

ECR-PECVD 방법으로 증착된 a-C:H 박막의 수소함량 측정

손영호 · 정우철 · 정재인 · 황도원* · 김인수** · 배인호***

포항산업과학연구원 센서 · 계측연구팀, *(주)알파플러스 기술연구소
경운대학교 전자공학과, *영남대학교 물리학과
(2000년 7월 13일 접수)

Measurement of hydrogen content in a-C:H films prepared by ECR-PECVD

Young Ho Son, Woo Chul Jung, Jae In Jeong, Do Weon Hwang,*
In Soo Kim,** and In Ho Bae***

Research Institute of Industrial Science and Technology, Pohang 790-600

*R & D Center, Alpha Plus Co. Ltd., Pohang 790-140

**Department of Electronic Engineering, Kyungwoon University, Kumi 730-850

***Department of Physics, Yeungnam University, Kyongsan 712-749

(Received July 13, 2000)

요 약 - ECR-PECVD 방법으로 ECR 플라즈마 소스 power, CH₄/H₂ 가스 혼합비와 유량, 증착시간 및 기판 bias 전압을 변화시켜 가면서 수소가 함유된 비정질 탄소 박막을 증착하고, 증착조건에 따라서 박막 내부에 함유되어 있는 수소함량 변화를 2.5 MeV 헬륨 이온빔을 사용하는 ERDA로 측정하였다. ERDA의 결과와 AES 및 RBS에 의한 성분분석으로부터 본 실험에서 증착된 박막은 탄소와 수소만으로 구성 되어있음을 확인할 수 있었고, FTIR의 결과로부터 박막 증착조건에 따라서 박막 내부에 함유되어 있는 수소함량이 변화함을 알 수 있었다. 기판 bias 전압을 증가시킬수록 이온충돌 현상이 두드러져 탄소와 결합하고 있던 수소원자들이 떨어져 나가는 탈수소화 현상으로 수소함량이 크게 감소됨을 알 수 있었다. 그 밖의 조건에서는 박막증착 초기에는 수소보다 탄소량이 좀 더 많다가 점차적으로 수소함량이 증가되었고, 이때 박막 내부에 함유되어 있는 수소함량은 45~55% 범위 내에 있음을 확인할 수 있었다.

Abstract - Hydrogenated amorphous carbon (a-C:H) films were deposited by ECR-PECVD (electron cyclotron resonance-plasma enhanced chemical vapor deposition) method with deposition conditions such as ECR plasma source power, gas composition of methane and hydrogen, deposition time and substrate bias voltage. The hydrogen content in the films has been measured by ERDA (elastic recoil detection analysis) using 2.5 MeV He⁺⁺ ion beam. From the results of AES (Auger electron spectroscopy), RBS (Rutherford backscattering spectrometry) and ERDA, the composition elements of deposited film were confirmed the carbon atom and the hydrogen atom. It was observed by FTIR (Fourier transform infrared) that the hydrogen contents in the film varied according to the deposition conditions. In deposition condition of substrate bias voltage, the hydrogen contents were decreased remarkably because the amount of dehydrogenation in films was increased as the substrate bias voltage increased. In the rest deposition conditions, the hydrogen contents in the film were measured in the range 45~55%.

1. 서 론

수소가 함유된 비정질의 탄소(a-C:H; hydrogenated amorphous carbon) 박막은 화학적으로 대단히 안정되어 있고, 광 투과율, 경도, 열전도도, 내화학적, 굴절률

이 높은 동시에 마찰계수가 낮은 특성을 가지고 있으므로 다양한 분야에서 응용이 기대되고 있다. 현재도 기계적 강도가 요구되는 공구, 베어링 등의 내마모성 코팅용으로서의 연구는 물론 적외선 창과 실리콘 태양전지 등 광학재료의 보호 및 무반사 코팅재료, 반도체소자의

열 방사 코팅재료, 평판 표시소자의 전계방출 tip 재료 등으로 활용하기 위한 연구 등이 활발히 진행되고 있다 [1-3].

지금까지 a-C:H 박막을 제조하기 위한 다양한 방법이 시도되었으며 [4-9], 본 연구에서는 ECR-PECVD (electron cyclotron resonance plasma enhanced chemical vapor deposition) 방법을 사용하였다 [10-12]. 이 방법은 최근에 많이 이용되고 있는 방법으로 이온화율이 높을 뿐만 아니라 상온에서도 성막이 가능하며 특히, 넓은 진공도 영역에서 플라즈마 공정이 가능하다는 장점이 있다. 일반적으로 기판 위에 박막을 증착할 때 이온충돌 효과가 박막의 물성 변화에 큰 변수가 된다. ECR-PECVD 방법의 경우에 반응성 가스의 이온화를 위하여 ECR 플라즈마 소스를 사용하고 이온충돌 효과를 위하여 RF (radio frequency) 전원을 사용하면, 미세한 이온 에너지까지 제어가 가능하므로 전기적 특성이나 경도 등과 같은 물성 변화를 미세하게 제어할 수 있는 장치가 된다.

탄소박막은 탄소의 결합 구조에 따라 다이아몬드(sp³ 형태), 흑연(sp² 형태), 비정질 탄소(a-C), 수소가 함유된 비정질 탄소(a-C:H) 등으로 구분된다 [13]. 이 중에서 a-C:H 박막은 박막 내부에 수소를 함유하고 있고, 다이아몬드와 흑연의 탄소 결합구조를 모두 지니고 있기 때문에 탄소 결합구조의 비율(sp³/sp²), 탄소와 수소의 결합구조 및 수소함량에 따라서 박막의 특성이 변화된다.

본 연구에서는 a-C:H 박막에 함유되어 있는 수소의 함량에 관심을 두고, ECR-PECVD 장치를 이용하여 ECR 플라즈마 소스 power, CH₄/H₂ 가스 혼합비와 유량, 증착시간 및 기판 bias 전압을 변화시켜 가면서 박막을 증착하였고, 증착 조건에 따른 박막의 수소함량 변화를 ERDA (elastic recoil detection analysis)를 이용하여 조사하였다. 또한 AES (Auger electron spectroscopy)와 RBS (Rutherford backscattering spectrometry) 분석을 이용하여 본 실험에서 증착된 a-C:H 박막이 탄소와 수소 원자로만 구성되어 있음을 확인하였고, 이를 통하여 탄소함량도 간접적으로 정량화 할 수 있었다.

2. 실험

a-C:H 박막은 ECR-PECVD 장치 [14]를 이용하여 증착하였고, 박막 제작시 기판은 4" 크기의 (100)면을

표 1. Summary of deposition conditions.

Deposition Conditions	
ECR Power (W)	300, 500, 700, 900
Gas(CH ₄ /H ₂) Composition and Flow Rate (SCCM)	10/100, 20/100, 30/100, 40/100
Deposition Time (h)	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0
Substrate Bias Voltage (V)	0, -50, -75, -100, -150, -200
Substrate	Si (100)
Distance (mm)	150

가진 Si 웨이퍼를 사용하였고, 기판은 대기 중에서 아세톤과 에탄올 용액으로 세척한 후 진공용기로 loading 하였으며, 진공용기를 5×10⁻⁷ torr 이하의 기초 진공상태로 만든 후 실온에서 ECR 플라즈마 소스로부터 150 mm 떨어진 거리에 기판을 설치하고 박막을 증착하였고, 박막을 증착하기 전에 진공 중에서 플라즈마 전처리를 실시하였다. 플라즈마 전처리에는 아르곤을 150 SCCM 주입하여 5×10⁻³ torr의 진공도를 유지시켰으며, ECR 플라즈마 소스 power를 700 W로 고정하고 기판 bias 전압을 -300 V로 하여 5분 동안 기판을 청정하였다. 박막의 증착조건은 표 1과 같다.

기판 bias 전압은 기판에 13.56 MHz RF power를 연결하고, RF power를 인가하여 기판에 유도되는 negative DC self bias 전압을 이용하였다. Negative DC self bias 전압은 플라즈마 내에 있는 이온들과 전자들의 이동도 차이 때문에 형성되는데, 기판에 RF를 인가시킬 때 RF cycle의 positive에서 전자들에 의한 전류와 RF cycle의 negative에서 이온들에 의한 전류가 같도록 matching network에서 negative bias를 형성해야하기 때문이다. 기판 bias 전압은 기판에 인가한 RF power를 증가시키기에 따라 증가하며, 이것은 RF power가 클수록 플라즈마 내의 전자들이 더욱더 가속되기 때문이다.

RBS 분석 [15]은 MeV급 이온빔 활용분야 중에서 헬륨이온(He⁺⁺)을 주로 사용하며, 고에너지 헬륨이온이 박막을 구성하고 있는 물질의 원자핵과 탄성충돌을 하게 되면 물질의 종류에 따라 후방산란되는 헬륨의 에너지가 달라지게 되는데, 이때 detector에 의해 측정된 후방산란된 헬륨입자의 에너지와 개수(yield)로 이루어진 스펙트럼을 분석함으로써 박막의 두께, 원소조성 및 함량 등에 관한 정보를 얻을 수 있는 유용한 방법이다.

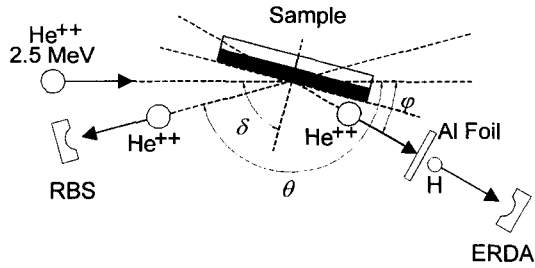


그림 1. Experimental setup for ERDA.

ERDA는 탄성산란을 이용한다는 점에서는 RBS와 같으나 박막표면을 헬륨입자에 대해 기울인 상태로 놓고 전방으로 recoil 되는 박막 내의 경원소를 측정하는 것이 다르다. ERDA와 RBS 분석은 박막표면으로 입사하는 헬륨입자의 입사각이 서로 다르기 때문에 ERDA에 의한 수소함량과 RBS에 의한 박막 내의 구성원소 함량을 동시에 정상화하는 할 수 없다.

따라서 본 실험에서는 a-C:H 박막에 함유되어 있는 수소함량에 초점을 두고 그림 1과 같이 ERDA를 중심으로 분석장치를 구성하였다. 박막표면을 헬륨이온에 대해 75°(δ) 기울인 상태로 놓고 전방(헬륨이온 입사각에 대해 30°(ϕ))으로 recoil되는 수소원소를 ERDA의 detector를 이용하여 측정하였고, RBS의 detector를 헬륨이온 입사각에 대해 165°(θ)에 설치하여 후방산란하는 헬륨의 에너지를 측정하여 박막을 구성하고 있는 원소를 측정하였다. RBS에 의한 박막의 구성 원소 측정은 정량적인 것은 아니며, 단지 박막 내의 탄소원자와 다른 원소들의 존재만을 확인하기 위한 것이었다. 이때 헬륨 이온의 에너지는 2.5 MeV로 하였다.

박막의 두께측정은 Dektak surface profiler와 SEM (secondary electron microscopy)을 이용하였고, 200 Å 미만의 두께는 AFM(atomic force microscopy)을 이용하여 측정하였다. 그리고 RBS 분석과 병행하여 AES(Auger electron spectroscopy)을 이용한 박막의 성분분석도 하였다.

3. 결과 및 토의

그림 2는 플라즈마 전처리를 하였을 경우와 하지 않았을 경우, 그리고 bias 전압을 인가하였을 경우와 하지 않았을 경우의 AES에 의한 depth profile이다. 이때 ECR 플라즈마 소스 power, CH₄/H₂ 가스 혼합비

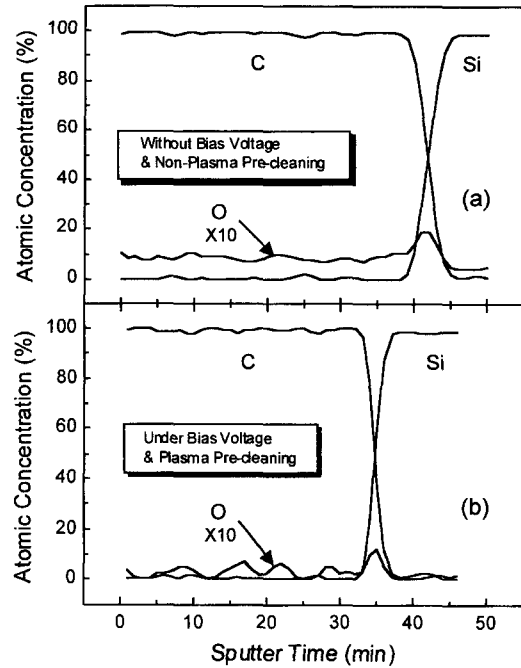


그림 2. AES depth profile of a-C:H films (a) without and (b) under substrate bias voltage.

와 유량, 압력 및 증착시간은 각각 700W, 10/100 SCCM, 1.1×10^{-2} torr, 2시간이었고, 그림 2(b)의 경우에 bias 전압은 -50V였다.

그림 2의 (a),(b) 모두 박막 내에는 탄소원소가 dominant하며, 기판과 박막 사이에서 플라즈마 전처리를 하지 않았을 경우에 약 2%의 산소원소가 측정되었고, 플라즈마 전처리 후의 경우에는 약 1%의 산소원소만 측정되었다. 계면과 박막 내에 존재하는 산소원소는 플라즈마 용기로부터 진공용기로 divergence하게 down stream되는 플라즈마들이 진공용기 내벽에 약하게 결합되어있는 산소원자들과 충돌에 의하여 진공용기 내벽에서 떨어져 나온 것으로 생각된다.

그리고 본 논문에 제시하지 않았지만 표 1의 모든 증착조건에서 만들어진 박막의 AES depth profile은 sputter time의 차이만 있을 뿐이고, 박막의 구성성분은 그림 2(b)와 같이 측정되었다. 본 실험에서 증착한 모든 박막은 플라즈마 전처리를 실행하였고, AES 분석장치 자체의 오차율을 고려한다면 약 1%의 산소는 무시할 수 있을 것으로 생각된다. 이 결과로 보아 AES로 측정할 수 있는 원소 중에서 박막 내에 있는 구성원소는 탄소원소뿐임을 확인할 수 있다. Sputter 시간의

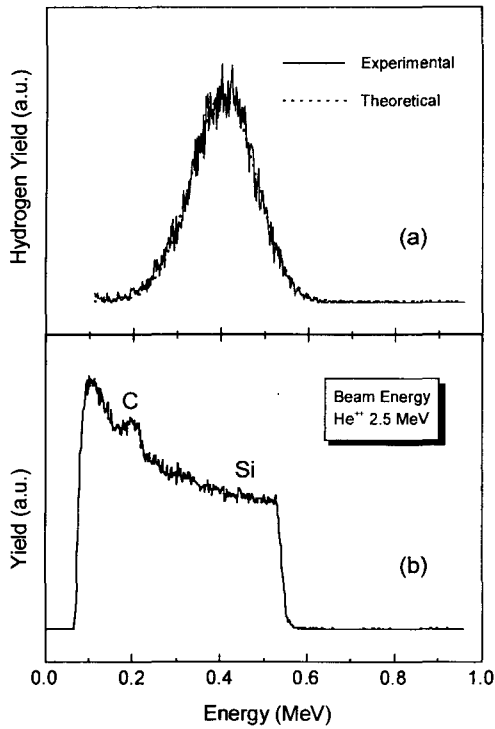


그림 3. (a) ERD and (b) RBS spectrum obtained from a-C:H film.

차이는 박막의 증착조건에 따른 두께와 밀도의 차이 때문으로 판단된다.

그림 3은 bias 전압을 인가하지 않고 ECR 플라즈마 소스 power, CH₄/H₂ 가스 혼합비와 유량, 증착시간을 각각 300W, 10/100 SCCM, 2시간인 조건으로 증착한 박막의 ERDA와 RBS의 스펙트럼이다. 그림 3(a)에서 실선이 2.5 MeV의 에너지를 갖는 헬륨이온을 박막에 충돌 시켰을 때 전방으로 recoil 되는 수소원소를 측정 한 것이고, 일점쇄선은 ERDA로 측정된 스펙트럼을 이론적으로 fitting 한 것이며, 이렇게 fitting 된 곡선을 ERDA의 소프트웨어를 통하여 적분하면 박막 내에 있는 수소함량을 정량적으로 알 수 있다. 그림 3(b)의 RBS 스펙트럼으로부터 박막 내에는 탄소원소 외에 다른 원소들이 존재하지 않음을 확인할 수 있다.

그림 2(b)의 결과와 그림 3(a) 및 (b)의 결과를 보면, 본 실험에서 제작된 박막은 탄소원소와 수소원소로만 구성되어 있음을 알 수 있고, ERDA에 의해서 수소함량을 정량화하면 박막 내의 나머지 성분은 탄소원소이므로 간접적으로 탄소함량도 정량화 할 수 있다.

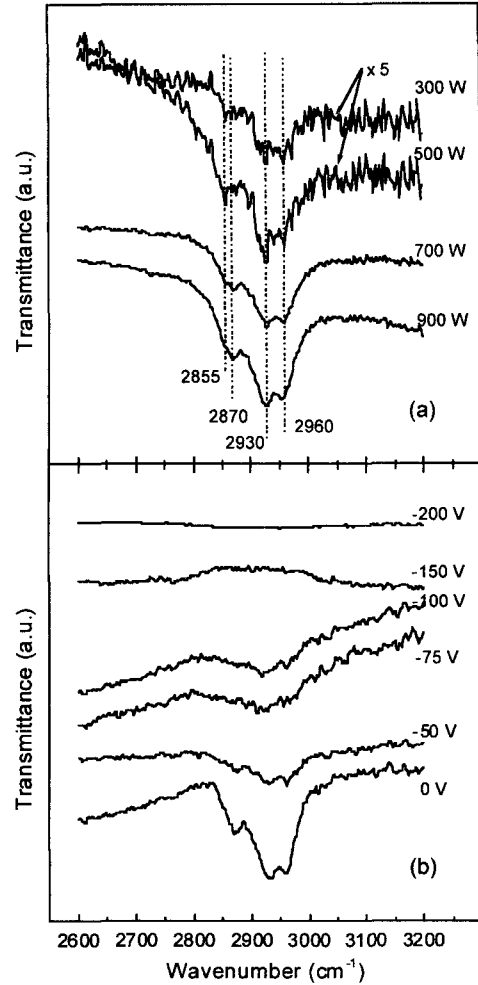


그림 4. FTIR spectra of films deposited at various conditions of (a) ECR plasma source power and (b) substrate bias voltage.

그림 4는 ECR power와 기판 bias 전압을 변화시키면서 증착한 박막의 FTIR(Fourier transform Infrared) 스펙트럼이다. 그림 4(a)는 bias 전압을 인가하지 않고 CH₄/H₂ 가스 혼합비와 유량, 증착시간을 각각 10/100 SCCM, 2시간인 조건으로 증착한 박막이고, 그림 4(b)는 ECR 플라즈마 소스 power, CH₄/H₂ 가스 혼합비와 유량, 증착시간을 각각 700W, 10/100 SCCM, 2시간인 조건으로 증착한 박막이다.

그림 4(a)에서 ECR 플라즈마 소스 power를 증가시킬수록 모든 peak의 상대강도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 ECR power가 증가됨에 따라 이온화되는

메탄 가스와 수소 가스에서 수소량이 증가하기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 각각의 흡수 peak들은 2800~3000 cm^{-1} 영역에서 나타나고 있다. 특히, 2855 cm^{-1} , 2870 cm^{-1} , 2930 cm^{-1} , 2960 cm^{-1} 에서 강한 peak들이 나타나는데, 2855 cm^{-1} 에서 나타나는 peak는 $\text{sp}^3 \text{CH}_2$ (symmetrical) 결합이고 2870 cm^{-1} 에서 나타나는 peak는 $\text{sp}^3 \text{CH}_3$ (symmetrical) 결합이며 2960 cm^{-1} 에서 나타나는 peak는 $\text{sp}^3 \text{CH}_3$ (asymmetrical) 결합에 의해서 나타나는 것이고, 2930 cm^{-1} 에서 나타나는 peak는 $\text{sp}^3 \text{CH}_2$ (asymmetrical) 결합 때문에 생긴 peak인 [16], 2960 cm^{-1} 에 나타난 peak의 영향으로 높은 파수(wavenumber) 쪽으로 약 5 cm^{-1} 이동한 것으로 판단된다. 뚜렷하게 관측된 peak는 위에 표시한 네 곳의 영역이지만, 2950 cm^{-1} 에서 $\text{sp}^2 \text{CH}_2$ 결합과 3000 cm^{-1} 에서 $\text{sp}^2 \text{CH}$ 결합도 포함되어 있을 것으로 판단되므로 [1,16],

박막을 형성하는 수소결합의 대부분이 sp^3 이고 일부 sp^2 구조가 존재함을 알 수 있다.

그림 4(b)에서 bias 전압을 인가하지 않았을 때 관측되었던 2855 cm^{-1} , 2870 cm^{-1} , 2930 cm^{-1} , 2960 cm^{-1} peak들이 bias 전압을 -50, -75, -100 V로 변화시킬수록 peak의 상대강도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것은 기판 bias 전압을 크게 증가할수록 더 큰 에너지를 가진 이온들이 기판 위에 형성하고 있는 박막에 충돌하기 때문에 탄소와 결합하고 있던 수소원자들이 떨어져 나가는 탈수소화 현상 때문으로 생각된다 [11,12]. 그림 4의 FTIR 실험 결과로부터 증착 조건에 따라서 박막 내부에 함유되어 있는 수소량이 변화함을 알 수 있다.

그림 5와 그림 6은 표 1에서 나타난 증착조건에 따른 박막의 두께 변화와 박막 내부에 함유되어 있는 수

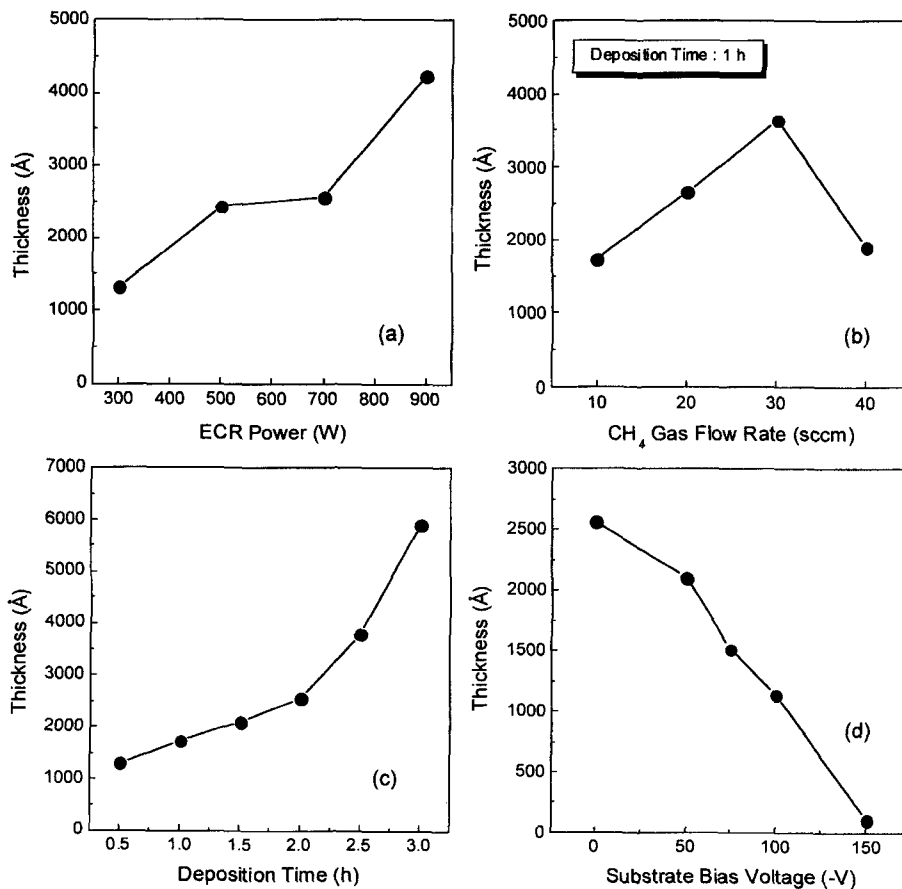


그림 5. Thickness of films deposited at various conditions of (a) ECR plasma source power, (b) gas composition and flow rate, (c) deposition time and (d) substrate bias voltage.

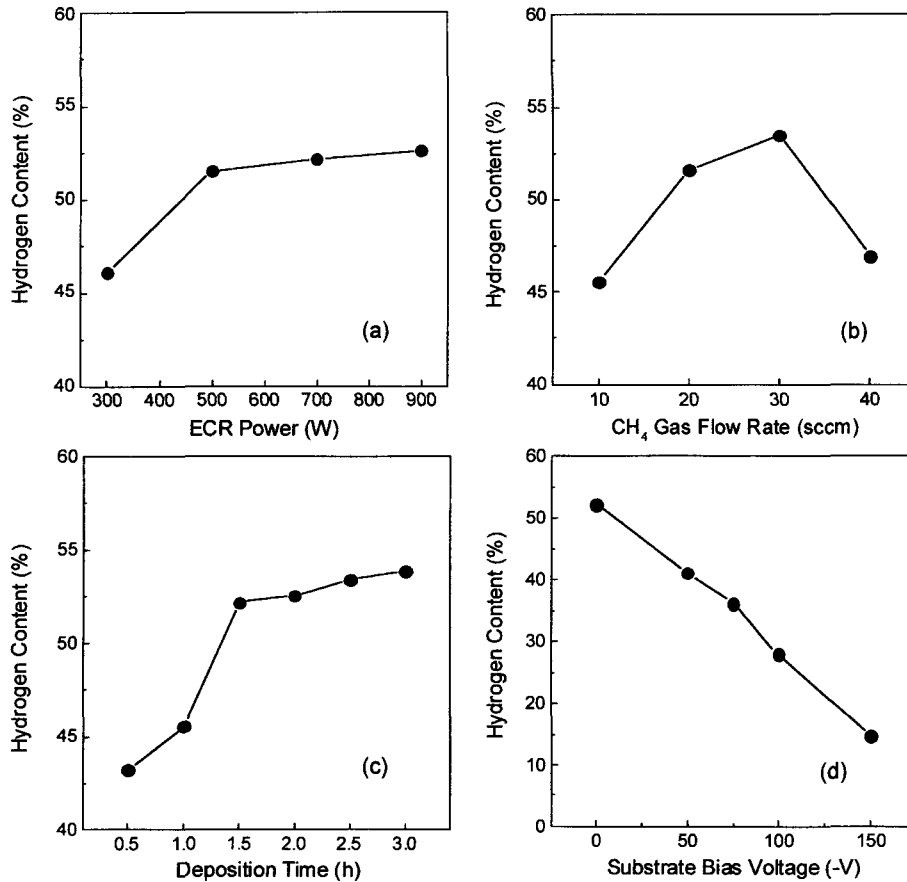


그림 6. Hydrogen content of films deposited at various conditions of (a) ECR plasma source power, (b) gas composition and flow rate, (c) deposition time and (d) substrate bias voltage.

소함량의 변화를 나타낸 것이다. 박막 증착 시 기본조건으로는 ECR 플라즈마 소스 power, CH₄/H₂ 가스 혼합비와 유량, 증착시간 및 기판 bias 전압을 각각 700W, 10/100 SCCM, 2시간, 0V로 하였고, 네 개의 증착조건 중 한 개의 조건을 변화시킬 때 나머지 세 개의 조건은 기본조건으로 고정하고 박막을 증착하였다.

그림 5(a)와 (c)에서 나타냈듯이 ECR 플라즈마 소스 power와 증착시간을 증가시킬수록 박막의 두께는 증가하였다. 이것은 ECR 플라즈마 소스 power와 증착시간을 증가시킬수록 이온화되는 메탄가스 속의 탄소 및 수소량과 이온화되는 수소가스 속의 수소량이 증가하기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다. 이 때 박막 내부에 함유되어 있는 수소함량을 ERDA로 측정하여 나타내면 그림 6(a) 및 (c)와 같다. ECR 플라즈마 소스 power가 적을 때와 증착초기에는 박막 내부의 수소함량

은 50% 미만이었으며, ECR 플라즈마 소스 power와 증착시간을 증가시킬수록 수소함량은 50% 이상으로 서서히 증가하였다. 이것은 ECR 플라즈마 소스 power가 적을 때와 증착초기에는 박막을 구성하는 원소가 탄소 원자가 많고, ECR 플라즈마 소스 power와 증착시간을 증가시킬수록 수소원자가 더 많음을 의미한다. 또한 ECR 플라즈마 소스 power와 증착시간을 증가시킬수록 박막을 구성하는 탄소와 수소의 3차원적 cross-link에서 수소에 의한 network이 더 크게 형성되는 것으로 볼 수 있다.

그림 5(b)는 수소가스를 100 SCCM으로 고정시킨 상태에서 메탄가스를 10에서 40 SCCM까지 변화시키면서 증착한 박막의 두께를 나타낸 것이다. 메탄가스의 유량을 증가시킬수록 박막의 두께가 증가하다가 다시 감소함을 볼 수 있으며, 이때 박막 내부에 함유되어 있

는 수소함량도 그림 6(b)에서 나타냈듯이 메탄가스의 유량을 증가시킬수록 증가하다가 다시 감소하였다. 이것은 수소가스 유량에 비해서 상대적으로 메탄가스 유량 증가가 수소함량을 감소시키고, 또한 박막 내부의 수소에 의한 network 형성이 감소되어 박막의 두께가 감소되는 것으로 판단된다. 그리고 이 결과는 메탄가스와 수소가스에 의한 카본박막 증착에서 박막 내부에 함유되는 수소함량이 박막 형성에 크게 영향을 줄을 보여주는 것이라고 말할 수 있다.

그림 5(d)는 기판 bias 전압을 변화시키면서 증착한 박막의 두께를 나타낸 것이다. -150 V의 기판 bias 전압에서는 막의 두께가 약 100 Å로서 박막이 거의 만들어지지 않았고, -200 V에서는 기판 표면이 식각되었다. 이것은 ECR 플라즈마 소스에 의한 고밀도 플라즈마와 bias 전압에 의한 이온충돌 효과 때문으로 판단되며, -150 V 이하에서는 증착되는 양보다 re-sputtering 되는 양이 더 많음을 의미한다. 그리고 기판 bias 전압을 -50, -75, -100 V로 변화시킬수록 박막의 두께는 감소하였으나, 이온충돌로 박막 내부의 공극율을 줄일 수 있기 때문에 박막의 경도나 밀착력이 더 증가될 것으로 기대할 수 있다. 그림 6(d)는 기판 bias 전압을 변화시키면서 증착한 박막의 내부에 함유되어 있는 수소함량을 나타낸 것이며, 기판 bias 전압을 증가시킬수록 수소함량은 크게 감소하였다. 이것은 그림 4(b)의 FTIR 결과에서도 보았듯이 기판 bias 전압에 의한 이온충돌 때문에 일어나는 탈수소화 현상이다. C-H 결합 에너지는 3.4 eV로 C-C 결합이나 C=C 결합 보다 약하여 수소 원자가 비교적 해리가 잘 되므로 이러한 현상이 일어났다고 생각된다. 결합이 끊어진 탄소 원자들은 다른 탄소 원자들과 dangling bond 결합하여 3차원적 cross-link를 형성시켜 나가면서 내부 압축응력을 증가시키는 것으로 알려져 있다 [17].

4. 결 론

ECR-PECVD 방법으로 ECR 플라즈마 소스 power, CH₄/H₂ 가스 혼합비와 유량, 증착시간 및 기판 bias 전압을 변화시켜 가면서 수소가 함유된 비정질 탄소 박막을 증착하고, 증착조건에 따라서 박막 내부에 함유되어 있는 수소함량 변화를 ERDA로 측정하였다. ERDA의 결과와 AES 및 RBS에 의한 성분분석으로부터 본 실험에서 증착된 박막은 탄소와 수소만으로 구성되어

있음을 확인할 수 있었고, FTIR의 결과로부터 박막 증착조건에 따라서 박막 내부에 함유되어 있는 수소함량이 변화함을 알 수 있었다. 기판 bias 전압을 증가시킬수록 이온충돌 현상이 두드러져 탄소와 결합하고 있던 수소원자들이 떨어져 나가는 탈수소화 현상으로 수소함량이 크게 감소됨을 알 수 있었다. 그 밖의 조건에서는 박막증착 초기에는 수소보다 탄소량이 좀 더 많다가 점차적으로 수소함량이 증가되었고, 이때 박막 내부에 함유되어 있는 수소함량은 45~55% 범위 내에 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 포스코신기술연구조합의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] V. K. Kudoyarova, A. V. Chernyshov, T. K. Zvonareva, N. B. Dzhelepova and M. B. Tsolov, Surf. Coat. Tech. **100/101**, 192 (1998).
- [2] K. C. Park, J. H. Moon, S. J. Chung, M. H. Oh, W. I. Milne and J. Jang, J. Vac. Sci. Technol. **B15**, 428 (1997).
- [3] W. Reuter, J. Voigt, A. Neuffer and A. Lunk, Surf. Coat. Tech. **93**, 93 (1997).
- [4] J. P. Hirvonen, J. Koskinen, R. Lappalainen, A. Anttila and M. Trkula, J. Electron. Mater. **20**, 127 (1991).
- [5] Xiaoming He, Wenzhi Li and Hengde Li, J. Vac. Sci. Technol. **A14**, 2039 (1996).
- [6] F. Jansen, M. Machonkin, S. Kaplan and S. Hark, J. Vac. Sci. Technol. **A3**, 605 (1985).
- [7] F. Xiong, Y. Y. Wang, V. Leppert and R. P. H. Chang, J. Mater. Res. **8**, 2265 (1993).
- [8] A. Ali, K. K. Hirakuri and G. Friedbacher, Vacuum **51**, 363 (1998).
- [9] V. N. Apakina, A. L. Karuzskij, Y. A. Mityagin, V. N. Murzin, A. V. Perestoronin, A. V. Tsikunov, N. A. Volchkov and B. G. Zhurkin, Appl. Surf. Sci. **109/110**, 335 (1997).
- [10] K. Kuramoto, Y. Domoto, H. Hirano S. Kiyama and S. Tsuda, Appl. Surf. Sci. **113/114**, 227 (1997).
- [11] E. Kamijo, T. Nakamura and Y. Tani, Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. **B121**, 110 (1997).
- [12] S. F. Yoon, H. Yang, R. J. Ahn and Q. Zhang, J. Electron. Mater. **27**, 44 (1998).
- [13] M. A. Tamor, W. C. Vassel and K. R. Carduner, Appl.

- Phys. Lett. **58**, 592 (1991).
- [14] 손영호, 허영준, 권오진, 정우철, 정재인, 김인수, 김기홍, 배인호, 새물리 **41**(6), 392(2000).
- [15] W. D. Mackintosh, Characterization of Solid Surfaces (Plenum, New York, 1974), chap. 16.
- [16] N. Mutsukura, S. I. Inoue and Y. Machi, J. Appl. Phys **72**, 43 (1992).
- [17] S. F. Yoon, H. Yang, A. Rusli, J. Ahn and Q. Zhang Diamond Relat. Mater. **7**, 70 (1998).