

반도체공정및실습캡스톤디자인 결과 레포트

전자및정보공학과
2018270801 황석현

1. 실험 주제

압력 변화와 열처리 과정이 박막에 미치는 영향

2. 주제 선정 배경

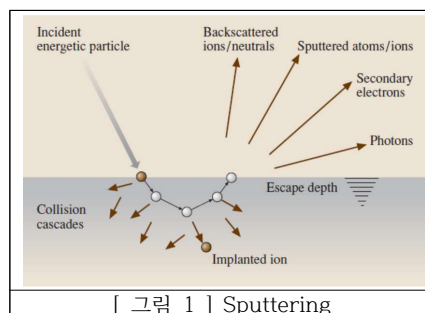
집적도가 높은 소자는 얇고 균일한 박막의 형성을 요구한다. 박막의 특성은 반도체 소자의 성능과 신뢰성에 직접적인 영향을 미치기 때문에 박막 증착 공정에서의 정밀한 제어가 필요하다. 특히, 박막의 두께, 밀도, 결정 구조 등의 특성은 공정 조건인 압력, 파워, 온도 등에 따라 달라질 수 있다. 반도체 제조 공정에서 사용되는 gas의 유량은 박막의 형성과 특성에 중요한 요소이며, 그에 따른 압력의 변화는 증착되는 박막의 두께와 비저항 변화에도 깊은 연관이 있다. 박막의 비저항은 반도체 소자의 전기적 특성을 알 수 있는 직관적인 요소로 압력 조건에 따라 박막 내 결함 밀도와 grain 및 grain boundary 크기가 변하게 된다. 최적의 압력 조건을 찾는 것은 소자의 성능을 향상시키는 데 필수적이다.

또한, 반도체 소자의 성능을 최적화하기 위해 박막 형성 후의 열처리(annealing)를 진행하기도 한다. 열처리는 전공정 중에 발생한 박막 내의 결함을 줄이고, 결정 구조를 개선하며, 전기적 특성을 향상시키는 역할을 한다. 열처리 조건에 따라 박막의 특성이 크게 달라지기 때문에, 이를 체계적으로 연구하여 최적의 열처리 조건을 찾는 것이 중요하다.

본 실험에서는 Ar 가스 유량에 따른 압력 변화가 박막 형성에 미치는 영향을 분석하고, 박막의 비저항에 미치는 영향과 더불어 열처리 과정이 박막의 특성에 미치는 영향을 살펴볼 것이다. 이를 통해 고성능 반도체 소자 제조를 위한 최적의 박막 형성 및 처리 조건을 제시하는 것을 목표로 한다.

3. 이론적 배경

I. 증착 공정



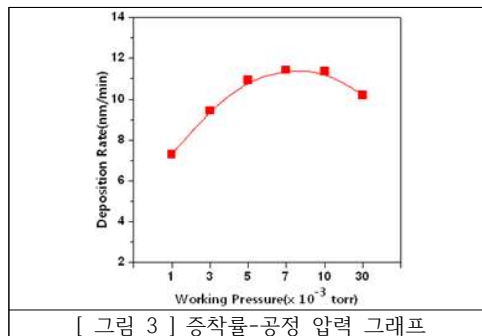
증착 공정이란 웨이퍼 위에 원하는 분자 또는 원자 단위의 물질을 박막 형태로 입혀 전기적인 특성을 갖도록 하는 공정이다. 공정 방식에 여러 가지가 있지만 그 중 스퍼터링이란 건식 방식으로 얇은 박막을 코팅하는 방법이다. 진공에서 불활성 기체(Ar, Ne, Xe 등)를 방전시켜 양이온을 만들고 음극 타겟에 충돌시키면 타겟 입자들이 떨어져 나온다. 타겟 입자들이 기존 결함과 끊어져야 하기 때문에 충돌하는 입자의 에너지는 결합에너지보다 커야 하며, 이때 에너지 크기는 약 10 eV부터 최대 1 keV가 된다. 이렇게 떨어져 나온 입자들이 기판 표면에 쌓여 박막이 형성된다. sputtering 증착 방식은 여러 가지 금속을 타겟으로 사용할 수 있으며, 타겟 원자가 화학적 변화 없이 타겟 위치에서 웨이퍼 위로 물리적으로 위

치만 바꾸어 금속막을 형성한다.

II. 공정 압력과 증착두께(증착률) 간의 상관관계

공정 압력을 높이면 증착률이 점점 증가하다가 최대지점에 도달한 후 감소한다. 이는 플라즈마와 압력 간의 관계를 나타내는 파센 법칙의 결과이다. 파센 법칙이란 방전이 시작할 때 필요한 방전개시전압 V , 기체 압력 P , 전극 사이 거리 d 의 관계를 나타낸 법칙으로, $V = f(P \cdot d)$ 의 관계를 따른다. 기체 원자의 종류에 따른 적절한 압력과 전압 바이어스를 이용하여 플라즈마를 유지하기 위한 최적의 조건을 만들 수 있도록 도와준다. 압력이 낮다면 MFP(Mean Free Path)가 길어져 전자가 기체 원자를 이온화 시킬 수 있는 충분한 에너지를 가진다. 그러나, 기체 원자 수가 감소하여 전자와 기체 원자가 충돌할 확률이 감소하여 플라즈마 유지가 어려워진다. 반대로 높은 압력에서는 기체 원자의 양이 매우 많아지고 짧은 MFP를 가진다. 이때에는 전자의 충돌 에너지는 감소하며 기체 원자를 이온화시키기 위한 에너지가 부족해져 플라즈마를 형성하기 어렵다.

[그림 3]으로 볼 수 있듯, 압력이 낮을 때 챔버 내 Ar 가스량이 적어 스퍼터링율이 낮아지는 것을 알 수 있었다. 압력을 점점 높이게 되면 챔버 내의 가스량이 많아지고 점점 증착률이 증가하지만, 압력이 필요 이상으로 높아질 경우 증착률이 오히려 감소한다. 이런 경향이 나타나는 이유는 챔버 내 가스량이 많아지면서 입자들의 MFP가 줄어들게 되고, 타겟 입자들과 Ar 입자들 사이에서 충돌이 발생하기 때문이다. 타겟으로부터 떨어져 나온 입자들이 기판까지 도달하는 것을 방해받아 스퍼터링 될 확률이 작아지는 것이다.



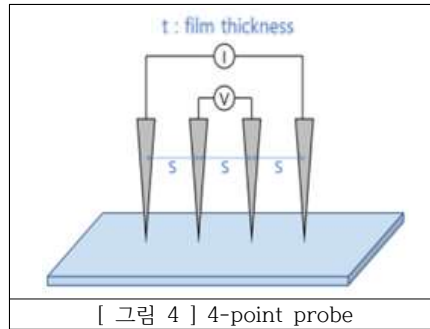
III. Mo(몰리브덴)의 물질 특성

매우 높은 열 전도성을 가지고 있어 반도체 장치 내에서 발생하는 열을 효율적으로 분산시킬 수 있다. 화학적으로는 산화되지 않는 특성을 가지고 있어 공기 중에서 안정적으로 사용될 수 있다. 전기 전도성이 뛰어나 반도체 장치 내의 전기적 연결성을 향상시키는 데 기여하여 증착 공정에 쉽게 적용된다.

IV. 비저항

물질이 가지고 있는 저항 상수로, 물질이 전류 흐름에 얼마나 세게 맞서는지를 나타내는 저항 물리량이다. 그리고 면저항은 4-point probe를 이용하여 측정하는데, 4개의 probe를 일정 거리(s) 만큼 일렬로 만든 후 바깥 probe 2개에 전류를 흘리면, 안쪽 probe 2개에서 전압차를 측정하여 저항을 구한다. 20°C에서 몰리브덴의 비저항(ρ)은 52.25 nΩ·m이다. 이 실험에서는 4-point probe를 이용하여 면저항을 측정하고, 측정값과 공식

$R_s = \frac{\rho}{t} = \frac{\pi}{\ln(2)} \frac{\Delta V}{I}$ ($t \ll s$ 일 때)을 이용하여 비저항을 계산하는 방식을 사용하였다.



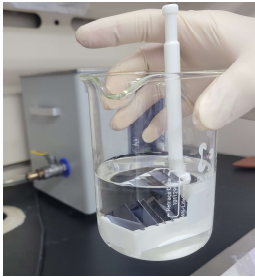
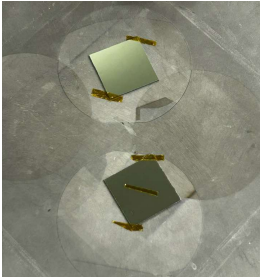

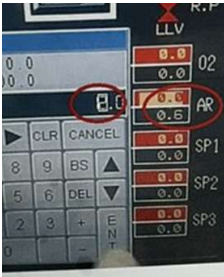


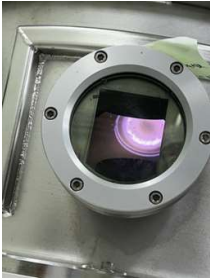




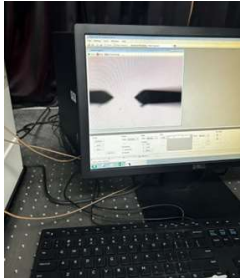
4. 실험 기구

실험 웨이퍼, 트위저, sputtering 장비, 테이프, Alpha-step, 4-point probe, 열처리장비, 세척 용액(아세톤, 에탄올, D.I water)

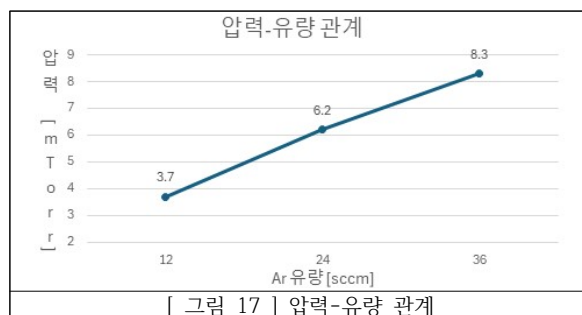
5. 실험 방법

압력 조건을 바꿔가면서 일정 시간 내에 증착이 된 두께를 Alpha-step을 이용하여 측정할 것이다. 4-point probe로 비저항의 변화를 측정한다. 그 다음, 열처리 과정을 거치기 전과 후 변화한 박막의 특성 차이를 살펴본다. 이를 위해 한 압력 조건 당 2개의 동일한 웨이퍼를 준비해, 증착 두께를 측정할 웨이퍼 1개는 중간에 테이프를 부착해 인위적으로 증착된 부분과 테이프가 있어 증착되지 않은 부분을 형성한다. 다른 하나의 웨이퍼는 비저항을 측정할 것이기 때문에 테이프 부착 작업을 하지 않는다. 주입하는 Ar gas 유량을 변화시켜가며 공정 압력에 변화를 주는 방식을 채택하였다.

- i. 아세톤, 에탄올, D.I water로 사용할 wafer를 세척한다.
- ii. sputtering 장비 chuck에 웨이퍼를 부착하고, 박막 두께 측정할 웨이퍼에는 테이핑 작업을 한다.
- iii. wafer를 챔버에 넣고 pump로 base pressure를 낮추고 안정될 때까지 대기한다.
- iv. Ar 가스를 12 sccm으로 설정하고 주입한다.
- v. working pressure가 안정화되면 DC power 160W를 인가한다. 플라즈마가 생성되어 눈으로 보이는지 확인한다. 확인이 되면 10분 동안 pre-sputtering을 진행한다. pre-sputtering 하는 동안에는 wafer에 오염을 막기 위하여 shutter를 닫아둔다.
- vi. 10분이 지나면 shutter를 열어 10분 동안 wafer sputtering을 진행한다.
- vii. sputtering을 마치면 power를 끄고 작업 과정을 반대로 진행하여 sample을 꺼낸다.
- viii. Ar gas 유량을 24 sccm, 36 sccm으로 바꿔 과정 ii ~ vii를 반복한다.
- ix. Alpha-step 장비를 이용하여 압력별 증착된 두께를 측정한다.
- x. 4-point probe를 이용하여 sample 웨이퍼들의 비저항을 측정한다.
- xi. 200°C, 1시간 열처리 과정을 거친 후 웨이퍼의 비저항을 다시 측정한다.

		
[그림 5] 방법 i.	[그림 6] 방법 ii.	[그림 7] 방법 iii.
		
[그림 8] 방법 iv.	[그림 9] 방법 v (1).	[그림 10] 방법 v (2).
		
[그림 11] 방법 v (3).	[그림 12] 방법 vii.	[그림 13] 방법 viii (1).
		
[그림 14] 방법 viii (2).	[그림 15] 방법 ix (1).	[그림 16] 방법 ix (2).

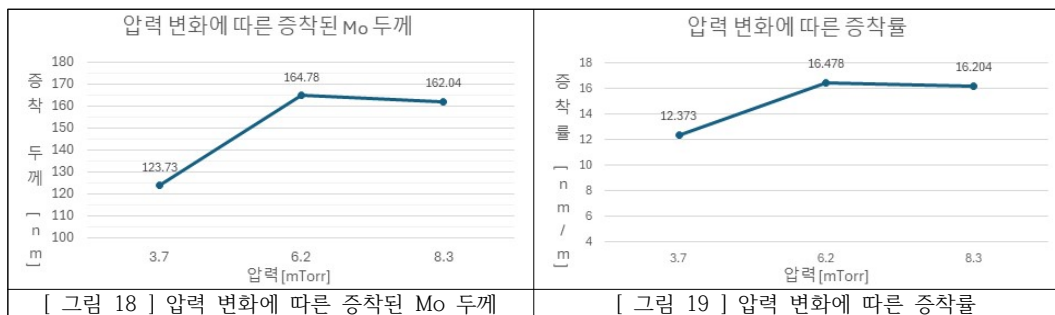
V. 실험 결과 및 분석



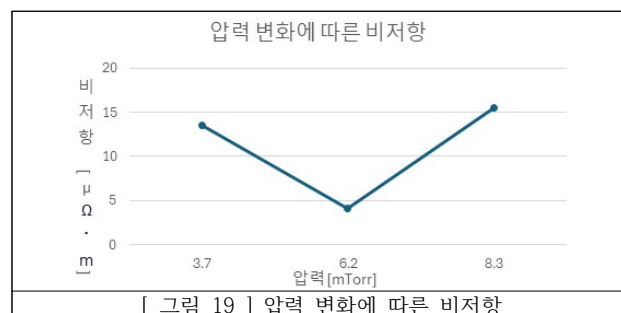
주입하는 Ar gas 양을 초기 주입량(12 sccm)의 배수로 설정하여 유량 변화에 따른 명확한 변화를 보고자 했다. Ar gas를 12 sccm, 24 sccm, 36 sccm 주입했을 때 각 경우에 대한 챔버 내부 압력은 3.7 mTorr, 6.2 mTorr, 8.3 mTorr이다. [그림 17] 그래프를 통하여 Ar gas 유량이 증가할수록 챔버 내의 압력이 증가한다는 것을 알 수 있다. 기체는 많은 수의 자유롭게 움직이는 분자로 이루어져 있다. 챔버에 주입하는 아르곤 가스의 유량이 많아질수록 챔버 내부의 아르곤 분자 수가 증가하게 되고 챔버의 압력이 증가하게 된다. 이는 기체 분자들이 챔버 벽에 더 자주 충돌하면서 발생하는 힘이 증가하기 때문이다. 다만 유량이 배수로 증가한다고 해서 압력이 선형적인 배수로 증가하지는 않는다는 것을 알 수 있다. 우선 챔버 내부가 완벽하게 진공 상태를 유지할 수 없고, 입자들이 주변과 부딪치며 에너지를 잃어 압력이 감소했을 가능성이 있다.

[그림 18], [그림 19], [그림 20] 그래프의 실험 결과 수치들은 같은 실험을 2번씩 반복해서 진행한 후 평균값을 사용했다. 그리고 증착률은 증착된 Mo 두께를 증착 시간으로 나누어 계산했다. 실험에서 증착 시간은 10분이므로 아래 수식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{증착률} = \frac{\text{증착된 Mo 두께}}{10 \text{ min.}}$$



[그림 18]에서 3.7 mTorr에서 6.2 mTorr로 압력이 증가함에 따라 증착되는 박막 두께가 증가하는 양상을 보인다. 그러나 압력 6.2 mTorr일 때 두께가 164.78 nm로 최대가 되었다가 더 이상 증가하지 못하고, 8.3 mTorr까지 압력이 증가하자 증착 두께가 162.04 nm로 약간 감소하게 된다. 증착 시간이 동일할 때 증착률은 증착 두께와 비례한다. 증착률이 최대가 되는 압력이 6.2 mTorr와 8.3 mTorr 사이에 존재할 것이라고 짐작할 수 있다. 또, 공정 압력을 높임으로써 증착률이 점점 증가하는데, 최대점에 도달한 뒤 특정 압력 구간 동안 증착률이 포화 상태에 머무르다가 감소한 것이라고 유추해볼 수 있다.



비저항의 경우 3.7 mTorr와 8.3 mTorr 두 경우를 비교해보았을 때 압력이 높아면서 비

저항이 소폭 증가한 모습이 보인다. 압력이 높아지면 스퍼터링된 몰리브덴 원자들이 기판에 도달하기 전에 기체 분자들과 충돌할 확률이 높아지고, 이로 인해 몰리브덴 원자들의 운동에너지가 감소해 기판 표면에서 원자들이 에너지를 잃고 불규칙하게 증착될 가능성이 커질 수 있다. 결국 박막에 많은 결함이 발생해 크리스탈 구조의 박막이 아닌 비정질 박막이 형성될 수 있다. 구조적 결함들은 전자의 산란을 증가시키고, 이로 인해 비저항이 높아진다. 또한, 스퍼터링 공정 중 압력이 높아지면 Ar gas나 공기 중의 산소 같은 불순물이 몰리브덴 박막에 혼입될 가능성이 있다. 이러한 불순물은 몰리브덴의 결정 구조를 방해하고, 전자의 이동을 저해하여 비저항을 증가시키는 원인이 된다.

마지막으로 비저항의 감소 효과를 기대하고 웨이퍼 열처리를 진행하였다. 그러나 열처리를 진행한 후의 결과를 살펴보았을 때 열처리의 효과가 크지 않은 것으로 보여졌다. 이는 몰리브덴이 기판에 증착이 될 때부터 grain의 결정성이 밀도 있는 crystalline 구조에 가깝게 형성되었기 때문일 것이다.

VI. 고찰

6.2 mTorr 조건에서 측정한 비저항의 평균값이 $4.15 \mu\Omega \cdot m$ 로, 다른 압력에 비해 매우 낮은 값이 나와 다시 실험하고 비저항을 측정해보았다. 그 결과, 약 $44.6 \mu\Omega \cdot m$ 의 상당히 높은 수치가 나왔다. 측정값들의 편차가 매우 크기 때문에, 이는 스퍼터링 장비의 문제라고 생각된다. 더불어 4-point probe를 사용한 비저항 측정에서 웨이퍼와 피팅을 맞추는 과정에서 측정 오차가 발생했고 예상한 바와 무관해 보이는 측정값들이 발생했을 것이다. 최대 증착률을 보이는 공정 조건이 박막의 품질이 가장 좋은 조건은 아님을 알 수 있었다. 빠른 속도의 증착을 목표로 하지 않고, 가장 우수한 특성을 나타내는 압력 조건이 어딘지를 찾는 것에 중점을 두어야 한다. ALD도 증착 속도가 매우 느리지만, 증착되는 박막의 품질이 매우 우수하다는 것을 수업 시간에 배웠다. 박막의 용도와 요구되는 특성에 맞는 증착 두께를 설정하고, 박막의 최종 특성과 목적을 고려하여 증착률과 다른 매개변수를 최적화하는 것이 중요함을 느꼈다.

또, 열처리를 한다고 해서 무조건 박막 특성이 좋아지는 것은 아니었다. 긍정적인 방향으로의 변화가 있을 수도 있지만, 저항이 증가하는 것처럼 정반대의 결과를 초래할 가능성이 있다. 타겟 물질에 적용 가능한 알맞은 온도와 공정 시간을 잘 고려하여 적용해야 한다는 점도 배울 수 있었다.

VII. 참고자료

- [1] 반도체공정및실습캡스톤 강의자료 “Part5_Semiconductor Process_Sputtering”
- [2] Kong, Seon-Mi, Xiao, Yubin, Kim, Eun-Ho, and Jeong, Ji-Won, “Characteristics of Mo Thin Films Deposited by DC Magnetron Sputtering,” Korean Chemical Engineering Research, vol. 49, no. 2, pp. 195-199, Apr. 2011.
- [3] S.-H. Jang and D. K. Kim, “Structural, Electrical, and Optical Properties of AGZO Thin Films Using RF Magnetron Sputtering System Under Ar Flow Rates,” Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, vol. 35, no. 1, pp. 32-36, Jan. 2022.