

진공증착 개요 및 원리

진공증착의 개요

박막을 제조하는 기술은 크게 물리적 방식을 이용하는 Physical Vapor Deposition(PVD)과 화학적 방식을 이용하는 Chemical Vapor Deposition(CVD)로 분류될 수 있다. PVD는 CVD에 비해 작업조건이 깨끗하고, 진공상태에서 저항열이나 전자 beam, laser beam 또는 plasma를 이용하여 고체상태의 물질을 기체상태로 만들어 기판에 직접 증착시키는 박막제조 방식이다.

PVD 방식으로 제조할 수 있는 박막재료는 금속, 합금을 비롯하여 화합물, 비금속 산화물 등이 있다.

이들 박막을 기능별로 분류하면 다음과 같으며, 각 기능별로 특성에 따른 응용분야를 조사하면 그 범위가 매우 넓다.

위에서 언급한 응용에는 최근 모든 기술의 경향인 device의 소형, 경박화의 추세에 따라 급격히 확산되고 있다.

CVD는 증착하고 싶은 필름을 개스 형태로 웨이퍼 표면으로 이동시켜 개스의 반응으로 표면에 필름을 증착시키는 방법이다.

화학적 박막 형성	분무법(SPRAY)
	화학증착법(CVD) APCVD, LPCVD, PECVD, EPITAXY, MOCVD
	SOL-GEL
	DIPPING
물리적 박막 형성	진공증착법(evaporation)
	SPUTTERING DC, RF, DC MAGNETRON, RF MAGNETRON BIAS, REACTIVE
	ION PLATING

Thermal Evaporation

1. 저항열을 이용한 evaporation

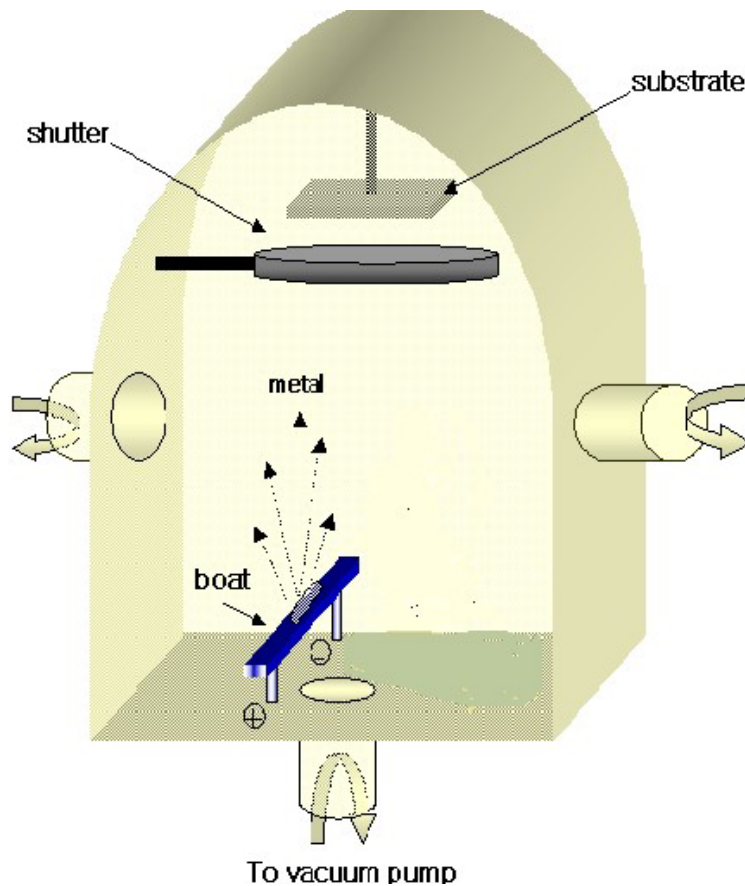
열 source 로는 고융점의 filament, baskets 또는 boats 등과, 용융점이 낮은 재료의 evaporation 에 적합한 electron beam 이 있다.

W(m.p. : 3380℃, 10⁻⁶Torr 에서는 2410℃)

Mo(m.p. : 2510℃, 10⁻⁶Torr 에서는 1820℃)

Ta(m.p. : 3000℃, 10⁻⁶Torr 에서는 2240℃)

저항열을 이용한 evaporation 은 용융점이 낮은 재료(예:Al, Cu, Ag, Au....)의 증착에 유리하며, 증착속도는 filament 에 공급하는 전류량을 조절함으로써 변화시킬 수 있다.



2. Electron Beam Evaporation

전자 beam 을 이용한 증착방법은 증착재료의 용융점이 낮은 경우(예:W, Nb, Si)에 주로 사용된다.

Electron beam source 인 hot filament 에 전류를 공급하여 나오는 전자 beam 을 전자석에 의한 자기장으로 유도하여, 증착재료에 위치시키면 집중적인 전자의 충돌로 증착재료가 가열되어 증발한다. 이때 윗부분에 위치한 기판에 박막이 형성된다.

Electron beam evaporation 의 특징을 보면

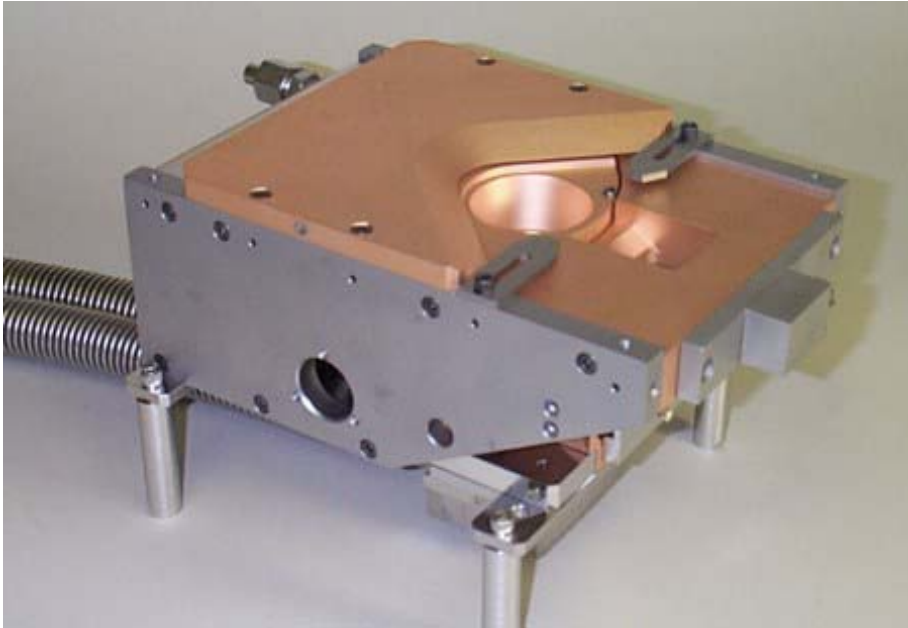
(장점) - 증착속도가 빠르다.(50 Å/sec 가능)

- 고융점 재료의 증착이 가능하다.

- Multiple deposition 이 가능하다.

(단점) - X-ray 발생

- e-beam source 위에 원자의 농도가 크므로 와류 또는 discharge 가 심하다.



Sputter Deposition

1. Sputter deposition 의 원리 및 특징

Sputtering 은 chamber 내에 공급되는 gas cathode 에서 발생하는 전자 사이의 충돌로부터 시작된다. 그 과정을 보면

- 진공 chamber 내에 Ar 과 같은 불활성기체를 넣고(약 2~15mTorr 정도), cathode 에 (-)전압을 가하면

- cathode 로부터 방출된 전자들이 Ar 기체원자와 충돌하여, Ar 을 이온화시킨다.

$$\text{Ar} + e^-(\text{primary}) = \text{Ar}^+ + e^-(\text{primary}) + e^-(\text{secondary})$$

- Ar 이 excite 되면서 전자를 방출하면, 에너지가 방출되며, 이때 glow discharge 가 발생하여 이온과 전자가 공존하는 보라색의 plasma 를 보인다.

- plasma 내의 Ar⁺이온은 큰 전위차에 의해 cathode(target)쪽으로 가속되어 target 의 표면과 충돌하면, 중성의 target 원자들이 튀어나와 기판에 박막을 형성한다.

Sputter deposition 의 장단점을 보면

(장점) - 여러 가지 다른 재료에서도 성막속도가 안정되고 비슷하다.

- 균일한 성막이 가능, step 또는 defect coverage 가 좋다.

- 박막의 응착력(adhesion)이 좋다.
- 금속, 합금, 화합물, 절연체 등 다양한 재료의 성막이 가능하다
- Target 냉각이 가능, 큰 target 사용 가능하다.
- 기판의 sputter etching 으로 pre-cleaning 이 가능하다.
- O₂, N₂ 등의 reactive sputter 로 산화물, 질화물 박막의 형성이 가능하다.

(단점) - 성막속도가 낮다.(<10 Å/sec)

- ⇒ Magnetron sputtering 으로 증가시킬 수 있다.
- High energy deposition 이므로 박막의 불균일과 damage 발생요인이 된다.
- ⇒ 성막 후 열처리로 불균일과 damage 감소시킴.
- 박막이 전자, UV, 이온 등에 노출되어 가열된다.(100~150℃)
- ⇒ 기판 holder 의 수냉이 필요하다.(필요에 따라)
- 성막조건이 민감하고 서로 영향을 끼친다.
- ⇒ Ar 기체 압력, 전압, bias 전압, 기판온도 등을 조절한다.

Sputtering 할 때 조절해야 할 조건은 다음과 같다.

- 기판재료 선정 및 세정
- 박막두께 결정 및 조성결정
- 박막조성에 따른 target 결정
- 기판온도 결정
- Background 압력결정 : $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-6}$ Torr
- Ar 기체 압력결정
- Input power 결정
- Reflected power 를 "0"으로 setting
- 기판 bias 전압결정
- 기판회전시 기판회전수 결정
- 기판과 target 사이 거리 결정
- Reactive sputtering 시 반응성 기체의 압력결정
- 위의 조건들로부터 각 경우의 성막속도 결정
- 성막속도에 따른 성막시간 조절로 박막의 두께를 결정

2. Sputtered 박막의 구조

Sputter deposition 한 박막의 구조는 앞의 성막조건에 따라 다공성(porous)구조, 조밀(dense)구조, 주상정(columnar)구조, 조대(coarse)구조 등의 다양한 형태로 나타난다. Sputtered 박막은 조성 또는 성막조건에 따라 다결정 또는 비정질로 형성될 수도 있다. 특히 기판온도가 낮아 기판에 도달하는 원자의 이동성이 작을 경우 주상정의 비정질 박막형성이 용이하다.

기판온도가 충분히 낮고, Ar 기체의 압력이 높아 성막속도가 빠르면, 기판에 도달하는 원자의 표면확산이동이 작으므로 미세한 입자가 형성된다.

Sputter 된 합금 박막은 위에서 보여진 주상정 박막의 구조적 불균일 이외에도 박막조성의 불균일을 자주 보인다. 우선 합금 target 을 sputter 할 때, 형성되는 박막의 조성은 target 조성과 일치하지 않는다. 이는 합금 구성원소의 원자량 차이에 따라 고유 sputter yield 가 다르기 때문이다. 또한 두가지 이상의 순수원소 target 들을 동시에 sputter 하고, 그 밑에서 기판을 회전시켜 형성한 compositionally modulated structure(CNS)를 갖는 박막들은 합금조성의 조절에 큰 어려움이 따른다.

천이금속과 metalloid 원소, 또는 천이금속과 산화되기 쉬운 원소 사이의 합금 박막에서는 구조적 불균일과 조성적 불균일이 모두 나타나기 쉽다. 이는 metalloid 나 산화되기 쉬운 원소가 진공 chambers 내의 잔류산소와 반응하여 천이금속 입자 주위를 둘러싸는 산화물을 형성하고, 천이금속 입자가 거의 완전히 고립되어 주상정으로 성장하는 불균일로서 보여진다. 이러한 불균일성은 원자의 입사각, 기판 bias, 성막전 기판가열, 성막후 박막가열 등의 sputter 조건에 따라 조절된다.

- Ar 압력이 증가하면, plasma 방전전류의 증가로 인해 target 으로 향하는 이온전류밀도의 증가에 의해 증착속도가 증가하는 효과 및 sputtering 된 입자들과 방전가스와의 scattering 이 알곤 압력의 증가에 따라서 더 심해져서 증착속도가 감소하는 효과가 동시에 나타남.

- RF sputtering 시 기판온도 상승의 원인은 주로 target 에서 발생한 이차전자
⇒이온이 target 과 충돌시 발생된 이차전자를 target 전압과 거의 같은 에너지를 갖고 튀어나오며 이들은 target 이나 gas 원자보다 월등히 작기 때문에 기판까지 에너지 손실 없이 도달하게되어 기판온도 상승을 유발

- 기판온도의 증가는 기판에 도달한 원자들의 이동도를 증가시켜 이들로 하여금 안정된 자리로 이동할 수 있도록 하여 결정화 및 치밀화에 기여함.

- RF 전력을 증가시킴에 따라 sputtering 된 입자들이 더 높은 에너지를 갖고 기판에 도달하게 됨으로써 원자들의 이동에 필요한 여분의 에너지를 공급하게 되어 결정화를 유발하게 된다.

- 증착속도가 증가하면 원자들이 미처 안정된 자리로 못간 상태에서 계속 그 위에 sputtering 된 원자들이 도달하게 되어 결정화 및 치밀화를 저해함.

3. DC Sputtering

직류전원을 이용한 sputtering 방법이다. DC sputtering 의 특징을 보면

(장점) - 구조가 간단하며, 가장 표준적인 sputter 장치이다.

- 성막속도가 여러 종류의 금속에 대해 거의 일정하다.
- 전류량과 박막두께가 거의 정비례하므로 조절이 쉽다.
- RF sputtering 에 비해 성막속도가 크다.

- 박막의 균일도가 크다.
- 높은 에너지의 공정이므로 밀착강도가 높다.
- (단점) - Target 재료가 금속에 한정된다.
- 높은 Ar 압력이 필요하다.(10~15 mTorr)
- 기판이 과열되기 쉽다.

위와 같은 결점은 diode 대신 triode 형으로 하여 plasma 형성용 전자방출 전극을 이용. 전자와 기체의 충돌을 촉진시킴으로써 낮은 Ar 압력하에 sputter 할 수 있게 하거나, magnetron 방식을 사용하여 해결할 수 있다.

4. RF sputtering

DC sputtering에서는 target 이 산화물이나 절연체일 경우 sputtering 되지 않는다. 이러한 단점은 RF sputtering 함으로써 해결될 수 있으며 특히 낮은 Ar 압력에서도 plasma 가 유지될 수 있다.

RF sputtering 은 금속 이외에도 비금속, 절연체, 산화물, 유전체 등의 sputtering 이 가능하며 주로 13.56MHz 의 고주파 자원을 사용한다.

sputtering	DC sputtering	RF Target
TARGET 재질	전도체	전도체, 절연체, 비금속, 유전체
Target 제조방식	진공주조	HIP 또는 sintered powder
Glow discharge 를 위한 Ar	10~15 mTorr	2~5 mTorr
성막속도	성막속도 크며, PAr 에 덜 민감	성막속도 낮고, PAr 에 민감
Shield 크기	작다 ⇒ 성막면적이 크다	크다 ⇒ 성막면적이 작다
Reactive sputtering	RF 보다 불리함	Reactive sputtering 에 적합

5. Magnetron Sputtering

Magnetron Sputtering 이란 target(cathode)의 뒷면에 영구자석(CoSm, Alnico)이나 전자석을 배열함으로써, 전기장에 의해(RF 또는 DC) cathode 로부터 방출되는 전자를 target 바깥으로 형성되는 자기장내에 국부적으로 모아 Ar 기체원자와의 충돌을 촉진시킴으로써 sputter yield 를 높이는 방법이다.

(장점) - Sputtering 효율이 증가된다.

- 전자의 와류운동으로 전자의 기판 및 박막에의 충돌을 감소시킬 수 있다. 따라서 기판온도 상승효과가 적다.

- SiO₂, Al₂O₃ 등의 절연체의 경우에도 성막속도가 크다.

- 유전체 재료의 sputter 또는 reactive sputter 가 가능하다.
 - 주어진 input power 에서 성막속도가 일정하다.(±10%)
 - 영구자석의 적절한 배열과 shield 사용으로 박막두께의 균일도(uniformity)를 쉽게 조절할 수 있다.
- (단점) - 자기장이 target 표면에 수직으로 들어오고 나가도록 해야한다.
- 자기장 근처에서의 선택적인 sputter 로 target 의 소모성이 크다(효율 약 25%)
 - 자성이 있는 재료(Co, Ni 등)의 sputtering 시, 자기장이 target 바깥으로 나오기 힘들다. 따라서 1/8" ~ 1/32" 정도의 얇은 target 을 사용해야 한다.

6. Bias Sputtering

Bias sputtering 은 sputter 하기 전 기판에 (-) bias 를 걸어주어 기판을 sputter 하는 sputter etch 와 sputtering 하는 동안 target 보다 훨씬 작은 (-) bias 를 기판에 걸어주어 (-) ion 과 전자들이 기판과 충돌하는 것을 막는 bias sputter 로 나눌 수 있다.

Sputter etch(Back sputtering)에서는 기판에 -100V ~ -200V 정도의 RF 또는 DC (-) bias 를 걸어주어, Ar+ ion 을 기판에 충돌하게 함으로써 기판의 표면에 존재하는 불순물 등을 제거한다.

Bias sputtering 에서는 target 에 약 -1kV 정도, 기판에 -60 ~ -100V 정도의 (-) bias 를 걸어주면, Ar+ ion 은 target 에 충돌하여 sputter 시킨다. 또한 진공 chamber 중에 존재하는 O-2 ion 과 전자들이 기판에 걸린 (-) bias 에 의해 기판에서 멀어지므로 박막 내에 혼입되는 산소의 양을 감소시킬 수 있다.

일반적으로 박막제조에서는 산소의 침투가 박막의 산화 등 나쁜 영향을 주기 때문에, 산화되기 쉬운 원소의 sputter(Ta, Mo, Nb, Cr, Rare earth 원소)에서는 bias sputtering 이 필수적이다.

7. Reactive Sputtering

Bias sputtering 과는 정반대의 역할로, 임의의 목적에 따라 산화물 또는 질화물 등의 박막(유전체 박막 등)을 형성하기 위해 reactive sputtering 을 이용한다. 이 방법은 보통의 sputtering 과 동일하나 Ar 기체 외에 미량의 산소 또는 질소를 함께 공급함으로써 원하는 화합물의 박막을 만들 수 있다.

Reactive sputtering 에 의한 화합물 박막 형성은, 산화물이나 질화물 target 을 직접 sputter 하는것보다 제조, 순도 및 가격면에서 유리하다. 그 이유는 target 으로부터의 기체상태의 원자는 매우 불안정한 상태여서, 반응성 기체와 쉽게 반응하며 기판에 도달한 원자도 박막상태에서 반응이 빠르기 때문이다. Reactive sputtering 중 기판온도를 올려주면 화합물 형성속도가 빨라져 성막속도를 증가시킬 수 있다.

그러나 Reactive sputtering 에서는 진공압력 gauge 나 glow discharge 용 filament 의 수명을 짧게하고 DC sputter 동안 target 표면에 산화물 또는 질화물 등의 절연층을 형성하므로 sputter 효율을 감소시킨다. 이러한 현상은 DC-sputtering 의 경우 sputter

초기부터 target 뒷면의 영구자석을 회전시켜 주거나, 전자석의 전류를 변화시키면 개선될 수 있다.

CVD(CHEMICAL VAPOR DEPOSITION)

증착하고 싶은 필름을 개스 형태로 웨이퍼 표면으로 이동시켜 개스의 반응으로 표면에 필름을 증착시키는 방법이다.

장점 - 고순도 film 형성 가능

- 재료의 선택에 따라 각종 박막형성이 가능
- control 하기 쉽다
- 대량처리가 가능하다.

종류

APCVD(Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition)

- 760 torr , 400 C - 500 C 에서 동작
- 간단한 반응노, 낮은 온도와 높은 증착률이 장점
- gas의 소비량이 많고 분순물 문제가 발생하기 쉽다.

LPCVD(Low pressure chemical vapor deposition)

- 0.2 - 2.0 torr, 300 C - 900 C 에서 동작
- 필름의 순도가 높고 균일하다
- 증착률이 낮고, 높은 온도가 단점

PECVD(Plasma Enhanced CVD)

- 0.1 - 5.0 torr, 200 C - 500 C , 50 - 13.56 MHz 의 r.f.frequency 사용
- 낮은 온도에서 동작하고 빠른 증착률이 장점이다.
- 불순물 문제가 생긴다.

에피택시(Epitaxy)

- crystalline substrate 위에 얇은 crystalline 층을 성장시키는 것. 주로 CVD 를 사용한다.