

## Penning 방전을 이용한 실리콘 CVD

김태훈 · 이지화

서울대학교 공업화학과  
(1996년 2월 6일 접수)

### Penning Discharge Assisted Chemical Vapor Deposition of Silicon

Tae-Hoon Kim and Jihwa Lee

Department of Chemical Technology, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea  
(Received February 6, 1996)

**요 약** - Penning 방전에 의한 실리콘박막 증착실험을 5% SiH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>와 초순수 Ar을 혼합하여 수행하였고 반응기체 조성, 증착온도, 방전전력 등의 증착조건들이 증착속도와 박막의 결정성 및 morphology에 미치는 영향을 고찰하였다. 방전영역 내의 자기장(800 G)에 의해 1 mTorr 이하의 비교적 낮은 압력에서 방전전류가 수 배 증가하였고 플라즈마 한정효과를 얻을 수 있었다. 자기장에 의한 플라즈마 밀도 증가에 의해 0.7 sccm의 SiH<sub>4</sub>에 대해 800°C에서 300 Å/min의 비교적 큰 증착속도를 보였다. Raman 스펙트럼, XRD와 SEM 분석결과로부터 800°C이상에서는 매끈한 표면의 단결정 실리콘, 400°C에서는 비정질 실리콘이 성장하였고 그 사이 영역의 온도에서는 거친 표면의 다결정 실리콘이 성장하였다.

**Abstract** - Silicon deposition by Penning discharge was carried out using a mixture of 5 % SiH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> and Ar gas, and the effects of the deposition conditions(gas mixing ratio, substrate temperature, discharge power etc.) on the growth rate, crystallinity and morphology of the films deposited were investigated. The magnetic field(800 G) confined the plasma in the region between the two cathodes and enhanced the discharge current by a factor of a few hundreds below 1 mTorr. The magnetic field-enhanced plasma density resulted in a very large deposition rate of about 300 Å/min at SiH<sub>4</sub> flow rate of 0.7 sccm and the substrate temperature of 800°C. Characterization of the films by Raman spectroscopy, X-ray diffraction, and scanning electron microscopy revealed that an epitaxial film with a smooth surface grows above 800°C, an amorphous film below 400°C, and a rough polycrystalline film at intermediate temperatures.

### 1. 서 론

단결정 실리콘박막은 bipolar 직접회로나 금속-산화물-반도체(MOS) 소자의 제작에 널리 쓰이고 있다. 소자 크기의 수평 및 수직축소를 통한 고집적화가 큰 관심을 끌고 있는데 이를 위해서는 dopant의 확산과 autodoping을 줄일 수 있는 낮은 온도에서의 실리콘박막성장이 필수적이다. 저온 증착방법에는 Si-MBE [1], photo CVD [2], LPCVD [3], ion beam deposition [4], PECVD [5~12] 등이 있다. 각각의 방법이 장단점을 갖지만 PECVD는

기상에서 전자 등과의 충돌에 의해 반응종이 여기되므로 비교적 낮은 온도에서 큰 박막성장속도를 갖고, 가속된 이온의 표면충돌로 인해 에피막성장에 필요한 표면이동도를 높이므로 저온 에피성장이 가능하다. 그러나 기판이 플라즈마에 침잠하게 되면 sheath 전위에 의해 가속된 이온의 너무 높은 충돌에너지로 인해 오히려 격자손상을 유발하는 것이 단점이다[5]. 이러한 이온에 의한 박막손상을 줄이기 위해 RPCVD (Remote Plasma enhanced Chemical Vapor Deposition)에 대한 연구가 근간에 활발해지고 있다[13~17]. 현재 널리 쓰이는

RPCVD 방법은 증착반응기와 연결된 석영관 외부에 rf 코일을 감아 Ar과 같은 불활성기체의 플라즈마를 발생시키고 SiH<sub>4</sub>와 같은 증착기체는 플라즈마 영역 아래에서 링 모양의 기체공급관을 통해 유입시켜 여기된 아르곤(Ar\*) 등에 의해 SiH<sub>4</sub>를 활성화시키는 간접 플라즈마 증착법이다. 이 방법은 이온의 충돌로 인한 박막손상을 줄일 수 있는 장점에 반해 반응기체의 여기가 플라즈마와의 간접접촉에 의하므로 여기효율이 낮기 때문에 효과적인 증착기체의 활성화를 위해서는 플라즈마 발생영역에서의 큰 방전전력이 요구된다. 또한 방전기체압력 및 방전전력에 따라 플라즈마 발생영역이 연장되기 쉽기 때문에 플라즈마의 한징에도 어려움이 있다.

Penning 방전은 [18~24] 자기장에 의한 전자의 나선형운동으로 인해 기체의 이온화 효율이 높기 때문에 방전이 어려운 1 mTorr 이하의 낮은 압력에서도 쉽게 방전이 유지되며 이러한 특성으로 인해 초고진공용 이온펌프나 낮은 압력측정용 게이지에 이용되고 있다. 또한 비교적 큰 플라즈마 밀도를 얻을 수 있고, 자기장이 존재하는 영역에만 플라즈마를 한정시킬 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 Penning 방전장치를 제작하고 이의 방전 특성을 고찰하였고, SiH<sub>4</sub>와 Ar의 혼합기체의 Penning 방전을 방전영역 바깥에 위치한 실리콘 기판에의 실리콘박막증착에 적용하여 이온충돌에 의한 박막손상을 줄이고 증착효율을 높일 수 있는가를 시험하였다.

### 2. 실험방법

Penning 방전을 이용한 실리콘 박막증착 실험을 위해 제작한 전체 장치의 개략적인 구조를 Fig. 1 a)에 나타내었다. 반응기는 수소의 배기속도가 7000 l/sec인 유화산 펌프로 배기시켰고, 펌프오일 등의 반응기 유입을 막고 반응기 내의 수증기를 제거하기 위해 수냉각 baffle 및 표면적 1100 cm<sup>2</sup>의 액체질소 트랩을 펌프와 반응기 사이에 설치하여 2×10<sup>7</sup> Torr의 기저 압력을 얻을 수 있었다. 반응 기체로는 순도 99.999%인 5% SiH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>와 Ar을 혼합하여 사용하였고 유량 조절을 위해 각각의 기체 공급선에 Mass Flow Controller

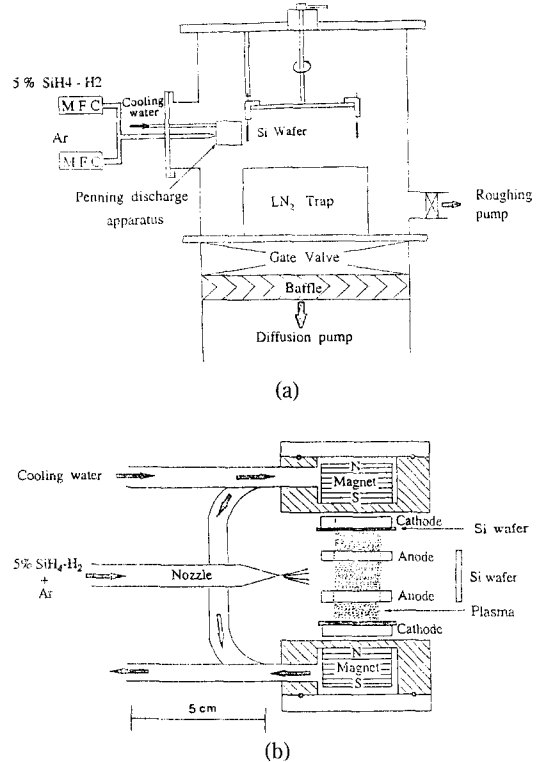


Fig. 1. Schematic diagrams of a) PECVD system and b) Penning discharge apparatus.

(MFC)를 연결하였다. 실험에 사용한 시편은 비저항 1~100 Ωcm인 n-type Si(100) 기판이고 크기는 1 cm×2 cm 이었다. 직경 1 mm 텅스텐 와이어를 클립 모양으로 가공하여 시편을 끼워 고정시키고 직류전류로 가열하였으며, 시편의 온도는 고온 세라믹 접착제로 기판 뒷면에 부착시킨 열전쌍으로 측정하였다. 또한 외부에서 회전시킬 수 있는 원판의 내칭적인 네 곳에 시편을 장착하여, 고진공을 유지한 채 연속적으로 증착실험을 수행하였다. Fig. 1 b)는 본 실험에 사용한 Penning 방전 장치를 나타낸 그림이다. 일반적으로 Penning 방전 장치는 두 음극 사이에 하나의 원통형 또는 링형의 접지전극을 갖지만, 본 실험에서는 방전공간의 가운데 영역으로의 반응 기체 흐름을 원활히 하기 위해 두 개의 링 전극을 사용하였다. 또한 금속전극의 스퍼터링에 의한 박막의 오염을 막기 위해 두 개의 원판형 음극(φ=2.5 cm)의 안쪽을 실리콘 기판으로 가렸다. 방전공간에 자기장을 가해주기 위해 사용한 Nd 영구자석(φ=2.5

cm)의 Curie 온도는 약 70°C로 낮아서 자성을 쉽게 잃기 때문에 증착반응시 자석을 가열된 시편과 플라즈마로부터 차단시키기 위해 냉각수가 흐르는 구리통 내에 자석을 위치시켰다. 두 음극 바깥쪽에 둔 Nd 영구자석에 의한 방전공간 가운데의 자기장 세기는 850 G 이었다. 원하는 비율로 혼합된 두 기체는 quartz nozzle( $\Phi = 1.5$  mm)을 통하여 빔의 형태로 두 양극 링 사이로 유입시켰다. 혼합기체가 35 sccm 유입될 때 반응기의 압력은 약 1 mTorr 정도이나 플라즈마 영역의 실제압력은 더 높다 하겠다. 1 mTorr의 압력에서 원판형의 두 음극에 -1200~-1600 V의 직류전압을 공급함으로써 약 8~16 mA의 음극전류값을 얻을 수 있었다. 시편 표면의 산화막과 불순물을 제거하기 위해 외부에서 RCA 법으로 세척한 후  $2 \times 10^7$  Torr의 고진공 하에서 1000°C로 10분 동안 산화막을 SiO로 열탈착하는 방법을 사용하였다. 세척 후 실험조건으로 반응기체를 흘리고 증착온도를 맞춘 다음 전압을 조절함으로써 원하는 방전전력을 설정하였다. 증착된 박막의 결정성은 XRD와 Raman 스펙트럼으로 분석하였고 음극 물질의 스퍼터링에 의한 금속 불순물 함유량을 Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)로 측정하였으며 주사전자현미경으로 박막 표면의 매끈한 정도를 관찰하였다. 박막의 두께는 증착시  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 의 Si 기판으로 시편을 가려서 생긴 중앙의 계단을  $\alpha$ -step으로 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. Penning 방전의 특성

1 mTorr의 Ar 분위기 하에서 음극전압에 따른 음극전류값의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 자장이 없는 경우 dc glow 방전이 생성되며 이 때의 음극전류는 매우 낮은 값을 보이는 데 반해 850 G의 자기장이 존재할 경우 음극 전류값이 수 백 배 증가하였다. 또한, Penning 방전의 경우 음극전압 1.5 kV에서 음극전류값이 15 mA이었고 Nd 영구자석에 의해 Penning 방전이 발생하는 음극전극의 면적은  $7.5\text{cm}^2$ 이므로 이는 전류밀도  $2\text{mA/cm}^2$ 에 해당한다. 일반적으로 rf 나 dc glow 방전은 1 mTorr의 압력에서는 방전개시가 어렵거나 전류밀도가 매우

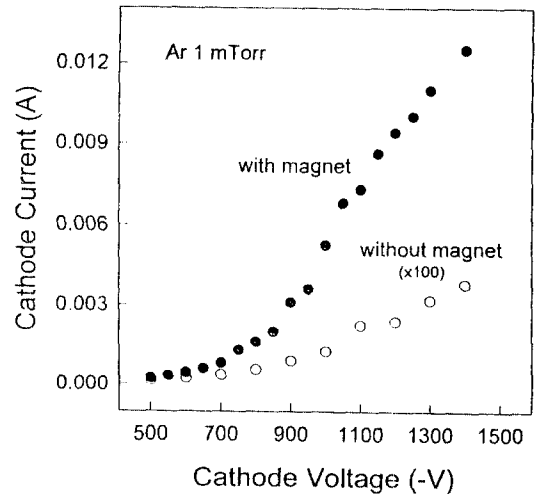


Fig. 2. Penning discharge current as a function of the cathode voltage with and without magnetic field( 850 G at the center).

작지만(예로 들면 Ar 50 mTorr, 2 kV 조건에서도  $0.25\text{mA/cm}^2$ 의 작은 전류밀도를 갖는다 [25].) Penning 방전의 경우 자기장에 의한 전자의 나선형 운동으로 인해 기체의 이온화 효율이 증가하므로 큰 전류밀도를 얻을 수 있었다. 음극 전류값( $i$ )의 압력( $P$ )에 대한 의존성은 다음과 같다[20].

$$i = k \times P^n, n = 1 \sim 1.15$$

본 실험의 경우 방전기체 Ar, 음극전압 1 kV 조건에서 기체압력에 따른 음극전류값을 도시한 결과를 Fig. 3에  $\log i$  vs  $\log P$  도식으로 나타내었다. 전형적인 Penning 방전의 특성인 직선관계를 보이며 그 기울기로부터 구한  $n$  값은 1.05 이었다. 또한, 1 mTorr, 26 W에서 링 전극으로부터 1 cm 거리에 위치한 기판의 floating 전위가 -0.1 V 정도로 매우 작은 값을 갖는데, 이는 1 mTorr의 낮은 압력조건에서 자기장에 의한 플라즈마 한정효과가 매우 뛰어남을 의미한다. 그러나 수 mTorr 이상의 압력에서는 Penning 방전영역 바깥에서도 글로우 방전이 생성되었다. 압력이 높을 수록 일정 방전전압에서 플라즈마밀도가 증가하지만 플라즈마 한정효과를 동시에 얻기 위해서는 1 mTorr 이하의 낮은 압력이 필수적이기 때문에 아래 제시한 결과들은 플라즈마가 음극전극 사이에 한정되는 1 mTorr에서 수행하였다.

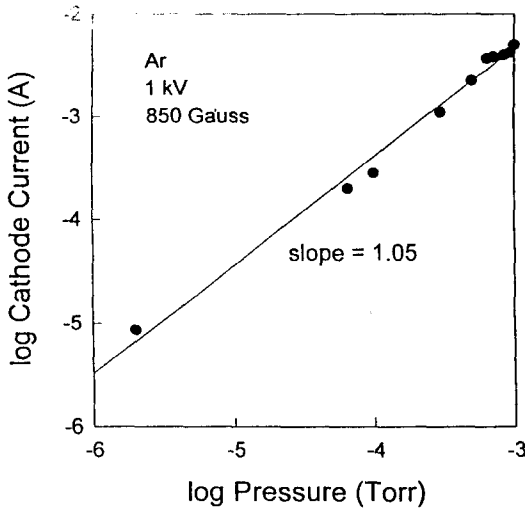


Fig. 3 Plot of the cathode current vs. gas pressure using Ar as a test gas.

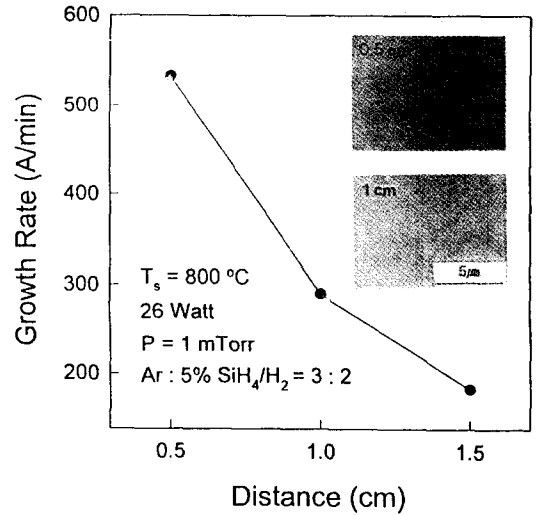


Fig. 5. Growth rate vs. the substrate position from the plasma edge. SEM micrographs in the inset show the surface morphology of the films grown at a distance of 0.5 cm and 1 cm, respectively.

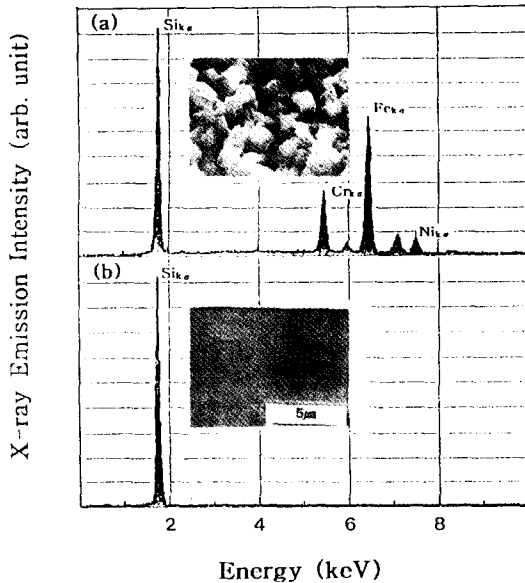


Fig. 4. EDS spectra and SEM micrographs showing (a) a rough and contaminated silicon film and (b) a smooth and pure silicon film which were deposited using a stainless steel and a silicon wafer cathod, respectively.

### 3.2. Penning 방전에 의한 실리콘 박막 증착

5% SiH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> 14 sccm, Ar 21 sccm을 공급하고 방전전력 26 W, 기판온도 800°C 조건에서 스테인레스강 원판을 음극전극으로 사용하여 증착된 실리

콘 박막을 EDS로 분석한 결과 Si 외에도 스테인레스강의 구성원소인 Fe, Cr, Ni 등의 금속불순물이 약 40%정도 함유되어 있었다. 이는 Penning 방전은 큰 운동에너지를 갖는 이온충돌에 의해 음극물질인 스테인레스강의 스퍼터링이 잘 일어나기 때문이다[21]. 이러한 금속오염을 막기 위해 증착하고자하는 박막과 같은 실리콘 기판으로 음극전극을 가려서 금속전극이 플라즈마에 노출되지 않도록 한 경우는 순수한 실리콘 박막이 증착되었다(Fig. 4). 증착된 박막 표면의 SEM 사진들을 비교하면 금속 불순물이 다량 존재하는 박막은 매우 울퉁불퉁하였고 순수한 박막은 매끈하였다.

플라즈마 영역과 증착시편과의 거리에 따른 증착속도 및 surface morphology 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 링전극 가장자리와 증착시편과의 거리가 0.5 cm에서 1.5 cm로 멀어지면 증착속도는 약 540 Å/min에서 190 Å/min로 급격하게 감소한다. 이처럼 증착속도의 거리 의존성이 큰 이유 중의 하나는 SiH<sub>4</sub>를 이용한 실리콘 박막증착시 주된 증착반응 전구체인 SiH<sub>3</sub>와 SiH<sub>2</sub> 등이 기판까지 도달하기 전에 라디칼의 재결합등에 의해 소멸되기 때문이라고 사료된다[13]. 또 다른 이유로는 반응기체가 노즐로부터 분사되므로 거리가 멀어지면 기

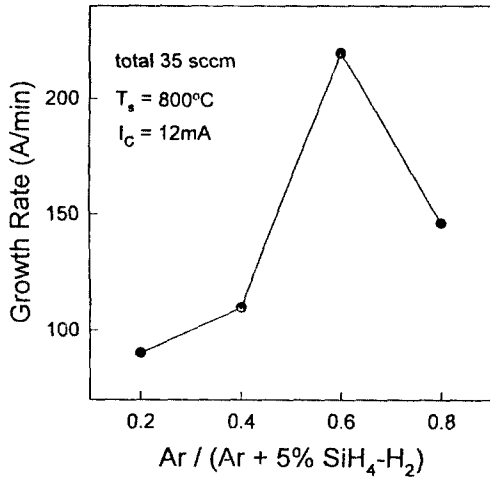


Fig. 6. Effect of Ar dilution in the gas mixture on the growth rate.

체질이 확산되기 때문에 시편이 놓인 위치에서의 반응기체밀도가 낮아지고 또한, 음극전극을 가린 실리콘 기관의 스퍼터링에 의한 증착반응의 기여도가 감소하기 때문이다. 증착속도 관점에서는 거리를 가깝게 하는 것이 유리하지만 증착시편이 0.5 cm 정도로 가까이 위치하면 박막 표면에 작게 파인 자국이 존재한다(Fig. 5 내의 SEM 사진). 비교적 큰 증착속도 (300 Å/min)를 갖는 1 cm의 가까운 거리에서는 매끈한 표면을 갖는 실리콘박막을 증착할 수 있었다.

Fig. 6은 증착온도 800°C, 음극전류값 12 mA, 혼합기체 총유량 35 sccm 조건에서 5% SiH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>와 Ar의 혼합비에 따른 증착속도의 변화를 나타낸 것이다. 5% SiH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>의 비율이 낮은 영역에서는 비례하여 증가하다가 5% SiH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>와 Ar의 비가 2:3 일 때 최대 증착속도를 갖고, 5% SiH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>의 비율이 큰 영역에서는 증착속도가 다시 감소하였다. SiH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>의 비율이 5%로 일정하게 하고 음극전류값을

12 mA로 같게 하여 플라즈마 밀도를 일정하게 유지하였기 때문에, Ar의 비율이 0.6인 조건에서 최대 증착속도를 갖는 것은 혼합기체중 Ar의 함량이 증착속도를 변화시키는 중요한 요소의 하나라는 것을 암시한다. 즉 플라즈마 내에서 전자충돌해리반응에 의한 SiH<sub>3</sub>, 여기 이외에도 준안정 (metastable)상태의 Ar\* 여기종에 의한 SiH<sub>3</sub> 활성화 반응이 증착효율에 큰 영향을 미치기 때문이라 생각된다. SiH<sub>4</sub>를 이용한 실리콘박막 증착에서의 주 활성화종으로 알려진[26] SiH<sub>3</sub>와 SiH<sub>2</sub> 라디칼의 주된 생성반응인 전자충돌해리반응 및 아르곤에 의한 Penning 해리반응의 속도상수를 Table 1에 비교하였다. 이로부터 준안정상태의 아르곤 여기종에 의한 silane의 해리반응이 증착반응에 크게 기여함을 쉽게 유추할 수 있다. 또한 SiH<sub>4</sub>의 분압이 낮은 경우도 작은 증착속도를 가지며 SiH<sub>4</sub>의 분압에 비례하는 것은 음극전극을 가린 실리콘 기관의 아르곤 스퍼터링에 의한 증착보다는 SiH<sub>4</sub>의 해리에 의한 증착반응이 주된 경로임을 시사한다.

성장온도에 따른 박막의 결정성을 보여주는 Raman 스펙트럼과 XRD 분석 결과를 Fig. 7 a)와 b)에 나타내었다. 박막의 두께는 약 2 μm로 일정하게 하였다. 400°C에서 증착된 박막은 결정질 실리콘 피크(520 cm<sup>-1</sup>)가 없고 500°C와 600°C에서는 작은 세기의 피크가, 800°C 이상에서는 단결정 실리콘 기관과 같은 모양의 피크가 관찰된다. 실리콘박막의 Raman 스펙트럼에서 520 cm<sup>-1</sup>에서 뾰족한 결정질 피크, 480 cm<sup>-1</sup>에서 작은 세기의 완만한 비정질 피크가 나타난다고 알려져 있지만[27, 28], 본 실험에서는 결정질 실리콘 피크가 관찰되지 않는 400°C에서도 비정질 피크가 관측되지 않았다. XRD 결과에서는 400°C와 800°C 이상에서는 Si (100)에 의한 피크만이 나타나고 600°C의 경우는 작은 세기의 (111), (220) 결정면에 의한 피크가 존재하며 700°C의 경우는 (111), (220), (311),

Table 1. Rate constants of SiH<sub>4</sub> dissociation by electron impact and Excitation transfer

Process	Rate Constant(× 10 <sup>10</sup> )	Reference
e <sup>-</sup> + SiH <sub>4</sub> → SiH <sub>3</sub> + H + e <sup>-</sup>	1.59	29
e <sup>-</sup> + SiH <sub>4</sub> → SiH <sub>2</sub> + H + H + e <sup>-</sup>	0.187	29
[Ar*, Ar**] + SiH <sub>4</sub> → SiH <sub>3</sub> + H + Ar	1.40	30
[Ar*, Ar**] + SiH <sub>4</sub> → SiH <sub>2</sub> + H + H + Ar	2.60	30

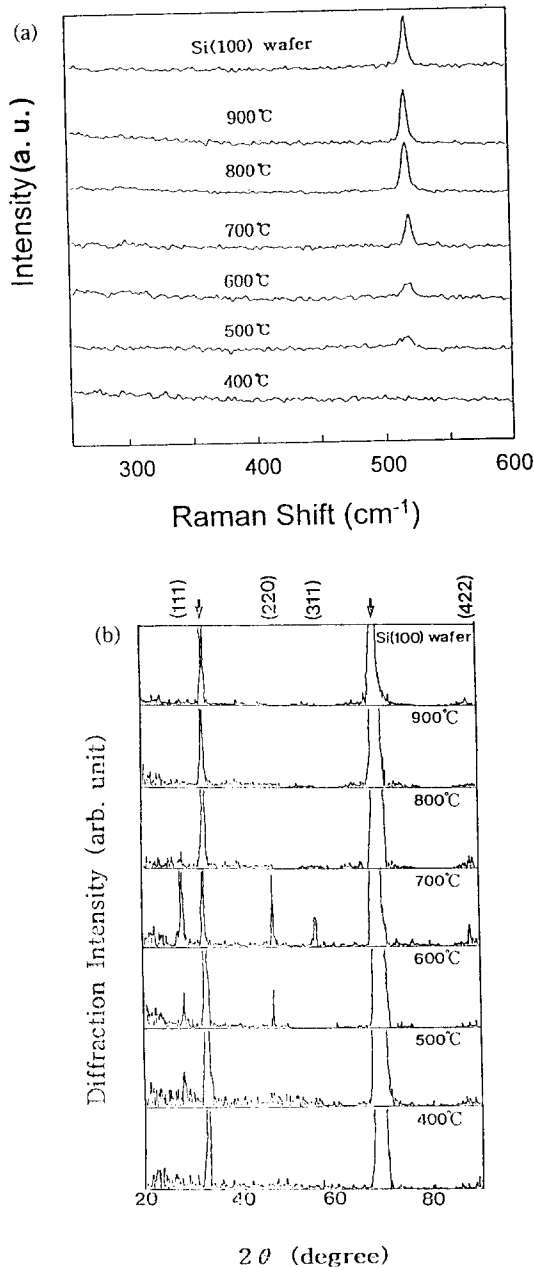


Fig. 7. a) Raman and b) XRD spectra showing the effect of the substrate temperature on the crystallinity of the Si films: 26 W; 5% SiH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>, 14 sccm and Ar 21 sccm; P=1 mTorr.

(422) 피크가 모두 나타나는 다결정 실리콘의 양상을 보인다. 그러나 800°C와 900°C에서 증착된 박막의 Raman 및 XRD 스펙트럼들은 기판 자체

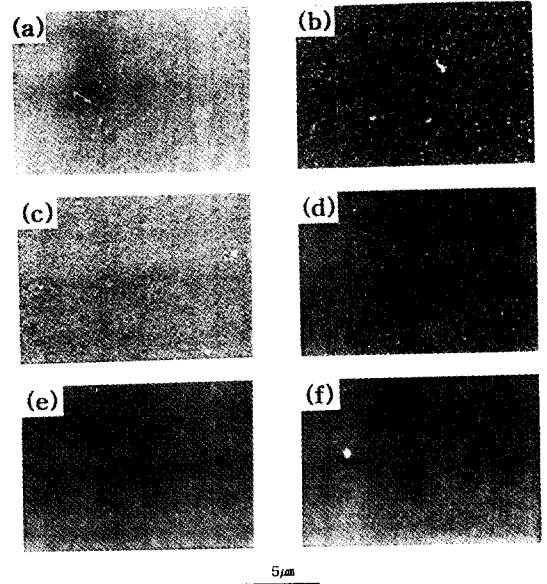


Fig. 8. SEM micrographs showing the morphology of the films deposited at various substrate temperatures: Ts= 400(a), 500(b), 600(c), 700(d), 800(e), and 900°C(f).

의 스펙트럼들과 같으므로 800°C 이상에서는 단결정이 성장하고, 400°C에서 증착된 박막은 Raman 스펙트럼에서 비정질 피크가 없었지만 XRD에서 (100)기판에 의한 피크 외에는 존재하지 않으므로 비정질 실리콘이 성장한다고 결론지을 수 있다. 여러 온도에서 증착된 박막의 표면 SEM 사진(Fig. 8)에 의하면 다결정 실리콘의 성장이 시작되는 500°C에서 증착된 박막의 표면은 비교적 거칠지만 단결정이 성장하는 800°C 이상에서는 매우 매끈하다. 다결정 실리콘의 성장이 원활한 700°C 이상의 온도 범위에서 Arrhenius plot를 한 결과 활성화에너지는 8 kcal/mol이었다(Fig. 9). 비슷한 증착조건에서 실험한 Hottier와 Cadoret [8]는 1 Torr보다 낮은 압력과 700°C 이상에서 활성화에너지가 11 kcal/mol, R. Reif 등[5]은 6 mTorr, 700°C 이상에서 10 kcal/mol의 값을 갖는다고 보고하였는데 이는 본 실험치와 유사하다.

단결정이 성장하는 온도 800°C와 900°C에서 방전전력에 따른 증착속도의 변화를(Fig. 10) 보면 방전전력에 대해 증착속도가 거의 직선적으로 증가하고, 전력이 2배가 되면 증착속도는 약 50% 증가한다. R. Reif 등[5]은 8 배의 전력 증가에 의해

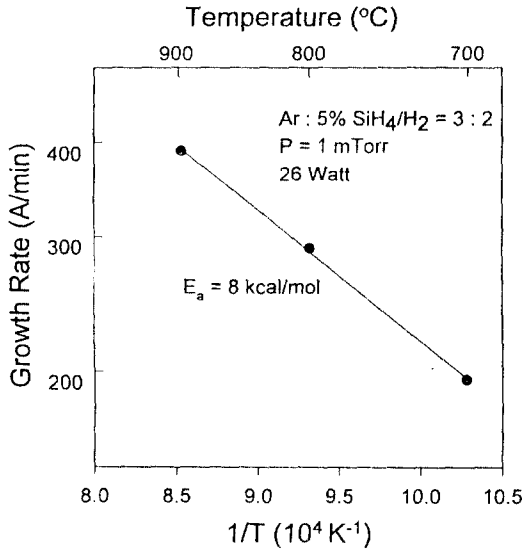


Fig. 9. Arrhenius plot of the growth rate.

약 40%의 증착속도 향상이 유발된다고 보고하였다. 본 실험에서 방전전력에 따른 증착속도 증가가 매우 큰 이유는 R. Reif 등[5]의 실험은 석영관에서 발생된 Ar 플라즈마의 끝부분에서 SiH<sub>4</sub> 반응기체가 플라즈마와 접촉하여 여기되는데 반하여, 본 실험에서는 SiH<sub>4</sub> 반응기체가 플라즈마 내에서 직접 여기되므로 방전전력이 활성종의 농도에 직접적인 영향을 미치고, 또한 증착효율이 높은 플라즈마로부터 가까운 거리에서도 플라즈마 한정효과를 얻을 수 있기 때문에 기관으로의 활성종 도달 가능성이 보다 높기 때문으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 플라즈마원으로 사용한 Penning 방전은 850 G의 자기장에 의해 1 mTorr 정도의 낮은 압력에서도 2 mA/cm<sup>2</sup>의 큰 방전전류 밀도를 얻을 수 있었고, 링접지전극의 가장자리로부터 1 cm 떨어진 위치에서도 플라즈마 한정효과가 매우 뛰어나다. 그러나 Penning 방전은 가속된 이온에 의해 음극 물질의 스퍼터링이 원활히 일어나 박막에 금속불순물이 다량 함유되었으나 음극을 실리콘 기관으로 가림으로써 순수한 실리콘박막을 증착할 수 있었다. 플라즈마로부터 기관 사이의 거리가 멀어질수록 증착속도는 급격히 감소하였는

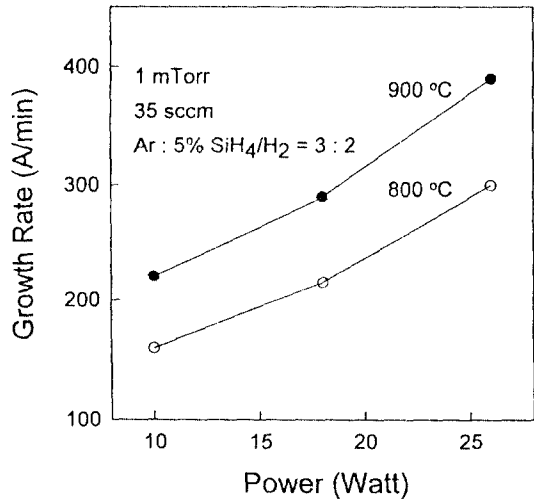


Fig. 10. Variation of the growth rate as a function of the Penning discharge power.

데 이는 반응에 참여하는 활성종이 수명이 짧은 SiH<sub>2</sub>와 SiH<sub>3</sub> 등의 라디칼임을 시사하는 결과이다. 또한, 반응기체 조성에 따른 증착속도 변화로부터 준안정상상태의 아르곤 여기종이 증착반응에 크게 기여함을 알 수 있었다. 비교적 낮은 온도인 800°C에서 표면이 매끈한 단결정 실리콘이 성장하였으며, 26 W에서 0.7 sccm의 SiH<sub>4</sub>에 대해 300 Å/min의 큰 증착속도를 얻었다. Power에 대해 증착속도는 직선적으로 증가하며 2배의 power 증가로 약 50%의 큰 증착속도 향상을 얻을 수 있었다.

Penning 방전은 스퍼터링에 의한 문제점만 해결된다면 수 mTorr 이하의 낮은 압력에서도 높은 플라즈마밀도와 플라즈마 한정효과를 필요로 하는 공정에 매우 적합한 플라즈마 공급원이라고 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 우수연구센터인 서울대학교 신소재 박막가공 및 결정성장연구센터의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. J.C. Bean, J. Crystal Growth, **81**, 411(1987).

2. S. Nishida, T. Shiimoto, A. Yamada, S. Karasawa, M. Konagai, and K. Takahashi, *Appl. Phys. Lett.* **49**, 79(1986).
3. B.S. Meyerson, *Appl. Phys. Lett.* **48**, 797(1986).
4. H. Yamada and Y. Torii, *J. Appl. Phys.* **64**, 702(1988).
5. J.H. Comfort and R. Reif, *J. Electrochem. Soc.* **136**, 2398(1989).
6. C.C. Tsai, G.B. Anderson and R. Thompson, *J. Non-crystalline Solids*, **137**, 673(1991).
7. S.J. Deboer *et al*, *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 2528(1995).
8. L.M. Garverick *et al*, *J. Appl. Phys.*, **62**, 3398(1987).
9. T.J. Donahue and R. Reif, *J. Appl. Phys.* **57**, 2757(1985).
10. T. Yew and R. Reif, *Appl. Phys. Lett.* **55**, 1014(1989).
11. T.J. Donahue, W.R. Burger, and R. Reif, *Appl. Phys. Lett.* **44**, 346(1983).
12. C.H. Chen *et al*, *Appl. Phys. Lett.* **62**, 3126(1993).
13. B. Anthony *et al*, *J. Electronic materials.* **19**, 1089(1990).
14. S.V. Hattangady *et al*, *Appl. Phys. Lett.* **59**, 339(1991).
15. C.H. Chen, T. Yew, *J. Cryst. Growth*, **147**, 305(1995).
16. M.D. Shieh, C. Lee and T. Yew, *J. Electrochem. Soc.*, **141**, 3584(1994).
17. T. Hsu *et al.*, *J. Electronic Materials* **19**, 1043(1990).
18. J. Backus, *J. Appl. Phys.* **30**, 1866(1959).
19. R.L. Jepsen, *J. Appl. Phys.* **32**, 2619(1961).
20. W. Knauer, *J. Appl. Phys.* **33**, 2093(1962).
21. Y. Yoshida *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **61**, 598(1990).
22. Y. Sato, H. Ogawa, S. Yamada, T. Yamada, and T. Kohno, *J. Appl. Phys.*, **69**, 7933(1991).
23. N.T. Peacock and R.N. Peacock, *J. Vac. Sci. Technol. A* **6**, 1141(1988).
24. N.T. Peacock and R.N. Peacock, *J. Vac. Sci. Technol. A* **8**, 2806(1990).
25. W.D. Westwood and R. Boynton, *J. Appl. Phys.* **43**, 2471(1972).
26. A. Gallagher, *J. Appl. Phys.* **63**(7), 2406(1988).
27. J. Jang, S.C. Kim, K.C. Park, and S.K. Kim, *J. Appl. Phys.* **75**, 3184(1994).
28. T. Kaneko, M. Wakagi, K. Onisawa, and T. Minemura, *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 1865(1994).
29. M.J. Kushner, *J. Appl. Phys.*, **62**, 2803(1987).
30. J. Balamuta, M.F. Golde, and Y.-S. Ho, *J. Chem. Phys.* **79**, 2822(1983).