

광학소자 가공 방법(부가가공 편)

# 스퍼터 증착

## 1. 스퍼터링 현상<sup>1)</sup>

전기장 등으로 가속한 이온을 고체 표면에 조사한 경우, 고체 표층 및 고체 내에서는 여러 가지 현상이 관찰된다. 입사하는 이온이 수 eV 정도의 에너지를 가진 경우에는 고체 표면에 부착 및 퇴적하고 수십 eV~수십 keV의 에너지 영역에서는 고체 구성 원자를 튀어 오르게 하는 스퍼터링이 확대된다. 또 그 이상의 고 에너지 영역에서는 고체 안으로 이온이 주입되는 현상

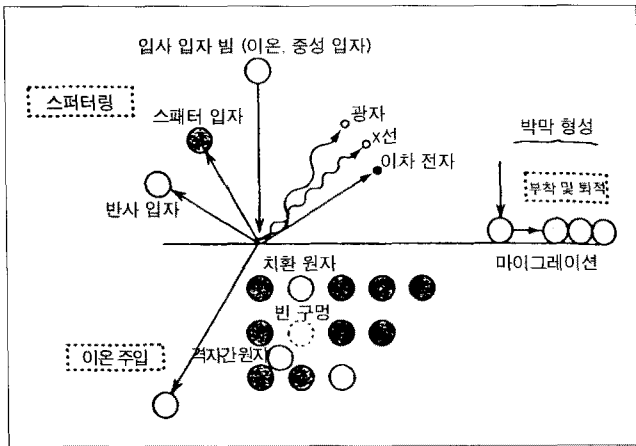


그림 1. 고체에 조사된 이온과 그 고체 표층, 고체 안에서의 상호 작용 개략도

이 현저하게 일어난다.<sup>2)</sup> (그림 1)

즉, 입사하는 이온의 운동 에너지가 수십 eV를 넘으면 이온은 고체 안에 침입하고 고체 구성 원자의 원자 핵과의 상호 작용(핵 충돌)에 따라 고체 원자를 변위 혹은 반동(recoil)시켜 차례로 그 운동 에너지를 잃는다. 이 때 입사 이온과의 충돌로 발생한 반동 원자의 운동 에너지가 큰 경우에는 그 반동 원자가 다른 원자를 튀어 오르게 하는, 소위 캐스케이드 충돌이 일어나 결국 고체 표층 원자에 가해지는 에너지가 원자 간의 결합 에너지를 넘으면 이들 원자 및 분자가 진공 중에 방출된다. 이것이 스퍼터링(sputtering) 현상이다. 이 현상을 이용한 박막 형성법을 스퍼터 증착법(sputter deposition) 이라 한다.

## 2. 스퍼터링 현상의 기초<sup>2)</sup>

입사 이온 1개당 방출되는 원자수는 스퍼터링률 S(sputtering yield)라 한다. 스퍼터링률은 입사하는 1차 이온의 종류나 그 상태(운동 에너지  $E_0$ , 입사 각도  $\theta$ ), 타겟 종류나 그 상태(결정 방위, 표면 요철, 타겟 온도)에 의존한다.

스퍼터링 현상의 가장 기본인 입사 이온의 운동 에너지와 스퍼터링률과의 관계는 정성적으로는 그림 2와 같이 나타난다.

주1) 이 결과, 입사한 이온의 운동 에너지 크기에 따라 퇴적(박막 형성), 스퍼터링(박막 형성, 에칭) 이온 주입(불순물 도핑, 표면 개질) 등의 프로세싱이 발생한다.

스퍼터링률은 이온의 운동 에너지(임계값(threshold) <sup>주2)</sup> ~1keV) 증가에 따라 증대하고 결국 거의 일정한 값(평탄한 영역)이 되고, 수십 keV를 넘는 에너지 영역에서는 반대로 감소하는 경향이 나타난다. 또한 스퍼터 전력을 등을 고려한 실용적인 관점에서 보면 스퍼터링에 이용하는 이온의 운동 에너지로는 수백 ~500eV가 가장 효율적임을 알 수 있다. (그림 3)

그림 4는 동일한 이온 에너지를 갖는 다양한 이온 종류(그림의 가로축)를 타깃(Cu)에 조사한 경우의 스퍼터링률을 비교한 것이다.<sup>4)</sup> Ne<sup>+</sup>, Ar<sup>+</sup>, Kr<sup>+</sup> 등 불활성 가스 이온을 조사한 경우, 스퍼터링률 최대값이 관찰된다.<sup>주3)</sup> 이것이 대부분의 스퍼터 장치에서 방전용 가스로 불활성 가스 (일반적으로 Ar)가 이용되는 이유이다.

그림 5는 스퍼터링률 비( $s(\theta)/s(0)$ ) 로 정의의 이온 입사각도

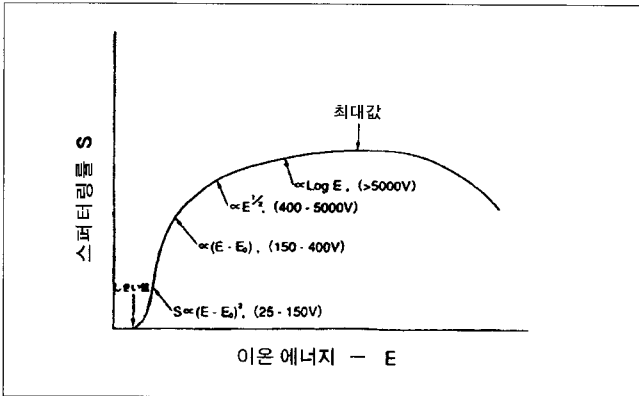


그림 2. 이온의 운동 에너지 E와 스퍼터링률 S와의 일반적인 관계 (여기에서 E<sub>0</sub>는 스퍼터 임계값 에너지이다.)

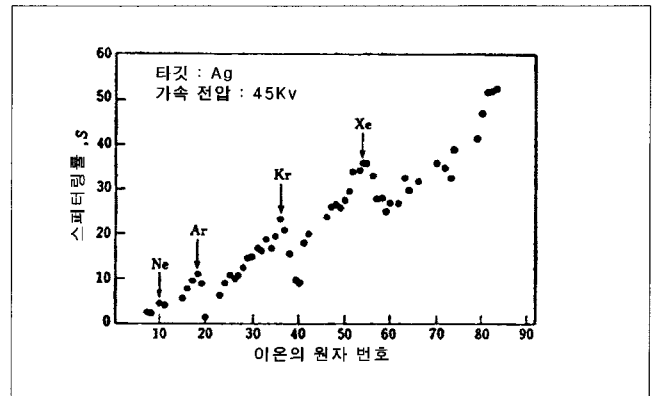


그림 4. 동일한 이온 에너지를 가진 다양한 이온 종류를 Cu 타깃에 조사한 경우의 스퍼터링률 비교 <sup>4)</sup>

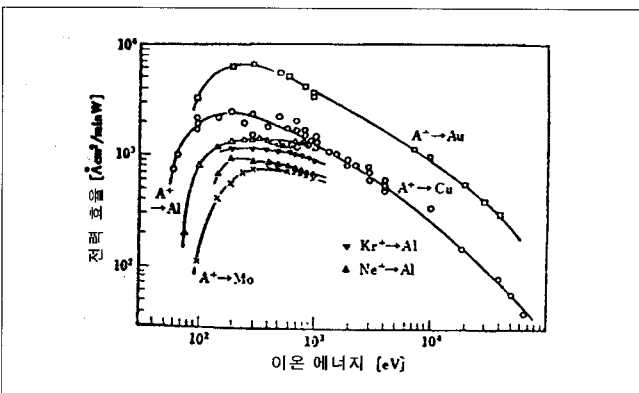


그림 3. 스퍼터 전력 효율과 이온의 운동 에너지와의 계산 관계 <sup>3)</sup> (여기에서 전력 효율은 타깃에 투입된 전력 당 에칭 속도로 규격화되어 있다.)

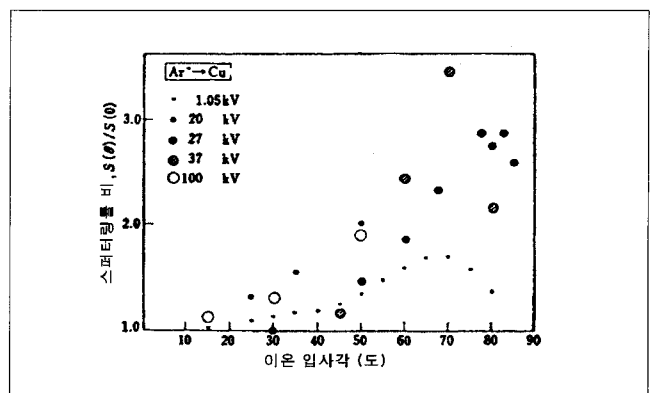


그림 5. 스퍼터링률의 이온 입사 각도 의존성의 일례 <sup>5)</sup> (입사 각도는 타깃 표면의 법선에서 측정한 값)

주2) 스퍼터링이 일어나는 최저 이온 에너지는 스퍼터 임계값 에너지라 하고, 대개 수십 eV 정도이다.

주3) 스퍼터링률의 최대값이 관찰되는 이유로는 단순한 반음 (물리적 스퍼터링)이 한 원인으로 생각된다. 또 희토류 원소의 경우 스퍼터링률이 제로 또는 최소값이 되는데 이것은 입사 이온이 희토류 원소와 반응해 층을 형성하는 것이 원인으로 생각된다.

주4) 일례로 1000K로 가열된 필라멘트에서 방출되는 입자의 에너지는 약 0.1eV이다.

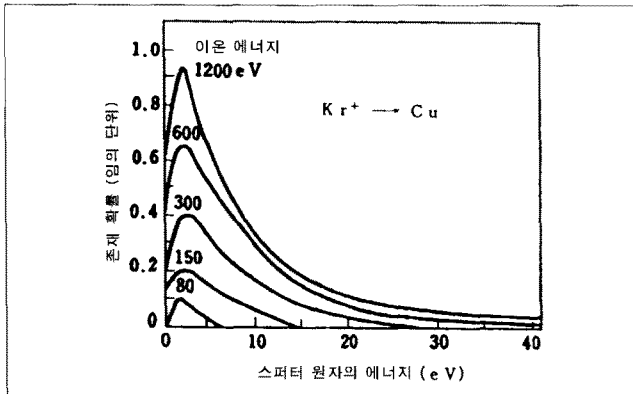


그림 6. 타겟에서 방출되는 스퍼터 원자의 에너지 분포 일례 6)

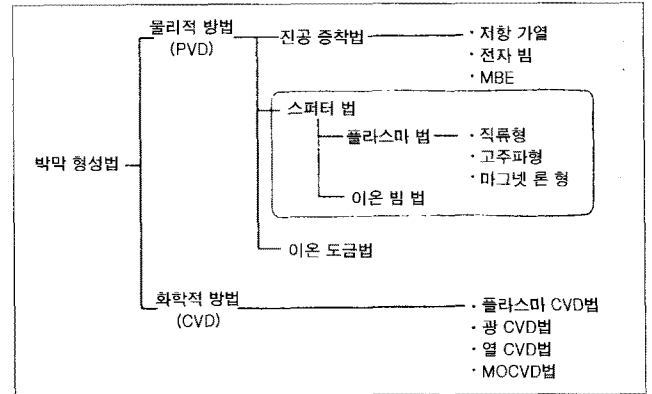


그림 7. 박막 형성법의 일반적인 분류에 의한 스퍼터 법의 위치 부여

림 1의 2차 전자나 반동 원자 등), 박막의 제반 특성에 악영향을 미치기 때문에(기판 온도 상승, 박막의 재 스퍼터 등), 뒤에 설명할 플라스마법을 이용한 스퍼터 증착에서는 특히 주의가 필요하다.

### 3. 스퍼터링 법의 특징과 분류

박막 형성법은 물리적 기상 성장법(physical vapor deposition)과 화학적 기상 성장법(chemical vapor deposition)으로 크게 나뉜다. (그림 7) 스퍼터 증착법은 이 중에서 물리적 기상 성장법에 속하며, 앞에서의 진공 증착법과 비교하면 일반적으로는 다음과 같은 특징이 있다.

- ① 고용점 재료의 박막 형성을 비교적 저온에서 실현할 수 있다.
- ② 기판으로 날아오는 입자의 운동 에너지가 크기 때문에 박막의 부착력이 양호하다.
- ③ 타겟 조성의 조합이나 첨가 가스(산소, 질소 등) 도입으로 박막의 조성이 쉽게 제어되기 때문에 다원소로 이루어진 합금이나 화합물의 박막 형성에 유리하다.
- ④ 타겟의 수명이 길고 동시에 보수가 쉽기 때문에 장치의 자동화 및 연속 운전이 적합하다.
- ⑤ 면적이 크고 고속 퇴적이 가능해 인라인 스퍼터 등의 양산화 장치가 개발되고 있다.

또한 스퍼터 증착법은 (i)장치 구성법, (ii)반응 과정, (iii)플라스마의 생성 방법 등에 따라 다음과 같이 분류된다.

우선, 장치 구성법의 차이에 따라 플라스마 법과 이온 빔 법으로 크게 나뉜다. (그림 8) 전자는 플라스마의 방전 공간 안에 타겟과 기판이 놓이는 구성이고(동작 압력 : 1~10Pa), 후자는

빔 발생원(플라스마 생성 영역)과 박막 형성실(타겟과 기판의 설치 영역)이 공간적으로 분리된 구성이다(동작 압력 :  $10^{-2} \sim 10^{-3}$ Pa).

플라스마 법에서는 기판이 플라스마에 노출되기 때문에 막속에 방전 가스가 들어가거나 기판에 대한 고속 입자 충격이 문제가 되는 경우가 있지만 그 한편에서 방전 공간 안에서 박막 형성이 진행되기 때문에 이온 빔 법과 달리 고속 제막이 가능하다.

한편, 이온 빔 법은 타겟과 기판이 공간적으로 분리되어 배치되어 있기 때문에 저온에서의 박막 형성(기판이 직접 플라스마에 노출되지 않는다)이나 순도가 높은 박막 형성(빔을 고진공 환경으로 끌어들여 프로세싱한다)에 유리하다. 또한 이 방법은 박막 형성 파라미터(이온 에너지, 빔 전류 밀도, 빔 입사 각도, 성막 시의 가스 압력)를 독립적으로 제어할 수 있는 매력적인 특징을 갖추고 있다. 따라서 이온 빔 법은 품질이 좋은 박막 형성에 높은 가능성을 가지고 있다.

또 스퍼터 증착법은 스퍼터링의 반응 기구에 따라 다음과 같이 나뉜다.

- ① 물리적 스퍼터링 법(physical sputtering) : Ar 등의 불활성 가스 이온을 타겟에 충돌시켜 스퍼터링하는 방법
- ② 화학적 스퍼터링 법(chemical sputtering) : 타겟에 입사하는 이온이 타겟 재료와 반응해 화합물을 생성해 방출되는 스퍼터링 방법 <sup>주9)</sup>
- ③ 반응성 스퍼터링법(reactive sputtering) : Ar 등의 방전 가스 중에 산소, 질소 가스 등을 혼합시켜 스퍼터링을 하여 산화물, 질소물 박막 등을 형성하는 방법.

반응성 스퍼터링 법은 재료의 조성 제어가 필요한 박막 형성뿐만 아니라 자연계서 안정적으로 존재하지 않는 재료계(초전도 박막)나 다른 박막 형성 방법으로는 제작이 곤란한 박막화가

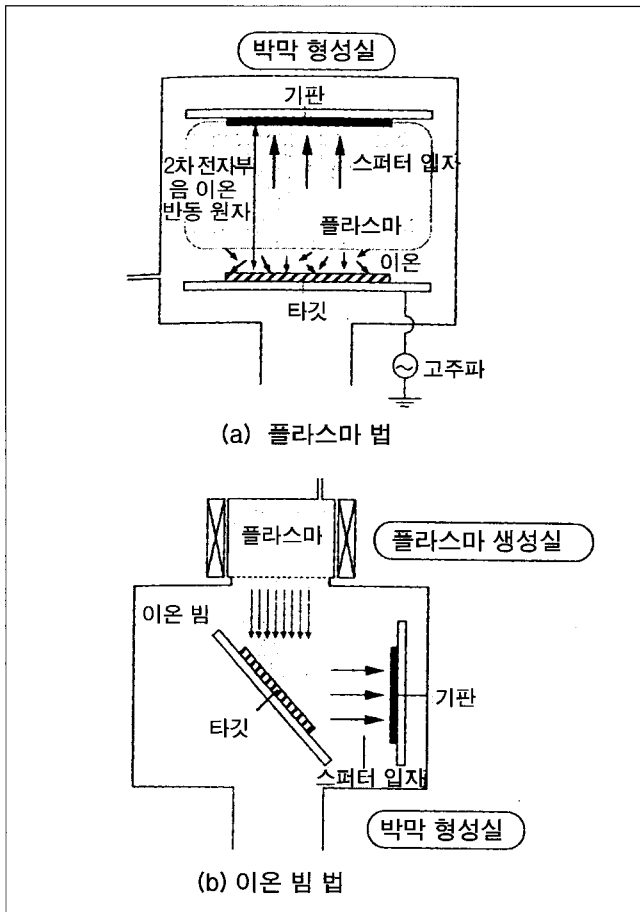


그림 8. (a) 플라즈마 법과 (b) 이온 빔 법의 장치 구성 비교

가능해 널리 이용되는 기법이다.

또한 플라즈마 생성 방법은 다음과 같이 분류된다.

- ① 직류 방전을 이용하는 방법(DC형 스퍼터 장치, 카우프만형 이온 빔 스퍼터 장치)
- ② 고주파 방전을 이용하는 방법(RF형 스퍼터 장치, RF형 이온 빔 스퍼터 장치)
- ③ 직교 전자계 방전을 이용하는 방법(마그넨트론형 스퍼터 장치)
- ④ 마이크로파 방전을 이용하는 방법(ECR형 스퍼터 장치)
- ⑤ 그 외 방법

이 중에서 RF형 스퍼터 장치는 절연성 타겟에도 대응할 수 있기 때문에 가장 널리 이용된다. 또 마그넨트론형 스퍼터 장치는 전자계의 작용에 따라 타겟 근처에 보다 밀도가 높은 플라스

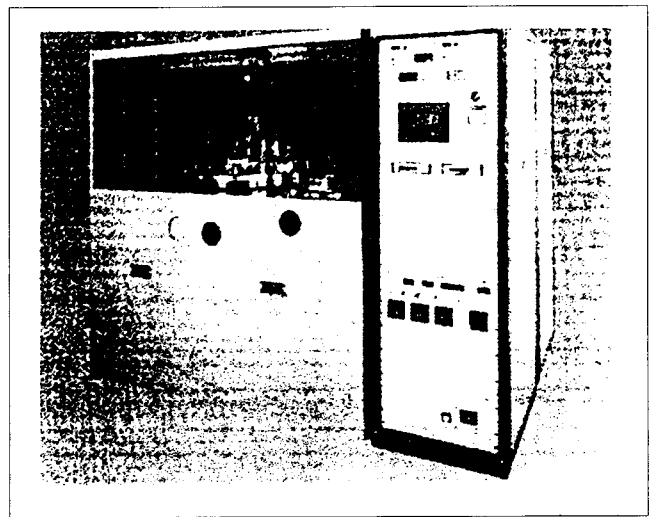


그림 9. 고체 소스 ECR 플라즈마 석막 장치 (aFTEX-6000)의 개략도  
(사진 제공 : 주식회사 아프티의 及川秀男 씨)

마를 생성하기 때문에 박막 형성의 고속화가 실현되고 있다. 한편, 이온 빔 스퍼터 장치로는 열 음극 및 직류 방전 방식의 카우프만형 이온 빔 스퍼터 장치가 가장 널리 이용되고 있지만 최근에는 마이크로파 방전을 이용한 ECR형 스퍼터 장치<sup>주6)</sup> 등 새로운 장치도 개발돼 실용화되고 있다(그림 9).

#### 4. 스퍼터링에 의한 박막 형성 응용 예(광학 박막)

스퍼터 증착법을 이용한 광학 관련 분야로의 응용으로는 광학 박막 형성을 들 수 있다. 광학 박막의 용도는 거울, 렌즈 등과 같은 반사 방지막, 건축, 자동차용 열선 반사 유리막, 디스플레이용 저 반사 유리막, 광통신 분야의 파장 분할 다중 시스템용 파장 선택 필터 등, 여러 방면에 걸쳐 있다. 이들의 광학 박막 형성에는 스퍼터 증착법에 비해 활성화 증착법(ARE : Activated Reactive Evaporation)이나 이온 빔 어시스트 증착법(IAD : Ion Beam Assisted Deposition) 등의 진공 증착법을 기본계로 한 제조 장치가 많이 사용되고 있는데 최근에는 그림 9와 같은 ECR형 스퍼터 장치로 형성한 반도체 레이저(단면 코팅막 형성)에서 지금까지의 박막 형성법으로는 실현하기 힘들었던 디바이스의 높은 신뢰 및 긴 수명이 달성된 경우도 있다. 이러한 새로운 스퍼터 증착 장치의 개발이 진전되길 크게 기대해 본다.

주5) 가장 대표적인 예는 H<sup>+</sup>와 C의 반응으로 CH<sub>4</sub>가 생성돼 탈락하는 과정이다.

주6) 이 방법은 플라즈마 생성실과 박막 형성실이 분리되어 있기 때문에 이온 빔 법의 범주에 속한다. 현재 시판되고 있는 스퍼터 장치로 가장 품질이 좋은 (고순도 및 고굴절률 제어·저 손상) 박막 형성을 저온에서 실현할 수 있다.