

전자빔 여기 플라즈마 소스



노승정
단국대학교 응용물리학과 교수



김태영
서울대학교 원자핵공학과
박사과정 수료

업의 경우에는 300 mm 웨이퍼의 가공을 위한 장비가 이미 절실하게 요구되고 있으며, 평판디스플레이 산업 역시 가공 기판 면적의 크기를 넓히어 생산성을 향상시키는 전략을 선택할 것으로 판단된다.

물질의 제 4 상태라고 불리는 플라즈마를 응용한 기술은 반도체와 평판디스플레이의 증착 및 식각공정에서 중요한 역할을 수행하고 있으며, 계속하여 대면적에 걸쳐 균일한 플라즈마 분포를 갖는 장비를 필수적으로 요구하고 있다. 현재 전세계적으로 rf와 microwave를 이용한 많은

플라즈마 소스가 제안되고 있으나, 원리와 기술적인 면을 고려할 때 단순히 챔버의 크기를 증가시켜 대면적에 걸쳐 균일한 플라즈마를 유지하기에는 많은 문제점이 지적되고 있다.

특히 우리나라의 경우, 반도체 산업의 급속한 성장과정 속에서 제조 장비의 초기 투자와 개발에 등한시한 결과 아직까지도 주요 장비의 대부분을 수입에 의존하고 있는 실정이며, 평판디스플레이 산업 역시 제조장비의 국산화에 대한 기반이 취약한 실정이다.

여기서 소개할 전자빔 여기 플라즈마소스는 전자총을 이용하여 발생한 열전자를 양극을 이용

1. 서론

현재 세계 반도체 시장의 규모는 약 1,500억 달러에 이르고 있으며, LCD에 주도되고 있는 평판디스플레이의 세계 시장은 매우 빠른 속도로 성장하여 2000년에는 그 규모가 200억 달러를 넘어설 것으로 전망된다. 반도체와 평판디스플레이 산업은 제조장비에 대한 의존도가 거의 절대적인 특성을 갖는다. 반도체 산

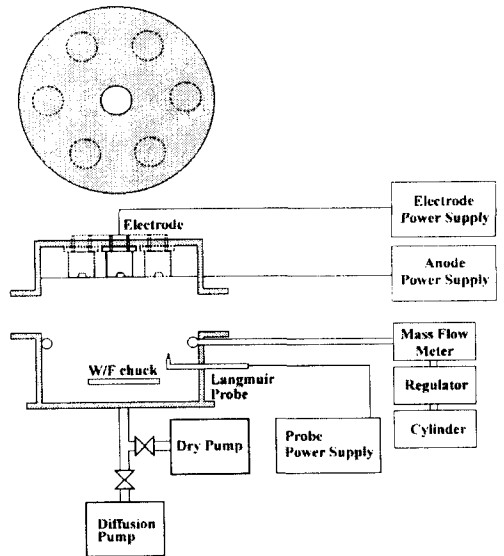


그림 1. 전자빔 플라즈마장치의 개략도

하여 가속시킨 후에 증성기체와의 충돌을 유도하여 플라즈마를 발생, 유지시키는 독특한 방법이다. 반응기의 구조에 따라 전자총의 위치를 선정할 수 있으며, 인출전극에 전압을 인가함으로써 전자의 가속에너지를 필요에 따라 조절하여 공정에 이용되는 다양한 기체의 이온화 단면적(ionization cross section)을 제어하기가 용이하다. 따라서 플라즈마 확장성, 균일성이 용이하며, 동작원리가 단순하고 장치의 복잡함을 피할 수 있다. 이 전자빔 여기 플라즈마 방식은 일본의 이화학 연구소와 가와사키중공업 등이 반도체 제조용으로 개발하고 있으며, 국내에서는 단국대학교, 서울대학교 그리고 한국 가속기 및 플라즈마 연구협회 등이 반도체와 평판디스플레이 제조용으로 개발하고 있다.

전자빔 플라즈마 소스의 주요 부분은 전자총, 가속전극, 반응함 등으로 구성되며 개략적인 모양은 그림 1에 나타나 있다.

2. 전자총

자유 전자는 외부로부터 가해진 에너지에 의해 전자총에서 방출된다. 금속에 존재하는 전자는 금속표면의 일정한 포텐셜(potential)에 의해 구속되어 있다. 이 포텐셜을 금속의 일함수(ϕ)라고 한다. 일함수는 외부 진공의 포텐셜을 기준으로 해서 금속의 전자 포텐셜까지의 차이를 의미한다. 따라서 외부에서 금속의 일함수에 해당하는 에너지를 가하게 되면 금속에 속박된 전자는 외부로 방출된다. 이때 외부에서 전자방출에 공급되는 에너지 종류에 따라서 열전자 방출(thermionic emission), 광전자 방출(photoelectric emission), 전기장 방출(electric emission), 이차전자방출(secondary emission) 등으로 나뉜다. 본 전자빔 플라

즈마장치는 열전자 방출에 의하여 간편하게 전자를 이용하는 방식으로, 금속의 온도를 조절함으로써 전자의 방출을 유도해낼 수 있다.

외부에서 일함수 이상의 에너지를 가하게 되면 금속표면의 전자들이 에너지를 흡수하게 되어 금속으로부터 벗어나게 된다. 금속에서 방출된 이 전자를 열전자라 하며 외부의 에너지량과 방출되는 전자의 양은 Richardson - Dushman의 열전자방출 이론에 의해 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$J = A_0(1 - r)T^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) \\ \approx A_0T^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right) \left(\frac{A}{m^2}\right) \\ A_0 = 1.20 \times 10^6 \text{ A/m}^2\text{K}^2 \\ r = \text{반사계수} \\ T = \text{절대온도} \\ e = \text{전자의 전하량} \\ \phi = \text{일함수} \\ k = \text{볼츠만상수} \\ h = \text{플랑크상수} \\ m = \text{전자질량이다.}$$

이 식에 의하면 금속에서 방출되어 나오는 전자의 양은 온도와 일함수를 모두 가진 항에 의해 지배적으로 영향을 받는다. 따라서 전자총의 음극을 선정할 때 일함수는 낮고, 용융되는 온도가 높은 금속을 선정하면 많은 양의 전자를 얻을 수 있다. 하지만 용융점이 비록 높아도 용융점 밑에서 증발량이 크면 안정적인 열전자 방출에 제한이 있기 때문에 적절한 온도에서 음극을 가열하여 열전자 방출을 유도해야 한다. 이러한 제약으로 인하여 실제 전자총에 들어가는 음극재료로 사용되는 금속은 제한되어 있다. 열전자 방출을 위하여 전자총에 사용되는 대표적인 재료들에 대한 적절한 동작온도와 방출되는 전류밀도를 표 1에 나타내었다.

전류밀도나 작동온도면에서 LaB₆ bulk는 전자총의 재료로 매우 훌륭한 특성을 갖고 있다. 기초실험에서는 가격과 가공성 등을 고려하여 주로 텅스텐을 사용한다.

표 1. 대표적인 음극들의 작동온도에 따른 전자방출밀도

음극재료	작동온도 [K]	전자방출밀도 [$10^3 \text{A} \cdot \text{m}^{-2}$]
Tungsten	2,500	3
Tantalum	2,400	8
Rhenium	2,400	0.5
BaO/SrO on nickel D.C.	1,100	10
Oxidized cathode on pulse	1,000	100
BaO/SrO on Ni matrix type	1,150	20
L cathode	1,360	30
Impregnated Tungsten	1,350	50
ThO ₂ on W or Ir	1,900	10
LaB ₆ on Re	1,450	0.5
LaB ₆ bulk	1,900	50
Thoriated Tungsten	1,900	10

3. 가속전극

앞서 기술한 바와 같이 자유 전자는 외부에서 걸어준 에너지에 의해 전자총에서 전자가 방출하게 된다. 이때 전자총에서의 전자의 양은 공간전하 효과에 의해서 결정이 된다. 이 공간전하 효과란 전자를 무한대로 공급해주는 음극이 양극과 평행하게 위치하고 있다고 가정하더라도 음극에서 방출되는 전자는 공간전하(space charge)에 의해서 인출전류의 제한을 받는 효과이다. 즉, 음극 주위에 전자가 존재하기 때문에 두 평행판은 전자가 존재하지 않는 평행판의 등전위면보다 낮은 포텐셜을 가지게 된다. 이때 낮아진 포텐셜에 의해 전자의 방출이 줄어든다. 그러나 음극표면에서의 전자가 줄어들면 그 전위차는 다시 상승하여 전자 방출이 증가한다. 이런 과정을 반복해 결국 음극 표면에서 전기장의 세기가 0이 될 때의 전류로 전자는 방출되는 효과이다. 이때 전자는 음극 표면의 온도와 상태가 전자의 방출에는 영향을 주지 않고, 오직 양 전극에 인가된 전압과 양 전극의 기하학적 구조에만 의존한다. 만약, 음극과 양극간의 거리가 줄어들거나 양 전극에 인가된 전압이 증가하면 전자의 방출이 증가하게 된다. 그러므로 공간전하 제한 효과에 영역에서의 전자총은 가속전극의 인가 전압에 의해 전류를 제어할 수 있다.

한편, 실제의 음극은 Richardson-dushman의 이론과 같이 음극의 온도에 따른 유한한 양의 열 전자만 방출할 수 있다. 그러므로, 공간 전하 제한 영역에서, 양극 사이의 인가 전압이 충분히 높아서 음극 한계 전자 방출량에 도달하면, 이 보다 더 높은 전압을 인가한다고 하더라도 전류의 증가를 기대할 수 없다. 이때의 전류는 Richardson-Dushman의

열전자방출 이론에 의해 전자방출이 이루어진다. 이러한 효과를 온도제한 (temperature limited) 효과라 한다. 만약 전압을 아주 높게 가하게 되면 field emission 효과에 의해 전류가 아주 급격히 증가를 하고 이는 전자의 양자역학적인 성질에서 기인한 터널링 효과로 설명이 가능하다.

이렇게 가속전극에 의해 방출된 전자빔은 이 전자빔이 반응함에서 중성 기체와의 충돌을 한다. 이때 전자의 운동에너지가 중성 기체 내에서 전자를 속박하고 있는 에너지보다 크게되면 중성기체는 전자에 의해 이온화가 된다. 이러한 과정이 연속적으로 진행되어 플라즈마가 형성된다. 이때의 이온화 단면적(σ_{iz})은 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_{iz} = \pi \left(\frac{e}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{1}{E} \left(\frac{1}{E_{iz}} - \frac{1}{E} \right)$$

이때 $E > E_{iz}$ 이다.

여기서 ϵ_0 는 진공중의 유전율, E는 전기장의 크기, E_{iz} 는 이온화 에너지이다.

위의 식은 Thompson 단면적이라 불리며 전자의 에너지가 중성기체의 이온화에너지보다 작으면 $\sigma_{iz} = 0$ 이 된다. 그리고 σ_{iz} 의 최대값은 $E = 2E_{iz}$ 일 때 나타난다. 이온화 단면적(cross section)의 최대치는 에너지 50 eV 전후로 알려져 있다. 이렇게 중성기체와 충돌된 전자는 이온화과정에서 2차 전자가 발생되어 다른 중성기체와 연쇄적으로 충돌을 하면서 플라즈마가 형성된다. 일반적인 DC 플라즈마의 경우에는 2차 전자가 생성되지 않으면 연속적인 중성기체와의 충돌이 힘들어지게 된다. 또한, 전극간의 간격과 압력과의 관계는 일정한 규칙이 따른다. 이러한 전극간의 간격(d)과 압력(p)이 2차 전자의 생성에 관련되어 설명되는 이론이 아래의 Paschen 법칙이다.

$$V_b = \frac{C_1(pd)}{C_2 + \ln(pd)}$$

C_1 과 C_2
= 기체 특성에 따라
변하는 상수
 p = 압력
 d = 전극간의 거리

만약 두 전극간의 거리가 짧고 압력이 낮으면 음극에서 나온 전자에 의한 2차 전자의 발생이 용이하여 이온들이 형성된다. 그러나 전압이 너무 크면 전자들은 이온화하기에 충분한 에너지를 얻지 못하게 된다. 또 두 전극간의 거리가 너무 길면 이온을 형성하는 비율이 작아지게 된다. 이러한 점을 고려하여 동작압력에 따른 적절한 전극간의 거리를 조절할 필요가 있다.

그러나, 전자빔을 이용한 플라즈마 방전은 플라즈마를 생성, 유지하기 위해서 필요한 전자를 이차전자 및 음극으로부터 방출된 전자빔으로부터 얻으므로 일반적인 DC 플라즈마보다 쉽게 플라즈마를 발생시킬 수 있다.

그리고 앞에서 언급한 공간전하 제한영역 상태의 양극 전압에 의해 인출된 전자빔의 전류가 결정된다. 이 인출된 전자빔은 전극에 의해 전자빔의 모양 및 에너지를 조절할 수 있다. 전자빔의 모양을 조절하기 위해서는 전자빔의 광학계가 필요하다. 전자빔의 광학계는 크게 자기장 렌즈와 전기장 렌즈로 나눌 수 있다. 전체적으로 자기장이 없는 상태에서 플라즈마를 발생할 목적이 라면 자기장이 없는 전기장 렌즈를 채택한다.

4. 반응함

반응함은 전자총에서 인출된 전자빔이 전극을 지난 후 반응함에 주입되는 중성기체와 충돌하여 플라즈마가 생성되는 곳이다.

실제 공정에 적용될 때는 피공정 물, 즉 반도체 웨이퍼 상에서 플라즈마에 의한 공정도 수반된다. 이를 위해서 반응함에는 중성기체가 들어올 수 있는 feed thru 와 실제 중성기체가 반응함에 균일하게 뿌려지게 하는 shower ring 등이 갖추어져야 한다. 또한 플라즈마 진단을 위한 Langmuir probe 등을 장착시킨다.

플라즈마의 구속 및 boundary 의 조절을 위하여 전기장 장벽 및 자기장 장벽(multipole(or cusp) magnet)의 부착을 고려할 수 있다. Multipole magnet을 사용한 구속은 원통형 진공함 벽면을 따라서 자석의 N극과 S극을 교대로 배열함으로써 플라즈마의 구속이 이루어진다. 이러한 구조에서 자석은 line cusp 자장 구조를 형성하고, 자기장의 세기는 자석근처에서 최대이고, 진공함 안쪽으로 갈수록 급격히 감소한다. 그리하여, 진공함 내부의 플라즈마가 차지하는 부피의 대부분은 거의 자기장이 없는 영역이

되고 진공함 내부 표면에서만 강한 자기장이 존재하는 형상이 된다. 이로 인하여 진공함 벽쪽으로의 플라즈마 손실을 줄이고, 플라즈마의 밀도와 균일도가 개선되는 결과를 얻을 수 있다.

5. 결 론

지금까지 살펴본 전자빔 여기 플라즈마소스 장치는 반응기의 구조 및 크기에 따라 전자총의 위치와 개수를 선택할 수 있으므로 타 장비에 비해 확장성 및 구조에 따른 균일성 확보가 특히 우수하다. 또한 장치가 비교적 복잡하지 않으며 공정에 필요한 파라미터의 제어가 용이하다. 그러나, 반도체와 평면디스플레이 제조에 실제로 응용하기 위해서 다음과 같은 문제점들이 해결되어야 할 것이다.

전자총의 수명을 보장하고, 전자총으로 부터의 오염을 최소화하고, 작동압력의 범위를 넓히기 위하여 전자총의 최적화와 함께

차등 진공(differential pumping)을 고려하여야 할 것이다. 공정 변수에 알맞은 플라즈마를 형성하기 위해서 정확한 플라즈마진단이 필요하다. 또한 생성된 플라즈마의 균일도와 밀도를 향상시키기 위해 자기장 효과를 도입을 신중히 고려할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] A. S. Gilmour, Jr., "Micro-wave Tubes", Artech House, INC., 1986
- [2] L. Solymar & D. Waish, "Lectures on the Electrical Properties of Materials", 1993
- [3] Alfred Grill, "Cold Plasma in Materials Fabrication From Fundamentals to Application", IEEE Press 1994
- [4] C.E. Hill, "ION AND ELECTRON SOURCE", <http://nicewww.cern.ch/~linac2>.
- [5] B. Chapman, "Glow Discharge Processes", 1980

< 김현후 위원 >