

Hollow Cathode Discharge Method



김현후

두원공대 전자과 조교수

관심분야: 전자세라믹, PVD장비,
강유전체, 세라믹센서



박철현

충북대 전기공학과 대학원

관심분야: 전자세라믹, 유전체

배민호

충북대, 전기공학과, 대학원

관심분야: 전자세라믹, 유전체

1. 서 론

Hollow cathode discharge법은 물리증착법(PVD)의 일종으로 매우 특유한 진공증착법이다. Hollow cathode란 중공음극(中空陰極)이라는 의미를 나타내고 있으며, 1916년 Friedrich Paschen이 helium 스펙트럼선을 연구하기 위해 간단한 직각 tube형의 aluminum sheet를 이용하여 helium d.c. discharge을 발생시킨 것이 최초의 hollow cathode이다[1]. 그 후, hollow cathode는 주로 spectrochemistry의 광원으로 사용되어 왔고, 처음 hollow cathode 효과를 제시한 보고는 1954년 Little과 von Engel[2]에 의해서 였다. 또한, 1972년에 Morley[3]는 hollow cathode를 최초로 박막증착장치의 증발공급원으로 사용하였다. 그리고, 1980년대 이전까지의 발표된 대부분의 보고는 전압원으로서는 직류를 사용한 dc hollow cathode에 관한 것이었지만 이후로는 많은 연구자들이 직류원 대신 교류의 전원원에 대한 가능성과 이론을 정립하게 되었으며, 1983년에는 Horwitz [4]가 처음으로 radio frequency (r.f.) hollow cathode를 실험하고, 발생기구에 대하여 연구하였다. 최근에는 r.f. hollow cathode의 여러 가지 형태의 구조와 배열에 의한 대면적의 초경금속재료에서 산업용 공정기술과 미세가공에 대한 연구가 진행 중에 있다.

본 논문에서는 높은 경도의 내

마모성과 내식성의 재료에 대한 plasma 박막증착기술의 관점에서 우수한 특성을 나타내는 d.c. 및 r.f. hollow cathode의 동작원리와 중요한 특성 등을 기술하고, 최근의 hollow cathode에 대한 연구동향을 살펴보기로 한다.

2. Hollow cathode의 동작원리

2.1 d.c. hollow cathode의 동작

그림 1(a)와 (b)는 hollow cathode discharge의 구조와 plasma발생의 동작원리를 간단하게 나타낸다. 진공조 내부에 고온금속으로 제작된 hollow cathode 와 anode을 서로 대응하게 설치하고, hollow cathode 내부로 Ar가스를 ~0.1Torr 정도로 주입하면서 고압전류를 인가하면 hollow cathode 내부의 가스분자가 이온화한다. 이때 발생된 plasma는 전자, 양이온 및 중성의 기체분자가 혼합된 고온의 기체로서 저압력가스의 plasma상태로 된다. 이런 상태에서 양이온은 음으로 인가된 hollow cathode 내부를 가속충격하여 2차 전자를 방출하게 되고, 또한 여기 분자의 발광에 의해 음극으로부터 광전자 방출 및 준안정상태 분자의 음극충돌에 의한 전자 방출 등이 나타나게 된다. 이와 같은 작용으로 hollow cathode의 온도는 고온으로 상승하게 되어 열전자가 방출된다. 열전자가 방출되면서 plasma의 증배작용으로 hollow cathode 부근의 전자 밀도는 급속히 증가하게 된다.

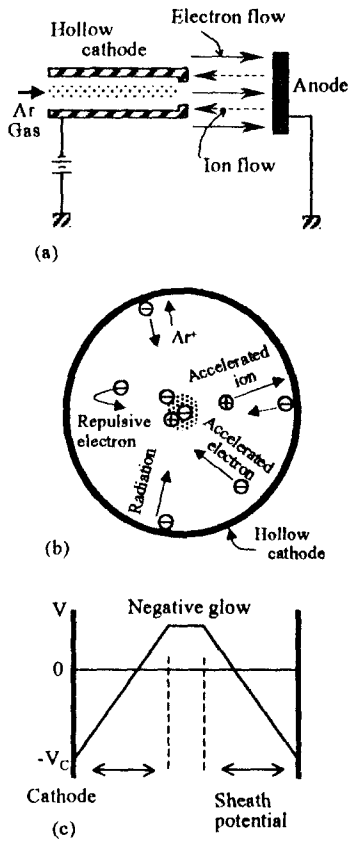


그림 1. Hollow cathode discharge의 동작원리

이때, hollow cathode와 plasma는 스스로 전자원의 역할을 하게 되며, 대전류의 전자빔은 anode를 향하여 방출하게 된다. 전자빔의 일부는 비행과정에서 잔류가스와 충돌하여 양이온과 전자전리를 생성하고, 양이온은 다시 음극에 충돌하여 전자의 방출을 촉진하게 된다. 그림 1(c)는 hollow cathode 단면도내에서의 전위분포를 보여준다.

이와 같은 hollow cathode의 중요한 특성은 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ Torr의 비교적 넓은 영역의 동작압력에서 사용되고, 전자밀도가 높기 때문에 이온의 수도 필연적으로 매우 높으며, 일반적인 전자총에 비하여 대직경의 전자빔이 얻어지며, 특히 저전압 대전류의 특

성을 갖는다.

Ar기체가스의 유량과 hollow cathode의 직경에 의한 방전전압의 의존성은 중공음극 내부로 침투되는 plasma 침투길이의 변화로 설명된다[5]. Hollow cathode discharge의 상태에서 cathode의 끝으로부터 어떤 일정거리에서 최대 온도를 나타내고, 이런 거리는 Ar기체유량과 음극직경에 강하게 의존하며, 또한 방전전압에도 의존한다[6].

2.2 r.f. hollow cathode의 동작

D.c. hollow cathode에서는 음의 전극에 대응하는 anode가 배치되고, 회로구조 내에서 가스의 절연파괴(breakdown)가 실현되기 위해서는 다음의 두 단계로 수행되어야 하는데: 첫 단계로 anode와 cathode 사이에 예비방전이 형성되어야 하고, 둘째로는 hollow cathode내에서 방전이 발생한다. 첫 단계에서 이온화된 가스채널은 cathode와 anode사이에서 발생하여야 하고, 직류고전압이 요구된다. 그리고, 둘째 단계에서는 비교적 낮은 전압이 인가되지만 만일 직류전압이 중지되면 처음 단계부터 다시 시작하여야 한다.

R.f. hollow cathode의 발생원리는 직류의 경우와 유사하지만 r.f.의 방전에는 특유의 성질을 근본으로 한 본질적인 차이가 있다. 구조상에 있어서 r.f. power (13.56MHz)와 직접 연결된 r.f. hollow 전극이 있고, 대표적인 r.f. power는 0.5kW이하이며, 진공조의 동작압력이 0.1~1Torr 정도의 영역에서 r.f. 전극에 전원이 주어진다. 그림 2는 r.f. hollow cathode의 기본동작원리 및 plasma의 발생을 보여준다. 그림에서 보여 주듯이 높은 에너지를 가진 전자는 cathode의 서로 대응하는 내벽에 형성된 sheath의 반발적인 전위차 사이에서 진동한다. cathode에서 방

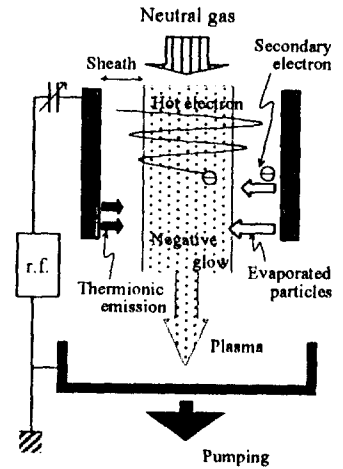


그림 2. R.f. hollow cathode의 기본 원리

출되어 sheath를 통해 negative glow에서 형성된 전계로 인하여 가속된 전자는 진행경로에서 가스입자와의 무수한 충돌을 일으키게 되고, sheath와 negative glow내의 양쪽에서는 가스의 이온화가 증대된다. R.f. hollow cathode에서 가스의 절연파괴는 압력에 의존하며, Paschen의 법칙을 따른다. 그리고, sheath의 두께는 가스압력의 증가로 인하여 감소하게 되고, $d \sim 1/\sqrt{p}$ 의 관계가 있다. Cathode표면으로부터 방출된 2차 전자는 sheath와 negative glow의 양쪽 경계에서 충돌로 주로 양이온을 발생시킨다. 또한, cathode 표면에서의 photoemission은 negative glow에서의 고 에너지 광자를 만들고, 전자의 thermionic emission은 이온의 가속충돌로 인하여 가열된 hot cathode에서 생성된다. 이때, 온도는 높은 r.f. power에 강하게 의존하게 되고, thermionic 방출전자가 지배적이다. 따라서, 이온의 가속충돌과 cathode온도의 증대로 인하여 hollow cathode의 재료는 sputter되거나 증발현상이 일어난다.

이상과 같이 기술한 r.f.

hollow cathode discharge의 동작에서 알 수 있는 중요한 특징을 살펴보면, hollow cathode discharge의 r.f. 생성과정에서 anode는 r.f. plasma 그 자체이며, 이를 virtual anode(가상 양극)라고 부른다. 이런 virtual anode의 구조와 성질은 방전 영역에 의해 조절된다. 그리고, r.f. hollow cathode의 구동력(driving force)은 sheath을 통하는 직류전원이지만, 전압의 크기는 전력원의 주파수에 의해 주로 조정되고 sheath의 두께는 주파수에 역비례하게 된다($d \sim 1/\omega$). R.f. hollow cathode의 방전은 일반적인 r.f. glow 방전에서 시작하며, 유지하는 것도 간단하다. 따라서, r.f. hollow cathode의 동작은 매우 우수한 안정성을 가진다.

3. Hollow cathode의 구조

3.1 Hollow cathode의 설계조건

고온금속의 박막증착 과정에서 이온화를 위한 열원으로서 hollow cathode discharge의 구조설계에서 고려해야 할 사항을 살펴보면 다음과 같다.

- ① Cathode에서 이온의 가속충돌에 의한 sputter로 발생하는 불순물의 극소화를 위하여 cathode의 재질은 가급적으로 낮은 sputter yield를 갖는 금속을 이용한다.
- ② Hollow cathode는 고온으로 동작하기 때문에 높은 용점의 재료를 사용하고, 특히 고온에서 낮은 증기압을 갖는 금속으로 한다.
- ③ Hollow cathode는 전자발생원으로 열전자가 생성되는 발생기 구이며, 주어진 온도에서 많은 열전자를 생성하여야 한다.
- ④ Hollow cathode의 방전과정에서 방전가스의 적절한 유입과 배기속도를 유지하여야 하고, plasma 방전의 점화 및 유지가 효과적으로 수행되도록 hollow cathode의 내경이 고려되어야 한다.

⑤ 지속적인 방전과 장시간의 전력 공급에 따른 과정을 견딜 수 있도록 hollow cathode tube의 두께를 고려한다.

⑥ 고온의 hollow cathode의 지지부를 생각할 경우, 전력의 손실을 최소화하는 hollow cathode의 길이를 고려한다.

⑦ Hollow cathode의 재질은 다루기가 쉬워야 한다.

이상에서 기술한 바와 같이 hollow cathode의 재료는 비교적 낮은 증기압, 낮은 sputtering yield와 높은 열전자 방출특성을 지닌 고용점의 물질이어야 하고, 이와 같은 재료로는 W, Ta, Mo, LaB₆ 등이 사용되고 있다.

3.2 Hollow cathode의 구조

R.f.와 d.c. hollow cathode의 방전과정은 유사하며, hollow cathode의 구조도 비슷하다. 그림 3은 여러 형태의 기본적인 hollow cathode 방식을 보여주고 있으며, 다양한 방식의 hollow cathode에서 구조는 설계조건에서 고려한 사항을 충족하여야 한다.

Hollow cathode의 방전은 자기장을 인가하면 영향을 받게 되는데, hollow cathode내벽을 관통하는 자기장을 형성하게 되면 전자의 운동이 진동하는 경로를 제어하게 되어 결국 방전이 cathode의 배출구에서 확대되도록 촉진하게 된다[7]. 이러한 원리는 hollow cathode에서 자기장 제어스위치와 같이 응용되고 있는데, 이 원리를 이용하면 자기장은 방전을 확장하고 방전영역을 조절할 수 있으며 cathode의 표면에서 r.f. 전력밀도가 확대되기 때문에 최근에는 선형평판 hollow cathode인 LAD(linear arc discharge) source로 이용되기도 한다.

최근에는 hollow cathode 방전을 계속 유지하면서 폭넓은 동작 압력하에서도 극히 균일하고 높은 plasma밀도의 특성을 갖는

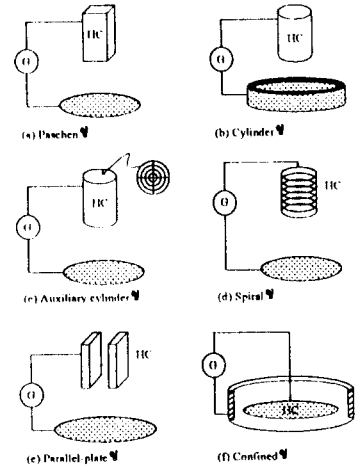


그림 3. 여러 가지 방식의 hollow cathode.

정사각형의 끝이 가는 hollow cathode인 square HCT를 개발하였다[8]. R.f. hollow cathode를 작은 크기로 만들 경우에 낮은 r.f. power에 의해서도 높은 bias 전압에 도달할 수 있고, 더욱이 작은 크기의 r.f. cathode는 hollow 기판이나 작은 tube형의 진공조내에서 설치하기가 용이하다는 이점이 있다.

선형으로 배열된 multiple r.f. hollow cathode가 대면적의 박막 증착이나 dry etching에 이용되고 있으며, 그림 4는 multiple r.f. hollow cathode의 구조를 나타내고 있다. 몇 개의 hollow 실린더에 자기장을 형성하기 위해 다수

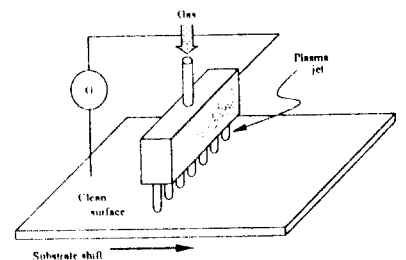


그림 4. 대면적의 박막증착을 위한 multiple r.f. hollow cathode.

의 자석을 장착한 hollow cathode는 고밀도의 plasma를 발생시킨다. 64개의 cathode를 나란히 배열하고 자석과 직류 전원으로 설계된 multiple hollow cathode가 대면적의 공정을 위해 실제 산업용으로 이용되고 있다[9].

4. Hollow cathode의 응용

Plasma 공정기술은 박막의 증착, 표면의 etching, 및 세정, 도핑과 거칠기 등의 다양한 표면처리를 포함한다. Hollow cathode는 공정을 위해 필요한 입자의 주공급원일 뿐만 아니라, 진공조 내에서의 반응과정과 이온화과정의 확장을 위한 전자와 이온화가스의 보조 공급원이기도 하다. 이와 같이 진공조에서 hollow cathode는 가장 중추가 되는 요소라고 고려할 수 있으며, 그림 5에서와 같이 cathode를 통해 흐르는 가스에 의존하여 다음 3가지로 분류할 수 있다.

① 박막성장을 지배하는 plasma 화학증착: PECVD 혹은 단순 PCVD의 plasma상태에서 요구되

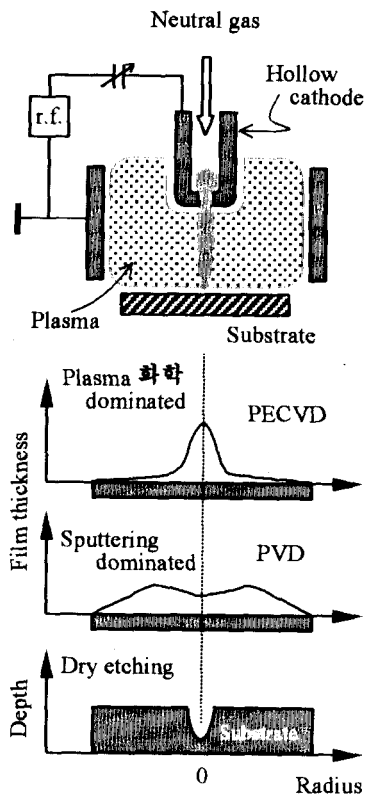


그림 5. Hollow cathode에 의해 가능한 plasma 공정분야

는 박막의 합성을 위해 필요로 하는 모든 가스를 함유한다. 이런 과정으로 기판에 형성되는 박막증착의 분포는 그림에서 표현하였듯이 균일하지 않고, hollow cathode에서 배출되는 plasma기류에 의존하여 집중하게 된다.

② Sputter 혹은 증발법에 지배되는 공정: r.f. hollow cathode를 이용한 PVD 공정에서 100W 이상의 r.f. power가 인가되면, 주입된 이온은 가열되고 hollow cathode의 배출구에서 sputter되거나 증발된다. 만일, 반응성 가스인 산소나 질소 등의 가스가 포함되면 반응성 PVD증착이 이루어진다. 또한, r.f. power가 증가하면 cathode도 가열되며 금속의 증발량도 확대된다. 이런 경우, 금속의 기체압력은 충분히 높기 때문에 다른 가스가 없더라도 방전과정이 유지된다. 증착된 박막의 두께분포는 cathode의 구조와 가스에 의존하여 그림에서 보여 주듯이 두 개의 대칭침두를 나타낸다. 그리고, PVD기술에서 이온플레이팅의 효율을 높이고자 plasma의 공급원으로 hollow cathode를 이용하고 있다.

표 1. R.f. hollow cathode에 의한 plasma 증착의 분야

Regime	Film	Hollow cathode	r.f. (MHz)	Power (W)	Gases	Pressure (Pa)	Substrate	T _s (°C)	Deposition rate(μm/m)
PECVD	a-Si:H	Al	27.12	<100	Ar-SiH ₄ -H ₂	50~100	Si, glass	200	0.5~1000
	Si, N	Ti	13.56	<200	Ar-SiH ₄ -N ₂	50~100	Si, steel	100~300	1~1000
	Si, O, N	Al	27.12	5~150			Al, stainless steel		
	Si, C	Al	27.12	≤200	Ar-SiH ₄ -C ₂ H ₂	100	Al tube	≤300	1~10
	DLC C diamond	Graphite, W	13.56	50~500	>10% CH ₄ in H ₂ <1% CH ₄ in H ₂	500~10 ⁴	Si, Mo, W	≤900	≤20 0.01~0.03
Etching-PVD	C	Graphite	13.56	300~500	H ₂ (-He)	500	Si, graphite	≤900	103
PVD	Ti, Mo, W, Al, Pt, Ni	Ti, Mo, W, Al, Pt, Ni	13.56	<500	Ar	10~100	Metal, ceramic	<300	0.05~1
Reactive PVD	Ti, N	Ti	13.56	100~350	Ar-N ₂	10~100	Si, steel, Al, stainless steel	<300	0.05~2
	Ge, N	Ge	13.56	≤100	N ₂	50	Si	350	0.01~0.07
Arc PVD	Cu	Cu	13.56	500	Ar	≤2	Si	<300	>1
	Mg	Mg				<1			4

③ R.f. hollow cathode에 의한 dry etching: 표면에 반응하거나 진공 pump로 제거되는 휘발성의 가스인 활성화 F 혹은 Cl의 이온과 원자를 포함하는 혼합가스로 plasma상태를 만든다. 따라서, 활성화된 가스는 표면에서 작용하는 plasma채널을 발생하게 되고, 그림에서와 같이 etching profile이 plasma기류의 중심에서만 일어나게 된다.

표 1은 r.f. hollow cathode가 여러 가지 박막증착의 plasma공정에서 대표적으로 사용된 일례를 보여주고 있다. PECVD 공정에서는 silicon nitride의 박막증착에 주로 사용되고 있으며 [10], 직경이 3mm인 hollow cathode에 500 sccm의 가스를 주입하고, 100W의 r.f. power를 인가할 경우의 증착속도는 약 1000 μ m/min 정도로 매우 높기 때문에 다공질의 박막증착에 이용되며 SEM의 분석결과를 보면 많은 cluster의 출현을 보였다.

최근에는 r.f. hollow cathode를 이용한 plasma jet 방식의 방전으로 높은 증착속도와 대면적의 고분자, 다이아몬드, TiN, silicon nitride에 응용될 뿐만 아니라, silicon의 etching에도 사용되고 있다[11]. 또한, hollow cathode 방전은 금속이온(metal ion) laser에 응용되고 있는데, 금속이온 laser에서 고효율의 여기

기구(excitation mechanism)는 noble gas와 기저상태의 금속원자 사이의 열에너지의 전하전달 반응에 근거하기 때문에 방전과정에서 전자의 빠른 진동운동은 noble gas의 충분한 이온화 과정을 성취할 수 있다[12].

5. 결 과

이상에서 살펴보았듯이 hollow cathode의 효과는 이미 오래전에 연구되었지만, r.f. hollow cathode의 이용은 비교적 최근에 와서야 고밀도의 반응성 plasma의 공급원으로 각광을 받게 되었다. 또한, 근간에 발표되는 연구논문들은 d.c. hollow cathode와 비교하여 r.f.로 발생하는 cathode의 원리, 유사성 및 차이점을 상세하게 다루고 있으며, 특히 모는 plasma공정기술 중에서 PECVD와 PVD의 고밀도 반응성 plasma에 대하여 강조하고 있다. 그리고, cathode방전을 유지하기 위한 주파수 제어전압과 virtual anode에 의해 자동으로 조절되는 r.f. plasma의 역할 등은 hollow cathode plasma의 특성 및 r.f. 발생에 있어서 중요한 요소가 된다.

현재로는 원통형의 r.f. hollow cathode가 여러 형태의 plasma공정 분야에서 이용되고 있으며, 이를 사용할 경우의 공정은 기존의 공정과정보다도 월등히 우수하다. 더욱이 hollow cathode의

특유한 특성과 구조는 PVD의 박막공정 혹은 반응가스가 없는 금속증발법의 아크공정과 같은 특별한 영역에서도 이용할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] F. Paschen, Ann. Phys. 58, p731, 1916
- [2] P. F. Little and A. von Engel, Proc. Roy. Soc. 224, p209, 1954
- [3] J. R. Morley, J. Vac. Sci. Technol. 9, p1377, 1972
- [4] C. M. Horwitz, Appl. Phys. Lett. 43, p977, 1983
- [5] B. Van der Sijde, J. Quant. Spectro. Radiat. Transfer. 12, p1497, 1972
- [6] R. A. Gibbons and R. J. Mackin, Proc. 5th. ICPIG, p1769, 1961
- [7] Y. Okuno, et al., Rev. Sci. Instrum. 63, p3725, 1992
- [8] T. Fukuda, et al., Jpn. J. Appl. Phys. 37, pL81, 1998
- [9] C. Lejune, et al., Vacuum, 36, p837, 1986
- [10] L. Bardos, et al., Surf. Coat. Technol. 97, p723, 1997
- [11] D. Korzec, et al., Surf. Coat. Technol. 93, p128, 1997
- [12] Z. Donko, et al., IEEE J. Quant. Elect. 34, p47, 1998

< 김현후 위원 >