

<연구논문>

마이크로파 플라즈마 화학기상증착법(PECVD)과 저압 화학기상증착법(LPCVD)을 이용한 실리콘 기판 위의 텅스텐 박막증착

김성훈 · 송세안[†] · 김성근*

서울대학교 자연과학대학 화학과, [†]삼성종합기술원 그룹시험분석센터
(1991년 11월 13일 접수)

Deposition of Tungsten Thin Films on Silicon Substrate by Microwave Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) and Low Pressure Chemical Vapor Deposition (LPCVD) Techniques

Sung Hoon Kim, Se Ahn Song[†], and Seong Keun Kim*

Department of Chemistry, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

[†]Precision Analysis Center, Samsung Advanced Institute of Technology,

P.O. Box, 111, Suwon 440-600, Korea

(Received November 11, 1991)

요약—플라즈마 화학기상증착법과 저압 화학기상증착법을 사용하여 실리콘 기판 위에 텅스텐 박막을 증착하였다. 반응기체로 WF_6 를 사용하였으며 환원기체로는 SiH_4 를 사용하였다. 플라즈마 증착법에 의한 텅스텐 박막의 성장은 환원기체의 유무에 상관없이 주로 기상 반응에 의한 텅스텐 덩어리들의 증착에 의하여 이루어졌으며 비교적 균일도가 낮은 박막표면을 이루었다. 저압 화학증착법의 경우 환원기체를 사용하지 않았을 때에는 실리콘 기판에 의한 제한된 환원반응에 의해 텅스텐이 증착되었으나, 환원기체를 사용했을 때에는 초기의 실리콘 기판에 의한 환원반응과 이어 일어나는 SiH_4 기체와의 불균일계 환원반응의 두 단계반응에 의하여 텅스텐 박막 증착이 이루어졌다. 저압 화학증착법의 경우 텅스텐 박막의 특성은 플라즈마 증착법에서 보다 우수하였으며 박막 성장은 island by island 양식을 따르는 것으로 추정되었다. 박막은 α -W의 체심입방 구조로 이루어졌으며 박막이 성장함에 따라 단결정 구조가 증가하였다.

Abstract—Tungsten films were deposited on silicon surfaces by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) and Low Pressure Chemical Vapor Deposition (LPCVD) techniques. WF_6 was used as source gas along with SiH_4 as reducing gas. In PECVD, the films were grown by the deposition of tungsten grains produced in homogeneous reactions, irrespective of the presence of reducing gas. PECVD produced films of relatively low uniformity. In LPCVD, tungsten was deposited by limited reduction reaction by silicon substrate in the absence of reducing gas. With the reducing gas, however, the films were deposited by a two-step process: initial reduction reaction by silicon substrate and subsequent heterogeneous reduction reaction by SiH_4 . Films of higher quality were obtained from LPCVD than from PECVD. The film growth mode was expected to be Volmer-Weber type (island-by-island mode), which eventually resulted in an α -W bcc structure.

Increase of the single crystal structure was observed as the film growth was proceeded.

1. 서 론

최근 반도체 device가 고집적화함에 따라 device를 이루는 소재의 전기적, 열적 특성의 우수성과 그 특성을 결정짓는 박막의 균일성과 순수성 그리고 박막과 기판과의 적합성 등이 중요한 문제로 대두되고 있다. 따라서 기존의 반도체 공정의 물질로 사용되었던 실리콘이나 알루미늄 등의 단점을 보완하고 이들을 대체할 수 있는 소재의 개발과 이러한 소재들의 특성을 최대한 향상시키기 위한 공정기술의 개발, 박막증착 기술과 조건에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 소재의 개발면에서 자체저항이 높은 폴리실리콘이나 고온 공정성이 좋지 않은 알루미늄을 대체하는 물질로 비교적 낮은 비저항과 높은 용융점을 가지는 refractory metal이 많이 연구되고 있으며 그 중 텅스텐은 순수한 원소 또는 실리사이드 계열의 화합물형태로서 차세대 반도체의 금속 공정에서 알루미늄을 대체하는 물질로 주목을 받고 있다[1, 2]. 박막의 증착방법으로는 sputtering 등과 같은 물리기상증착법(PVD)과 화학기상증착법(CVD)이 사용되고 있으며 박막의 균일성과 step coverage 및 stress 등의 면에서 화학기상증착법이 일반적으로 더 우수한 것으로 알려져 있다[3, 4]. 화학기상증착법으로는 플라즈마 화학기상증착법(PECVD)과 저압 화학기상증착법이 주로 사용되고 있다. 일반적으로 전자의 경우에는 기상에서의 균일계 반응(homogeneous reaction)에 의하여, 그리고 후자의 경우에는 기판과 기체간의 불균일계 반응(heterogeneous reaction)에 의하여 각각 박막의 증착이 이루어진다고 알려져 있으며 박막의 특성면에서는 저압 화학증착법이 일반적으로 우수하다고 알려져 있지만[5] 경우에 따라서는 박막의 성장속도와 박막의 전기적 특성면에서 플라즈마 증착법이 우수하다고 보고되고 있다[6]. 텅스텐의 화학기상증착에서 주로 사용되는 반응기체로는 WF_6 , $W(CO)_6$, WCl_6 등이 있으나 이 중 WF_6 가 가장 널리 사용되고 있으며 환원기체로서는 H_2 와 SiH_4 를 주로 사용하나 실리콘 기판과의 적합성면에서 SiH_4 가 더 우수한 것으로 알

려져 있다[7-9]. 본 연구에서는 반응기체로 WF_6 를, 환원기체로는 SiH_4 를 사용하여 화학기상증착으로 실리콘 기판 위에서 텅스텐 박막의 증착을 시도하였다. 증착방법으로는 플라즈마 화학기상증착법과 저압 화학기상증착법을 사용하였으며 각 경우에서 환원기체의 유무에 따라 박막을 증착하였고 그 때의 박막 특성을 조사하여 비교 검토하였다. 또한 텅스텐 박막의 증착 과정과 저압 화학증착에서의 박막 성장양식을 연구하였다.

2. 실험방법

그림 1(a)는 플라즈마 화학기상증착 장치를 나타내고 있다. 플라즈마를 생성하는 microwave generator로는 Ophos model MPG 4 M(2.45 GHz, 최대출력 100 W 이상)을 사용하였고, discharge cavity로는 Evenson type을 사용하였으며 직경 0.9 cm, 길이 16 cm의 석영관을 discharge tube로 사용하였다. 그림 1(b)는저압 화학기상증착 장치를 나타내는데 반응기는 stainless steel로 만들었으며 외벽은 냉각수를 사용하여 반응이 진행되는 동안 cold-wall 조건을 유지시켰다. 반응중 기판이 올려져 있는 히터의 온도는 온도 조절기(Omega 4001 KC)를 이용하여 $450 \pm 1^\circ C$ 로 고정시켰다. 반응기는 반응기체 주입 전에 확산

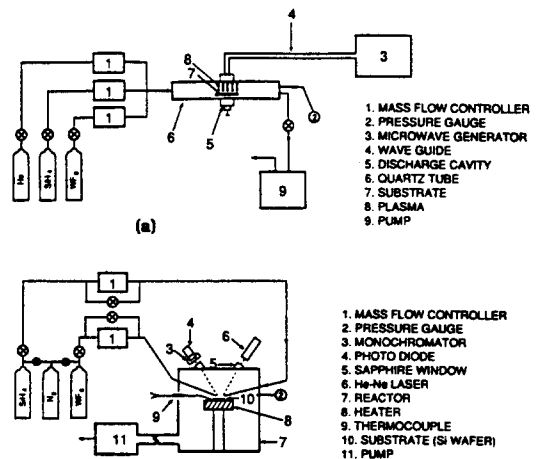


그림 1. (a) PECVD 장치; (b) LPCVD 장치.

본 연구는 한국전자통신연구소와 분자과학연구센터의 연구비 지원에 의하여 이루어짐.

표 1. 플라즈마 화학기상증착과 저압 화학기상증착에서의 실험조건

플라즈마 화학기상증착 (PECVD)	반응기체(기체유량) (sccm : standard cc/min.)	출력(watt)	전체압력(mtorr)	반응시간(분)
	WF ₆ (6), He(200)	20	1000	10
WF ₆ (6), SiH ₄ (18), He(200)	20	1100	10	
저압 화학기상증착 (LPCVD)	반응기체(기체유량) (sccm : standard cc/min.)	반응온도(°C)	전체압력(mtorr)	반응시간(분)
	WF ₆ (36)	450	150	30
WF ₆ (36), SiH ₄ (18)	450	250	30	

펌프를 사용하여 10^{-5} torr 정도의 진공상태로 만들어 주었다. WF₆(Takachion)와 SiH₄(Takachion)는 각각 99.999%의 순도를 가지는 것으로서 추가 정제 과정 없이 바로 사용하였다. 플라즈마 증착 반응시에는 플라즈마 효율을 향상시키기 위하여 완충기체인 He(99.999%, 대한 특수가스)를 사용하였다. 반응기체의 유량은 MFC(mass flow controller, Edwards model 1605)를 이용하여 조절하였으며 각각 다른 주입구를 통하여 반응기 내로 주입하여 기판 위에서 기체들이 만나도록 하였다. 실리콘 기판은 P-(100)형을 사용하였으며 10% HF 완충용액으로 1분동안 씻은 다음 증류수로 씻어내고 질소기체로 기판의 수분을 말렸다. 저압 화학증착 반응시 실리콘 기판 위에 텅스텐의 증착 여부는 He-Ne Laser를 사용하여 in-situ 상태로 알아 보았다. 분석방법으로는 박막표면과 단면형상은 주사전자현미경(SEM; scanning electron microscope, Jeol JSM840)과 투과전자현미경(TEM; transmission electron microscope, Hitachi H9000, 300 KV)을 사용하여 알아 보았으며 EDS(energy dispersive spectroscopy, Kevex Delta V)와 AES(Auger electron spectroscopy, Perkin-Elmer PHI 610)를 사용하여 박막의 구성성분을 조사하고 XRD(X-ray diffraction)와 투과전자현미경으로 부더의 SAD(selected area diffraction) pattern을 분석하여 박막의 결정구조를 알아 보았다. 박막두께와 거칠기 측정을 위하여는 침필형태의 측정기인 Dektak을 사용하였으며 박막의 비저항은 four point probe를 사용하여 측정하였다. 기체상에서의 반응 생성물의 검출을 위하여는 고분해능 질량 분석기(VG Analytical model ZAB-E)를 사용하였다.

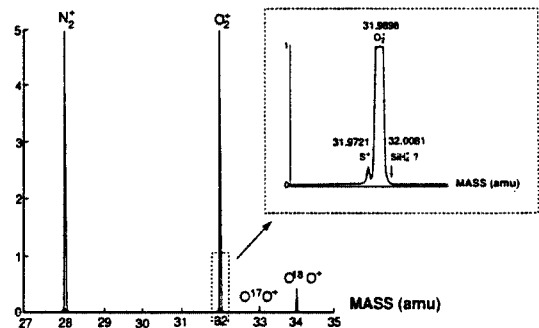


그림 2. PECVD 조건하에서의 질량 분석스펙트럼. 삽입도(inset) : 고감도 질량 분석스펙트럼.

3. 결과 및 고찰

3.1. 플라즈마 화학기상증착(PECVD)법에 의한 텅스텐 박막의 증착

플라즈마 증착법에서는 주로 MHz 영역인 라디오파(radio frequency wave)를 이용하여 플라즈마를 생성하는데 본 연구에서는 라디오파보다 훨씬 더 높은 주파수를 가지는 GHz 영역의 마이크로파(microwave)를 이용하였다. 마이크로파를 이용하면 라디오파를 이용하였을 때보다 플라즈마 생성률이 더 높고 따라서 플라즈마 내의 라디칼 및 이온의 농도가 높아져서 매우 반응성이 높은 환경을 형성하게 된다. 실제로 그림 2에서 보여 주듯이 SiH₄ 기체를 플라즈마 상태의 discharge tube로 통과시켜 주었을 때 고감도 질량 분석 스펙트럼에서 SiH₄의 어미이온(parent ion)이 전혀 발견되지 않는 것으로 보아 SiH₄ 기체는 플라즈마 내에서 완전히 분해되는 것으로 여겨진다. 플라즈마 증착에서의 실험은 원료기체의 구성방법

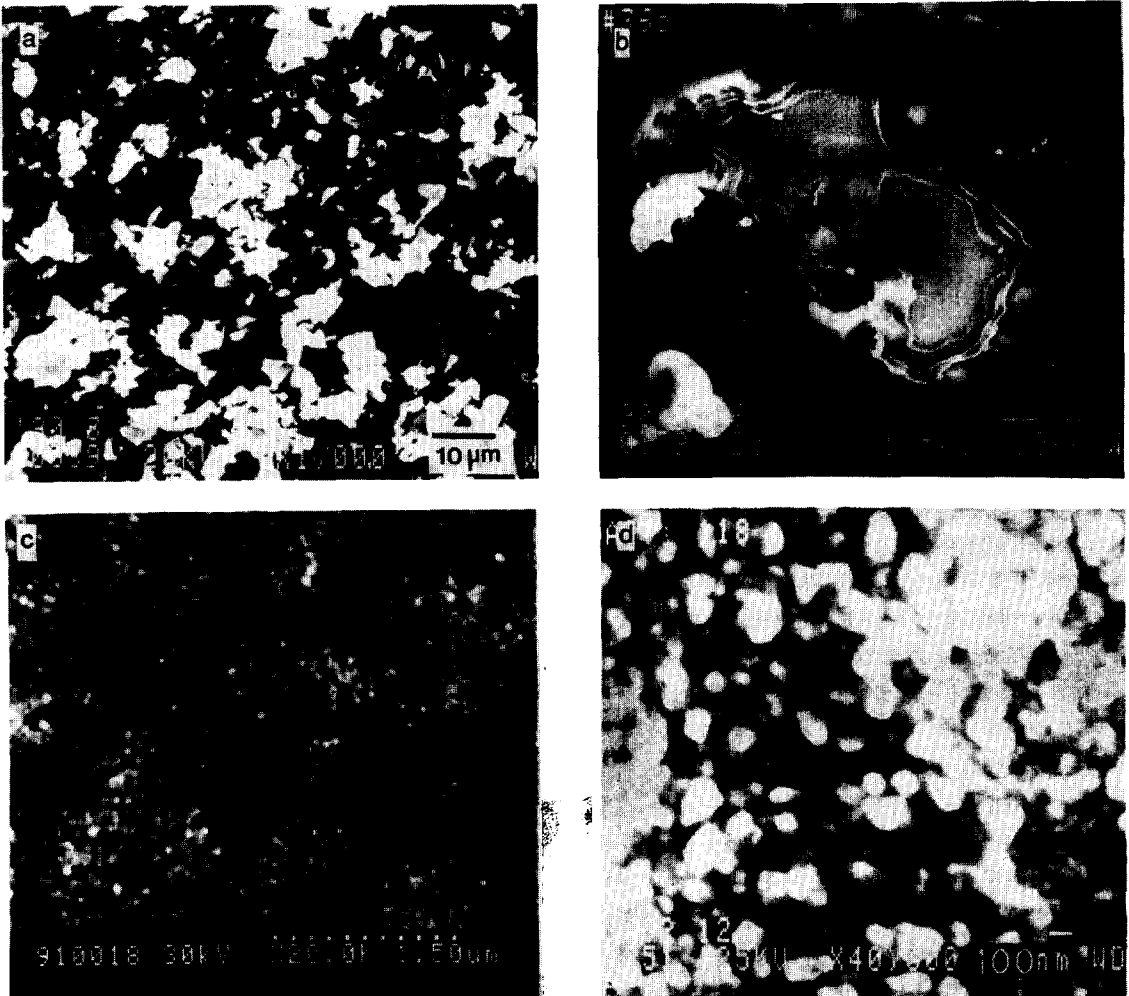


그림 3. (a) WF_6 만을 사용했을 때의 PECVD 박막의 표면 SEM 형상; (b) WF_6+SiH_4 를 사용했을 때의 PECVD 박막의 표면 SEM 형상; (c) WF_6 만을 사용했을 때의 LPCVD 박막의 표면 SEM 형상; (d) WF_6+SiH_4 를 사용했을 때의 LPCVD 박막의 표면 SEM 형상.

(WF_6 만을 사용하는 경우와 WF_6+SiH_4 의 혼합기체를 사용하는 경우)을 달리하여 실시하였으며 표 1에서는 플라즈마 증착법에서의 각각의 경우에 대한 실험조건을 나타내고 있다. 그림 3(a, b)는 실리콘 기판을 플라즈마 영역에 놓아두고 WF_6 만을 흘려 보내어 플라즈마화 시켰을 경우와 WF_6 와 SiH_4 의 혼합기체를 플라즈마화 시켰을 경우 각각 생성된 박막의 주사전자현미경 사진이다. 그림에서 보여주듯이 박막표면은 전형적인 기상 반응의 결과로 보이는 거친 형상으로 이루어져 있다. 그림 4(a, b)는 각 경우의 박막표면을 분석한 EDS 결과인데 텅스텐의 양이 실리콘에 비하

여 상당히 적음을 알 수 있다. 그림 5(a, b)는 이들 박막 표면의 XRD 결과이며 텅스텐 결정면에 해당하는 봉우리가 보이지 않는 것으로 보아 결정형태를 이루고 있는 텅스텐의 양이 매우 적음을 알 수 있다. 표 2에서는 Dektak으로 측정된 박막의 두께와 거칠기 및 four point probe로 측정된 박막의 비저항 값을 보여 주는데 원료기체의 조성에 상관없이 박막의 특성은 우수하지 않은 것으로 드러났다.

3.2. 저압 화학기상증착(LPCVD)법에 의한 텅스텐 박막의 증착

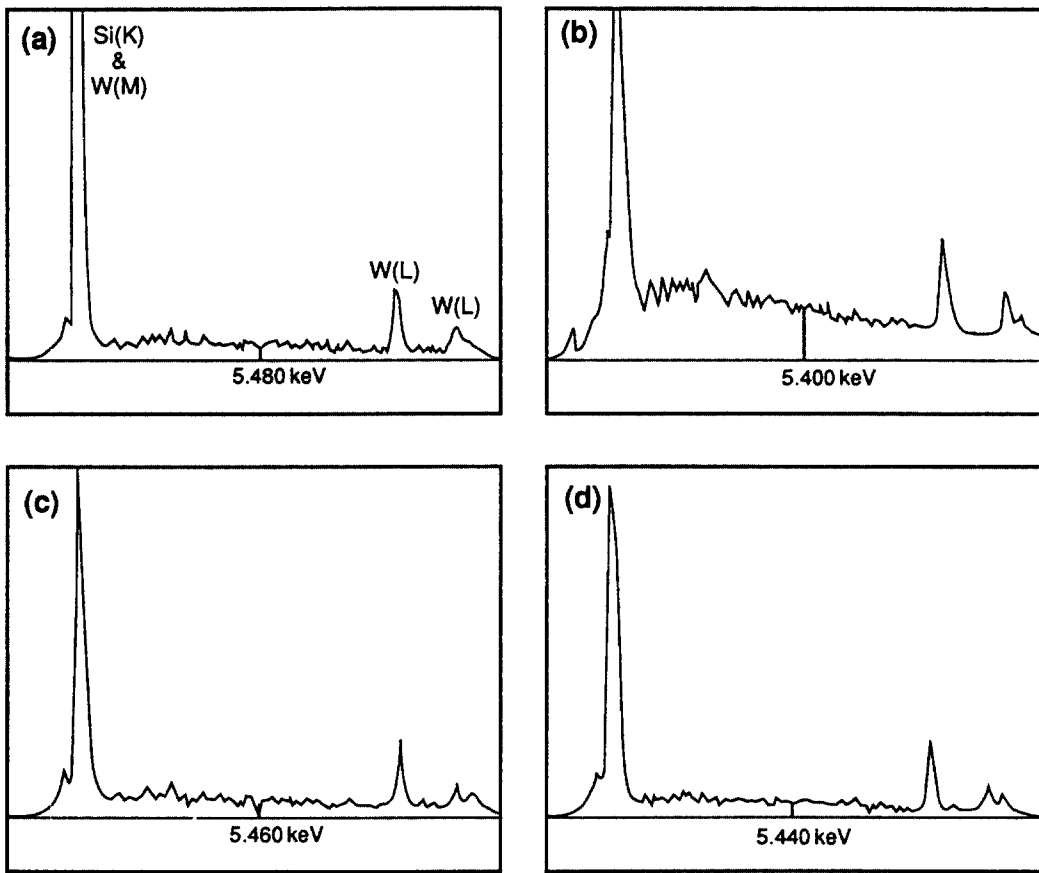


그림 4. 그림 3의 각각의 경우에 대한 EDS 스펙트럼.

저압 화학기상증착에서의 반응 역시 WF_6 기체만을 사용하는 경우와 WF_6 와 SiH_4 의 혼합기체를 사용하는 경우로 나누어 실시하였으며 표 1에서는 각각에 대한 실험조건을 나타내고 있다. 그림 3(c, d)는 각각의 경우의 주사전자현미경 사진이다. WF_6 만을 사용하였을 경우의 박막표면은 이미 Lifshitz[10]에 의하여 보고된 바와 같이 작은 알갱이들과 기공들로 구성되어 있음을 확인하였다. WF_6 와 SiH_4 를 동시에 사용하였을 경우의 박막표면은 알갱이들이 촘촘히 배열되어 있는 것을 볼 수 있었다. 그림 4(c, d)는 EDS 결과인데 증착된 텅스텐과 실리콘 양의 비가 각 경우에서 서로 비슷하며 PECVD 경우보다는 텅스텐의 양이 상대적으로 약간 많아짐을 알 수 있다. 그림 5(c, d)는 이들 박막표면의 XRD 결과인데 (110)과 (200) 및 (211)의 단결정면에 해당하는 텅스텐 봉우리가 뚜렷이 나타남을 보여주며 이로부터 저압 화학기상증착에서는

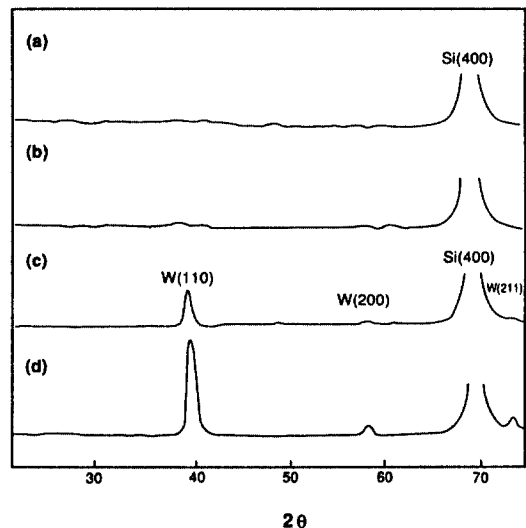


그림 5. 그림 3의 각각의 경우에 대한 XRD 스펙트럼.

표 2. 박막두께, 거칠기 및 박막표면의 비저항값

증착방법	반응기체 종류	박막두께 (μm)	박막표면 거칠기 (arb. units)	박막표면 비저항값 ($\mu\Omega\text{-cm}$)
플라즈마 화학기상증착 (PECVD)	WF_6, He	~ 0.2	< 100	< 100
	$\text{WF}_6, \text{SiH}_4, \text{He}$	~ 0.2	< 100	< 100
저압 화학기상증착 (LPCVD)	WF_6	~ 0.03	30	14.5
	$\text{WF}_6, \text{SiH}_4$	~ 1	10	15

플라즈마 증착에서와는 달리 박막이 성장함에 따라 텅스텐의 단결정면들이 형성됨을 알 수 있다. 표 1에서 보여주듯이 박막은 WF_6 만 사용한 경우 약 300 \AA 정도에서 더 이상 성장되지 않았으나 SiH_4 환원기체와의 혼합기체를 사용한 경우는 반응 시간 내에 $1 \mu\text{m}$ 정도까지 박막의 성장이 계속되었다. Four point probe로 측정된 박막의 비저항 값은 표 2에 나타나 있으며 각 경우 $15 \mu\Omega\text{-cm}$ 정도의 양호한 값을 나타내었고 박막의 표면은 WF_6 만을 사용한 경우가 더 균일하였다.

3.3. 플라즈마 증착법과 저압 증착법에 의한 박막의 특성 비교

지금까지 언급한 박막의 특성을 종합해 보면 플라즈마 화학증착에서는 박막표면이 거칠뿐 아니라 전기전도도 등 박막의 특성이 좋지 못한 반면 저압 화학증착의 경우는 플라즈마 증착에 비하여 모든 박막 특성이 월등히 우수하였다. 이로부터 플라즈마 증착의 경우 주로 기상반응에 의하여 생성된 텅스텐이 확산에 의하여 기판에 도달함으로써 박막의 증착이 시작되고 따라서 기판 표면에 불균일하게 텅스텐 덩어리가 증착되므로 텅스텐의 표면 확산이 일어나기에는 너무 낮은 온도인 본 실험 조건하에서 단결정면의 성장은 이루어지지 않는 것으로 해석되었다. 반면에 저압 화학증착법에서 WF_6 만을 반응기체로 사용하였을 경우 실리콘 기판 환원반응에 의하여 WF_6 로부터 텅스텐이 기판에 증착되고, WF_6 와 SiH_4 기체를 같이 사용하였을 경우에도 cold-wall 조건하에서 기판표면에서 불균일한 반응이 주로 일어나기 때문에 매우 균일한 박막표면 형성과 함께 단결정면의 성장을 이루는 것으로 추정되었다. 그림 6(a)는 저압 화학증착법에서 WF_6 만을 반응기체로 사용하였을 경우 박막단면의

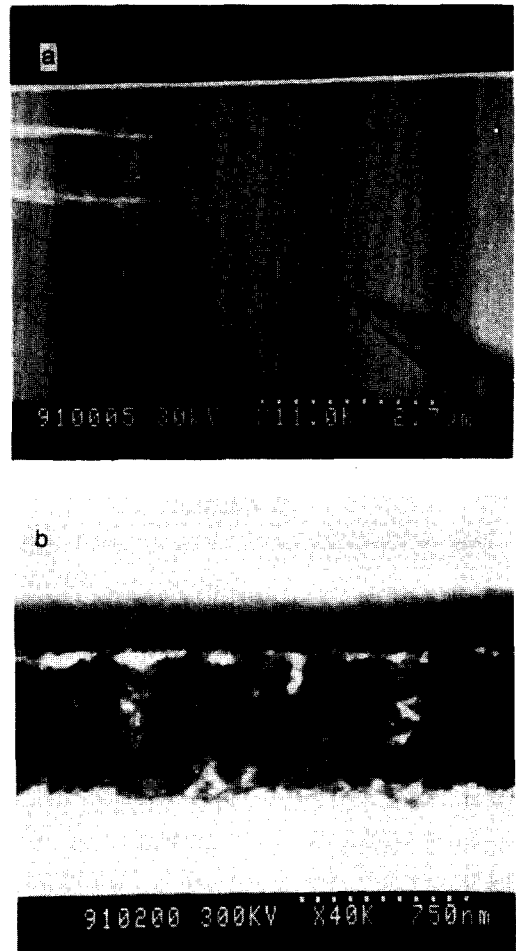


그림 6. (a) WF_6 만을 사용했을 때의 LPCVD 박막의 단면 SEM 형상; (b) $\text{WF}_6 + \text{SiH}_4$ 를 사용했을 때의 LPCVD 박막의 단면 TEM 형상.

주사전자현미경 형상으로서 박막의 성장은 수 백 \AA 정도로 제한됨을 보여준다. 이미 많이 보고되어 있는 [11, 12] 이러한 현상은 박막이 성장함에 따라 WF_6 와

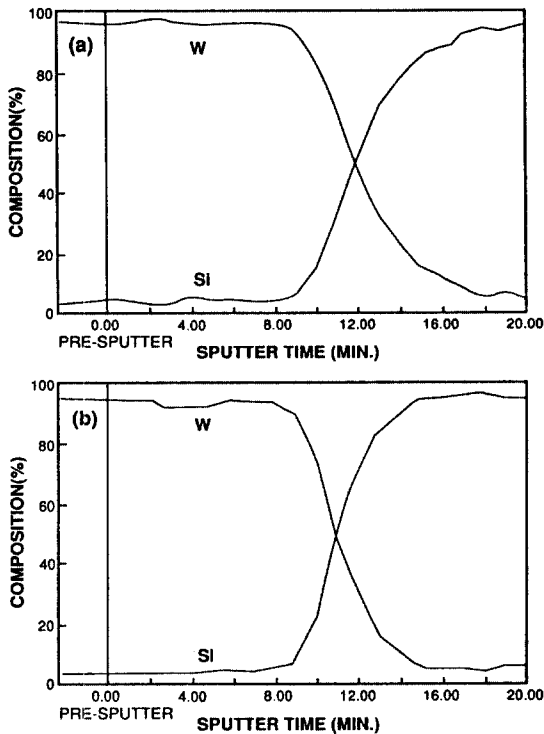


그림 7. (a) WF_6 만을 사용했을 때의 LPCVD 박막의 표면 깊이에 따른 AES에 의한 성분 함량분석; (b) $WF_6 + SiH_4$ 를 사용했을 때의 LPCVD 박막의 표면 깊이에 따른 AES에 의한 성분 함량분석.

반응하는 실리콘 기판 활동면의 잔존량이 점점 감소하는데 기인한다. 그림 6(b)는 저압 화학증착법에서 WF_6 와 SiH_4 의 혼합기체를 사용하여 같은 반응시간 동안 증착시킨 박막단면의 투과전자현미경 형상이며 WF_6 만 사용했을 경우보다 훨씬 두꺼운 $1\mu m$ 정도의 박막성장이 이루어짐을 보여준다. 그림 7에서는 WF_6 기체만에 의해 증착된 박막과 WF_6 와 SiH_4 기체를 혼합하여 초기 반응시간(3분) 동안 증착한 박막을 AES를 사용하여 박막 깊이에 따라 성분 함량 분석을 한 결과를 나타내었다. 각 경우 모두 박막 깊이에 따른 텅스텐과 실리콘의 함량 변화가 비슷한 것으로 보아 상당히 유사한 초기 증착과정을 거치는 것으로 추정되었다. 이와 같은 결과로 미루어 WF_6 와 SiH_4 기체의 혼합에 의한 박막증착의 경우 텅스텐 박막의 성장은 그 첫 단계에서 WF_6 만에 의한 증착에서와 마찬가지로 실리콘 기판의 환원 작용에 의한 텅스텐 증착과 두 번째 단계에서 SiH_4 환원에 의한 증착의 두 단계

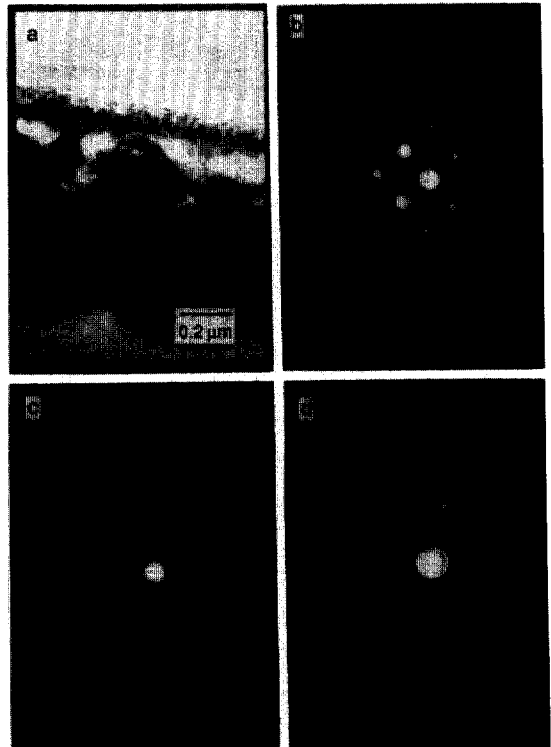


그림 8. (a) $WF_6 + SiH_4$ 를 사용했을 때의 LPCVD 박막의 단면 TEM 형상; (b) 그림 8(a)에 나타난 박막의 실리콘 기판 부분의 SAD pattern; (c) 그림 8(a)에 나타난 박막의 실리콘 기판에 근접한 부분의 SAD pattern; (d) 그림 8(a)에 나타난 박막의 최외각층의 SAD pattern.

메커니즘을 따라 진행된다고 생각된다.

3.4. 저압 화학기상증착에서의 텅스텐 박막 성장 과정

일반적인 박막성장 형태는 island by island 성장인 Volmer-Weber(VW)양식과 layer by layer 성장인 Frank-van der Merwe(FV)양식, 그리고 이들의 중간형태인 layer plus island 성장인 Stranski-Krastanov(SK)양식의 세 종류가 있다[13-16]. 이들 성장양식은 순수한 admetal과 순수한 기판 그리고 계면의 표면에너지(각각 H_A , H_S , H_{A-S} 로 표기)의 상대적인 크기에 의존한다. VW양식의 경우 $\Delta H = H_A + H_{A-S} - H_S > 0$ 의 조건이 만족되는 상태에서 흔히 발견되나 이와는 반대로 FV양식의 박막성장은 $\Delta H < 0$ 인 조건 하에서 대개 이루어지게 되며, 이로부터 계면의 표

면에너지 H_A-S 의 크기가 박막 성장양식을 결정짓는 중요한 파라미터 중의 하나임을 알 수 있다. 물론 박막성장 양식을 결정짓는 요인은 이외에도 여러 가지가 있으며, 예를 들어 $2|(H_A-H_S)/(H_A+H_S)|$ 로 정의되는 표면에너지 mismatch parameter Γ_{AS} 의 값이 1/2보다 작을 때의 박막성장은 흔히 FV양식을 따르는 것이 보통이다. 이들 각기 다른 성장양식으로 만들어진 박막은 흔히 FV의 경우 단결정면을, 그리고 VW의 경우에는 다결정적인(polycrystalline) 표면구조를 가지는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 박막의 단면구조를 투과전자현미경으로부터 SAD 분석을 하여 박막 성장양식의 규명을 시도하였다. 그림 8(a)에서는 SiH_4 환원기체를 사용하여 제조한 박막 단면의 투과전자현미경 사진을 보여주고 있으며 그림 8(b, c, d)는 각각 실리콘 기판 부분, 실리콘 기판에 근접한 텅스텐 박막부분, 그리고 텅스텐 박막의 최외각층 부분의 SAD pattern들을 보여주고 있다. 텅스텐 박막단면부분에서는 다결정(polycrystal)의 전형적인 형태인 고리(ring) 모양들을 볼 수 있는데 이로부터 텅스텐 박막은 주로 island by island 양식으로 성장되는 것으로 일단 추정되었으며, 그림 3(c, d)의 텅스텐 박막표면의 주사전자현미경 사진에서 나타난 박막표면의 알갱이 형상으로부터도 이와 같은 사실을 확인할 수 있었다. SAD pattern의 각 고리의 위치는 계산결과 $W(110)$, $W(200)$, $W(211)$ 면에 해당함을 발견하였고 이는 그림 5(d)에 나타난 XRD 결과와도 일치하며 따라서 텅스텐 박막의 구조는 체심입방(body centered cubic) 구조를 갖는 α -W임을 알 수 있었다[11, 17]. 그림 8(c)와 8(d)의 비교로부터 실리콘 기판에 근접한 박막에서는 다결정인 고리 모양의 SAD pattern이 관측되나 점점 박막 표층으로 감에 따라 단결정(single crystal)의 전형적인 형태인 점(spot) 모양이 나타남을 알 수 있었다. 이로부터 본 연구의 조건 하에서 텅스텐 박막은 그 성장이 진행함에 따라 다결정 구조로부터 단결정 구조로 변화하여 가는 것으로 추정되었다.

4. 결 론

플라즈마 화학기상증착법에 의한 텅스텐 박막의 증착에서는 환원기체의 유무에 상관없이 기상반응에 의하여 생긴 텅스텐 덩어리들이 실리콘 기판 위에

증착됨으로 인해 낮은 균일도의 표면과 높은 비저항을 가지는 박막이 생성되었다. 그러나 저압 화학기상증착법에 의한 텅스텐 박막증착에 있어서는 주로 기판과 반응기체 간의 반응에 의하여 박막이 성장되었고 이로부터 균일한 박막표면 형상과 낮은 비저항 등의 향상된 특성을 가지는 박막이 생성되었다. 저압 화학증착법에서 WF_6 만을 반응기체로 사용하였을 경우는 실리콘 기판의 환원반응에 의하여 텅스텐 박막이 증착되며 박막성장은 실리콘 기판 활동면의 잔존량이 감소함에 따라 수 백 Å 정도에서 제한되었다. 그러나 WF_6 와 환원기체인 SiH_4 를 함께 사용한 경우는 먼저 실리콘 기판의 환원반응에 의한 텅스텐 박막의 증착과 SiH_4 환원반응에 의한 증착의 두 단계로 박막성장이 진행되었으며 평균 $300 \text{ \AA}/\text{min}$ 정도의 증착속도로 증착이 이루어졌다. 저압 화학증착법에서 박막성장은 주로 island by island 양식을 따르고 박막이 성장함에 따라 단결정 구조가 증가하는 것으로 추정되었으며 박막의 구조는 α -W의 체심입방구조를 가지는 것으로 확인되었다.

참고문헌

1. R. A. Levy and M. L. Green, *J. Electrochem. Soc.* **134**, 37C (1987).
2. N. E. Miller and I. Beinglass, *Solid State Technol.* **23**, 79 (1980).
3. D. L. Brors, J. A. Fair, K. A. Monning and K. C. Saraswat, *Solid State Technol.* **26**, 183 (1983).
4. K. C. Saraswat, D. L. Brors, J. A. Fair, K. A. Monning and R. Beyers, *IEEE Trans. Electron Devices* ED-30, 1497 (1983).
5. D. L. Brors, J. A. Fair, K. A. Monning and K. W. Saraswat, *Low Pressure Chemical Vapor Deposition of Tungsten Silicide* (in *Semiconductor International*, May, 1984) p. 82.
6. W. M. Green, D. W. Hess and W. G. Oldham, *J. Appl. Phys.* **64**(9), 4696 (1988).
7. M. L. Green and R. A. Levy, *J. Electrochem. Soc.* **132**, 1234 (1985).
8. T. Ohba, S. Inoue and M. Maeda, *IEEE IEDM Tech. Dig.* 213 (1987).
9. H. Kotani, T. Tsutsumi, J. Komori and S. Nugao, *IEEE IEDM Tech. Dig.* 217 (1987).
10. N. Lifshitz, J. M. Brown, C. D. Capio and D. S. Williams, *J. Electrochem. Soc.* **134**, 2061 (1987).

11. H. H. Busta and C. H. Tang, *J. Electrochem. Soc.* **133**, 1195 (1986).
12. K. Y. Tsao and H. H. Busta, *J. Electrochem. Soc.* **131**, 2702 (1984).
13. F. C. Frank and J. H. van der Merwe, *Proc. Roy. Soc. (London)* **A200**, 125 (1949).
14. M. Volmer and A. Weber, *Z. Phys. Chem.* **119**, 277 (1926).
15. J. N. Stranski and L. Krastanov, *Ber. Akad. Wiss. (Wien)* **146**, 797 (1938).
16. J. A. Rodriguez and D. W. Goodman, *J. Phys. Chem.* **95**, 4196 (1991).
17. M. L. Green, Y. S. Ali, T. Boone, B. A. Davidson, L. C. Feldman and S. Nakahara, *J. Electrochem. Soc.* **134**, 2285 (1987).