조성으로 증착하였으며, Cu 박막은 magnetron sputtering법으로 증착하였다. 각 조건마다 9개의 시편을 제작하였으며 최대하중 1000 N의 load cell을 이용하여 0.5 mm/min의 loading rate 조건하에서 tople test를 수행하였다. 모든 경우의 test시 TaN_x 박막과 SiO₂/Si 기판 사이에서 박리가 일어났다.

Reactive sputtering법으로 증착된 TaN_x 박막의 조성에 따른 Cu에 대한 확산방지막 특성을 조사하기 위해 Cu/TaN_x/SiO₂/Si 구조의 시편을 제작하였다. Reactive sputtering법으로 여러 조성의 TaN_x 박막을 30 nm의 두께로 증착한 다음 magnetron sputtering 법으로 두께 100 nm의 Cu 박막을 증착하였다. 증착된 시편에 대하여 진공로에서 800~1000°C의 온도범위에서 50°C 간격으로 1시간 동안 열처리를 해주었다. 열처리 후 확산방지막의 파괴로 인한 Cu-silicide 및 Ta-silicide의 형성 여부를 분석하기 위하여 XRD(X-ray diffraction)분석을 수행하였다. XRD분석은 tube voltage 40 kV, tube current 100 mA에서 20~50° 범위의 2θ 를 측정하여 분석하였으며, 이 때 scan 속도는 3°/min, 그리고 step size는 0.01° 이었다.

3. 결과 및 고찰

Ta 타겟을 이용하여 reactive sputtering법으로 N₂/(Ar+N₂) 유량비를 0~0.25로 변화시키며 TaN_x 박막을 증착하였다. 이 때 공정압력은 1mTorr로 일정하게 유지하였다. 증착된 TaN_x 박막에 대하여 단차를 형성시킨 후, surface profiler으로 두께를 측정하여 증착 속도를 구하였으며 그 결과를 Fig. 3(a)에 나타내었다. TaN_x 박막의 증착속도는 N₂ 유량이 증가함에 따라 점차 감소하였는데, N₂를 흘리지 않았을 경우에 비하여 N₂/(Ar+N₂) 유량비가 0.25일 때 증착속도는 34% 감소하였다. Fig. 3(b)에 WDS로 측정된 N₂/(Ar+N₂) 유량비에 따른 TaN_x 박막의 성분비(N/Ta composition ratio)를 나타내었다. N₂/(Ar+N₂) 유량비가 0에서 0.25로 증가함에 따라 TaN_x 박막 내의 N/Ta 성분비도 0에서 1.4까지 증가하였다. TaN_x 박막의 증착속도와 박막의 조성으로부터 N₂/(Ar+N₂) 유량비에 따른 박

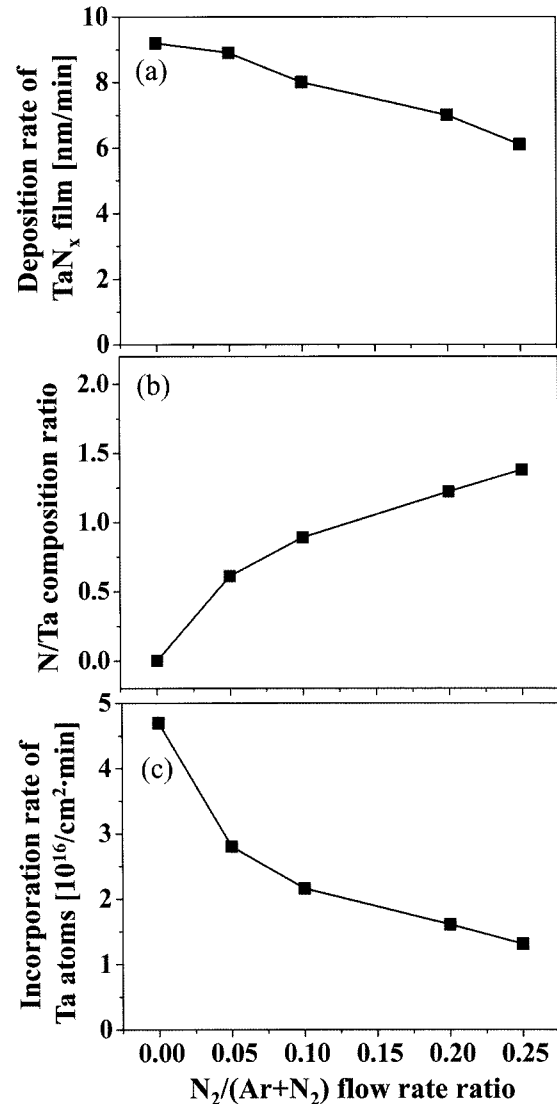


Fig. 3. (a) Deposition rate of TaN_x films, (b) N/Ta composition ratio in the deposited TaN_x films and (c) incorporation rate of Ta atoms into the TaN_x films for various N₂/(Ar+N₂) flow rate ratios in reactive sputtering.

막 내 Ta 원자의 함유속도를 계산하여 Fig. 3(c)에 나타내었다. $N_2/(Ar+N_2)$ 유량비가 0에서 0.25로 증가함에 따라 Ta 원자의 함유속도는 70% 이상 크게 감소하였다. 박막 내 Ta 원자의 함유속도는 Ta 타겟의 sputtering rate에 비례하므로, $N_2/(Ar+N_2)$ 유량비 증가에 따라 Ta 타겟의 sputtering rate가 크게 감소하였음을 알 수 있다. 이는 N_2 유량이 증가함에 따라 Ta 타겟 표면에 sputtering yield가 작은 질화탄탈륨막이 형성되는 poisoning 현상이 발생하였기 때문이다.

Reactive sputtering법으로 증착한 다양한 조성의 TaN_x 박막에 대하여 180° peel test로 접착력을 측정된 결과를 Fig. 4(a)에 나타내었다. Cu 박막과 SiO_2 절연막 사이에 두께 40 nm의 Ta 박막을 접착층으로 사용하는 경우의 180° peel test로 측정된 peel strength는 5.2 N/m이었다. 이는 접착층 없이 Cu 박막을 SiO_2/Si 기판 위에 직접 형성시켰을 경우의 peel strength, 3.6 N/m에 비하여 약 50% 향상된 값이다. TaN_x 박막 내 질소함량이 증가함에 따라 peel strength는 증가하였으며 N/Ta 조성비가 0.9인 $TaN_{0.9}$ 박막을 접착층으로 사용한 경우의 peel strength는 Ta 박막을 사용하였을 경우보다 약 60% 증가하였다. N/Ta 조성비가 1.2, 1.4인 $TaN_{1.2}$, $TaN_{1.4}$ 박막의 경우에는 TaN_x 박막과 SiO_2/Si 기판 사이의 접착력이 너무 커서 Cu/ TaN_x 박막이 peeling되는 대신 test 전에 미리 벗겨놓은 박막이 파열되어 정량적인 접착력 값을 측정할 수 없었다. Fig. 4(b)에

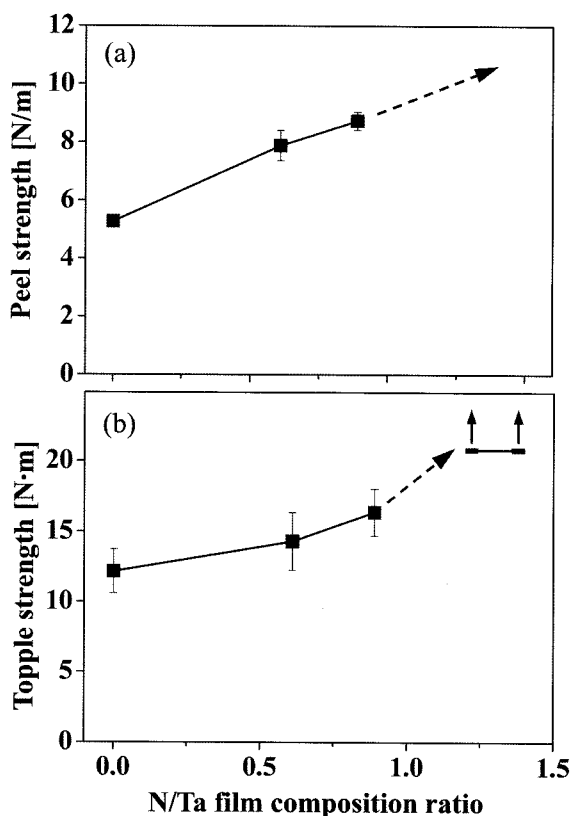


Fig. 4. Adhesion strength of Cu/ TaN_x film on SiO_2/Si substrate as a function of N/Ta composition ratio in TaN_x film: (a) 180° peel test, (b) Topple test.

N/Ta 조성비에 따른 topple test로 측정된 TaN_x 박막과 SiO_2/Si 기판 사이의 topple strength를 나타내었다. Ta 박막을 접착층으로 사용하는 경우의 topple strength는 12.2 N·m이었다. 이 값은 접착층 없이 Cu 박막을 SiO_2/Si 기판 위에 직접 형성시켰을 경우의 topple strength, 6.7 N·m에 비하여 약 2배 높은 값이다. Topple test에서 TaN_x 박막 내 질소함량에 따른 접착력 특성은 180° peel test의 결과와 비슷한 경향성을 보였다. TaN_x 박막 내 질소함량이 증가함에 따라 topple strength도 증가하였다. N/Ta 조성비가 0.9인 $TaN_{0.9}$ 박막을 접착층으로 사용한 경우의 topple strength는 Ta 박막을 접착층으로 사용한 경우보다 약 35% 증가하였다. N/Ta 조성비가 1.2, 1.4인 경우에는 topple test 수행 시 TaN_x 박막과 SiO_2/Si 기판 사이가 박리되는 대신 epoxy로 접착시킨 금속기둥과 Cu 박막 사이가 떨어져 TaN_x 박막과 SiO_2/Si 기판 사이의 정확한 접착력 값을 측정할 수 없었다. 이것은 TaN_x 박막과 SiO_2 절연막사이의 접착력이 접착제인 epoxy와 Cu 박막간의 접착력을 초과하게 되어 나타나는 현상이다. 금속기둥과 Cu 박막 사이의 접착제인 epoxy의 topple strength는 20.8 N·m이었다. 따라서 N/Ta 조성비가 1.2, 1.4인 $TaN_{1.2}$, $TaN_{1.4}$ 박막과 SiO_2 절연막 사이의 topple strength는 최소 20.8 N·m 이상임을 알 수 있다.

Ta 또는 TaN_x 박막을 접착층으로 도입함으로써 Cu 박막과 SiO_2/Si 기판 사이의 접착력을 증가시킬 수 있었다. 접착층으로써 Ta 박막보다는 TaN_x 박막이 더 우수한 특성을 나타내었으며 TaN_x 박막 내 N/Ta 조성비가 1.4까지 증가함에 따라 접착력도 증가하였다. 박막과 기판 사이의 접착력에 영향을 미치는 주요인자로는 기판의 morphology, 계면에서 원자간 결합에 따른 결합 세기 및 결합 수 등이 있다. 기판의 morphology가 거칠수록 접착력이 증가하는데 이는 기판과 증착되는 박막간 접촉면적이 증가하여 평탄한 박막에 비하여 계면에서 기판원자와 박막원자들 사이에서 많은 수의 원자 결합을 할 수 있기 때문이다.

본 연구에서 사용된 기판은 모두 동일한 SiO_2 절연막이며 박막증착은 같은 조건에서 조성만 다르게 하여 증착된 것이므로 기판의 morphology 변화는 없다고 봐도 무방하다. SiO_2 절연막위에 TaN_x 박막을 증착하는 경우 TaN_x 박막과 SiO_2 절연막사이의 계면에서 Si_3N_4 , Ta_2Si 나 Ta_2O_5 와 같은 계면반응물이 생성된다고 알려져 있다⁵⁾. 따라서 reactive sputtering법으로 질소분위기에서 TaN_x 박막을 증착할 때 N_2 유량증가에 따라 Cu/ TaN_x 박막과 SiO_2/Si 기판 사이의 계면에서 계면반응물의 형성이 증가하며, 이에 따라 접착력도 증가하는 것으로 해석된다.

Reactive sputtering법으로 증착된 TaN_x 박막의 Cu에 대한 확산방지 특성을 조사하기 위해 SiO_2/Si 기판 위에 $TaN_x(30\text{ nm})$, Cu(100 nm)를 차례로 증착한 후 진공로에서 $800\sim 1000^\circ\text{C}$ 의 온도범위에서 50°C 간격으로 1시간 동안 열처리를 수행하였다. 열처리한 시편들에 대한 XRD

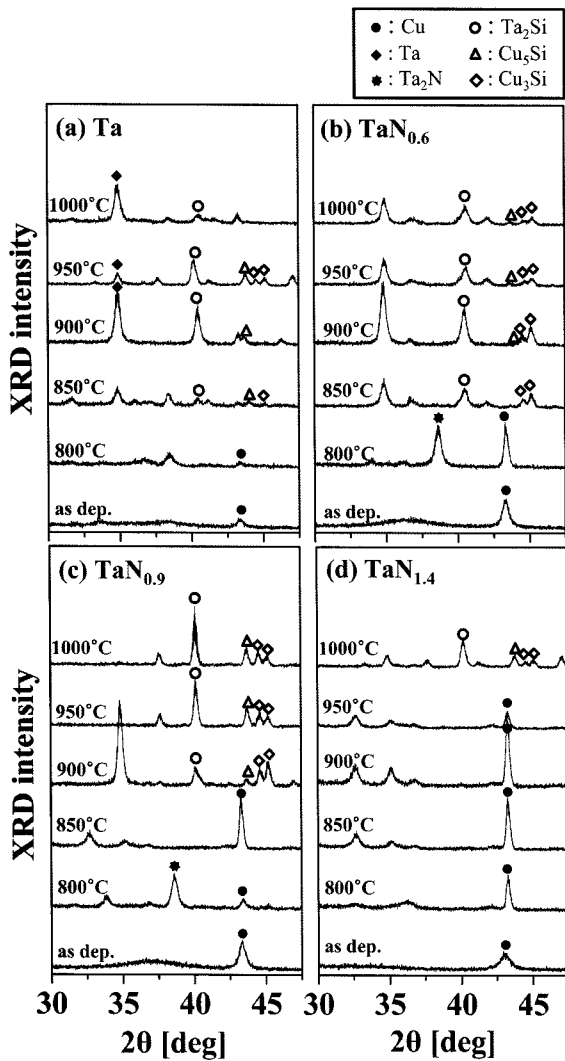


Fig. 5. XRD patterns of Cu/TaN_x films after annealing at various temperatures: (a)Ta, (b)Ta_{N0.6}, (c)Ta_{N0.9}, (d)Ta_{N1.4}

패턴을 Fig. 5에 나타내었다. 고온에서 확산방지막의 파괴는 확산방지막의 결정립계를 따라 Cu와 Si이 확산하여 Cu-silicide를 형성하거나 Ta과 Si이 반응하여 TaN 박막이 파괴됨으로써 일어나므로 XRD에서 이 silicide들의 peak이 관찰되는 것은 확산방지막이 파괴되었음을 의미한다. 질소함량이 증가함에 따라 Ta, Ta_{N0.6}, Ta_{N0.9}, Ta_{N1.4} 박막을 확산방지막으로 사용한 시편에서 Cu-silicide와 Ta-silicide가 각각 850, 850, 900, 1000°C에서 나타나기 시작하였다. 확산방지막의 파괴온도는 silicide가 형성되기 전후의 열처리 온도범위로 정의하였으며, TaN_x 박막 내 N/Ta 조성비에 따른 TaN_x 확산 방지막의 파괴온도를 Fig. 6에 나타내었다. N/Ta 조성비가 0일 때와 0.6일 때는 모두 800°C까지 안정한 특성을 보였고 N/Ta 조성비가 증가함에 따라 확산방지 특성이 향상되어 N/Ta 조성비가 1.4일 때 950°C까지 안정하여 가장 우수한 확산방지특성을 보였다. 확산방지막이 결정질인 경우 결정립계를 통하여 Cu 원자들이 쉽게 확산하는데 반하여 비정질인 경우 결정립계가 없기 때문에 우수한 확산방지특성을 보이게 된

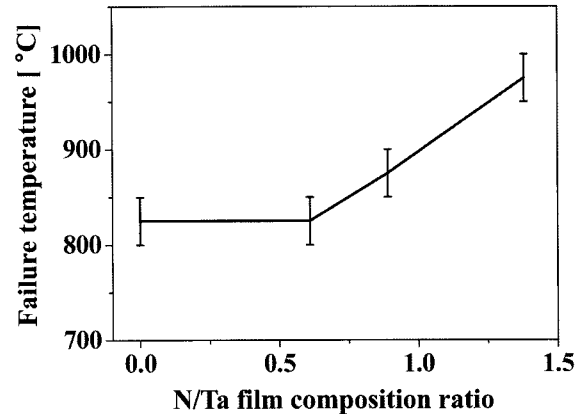


Fig. 6. The variation of the diffusion barrier failure temperature of TaN_x film with respect to the N/Ta composition ratio of the film.

다. Ta_{N0.6}, Ta_{N0.9} 박막의 경우 상온에서 비정질상으로 증착되었다가 열처리시 각각 850, 900°C에서 확산방지막이 파괴되었음을 알 수 있다.

이와 같이 TaN_x 박막이 Ta 박막보다 우수한 확산방지막 특성을 보이는 이유는 TaN_x 박막은 Ta 박막과 달리 높은 온도에서 결정화되는 비정질이기 때문이다. 박막 내 질소함량이 증가함에 따라 TaN_x 박막의 확산방지특성이 향상되는 것으로 나타났다. Reactive sputtering법으로 TaN_x 박막증착시 박막 내 질소함량이 증가함에 따라 차례로 Ta₂N과 TaN상의 형성비율이 증가하는 것으로 알려져 있다.^{6,7)} 본 연구에서 TaN_x 박막의 질소함량이 증가함에 따라 Cu에 대한 확산방지특성이 좋아지는 이유는 비정질 Ta₂N의 경우 800°C의 이하의 온도에서 결정화가 이루어지는 반면 TaN의 경우 그보다 높은 온도에서 결정화가 이루어지기 때문으로 해석된다.

4. 결 론

Cu 박막과 SiO₂ 절연막 사이에 reactive sputtering으로 증착한 TaN_x 박막의 조성에 따른 접착특성 및 확산방지막특성을 연구하였다. TaN_x 박막증착시 N₂/(Ar+N₂) 유량비가 0.25까지 증가함에 따라 Ta 타겟의 poisoning effect로 인하여 TaN_x 박막의 증착속도는 34%까지 감소하였으며, TaN_x 박막 내 N/Ta 조성비는 1.4까지 증가하였다. 180° peel test와 topple test를 이용하여 Cu/TaN_x 박막과 SiO₂/Si 기판 사이의 접착력을 정량적으로 측정하였다. Cu 박막의 SiO₂ 절연막에 대한 접착력은 Ta 박막을 접착층으로 사용하였을 경우가 Ta 박막이 없는 경우에 비하여 우수하였으며, TaN_x 박막을 접착층으로 사용한 경우가 Ta 박막보다 더욱 우수한 접착특성을 보였다.

TaN_x 박막 내 질소함량이 증가함에 따라 접착력이 증가하였는데 이는 TaN_x 박막과 SiO₂ 절연막사이의 계면에서 계면반응물의 생성이 증가하기 때문으로 해석된다. TaN_x 박막 내 N/Ta 조성비가 증가할수록 보다 우수한 확

산방지특성을 보였다. 이는 TaN_x 박막 내 질소함량이 높아짐에 따라 더 높은 온도에서 비정질상의 결정화가 이루어지기 때문으로 해석된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부가 주관하는 차세대성장동력기술개발사업의 지원으로 수행되었습니다.(Grant No. 1002909)

참고문헌

1. L. Schaper, S. Burkett, M. Gordon, L. Cai, Y. Liu, G. Jampana and I. U. Abhulimen, "Integrated System Development for 3-D VLSI", 57th Electronic Components and Technology Development, 853(2007)
2. J. U. Knickerbocker, P. S. Andy, L. P. Buchwalter, A. Deut-sch, R. R. Horton, K. A. Jenkins, Y. H. Kwark, G. McVicker, C. S. Patel, R. J. Polarstre, C. Schuster, A. Sharma, S. M. Sri-jayantha, C. W. Surovic, C. K. Tsang, B. C. Webb, S. L. Wright, E. J. Sprogis and B. Dang, "Development of Next-generation System-on-package Technology Based on Silicon Carriers with Fine-pitch Chip Interconnection", IBM J. Res. Develop., 49(4,5) 725(2005)
3. L. Jiang, P. He, G. He, X. Zong and C. Lee, "Copper Thermal Diffusion in TaN Films on Si Substrate", Jpn. J. Appl. Phys., 41, 6525(2002)
4. D.W. Butler, C.T.H. Stoddart and P. R. Stuart, "The Stylus or Scratch Method for Thin Film Adhesion Measurement: Some Observations and Comments", J. Phys. D, 3, 877(1970)
5. M. Lane, R.H. Dauskardt, N. Krishna and I. Hashim, "Adhesion and Reliability of Copper Interconnects with Ta and TaN Barrier Layers", J. Mater. Res., 15(1), 203(2000)
6. K. H. Min, K. C. Chun and K. B. Kim, "Comparative Study of Tantalum and Tantalum nitrides (Ta₂N and TaN) as a Diffusion Barrier for Cu Metallization", J. Vac. Sci. Technol. B, 14(5), 3263(1996)
7. T. Oku, E. Kawakami, M. Uekubo, K. Takahiro, S. Yamaguchi and M. Murakami, "Diffusion Barrier Property of TaN between Si and Cu", Appl. Surf. Sci., 99, 265(272)