

Physical Vapor Deposition

(I) Vacuum evaporation

Vapors are produced from a material located in a source which is heated by direct resistance, radiation, eddy currents, electron beam, laser beam or an arc discharge.

The process is usually carried out in vacuum (10^{-5} to 10^{-6} torr) so that the evaporated atoms undergo an essentially collisionless line of sight (직선) transport prior to condensation on the substrate.

The substrate is usually at ground potential.

※ 박막제조를 위한 몇 가지 물리적 단계

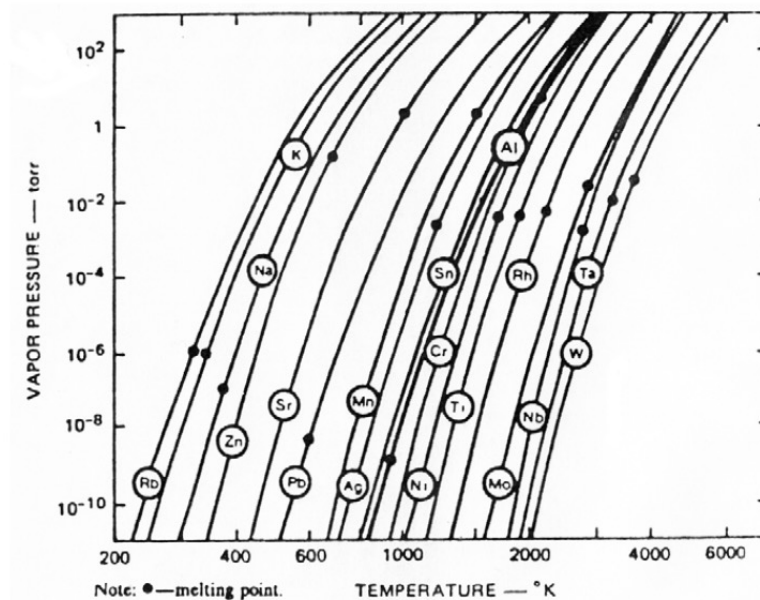
- ① 증발이나 기체상태로 승화되어 물질이 이송되면서 증착된다.
- ② 증발원에서 기판까지 원자나 분자형태로 이송된다.
- ③ 이들 입자가 기판상에서 성막 (필름형성) 된다.
- ④ 기판상에서 그들의 결합상태에 따라서 재배치되거나 정리된다.



Vacuum evaporation

- ※ 고체 또는 액체상태의 모든 물질 → 가열 → 분리 (분자나 원자상태)
- * 포화증기압(평형압력) ; 닫혀진 장치내에서 임의의 특정온도에 대해 형성
- * 증착(evaporation) ; 액체 또는 고체가 증기로 되어 수송되고 성막되는 과정
- * 승화(sublimation) ; 고체가 바로 증기가 되어 수송되는 것

- Many metals (eg Al) can reach millitorr pressure at modest temp (500 ~ 1200 °C)
- Hence evaporation easy for many materials



Vapor Pressure

- Vapor pressure is the pressure at which the vapor phase is in equilibrium with the solid or the liquid phase at a given temperature.
- Below this pressure, surface evaporation is faster than condensation, above it it is slower.
- Theoretically, the vapor pressure can be found by the **Clausius-Clapyeron equation**.

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H(T)}{T\Delta V} \quad \text{where } \Delta H \text{ is the change in enthalpy, and } \Delta V \text{ is the change in volume between the solid (or liquid) and vapor phases}$$

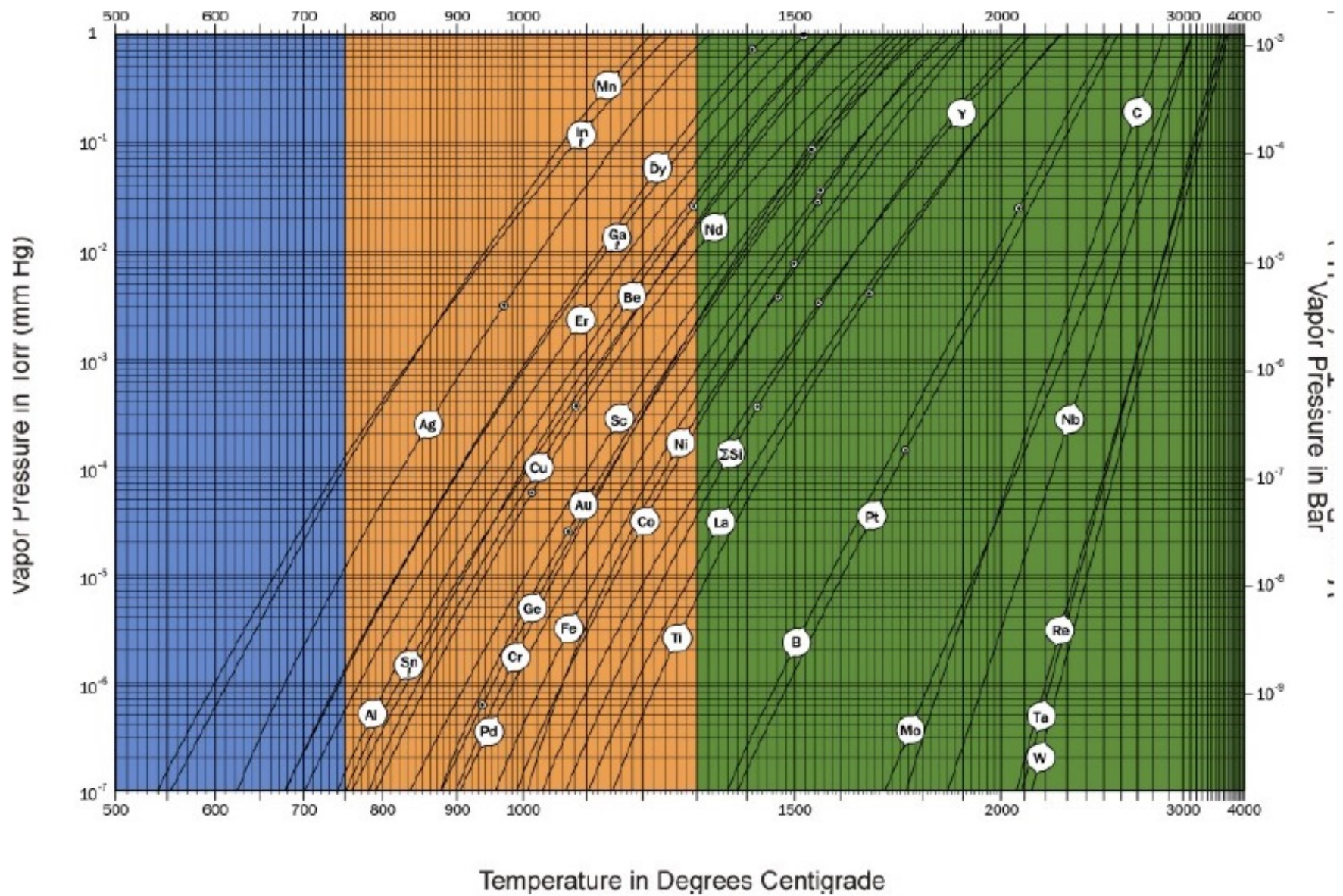
- Over a **small temperature range**, the equation can be simplified as:

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{\Delta H_e}{RT}\right) \quad \text{where } \Delta H_e \text{ is the molar heat of evaporation}$$

- In reality, **empirical formulas and experimental data** are more useful to find the vapor pressure of an element.
- For example, the vapor pressure of liquid Al is given by:

$$\log P(\text{torr}) = \underbrace{-15993/T + 12.409}_{\text{Main Terms}} - \underbrace{0.999 \log T - 3.52 \times 10^{-6} T}_{\text{Smaller Terms}}$$





Evaporation Rate

- The basic equation for evaporation flux is given by:

$$\Phi_e = \frac{\alpha_e N_A (P_v - P_h)}{\sqrt{2\pi MRT}}$$

where Φ_e is the evaporation flux, α_e is the coefficient of evaporation ($0 < \alpha_e < 1$), P_v is the vapor pressure and P_h is the ambient pressure.

- Maximum flux is obtained when $\alpha_e = 1$ and $P_h = 0$

$$\Phi_e = 3.513 \times 10^{22} \frac{P_v}{\sqrt{MT}} \frac{\text{molecules}}{\text{cm}^2 \text{s}} \quad (\text{입자기준})$$

- This can also be put in mass units by multiplying flux with the atomic mass:

$$\Gamma_e = 5.84 \times 10^{-2} \sqrt{\frac{M}{T}} P_v \frac{\text{gr}}{\text{cm}^2 \text{s}} \quad (\text{질량기준})$$



Aluminum Example

- For Al, $M = 27$ gr
- From the vapor pressure diagram, to get $P_v = 10^{-4}$ Torr, we need to heat Al to 980°C . (앞의 그래프 기준)
- At this temperature, the mass evaporation rate is:

$$\Gamma_e = 5.84 \times 10^{-2} \sqrt{\frac{27}{980}} 10^{-4} \frac{\text{gr}}{\text{cm}^2 \text{s}} = 9.694 \times 10^{-7} \frac{\text{gr}}{\text{cm}^2 \text{s}}$$

- If the vapor pressure is chosen to be 10^{-2} Torr, then the temperature has to be increased to 1220°C and the evaporation rate becomes:

$$\Gamma_e = 5.84 \times 10^{-2} \sqrt{\frac{27}{1220}} 10^{-2} \frac{\text{gr}}{\text{cm}^2 \text{s}} = 8.688 \times 10^{-5} \frac{\text{gr}}{\text{cm}^2 \text{s}}$$

$$\Gamma_e \propto T, P_v, \frac{1}{P_h} \text{ (진공에 가까울수록)}$$



Deposition Rate

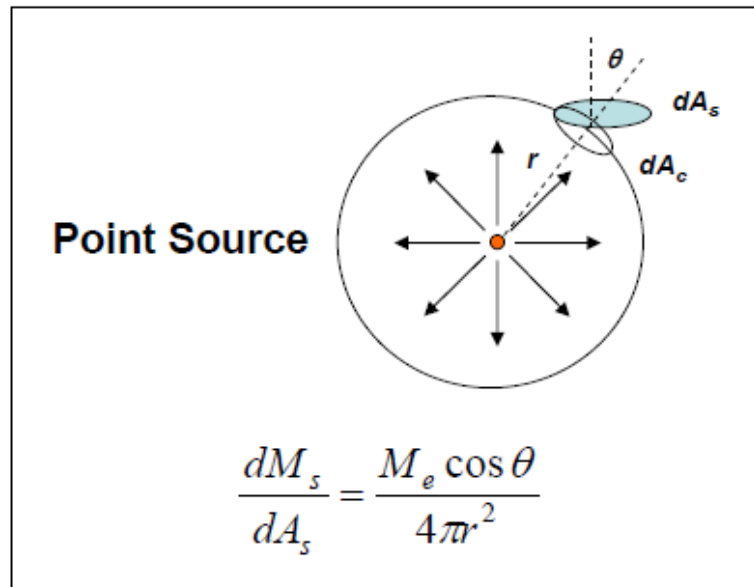
- Of course the ultimate quantity we are looking for is a **deposition rate**.
- This is not only related to the evaporation rate but also the **angle and distance between the source and substrate**.
- Our basic assumption remains that we are in the **ballistic regime** (직선 이동 가정) and the evaporated atoms travel in a **straight line** from the source to the substrate.
- We start by looking at the mass lost from the source.

$$M_e = \int_0^t \int_{A_e} \Gamma_e dA_e dt \quad \text{where } A_e \text{ is the surface area of the source}$$

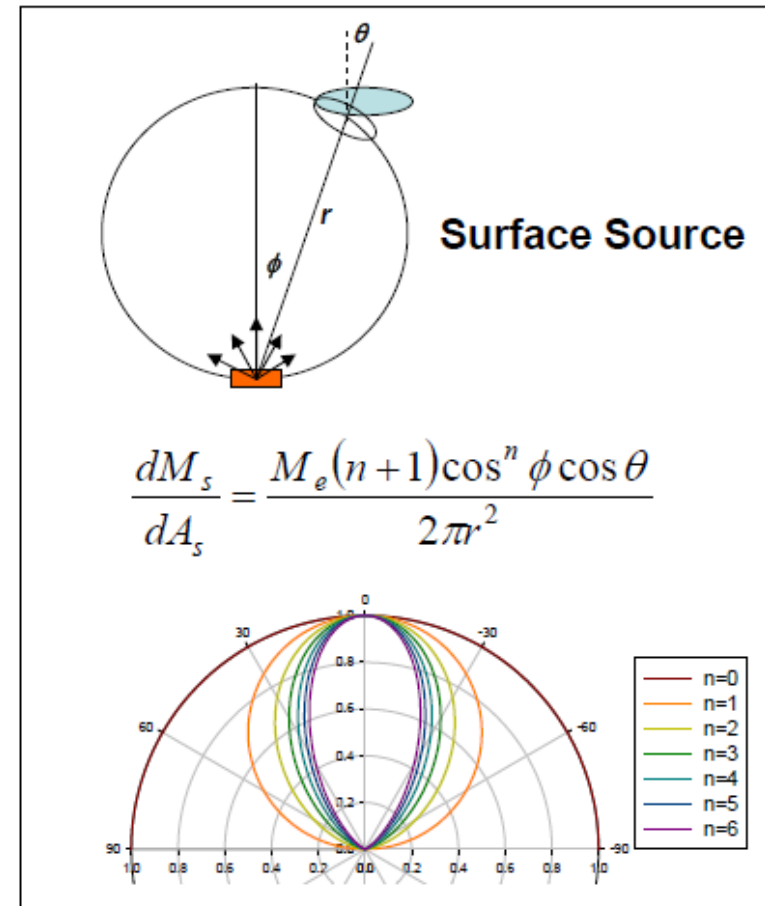
- The expansion of that mass in the chamber depends on whether the source is a point or a surface source.
- A portion of that mass is incident on the target. The orientation of the target will determine the actual mass that is deposited.



Point and Surface Sources

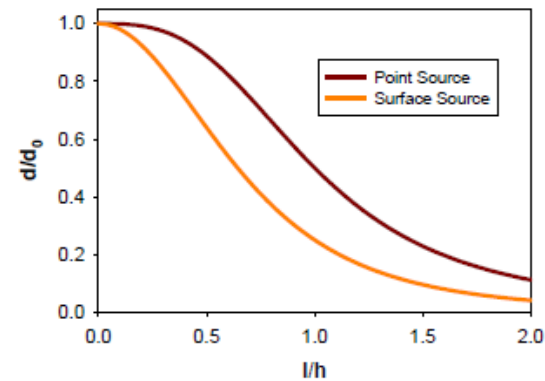
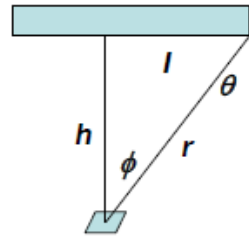


M_s : 기판에 도달하는 증착량
 M_e : 전체 증착량



n : 방출분포의 날카로움 (소스의 형태, 온도, 용기의 형상, 물리적 가이드)

※ 증발원과 기판사이의 기하학적 구조의 예



- . 증발원 ; 점
- . 기판상에 형성되는 박막 ; 면
- ⇒ 증발원과 기판사이의 거리에 따라 두께 변화
- * 최대 두께(d_0)는 중심부이고 h 거리에서 l 에 따라 두께 감소

Point Source

$$d = \frac{M_e h}{4\pi(h^2 + l^2)^{3/2} \rho_{density}}$$

Surface Source

$$d = \frac{M_e h^2}{\pi(h^2 + l^2)^2 \rho_{density}}$$

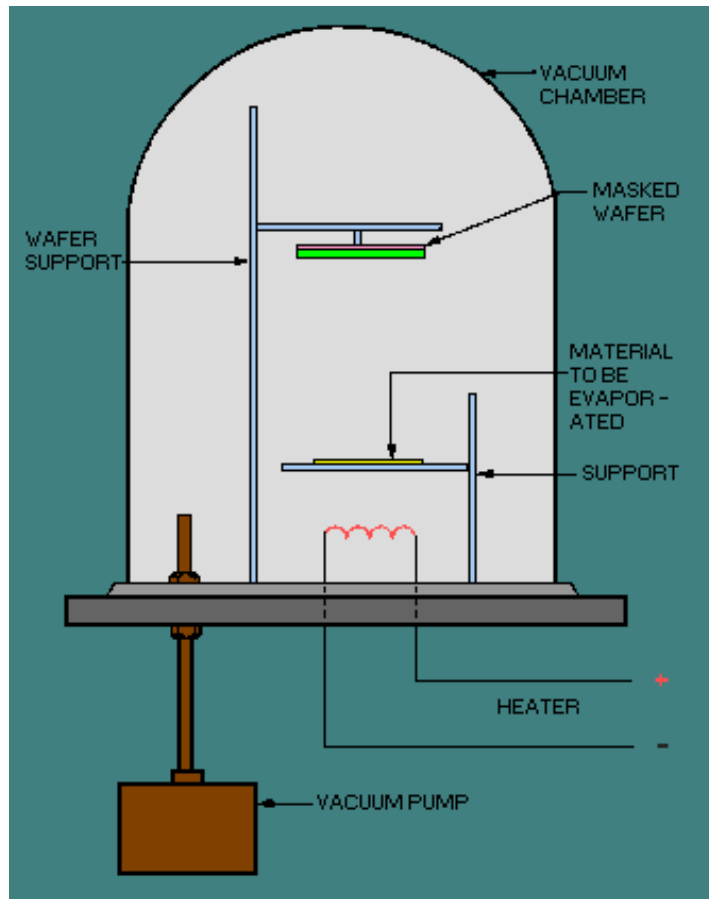
Maximum film thickness occurs at $l = 0$. If we express the thickness relative to the maximum thickness;

$$\frac{d}{d_0} = \frac{1}{(1 + (l/h)^2)^{3/2}}$$

$$\frac{d}{d_0} = \frac{1}{(1 + (l/h)^2)^2}$$

⇒ 이런 효과를 없애기 위하여 기판을 구면으로 만들기도 한다. (거리를 유사하게)

1) 증착장치-필요조건



. low pressure ($< 10^{-5}$ torr)

. 대기압에서부터 짧은 시간안에 위 threshold pressure 도달(배기속도가 수백 //sec 이상 – 오염방지를 위해)

. chamber가 유기성 증기에 오염되지 않아야 함

. vacuum chamber의 size가 충분히 커서 손이 들어가 작업 가능

. 증발원의 복사열이 기판막에 영향을 주지 않아야 함.

2) 기판과 그 준비

박막은 혼자서 그 형태를 유지하지 못하고 반드시 다른 강체 기판에 부착되어 있어야 함.

- . 박막의 지지대가 기판
 - . 오랫동안 박막을 잘 부착
 - . 박막과 기판사이에 화학적 반응이 생기면 안된다.
 - . 기계적으로 강한 재료
 - . 상온뿐만아니라 넓은 온도범위에서 그 특성이 불변
 - . 표면이 매끄럽고 평탄
 - . 표면의 열전도도가 적당; 자체에서 발생한 열을 쉽게 발산
 - . 가격이 저렴
 - . 경우에 따라서 결정성 박막을 만드는 경우 기판도 결정성이어야 한다.
- ⇒ 이 요구조건을 다 충족하는 것은 찾기 힘들다.

* 다정질막 용

; 유리, 석영판, 세라믹(Al_2O_3)

유기물질인 mylar(폴리에스테르필름), teflon; 비중이 낮고 고온에서 사용 불가

* 단결정막 용

; 단결정 Si, Ge, 사파이어, 운모(mica) 등



※ 유리 기판

. 유리가 쉽게 구할 수 있고, 값도 저렴하고, 여러 가지 특성이 기준값 이상이 되는 점이 많아서 자주 쓰인다.

. 유리 중에 내포되어 있는 Na 성분이 고온, 전기장이나 자장에 의해 유리 내외에서 활성화되어 전기 전도도에 영향을 끼치기 때문에 주의 필요.

. 파이렉스(Corning 7059) 기판이 많이 사용됨. (Na 량이 적고, 열팽창이 작다)

※ 가장 좋은 기판-석영판(SiO_2), 알루미늄(Al_2O_3)

⇒ 표면거칠기 check 필요

표면정밀가공 여부가 중요

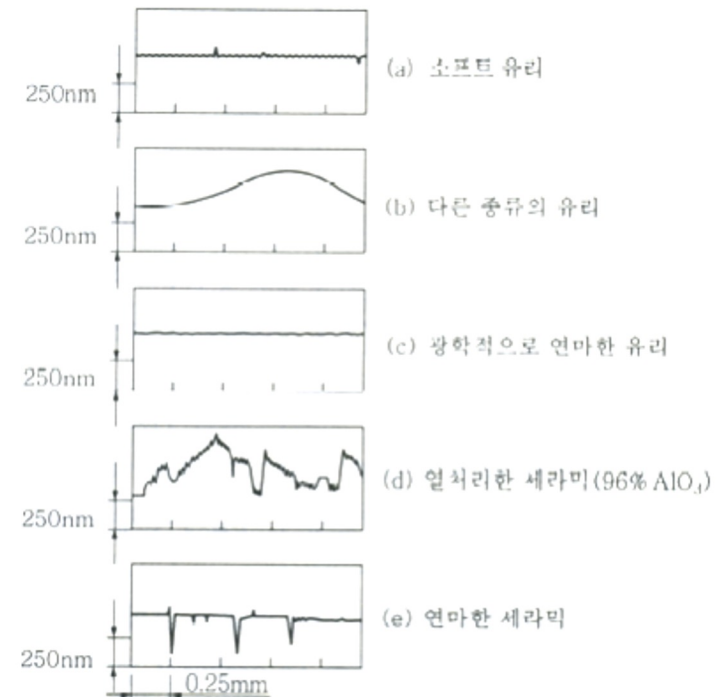


그림 2-4 각 기판의 표면 거칠기

3) 기판의 세척

- ① 탈이온수(deionized water)속에서 초음파 세척한다.
- ② 순수한 알코올에서 지방질을 제거한다.
- ③ 건조하고 먼지를 제거시킨 질소기체로 불어 건조시킨다.
- ④ 이온충격(ion bombardment)으로 표면의 오염막을 제거한다.
- ⑤ 진공중에서 유리기판을 300°C에 가열시킨다. (유기물 및 수분제거)

4) 증착을 위한 주요 재료

- . 순수한 금속, 합금, 반도체, 유전체, 화학원소, 화합물이 있다.
 - . 증착원(source)에 있는 물질 전체를 다 사용하지 않는다.
- ⇒ 그 찌꺼기에 많은 불순물이 남아 있기 때문 → 항상 고순도 유지



5) 증발원

①저항발열원 (electrically heated evaporation sources)

- . 고융점과 낮은 증기압 소재; W, Ta, Mo 등 (증발원 자체가 날아가버리면 X)
- . 1000°C이하에서 증착하는 재료의 경우; Pt, Fe, Ni 을 쓰기도 한다.
- . 형태; wire, foil, boat 등

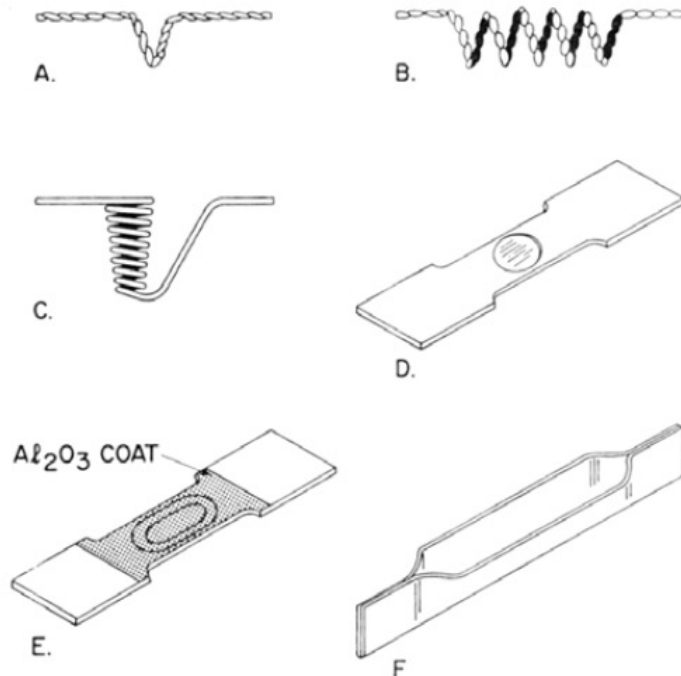
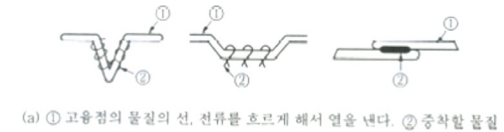


Fig. 13 Wire and metal-foil sources. (A) Hairpin source. (B) Wire helix. (C) Wire basket. (D) Dimpled foil. (E) Dimpled foil with alumina coating. (F) Canoe type.



(b) 고융점의 선으로 된 바게트

그림 2-6 필라멘트 증발원

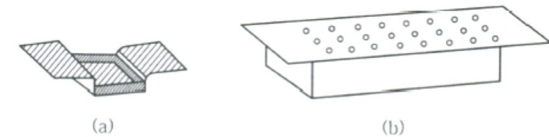


그림 2-7 증발 보트

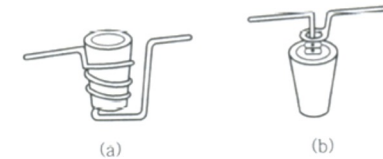
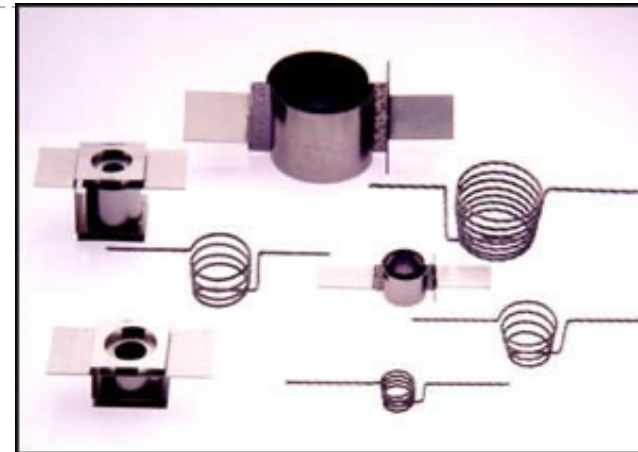
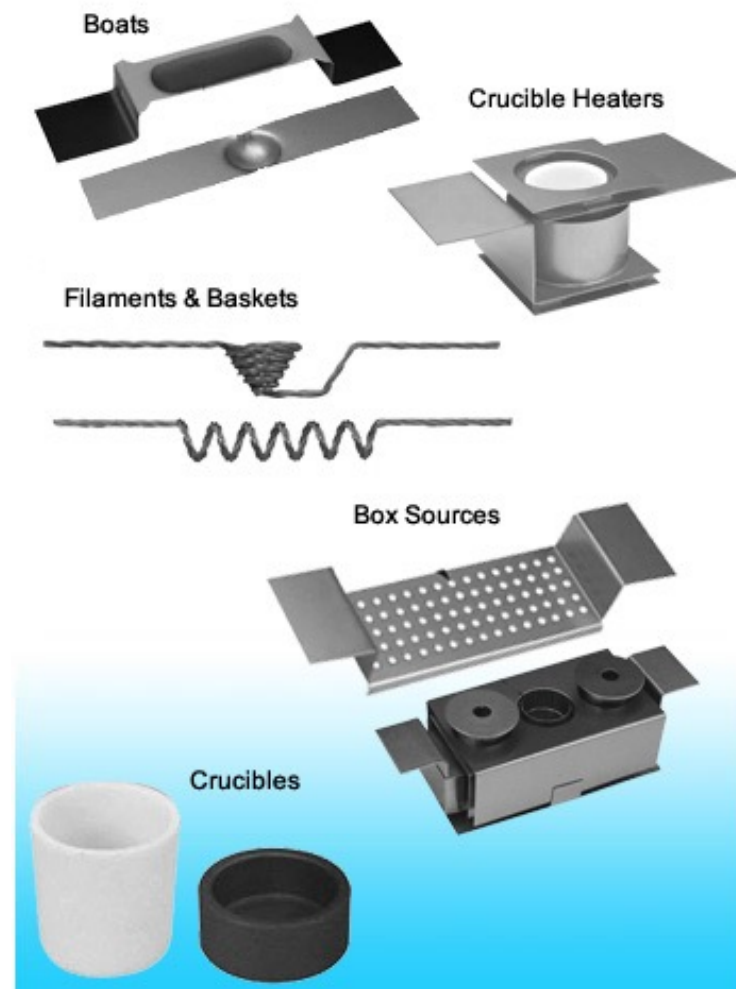


그림 2-8 증발 도가니



② 고전류 증착법 - 일반금속

- . 주어진 양의 금속을 아주 빨리 증착하기 위하여 사용
- . 증착시킬 물질의 가는 선에 강한 전류의 pulse(약 10^6A/cm^2)를 흐르게 하여 순간적으로 폭발 (제어가 어려움) → 이 물질이 막으로 증착됨

③ Pulsed laser deposition (PLD) – 고온이나 화학적으로 어려운 물질들

- . chamber 외부의 laser source → window를 통해 증착원에 집속 → 증발
- . 고가이며 장치가 복잡

④ 플래시법(flash deposition) – 복잡한 유기물, 산화물, 혼합화합물 증착시

- . 충분히 높은 온도로 가열된 boat 위에 미량씩 화합물을 떨어뜨림 → 화합물이 분해되기 전에 녹으면서 증발 → 화합물 막 형성



Figure 13.12 Flash evaporation source.

⑤ 전자선가열 증착법(electron-beam evaporation)

- . 열전자가 음극에서 발생 → 증발원인 양극으로 집속(중간에 자기장에 의해 focusing)
- 전자선의 에너지가 증발원에 닿으면 열로 변해 증발원을 녹임
- . 도가니를 사용하지 않아 오염의 염려가 없다.(전자빔을 활용하기때문)
- . 세라믹도 가능
- . deposition rate 을 e-beam의 속도를 조절하여 조절 (정밀제어 가능)
- . e-beam 의 조절이 매우 중요

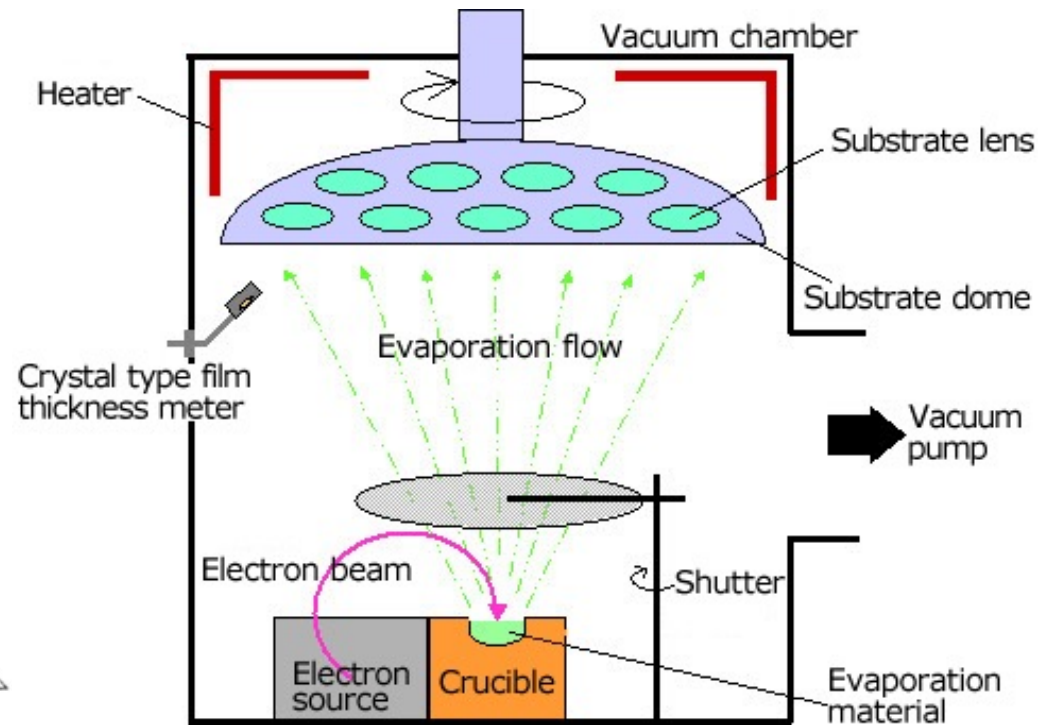
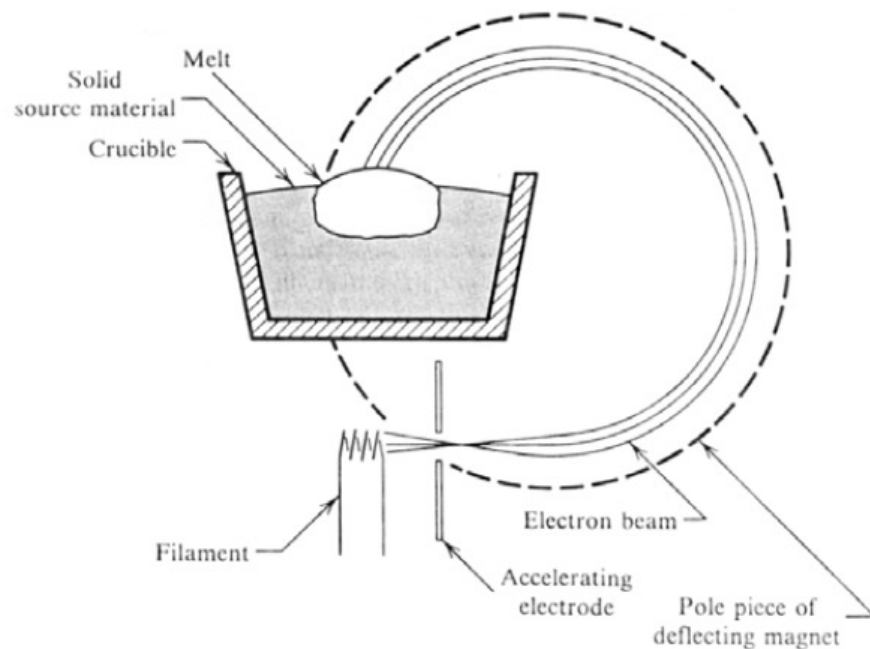


Figure 7-3 An evaporation source using electron-beam heating. The beam is generated out of the line of sight of the source and is focused into it by a magnetic field. A heated filament supplies electrons, and the accelerating electrodes form them into a beam.

⑥ Molecular beam epitaxy (MBE)

. 아주 순수하고 이상적인 결정구조를 갖는 박막의 제조 (느린속도)

- Used to create complex thin layers
- Highly used in III-V compounds
- Have an many e-guns hitting many separate sources
- Control relative composition by separate rates
- Can put down monolayers of different compositions
- used in complex microwave and electro-optic devices

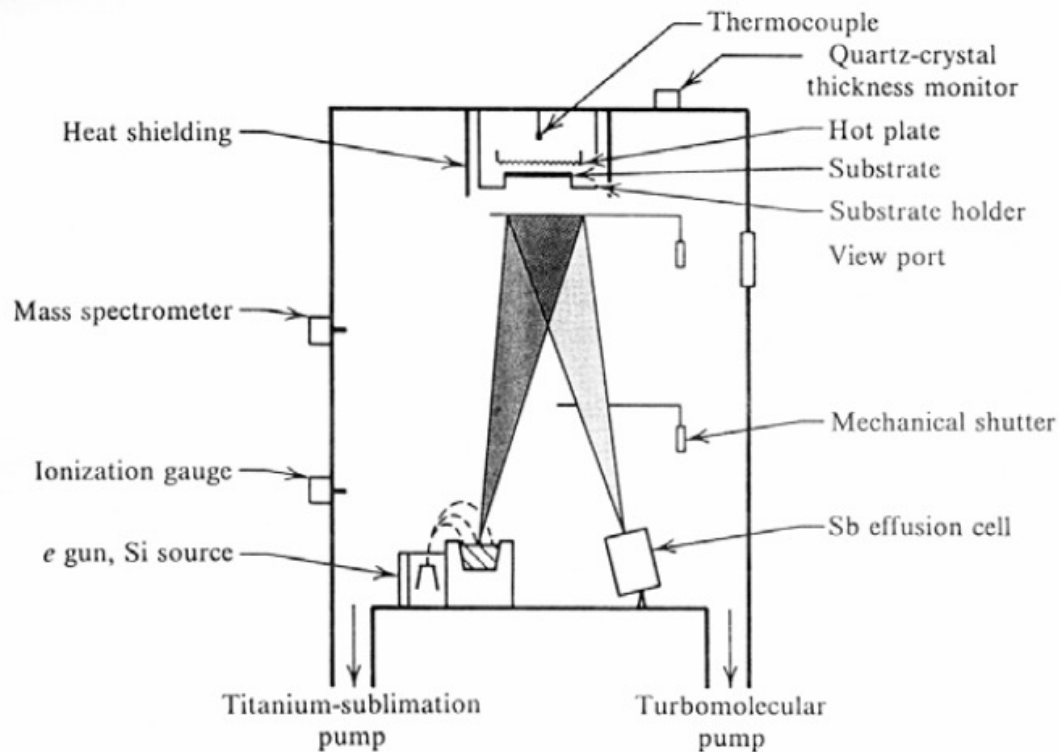
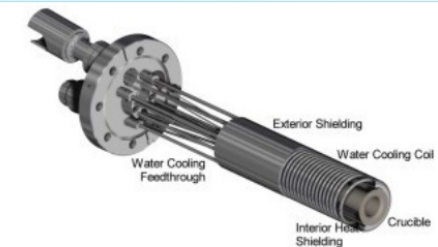
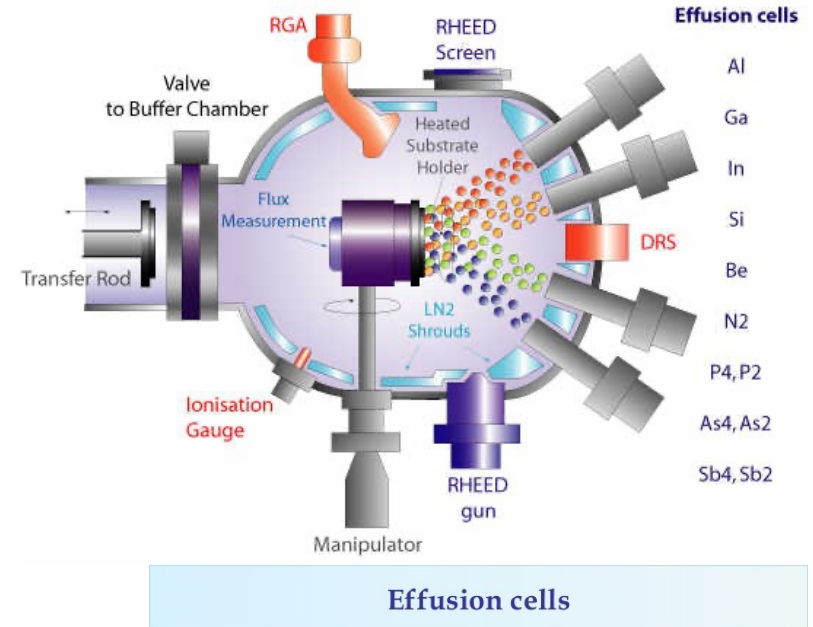


Figure 8-11 An apparatus for molecular-beam epitaxy. (Reference 19. Used by permission.)



Heating System	Radiation heating, tantalum wires with PBN insulators
Thermal insulation	Shield made out of refractory metal and water cooling coil
Temperature range	100 °C ...1000 °C low temperature cells 800 °C ...1400 °C high temperature cells up to 2000 °C based on custom design
Temperature stability	<= 0.1 K depending on the PID controller

6) Microstructure of thin film deposited by evaporation

. The parameters affecting the microstructure of thin films

- ① the **nature of the substrate**
- ② **the temperature** of the substrate
- ③ the **rate** of deposition
- ④ the deposit **thickness**
- ⑤ the **angle** of incidence of the vapor stream
- ⑥ **the pressure** and nature of the ambient gas phase

. The parameters affecting the texture of thin film

- ① nucleation rate and growth rate
- ② surface mobility of adatom

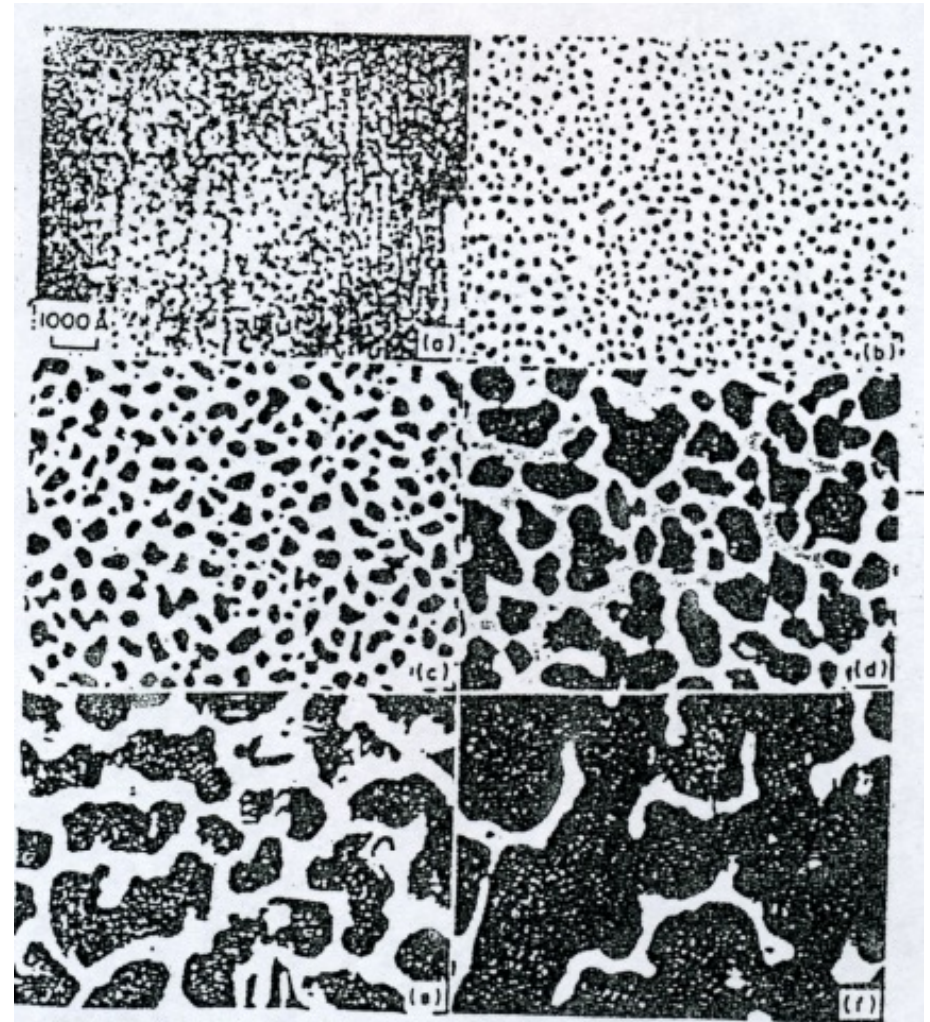
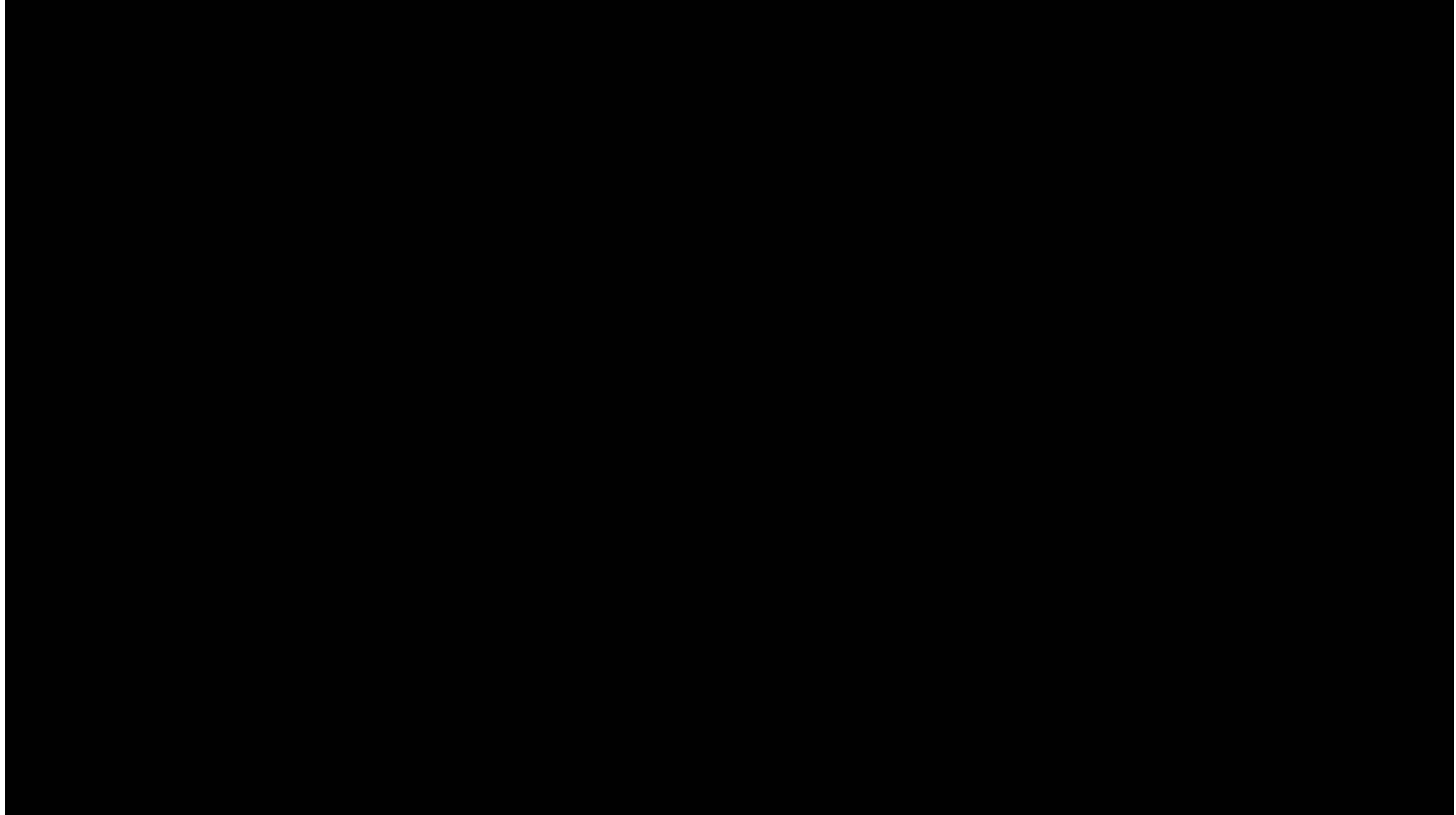


Figure 4.34: Sequence of micrographs illustrating the effect of increasing deposit thickness of gold on rock salt. X8000. (After Pashley-Ref. 101-with kind permission.)



https://www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=NsGRKSV8yH8

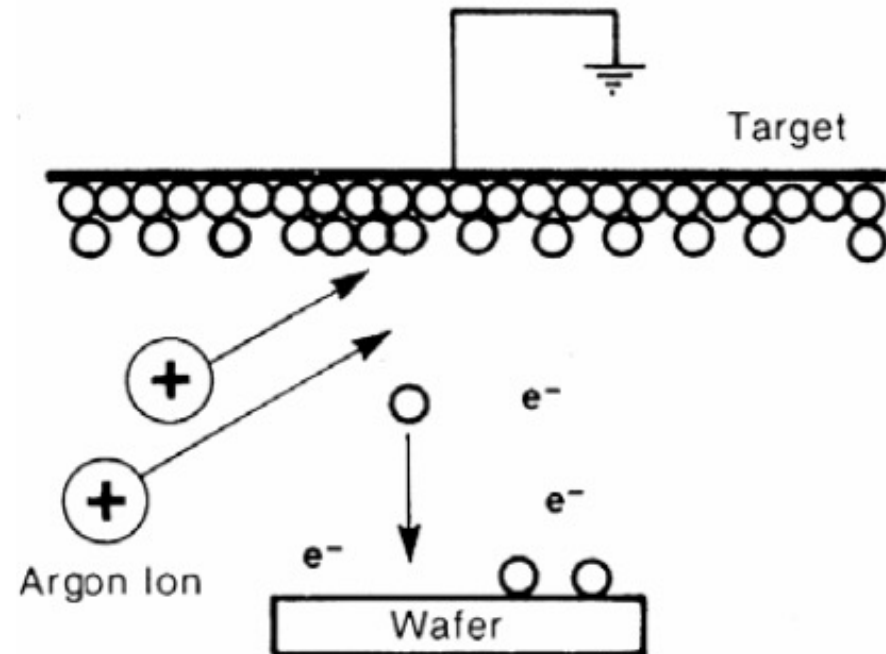


(2) Sputtering

※ Sputtering 에 의한 박막제조과정

- ① 가속된 이온의 충돌에 의하여 물질을 target에서 떼어 낸다.
- ② 방출된 원자가 기판에 증착되어 성장한다.

- Positive Ar ions move to cathode (negative electrode)
- Accelerated by voltage, gain energy
- Ar^+ ion hits target: knocks off target atom/molecule
momentum transfer: Called sputtering
- Target atom then lands on substrate (wafer)
- Since momentum transfer does not heat target
Thus no decomposition of target or substrate



1) Physics of sputtering

① Ions that bombard surface can arise from both plasmas and ion beams.

② Upon bombarding a surface incoming ions may be

- . 반사: reflected back
- . 흡착: stick or adsorb
- . 산란: scatter
- . 표면원자 제거: eject or sputter surface atoms
- . 기판에 파묻힘: get buried in substrate layer

※ ion bombardment에 의해 발생하는 현상

- . surface heating
- . chemical reaction
- . atom mixing
- . alteration of surface topography



③ **Ion beam energy** is critical in defining the nature of the interaction with surface by changing the probability of surface sticking and reaction

. kinetic energy가 약 10^{-2} eV 이하(상온에서 열에너지정도에 해당); sticking probability 가 보통 1이다. → condensation as well as chemisorption

. from 10^{-2} eV to 10^4 eV ; sticking probability 가 0.2에서 0.6

⇒ **sputtering processes** 가 일어나는 **ion-energy 범위**

. 10^4 eV에서 10^6 eV ; sticking probability 가 거의 1 이다. ⇒ implantation 으로 sputtering 확률이 매우 작다.

④ Sputtering yielding

$$S = \frac{\text{Number of sputtered atoms}}{\text{incident particle}}$$

. experimental value of S ranging from 10^{-5} to as high as 10^3

. most practical sputtering processes; from **10^{-1} to 10**



2) 스퍼터링의 특징

- ① 넓은 면적을 균일하게 증착할 수 있으며, 다양한 화합물을 증착할 수 있다.
- ② 박막의 두께 조절이 용이, 연속 생산이 가능
- ③ sputtering yield 가 금속간에 큰 차이가 없으므로 합금코팅의 성분 조절이 용이
- ④ 기판의 위치가 하향, 수평 등으로 하여 증착이 가능
- ⑤ 코팅온도가 낮다.
- ⑥ 이물질의 혼입이 없어 고순도의 코팅이 가능
- ⑦ 증착속도가 evaporation 에 비하여 느리다.
- ⑧ 반응성스퍼터링(reactive sputtering)의 경우 target 오염 발생
- ⑨ 플라즈마 상태를 증착공정과 독립적으로 조절할 수 없다. (최적화의 어려움)

3) 스퍼터링의 응용분야

- ① 에칭
 - ② thin film deposition
 - ③ ion implantation
 - ④ atom rearrangement
-



①장점

- 여러 가지 다른 재료에서도 성막속도가 안정되고 비슷
- 균일한 성막이 가능, step 또는 defect coverage가 좋다
- 박막의 응착력이 좋다
- Target의 냉각이 가능, 큰 target 사용 가능
- 금속, 합금, 화합물, 절연체 등 다양한 재료의 성막이 가능
- 기판의 sputter etching으로 pre-cleaning 이 가능
- O₂, N₂ 등의 reactive sputter로 산화물, 질화물 박막의 형성이 가능

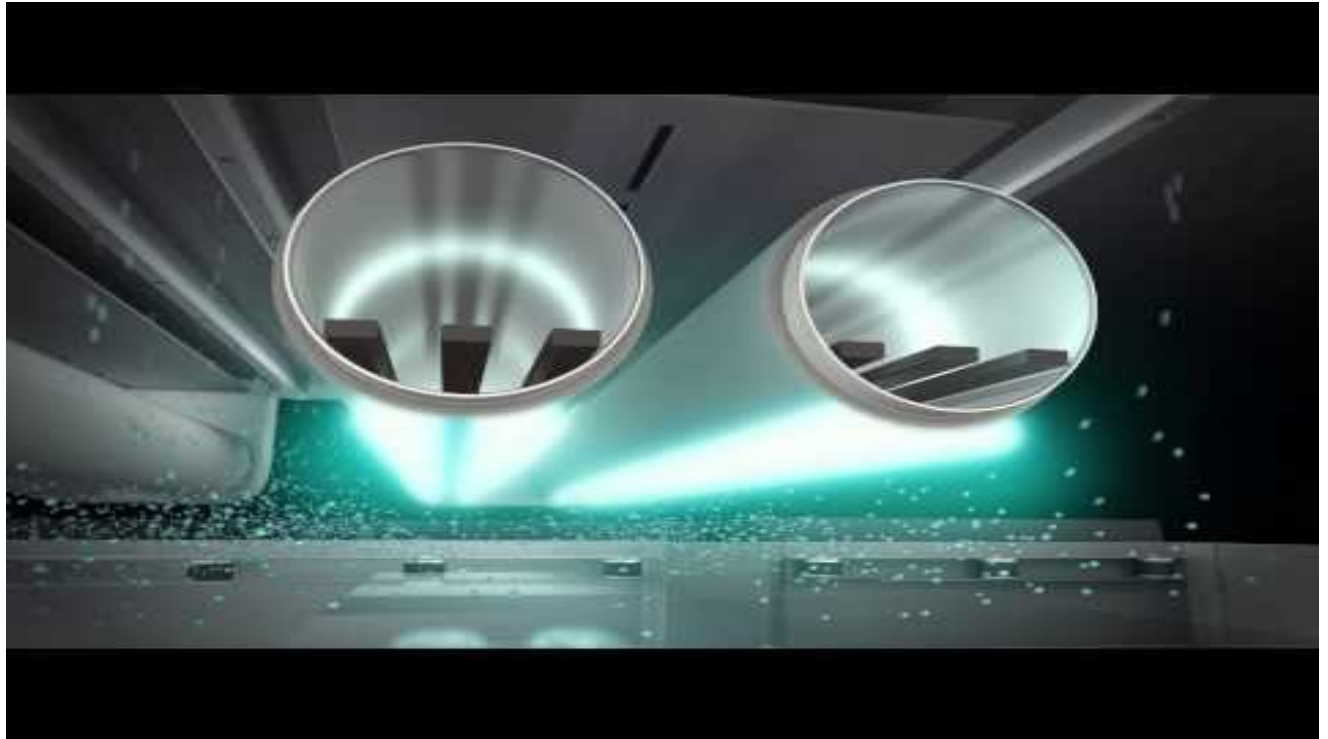
② 단점

- 성막속도가 낮다 → magnetron sputtering으로 증가시킬 수 있음.
- High energy deposition 이므로 박막의 불균일과 damage 발생요인.
→ 성막 후 열처리로 불균일과 damage 감소
- 박막이 전자, UV, 이온 등에 노출되어 가열 → 기판 holder의 수냉이 필요
- 성막조건이 민감하고 서로 영향을 끼친다.
→ Ar 기체 압력, 전압, bias 전압, 기판온도 등을 조절



4) 스퍼터 장치

- ① DC sputtering
- ② RF sputtering
- ③ Reactive sputtering
- ④ Magnetron sputtering



<https://www.youtube.com/watch?v=8mVK5dwyoEY>



DC 2극 sputtering

(1) 충분한 기체 농도($1 \sim 500 \times 10^{-4} \text{mbar}$)에서 큰 전압($300 \sim 5000 \text{V}$)을 걸어줄 때 diode plasma 형성

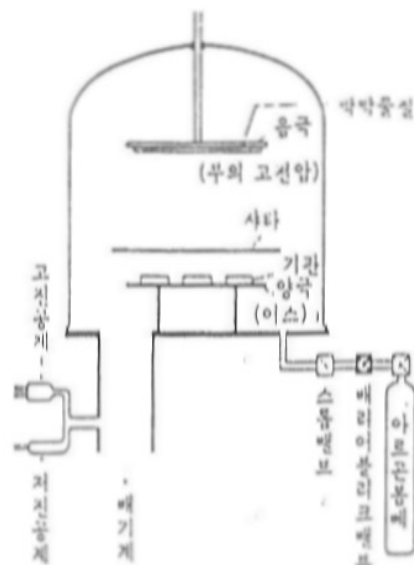
→ 가스 원자들의 적은 양이 이온화 되고, 이온이 가속되어 cathode sheath의 전압 구 배를 가로질러 target과 충돌해서 표면의 sputtering을 일으킴

(2) 일원 또는 다원계의 target재료를 사용할 수 있으나 전도체여야 한다.

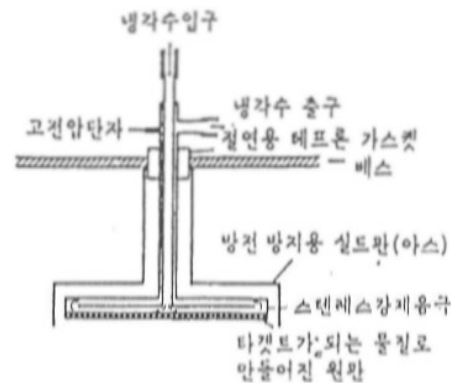
(3) target에 공급된 전력의 75 ~ 95%가 냉각수에 의해 소비되므로, target물질의 열전도도가 중요한 변수다.

(4) 장점 - 장치와 조작이 간단하다.

(5) 단점 - 낮은 증착속도, 높은 기판온도(target으로 부터의 열방사, 2차전자), 에너지의 비효율성, 방전가스의 압력이 높고, 절연체의 sputtering이 불가능



(a)



(b)

(a) 전형적인 2극 직류 스퍼터링 장치,
(b) 스퍼터링 장치에서의 음극(타겟)의 구조

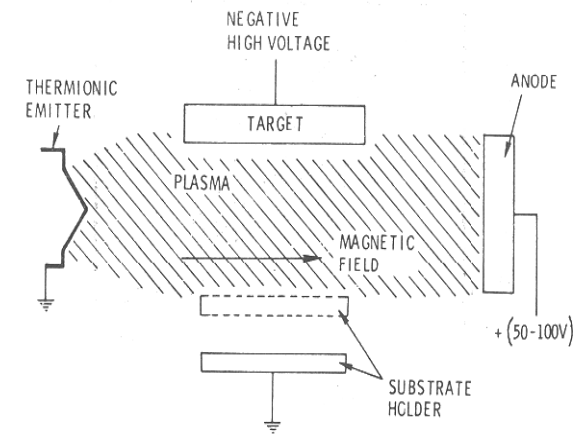
RF sputtering

- (1) sputtering plasma 발생 **oscillating power source** 를 사용하므로 DC방법보다 많은 장점이 있다.
 - **부도체재료를 sputter** 할 수 있고, 낮은 압력하에서 사용가능하다.
- (2) 주파수가 50kHz이상이면, **negative glow region**에 있는 전자들은 기체 원자들을 직접 이온화 할 수 있는 **충분한 에너지**를 갖게 되어 실질적으로 discharge를 유지하는데 필요한 전자들의 수가 감소한다. 또한 impedance라 하더라도 전극으로 사용할 수 있으므로 **양전극이 모두 도체일 필요는 없다**. 효과적인 sputtering을 위해서는 coupled electrode의 크기가 direct electrode의 크기보다 작아야 한다. RF 발생기를 직접 ground를 연결하거나 chamber의 벽 또는 기판 고정 장치에 ground를 시켜서 작은 크기의 coupled 전극을 만들 수 있다. 하지만 이러한 공명 circuit을 이루는데 필요한 inductance를 만들기 위해서는 RF 발생기와 load 사이에 impedance-matching network를 필요로 한다. RF system에서는 inductive, capacitive 손실 감소를 위해 적당한 접지, 도선 길이의 최소화, 불필요한 연결부분을 제거하는 것이 중요하다.
- (3) 낮은 MHz영역에서는 이온들은 상대적으로 질량이 크므로 potential oscillation을 따라갈 수 없다. electrode가 cathode로 작용할 때는 10MHz이상 되어야 효과적으로 sputtering에 이용된다. 대체적으로 13.56MHz, 27MHz가 사용된다.
- (4) 단점 - **insulating target은 열전도성이 좋지 않아 부도체의 증착속도가 제한된다 (DC 보다 느림)**. metal source로부터 화학반응을 이용하여 절연막을 증착시키는 방법도 사용된다. 거의 모든 물질이 RF discharge에서 sputter되지만, 생성된 막이 target의 구성과 반드시 일치하지는 않으며, 금속, 합금, 산화물, 질화물, 탄화물 등의 증착 등에 다양하게 사용된다.



Triode sputtering

- (1) 금속 필라멘트를 가진 제 3의 전극(simple biased conductor of thermionic electron source)을 달아 열전자를 방출시켜 이온화율을 높임
- (2) 장점
 - ① 낮은 압력(10^{-5} torr)에서 sputtering 가능
 - ② 낮은 전압(40V 이하)에서 가능 - 2차 전자로 방전을 유지할 필요가 없다.
 - ③ 전자 source의 여기에 변화를 줌으로써 전압과 무관하게 전류를 변화시켜 이온 밀도를 높이고 낮은 전압 사용 가능
 - ④ 증착 속도 증가
 - ⑤ 플라즈마 밀도를 독립적으로 조절 (고정밀 증착 가능)
- (3) 단점
 - ① 사용이 복잡하다.
 - ② 열전자 방출로 인한 오염 증가
 - ③ 반응적인 과정에는 어렵다. ← 전자 소스가 반응기체에 민감
 - ④ 규모를 크게 하기 어렵다.



Schematic drawing of hot-cathode assisted discharge device(triode)

Reactive vs. non-reactive process

① non-reactive process

- . 불활성 gas plasma (Ar)를 이용하여 sputtering
- target이나 기판에 직접적인 화합물 형성에 참여하지 않음
- . 불활성 기체가 매우 적은 양이라도 target이나 막에 침투하면 막의 성질에 좋지 않은 효과 발생 ex) hard coating 내부의 Ar - 막의 내부 응력을 증가시킨다
- . 기판/막 couple의 불활성기체 충돌
- growth mode, stoichiometry, film properties, 기체 혼입 가능성에 큰 영향을 미친다.
- . 불활성 기체로 Ar이 탁월 - 값이 싸고, 무거워서 sputtering yield가 높다.

② reactive process

DC diode, RF diode, triode, magnetron, modified RF magnetron sputtering

다음 두 가지 방법이 기본이다. (O₂, N₂ 활용)

(1) metallic cathode

- . target은 깨끗한 금속표면으로 유지(화합물의 형성은 기판과 chamber벽에 국한)
- . sub-stoichiometric 막의 형성과 target의 오염을 피하기 위해 공정의 주의 깊은 조절이 필요

(2) compound-coated cathode

- . 간단하나 sputtering 속도가 느리다. (∵ 대부분의 화합물 target은 sputtering yield가 작고 이차 전자의 방출량이 많다.)
- . sputtering 기술, 물질, 증착조건에 의존하므로 target물질에 따라 막이 같은 화학조성을 갖지 못한다.



Magnetron sputtering

(1) 다른 sputtering 방법과 다른 점

① 강한 자기장을 이용하여 플라즈마의 대부분을 target 표면 근처에 묶게 된다.- 방출된 2차 전자의 궤도를 target 표면을 가로지르는 소용돌이 꼴의 나선 형태로 구부린다.

② 이러한 배열을 이용하면 플라즈마가 target 표면의 매우 가까운 곳에 유지되어 근처 지역에서 플라즈마 밀도가 높아지게 되므로 이온화율이 증가한다.

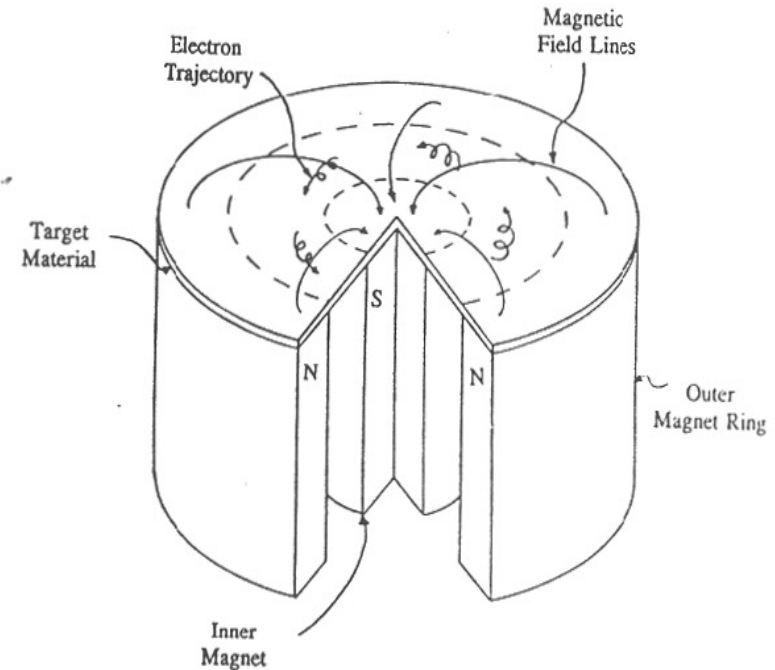
(2) plasma를 가두었을 때의 장점

- ① 증착 속도의 증가
- ② chamber 벽과 기판으로부터의 sputtering 감소
- ③ 증착 도중 기판 가열 감소
- ④ 작용기체의 필요 압력 감소($10^{-1} \sim 10^{-2}$ Pa)

(3) 가장 일반적인 magnetron source

앞에서 본 바와 같이 magnetron target은 전형적으로 'racetrack'형태로 sputter erosion이 일어난다.

→ 고체 원판형 target에서 많은 양의 낭비가 있고, target을 가로질러 sputter된 atom의 밀도가 고리 모양의 분포가 된다. → deposition의 균일성과 target 이용면에서 다른 형태의 많은 target이 개발되고 있다.



Circular, planar magnetron cathode schematic, illustrating the magnetic confinement and the resulting electron trajectories.

(4) magnetron sputtering system

① electron source의 추가로 triode mode에서 수행

- hollow cathode enhanced magnetron

이온화를 높이기 위해 magnetron source 앞에서 직접 hollow cathode discharge가 이용됨.

② RF voltage 사용

electron field vector의 진폭과 방향이 다양하기 때문에 한 주기 내에서 플라즈마 내의 전자들이 받는 힘이 변하게 된다. 따라서 plasma내에서 행동하는 전자들의 힘도 다양해져 plasma가 더 이상 target 근처에 국한되지 않는다.

→ 한 주기의 일부분에만 true magnetron behavior가 존재

(5) 장점

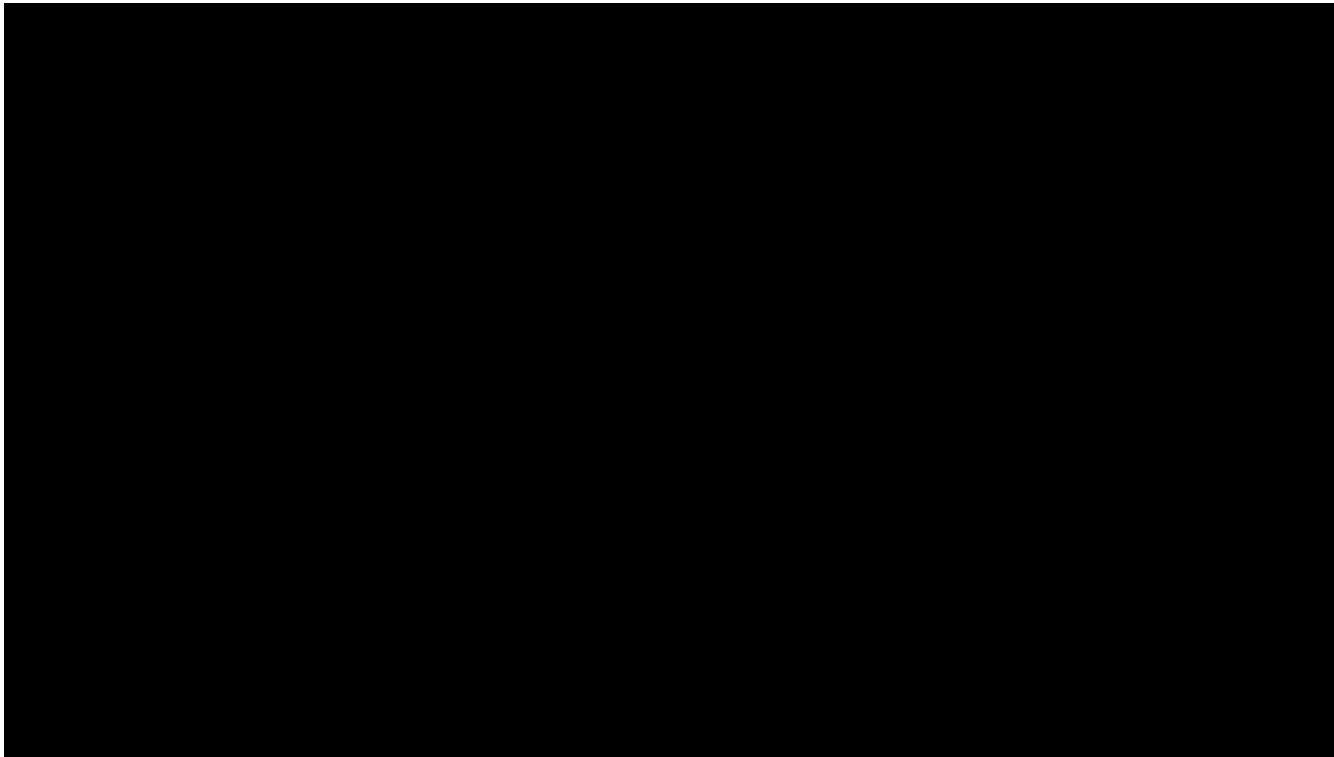
① 높은 증착 속도

② 낮은 sputtering 압력

③ 기판 온도 감소

④ 산업적 규모의 공정으로 변환이 용이





https://www.youtube.com/watch?v=Hf2kkqZhL7U&feature=player_embedded



Unbalanced magnetron sputtering

(1) 특징

- ① 내부 자석과 외부 자석의 자장의 세기가 다르다. → 자장이 내부와 외부 사이를 벗어나 기판의 표면 쪽으로 향하는 유속이 생긴다.
- ② 이러한 자장은 전기장 방향과 가까워 자기장의 방향과 전기장의 방향이 비슷해져 전자가 자장을 따라 스프링 모양을 그리면서 나선운동을 하여 기판쪽으로 향함
→ 플라즈마가 음극 부근에 국한되지 않고 전체적으로 유지 가능

(2) 증착 도중 이온의 충돌은 막에 있어서 nucleation behavior, morphology, composition, orientation, mechanical properties 등을 변화시킨다.

(3) magnetron sputtering에서 기판에 1 ~ 500V의 negative potential을 걸면 기판 주위의 discharge로부터 이온이 나온다.

그러나 일반적으로 막/기판 계면에 입사하는 전류밀도가 매우 낮다.

(전통적인 DC magnetron에서 증착 원자당 0.05 ~ 0.10이온)

(4) magnetron sputtering으로 hard coating을 할 경우

① 내부식성, 내마모성을 최대화하기 위해

- . 결정내의 damage를 최소화
- . 입계, 입내의 공공을 줄임
- . 기판에 bias 전압을 걸어주어 기판으로의 이온 전류를 증가시킴

② bias 전압을 너무 증가시키면

공공은 작게 되나 입내에 결함이 생김 (에너지가 너무 커져서)

→ 응력 상태가 증가하여 adhesion이 나빠지고, 막의 품질이 나빠진다.

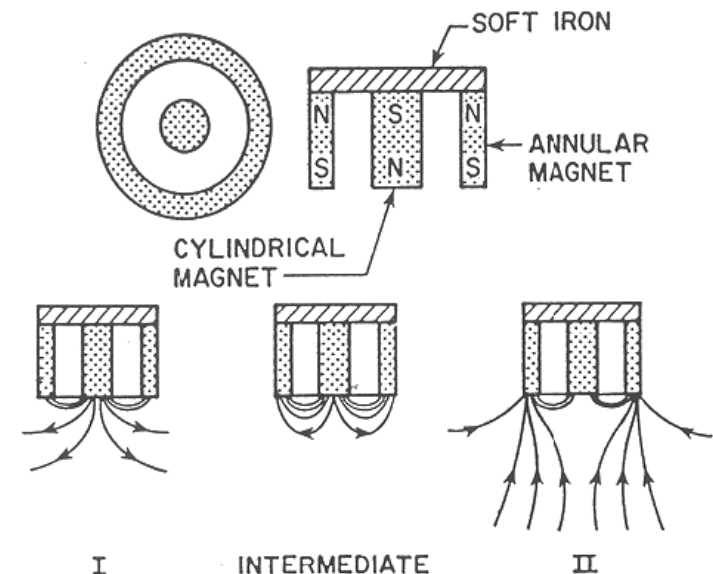
∴ 이온의 전류 밀도를 증가시키고, bias voltage를 낮게 유지하여 이온의 에너지를 낮게 유지해야 한다.

(5) 세가지 기본 형태

① I 형태 - 강한 내부 pole, 약한 외부 pole
기판에 이온 충돌이 매우 낮다. (이온:증착원자=0.25:1)
→ 응력이적고 손상이 적지만, 개질효과는 떨어짐

② 중간 형태 - 거의 균형, 보통의 magnetron
→ 표준성능

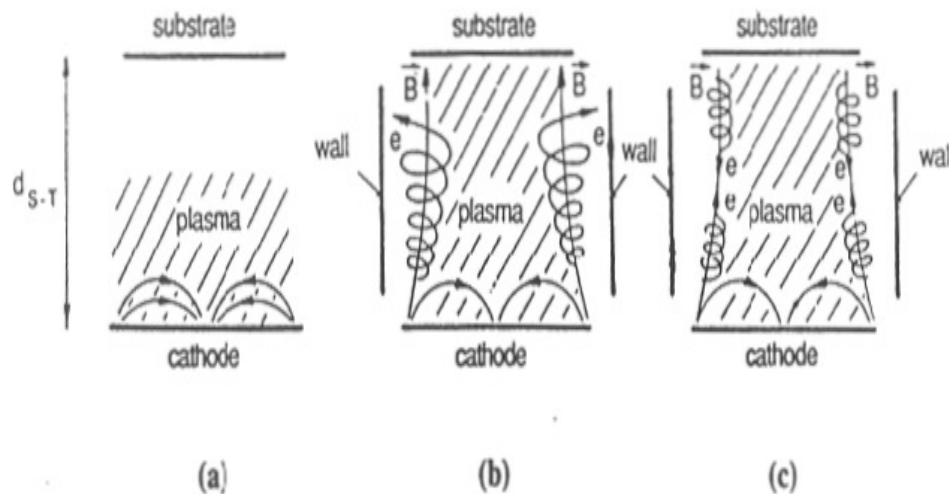
③ II 형태 - 약한 내부 pole, 강한 외부 pole
낮은 기판 bias potential에서 강화된 이온 충돌(2:1)
→ 세밀한공정에 활용



(6) 기판 지역의 이온 충돌
discharge current에 선형적 비례
계의 총 압력에 큰 영향을 받지 않는다.

(7) target/기판 거리 $\uparrow$ $\rightarrow$ ion density $\downarrow$ 가 문제

(8) three modes of operation

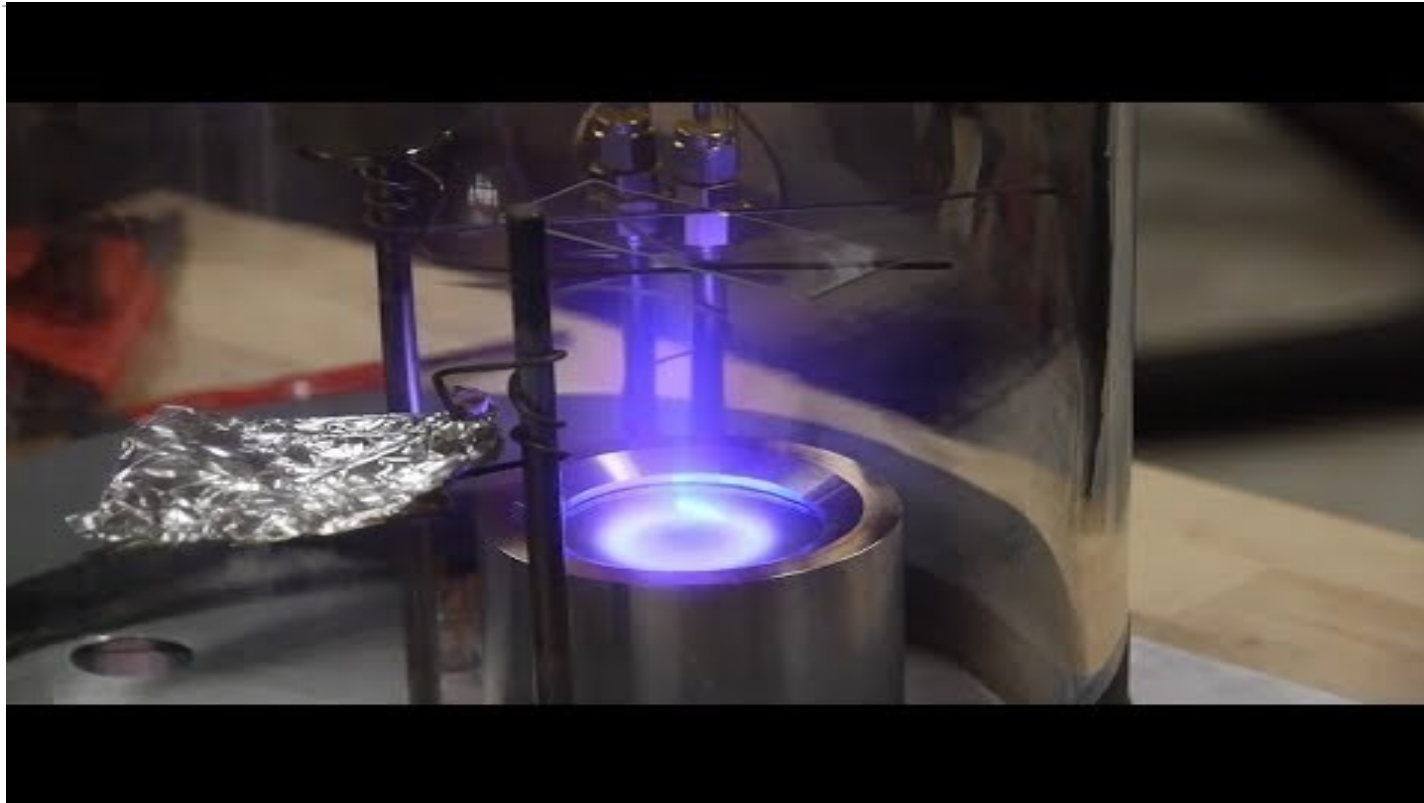


Schematic representation of the plasma localization and confinement for the modes of operation: (a)conventional magnetron; (b)unbalanced magnetron; and (c) dual site sustained discharge

ion : deposited atom ratio
CM(0.5:1), UM(2:1), DSSD(10:1)

(9) unbalanced magnetron의 장점

- ① 이온 에너지와 flux를 독립적으로 조절 가능
- ② 생성된 막의 미세구조와 관련된 공정 변수 사이의 관계를 보다 명확하게 알 수 있다.



https://www.youtube.com/watch?v=9OEz_e9C4KM

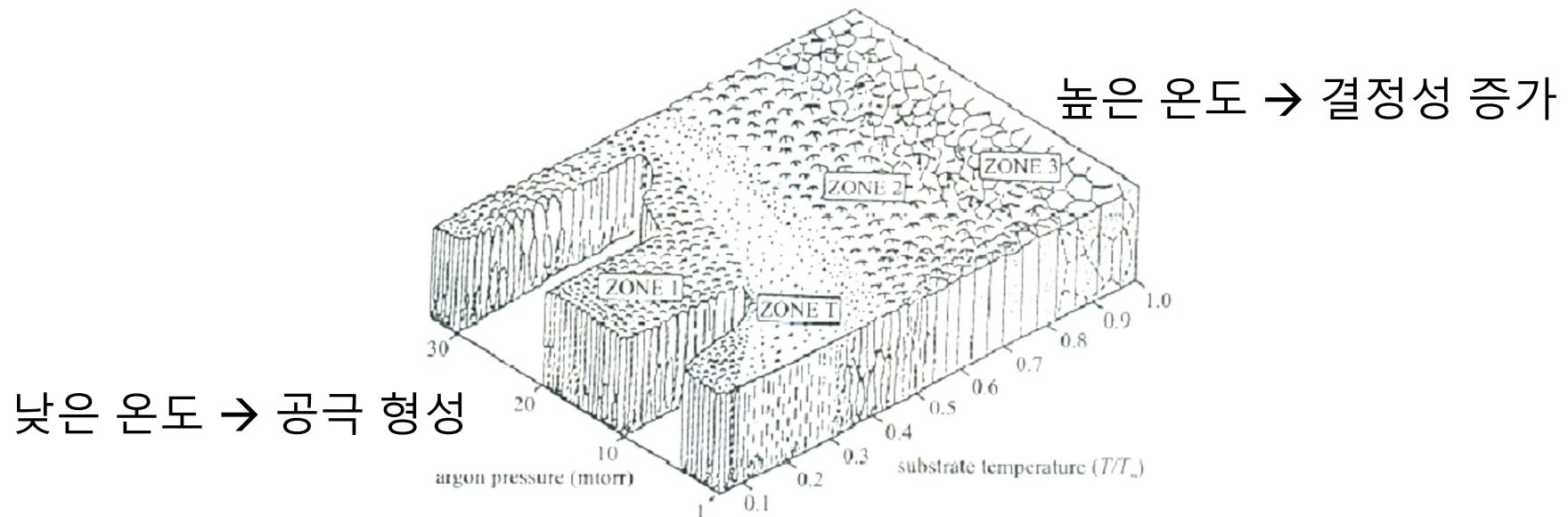


5) sputtering에 의해 coating된 박막의 미세구조

※ coating 원자들의 응축과정

- ① 표면흡착; 입사원자들이 기판의 격자에 운동에너지를 전달하고 약하게 흡착됨
 - ② 표면이동; 흡착된 원자들이 에너지가 낮은 부위를 찾아 이동
 - ③ 안정화: 흡착된 원자들이 bulk 확산에 의해 격자 내에서 자신들의 위치를 조절
- 이때 이온충격(ion bombardment)은 ①과 ②과정의 크게 영향을 준다.

스프터링에 의한 금속도금구조에 미치는 압력과 기판온도의 영향



① scattering within the discharge

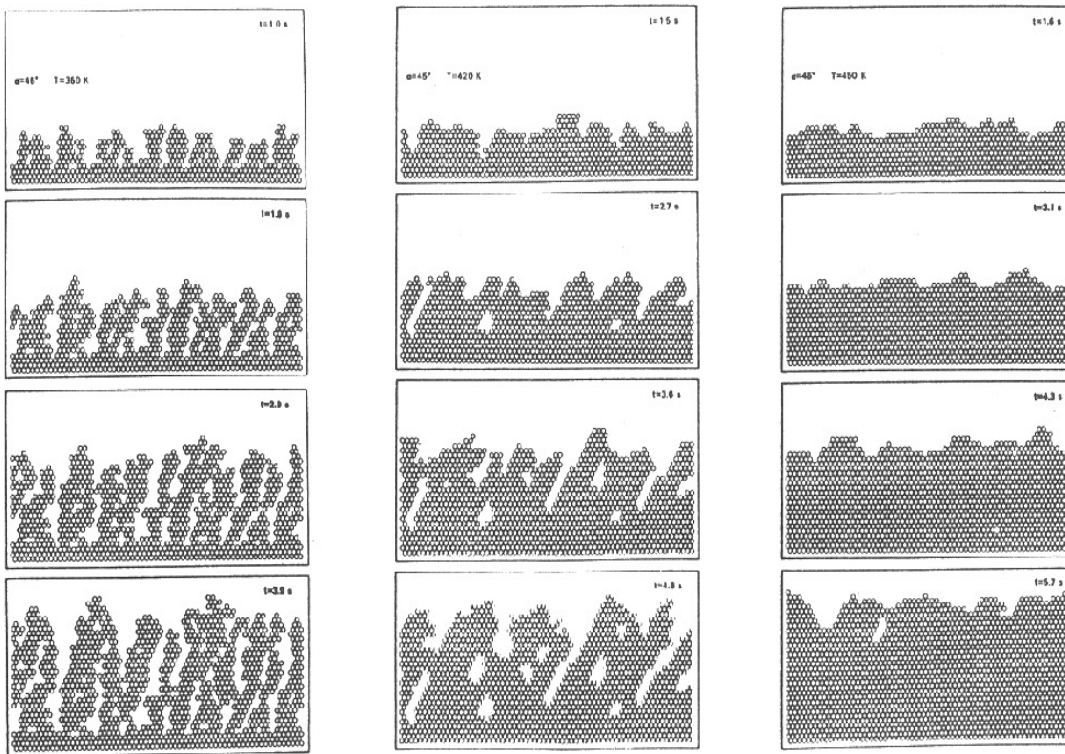
- . 대부분의 원자는 산란 때문에 낮은 에너지로 기판에 도달
- . 기판-target 거리가 멀수록 산란 효과가 커서 증착속도 감소

② gas pressure

- . 기체 압력이 너무 낮으면 - 플라즈마의 이온화율 감소 → sputtering 속도 감소
- . 기체 압력이 너무 높으면 - mean free path의 감소로 인한 scattering에 의해 에너지가 적어 증착속도 감소

③ 증착 도중의 추가적인 기판 가열과 negative bias 전압

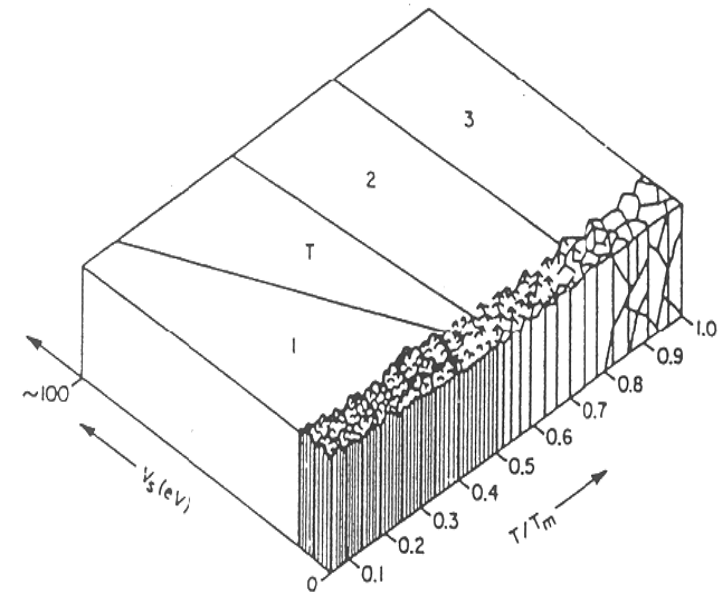
→ 표면재배열에 따른 결정성 및 높은 밀도 확보 (하지만, 너무 강한 전압은 손상/결함 가능성)



Computer-simulated two-dimensional microstructures of Ni films deposited with incident flux angle $\alpha=45^\circ$, deposition rate $R=1$ nm/s, and growth temperatures T_s of (a)350K, (b)420K, and (c)450K. The deposition time, t , is shown.

④ 기판 온도와 negative bias에 따른 조직

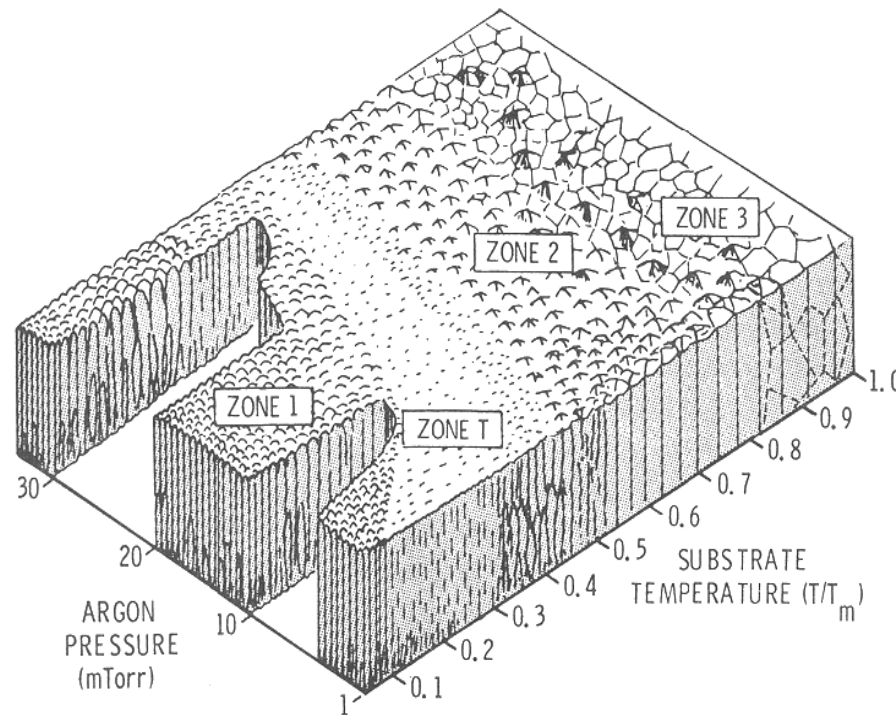
- 1) Zone I - 저온에서는 open dendritic arrangement, 낮은 밀도
- 2) T-zone - dense columnar formation, T-zone 정도의 온도에서는 어느 정도 높은 밀도를 가지므로 압력을 조절하여 특성을 조절
- 3) Zone II - second dense columnar microstructure, 온도가 높아지면서 조금 더 밀도가 높아진다.
- 4) Zone III - dense equiaxed grain structure(재결정)
※ negative bias potential을 증가시킬수록 T-zone의 온도가 내려간다.
($\therefore$ adatom mobility $\uparrow$, substrate heating $\uparrow$, point defect generation $\uparrow$)



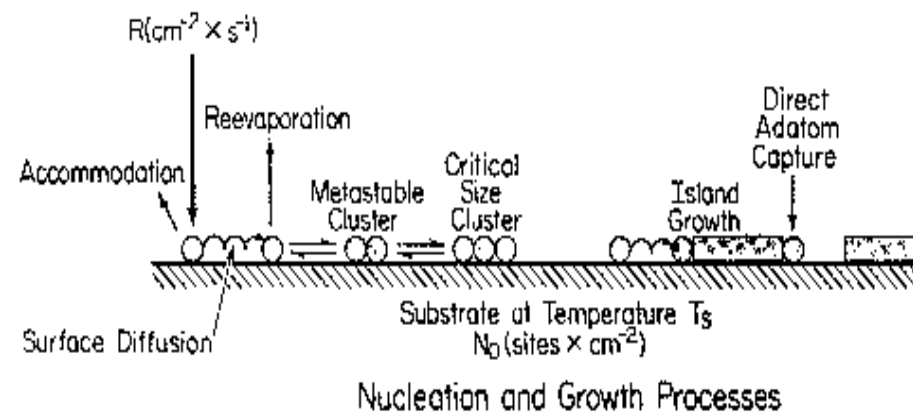
Revised structure zone model illustrating the combined influences of substrate bias voltage and substrate temperature(relative to the melting temperature) for thick films

⑤ 기판 온도와 압력에 따른 조직

여기서도 역시 온도가 높을수록 더욱 높은 밀도를 가지는 조직을 형성한다. 압력에 대한 영향은 온도와 반대이다. 높은 압력의 경우 scattering에 의해 에너지가 낮아지고 막은 porous하게 된다. 그래서 압력이 낮을수록 T-zone이 형성되는 온도는 더욱 낮아진다.



Structure-zone diagram showing schematic microstructures of films deposited by cylindrical magnetron sputtering as a function of growth temperature and Ar pressure



Schematic representation of processes leading to three-dimensional nucleation and film growth



※ Step coverage ; 별로 좋지 않다. 벽과 바닥에 도달하는 입자의 숫자가 적음

