

Thin-film Processes

- Thin Film Deposition (I) -

☞ Thin Film 이란 ?

; 열적 성장이나 물리적 증착, 혹은 화학 반응에 의해 증착 (deposition) 되는 금속, 반도체, 부도체의 얇은 층 (수 나노~수백 나노)

☞ Thin Film Process 란 ?

; thin film deposition (증착), photolithography (사진식각), plating (도금) 및 etching (에칭) 기술을 이용하여 원하는 형상의 회로를 형성하는 일련의 과정

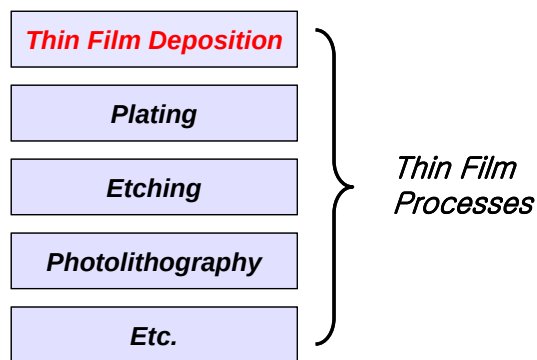


Fig. Thin film processes

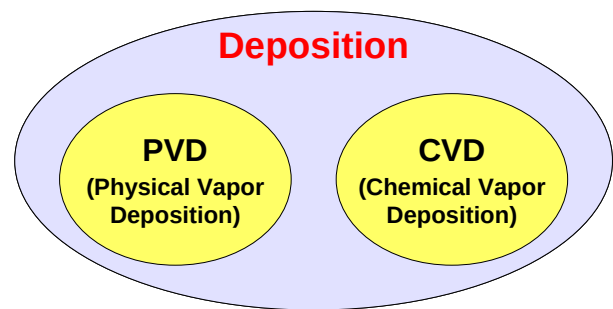


Fig. Thin film deposition methods

1. Thin Film Deposition

☞ Deposition 이란 ?

; 진공 중에서 코팅시키고자 하는 물질을 물리적 (physical) 방법 또는 화학적 (chemical) 방법으로 기화 또는 승화시켜서 원자 또는 분자 단위로 기판 표면에 응고되게 함으로써 피막을 형성시키는 방법.

; 증착은 도금 물질계 및 응고 방법에 따라 물리기상증착 (physical vapor deposition ; PVD)과 화학기상증착 (chemical vapor deposition ; CVD)으로 나눈다.

1) Physical vapor deposition

; 원하는 물질의 박막 물질의 기판이나 덩어리에 에너지를 가하여 운동에너지를 가지는 해당 물질이 물리적으로 분리되어 다른 substrate에 쌓이게 하여 박막을 만드는 방법

; 크게 evaporation (증발법)과 sputtering (스파터링)으로 나눌 수 있다.

① Vacuum Evaporation

； 진공으로 된 용기 내에서 증착 하고자 하는 물질을 가열하여 증기압을 상승시켜 기판위에 증착되게 하는 방법

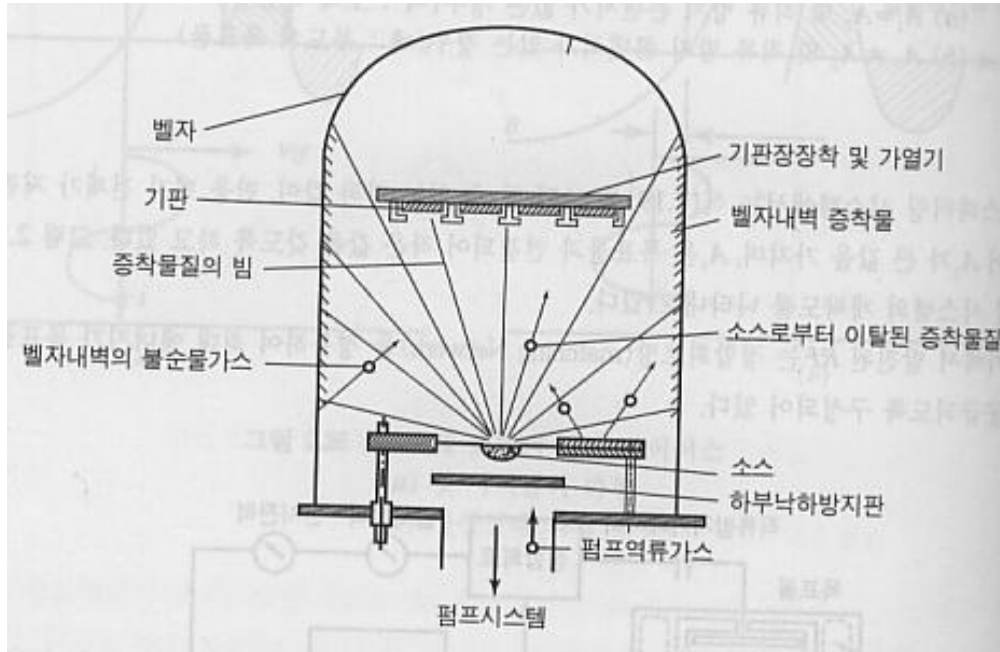


Fig. 진공 증착 장치의 기본 구조

- 증착률은 증기압에 비례 → 충분히 큰 증기압을 갖는 상태에서 증착
- 보통 증기압이 10mTorr (1.33×10^{-2} mbar) 이상 되어야 함.
- ex) Al; 1000°C 이상, Mo; 2500°C 이상
- 용기내의 가열되어 증기 상태로 기체화된 물질 분자가 이동하여 기판에 도달하는 동안 용기내의 잔존하는 다른 물질 분자들과 충돌하지 않고 직진해야 한다. → 기체분자의 자유행정거리 (mean free path) λ 을 장치크기 m 보다 훨씬 크게 하여 분자 흐름이 되게 함.

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 P}$$

where d : 기체분자의 직경, P : 압력, T : 절대온도

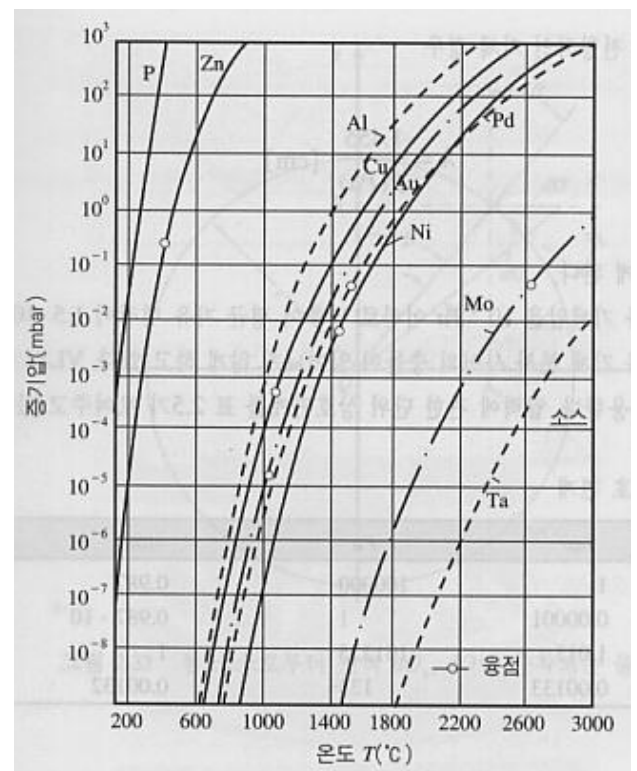


Fig. 온도에 따른 증기압

<진공 증착의 장점>

- 증착률을 크게 할 수 있다. (0.5 $\mu\text{m}/\text{min}$)
- 고진공으로 순수한 박막을 얻을 수 있다.
- 기체 분자 및 원자 에너지가 0.1 eV 정도의 낮은 에너지로 기판에 손상을 주지 않는다. (1 eV = $1.60217733 \times 10^{-19}$ J)

<단점>

- 정확한 합금 성분 조절이 어렵다.
- 기판의 in-situ cleaning이 불가능하다.
- X-선 손상이 발생한다. (E-beam 사용 경우)

◦ 박막 두께 예측

- 가정) 증착시키고자 하는 물질 Q가 원점에 있을 때 열에너지를 받은 물질이 분자 형태로 원점 위치에서 떨어져 나와 모든 방향으로 동일한 분포로 이동

- 방법) 반경 4인 구의 면적은

$$O_k = 4\pi r^2$$

이므로 dO_k 인 구의 표면에 증착될 양 dm 은

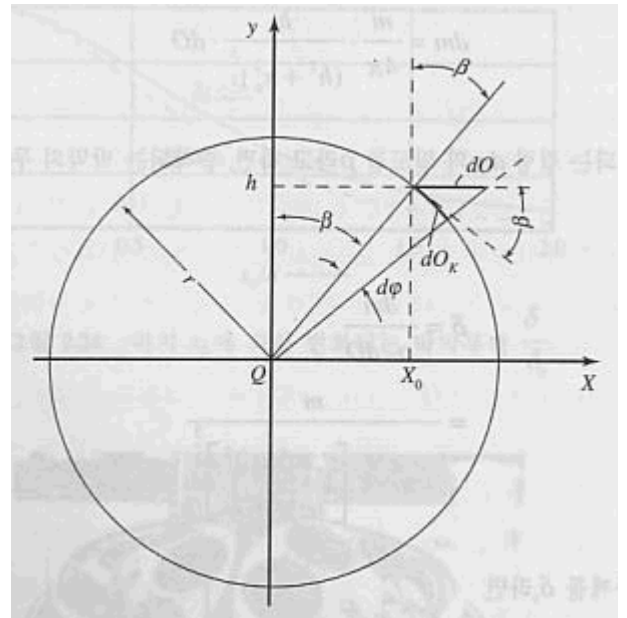
$$dm = m \cdot \frac{dO_k}{O_k} = \frac{m}{4\pi r^2} dO_k$$

where $dO_k = dO \cos \beta$ 이므로

$$dm = \frac{m}{4\pi r^2} \cdot dO \cdot \cos \beta$$

또한, $h^2 + x_0^2 = r^2$, $\cos \beta = h / (h^2 + x_0^2)^{1/2}$

$$dm = \frac{m}{4\pi} \cdot \frac{h}{(h^2 + x_0^2)^{3/2}} \cdot dO$$



따라서, dO 에 증착되는 질량 dm 의 밀도가 ρ 라면 증착되는 박막의 두께 t 는

$$t = \frac{dm}{\rho \cdot dO} = \frac{m}{4\pi \rho \cdot h^2 \left[1 + \left(\frac{x_0}{h} \right)^2 \right]^{3/2}}$$

- 같은 높이에 있는 기판들은 소스 바로 위의 위치에 있는 기판에 생성된 박막 두께에 비해 가장자리로 갈수록 박막 두께가 감소함. 따라서, 균일한 박막 두께를 요할 경우 기판들을 증착시킬 물질원을 중심으로 하는 구면에 상응한 위치에 고정 할 필요가 있다.

□ Vacuum Evaporation의 종류

; 증착시키고자 하는 물질을 가열하는 방법에 따라 구분

가) _____

- 가장 간단한 증착 방법
- 대체적으로 _____의 증착에 유리
- _____등의 물질로 보트를 만들고 증착시킬 물질을 얹어 _____을 일으킴.

<장점>

- 셋업이 간단하고 장비가 저가

<단점>

- 보트 자체 증발도 동시에 발생하여 박막에 불순물도 첨가
- 두꺼운 막을 얻기 힘들
- 고용점 금속 (W, Mo, etc)의 박막 형성에는 사용할 수 없다.
- 낮은 밀착 강도

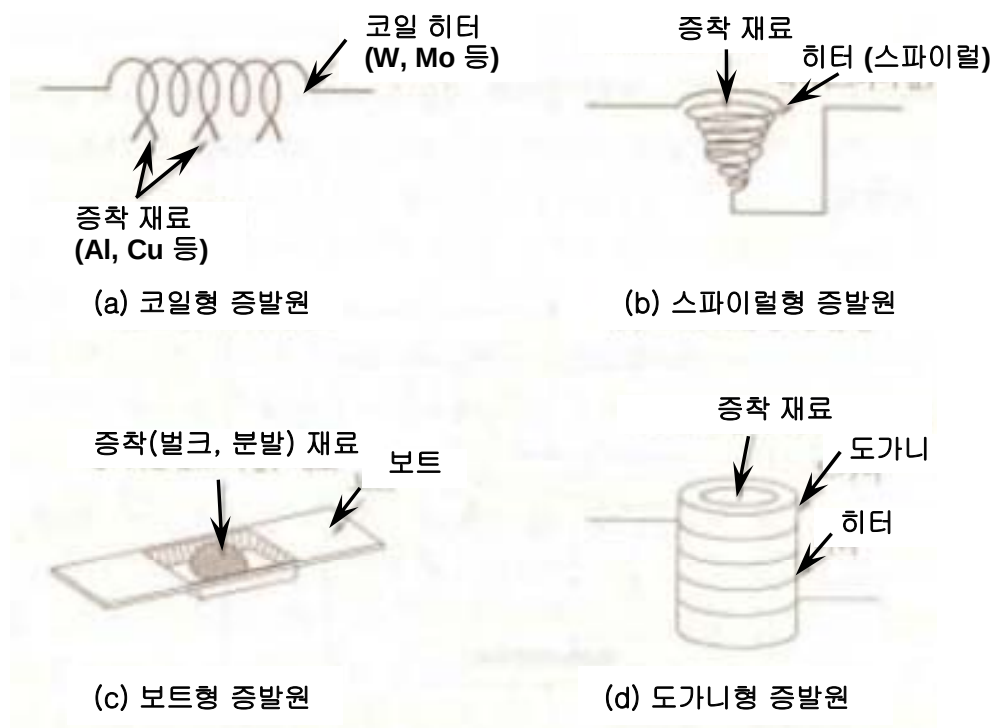


Fig. 저항열 증착법에 사용되는 증발원

나) _____

- 고주파 유도 가열 코일을 BN(boron nitride)로 만들어진 도가니 주위에 감아 고주파 전류를 흘려 가열 시키는 방법

<장점>

- BN은 열에 잘 견디고 가공하기 쉬운 부도체로 증착시킬 물질을 담는 용기 제작에 적합

<단점>

- 장비 및 공정이 복잡



Fig. 유도 가열

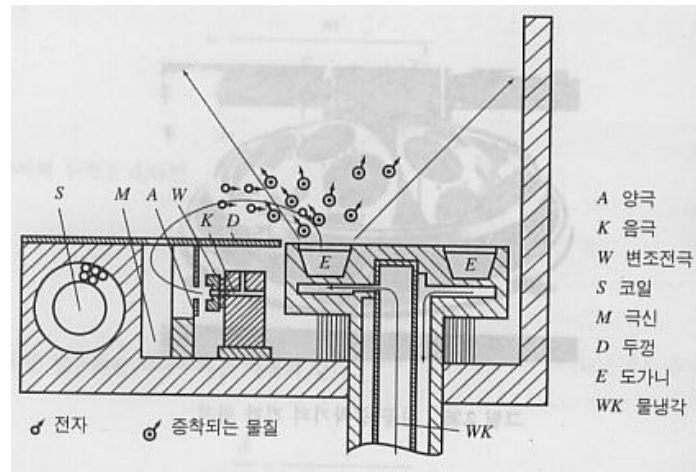


Fig. e-beam evaporator

다) _____

- Electron Beam Source인 hot filament에 전류를 공급하여 나오는 전자 beam(3 ~ 20 KeV)을 _____하여 이 전자빔을 증착물질에 집중적인 _____시켜 증착시키는 방법
- 증착 재료의 용융점이 높은 경우(W, Nb(니오브), Si)에 주로 사용

<장점>

- 증착속도가 빠르다 (5 nm/sec 가능)
- 고용점 재료의 증착 가능
- 기판이 증착 재료 주위를 회전하므로 균일한 증착막을 얻을 수 있음
- 상대적으로 많은 증착 재료를 공급할 수 있으므로 후막 생성 가능
- 도자기로부터 불순물 혼입이 없음.
- Multiple deposition 가능
- 높은 밀착 강도 (증발 물질이 비교적 높은 에너지를 가짐)
- 증착물질이 국부적으로 용융, 기화되므로 도가니와 접촉하지 않음

<단점>

- X-ray 발생 (가속전압 10 KV 이상)
- 전자 빔 source 위에 원자의 농도가 크므로 discharge가 심하다

Thin-film Processes

- Thin Film Deposition (II) - Sputtering

1) Physical vapor deposition

- ; 원하는 물질의 박막 물질의 기판이나 덩어리에 에너지를 가하여 운동에너지를 가지는 해당 물질이 물리적으로 분리되어 다른 substrate에 쌓이게 하여 박막을 만드는 방법
- ; 크게 evaporation (증발법)과 sputtering (스파터링)으로 나눌 수 있다.

① Vacuum Evaporation

- ; 진공으로 된 용기 내에서 증착 하고자 하는 물질을 가열하여 증기압을 상승시켜 기판 위에 증착되게 하는 방법

② Sputtering

- ; _____시켜 증착물질의 원자와 분자가 떨어져 나와 다른 substrate에 박막을 만드는 방법

◦ What's sputtering ?

고체의 표면에 고에너지의 입자를 충돌시키면 target 물질의 원자가 완전탄성 충돌에 의해 운동량을 교환하여 표면에서 밖으로 튀어나오게 된다. 이처럼 ion이 물질의 원자간 결합에너지 보다 큰 운동에너지로 충돌할 경우 이 ion 충격에 의해 물질의 격자간 원자가 다른 위치로 밀리게 되며, 원자의 표면 탈출이 발생하게 되는 현상을 물리학에서 “sputtering”이라고 말한다.

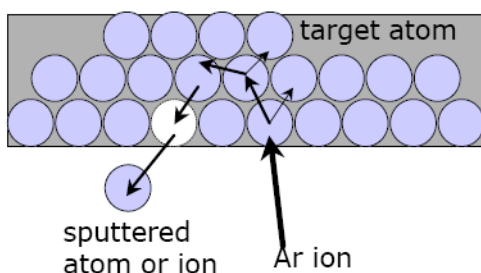


Fig. Sputter 원리

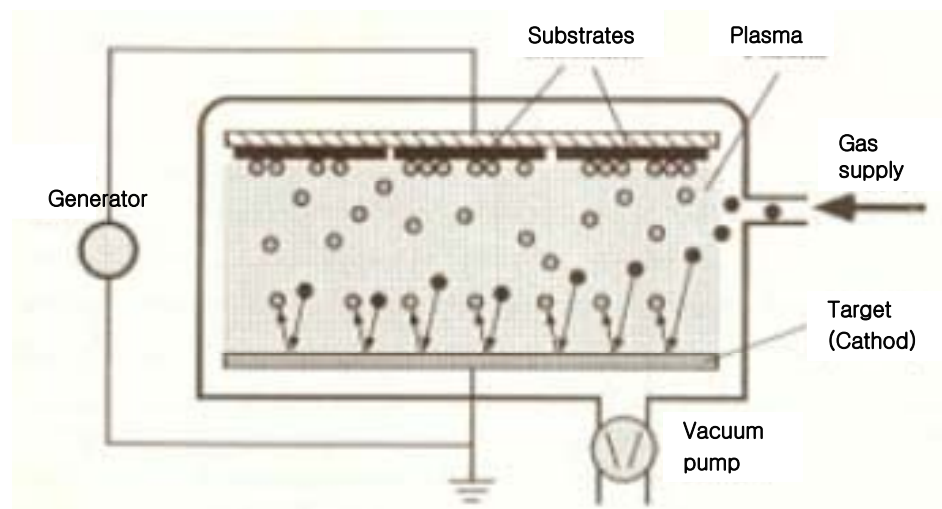
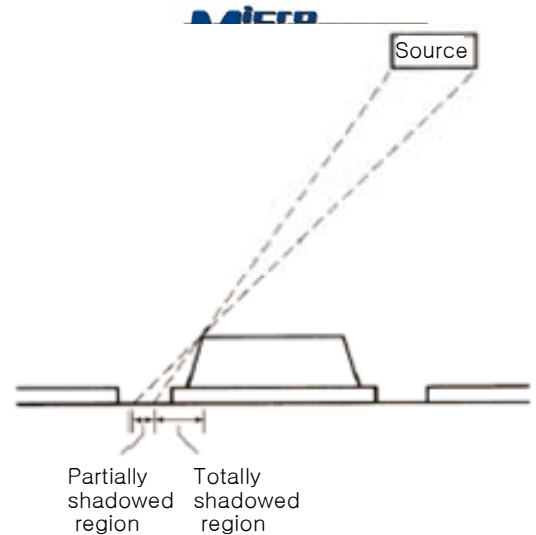


Fig. Sputtering 장비

마이크로 나노 공학

<장 점>

- 넓은 면적에 균일한 박막 두께 증착 가능
- 박막 두께 조절이 비교적 용이함
- 스텝 커버리지 (step coverage)가 좋음
- 보통 진공 증착법으로 형성 불가능한 W, Mo등의 고용점 박막 형성 가능
- 뛰어난 부착력
; 입사 이온의 에너지가 대개 수 keV ~ 수십 keV 로 상당히 크며 스퍼터 된 입자의 평균에너지가 수십 eV로 상당히 큼



<단 점>

- 고가 장비
- 낮은 증착률
- 불순물 증착

표. Evaporation법과 Sputtering법의 비교

	Evaporation	Sputtering
Deposition rate	Thousand atomic layer / s	One atomic layer / s
증착물질	Limited	Almost unlimited
Surface damage	Low	Damage
Alloy 조성	Difficult	Easy
박막의 균일성	Difficult	Easy
박막의 부착성	Poor	Excellent
Shadowing effect	Large	Small
Cost	Low	Expensive

참고) Reactive sputtering (반응성 스파터링)

- 전통적인 스파터링 방법에서 Target은 박막과 똑같은 물질로 만들고 순수 아르곤을 사용한다.
- 반응성 Process로 만드는 박막은 Target물질과 반응성 가스의 화학 화합물로 이 가스(즉 산소, 질소) Process 중 아르곤과 섞이고 Plasma 속에서의 물질반응과 박막의 원자 또는 분자는 반응 산출물에 의해 만들어 진다. 그래서 TiN 또는 SiO₂ 막을 증착 할 수 있다.

2)

원료로 _____ 해서 기판표면에서 _____ 하는 방법으로 박막을 구성하는 원소의 화합물들은 기체 또는 증기의 상태로 만들어서 가열된 기판 위에서 반응이 일어나도록 하여 필요한 원소들만 기판에 침착되도록 하는 방법

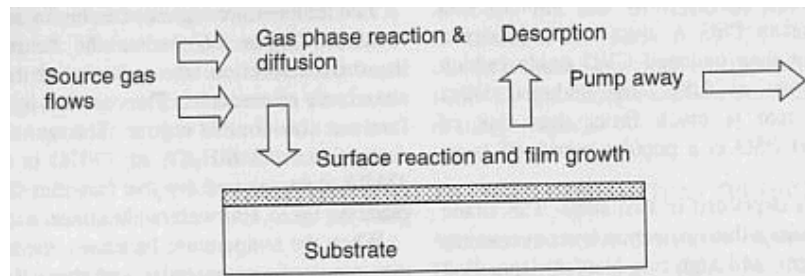


Fig. CVD process

2. 1) CVD의 분류

반응로 내부의 압력 정도에 따라 크게 APCVD(Atmospheric Pressure CVD : 상압 화학 기상 증착) LPCVD(Low Pressure CVD : 저압 화학 기상 증착)로 구분하며 APCVD는 수행 온도 영역에 의해 LTCVD (Low Temperature CVD : 저온 화학 기상 증착)과 HTCVD (고온 화학 기상 증착) 등으로 나눈다. 그외에 PECVD (Plasma Enhanced CVD), PHCVD (Photo-assisted CVD) 등이 있다.

기본적으로 ① 반응가스와 희석 가스의 주입과 측정 및 시간 조절 가능, ② 박막이 형성될 기판의 가열과 자동 온도 조절 ③ 반응 폐기 가스 배출 및 안전한 제거 기능을 갖추어야 함.

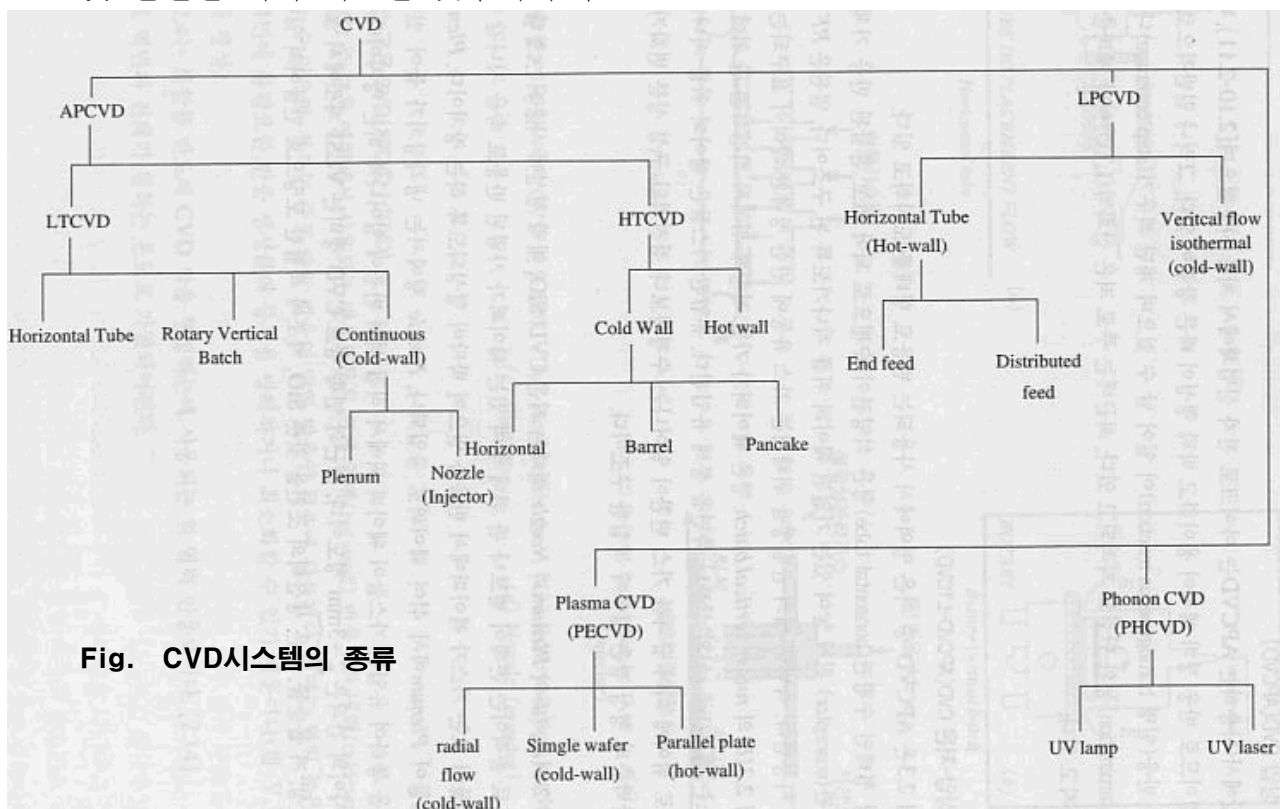


Fig. CVD시스템의 종류

□ CVD 반응의 종류

CVD 반응	화학반응식
열분해	$\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2$
환원	$\text{WF}_6 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{W} + 6\text{HF}$
산화	$\text{SiH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 2\text{H}_2$
질화	$3\text{SiH}_4 + 4\text{NH}_3 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 12\text{H}_2$
탄화	$2\text{SiH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4 \rightarrow 2\text{SiC} + 6\text{H}_2$
합성반응	$(\text{CH})_3\text{Ga} + \text{AsH}_3 \rightarrow \text{GaAs} + 3\text{CH}_4$

① APCVD (Atmospheric Pressure CVD)

- ; 상압 or 대기압 화학 기상 증착이라고 하며 반응으로 안을 일정한 온도로 유지시킨 후, 특정한 Gas를 넣어 화학적 반응을 일으켜 Wafer 위에 원하는 재료의 막을 입히는 공정
- Microelectronics 에서 가장 먼저 사용된 CVD 시스템
 - 대기압 분위기, 300 ~ 500 °C 의 온도

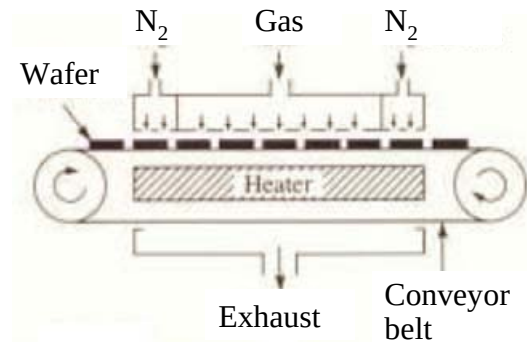


Fig. APCVD 반응장치

<장점>

- 반응 장비 제작이 용이
- 낮은 온도와 높은 증착률 (1000 Å / min)

<단점>

- 스텝 커버리지가 나쁘다.
- 박막 균일도가 상대적으로 떨어짐
- 불순물 오염
- 가스 소비가 큼

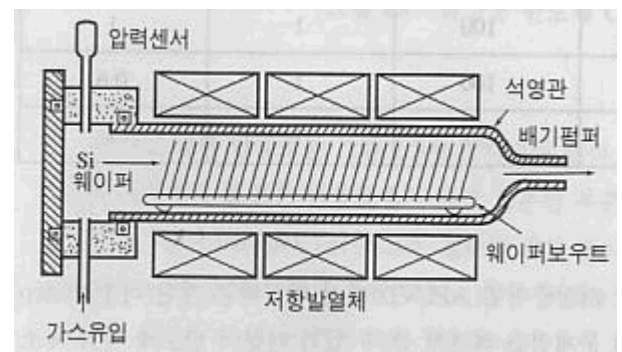


Fig. LPCVD 반응장치

② LPCVD (Low Pressure CVD)

- ; 저압 화학 기상 증착
- 0.2 ~ 2.0 torr의 압력과 300 ~ 900 °C 의 온도

<장점>

- 스텝 커버리지와 박막 균일도가 좋다.
- 낮은 불순물 입자 유입률
-

마이크로 나노 공학

<단점>

- 증착률이 낮다 ($100 \sim 500 \text{ \AA} / \text{min}$)
- 높은 온도

③ PECVD (Plasma Enhanced CVD)

; 플라즈마 보강 기상증착으로 source gas의 분해를 플라즈마를 이용함으로써 비교적 낮은 온도에서 gas를 분해 시킴으로써 박막 증착을 하는 방법

<장점>

- 저온 프로세스
- 스텝 커버리지와 박막 균일도가 좋다.
- Good adhesion
- 적은 동공(pinhole)밀도

<단점>

- Films are not stoichiometric (즉, Si_3N_4 경우 각 원자의 구성비가 화학량론적으로 정확하지 않다.)
- Variety and complex parameters for optimization condition

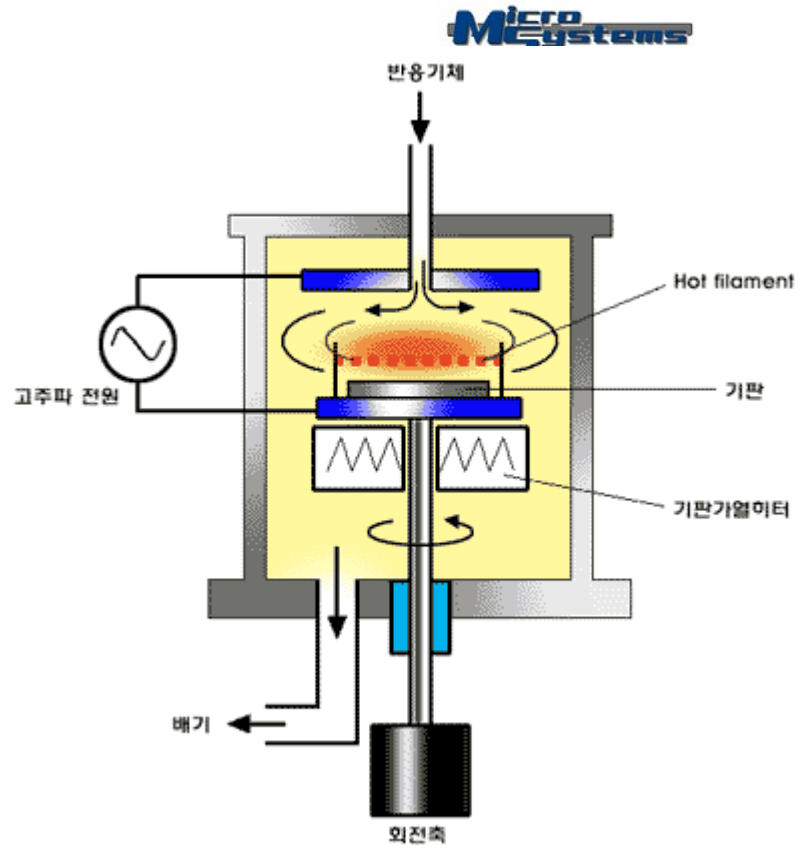


Fig. Schematic diagram of plasma CVD apparatus.

표. 각 CVD프로세스의 장단점

Process	Advantages	Disadvantages	Applications
APCVD (저온)	간단한 장치 높은 증착률 낮은 온도	나쁜 step coverage 낮은 효율	Low temp. oxides
LPCVD	양호한 순도, 균일성, Step coverage	높은 온도 낮은 증착률	High temp. oxides, Silicon Nitride, Poly-Si, W, WSi_2
PECVD	낮은 온도 높은 증착률	불순물 나쁜 step coverage	Low temp. Insulators over metals, Passivation(Nitride)

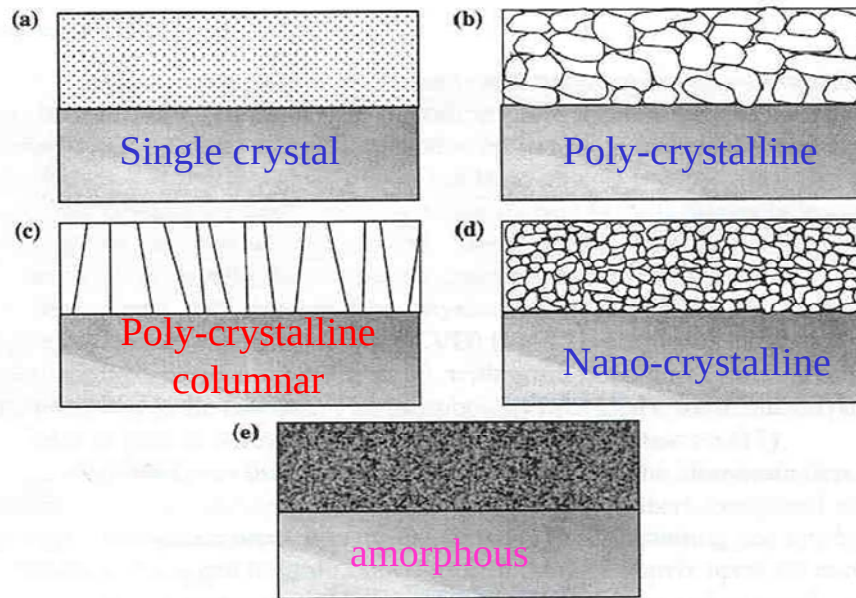


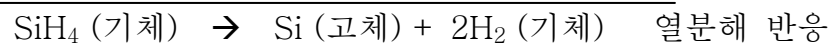
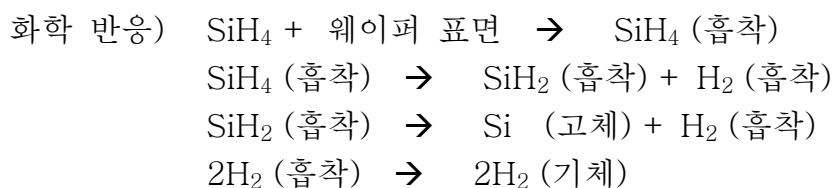
Fig. Different thin film texture

2.2) 각종 박막

① Poly-Silicon 형성

- 다결정 실리콘은 일반적으로 580 ~ 650 °C에서 _____에 의해 얻어진다.
- 보통 균일성, 순수도 및 경제성으로 LPCVD방법에 의해 제조 됨.

공정 조건) 100% SiH_4 , 기압 : 0.3 ~ 1 Torr
 25% SiH_4/N_2 기압 : 0.3 ~ 1 Torr
 25% SiH_4/H_2 기압 : ~ 1 Torr

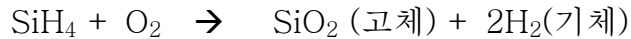


③ SiO_2 박막 형성

; CVD법으로 생성된 SiO_2 는 금속 층의 _____로 사용되며, _____으로도 사용됨.

- 저온 영역 (300 ~ 450 °C)
- 실레인 (SiH_4)과 산소 (O_2)를 이용하여 박막을 형성
- APCVD, LPCVD (분산주입형), 또는 PECVD 등 사용

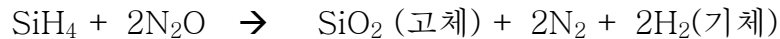
화학 반응)



; 증착률은 온도가 증가할수록 O_2/SiH_4 비율이 증가할수록 증대되나 비율이 너무 크면 기판 표면에 과도하게 흡착된 O_2 가 SiH_4 의 분해를 방해하여 증착률이 감소

- PECVD 법을 이용한 다른 방법으로 아산화질소(nitrous oxide; N_2O)를 이용 (200 ~ 400 °C)

화학 반응)



- ▶ 홀 형성이 적고 금속에 대한 접착력이 매우 강함

- 중온 영역 (450 ~ 800 °C)
- LPCVD를 이용한 Tetraethylorthosilicate (TEOS)라고 부르는 tetraethosiloxane $\text{Si}(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4$ 의 열분해에 의해 실리콘 산화층을 형성

화학 반응)



- ▶ 많은 양의 물이 발생하므로 박막층의 질 저하
- ▶ 균일성이 좋고 step coverage가 양호

- 고온 영역 (900 °C 이상)
- LPCVD를 이용한 이염화 실레인 (dichlorosilane) SiH_2Cl_2 와 산화질소 (nitrous oxide) N_2O 에 의해 실리콘 산화층을 형성

화학 반응)



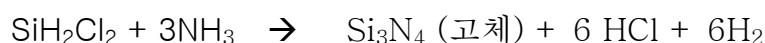
- ▶ Poly-Si위에 SiO_2 막을 형성할 때 잘 사용
- ▶ 균일성이 좋음
- ▶ 간혹 HCl과 Poly-Si이 반응하여 박막 균열을 유발

④ 질화실리콘 Si_3N_4 박막 형성

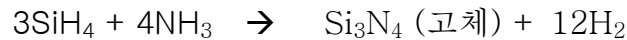
; 물이나 나트륨의 확산이 잘 되지 않는 좋은 확산 방지막으로 실리콘 소자의 최종 보호막으로 사용

- 고온 LPCVD 법
- 이염화 실레인 (dichlorosilane) SiH_2Cl_2 (700 ~ 800 °C)

화학 반응)



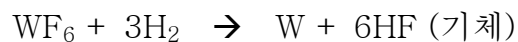
- 실레인 (SiH_4) 을 사용시는 APCVD도 사용 ($700 \sim 900 \text{ }^\circ\text{C}$)
화학 반응)



⑤ 텅스텐 W 박막 형성

; 전기적 신호 및 전력선 연결을 위한 재료로 알루미늄이 광범위하게 쓰이나 고온 공정에 적합하지 않으므로 W, Ti, Mo, Ta 등의 고융점 금속이 중요시 되고 있고 LPCVD 방법에 의해 텅스텐 박막을 만듦

화학 반응)



처음 Si와 반응된 WF_6 에 의해 Si 소모가 나타나나, 생성된 텅스텐 층으로 인해 Si 소모가 중단되고 WF_6 와 H_2 의 연이은 반응에 의해 W박막이 생성

- ▶ 실리콘(약 3 ppm/K)과 근접한 온도 팽창계수 (약 4.5 ppm/K)
- ▶ step coverage 특성이 좋고 타 물질에 비해 저항 성분이 낮아 중요 도선재료로 취급
- ▶ SiO_2 나 SiN_4 층에 약한 접착력
- ▶ $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 이상에서 산화층 형성
- ▶ $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 이상에서 silicide 형성

Thin-film Processes

- Thermal Oxidation -

1. Silicon thermal oxidation

☞ Thermal Oxidation 이란 ?

Si기판을 고온(800~1200℃) 하에서 _____에 노출시키면 산소분자가 표면에 부착하여 산화막(SiO_2)을 형성한다. 또한 SiO_2 에 부착된 산소분자는 SiO_2 안으로 확산에 의해 통과하여 Si와 SiO_2 의 계면에 도달하여 Si과 반응하여 SiO_2 가 형성

1.1 Si 산화막의 역할

- (1) _____; 웨이퍼 표면을 외계로부터 보호
- (2) _____; 예) MOSFET 게이트 산화막

참고) - active device : MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor), 다이오드, 바이폴라접합트랜지스터(BJT), JFET, 갈륨비소(GaAs)FET 등

- passive device : 저항, 커패시턴스, 자기인덕턴스, 상호인덕턴스, 전송선로 등

- (3) _____; LSI 다층배선의 층간 절연물, 불순물 도입의 마스크

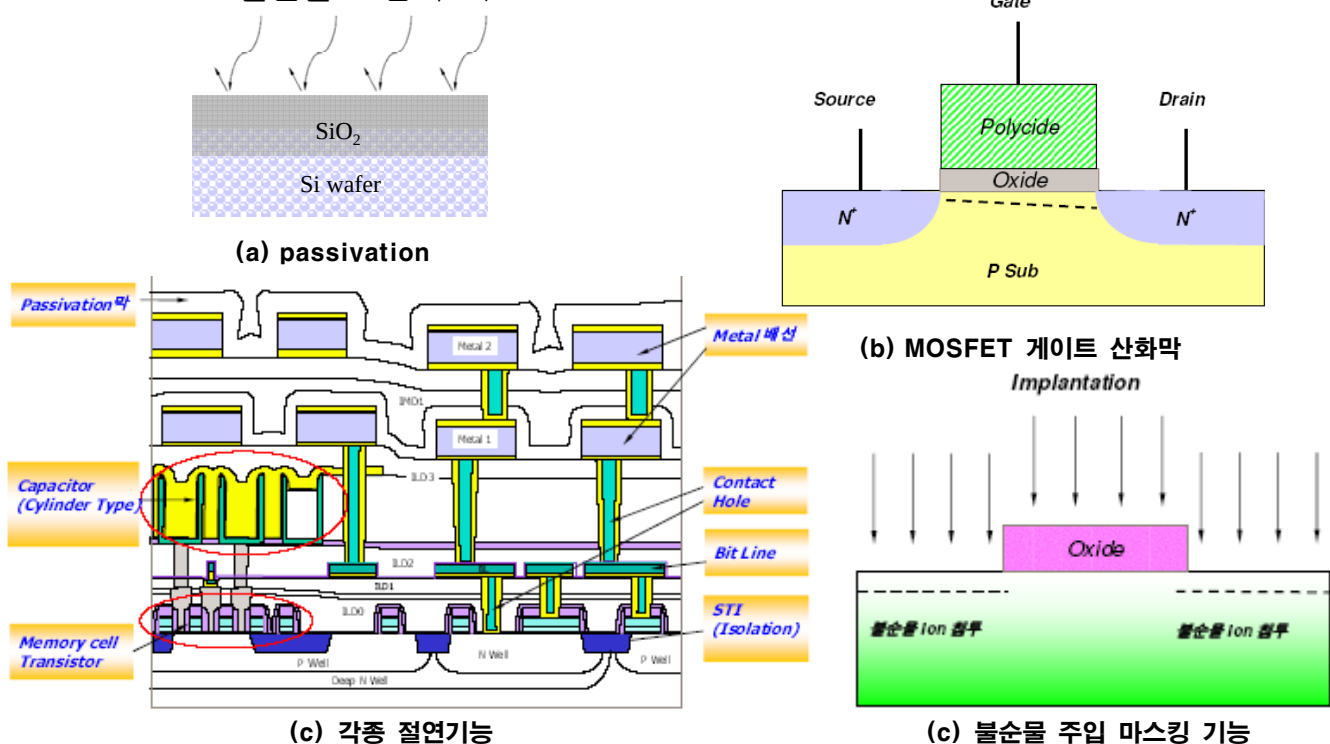


Fig. Si 산화막의 역할 출처) 반도체 공정교육 및 지원센터

□ 열산화막의 장점

- 안정한 절연막
- 막질이 우수
- Si과 매우 안정한 interface

1.2 산화막 형성법

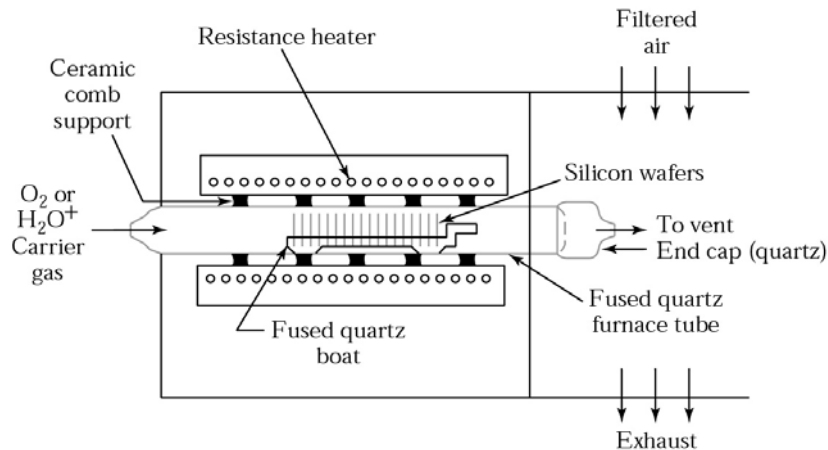


Fig. Schematic view of thermal oxidation

- (1) _____; 순수한 _____하여 약 900~1250℃ 온도로 가열하여 산화막을 형성하는 방법

$$\text{Si (solid)} + \text{O}_2 \text{ (gas)} = \text{SiO}_2 \text{ (solid)}$$

▶ 특징

- 산화막 형성이 느리다.
- 조밀성이 우수, 막질이 우수

- (2) _____; _____를 산화기체로 사용하여 약 900~1000℃ 온도로 가열

$$\text{Si (solid)} + 2\text{H}_2\text{O (gas)} = \text{SiO}_2 \text{ (solid)} + 2\text{H}_2 \text{ (gas)}$$

▶ 특징

- 산화막 형성이 빨라 두꺼운 산화막을 형성하거나 단시간 산화가 필요한 경우 유용
- 조밀성이 상대적으로 떨어지고, 막질이 떨어짐

(3) 응용 산화방법

- ① Steam oxidation (수증기산화법) ; Wet 산화방식과 같으나 적당량의 O_2 와 함께 공정 로관 속에 H_2 가 주입하여 산화막을 형성
- ② High pressure oxidation (고압산화법) ; 산화온도를 낮추어 디바이스의 열 영향을 감소시키고 wafer의 휨이나 변형 등의 발생을 줄이고 산화속도는 증대시킬 목적으로 사용

방법) 가압용기 내에 10기압 정도의 N_2 가스를 채우고 석영관과 히터를 용기내에 설치한 후 산화분위기는 N_2 가스와 같은 압력의 건조된 산소나 산소와 수소를 동시에 흘려(수소연소방식) 산화막 생성 (7기압 $1000^\circ C$ $1.8 \mu m/100 min$)

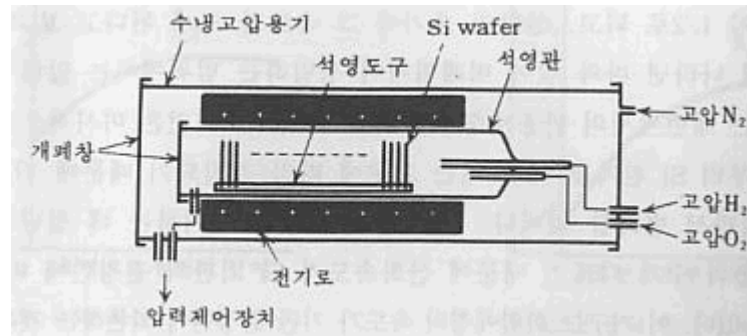


Fig. 수소 연소방식의 고압산화로

- ③ 플라즈마산화법 ; Si기판 양쪽에 백금전극을 설치하고 이 사이에 전압을 걸어 SiO_2 막 속을 이동하는 산화제의 속도를 증가시켜 산화속도를 크게 할 목적으로 사용

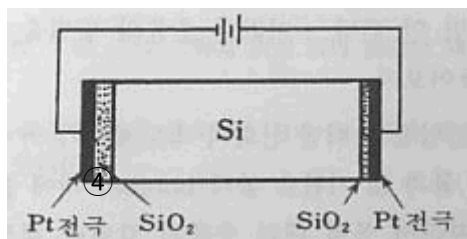


Fig. 플라즈마산화

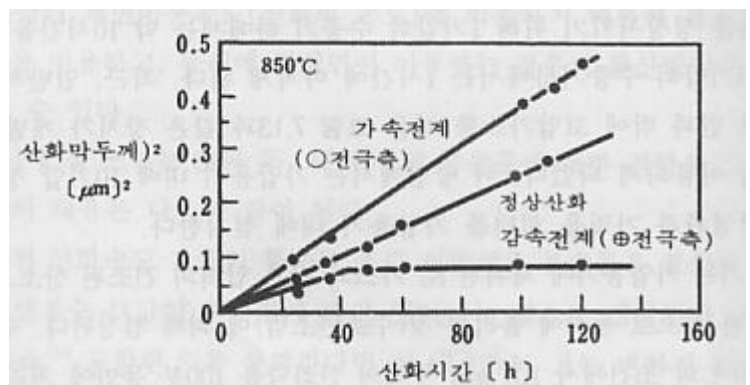


Fig. 고온 산화 속도

- ④ 양극산화 ; 상온에서 전기화학적으로 기판을 산화하는 방법.

방법) 전해조 속에서 양극과 연결된 전극에 Wafer를 연결하고 백금과 같은 귀금속을 음극에 연결하여 일정한 전압을 흐르게 하면 $Si-SiO_2$ 계면을 떠난 Si 이온이 SiO_2 막속을 전기에 따라 이동하여 산화막의 표면에서 산소와 반응하여 산화막이 생성.

화학반응)

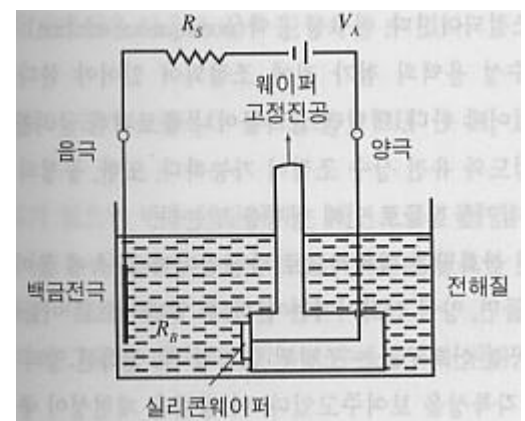
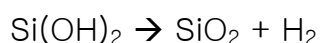
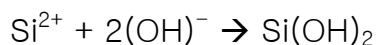
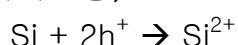


Fig. 양극산화 장치도

1.3 산화막 성장

(1) 산화막 두께

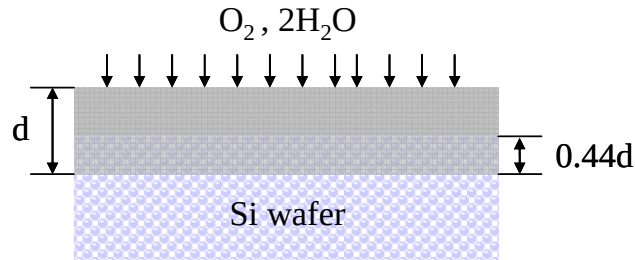


Fig. 산화시의 실리콘 소모

- 실리콘 1mol의 체적

$$\frac{\text{Molecular weight of Si}}{\text{Density of Si}} = \frac{28.09 \text{ g/mol}}{2.33 \text{ g/cm}^3} = 12.06 \text{ cm}^3/\text{mol}$$

- 산화막 1mol의 체적

$$\frac{\text{Molecular weight of SiO}_2}{\text{Density of SiO}_2} = \frac{60.08 \text{ g/mol}}{2.21 \text{ g/cm}^3} = 27.18 \text{ cm}^3/\text{mol}$$

- 실리콘 1 mol이 산화막 1mol로 바뀌므로

$$\frac{\text{Thickness of Si} \times \text{Area}}{\text{Thickness of SiO}_2 \times \text{Area}} = \frac{\text{Volume of 1 mol of Si}}{\text{Volume of 1 mol of SiO}_2} = \frac{12.06}{27.18} = 0.44$$

참고) 산화막 두께 측정

Deal-Grove 산화모델 : B. E. Deal and A. S. Grove, "General Relationship for the Thermal Oxidation of Silicon", Journal of Applied Physics, 36 (1965), 3770

(2) 산화막 성장

온도가 높을수록 O₂, H₂O 압력이 높을수록 빠름

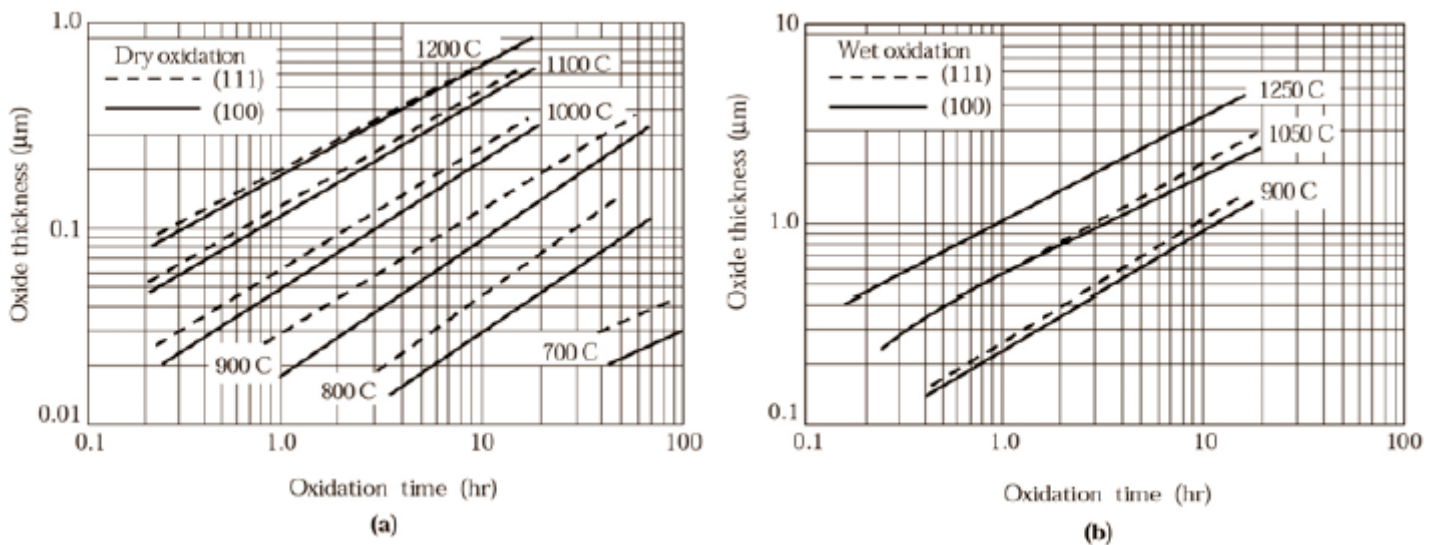


Fig. 건식산화 및 습식산화의 온도에 따른 산화막 성장

1.4 산화막 구조

- 용융실리카, 용융석영 (fused silica)라고 하며, 1710°C이하에서는 열역학적으로 불안정하여 투명한 비정질에서 불투명한 결정체로 변형

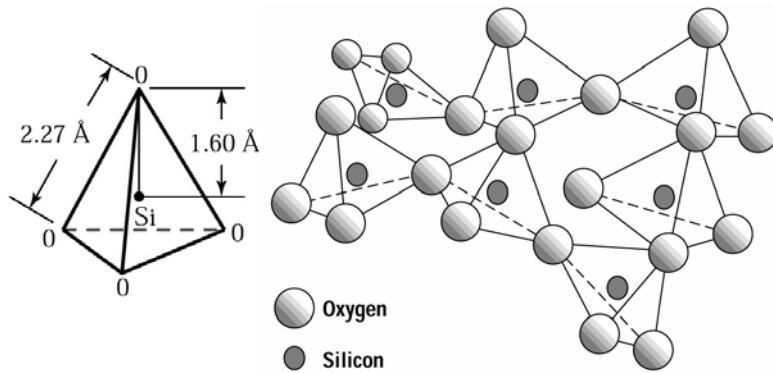


Fig. 산소다면체와 Si원자로 구성된 SiO₂

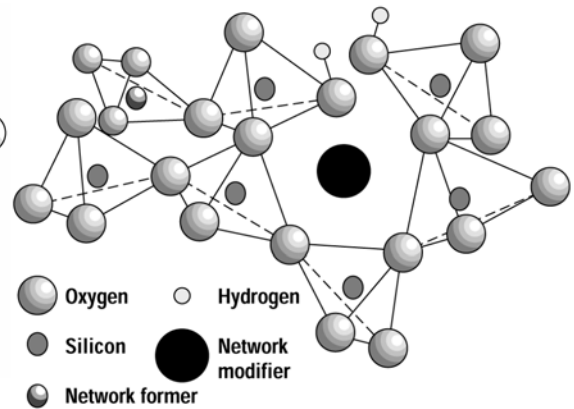


Fig. SiO₂내의 불순물

- Network former (망 형성자) ; B³⁺, P⁵⁺ 등과 같은 실리콘 자리에 들어오는 격자형 불순물
- Network modifier (망 수정물) ; 석영유리 구조가 약해지고 많은 기공이 발생하여 들어간 다른 종류의 불순물
- 잔존의 H₂O가 가교(bridging) 산소이온과 결합하여 비가교 수산기(OH-)쌍을 만들어 실리콘 망을 약화

