

RF Planar Magnetron Plasma CVD에 의한 DLC 박막 합성에 미치는 RF Power와 반응가스 압력의 영향

김 성 영 · 이 재 성*

생산기술연구원 생산기반기술센터

*한양대학교 공학대학 금속재료공학과

The Effects of Reactive Gas Pressure and RF Power on the Synthesis of DLC Films by RF Planar Magnetron Plasma CVD

Seong-Young Kim and Jai-Sung Lee*

Production Technology Development Center, KATTECH

Dept. of Metallurgy & Materials Science, Hanyang University

초 록 본 연구에서는 고밀도 플라즈마를 형성하는 planar magnetron RF 플라즈마 CVD를 이용하여 DLC (diamond-like carbon) 박막을 합성하였다. 이 방법을 이용하여 DLC 박막을 합성한다면 고밀도 플라즈마 때문에 종래의 플라즈마 CVD (RF-PECVD) 법보다 증착속도가 더욱더 향상될 것이라는 것에 착안하였다. 이를 위해 magnetron에 의한 고밀도 플라즈마가 존재할 때의 DLC 박막형성에 미치는 RF 전력과 반응가스 압력이 중요한 반응변수인가에 대해 조사하였고, 일정한 자기장의 세기에서 RF 전력과 DC self-bias 전압과의 관계를 조사하였다. 또한 RF 전력변화에 따른 박막의 증착속도와 밀도를 측정하였다. 본 연구에 의해 얻어진 박막의 증착속도는 magnetron에 의한 이온화율이 매우 높아 기존의 RF-PECVD 법보다 매우 빠르며, DLC 박막의 구조와 물질특성을 알아보기 위해 FTIR (fourier transform infra-red) 및 Raman 분광분석을 행한 결과 전형적인 양질의 고경질 다이아몬드상 탄소박막임을 알 수 있었다.

Abstract In this study, DLC thin films were deposited by RF planar magnetron plasma CVD. This method has a characteristic of high density plasma in sputtering process. So it was motivated that this high density plasma CVD process might enhance the growth of DLC thin film with a higher growth rate. The effects of the RF power and reactive gas pressure were studied in the high density plasma generated by magnetron. At the constant magnetic field strength, the dependences of DC self-bias, growth rate and density of DLC film on RF power were investigated. The growth rate of DLC film deposited by this study was much higher than that of a conventional RF-PECVD owing to the high ionization induced by magnetron. The C-H structures and material characteristics were analysed by FTIR (fourier transform infra-red) and Raman spectroscopy, respectively. From these results, we think that DLC film obtained by this study have an high quality.

1. 서 론

DLC 박막은 높은 경도와 전기 절연성, 투명성 및 저마찰 계수와 내마모 특성 등 다이아몬드와 유사한 성질을 갖고 있어 최근 많은 관심과 활발한 연구가 이루어지고 있다¹⁻³⁾. DLC 박막의 증착에는 플라즈마 CVD 법이 가장 널리 이용되고 있다. 그 이유는 장치가 간단하며 증착면적과 속도를 크게할 수 있기 때문이다. 플라즈마 CVD 법에 의한 DLC 박막의 형성과정은 탄화수소 가스가 RF 글로우방전에 의해 플라즈마 공간내에서 탄화수소 이온들로 해리되고, 이때 플라즈마내의 이온과 전자의 이동도 차이에 의해 음극에 DC self-bias가 형성된다. 이러한 self-bias 때문에 해리된 energetic 탄화수소 이온들이 음극상의 기관으로 가속되어 DLC 박막이 증착된다고 알려져 있다⁴⁾. 특히 Bubenzer 등⁵⁾은 DLC 박막의 증착속도가 이온의 충돌에너지에 비례하여 증가한다고 하여, 이를 결정하는 두 변수인 RF 전력과

반응 가스압력이 매우 중요하다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 박막 합성방법으로 RF planar magnetron을 장착한 새로운 플라즈마 CVD 법을 채택하였다. 이러한 시도의 발상은 스퍼터법에서 고밀도 플라즈마를 형성시켜 스퍼터율을 높여주는 planar magnetron의 장점을 이용하자는데 있다⁶⁾. 이 방법은 magnetron 때문에 고밀도 플라즈마를 형성시키므로 낮은 반응가스 압력에서도 글로우방전이 가능하고 평균 자유 경로를 증가시켜 충돌에너지 증가효과를 얻을 수 있다⁷⁾. 이러한 이유로 채택된 RF planar magnetron 플라즈마 CVD에서도 역시 RF 전력과 반응가스 압력이 중요한 변수이며, 아울러 증착특성이 이들과는 어떤 상관관계를 갖고 있는가를 알아보고자 하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 일차적으로 RF planar magnetron 플라즈마의 특성을 평가해보았다⁸⁾. 그 결과 magnetron에 의해 고밀도 플라즈마가 형성됨을 알 수 있었다. 이러한 사실은 planar magnetron을 이용해 DLC 박막을 합성한다면 종

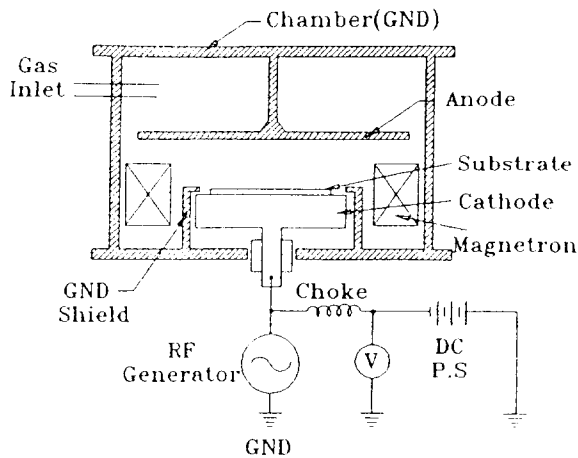


Fig. 1. Schematic diagram of RF planar magnetron plasma CVD system.

래의 플라즈마 CVD (RF-PECVD) 법보다 증착속도가 더
욱더 커질 것이라는 기대를 갖게 하였다. 또한 매우 낮은
DC self-bias에도 불구하고 충돌에너지를 뜻하는 전자온도
값이 RF-PECVD (약 7eV 정도)보다 높게 얻어졌다. 이
결과로부터 예측되는 것은 RF-PECVD에서는 매우 높은
DC self-bias에서 DLC 박막이 얻어지는데 반해¹⁾, 본 연
구에서 채택한 방법에서는 매우 낮은 DC self-bias에서도
DLC 박막이 좀 더 쉽게 얻어질 것이라는 것이다.

따라서 본 연구에서는 planar magnetron을 이용한
DLC 박막합성시 DLC 형성에 미치는 RF 전력과 반응가
스 압력의 영향에 대해 조사하였다. 이를 위해 RF 전력과
DC self-bias 전압과의 관계를 조사하였고, RF 전력변화
에 따른 박막의 증착속도와 밀도를 측정하였으며, DLC 박
막의 구조와 물질특성을 알아보기 위해 FTIR 분광 및
Raman 분광분석을 행하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 DLC 박막증착을 위한 기판재료로 지름 4
인치 크기의 (100)면을 갖는 Si wafer를 사용하였다. Fig.
1은 본 연구에서 설계, 제작한 RF planar magnetron 플라
즈마 CVD 장치를 보여주고 있다. DLC 증착을 위한 RF
전력은 13.56MHz의 방전주파수를 가진 전원(Dressler,
DTG 1310 : 1000W)으로 공급되고, DC self-bias는 RF
전력을 조절하여 변화시켰다. 이때 DC self-bias는 음극에
장착된 low pass filter (choke)를 통해 식류전압계로 측정
하였다. 음극상에서 고밀도 플라즈마를 얻기 위한 planar
magnetron은 음극옆에 4개의 영구자석(700 gauss/개)
을 장착하므로서 형성시켰다. 이때 기판상에서 측정된 자계
강도는 가우스미터를 이용하여 92 gauss로 측정되었다.

증착가스로는 순도 99.6%의 C₂H₂ 가스와 보조가스로 O₂
와 Ar을 사용하였다. 먼저 DLC 박막을 증착하기전에 기
판표면의 세정을 위해 기판을 Fig. 1과 같이 수냉되고 있는

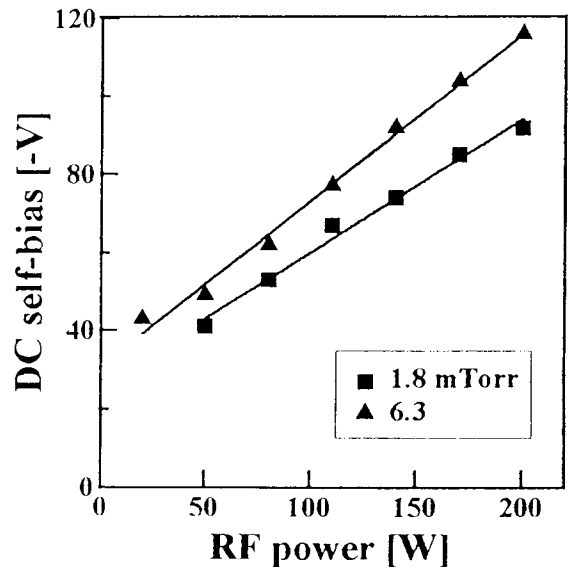


Fig. 2. RF power dependence of DC self-bias.

음극상에 올려 놓았다. 반응실의 초기진공을 1.5×10^{-5}
Torr로 유지한 상태에서 O₂ 가스를 1.3mTorr, RF 전력
100W, DC bias -50V의 조건으로 O₂ 플라즈마를 발생시
켜 10분간 세정하였다. 다음, Si 기판상에 존재하는 native
oxide층을 제거하므로서 DLC 박막과 Si 기판과의 결합력
(부착력)을 향상시키기 위해, Ar 가스 1.3mTorr, RF 전
력 100W, DC bias -80V의 조건으로 Ar 플라즈마를 발생
시켜 기판표면을 15분간 스퍼터 처리하였다. 이렇게 처리
된 기판상에 C₂H₂ 가스압력(1.8, 6.3mTorr)과 RF 전력을
변수로 하여 DLC 박막 증착실험을 행하였다. 증착된 박막
의 두께는 surface profilometer로 측정하였고, 박막의 밀
도는 정밀저울(1μg)로 무게를 측정하여 체적으로 환산하
는 방법으로 구하였다. 증착박막의 구조와 탄화수소 결합농
도는 FTIR 분석(Perkin Elmer 1760X, 측정범위 : 400~
4000cm⁻¹)을 통하여 측정하였고, 박막의 물질특성은
Raman 분광분석(Jobin Yvon U1000, Ar laser : 514.
5nm, 측정범위 : 100~1700cm⁻¹)을 이용하여 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 2는 RF 전력변화에 따른 DC self-bias 변화를 나
타낸 것으로 RF 전력이 증가함에 따라 두 경우 모두 DC
self-bias가 같이 증가됨을 알 수 있다. 이는 RF 전력이 증
가함에 따라 음극에 도달하는 이온수가 증가됨과 아울러 전
자수도 증가되어 결국 이동도차에 의한 self-bias가 증가되
는 것이다¹⁾. 그러나, 반응가스 압력이 높은 경우(6.3m
Torr)가 전체적으로 높은 DC self-bias의 증가율을 보인
다. 이것은 종래의 RF-PECVD에서 압력이 증가됨에 따라
self-bias가 감소된다는 보고¹⁾와는 다른 결과이다. 이는
종래의 RF-PECVD에 비해 반응가스의 압력이 수 mTorr
로 매우 작으므로 투입된 반응가스가 거의 전부 해리되어

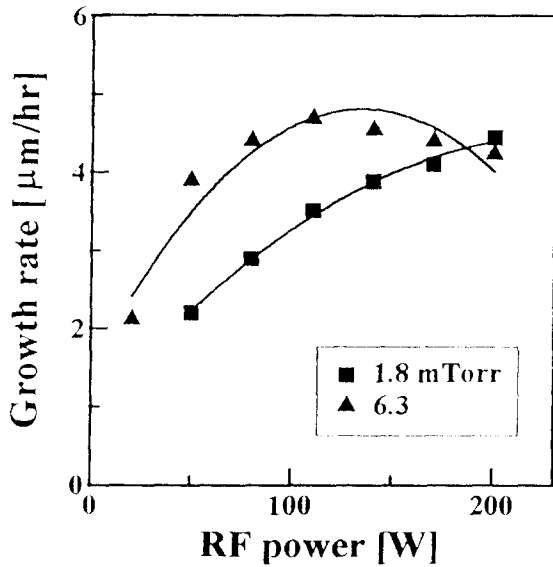


Fig. 3. RF power dependence of growth rate of DLC thin films.

고밀도 플라즈마를 형성시켰기 때문으로 생각한다. 즉 magnetron 플라즈마 특성평가 결과, magnetron에 의해 음극상에 형성된 2차 전자와 중성가스 입자와의 충돌횟수 증대로 인해 형성된 고밀도 플라즈마에 의해 반응 가스압력이 증가함에 따른 이온수와 전자수의 증가때문인 것으로 생각된다¹³⁾.

이러한 결과로 부터 DLC 박막의 증착속도는 반응가스 압력과 RF 전력이 증가함에 따라 증가할 것이라고 예측할 수 있다. Fig. 3은 RF 전력변화에 따른 증착속도 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 RF 전력이 증가함에 따라 증착속도는 전반적으로 증가하는데, 6.3mTorr인 경우 RF 전력 140W이상에서 증착속도는 오히려 감소하고 있다. 이는 이온이나 반응활성종들이 증착에 기여하는 것보다는 높은 충돌에너지에 의한 스퍼터 현상 때문에 박막 표면을 스퍼터시키는 정도가 더욱더 커져 박막에 내포된 수소나 탄소를 감소시켰기 때문으로 생각한다¹⁴⁾. 또한 그림에서 알 수 있는 것은 6.3mTorr인 경우, 증착속도의 감소가 1.8mTorr보다 더 낮은 RF 전력에서 일어난다. 이는 Fig. 2의 결과를 보면 감소이유가 더욱더 명확해진다. 즉 6.3mTorr인 경우에 증착속도가 감소되는 RF 전력은 약 140W로 이때의 DC self-bias는 -92V이다. 1.8mTorr인 경우에는 140W일때, -74V에 해당하므로 스퍼터시키기에 낮은 DC self-bias이므로 박막의 증착속도는 계속 증가된다. 그러나 6.3mTorr인 경우처럼 DC self-bias가 -92V로 되는 RF 전력을 보면, 약 190W이다. 이때의 증착속도는 역시 약간 둔화되고 있다. 따라서 스퍼터현상에 의한 증착속도의 둔화내지 감소는 반응가스 압력이 큰 경우에 먼저 일어나는데, 이는 동일한 RF 전력에서 DC self-bias는 반응가스 압력이 큰 경우에 더 크기 때문이라는 사실을 입증하는 결과이다.

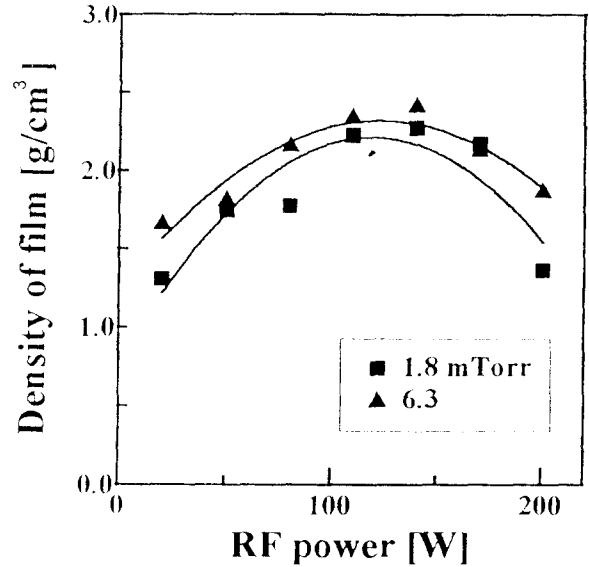


Fig. 4. The effect of RF power on DLC film density.

이러한 스퍼터현상에 의해 수소나 탄소의 감소를 초래하여 박막의 성장속도를 둔화 또한 감소시켰다는 사실을 입증하기 위해, 박막의 밀도를 측정하였다. 강대환, 김기범 등¹⁵⁾은 증착속도의 저하는 DC self-bias의 증가로, 스퍼터현상이나 운동량전달에 의해 막이 치열해졌기 때문이라고 보고하였다. 즉 이들은 self-bias가 증가할수록 증착속도와 박막의 광대역폭이 감소되는 결과로부터, 수소가 이탈되면서 σ -결합보다 들뜬상태인 π -결합수가 증가되기 때문에 탄소원자사이의 3차원적인 network을 많이 형성시켜 박막이 경해지고 치밀해진 것이라고 하였다. 그러나 이들 결과는 구체적인 밀도측정 결과가 없어, DC self-bias를 더 증가시켰을때도 역시 박막의 밀도가 증가되는지에 대해서는 의문이 남아 있다. 또한 이들 주장으로는 DC self-bias가 매우 커지면 충돌에너지 증가로 박막내의 수소이탈과 함께 박막표면의 국부적인 온도상승 때문에 박막의 구조가 변화된다¹⁶⁾는 점을 설명할 수 없다. 그러나 본 연구의 결과(Fig. 4)에 의하면, 박막의 밀도변화는 RF 전력이 증가함에 따라 증가하다가 140W이상에서는 다시 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 밀도변화는 증착이 지배적인 140W까지는 증착막의 질량증가로 밀도가 증가하지만, 140W이상에서는 스퍼터현상에 의한 수소분해 및 박막의 표면온도 상승으로 인한 박막의 구조변화(DLC구조에서 graphite-like구조)가 우세해져 밀도를 감소시킨 것으로 생각된다¹⁷⁾. 따라서 박막의 증착속도 감소는 스퍼터현상에 의한 박막의 밀도감소뿐만 아니라 박막 표면온도의 상승으로 인한 박막의 구조변화 때문에 야기되었다고 생각된다.

이와 같은 특성을 갖는 박막의 물질특성을 알아보기 위해 Raman 분광분석을 행한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 그림에 나타난 피크는 DLC 박막의 전형적인 스펙트럼으로 1350cm⁻¹ 부근의 disordered "D" 피크와 1580cm⁻¹ 부근의

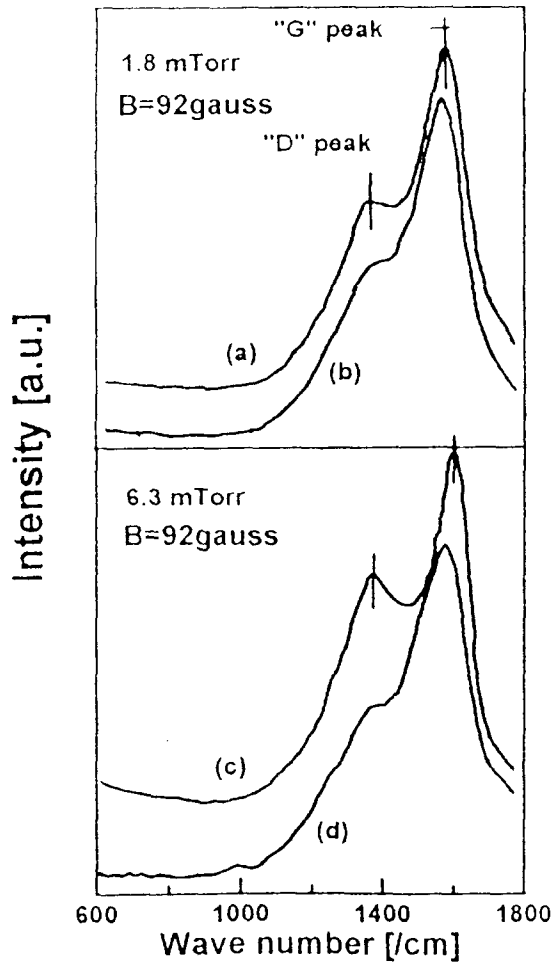


Fig. 5. Raman spectra of DLC films deposited at various RF power conditions of (a) 200W, 92V, (b) 50W, 41V, (c) 200W, 116V, and (d) 50W, 49V.

graphite-like "G" 피크의 중첩에 의한 것으로, 이들 두 피크는 sp^2 결합을 하고 있는 탄소상에 의한 것이다¹⁶⁾. 그림에서 보면 반응가스 압력이 6.3mTorr인 경우, "G" 피크강도는 변화가 거의 없는데 반해 "D" 피크강도는 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 반응가스 압력이 큰 경우, 기판에 충돌되는 반응성 이온의 갯수가 많아져 국부적인 박막표면 온도 상승을 초래했기 때문이다.

그러나 동일가스 압력조건에서는 disordered 정도를 의미하는 "D" 피크강도가 RF 전력이 증가함에 따라 거지고 있다. 이러한 "D" 피크의 증가는 RF 전력증가로 야기된 이온의 충돌에너지 증가와 박막의 표면온도 상승으로, 박막 내에 존재하는 탄소원자의 cross-linking 정도를 증가시켜 3차원적인 disordered network 형성을 증대시켰기 때문으로 생각된다¹⁷⁾. 아울러 흥미로운 점은 RF 전력이 증가함에 따라 "G" 피크의 위치가 점차 1600cm^{-1} 위치로 이동하고 있다는 사실이다. 이것은 RF 전력이 증가할수록 DLC 박막의 성질이 점차 graphite-like화되어가고 있음을 나타낸다. 이 이유는 앞의 결과와 마찬가지로 RF 전력증가로 야기

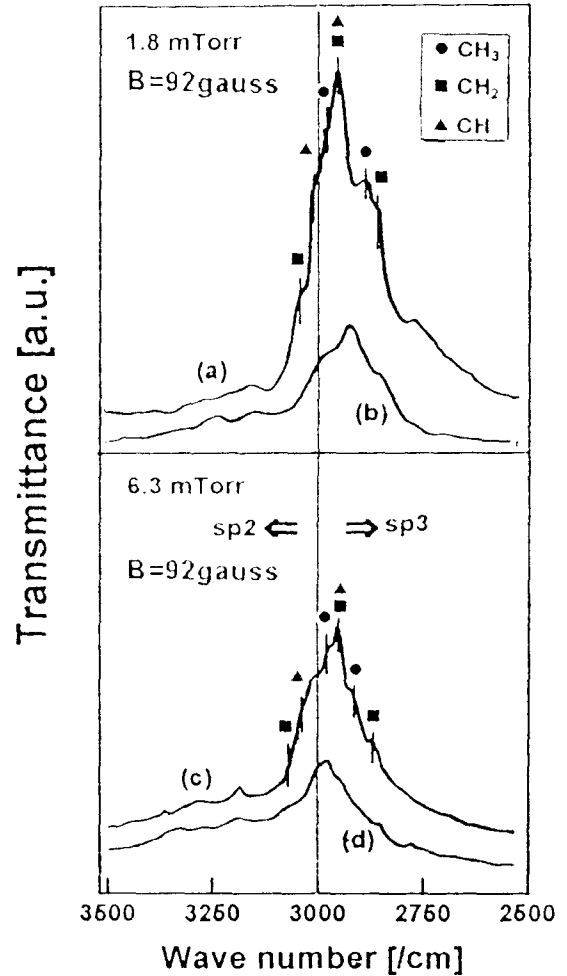


Fig. 6. FTIR spectra of DLC films (same as the sample of Fig. 5) in the region where the stretching mode of C-H appears.

된 이온의 충돌에너지 증가와 박막의 표면온도 상승이 주된 요인이다. 즉 박막내의 C-H 결합이 파괴되거나 수소가 이탈되어 π -결합(graphite)정도가 증가되었기 때문이다¹⁷⁾. 이 결과는 앞서서도 언급한바 있는 강대환, 김기범 등¹⁶⁾이 수소이탈로 인한 π -결합수의 증가로 박막의 밀도와 경도가 향상되었다고 주장한 점과는 다를 수 있다. 즉 이들은 "G" 피크의 위치이동에 대한 관찰 결과가 없었기 때문이 아닌가 생각한다.

이상의 결과는 박막의 구조가 변화되었기 때문임을 예측할 수 있게 해준다. 박막의 구조변화는 다음의 FTIR 분석 결과에서 잘 확인한다. Fig. 6은 Fig. 5에 나타난 조건에서 얻어진 박막의 탄화수소 결합구조를 관찰하기 위한 DLC 박막의 FTIR 분광분석 결과이다. 일반적으로 DLC 박막의 적외선 스펙트럼에서 탄소와 수소의 결합구조에 대해서는 2900cm^{-1} 부근의 C-H stretching 형태와 $1300\sim 1700\text{cm}^{-1}$ 사이의 deformation 형태로 구별된다¹⁸⁾. 그림에 나타난 결과는 2870cm^{-1} 피크를 갖는 $\text{CH}_3(sp^3, \text{대칭})$ 구조와 2960cm^{-1} 피크를 갖는 $\text{CH}_2(sp^3, \text{비대칭})$ 구조 및 3000cm^{-1} 피크를 갖는 $\text{CH}(sp^2, \text{olefinic})$ 에 대한 것으로 이들 피크

로부터 DLC 박막의 구조를 알 수 있다. 여기서 sp^1 는 다이아몬드 구조이고 sp^2 는 graphite 구조이므로 sp^3/sp^2 비율로부터 박막의 물성을 예측할 수 있다. 또한 $2800\sim 3100\text{cm}^{-1}$ 의 피크면적으로부터 상대적인 수소량을 알 수 있는데¹⁾, RF 전력과 반응가스 압력이 증가할수록 $2800\sim 3100\text{cm}^{-1}$ 의 피크면적이 감소되는 것으로 보아 DLC 박막내의 수소량이 작아짐을 알 수 있다.

이와같이 RF 전력이 증가할수록 수소량이 감소되는 이유는 플라즈마내에 형성된 탄화수소의 반응성 이온 및 반응 활성종들이 증가된 DC self-bias에 의해 기판과 충돌함에 따라 증착중에 박막의 C-H 결합(C-H 결합에너지 = 7.5eV)을 파괴시키는 플라즈마 분해나, 충돌에 의한 국부적인 박막 표면온도 상승에 의한 열분해같은 과정에 의해 수소가 분해되어 CH_4 등으로 재가스화되기 때문이다. 이상의 결과들로부터 RF planar magnetron에서도 DLC 박막의 합성에 중요한 변수로는 반응가스 압력과 RF 전력임을 알 수 있었다. 그러나 일반적인 플라즈마 CVD(RF-PECVD)와는 달리 magnetron에 의해 이온화율이 증대되어 고밀도 플라즈마가 발생되며, 이러한 고밀도 플라즈마는 비교적 매우 작은 DC self-bias에서도 DLC 박막합성을 가능케 한다는 점과 매우 작은 반응가스 압력임에도 불구하고 일반적인 플라즈마 CVD보다 증착속도를 증진시킨다는 장점이 있음을 알았다.

4. 결 론

1) C_2H_2 가스를 사용하여 RF planar magnetron 플라즈마 CVD에 의해 균일한 박막이 합성되었으며, Raman 분광분석과 FTIR 분석 결과 합성된 박막이 비정질의 DLC 박막임을 확인하였다.

2) RF 전력과 반응가스 압력이 큰 경우에 DC self-bias가 증가됨을 알았고, 또한 박막의 성장속도도 증가한다. 그러나 충돌에너지를 좌우하는 DC self-bias가 $90\sim 95\text{V}$ 이상되면, 스퍼터현상이 우세해져 증착속도가 둔화내지 감소된다.

3) RF 전력이 증가함에 따라 박막의 밀도가 증가하다가, RF 전력이 140W 이상으로 증가되면 밀도가 감소됨을 알 수 있었다. 이 곁고는 140W 이하에서는 증착에 기여하는 과정이 지배적이지만, 그 이상에서는 스퍼터현상에 의해 증착속도가 둔화 또는 감소됨을 알 수 있었다.

4) RF 전력이 증가될수록 Raman 스펙트럼의 disorderd "D" 피크가 증가되는 이유는 충돌에너지 증가로 인해 탄소원자의 cross-linking 정도가 커져 disordered network이 많아졌기 때문이고, 플라즈마내에 형성된 반응성 이온 및 반응 활성종들의 충돌에너지가 커져 DLC 박막내의 C-H 결합을 파괴시켜, 박막내의 수소량을 감소시키기 때문에 FTIR 스펙트럼의 $2800\sim 3100\text{cm}^{-1}$ 피크면적이 감소된다. 또한 "G" 피크의 위치가 1600cm^{-1} 로 이동하는 이유는 RF 전력증가로 야기된 이온의 충돌에너지 증가와

박막의 표면온도 상승으로 박막내의 C-H 결합이 파괴되거나 수소가 이탈되어 π -결합(graphite)정도가 증가되었기 때문이다.

이상과 같은 결론으로부터 본 연구에서 행한 RF planar magnetron 플라즈마 CVD에 의한 DLC 박막의 합성결과, 자계강도가 존재함에도 불구하고 박막의 성장기구, 물리적 성질 및 박막구조는 역시 RF 전력(또는 DC self-bias)과 반응가스 압력에 크게 의존함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. S. Praver, R. Kalish, M. Adel, and V. Richter, J. Appl. Phys., **61**, 4492 (1987).
2. V. J. Kapoor, M. J. Mirtich, and B. A. Banks, J. Vac. Sci. Tech., **A4**, 1013 (1986)
3. T. Datta, J. A. Woolam, and W. Notohamiprodjo, Appl. Phys. Commu., **5**, 263 (1985).
4. A. Grill, B. S. Meyerson, and V. V. Patel, IBM J. Res. Develop., **34**, 849 (1990).
5. J. Wagner and P. Lautenschlager, J. Appl. Phys., **59**, 2044 (1986).
6. P. Coudere and Y. Catherrine, Thin Solid Films, **146**, 93 (1987).
7. A. Bubbenzer, B. Dischler, G. Brandt, and P. Koidl, J. Appl. Phys., **54**, 4590 (1983).
8. K. Wasa and S. Hayakawa, in *Handbook of Sputter Deposition Technology: Principles, Technology and Applications*, (Park Ridge, NJ, 1992) p.24.
9. H. Kinoshita, T. Ishida, and S. Ohno, J. Appl. Phys., **62**, 4269 (1987).
10. S. Y. Kim and J. S. Lee, In press in J. Mater. Sci. Letter.
11. J. W. Zou, K. Reichelt, K. Schmidt, and B. Dischler, J. Appl. Phys., **65**, 3914 (1989).
12. H. Siegeman and D. C. Hinson, in *The Principles of Plasmas*, Materials Research Corporation, p.1-10.
13. R. Kato, K. Hiraoka, and K. Masuhara, Proc. of 9th Int. Symp. on Plasma Chemistry, edited by R. d'Agostino, Vol. **3**, 1458 (1989), Pugnochiuso, Italy.
14. S. M. Rosnagel, J. J. Cuomo, and W. D. Westwood, in *Handbook of Plasma Processing Technology*, (Park Ridge, NJ, 1990) p.160.
15. N. Mutsukura, S. Inoue, and Y. Machi, J. Appl. Phys., **72**, 43 (1992).
16. D. W. Kang, K. B. Kim, T. H. Kim, and J. W. Lee, J. of the Korean Inst. of Met. & Mater., **33**(1), 99 (1995).
17. K. Tachibana, M. Nishida, H. Harima, and Y. Urano, J. Phys. **D17**, 1727 (1984).

18. T. Sato, S. Furuno, S. Iguchi and M. Hanabosa, *Appl. Phys. A.*, **45**, 355 (1988).
19. A. Grill, V. Patel and B. S. Meyerson, *J. Mat. Res.*, **5**, 2531 (1990).
20. Hsiao-chu Tsai and D. B. Bogy, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A5**, 3287 (1987).