

## RF Helicon Plasma CVD



### 1. 서론

화학기상증착법 (Chemical Vapor Deposition)은 원료기체의 화학반응을 통해 고체재료를 생성시키는 공정이다. 일반적으로 CVD법은 1000℃ 이하의 온도와 밀리토르(millitorr) 단위의 압력을 사용한다. CVD법은 전자소자 분야 특히 반도체 산업에 있어서 재료의 수명과 성능을 향상시킬 수 있는 보호피막코팅에 필수적인 공정기술이다.<sup>1)</sup> 최근 국내에서도 증착기술의 중요성을 인식하여 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나 아직 해명되지 않은 부분이 많이 남아있고, 특히 첨단진공장치들의 수입가격이 매우 높기 때문에 몇몇 진공관련 업체에서는 장치의 국산화를 진행시키고 있다. CVD공정의 목표는 원하는 물질의 대면적화, 합성시간의 단축 및 합성변수들의 최적화에 있다고 할 수 있겠다.

박막코팅기술은 크게 물리증착(PVD) 기술과 화학증착(CVD)기술로 구별할 수 있으며, 현재 다이아몬드 박막제조를 위해 CVD법이 많이 이용되고 있다. 특히 다이아몬드 박막은 세라믹 박막, 반도체 재료 등에 비해 경도, 내마모성, 열전도도 및 반도체 특성 등이 매우 우수하나 하드코팅(hard coating)의 경우 그 밀착력이 매우 떨어진다. 지금까지 다이아몬드 박막 합성에 있어서 마이크로 플라즈마 CVD법과 ECR

플라즈마 CVD법이 그 주를 이루며 발전되어 왔다. 마이크로 플라즈마 CVD법은 극부적으로 고밀도 플라즈마를 발생시킬 수 있는 반면 ECR 플라즈마 CVD의 경우 압력감소로 대면적화에 좀더 용이하게 할뿐이므로 상호 의존적인 관계에서 발생하는 어려움에 봉착할 수 있다.<sup>2)</sup>

CVD의 대표적인 종류로는 DC 플라즈마 CVD, RF 플라즈마 CVD, 열 필라멘트 CVD, 헬리콘 플라즈마 CVD, 마이크로 플라즈마 CVD, ECR 플라즈마 CVD 등이 있으며, 그 외에도 여러종류의 저압력 고밀도 플라즈마 장치들이 개발되어 왔다.<sup>3)</sup> 그 중에서 헬리콘 플라즈마 CVD가 고밀도 플라즈마를 쉽게 생성할 수 있다는 이유로 크게 주목을 받고 있다. 헬리콘 플라즈마는 주로 RFI (radio frequency inductive), TCP (transformer coupled plasma) 등과 결합되어 사용되는데, 아직까지 헬리콘에 대한 정확한 이론적 규명은 이루어지지 않았으나 지금까지 알려진 헬리콘 플라즈마 장점을 보면 다음과 같다.<sup>4)-5)</sup>

**High Density:** 전형적인 헬리콘 방전은 RF 1-2kW로 평균 플라즈마 농도가  $10^{13} \text{cm}^{-3}$  이상이다.

**High Efficiency:** RF, DC방전에 비해 같은 파워에서 훨씬 높은 플라즈마밀도를 생성한다.



김경례

단국대학교 응용물리학과 석사과정  
관심분야: 박막공정, 박막분석



신재균

단국대학교 응용물리학과 석사과정  
관심분야: 박막공정, 초경재료



현준원

단국대학교 응용물리학과 조교수  
관심분야: 박막물리, 초경재료

**Low Magnetic Field:** ECR이 875G를 사용하는데 반하여 헬리콘은 주로 100-300G 정도를 사용한다. 따라서 자장의 변화에 따른 플라즈마 밀도 및 이온의 에너지를 조절할 수 있다.

**No Internal Electrodes:** 안테나의 위치가 진공챔버 바깥쪽에 위치하므로 내부 오염을 최소화할 수 있다.

**Remote Operation:** source에서 발생한 플라즈마는 자장이 없는 영역까지 이동한다.

**Control of Electron Energies:** RF 안테나의 길이와 진동수에 의해 전자의 에너지를 조절할 수 있다.

## 2. 다이아몬드 박막 제조로의 응용

1955년 미국의 제네럴 일렉트릭스(General Electrics)가 고온·고압법에 의해 다이아몬드를 합성한 이후 미국의 Angus, Eversole 등은 호모 에피택시 성장이 CVD법에 의해 가능하다는 것을 발표하였다.<sup>6)~7)</sup> 일본의 무기재연(無機材研)은 열 필라멘트 CVD법에 의해 실리콘 위에 다이아몬드를 합성하는데 성공하였고, 계속하여 마이크로 플라즈마 CVD법으로 확장시켜 나아갔다.<sup>8)</sup>

1980년대 초 Witmell, Ojha 등은 탄화수소를 분해하는데 플라즈마를 이용하여 이온종을 기판에 성막하는 플라즈마 CVD법을 성공하였다.<sup>9)~10)</sup>

다이아몬드는 고경도, 내마모성이 뛰어난 물질로 기계공구나 물질의 보호막으로 널리 사용되고 있으며, 자기헤드 및 디스크, 음향재료 및 정밀 공구 등으로

표 1. 합성 다이아몬드의 세계 시장 규모(단위: 백만불)

활용분야	1995	2000
절삭공구	11.7	18.3
자기디스크	3,420	4,640
반도체 다이아몬드	238	440
렌즈보호막	66	216

응용범위를 확장해 나가고 있다. <표1>은 다이아몬드 제품의 세계시장 규모를 보여주고 있다. 특히 에너지 갭(energy gap)과 온도 특성 등 반도체 재료로써 우수한 물성값을 갖고 있다.

RF 플라즈마 CVD법의 장점은 챔버로의 불순물이 유입되는 것을 차단할 수 있으며, 플라즈마의 안정화를 꾀할 수 있는 것이다. 또한 박막의 대면적화와 경비절감면에서 기대효과가 큰 것으로 알려져 있다. RF 파를 이용하는 방법에는 플라즈마의 발생과 기판의 가열을 동시에 작용할 수 있는 유도결합형과 한쌍의 원형 코일판을 대향시켜 마이크로파를 걸어 플라즈마를 발생하는 용량결합형으로 구분할 수 있다.

CVD에 의한 다이아몬드 합성에 있어서 원자상 수소와 메틸라디칼이 다이아몬드 성장 메커니즘에 매우 큰 역할을 하게 되며, 열역학적으로 플라즈마의 응용이 지배적이다.<sup>11)</sup> 플라즈마를 발생하기 위해서는 주로 DC나 RF등의 전기에너지를 주로 사용하여, PACVD 방법에서 주로 이용되고 있는 RF 플라즈마의 경우 증착조건들을 <표2>에 나타내었다.

Lehane 와 Thonemann은 헬리콘이 가스 플라즈마 내에서 존재할 수 있음을 발견하였고, 그 후 Boswell에 의해 1~2kW의 RF power로 10<sup>13</sup>cm<sup>-3</sup> 이상의 고밀도

표 2. 다이아몬드 박막의 증착 조건

RF power(w)	500~ 1000
압력(torr)	0.1~2.0
온도(°C)	500~850
주파수(Hz)	50k~13.56M

플라즈마를 산출하였다.<sup>5)</sup> 1991년 Chen은 헬리콘과의 에너지가 전자로 확산되는 Landau damping으로 에너지 전달에 대한 설명을 가능케 하였는데, 즉 플라즈마내에서 헬리콘파보다 느린 전자들이 헬리콘파로부터 이온화를 위한 최적에너지를 흡수함으로써 고밀도 플라즈마를 얻을 수 있게 되었다.<sup>12)</sup> 그림1과 그림2는 각각 나고야 타입 III 안테나와 Boswell 안테나를 보여준다. 플라즈마의 균일성 향상을 위해 confinement coil을 사용할 수 있는데 이는 부분별 온도 측정이 실행된 후 반응실 외부에 마그네트를 부착하여 플라즈마를 구속함으로써 기판의 균일성을 가져올 수 있다.

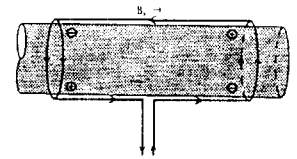


그림 1. 나고야타입 III 안테나

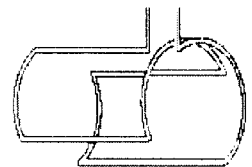


그림 2. Boswell 안테나

CVD법에 의한 다이아몬드 박막 제조에 있어서 수소의 역할은 시료 표면의 탄소성분들의 맹글링 본드(dangling bond)의 안정화를 통해 다이아몬드의 안정성을 유지하게 되는데, 다시말해서  $sp^3$ 결합의 유지와  $sp^2$ 나  $sp$ 결합의 표면 재결합화를 방지하는 일이다.<sup>13)</sup> 따라서 수소원자들은  $sp^2$ 결합이 깨진 손상된 부분을 재혼성화를 통해, 즉 수소플라즈마 처리에 의해  $sp^3$ 결합을 가져오게 된다.<sup>14)</sup> 그러나 이온화율이 낮을 경우 탄소입자들은  $sp^2$ 결합을 갖게되어 입자들의 결정성이 매우 떨어지게 된다.

### 3. RF Helicon Plasma CVD의 설계

RF HPCVD는 기존의 유도성 RF Plasma CVD에 마그네트(magnet)를 결합한 형태이다. 이는 RF의 장점과 함께 플라즈마 밀도면에서도 기존의 microwave나 ECR 이상의 특성을 가진다. 그림 3은 RF HPCVD의 개략도이다. 본 장비는 크게 3부분으로 나눌 수 있다.

첫째, 헬리콘 플라즈마를 발생시키는 반응챔버는 석영관으로 제작되었고, 1kW의 RF power, 나고야타입III를 개조한 안테나 및 1kW의 마그네트 파워 서플라이(magnet power supply)로 구성되었다. 반응챔버의 윗부분은 가스 유입구와 아랫부분은 증착 챔버와 연결되어 있다. 안테나에 의해 발생하는 플라즈마를 외부 자기장에 의해 구속시켜 전하를 띤 입자수들이 증가하게 된다.<sup>15)</sup> 또한 헬리콘 내의 플라즈마 포텐셜과 자장은 ECR보다 낮으므로 워킹코일(working coil)의 중심자장을 일정하게 유지하는 것이 필요하다. 둘째, 증착챔버는 기판위

에 막이 증착되는 부분이다. 기판홀더 아래로 히터가 부착되어 1300°C까지 급속가열이 가능하여 기판의 균등가열을 피하도록 하였다. 증착챔버의 진공도는 cold cathode gauge와 baratron gauge로, 기판과 기질의 온도차는 기판홀더에 부착된 열전대를 통해 측정할 수 있도록 하였다. 일반적으로 증착챔버 둘레에도 외부 자기장을 설치하여 챔버에서 다시 입자를 구속시킬 수 있다. 셋째, 러핑펌프(roughing pump)와 오일확산펌프(oil diffusion pump)로 구성된 진공펌프 시스템이다. 초기 진공작업은 러핑펌프에 의해  $10^{-4}$  torr까지 유지할 수 있으며, 다시 오일 확산펌프에 의해  $10^{-6}$  torr까지 진공도를 높일 수 있다. 특히 헬리콘은 수 m torr에서 수십 m torr까지 이온화율이 가장 좋기 때문에 고진공펌프는 필수적이다. 그밖에 가스주입부와 냉각라인은 각 시스템들과 상호보완적 기능을

갖도록 고안되었다.

그림 4는 Chen에 의한 RF power에 대한 플라즈마 밀도와 자기장과의 관계를 보여준다.<sup>16)</sup> 그림에서 보는 바와 같이 자기장과 RF power가 증가할수록 플라즈마 밀도가 크게 향상됨을 알 수 있다.

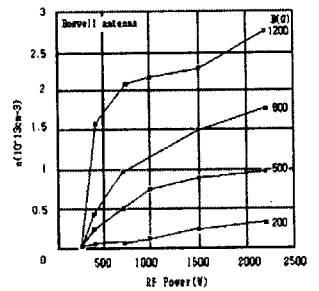


그림 4. 플라즈마밀도와 RF power와의 관계

## 5. 결 론

지난 십 수년간 꾸준하게 발전해

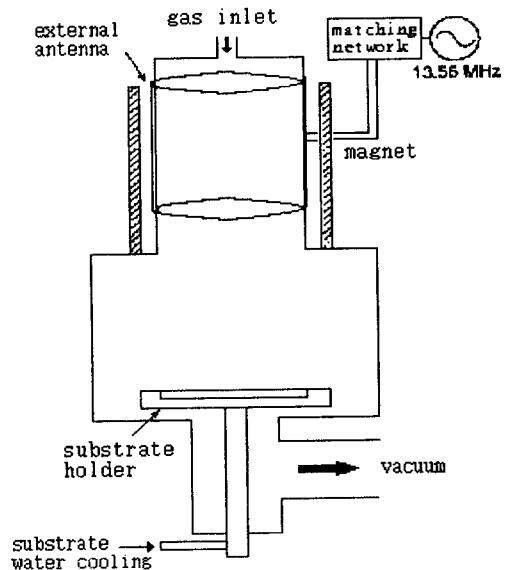


그림 3. HPCVD의 개략도

은 헬리콘 플라즈마 기술은 아직 까지 실용화되고 있지 않지만 고 밀도, 고효율 및 대면적 박막증 착 등에 우수한 특성을 갖고있다. 따라서 박막의 밀착력증진, 증착속도의 향상, 균일한 대면적 증착층 및 최적 증착조건등의 연구가 성과를 이룰때 경제성이 보장될 것으로 사료된다. 아직까지 헬리콘 플라즈마에 대한 이론적 배경이 미미하고, 다이아몬드 합 성시 핵 성장 메커니즘, 불순물 에 의한 영향 등 연구해야 할 부분이 산재해 있다. 1980년대초 CVD에 의한 다이아몬드 박막이 기계용 절삭공구에 응용된 이래 머잖은 미래에 고온용 반도체 소 자 및 보호막 제조에 헬리콘 플 라즈마 기술이 접목될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 權田俊一, 응용물리, 53, p315, 1984.
- [2] S. Matsumoto, J.Mater. Sci. Lett. 4, p600, 1985.
- [3] A. Lettington, J.W. Steeds, Thin Film Diamond, The Royal Society, Chapman & Hall, London, 1994.
- [4] M.H. Francombe, J.L. Vossen, Physics of Thin Film, Academic press, San Diego, 1994.
- [5] F.F. Chen, In High Density Plasma Sources, Noyes Pub, 1996.
- [6] Eversole W.G., U.S. Patent 3030187,3030188,1958.
- [7] Angus J.C., Will H.A. and Stanko W.S., J. Appl. Phys., 39,2915, 1968.
- [8] Kamo M., Sato Y., Matsumoto S. and Setaka N., J. Cryst. Growth, 62, 642, 1983.
- [9] Whitmell D.S. and Williamson R., Thin Solid Films, 35, 255, 1976.
- [10] Holland L. and Ojha S.M., Thin Solid Films, 48,217, 1976.
- [11] B.V. Spitsyn, L.L Bouilov, and V. Derjaguin, J. Cryst. Growth, 52, 219, 1981.
- [12] F.F. Chen, Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion, 2nd ed., Plenum press, 1984.
- [13] K.E.Spear, J.Am. Ceram. Sci. 72, 171, 1989.
- [14] W.Engel, D.C. Ingram, J.C. Keay and M.E. kordesch, Diamond Relat. Matter. 3, 1227, 1994.
- [15] A. Grill, Cold Plasma in Materials Fabrication from Fundamentals to Application, IEEE press, 1993.
- [16] F.F. Chen and J. Chevalier, J. Vac. Sci. Tech. A10, 1389, 1992.

< 김현후 위원 >