

LPCVD로 증착한 텅스텐 박막의 증착 조건 제어에 의한 접착성 및 저항 특성 향상

노관중 · 윤선필 · 윤영수 · 노용한

성균관대학교 전기전자및컴퓨터공학부
(2000년 5월 2일 접수)

Improvement of the adhesion and resistivity of low-pressure chemical vapor deposited tungsten films by controlling deposition parameters

Kwanchong Roh, Sunpil Youn, Youngsu Youn, and Yonghan Roh

School of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

(Received May 2, 2000)

요 약 - LPCVD 방식에 의해 산화막과의 접착성이 양호하고 $\sim 10 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 의 낮은 비저항을 갖는 텅스텐 박막을 성장시킬 수 있었다. 텅스텐의 산화막에 대한 접착성은 기판온도가 높을수록, SiH_4/WF_6 비율이 증가할수록 우수하였다. 특히, 가스 비율이 2인 경우 350°C 에서도 텅스텐의 성장이 가능하였으며, $\beta\text{-W}$ 의 성장으로 비저항이 높았으나 H_2 carrier 가스를 증가시켜 최소화시킬 수 있었다. 따라서, 텅스텐의 산화막에 대한 접착성 향상을 위해 복잡한 증착 공정이나 부가적인 공정을 사용하지 않고 단순히 증착온도, 가스 비율, carrier 가스 조건을 조절함에 의해 해결될 수 있음을 확인하였다.

Abstract - Tungsten(W) thin films with good adhesion property and low resistivity ($\sim 10 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) were deposited directly on SiO_2 by LPCVD. The adhesion property of W thin films on SiO_2 improves as the temperature and/or SiH_4/WF_6 gas ratio increase. Specifically tungsten thin films could be deposited on SiO_2 even at 350°C if the gas ratio of 2 was employed. The resistivity of tungsten thin films deposited at 350°C was high due to the presence of $\beta\text{-W}$. However, the resistivity can be minimized by increasing the amount of H_2 gas flow. Therefore, it is shown in this work that the adhesion of tungsten thin films on SiO_2 can be improved simply by controlling the process parameters (e.g., temperature, gas ratio and H_2 flow rate) without employing complex deposition methods or additional glue layers.

1. 서 론

금속-산화막-반도체(MOS) 소자를 이용하는 집적회로의 발전은 신호지연을 최소화하기 위해 저저항의 배선 물질의 선택 및 배선 물질간 저유전율의 산화막 사용, 그리고 낮은 저항의 전극재질 사용이 요구된다. 현재까지 게이트 전극으로 이용되고 있는 폴리 실리콘 계열(폴리사이드 포함)은 산화막과의 호환성은 좋으나 초미세 소자에 이용할 경우 게이트 산화막으로의 불순물(dopant) 확산, 불순물의 불충분한 활성화에 의한 공핍현상(poly depletion) 및 이로 기인한 문턱전압 제어 어려운 것이 문제점으로 지적되어 왔다 [1].

금속 게이트 전극은 산화막과의 호환성 측면의 기술적 사항을 극복할 수만 있다면 초미세 소자에 요구되는 낮은 저항값을 갖는 게이트 전극을 구현할 수 있다. 금속 게이트 전극 물질 중 특히, 저항이 낮고 녹는점이 매우 높은 내화성 금속(refractory metal)의 하나인 텅스텐(tungsten, W)은 차세대 MOS 소자의 유력한 대체 게이트 전극 금속으로 일찍부터 연구되어 왔다 [2-14].

텅스텐을 산화막위에 증착하는 방법은 스퍼터링(sputtering) [2, 3]과 화학기상 증착(CVD) [4-14]이 사용되고 있다. 스퍼터링의 경우 산화막과의 접착성은 우수한 반면 스텝 커버리지(step coverage) 특성이 열악하고 증착 과정 동안 물리적 충격에 의한 산화막(SiO_2)

손상을 유발함으로써 소자 특성을 열화시킬 수 있다. 반면, 화학기상 증착에 의한 텅스텐 성장은 스퍼터링보다 저항이 낮은 막을 얻을 수 있는 반면, 산화막과의 접착성이 좋지 않은 점과 반응가스인 WF_6 로부터 오는 불소(F)에 의한 산화막의 열화가 문제점으로 제기되고 있다 [4-10]. 화학기상 증착시 텅스텐 막과 산화막간 접착성 문제는 WF_6 의 H_2 환원에 의한 증착시 Si, 금속 물질 및 실리사이드 등에는 잘 증착되나, SiO_2 나 Si_3N_4 등의 절연막에는 잘 증착되지 않는 "선택성"에 기인한다. 이러한 SiO_2 와의 접착성 취약문제를 해결하기 위해 WF_6 와 H_2 의 반응가스 이외에 소량의 SiH_4 를 첨가시켜 SiH_4 환원 반응을 이용하는 방법이 제시된 바 있다 [4]. 또한 W과 SiO_2 사이에 TiN을 접착성 향상막(promoter layer)으로 사용하거나 [6-8], 얇은 두께의 poly-Si를 희생층으로 증착하여 Si 환원 반응에 의한 W 증착 및 접착성을 향상시킬 수 있는 것으로 보고된 바 있다 [9]. 이외에 텅스텐 증착후 부가적으로 $700^\circ C$ 이상 고온 열처리를 통해 접착성을 향상시키는 방법 [4], 반응가스를 펄스주입하여 반응후 발생하는 부산물의 탈착을 도와줌으로써 접착성을 향상시키는 방법이 제시되었다 [5, 10].

그러나, 상기 제시된 방법들은 부가적인 공정이 필요하고, 증착방법이 복잡하거나 증착된 막의 비저항이 상대적으로 높게 되는 문제점을 가지고 있다. 본 연구에서는 LPCVD 방식으로 텅스텐을 증착할 때, 증착 변수를 변화시켜 가며 텅스텐 박막의 산화막에 대한 접착성과 구조적 특성변화를 살펴보았다. 이를 통해 접착성 향상을 위한 부수적 공정 및 접착성 향상막 없이도 단지 증착조건 및 반응 가스 분위기만을 변화시킴으로써 낮은 저항의 텅스텐 전극을 산화막위에 증착시킬 수 있음을 확인하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 cold wall 방식의 저압 화학기상 증착(thermal LPCVD) 시스템을 이용하여 텅스텐을 증착하였다. P-Si (100) 웨이퍼위에 급속 열처리(RTP)에 의해 $850^\circ C$ 에서 80초간 130 \AA 의 열산화막을 성장시킨 후 그 위에 텅스텐을 증착하였다.

텅스텐 성장 조건으로 증착 압력, 기판 표면온도 및 SiH_4/WF_6 가스 비율을 변화시켜 가며 산화막위에 접착성이 양호한 저저항의 텅스텐을 성장시키고자 하였다.

압력은 $0.5 \sim 1 \text{ Torr}$, 온도는 $350 \sim 500^\circ C$, 사용가스는 WF_6 유량을 5 sccm 으로 고정시키고 SiH_4/WF_6 의 가스 비율을 0.2에서 2까지 변화시켰다. 또한 carrier 가스의 영향을 살펴보기 위해 H_2 의 유량을 500 sccm 에서 1000 sccm 으로 증가시켜 성장된 막의 저항 및 결정성 변화를 살펴보았다.

게이트 산화막위에 증착된 각 박막은 증착조건에 따라 접착성 테이프 테스트 및 압입자 이동 시험(scratch test)를 통해 산화막에 대한 접착 강도를 조사하였다. 압입자 이동시험 측정에 사용된 장비는 CSEM사에서 제작한 AE(acoustic emission) 검출장치가 부착된 REVETEST 장치로 압입자 끝의 반경이 $200 \mu m$ 인 다이아몬드 팁을 사용하였다. 그리고, 각 박막의 증착 조건에 따라 4 탐침법에 의한 저항 변화, XRD에 의한 결정성분, 그리고 SEM에 의한 표면 분석 등도 수행하였다.

3. 결과 및 논의

텅스텐의 화학기상 증착시 산화막에 대한 접착성이 좋지 않을 경우, 막이 증착되지 않거나 부가적인 후속 공정(에칭, 열처리 등)에서 벗겨질 수 있으므로 우선적으로 접착특성을 확보하여야 한다. 표 1과 같이 증착조건을 다르게 하여 증착한 텅스텐 박막을 육안 관찰 및 접착 테이프 테스트를 통해 산화막에 대한 접착성을 살펴보았다. 텅스텐의 산화막에 대한 접착특성은 증착 온도 및 SiH_4/WF_6 가스 비율에 크게 의존하였다. 가스 비율이 0.2인 경우 증착 온도가 $350^\circ C$ 일 때 산화막위에 텅스텐의 증착이 불가능하였으나, $400^\circ C$ 에서 막의 증착이 가능하였고 접착 테이프 테스트시 텅스텐 박막이 테이프에 묻어났다. 그리고, 증착 온도가 $450^\circ C$ 이상일 경우 접착 테이프 테스트 결과 텅스텐 박막이 테이프에 묻어남이 없어 접착력이 우수함을 보였다. 한

표 1. 접착성 테이프 테스트를 통한 증착 변수에 따른 텅스텐 박막의 접착성(× : 증착 불가, △ : 테이프에 묻어남, ○ : 접착성 우수)

Temp. \ SiH_4/WF_6	0.2	1	2
$350^\circ C$	×	△	○
$400^\circ C$	△	○	○
$450^\circ C$	○	○	○
$500^\circ C$	○	○	○

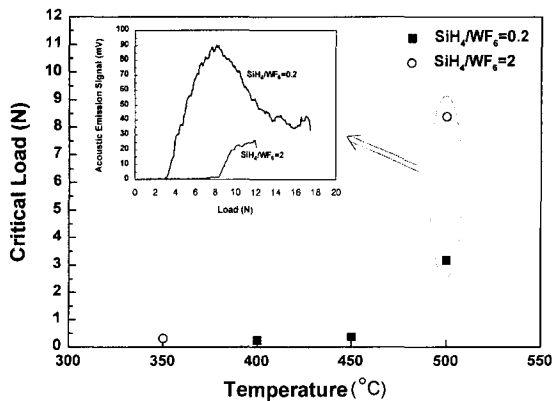


그림 1. 증착 온도 및 SiH_4/WF_6 가스 비율 변화에 따른 압입자 이동시험 방식으로 측정된 텅스텐의 임계하중.

편, SiH_4/WF_6 가스 비율이 증가할수록 접착 특성이 우수해졌는데, 증착이 불가능했던 350°C 조건에서 가스 비율이 0.2에서 1, 2로 증가할 경우 텅스텐 박막의 증착이 가능하였다. 접착 테이프 테스트시 텅스텐 박막이 묻어나지 않은 시료들을 이용하여 압입자 이동시험 [11, 12]을 통해 시료간 접착 강도 변화를 확인하였다. 그림 1은 증착 온도 및 SiH_4/WF_6 가스 비율 변화에 따른 압입자 이동시험에 의해 측정된 텅스텐의 임계하중(critical load)을 나타낸 것이다. 시료는 증착 온도 및 SiH_4/WF_6 가스 비율을 달리하여 동일한 시간(15분) 동안 증착한 텅스텐 박막이며 하중 부하 속도는 20 N/min, 압입자 이동속도는 10 mm/min로 조정하여 측정하였다. 450°C 이하의 온도에서 증착한 텅스텐 박막의 경우 가스 비율에 관계 없이 1N 미만의 임계하중을 나타내었다. 그러나, 500°C에서 증착된 텅스텐 박막의 경우 임계하중이 크게 증가하였는데 SiH_4/WF_6 가스 비율이 0.2인 경우보다 2인 경우가 더 우수하였다. 이것은 그림 1의 삽입그림을 통해 다시 확인할 수 있다. 압입자 이동 시험 결과는 접착 테이프 결과와 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 즉, 같은 온도에서는 SiH_4/WF_6 가스 비율이 증가할수록 접착성이 우수해지고 같은 가스 비율내에서는 증착 온도가 높을수록 우수해진다. 압입자 이동 시험시 350°C, SiH_4/WF_6 가스 비율이 2인 경우 임계하중이 높은 값을 나타내지 않았으나 같은 온도의 SiH_4/WF_6 가스 비율이 0.2인 경우 텅스텐의 증착이 불가능했던 것을 감안하면 가스비율 증가를 통해 접착 능력이 향상되었음을 알 수 있다.

앞선 접착 테이프 테스트 및 압입자 이동시험 결과를

통해 산화막에 대한 텅스텐의 접착성은 증착 온도가 높을수록, SiH_4/WF_6 가스비율이 증가할수록 향상됨을 확인하였다. 기존 발표 결과에 의하면 산화막에 대한 텅스텐의 접착성은 증착 온도가 높을수록, 증착시간이 증가할수록, 증착되는 기판 표면이 거칠수록 좋아지게 된다 [13]. 본 연구에서의 기판은 균일한 두께의 비정질 산화막이기 때문에 기판 표면의 거칠기에 의한 접착성에 대한 영향은 최소화되었다. 같은 가스 비율내에서 증착 온도가 높을수록 산화막에 대한 텅스텐의 접착성이 우수한 이유는 온도가 높을수록 “선택적 증착” 성질이 사라지고 “비선택적 증착”이 이루어지기 때문이다. 선택적 증착이란 WF_6 를 반응 가스로 사용한 텅스텐 증착시 Si, 금속물질 및 실리사이드 등에는 잘 증착되나, SiO_2 나 Si_3N_4 등의 절연막에는 잘 증착되지 않는 것을 뜻한다. 증착온도가 높을수록 접착성이 우수해지는 경향은 기존 결과와 일치하나, 350°C에서도 텅스텐의 증착이 가능한 결과는 타 연구의 400°C 이상 [9]이나 500°C 이상 [5]에서야 접착성이 좋아진다는 보고보다 낮은 결과이다. 접착성 향상을 위해 단순히 가스 비율만을 조절하여 게이트 산화막에 텅스텐을 증착하고자 한 시도는 본 연구가 처음이다. 상기 결과를 통해 낮은 온도에서도 단순히 가스 비율을 증가시킴에 의해, 게이트 산화막위에 텅스텐을 쉽게 증착할 수 있음을 보여준다. 350°C에서도 텅스텐이 증착이 가능한 이유는 SiH_4/WF_6 비율이 2로 증가함에 의해 H_2 환원보다 SiH_4 환원 반응이 우세해져서 gas-phase 반응에 의해 산화막에 대한 접착성이 향상된 것으로 보여진다 [14]. 그러나, 낮은 온도에서도 산화막에 대한 우수한 접착성을 얻었음에도 비저항이 높은 문제점이 발견되었다.

그림 2는 증착 변수에 따른 비저항 특성을 나타낸 것이다. 그림 2(a)를 통해 알 수 있듯이 같은 가스 비율내에서도 온도가 높을수록 비저항이 감소하였으나, 400°C 이후에는 거의 일정한 수준을 나타내었다. 기판 온도가 350°C의 경우에는 가스 비율이 1인 경우에서도 비저항이 높았다. 같은 온도 내에서는 가스 비율이 증가할수록 비저항은 증가하며, 특히 가스 비율이 2가 될 때 증착온도에 관계없이 $70 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ 이상으로 모두 높았다. 이러한 결과는 그림 4의 XRD 결과에서도 보여지듯이 낮은 온도(350°C)에서의 증착의 경우는 증착된 텅스텐이 미세결정 또는 비정질 상태를 갖기 때문이고, 가스 비율이 2인 경우에는 $\alpha\text{-W}$ 외에 $\beta\text{-W}$ 이 증착되기 때문으로 보여진다. 그림 2(b)와 같이 500°C에서

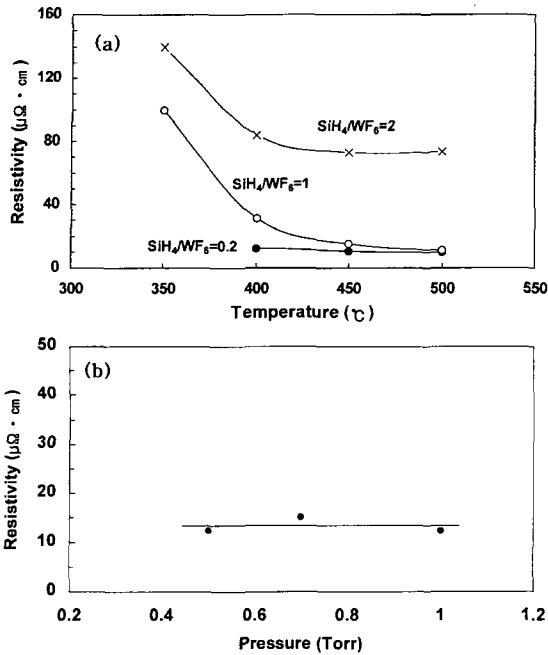


그림 2. 증착 변수에 따른 텅스텐의 비저항. (a) 증착 온도 및 SiH_4/WF_6 가스 비율 변화에 따른 비저항, (b) 증착 압력 변화에 따른 비저항 (500°C , $\text{SiH}_4/\text{WF}_6=0.2$).

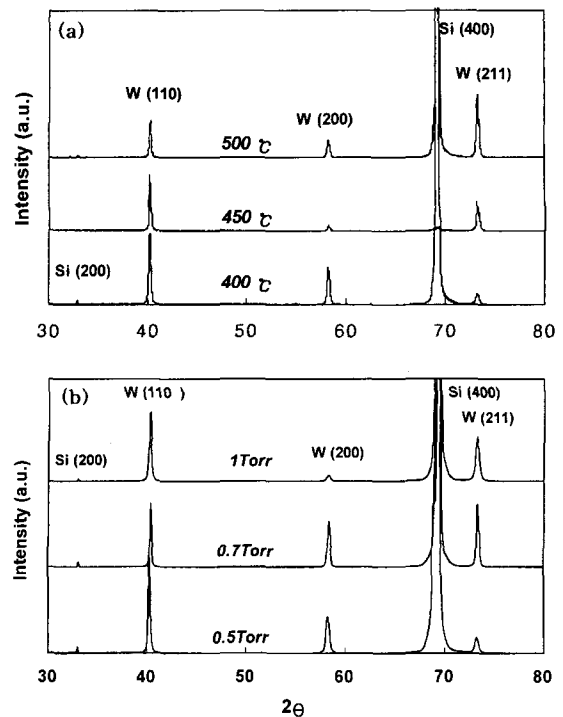


그림 3. 증착 온도 및 압력 변화에 따른 텅스텐의 XRD 결과. (a) 온도 변화에 따른 영향 ($\text{SiH}_4/\text{WF}_6=0.2$), (b) 압력 변화에 따른 영향 (500°C , $\text{SiH}_4/\text{WF}_6=0.2$).

증착된 경우에는 압력이 0.5~1 Torr의 범위에서는 비저항 변화가 거의 없었다. 본 실험에서는 기존에 보고된 결과보다 우수하거나 유사한 최저 $\sim 10 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 대의 비저항 특성을 얻을 수 있었다 [4, 5].

그림 3은 가스비율이 0.2일 때 증착 온도 및 압력에 따른 XRD 결과를 나타낸 것이며, 그림 4는 가스 비율(SiH_4/WF_6) 변화에 따른 XRD 결과이다. 증착막에서 실리콘이 검출되지 않았고 비저항 결과와 일치하여 낮은 온도에서는 비정질 상태의 XRD 형태를 보여주었으며, 가스 비율 2에서는 높은 비저항 특성을 나타내는 β -W이 나타났다. 그림 3(a)와 같이 가스 비율이 0.2인 경우 낮은 온도에서는 W(110), W(200), W(211)의 순서로 피크치의 크기를 보여 주었다. 그러나, 450°C 이상에서는 W(110)이 감소하고 W(211)이 증가하여 W(211), W(110), W(200)의 피크치 순서로 변화했다. 또한 증착압력이 변할 경우, 그림 3(b)의 증착온도가 변할 때의 양상과 같은 경향을 보여주었다. 이러한 결과를 산화막에 대한 접착성 결과와 연관시켜 살펴보면, 저온 증착된 텅스텐 막은 “선택적 반응”에 의해 성장하는 Si위에의 성장시에 주로 관측되는 XRD의 피크치

순서와 같고, 온도가 높을수록 JCPDS 카드에 나타나는 두꺼운 막의 XRD의 피크치 순서를 보여줄 수 있다. 즉, 온도가 증가할수록 선택적 반응이 줄어들어 SiH_4 환원 반응에 의한 blanket 증착이 이루어져 산화막에 대한 접착성이 우수해짐을 알 수 있다. 또한 비저항은 유사하지만 증착 온도 및 증착 압력에 따라 우선 배향이 다른 막의 성장이 가능함을 보여준다.

350°C 의 낮은 온도에서 증착된 텅스텐 박막은 그림 4(a)와 같이 아주 미세한 W(110) 피크치만을 보여줄 뿐, 비정질 상태에 가까운 결과를 보여주었다 [14]. 그림 4(b)는 500°C 에서 증착된 텅스텐 박막의 가스 비율에 따른 XRD 결과로써, 가스 비율이 증가할 때 W(110)에 비해 W(211) 피크치가 감소하였고, 특히 가스 비율이 2인 경우 β -W의 피크치가 크게 관측되었다 [15]. 따라서, 그림 2(a)의 증착온도에 관계없이 가스 비율이 2인 경우 비저항이 높았던 원인은 성장된 막이 β -W이었기 때문임을 알 수 있다.

그림 5는 SiO_2 위에 증착된 텅스텐 박막의 증착 온도에 따른 평면 SEM 및 단면 SEM 사진이다. 가스

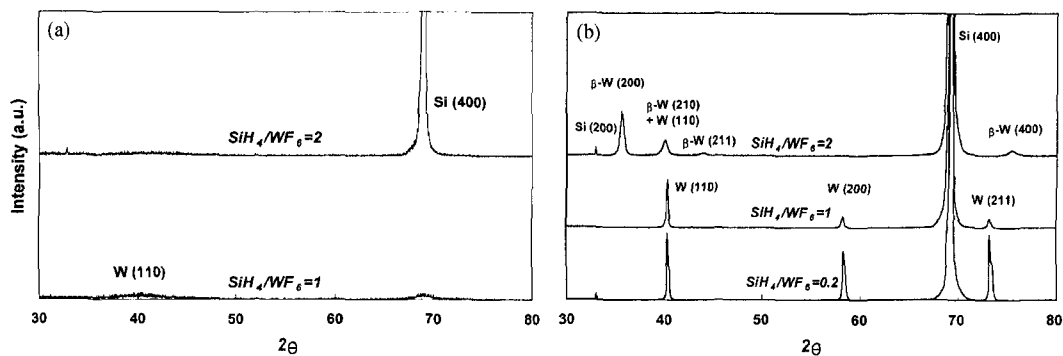


그림 4. SiH₄/WF₆ 가스 비율 변화에 따른 텅스텐의 XRD 결과. (a) 증착 온도가 350°C인 경우, (b) 증착 온도가 500°C인 경우.

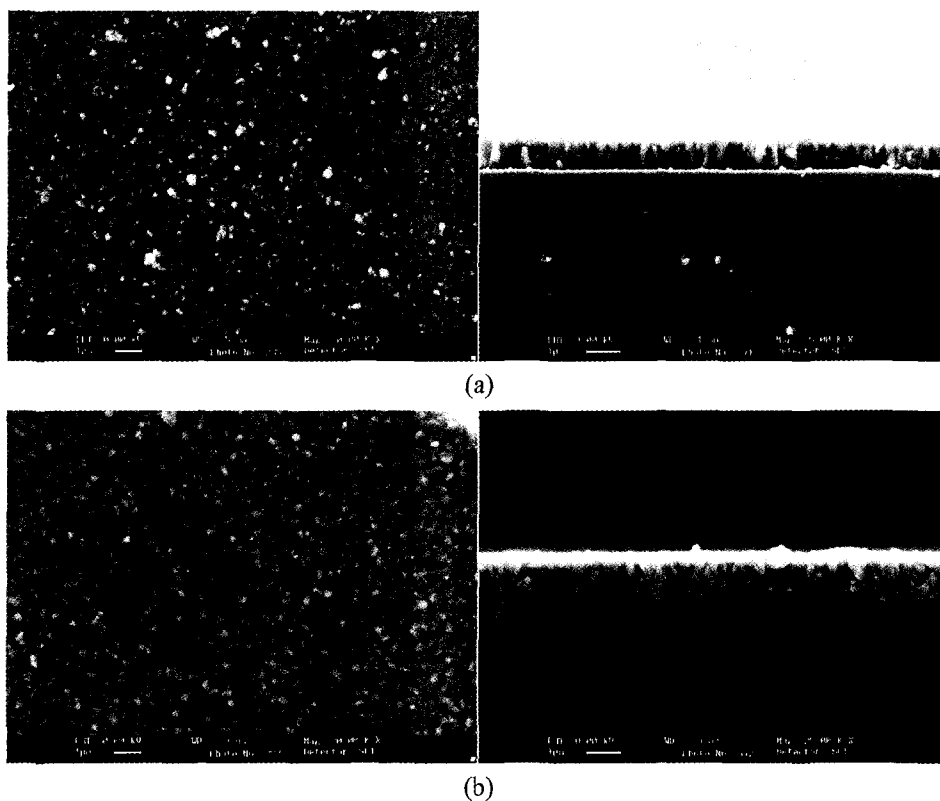


그림 5. 증착 온도에 따른 텅스텐의 평면 SEM 및 W/SiO₂/Si의 단면 SEM 사진 (SiH₄/WF₆=0.2, 15분). (a) 증착 온도가 400°C인 경우, (b) 증착 온도가 500°C인 경우.

비율 0.2에서 증착 온도가 400°C에서 500°C로 증가할수록 결정립의 크기가 증가함을 볼 수 있다. 또한 낮은 온도의 경우 결정립이 둥글고 고른 형태를 보이거나 온도가 높아질수록 모난 형태를 보이고 있다. 단면 SEM을 통해 알 수 있듯이 성장된 텅스텐 박막이 전체적으로

평평한 모습을 보였고 주상구조를 가짐을 알 수 있다. 증착온도가 증가할수록 결정립이 크기가 증가하는 것은 비저항 및 XRD 결과와 일치한다.

그림 6은 가스 비율에 따른 평면 SEM 결과이다. 가스 비율이 0.2에서 1로 증가할 경우 비저항 결과와 일



그림 6. SiH₄/WF₆ 가스 비율에 따른 텅스텐의 평면 SEM 측정 결과. (a) SiH₄/WF₆ 가스 비율이 0.2인 경우, (b) SiH₄/WF₆ 가스 비율이 1인 경우.

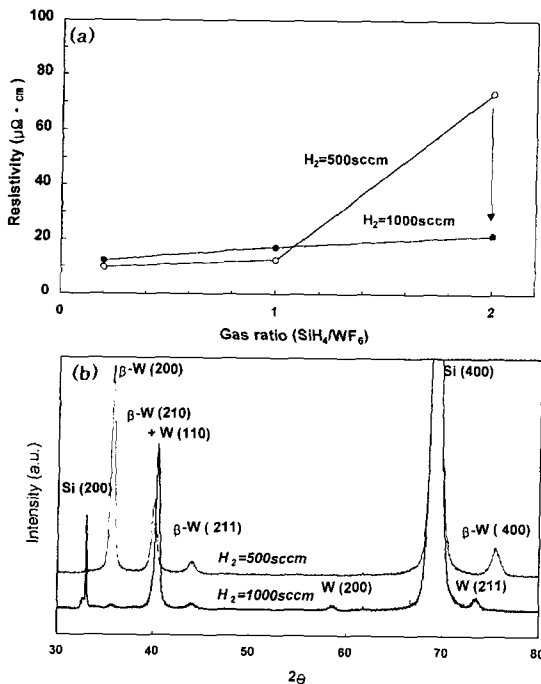


그림 7. Carrier 가스인 H₂를 500 sccm에서 1000 sccm으로 증가시킨 경우, (a) 비저항 변화 및 (b) SiH₄/WF₆ 가스 비율이 2인 경우 XRD 변화.

치하여 결정립의 크기가 감소함을 알 수 있다.

지금까지의 결과를 통해 비저항은 높으나 산화막에 대한 접착성이 우수한 텅스텐을 낮은 온도에서 증착할 수 있음을 확인하였다. 접착성이 우수한 조건인 가스비율 2인 경우에는 β-W의 생성이 문제가 된다. 이를 해결하기 위해 다른 조건은 고정시키고 반응 가스 중

carrier 가스인 H₂의 유량을 변화시켜 보았다. 그림 7(a)는 H₂의 유량을 500 sccm에서 1000 sccm으로 변화시켰을 때의 가스 비율에 따른 비저항 변화를 나타낸 것이다. 가스 비율이 0.2~1까지는 비저항이 유사하나, 가스 비율이 2일 때 H₂가 500 sccm인 경우 보다 1000 sccm인 경우 1/4로 크게 감소함을 알 수 있다. 그림 7(b)는 가스 비율이 2인 경우에 H₂ 유량 변화에 따른 XRD 변화를 살펴본 것이다. H₂가 500 sccm에서 1000 sccm으로 증가할 경우 비저항 결과와 일치하여 β-W의 피크치가 크게 감소한 반면, α-W이 크게 증가하였음을 알 수 있다. 따라서, β-W의 생성을 줄이는 방법으로 carrier 가스를 증가시킴으로써 가능하며, 이를 통해 낮은 온도에서 접착성이 우수하면서도 비저항이 낮은 막을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 발견된 방법 외에 증착시 관측되는 β-W는 고온의 열 처리에 의해 α-W으로 변화될 수 있다 [16].

4. 결 론

기존에 보고된 방법과 달리 낮은 온도에서도 SiH₄/WF₆의 가스 비율을 증가시킴으로써 게이트 산화막위에 접착성이 우수한 텅스텐 박막을 증착시킬 수 있었고, 기판 표면온도가 450°C 이상에서는 가스 비율에 무관하게 접착성이 우수한 텅스텐 막을 형성할 수 있었다. 이는 다량의 SiH₄ 첨가 혹은 증착온도 증가시 선택적 증착 성질이 줄어들기 때문이다 [5, 9]. 텅스텐 박막의 비저항은 저온증착시 비정질에 가까운 결정 구조로 인해 저항이 높은 반면, 고온증착시 주상구조를 갖는 결

정렬의 성장에 의해 $\sim 10 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ 대의 낮은 비저항 결과를 나타내었다. 비록 가스 비율이 2가 될 때 $\beta\text{-W}$ 의 성장으로 인해 막의 저항이 높았으나 H_2 carrier 가스를 증가시킴에 의해 접착특성에는 영향을 주지 않으면서 낮은 저항의 증착막을 얻을 수 있음을 확인하였다. 따라서, ULSI MOS 소자의 게이트 전극으로 사용하기 위해 기존에 문제점으로 여겨졌던 게이트 산화막에 대한 접착특성은 증착온도, 가스 비율 및 carrier 가스를 적절히 조절함으로써 해결될 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 핵심전문연구 프로그램(971-0914-081-2)의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] B. Yu, D.-H. Ju, W.-C. Lee, N. Kepler, T. -J. King, and C. Hu, IEEE Trans. Electron Devices, **ED45**, 1253 (1998).
- [2] N. Kobayashi, S. Iwata, N. Yamamoto, T. Mizutani, and K. Yagi, Tech. Dig. IEDM, 122 (1984).
- [3] C. Y. Ting, and B. Davari, Applied Surface Science, **38**, 416 (1989).
- [4] N. Kobayashi, N. Hara, S. Iwata, and N. Yamamoto, Proc. VMIC Conf., 436 (1986).
- [5] J. H. Sone, S. -O. Kim, K. -J. Kim, H. S. Kim, and H. J. Kim, Thin Solid Films, **253**, 377 (1994).
- [6] M. L. Yu, K. Y. Ahn, and R. V. Joshi, J. Appl. Phys., **67**, 1055 (1990).
- [7] J. C. Hu, H. Yang, R. Kraft, A. L. P. Rotondaro, S. Hattangady, W. W. Lee, R. A. Chapman, C.-P. Chao, A. Chatterjee, M. Hanratty, M. Rodder, and I. -C. Chen, Tech. Dig. IEDM, 825 (1997).
- [8] H. Wakabayashi, Y. Saito, K. Takeuchi, T. Mogami, and T. Kunio, Tech. Dig. IEDM, 253 (1999).
- [9] W.-K. Yeh, Y.-C. Shiao, and M.-C. Chen, J. Electrochem. Soc., **144**, 214 (1997).
- [10] K. Kim, J. H. Sone, S.-O. Park, J. S. Park, and H. J. Kim, J. Vac. Sci. Technol., **A14**, 919 (1996).
- [11] J. Valli, U. Makela, A. Matthews, and V. Murawa, J. Vac. Sci. Technol., **A3**, 2411 (1985).
- [12] H.-S. Park, Y.-W. Seo, and D.-I. Kwon, J. of the Korean Inst. of Met. & Mater., **34**, 1415 (1996).
- [13] K. Y. Ahn, Thin Solid Films, 153, 469 (1987).
- [14] K.-M. Chang, T.-H. Yeh, S.-W. Wang, and C. -H. Li, J. Electrochem. Soc., **144**, 996 (1997).
- [15] J. J. Lee, J. H. Park, and D. W. Kum, 1st Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM-1), 233 (1992).
- [16] C. M. Melliar-Smith, A. C. Adams, R. H. Kaiser, and R. A. Kushner, J. Electrochem. Soc., **121**, 298 (1974).