

論文2000-37SD-6-6

ALE 법에 의한 TiN 박막의 증착 및 특성

(Deposition and Characteristics of TiN Thin Films by Atomic Layer Epitaxy)

金東填*, 鄭榮培*, 李明福*, 李正熙*, 李龍鉉*,
咸成鎬**, 李鍾華***(Dong-Jin Kim, Young-Bae Jung, Myung-Bok Lee, Jung-Hee Lee,
Yong-Hyun Lee, Sung-Ho Hahm, and Jong-Hwa Lee)

요 약

ALE(atomic layer epitaxy)법을 이용하여 (100)면의 Si 기판위에 TiN 박막을 증착하였다. 증착된 TiN 박막을 XRD, 4-point probe, AFM, AES, SEM 등의 장비를 사용하여 분석하였다. ALE법에 의한 TiN의 증착을 위한 반응 전구체(precursor)로는 TEMAT(tetrakis(ethylmethylamino)titanium)와 반응 가스로는 NH₃를 사용하였다. 표면 포화 반응을 형성하기 위해 각 반응 기체는 TEMAT-N₂-NH₃-N₂의 순서로 교대로 반응로에 주입하였다. 그 결과 TiN 박막은 150 ~ 220 °C에서 자기 제어 성장(self-limiting growth) 기구에 의한 박막 증착 특성을 보였다. 증착된 TiN 박막은 증착율이 4.5 Å/cycle로 일정하였고, 비정질(amorphous)의 구조를 보였다. 박막의 저항율과 표면 평균 거칠기는 210 ~ 230 μΩ·cm와 7.9 ~ 9.3 Å로 측정되었다. TiN 박막을 2000 Å의 두께로 증착하였을 때, 폭이 0.43 μm 이고 단차비(aspect ratio)가 6인 트렌치 구조에서 매우 우수한 단차피복성을 보였다.

Abstract

The TiN thin films were deposited by ALE(atomic layer epitaxy) on (100) silicon substrate. The TiN thin films were characterized by means of XRD, 4-point probe, AFM, AES and SEM. TEMAT(tetrakis(ethyl methyl amino)titanium) and NH₃ were used as precursor and as reaction gas for TiN film deposition by ALE. Reactants were injected into the reactor in sequence of TEMAT-N₂-NH₃-N₂ to ensure a saturated surface reaction. As a result, the deposition rate of the TiN film was controlled by self-limiting growth mechanism at temperature range from 150 to 220 °C. Deposited TiN films, all of which show amorphous structure, had a fixed deposition rate of 4.5 Å/cycle. The resistivity of 210 ~ 230 μΩ·cm and the surface r.m.s. roughness of 7.9 ~ 9.3 Å were measured. When TiN film of 2000 Å were deposited, a excellent step coverage were observed in a trench structure of 0.43 μm contacts with 6 : 1 aspect ratio.

* 正會員, 慶北大學校 電子·電氣工學部
(School of Electronic and Electrical Engineering,
Kyungpook National University)

** 正會員, 慶北大學校 센서 技術 研究所
(Sensor Technology Research Center, Kyungpook
National University)

*** 正會員, 피케이이株式會社 포토마스크 事業附屬 研究
所

(R & D Center, Photo mask Division, P.K LTD.)
接受日字:1999年8月9日, 수정완료일:2000年4月24日

I 서론

TiN 박막은 높은 경도, 우수한 전도성, 높은 용접, 열적·화학적 안정성으로 인하여 반도체 집적회로 공정에서 금속 배선에 대한 확산방지막으로 널리 이용되고 있다.^[1-3] 최근에는 차세대 집적회로에서 새로운 금속 배선 재료로 연구되고 있는 Cu에 대한 확산방지막으로도 우수한 것으로 보고되고 있다.^[4-6] TiN 박막을 증착하기 위해 CVD(chemical vapor deposition), PVD(physical vapor deposition), MOCVD(metal-organic chemical vapor deposition) 등의 방법이 사용되고 있다.[7,8] 최근에는 점차 미세화 되고 있는 콘택 홀(contact hole) 및 비아 홀(via hole) 구조에서 균일도와 단차피복성(step-coverage) 등이 우수한 ALE(atomic layer epitaxy)법을 이용하여 TiN 박막을 증착하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.^[9,10]

ALE 성장 기술은 표면 포화 현상에 의한 자기 제어 성장 기구(self-limiting growth mechanism)를 이용하는 기술로서 원자층 단위의 두께 조절이 가능한 성장 기술이다.^[11] 주입된 반응물들의 표면반응(surface reaction)에 의해 주로 성장이 이루어지는 CVD 방법과는 달리 ALE 기술은 기상 반응을 억제하여 표면 포화 반응(saturated surface reaction)에 의해서 성장이 일어나므로 1 주기당 1 ML(monolayer)이하의 박막이 성장된다.^[13] 이러한 ALE 박막 성장 기술은 표면의 굴곡이 큰 경우에도 매우 균일한 두께의 박막을 성장할 수 있으므로 표면 요철이 큰 구조를 가지는 미세 전자소자의 절연막과 보호막, 유전막, 확산방지막 등의 형성과 대면적에서 우수한 균일도를 필요로 하는 박막의 성장에 유리하다.^[12,13]

본 연구에서는 직접 제작한 ALE 박막 성장 장치를 이용하여 TiN 박막을 증착하고 그 특성을 분석하였다.

II. 실험 방법

ALE 방법으로 TiN 박막을 증착하기 위해 크기가 6 cm × 3 cm인 (100)면의 실리콘 기판을 사용하였다. 또한 전기적 특성의 측정을 위해서 실리콘 기판위에 RF 스퍼터링법으로 5000 Å의 SiO₂ 절연막을 증착한

후 TiN 박막을 증착하였다. TiN 박막을 증착하기 위해서 사용된 전구체(precursor)로는 TEMAT(tetakis(ethylmethylamino)titanium)와 반응 가스로는 NH₃(99.9995%)를 사용하였다. TEMAT는 TDMAT(tetakis(dim ethylamino)titanium)와 TDEAT(tetakis(diethylamino)titanium)의 장·단점을 보완한 재료로서 TDEAT보다는 높은 평형증기압을 가지고 있다.^[14] TEMAT는 항온조에서 65 °C로 유지하였고, 이때에 TEMAT의 평형증기압은 700 mTorr이었다.^[14] 또한 TEMAT가 가스 수송 라인에 응축되는 현상을 방지하기 위하여 가스 수송 라인을 65 °C이상으로 유지하였다. 수송 가스(carrier gas) 및 제거 가스(purging gas)는 고순도 질소(99.999%)를 사용하였다. TiN 박막의 증착시 반응로의 작업압력은 1 Torr를 유지하였으며, 각 반응가스는 TEMAT - N₂ - NH₃ - N₂의 순서로 교대로 반응로에 주입하였다. 표 1은 ALE 방법에 의한 TiN 박막의 증착 조건을 나타낸 것이다. 반응로로 주입되는 반응가스의 유량은 NH₃를 200 sccm으로 하고 TEMAT 수송 가스용 N₂를 100 sccm 그리고 제거 가스용 N₂를 200 sccm을 유지하였다.

표 1. TiN 박막 증착 조건

Table 1. The condition of TiN thin film deposition.

Substrate	Si(100), SiO ₂ (5000 Å)/Si(100)
Working pressure	1 Torr
Base pressure	10 mTorr
Deposition Temperature	150 ~ 240 °C
Flow rate	carrier gas(N ₂) : 100 sccm
	NH ₃ : 200 sccm
	purging gas(N ₂) : 200 sccm
Bubbler temperature	65 °C
pulse time	3~10s TEMAT / 5s N ₂ / 5~15s NH ₃ / 5s N ₂

그림 1은 TiN 박막을 성장시키기 위하여 본 연구실에서 직접 제작한 ALE 장치의 개략도이다. 각 반응가스의 순차적인 주입을 위해 뉴매틱 밸브와 솔레노이드 밸브를 PLC(programmable logic controller)를 이용하여 조절하였다. 안정된 가스 흐름(laminar flow)을 형성시키기 위해 반응로로 들어가는 가스 라인 이외에 별

도의 바이패스(bypass) 라인을 설치하였다. 또한 할로젠 램프를 이용한 RTP(rapid thermal process)방식으로 기판을 가열하기 위한 장치를 제작하였다.

증착온도를 150 °C에서 240 °C까지의 범위에서 10 °C 간격으로 변화시키며, TiN 박막의 특성을 관찰하였다. 증착된 TiN 박막의 결정성과 두께 측정을 위해 XRD를 사용하여 측정 및 분석하였다. 전기적 특성 분석을 위해서 4점 탐침기를 사용하였고 박막의 조성 및 산소 및 탄소의 함유량을 측정하기 위해 AES를 사용하였다. 표면 형상과 단차피복성 및 표면 거칠기의 관찰을 위해 SEM과 AFM(atomic force microscopy)을 이용하였다.

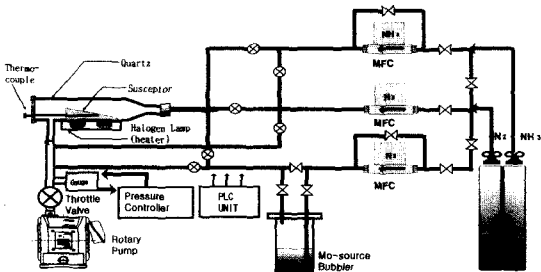


그림 1. ALE 장치의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of ALE system.

III. 결과 및 고찰

그림 2는 증착온도의 변화에 따른 한 주기당 증착율의 변화와 저항율의 변화를 나타내고 있다. TEMAT 수송 가스용 N₂를 100 sccm, 제거 가스용 N₂와 NH₃를 200 sccm으로 고정시켰다. 순차적인 펄스 주입 시간은 TEMAT 5초, 제거 가스용 N₂ 5초, NH₃를 5초로 유지하였다. 결과에서 나타나듯이 증착온도가 150 ~ 220 °C의 범위에서는 증착온도와 무관하게 4.5 Å/cycle의 일정한 증착율을 보인다. 이런 결과는 TiN 박막이 소오스의 열분해에 의한 기상반응으로 박막이 증착된 것이 아니라, 표면 포화 반응이 일어나는 ALE 반응기구에 의해 증착되었음을 보여준다. 그러나 230 °C이상의 증착온도에서는 증착율이 급격하게 증가하였다. 이는 표면 반응 이외에 TEMAT의 열분해에 의한 기상 반응이 일어났음을 보여준다.

그림 3은 증착온도가 160 °C일때, TEMAT의 펄스 주입 시간을 5초, 제거 가스용 N₂를 5초로 고정시키고,

NH₃를 5, 8, 10, 15초로 변화시켰을 때 와 NH₃와 제거 가스용 N₂를 5초로 고정하고, TEMAT를 3, 5, 8, 10초로 변화시켰을 때의 한 주기당 증착율을 나타낸 것이다. NH₃와 TEMAT의 펄스 주입 시간의 변화에 상관없이 100 주기 동안 450 Å의 두께로 TiN 박막이 증착되어 4.5 Å/cycle의 일정한 증착율을 나타내고 있다. 이는 소오스의 유량에 의해 증착율이 결정되는 CVD 방식이 아니라, 소오스의 유량과는 관계없이 일정한 증착율을 가지는 ALE 반응기구에 의해 증착되었음을 보여준다.

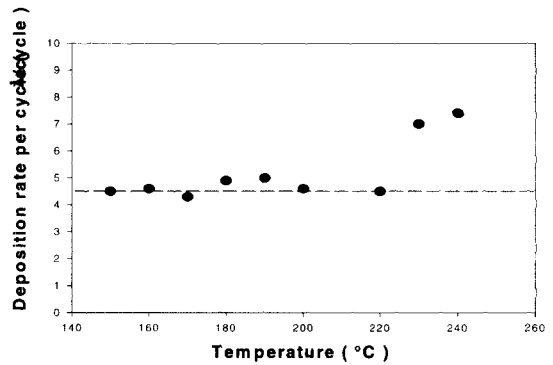


그림 2. 증착 온도에 따른 증착율의 변화
Fig. 2. Deposition rate as a function of deposition temperature.

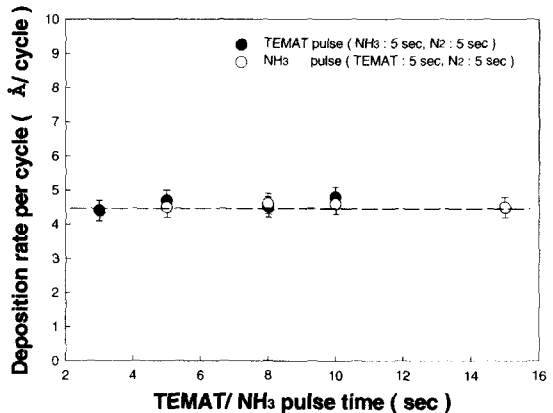


그림 3. TEMAT/ NH₃ pulse time에 따른 증착율의 변화
Fig. 3. Deposition rate as a function of TEMAT/ NH₃ pulse time.

그림 4는 증착온도를 160 °C, 펄스 시간을 TEMAT 5 초, NH₃ 10초, 제거 가스용 N₂를 5초로 고정시켰을 때,

증착 주기 수에 따른 TiN 박막의 두께의 변화를 나타내고 있다. 주기당 증착되는 TiN 박막의 두께가 일정하므로 증착되는 TiN 박막의 두께는 주기 수에 따라 선형적으로 증가하는 양상을 나타내고 있다. 이는 ALE 성장법의 자기 제어 성장 기구에 의한 성장을 잘 나타내고 있다. 또한 박막의 증착 두께를 원자층 단위로 정확하게 제어할 수 있음을 보여준다.

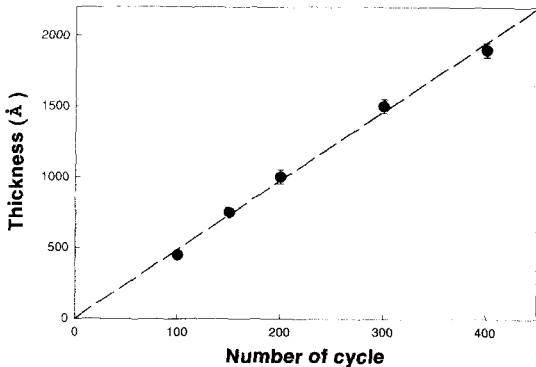


그림 4. 증착 주기 수에 따른 두께의 변화
Fig. 4. Thickness as a function of the number of cycle.

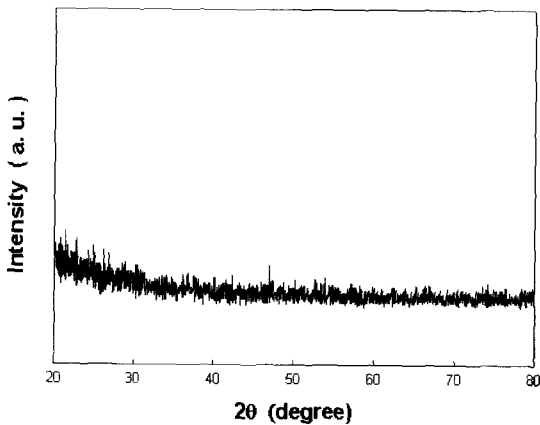


그림 5. 비정질 TiN 박막의 XRD 패턴
Fig. 5. The XRD pattern of amorphous TiN thin film.

그림 5는 TEMAT, NH₃ 및 N₂ 제거 가스의 펄스 주입 시간을 5초로 고정하고, 160 °C의 기판온도에서 100 주기 동안 증착하여 450 Å의 두께로 증착된 TiN 박막의 XRD 결정성 분석을 나타낸 것이다. 그림에서 나타나듯이 증착된 TiN 박막은 비정질(amorphous) 상태임을 알 수 있다. 이는 낮은 증착온도로 인하여, 결정성을

가진 TiN 막을 형성할 수 있는 표면 반응 에너지에 비해 낮은 열적 구동력에 기인한 것으로 사료된다. 한편, TiN 결정에서 격자상수의 값^[6]이 4.25 Å인 것과 비교해볼 때, ALE 방법으로 증착된 TiN 박막의 증착율이 주기당 격자상수 이상의 두께로 증착됨을 알 수 있다. 이는 낮은 열적 구동력으로 인해 결정성이 없는 비정질의 박막이 증착되기 때문으로 분석된다.

그림 6은 ALE법에 의해 증착된 TiN 박막의 증착을 특성을 해석하기 위해 제시한 모델이다. 그림 6(a)에서는 충분한 열적 구동력을 가진 TiN 박막의 결정성장 모델을 나타내고 있다. 이때의 막은 방향성과 결정성을 가진 밀집된 구조일 것으로 생각된다. 반면 그림 6(b)의 경우는 열적 구동력이 부족하여 비정질 상태로 증착된 막의 모델을 제시한 것이다. 비정질의 막은 결정질의 막에 비하여 밀도가 낮은 형태로 증착이 이루어지므로, 비정질 형태로 증착된 TiN 박막의 평균 증착율이 격자상수 이상의 두께로 나타난 것으로 사료된다.

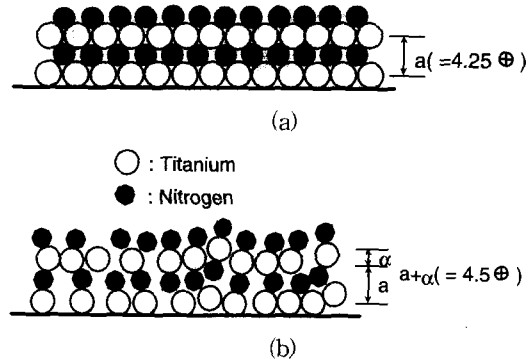


그림 6. TiN 박막 성장 모델
(a) 결정 성장 (b) 비정질 성장
Fig. 6. Model of TiN thin film.
(a) Crystal Film (b) Amorphous Film

이를 통해 ALE 방법을 이용하여 양질의 결정성을 가지는 막을 성장하기 위해서는 결정 성장에 적합한 온도에서 반응하는 소오스의 선택이 중요하다고 사료된다. 그러나 이런 비정질의 박막은 확산 경로로 작용하는 결정 입계가 없는 막이다. 따라서 이러한 비정질의 TiN 박막은 금속 배선 공정에서 확산방지막으로 우수한 성능이 기대된다.

그림 7은 NH₃ 펄스 주입 시간을 5, 8, 10 초로 변화시키며 TiN 박막을 증착했을 때의 비저항의 변화를 나타내고 있다. 증착온도 160 °C에서 TEMAT의 펄스 주

입 시간을 5초, N₂ 제거 가스의 펄스 주입 시간을 5초로 고정시키고 100 주기 증착하여 450 Å의 두께로 증착한 TiN 박막이다. NH₃의 펄스 주입 시간과 관계없이 비저항이 210 ~ 230 μΩ·cm 정도의 값을 가진다. 이는 일정한 소오스가 표면 반응을 일으키고, 반응하지 않은 나머지의 가스는 완전하게 제거되는 ALE 성장을 위한 반응이 일어났음을 보여준다. 또한 MOCVD법에 의해 같은 반응 물질을 이용하여 성장된 TiN 박막에 비해 상당히 낮은 비저항 값을 가진다.^[14]

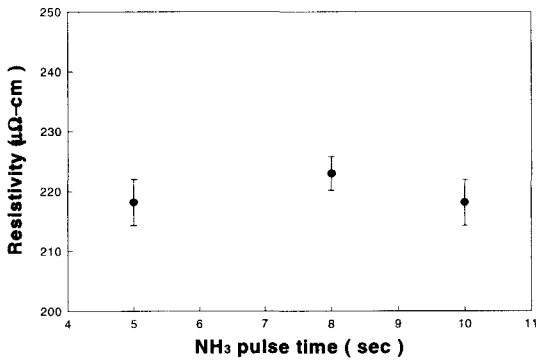


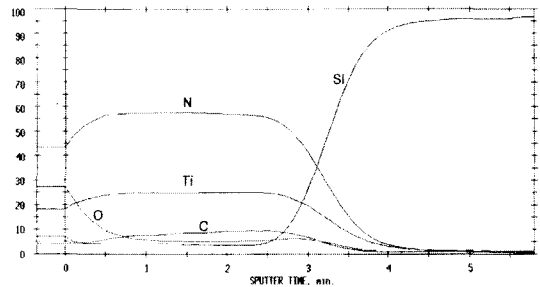
그림 7. NH₃ pulse 시간에 따른 비저항의 변화
Fig. 7. Resistivity as a function of NH₃ pulse time.

그림 8은 그림 7에서 증착된 시편에 대해서 깊이 방향에 따른 불순물 분포도를 AES를 이용하여 측정된 결과이다. 그림 8(a)는 증착 직후 관찰한 것으로 탄소는 5 ~ 8%, 산소는 10% 이하이다. 이런 탄소와 산소의 함유량은 초기 진공을 고진공으로 하고, 오일(oil) 역류 방지 장치를 설치하면 낮출 수 있을 것으로 생각된다. TiN 박막과 Si 기판의 경계로부터 TiN 박막 표면으로 갈수록, 처음에는 박막내의 산소량이 일정하다가 표면 부근에서 산소가 증가하는 것을 볼 수 있다. 표면에서 급격히 증가하는 산소는 TiN 박막 증착 중에 포함된 것이 아니라 박막 증착 후 공기 노출에 의해 산소가 침투한 것으로 분석된다. 이는 후속 공정시 in-situ로 다른 막을 증착하여 보호한다면 해결될 것으로 사료된다. 그림 8(b)는 같은 시편을 공기 중에 20일 동안 노출시킨 뒤에 깊이에 따른 불순물 함유량을 나타낸 것이다. 그림 8(a)의 경우보다 표면 부근에서부터 박막 내부로 산소가 증가한 것으로 보아 TiN 박막 내의 Ti가 공기중의 산소와 결합하여, 박막 내부의 산소를 증가시키는 역할을 한다는 것을 알 수 있다. 따라서

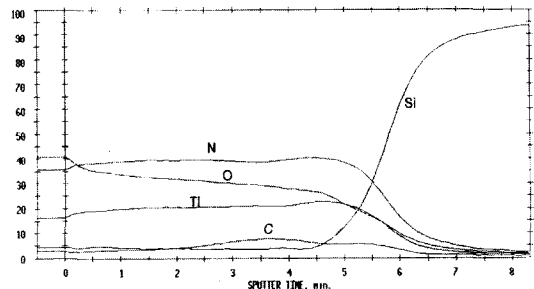
공기중 노출에 따라 비저항이 증가한 원인이 비정질 구조를 가지는 TiN 박막 내부로 산소가 침투하기 때문이라는 것을 알 수 있다.

그림 9는 증착온도 160 °C에서 펄스 주입 시간을 TEMAT 5초, 제거 가스용 N₂ 5초 그리고 NH₃를 5초로 하였을 때 증착된 TiN 박막의 단차피복성을 관찰하기 위하여 SEM으로 측정된 단면 사진이다. 그림 9(a)는 TiN 박막을 증착하기 전의 높이가 2.5 μm, 폭이 0.43 μm로 단차비가 6인 트랜치 구조이다. 그림9(b)는 그림9(a)의 시편에 ALE법에 의하여 2000 Å 정도의 TiN을 증착한 후 SEM으로 측정된 것이다. TiN이 표면 포화 반응에 의해 증착되므로 매우 우수한 단차피복성을 보였다. 따라서 선폭이 좁고, 단차비가 큰 다층 배선 공정의 확산 방지막으로서 적용이 기대된다.

그림 10은 그림 7에서 측정된 시편을 1 × 1 μm 크기의 영역에서 AFM을 이용하여 표면상태를 조사한 결과이다. 측정된 시편의 최고단차와 평균 거칠기는 54 Å와 7.9 Å으로 나타났다. 따라서 증착된 TiN 박막은 AFM측정 범위내에서 우수한 균일도를 나타내었다.



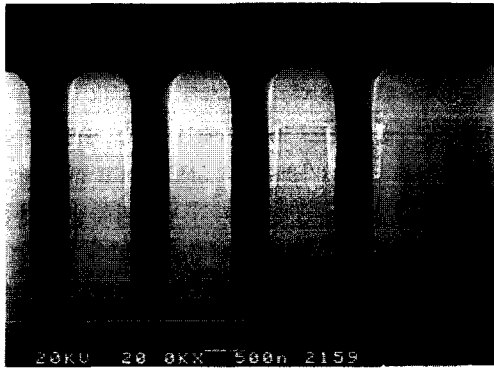
(a)



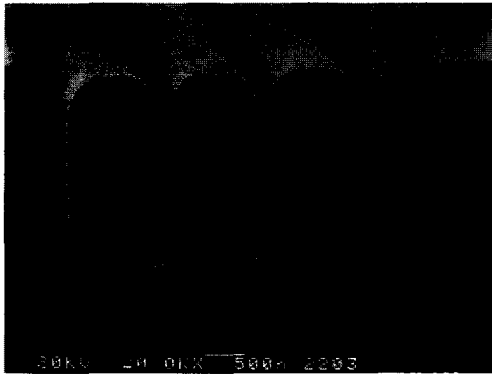
(b)

그림 8. TiN 박막의 AES 깊이 방향 분석 결과
(a) 증착 직후 (b) 20일 경과후

Fig. 8. AES depth profiles of TiN films.
(a) as-deposition (b) after 20 days



(a)



(b)

그림 9. 단차비가 6인 트렌치 구조의 SEM 사진
(a) TiN 증착 전 (높이:2.5 μm , 폭:0.43 μm)
(b) TiN(2000 Å) 증착 후

Fig. 9. SEM photograph of trench structure of 6 : 1 aspect ratio.

- (a) before deposition of TiN
(height:2.5 μm , width:0.43 μm)
(b) after deposition of TiN (2000 Å)

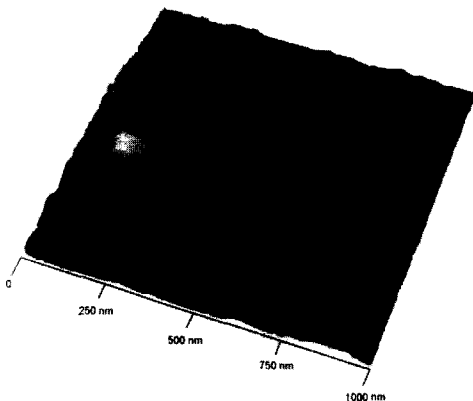


그림 10. TiN 박막의 AFM 사진(1 \times 1 μm)
Fig. 10. AFM images(1 \times 1 μm) of TiN films.

IV. 결 론

본 연구에서는 직접 제작한 ALE 박막 성장 장치를 이용하여 크기가 6 cm \times 3 cm인 (100)면의 실리콘 기판 위에 TEMAT, NH_3 와 N_2 를 이용하여 TiN 박막을 증착한 후 그 물성 및 전기적 특성을 조사하였다. ALE 성장 기구를 규명하고, 최적의 증착 조건을 확립하기 위하여 증착온도와 TEMAT와 NH_3 의 펄스 주입 시간을 변화시키면서 각각의 경우에 대하여 박막의 특성을 조사하였다. 150 ~ 220 $^\circ\text{C}$ 범위의 증착온도에서 NH_3 와 TEMAT의 펄스 주입 시간에 무관하게 4.5 A/cycle로 일정한 증착속도를 나타내었다. 이는 ALE 성장법의 자기 제어 성장 기구에 의해 TiN 박막이 증착되었음을 보여주고 있다. 그리고 TiN 박막의 두께는 주기 수에 따라 선형적으로 증가하였다. 증착된 450 Å 두께의 TiN 박막은 비정질의 구조를 가지며, 비저항은 210 ~ 230 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 의 값을 나타내었다. TiN막의 두께가 450 Å인 시편의 1 \times 1 μm 크기의 범위에서 측정된 평균 거칠기는 7.9 Å이고, 최고단차가 54 Å으로 균일도가 우수하였다. 또한 TiN을 2000 Å 증착하였을 때, 폭이 0.43 μm 이고 단차비가 6인 트렌치 구조에서 매우 우수한 단차피복성을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] K. Y. Ahn, M. Wittner, and C. Y. Ting, "Investigation of TiN films reactively sputtered using a sputter gun," *Thin Solid Films*, 107(1983), 45-54.
- [2] J. -E. Sundgren, "Structure and properties of TiN coatings," *Thin Solid Films*, 128(1985), 21-44.
- [3] M. M. Farahani et al., "A Study of Electrical, Metallurgical, and Mechanical Behaviors of Rapid Thermal Processed Ti Films in NH_3 ," *J. Electrochem Soc.*, Vol. 141, No. 2(1994), 479-495.
- [4] Do-Heyoung Kim et al., "Diffusion barrier performance of chemically vapor deposited TiN films prepared using tetrakis-dimethyl-amino

- titanium in the Cu/TiN/Si structure," *Appl. Phys. Lett.*, 69(27), 4182-4184(1996).
- [5] J. O. Olowofafe, Jian Li, and J. W. Mayer, "Interactions of Cu with CoSi₂, CrSi₂ and TiSi₂ with and without TiN_x barrier layers," *J. Appl. Phys.*, 68(12), 6207-6212(1990).
- [6] Shi-Qing Wang et al., "Reactively sputtered TiN as a diffusion barrier between Cu and Si," *J. Appl. Phys.*, 68(10), 5176-5187(1990).
- [7] Degang CHENG et al., "Surface Protrusions of Chemical Vapor Deposited TiN Films Caused by Cu Contamination of Silicon Substrates," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 37, L607-L609(1998).
- [8] 김재호 등, "Carrier gas(N₂, He)가 MOCVD TiN 형성에 미치는 영향에 대한 연구," *한국재료학회지*, Vol. 6, No. 4, 388-394(1998)
- [9] L. Hiltunen et al., "Nitrides of titanium, niobium, tantalum and molybdenum grown as thin films by the atomic layer epitaxy method," *Thin Solid Films*, 166(1988), 149-154.
- [10] Mikko Ritala et al., "Atomic Layer Epitaxy Growth of TiN Thin Films," *J. Electrochem Soc.*, Vol. 142, No. 8, 2731-2737(1995).
- [11] Akiyoshi Watanabe, Toshiro Isu et al., "The Mechanism of Self-Limiting Growth of Atomic Layer Epitaxy of GaAs by Metalorganic Beam Epitaxy Using Trimethylgallium and Arsine," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 28(7), L1080 -1082(1989).
- [12] J. R. Gong et al., "Atomic layer epitaxy of AlGaAs," *Appl. Phys. Lett.*, 57(4), 400-402 (1990).
- [13] Tuomo Suntola, "Atomic layer epitaxy," *Thin Solid Films*, 216(1992), 84-89.
- [14] Lee JG, Choi JH et al, "Chemical Vapor Deposition of TiN Films from Tetrakis(ethylmethyldamido)titanium and Ammonia," *Jpn. J. Appl. Phys.*, 37(12B), 6942-6945(1998).

저 자 소 개

金 東 煥(正會員) 第 37卷 SD編 第 2號 參照



李 鍾 華(正會員)
1974년 월 일생. 1997년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업(이학사). 1999년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(이학석사). 현재 PKL photo mask 사업부 근무. 주관심 분야는 ALE 방법에 의한 박막의 개발 등임

박막의 개발 등임

鄭 榮 培(正會員)

1971년 9월 19일생. 1998년 2월 경일대학교 전자공학과 졸업(이학사). 2000년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(이학석사). 현재 삼성전자 반도체 사업부 근무. 주관심 분야는 ALE 방법에 의한 박막의 개발 등임



李 明 福(正會員)
1982년 2월 경북대학교 물리학과 이학사취득. 1984년 2월 경북대학교 대학원 물리학과 이학석사취득. 1996년 12월 영국 Liverpool 대학 표면과학연구소 이학박사 학위취득. 주관심 연구분야 : 반도체 표면 및 계면현상과 소자성능과의 상관관계. 초미세 반도체 박막의 특성 및 그 응용 소자의 동작기구. 복합적인 구조를 갖는 산화막형 고체의 물리화학적 특성과 그 응용. 고체의 구조적, 물리화학적, 광학적 특성의 이론적 모델링 등임

및 계면현상과 소자성능과의 상관관계. 초미세 반도체 박막의 특성 및 그 응용 소자의 동작기구. 복합적인 구조를 갖는 산화막형 고체의 물리화학적 특성과 그 응용. 고체의 구조적, 물리화학적, 광학적 특성의 이론적 모델링 등임

咸 成 鎬(正會員) 第 35卷 D編 第 8號 參照

李 龍 鉉(正會員) 第 35卷 SD編 第 2號 參照

李 正 熙(正會員) 第 37卷 SD編 第 2號 參照