

FCVA 방법으로 증착된 다이아몬드상 탄소 박막의 XPS 및 XRR 특성 연구

論 文
52C-3-2

A Study on XPS and XRR Characteristics of DLC Films Deposited by FCVA Method

朴 昶 均* · 蔣 錫 謨** · 嚴 玄 錫* · 徐 洙 瑩*** · 朴 珍 奭[§]

(Chang-Kyun Park · Seok-Mo Chang · Hyun-Seok Uhm · Soo-Hyung Seo · Jin-Seok Park)

Abstract - Diamond-like carbon (DLC) films are deposited at room temperature using a filtered cathodic vacuum arc (FCVA) technique. The influence of negative bias voltage (applied to the substrate from 0 to -250V) on the sp^3 hybridized carbon fraction is examined by Raman spectroscopy and x-ray photoelectron spectroscopy (XPS) for C 1s core peak. For the first time, depth profile of C 1s, Si 2p, and O 1s XPS peaks for the deposited DLC film are obtained. DLC film is modeled as a multilayered structure, composing of surface, bulk, and interface. In addition, the x-ray reflectivity (XRR) is proposed as a method for estimating the density, surface roughness, and thickness of each layer constituting the DLC film. The estimated thickness of DLC film is in good agreement with the result obtained from the transmission electron microscope (TEM) measurement.

Key Words : DLC, FCVA, XRR, XPS, Raman 분광법

1. 서 론

다이아몬드상 탄소(diamond-like carbon, DLC) 박막은 비정질 구조의 탄소 박막으로서, sp^3 (diamond-like 혹은 tetrahedral 결합), sp^2 (graphite-like 혹은 trigonal 결합) 및 sp^1 hybridization C-C 결합 등이 혼재되어 있으며, 특히 sp^3/sp^2 분율(fraction)에 따라 박막의 전기적, 기계적 및 광학적 물성이 크게 좌우된다[1,2]. DLC 박막은 다양한 방법에 의하여 증착이 가능하며, 이 중에서 특히 FCVA(filtered cathodic vacuum arc) 방법은 여타 방법에 비하여 sp^3 함량이 매우 높은 DLC 박막을 제작할 수 있는 것으로 알려져 있다[3]. 또한, FCVA 방법에 의한 DLC 박막의 증착 시에는 그 초기 증착 단계에서 기관으로 널리 사용되는 실리콘의 표면에 높은 에너지를 갖는 탄소 이온들이 충돌하여 계면층이 존재하는데, 이 계면층에 대한 구조적 분석은 DLC 박막과 기관과의 접착(adhesion) 특성 분석 및 박막의 소자 응용에 있어서 중요하다고 할 수 있다[4].

DLC 박막 내에 존재하는 sp^3 함량을 분석하는 방법으로는 EELS(electron energy loss spectroscopy)[5], NEXAFS(near edge x-ray absorption fine structure)[6].

AES(auger electron spectroscopy)[7] 등이 널리 사용되어 왔다. 이 중에서 EELS와 NEXAFS 방법의 경우는 DLC 박막으로부터 얻어지는 스펙트럼의 해석에 있어서 아직까지 불명확성이 존재하고 있으며[8], AES의 경우는 사용되는 전자빔에 의해 분석 중 박막의 구조적, 화학적 변화가 유도될 수 있다고 보고 된 바 있다[7]. 최근에는 EELS에 비하여 비교적 분석이 용이한 장점을 가지고 있는 XPS(x-ray photoelectron spectroscopy) 방법이 제안되어, 측정된 스펙트럼으로부터 C 1s 피크를 sp^2 및 sp^3 피크로 분해함으로써 박막내의 sp^3 함량을 정량적으로 산출하는 방법이 소개된 바 있다[9]. 또한, 분석 시 박막의 물성 변화를 야기하지 않으면서, 분석 영역에 따른 밀도, 거칠기 등의 차이를 고려하여, DLC 박막을 물성이 서로 다른 층상구조(layered structure)로 해석하는 XRR(x-ray reflectivity) 방법이 제안되어 계면층, 표면층을 포함한 DLC 박막의 구조 해석에 시도된 바 있다[10]. 그러나, 아직까지 XPS 및 XRR 방법을 이용한 DLC 박막의 구조적 물성 분석에 대한 연구 결과가 미흡하며, 더욱이 FCVA 방법으로 제작된 DLC 박막에 대하여 상기 방법들을 적용한 예는 매우 찾아보기 어렵다.

본 연구에서는 FCVA 방법으로 증착된 DLC 박막에 대하여 XPS, XRR 및 Raman 분석을 동시에 수행함으로써, 증착조건에 따른 박막 내 sp^3/sp^2 함유비의 정성적인 변화뿐 아니라, 층상구조로 모델링(modeling)된 DLC 박막에 대하여 표면층, 벌크(bulk)층 및 기관과의 계면층등 DLC 박막을 구성하는 각 층의 물질에 대한 탄소 결합구조, 밀도 등 구조적 물성의 차이를 정량적으로 규명하였다.

* 正 會 員 : 漢陽大 電子電氣制御計測工學科 博士課程

** 準 會 員 : 漢陽大 電子電氣制御計測工學科 工學碩士

*** 正 會 員 : 漢陽大 無機材料工學科 工學博士

§ 正 會 員 : 漢陽大 電子컴퓨터工學部 副教授·工博

接受日字 : 2002年 8月 27日

最終完了 : 2002年 12月 27日

2. 실험 방법

본 연구에서 DLC 박막의 증착을 위하여 사용한 FCVA 장치는 음극 증발부, 아크 플라즈마의 수송 및 대입자 (macroparticle)를 제거하기 위한 필터링(filtering)부와 전원 및 반응가스 공급부 등 크게 3가지로 구성되어 있으며, 이온 빔의 수송효율을 극대화하기 위하여 거울형 자장 구조를 채택하였다[11]. 아크 플라즈마 발생시 방전전압 및 전류는 20~25V 및 20A로 각각 인가하였고, 자계 발생을 위하여 음극 영역에는 4A, 필터링부의 곡선캐도 이전 및 이후 영역에는 각각 3A 및 4A를 인가하였다. 초기진공은 터보 분자펌프를 이용하여 모든 실험에서 5×10^{-6} Torr 이하로 유지하였다. 기판은 $0.001 \sim 0.01 \Omega \text{cm}$ 의 비저항을 갖는 (100) 방향의 p형 실리콘 기판을 사용하였으며, 습식 세정 후 5×10^{-3} Torr 압력에서 -500V의 기판전압을 인가하여 Ar 분위기에서 2분간 건식 식각한 후 박막을 증착하였다. DLC 박막의 증착시 반응기내 압력은 3×10^{-4} Torr로 고정하였으며, 기판전압을 0V에서 -250V까지 변화시켜 박막 증착에 참여하는 탄소 이온의 에너지를 변화시킴으로써 구조적 물성이 서로 다른 다양한 DLC 박막을 증착하고자 하였다.

증착된 DLC 박막의 탄소 결합 구조 분석은 Triple Raman Spectroscopy(Jobin Yvon T64000)를 이용하여 $400 \sim 2400 \text{cm}^{-1}$ 범위에서 스펙트럼을 측정하여, 1550cm^{-1} 부근의 피크(D-line, I_D)와 1350cm^{-1} 부근의 피크(G-line, I_G)의 상대적인 크기(I_D/I_G) 및 파장에 따른 G-line 피크의 폭을 증착시 사용된 기판전압의 함수로 정량적으로 분석하였다. 이때 Raman 스펙트럼 분석에 사용된 광원은 514.532nm 파장의 Ar 레이저이며, 레이저의 조사로 인한 열처리 효과를 피하기 위해 낮은 전력(3mW)을 인가하였고, 장비의 분해능은 1.8cm^{-1} 이었다. DLC 박막 내 구성 원소들의 화학적 결합을 분석하기 위하여 XPS(VG Scientific ESCALAB 200R)를 사용하였다. 여기서, x-ray 광원은 Al-K α (15kV, 20mA, 300W)를 사용하였고, 측정 시 진공도는 5×10^{-10} Torr이었으며, 광전여기(photoelectrically excited)된 전자의 에너지는 CHA (concentric hemispherical analyzer)와 CAE(constant analyzer energy mode) 방식을 통하여 검출하였다. 특히, 박막의 깊이에 따른 XPS 스펙트럼의 분포(depth profile)를 얻기 위하여 5keV, 0.30 μ A의 Ar 이온빔을 이용하여 다단계의 식각 실험을 수행하면서 survey scan(electron pass energy: 50eV) 후 주요하게 나타나는 C 1s, Si 2p, Ar 2p, O 1s 상태들을 다시 고 분해능(electron pass energy: 20eV)으로 scan하여 측정하였다. 동일한 시편들에 대하여 θ -2 θ scan 방식으로 50kV-40mA, $0^\circ \sim 4^\circ$ 범위에서 0.02 $^\circ$ /sec의 scan 속도로 XRR(Bede D3 System) mode를 동시에 측정하였다. 측정된 결과는 Bede REFS v.3.50을 이용하여 DLC 박막을 세 개의 층으로 구분한 후, 각 층마다의 밀도, 두께, 표면 거칠기 값을 조정하여 얻어진 수치해석 결과를 실험값과 최적 근사되도록 하여 각 층에 해당하는 물성 값들을 도출하였다. 또한, TEM (transmission electron microscope, JEM-2010)을 이용하여 XRR 분석으로부터 산출된 DLC 박막내 각 층의 두께를 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 FCVA 방법에 의해 증착한 DLC의 Raman 스펙트럼을 박막 증착시에 인가한 기판전압에 따라 나타낸 것이다. 일반적으로 DLC 박막의 Raman 스펙트럼은 그림 1과 같이 약 1550cm^{-1} 에서 주로 나타나는 결정질 흑연상과 관련된 E2g zone center mode에 의한 G-line 피크(I_G)와 약 1350cm^{-1} 에서 나타나는 disorder-allowed zone edge mode와 관계된 D-line 피크(I_D)가 관찰된다[12]. 이러한 두 가지 피크는 박막의 증착조건과 물성에 따라 각 피크의 중심 위치(cm^{-1}), 폭 그리고 두 피크의 상대적인 크기(I_D/I_G)가 어느 정도의 경향성을 가지고 변화하는 바, 특히 박막내의 sp^3/sp^2 함유비와는 대체적으로 반비례하는 것으로 알려져 있다[13].

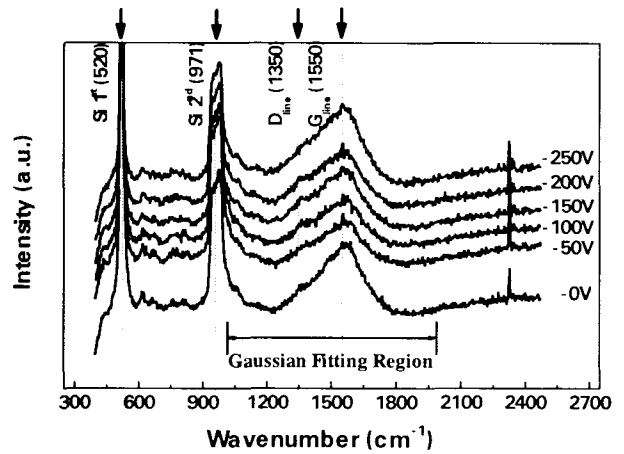


그림 1 기판전압에 따른 DLC 박막의 Raman 스펙트럼
Fig. 1 Raman spectra of DLC films, as a function of substrate bias voltage

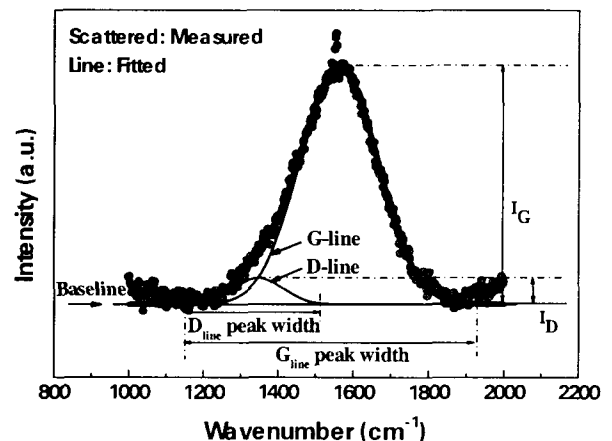


그림 2 Gaussian 함수를 이용한 D 피크 및 G 피크 분리
Fig. 2 Deconvolution of D-peak and G-peak using the Gaussian function

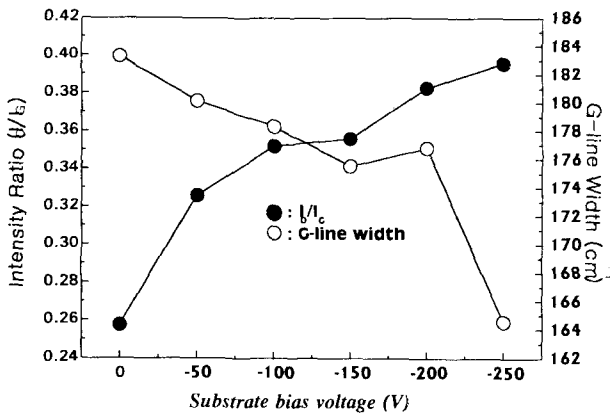


그림 3 기판전압에 따른 DLC 박막의 (a) I_D/I_G 및 (b) G-line 폭의 변화

Fig. 3 Variation of I_D/I_G intensity ratio and G-line width, as a function of substrate bias voltage

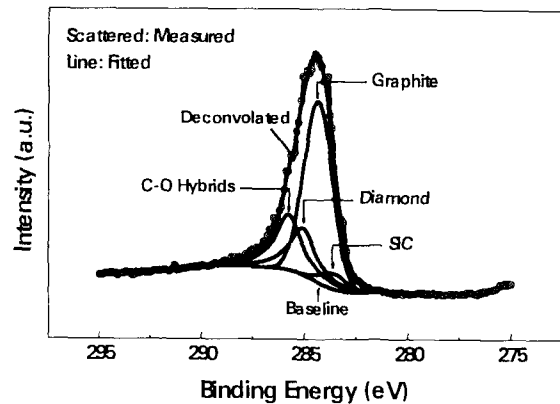


그림 5 증착된 DLC 박막의 XPS 스펙트럼에서 C 1s 상태에 포함된 4개 피크의 분리

Fig. 5 Deconvolution of 4 peaks constituting the C 1s state in the XPS spectrum of deposited DLC film

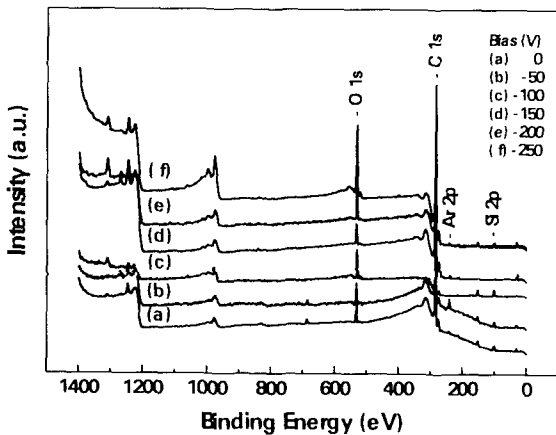


그림 4 기판전압에 따른 DLC 박막 표면의 XPS survey scan

Fig. 4 XPS survey scan for DLC films deposited at different substrate bias voltage

따라서, 본 연구에서는 측정된 Raman 스펙트럼을 그림 2와 같이 Gaussian 함수를 이용하여 두 개의 피크로 분리한 후 I_D/I_G 및 G-line 폭의 변화를 기판전압의 함수로서 정량적으로 분석하여 그림 3에 정리하였다. 그림 3에서 기판전압이 증가할수록 I_D/I_G 상대적 강도비(intensity ratio)는 증가하였으며, G-line의 폭은 감소하는 경향이 나타남을 알 수 있다. 이는 기준에 보고된 바와 같이[14] FCVA 방법의 의한 박막 증착시 기판전압이 증가함에 따라 탄소 이온의 잉여 이온화 에너지의 증분(increment)에 의하여 소위 thermal spike 현상이 발생하고, 이에 따라 탄소 결합의 후연화(graphitization)가 더욱 활발히 진행하여 결국 박막내 sp^3 결합의 감소를 초래하였기 때문이라 사료된다.

그림 4는 증착된 DLC 박막에 대하여 식각 공정을 수행하지 않고 측정된 XPS survey scan 결과를 기판전압에 따라 나타낸 것으로서, C 1s, Si 2p, Ar 2p 및 O 1s 등의 결합상태(bonding state)를 관측할 수 있었다. 여기서, Ar 2p)

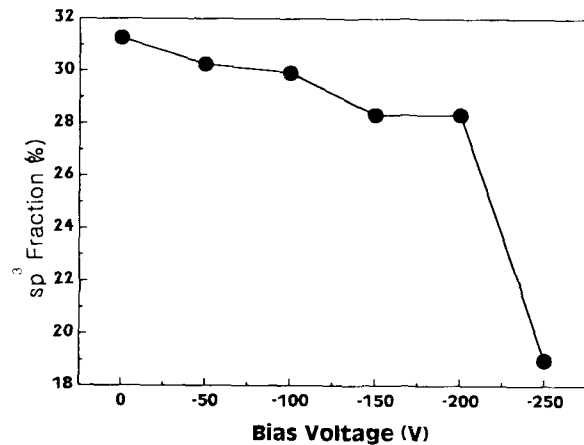


그림 6 XPS 스펙트럼의 C 1s 상태에서 산출된 기판전압에 따른 DLC 박막의 sp^3 분율의 변화

Fig. 6 Variation of sp^3 fraction of DLC films estimated from the XPS spectra for C 1s peak, as a function of substrate bias voltage

는 박막 증착시 안정된 아크 플라즈마의 형성을 위해 사용된 Ar 가스의 영향이고, O 1s는 증착 후 박막이 공기중에 노출되어 나타난 것이라 판단된다. 또한, Si 2p는 박막 증착시 높은 에너지를 갖는 탄소 이온들이 실리콘 기판에 침투되면서 internal sputtering 같은 효과에 의해 실리콘 원자가 방출되어 그 위에 증착되는 탄소 박막 내부로 확산되어 표면까지 도달한 실리콘에 의해 나타난 것이라 사료된다[15].

본 연구에서는 DLC 박막의 sp^3 분율을 산출하기 위하여 그림 4의 XPS 스펙트럼에서 C 1s 상태에 대한 스펙트럼을 그림 5에 나타낸 바와 같이 다이아몬드상 피크(285.2eV), 후연상 피크(284.4eV), C-O 혼성(hybrid) 피크(286.5eV), SiC 피크(283.7eV) 등으로 분리(deconvolution)하였다. 여기서, % sp^3 분율(fraction)은 식 (1)과 같이 다이아몬드상 및 후연상 피크의 전체 면적($D_{FA}+G_{FA}$)에 대한 다이아몬드상 피크의 면적(D_I)으로 정의하여 산출하였다[16].

$$\% sp^3 \text{ fraction} = \frac{D_{PA}}{D_{PA} + G_{PA}} \times 100 \quad (1)$$

그림6은 증착된 DLC 박막의 % sp^3 분율을 상기한 방법으로 기관전압의 변화에 따라 산출한 결과이다. 기관전압이 0V인 경우 DLC 박막의 sp^3 분율이 31.3%로서 가장 큰 값을 가지며, 기관전압이 증가할수록 sp^3 분율은 단조적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 그림3의 Raman 스펙트럼 I_b/I_g 변화에서 예측한 탄소 결합구조의 기관전압에 따른 변화와 일치하는 결과임을 알 수 있다.

DLC 박막 내 sp^3 분율 분포 및 계면층에 대한 분석을 위하여 기관전압 0V에서 증착된 DLC 박막에 대하여 Ar 식각을 수행하였으며, 매 10분마다 식각된 박막에 대하여 XPS 스펙트럼을 측정하였다. 그림7의 (a)는 C 1s 피크에 대한 식각시간 0 ~ 200분 사이의 변화를 나타낸 것이고, (b)와 (c)는 식각시간 0 ~ 500분 사이의 Si 2p와 O 1s 피크의 변화를 각각 나타낸 것이다. 먼저, 그림7의 (a)에서 식각을 수행하기 이전(ET 000)에는 C 1s 피크의 위치가 약 284.7eV로서 다이아몬드상 피크(285.2eV)와 흑연상 피크(284.4eV) 사이에 존재했으나, 식각시간이 증가할수록 피크의 위치가 흑연상 피크 쪽으로 근접하고, 강도는 상대적으로 점차 감소하는 경향이 나타났음을 알 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 C 1s 피크의 식각시간에 따른 변화로부터 박막의 깊이 방향에 대한 sp^3 분율 분포를 산출하였다. (그림8 참조) 다음으로 그림7의 (b)는 Si 2p 피크가 식각이 수행되기 전에는 Si 피크(99.5eV)와 SiC 피크(101.8eV) 사이에서 비교적 넓은 에너지 범위를 갖는 강도가 상대적으로 미약한 피크의 형태로 나타났지만, 식각공정이 약 60분 정도까지 수행된 경우에는 다소 SiC 피크 쪽으로 근접하다가, 식각시간이 100분을 경과한 이후에는 강도가 매우 큰 Si 피크의 형태로 나타났음을 보여준다. 그 후 식각시간이 증가할수록 강도는 증가하고, 피크의 위치는 Si 피크에서 변함이 없었다. 끝으로, 그림7의 (c)에서 O 1s 피크(531.0eV)는 식각이 수행되지 않았을 경우 강도가 크게 나타났으나, 식각공정이 10분 진행된 직후 강도가 급격히 감소하다가, 약 60 ~ 80분 사이의 식각시간 동안 다시 한번 큰 강도로 나타났지만 그 이후 식각이 더 진행되면 다시 미약해지는 경향을 나타냈다.

앞에서 언급한 바와 같이 식각시간에 따른 sp^3 분율을 산출하여 그림8에 나타내었다. 박막의 표면 즉 식각시간이 진행되기 전의 sp^3 분율은 31.3%이었으나, 식각이 20분 정도 진행된 직후에는 49.7%로서 가장 높은 sp^3 분율을 나타냈고, 식각시간이 약 60분 정도 경과한 이후에는 급격히 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 그림7에 나타낸 Si 2p 및 O 1s 피크의 결과를 고려할 때, 증착된 DLC 박막의 표면층은 산소와 같은 외부 원자로부터의 오염이 발생하고 DLC 박막 형성시 발생한 내부 압축응력의 급격한 완화 등의 이유에 의하여 낮은 sp^3 분율을 갖게 되고, 식각이 약 20분 정도 진행되어 이러한 오염층이 제거된 박막 내부는 sp^3 분율이 49.7 ~ 37.6%로 상대적으로 높은 sp^3 분율을 유지하는 영역이 존재하며, 식각이 약 60분 정도까지 더욱 진행되면 DLC 박막과 실리콘 기관의 계면에 이르게 되어 SiC층 및 native oxide의 영향으로 sp^3 분율이 다시 크게 낮아지는 결과가

발생하였다고 판단된다.

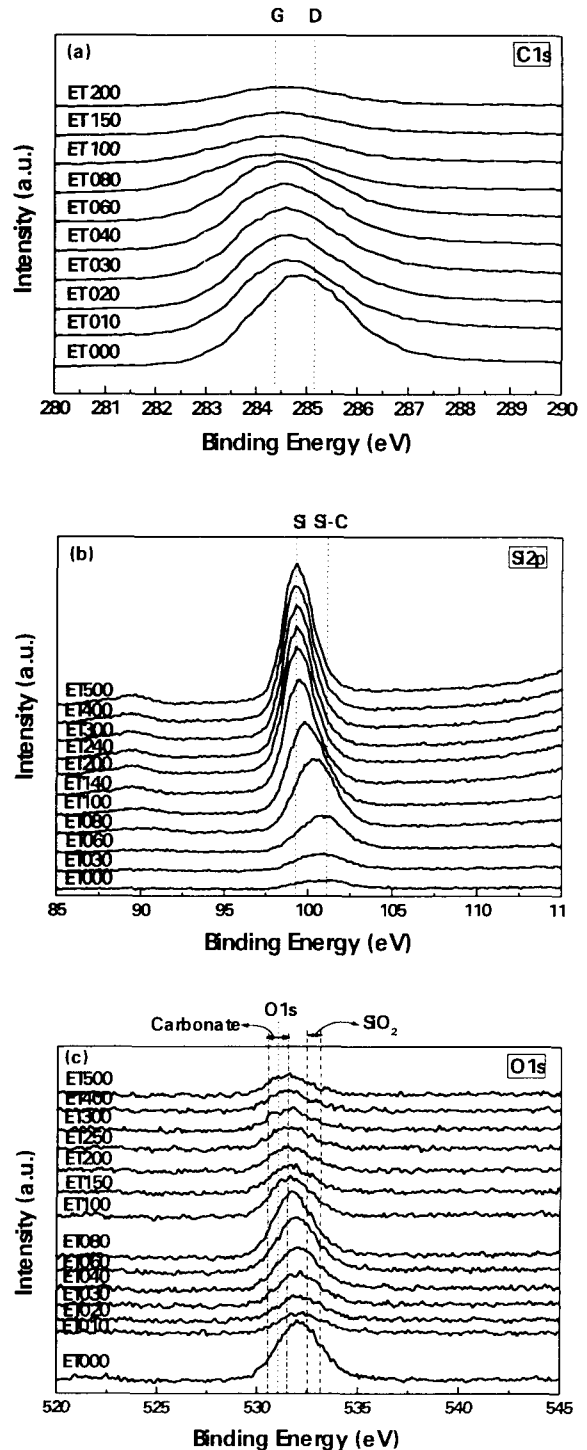


그림 7 DLC 박막의 식각시간(ET)에 따른 (a) C 1s, (b) Si 2p, (c) O 1s 상태의 변화

Fig. 7 XPS spectra for (a) C 1s, (b) Si 2p, and (c) O 1s states of DLC films, as a function of etch time (ET)

한편, FCVA 방법으로 증착된 DLC 박막의 sp^3 분율은 박막의 두께에 따라 달라지는데, 일반적으로 박막의 두께가 증가할수록 sp^3 분율은 높게 나타난다[4]. 본 연구에서 증착된 DLC 박막의 sp^3 분율이 상대적으로 낮은 이유는 sp^3 분율의 박막 깊이 방향에 대한 분포 및 실리콘 기판과의 계면층에서의 sp^3 분율 등을 산출하기 위하여 DLC 박막의 식각을 수행해야 하였기 때문에 박막의 증착시간을 짧게(2분)하여 약 20nm 정도의 얇은 박막을 증착하였기 때문이라 사료된다.

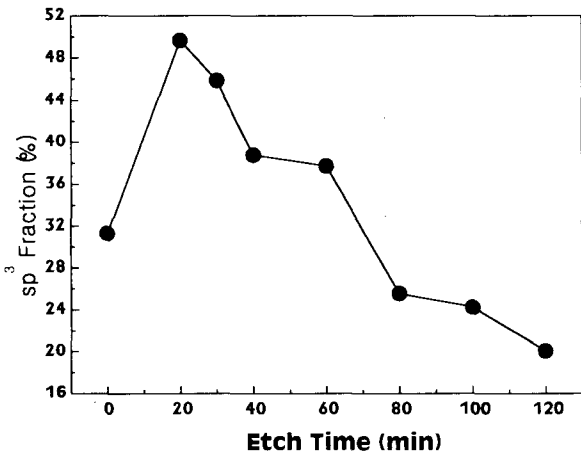


그림 8 기판전압 0V에서 증착된 DLC 박막의 식각시간에 따른 sp^3 분율의 변화

Fig. 8 Variation of sp^3 fraction of DLC film deposited at a substrate bias voltage of 0V, as a function of etch time

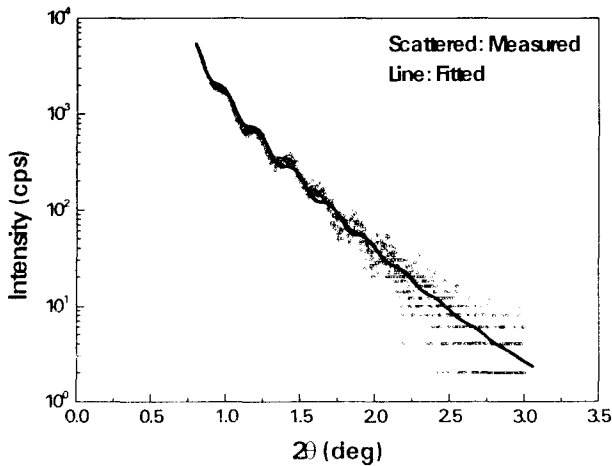


그림 9 증착된 DLC 박막의 x-ray reflectivity 결과
Fig. 9 X-ray reflectivity for deposited DLC film

본 연구에서는 그림7의 결과를 나타낸 동일한 DLC 박막에 대하여 XRR 측정을 수행하였으며, 상기와 같은 XPS 결과를 근거로 DLC 박막을 실리콘 기판과의 계면층(SiC, 1st layer), 벌크층(sp^3 rich, 2nd layer), 표면층(sp^3 poor, 3rd layer) 등으로 구분하고, 각 층의 두께, 밀도 및 표면거칠기 등의 세 가지 변수를 변화시키면서 실험치에 모의실험값을

근접시켰다[10,17]. XRR의 모의실험에 사용된 SiC와 diamond의 밀도는 각각 $3.28g/cm^3$ 과 $3.51g/cm^3$ 로 설정하였으며[18], XRR의 측정 결과 및 최종 모의실험 결과를 그림9에 비교하여 나타내었고, 실리콘 기판을 포함하여 DLC 박막의 세 가지 층에 대한 층별 두께, 밀도 및 표면거칠기, 또한 각 층에 대한 식각율 등의 산출 결과를 표1에 정리하였다.

표 1 XRR에 의해 분석된 DLC 박막의 층별 물성분석 결과
Table 1 Values of material parameters estimated from the best-fit of x-ray reflectivity

Layer	Thickness (Å)	Density (g/cm^3)	Roughness (Å)
DLC	Surface	20	0.64
	Bulk	67	1.76
	Interface	94	1.08
Si Substrate		2.33	3.7

DLC 박막의 세 가지 영역 중에서 실리콘 기판과 DLC 박막 사이의 계면층인 SiC층의 두께가 약 94Å으로 가장 두꺼운 것으로 나타났으며, 밀도는 약 $1.08g/cm^3$ 로 산출되었다. 이에 비하여 벌크층은 약 67Å의 두께를 차지하며 밀도는 세 영역 중 가장 높은 약 $1.76g/cm^3$ 로 산출되었으며, 표면층은 약 20Å 정도의 두께로 존재하며 밀도는 가장 낮은 약 $0.64g/cm^3$ 로 산출되었다. 또한, 각 층의 식각율을 계산한 결과, sp^3 분율이 상대적으로 높은 DLC 벌크층에 대한 식각율이 약 $1.68\text{\AA}/\text{min}$ 로 가장 낮게 나타났으며, SiC 계면층($1.88\text{\AA}/\text{min}$) 및 DLC 표면층($2.00\text{\AA}/\text{min}$)의 순으

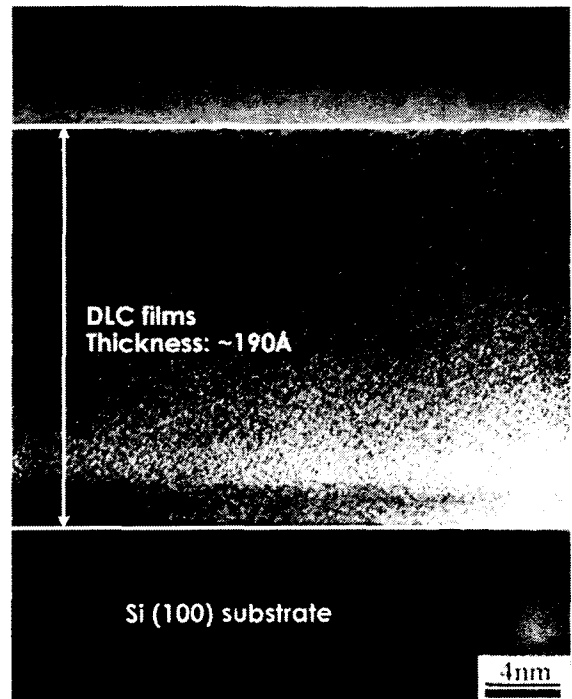


그림 10 증착된 DLC 박막의 TEM 사진
Fig. 10 TEM image for deposited DLC film

로 식각율이 증가하는 것으로 산출되었다. DLC 박막의 전체 두께는 181Å로 산출되었는데 이는 그림10에 나타난 DLC 박막의 TEM 영상으로부터 측정된 DLC 박막의 두께 (약 190Å)와 유사한 값을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 FCVA 방법으로 기판전압을 0V에서 -250V까지 변화시키면서 DLC 박막을 증착한 후, Raman 분석을 통하여 탄소결합 구조의 변화를 관찰하였으며, DLC 박막에 대하여 식각공정을 수행하면서 XPS를 측정함으로써 기존에 보고 되지 않은 DLC 박막의 깊이 방향에 대한 sp^3 분율의 변화를 산출하였으며, XRR 분석을 동시에 수행하여 DLC 박막의 표면층, 벌크층 및 실리콘 기판과의 계면층에 대한 물성 변화를 정량적으로 규명하였다. Raman 스펙트럼의 I_D/I_G 변화로부터 예측한 기판전압의 변화에 따른 DLC 박막의 sp^3 분율 변화에 대한 정성적인 결과를 XPS의 C 1s 피크 스펙트럼으로부터 산출한 sp^3 분율의 정량적인 변화로부터 확인하였고, XPS 및 XRR 측정 결과로부터 DLC 박막의 벌크층, 표면층 및 실리콘과의 계면 영역의 물성변화를 평가하였다. 또한, Ar에 대한 DLC 박막의 각 층에서 산출된 식각율은 XRR 방법으로 산출된 막의 밀도 결과와 반비례 관계에 있음을 반영하며, TEM 측정 결과로부터 XRR에서 산출된 DLC 박막의 전체 두께가 실험값과 거의 일치하는 것을 확인하였다.

끝으로 본 연구를 통하여 XPS 및 XRR 측정 및 분석은 DLC 박막의 sp^3 분율에 대한 정량적인 산출 뿐 아니라 DLC 박막의 내부 구조 및 계면 해석에 있어서 매우 유용한 방법이 될 수 있음을 제안하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 한양대 전자재료 및 부품 연구센터의 2002년도 기본프로그램 연구비 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Lifshitz, "Hydrogen-free amorphous carbon films: correlation between growth conditions and properties", *Diamond Relat. Mater.*, vol. 5, pp. 388-400, 1996.
- [2] A. Grill, "Diamond-like carbon: state of the art", *Diamond Relat. Mater.*, vol. 8, pp. 428-434, 1999.
- [3] R. L. Boxman, V. Zhitomirskym B. Alterkop, E. Gidalevich, I. Beilis, M. Keidar, and S. Goldsmith, "Recent progress in filtered vacuum arc deposition", *Surf. Coat. Technol.*, vol. 86, pp. 243-253, 1996.
- [4] L. Zajickova, K. Veltruska, N. Tsud, and D. Franta, "XPS and ellipsometric study of DLC/silicon interface". *Vacuum*, vol. 61, pp. 269-273, 2001.
- [5] J. Kulik, Y. Lifshitz, G. D. Lempert, D. Marton, and J. W. Rabalais, "Electron energy-loss spectroscopy of mass-selected ion-beam-deposited diamond-like carbon", *J. Appl. Phys.*, vol. 76, no. 9, pp. 5063-5069, 1994.
- [6] F. L. Coffman, R. Cao, P. A. Pianetta, S. Kapoor, M. Kelly, and L. J. Terminello, "Near-edge x-ray absorption of carbon materials for determining bond hybridization in mixed sp^2/sp^3 bonded materials", *J. Appl. Phys.*, vol. 69, no. 4, pp. 568-570, 1996.
- [7] H. Ziegele, H. J. Scheibe, and B. Schultrich, "DLC and metallic nanometer multilayers deposited by laser-arc", *Surf. Coat. Technol.*, vol. 97, pp. 385-390, 1997.
- [8] J. Diaz, G. Paolicelli, S. Ferrer, F. Li, and J. S. Lannin, "Separation of the sp^3 and sp^2 components in the C 1s photoemission spectra of amorphous carbon films", *Phys. Rev. B*, vol. 54, no. 11, pp. 8064-8069, 1996.
- [9] P. Merel, M. Tabbal, M. Chaker, S. Moisa, and J. Margot, "Direct evaluation of the sp^3 content in diamond-like carbon films by XPS", *Appl. Surf. Sci.*, vol. 136, pp. 105-110, 1988.
- [10] Qing Zhang, S. F. Yoon, Rusil, J. Ahn, and H. Yang, "Study hydrogenated diamond-like carbon films using x-ray reflectivity", *J. Appl. Phys.*, vol. 86, no. 1, pp. 289-296, 1999.
- [11] 박창균, 엄현석, 서수형, 박진석, "거울형 자계구조를 갖는 진공여과 아크 증착법을 이용한 다이아몬드상 탄소막의 증착 및 물성분석", *대한전기학회 하계학술대회*, vol. C, pp. 1717-1719, 2000.
- [12] M. A. Tamor and W. C. Vassel, "Raman fingerprinting of amorphous carbon film", *J. Appl. Phys.*, vol. 76, no. 6, pp. 3823-3830, 1988.
- [13] B. K. Tay, X. Shi, H. S. Tan, H. S. Yang, and Z. Sun, "Raman studies of tetrahedral amorphous carbon films deposited by filtered cathodic vacuum arc", *Surf. Coat. Technol.*, vol. 105, pp. 155-158, 1998.
- [14] J. Robertson, "Deposition mechanism for promoting sp^3 bonding in diamond-like carbon", *Diamond Relat. Mater.*, vol. 7, pp. 984-989, 1993.
- [15] E. G. Gerstner, D. R. Mckenzie, M. K. Puchert, P. Y. Timbrell, and J. Zou, "Adherent carbon film deposition by cathodic arc with implantation", *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 13, pp. 406-411, 1995.
- [16] B. K. Tay, X. Shim H. S. Tan, and D. H. C. Chua, "Investigation of tetrahedral amorphous carbon films using x-ray photoelectron and Raman spectroscopy", *Surf. Interface Anal.*, vol. 28, pp. 231-234, 1999.
- [17] C. A. Lucas, T. D. Nguyen, and J. B. Kortright, "X-ray reflectivity measurements of the expansion of carbon films upon annealing", *Appl. Phys. Lett.*, vol.

59, no.17, pp. 2100-2102, 1991.

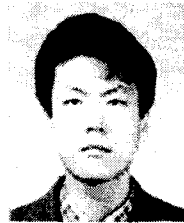
[18] L. S. Pan and D. R. Kania, "Diamond: electronic properties and applications", Kluwer Academic Publishers, pp. 378, 1995.

저 자 소 개



박창균(朴昶均)

1974년 10월 24일생. 1999년 한양대학교 공학대학 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한양대 대학원 전자전기제어계측공학과 박사과정
Tel : 031-400-4088
Fax : 031-419-3042
E-mail : ckpark@ihanyang.ac.kr



서수형(徐洙堃)

1971년 1월 1일생. 1993년 강원대 공과대학 재료공학과 졸업. 1995년 동 대학원 재료공학과 졸업(석사). 1995년~1997년 (주)영도산업 부설 영도기술연구소 연구원. 1999년 한양대학교 대학원 무기재료공학과(현 세라믹 공학과) 졸업(박사). 1998년~2002년 한양대학교 전자재료 및 부품연구센터 박사후 연구원. 현재 네오세미테크(주) 성장사업부 팀장
Tel : 031-400-4088
Fax : 031-419-3042
E-mail : jshseo@neosemitech.com



장석모(蔣錫謨)

1975년 4월 17일생. 2001년 한양대 공학대학 전기공학과 졸업. 2003년 한양대 대학원 전자전기제어계측공학과 졸업(석사). 현재 (주) 삼성전기에 근무
Tel : 031-400-4088
Fax : 031-419-3042
E-mail : your1003@ihanyang.ac.kr



박진식(朴珍奭)

1961년 9월 25일생. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993년~1995년 영국 Cambridge 대학 Research Fellow. 현재 한양대 공대 전자컴퓨터 공학부 부교수. 대한전기학회 국제위원 및 C 부문학회 이사. 한양대 전자재료 및 부품 연구센터(EM&C) 부소장
Tel : 031-400-5166
Fax : 031-419-3042
E-mail : jinsp@hanyang.ac.kr



엄현식(嚴玄錫)

1974년 7월 18일생. 1997년 한양대 공학대학 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~2002년 한국전자통신연구원 위촉 연구원. 현재 한양대 대학원 전기공학과 박사과정
Tel : 031-400-4088
Fax : 031-419-3042
E-mail : hsuhm@ihanyang.ac.kr