

FCVA 방법으로 증착된 DLC 박막의 열처리에 따른 구조적 물성 분석

論 文
52C-8-2

Effects of Thermal Treatment on Structural Properties of DLC Films Deposited by FCVA Method

金榮道* · 蔣錫謨** · 朴昶均*** · 嚴玄錫*** · 朴珍奭§

(Young-Do Kim · Seok-Mo Chang · Chang-Kyun Park · Hyun-Seok Uhm · Jin-Seok Park)

Abstract - Effects of thermal treatment on the structural properties of diamond-like carbon (DLC) films were examined. The DLC films were deposited by using a modified filtered cathodic vacuum arc (FCVA) deposition system and by varying the negative substrate bias voltage, deposition time, and nitrogen flow rate. Thermal treatment on DLC films was performed using a rapid thermal annealing (RTA) process at 600°C for 2min. Raman spectroscopy, x-ray photoemission spectroscopy (XPS), atomic force microscope (AFM), and surface profiler were used to characterize the I_D/I_G intensity ratio, sp^3 hybrid carbon fraction, internal stress, and surface roughness. It was found for all the deposited DLC films that the RTA-treatment results in the release of internal compressive stress, while at the same time it leads to the decrease of sp^3 fraction and the increase of I_D/I_G intensity ratio. It was also suggested that the thermal treatment effect on the structural property of DLC films strongly depends on the diamond-like nature (i.e., sp^3 fraction) of as-deposited film.

Key Words : DLC, FCVA, XPS, Raman 분광법

1. 서 론

다이아몬드상 탄소(diamond-like carbon, DLC) 박막은 비정질 고상 탄소 박막의 하나로 sp^3/sp^2 분율이 높아 다이아몬드에 가까운 높은 경도와 밀도를 가지며, 기판과의 접착력이 좋고, 박막의 투과성이나 굴절률 등의 광학적 특성 또한 우수하여 광학적 응용범위가 매우 넓은 박막 재료로 평가되고 있다. 특히 DLC 박막의 합성 기술 중 진공여과아크(filtered cathodic vacuum arc, FCVA) 증착법은 타 공정에 비해 이온화 에너지 및 이온화율이 높아 sp^3 함량이 매우 높은 DLC 박막을 제작할 수 있으며, 수소함유를 원천적으로 배제할 수 있을 뿐만 아니라 필요한 경우 인위적인 수소량의 제어가 가능하고, 박막 증착시 타 원소(질소, 붕소 등)의 첨가에 의한 도우핑이 비교적 용이하여 전자소자의 재료로서 그 응용범위가 확대되고 있다[1]. 그러나, FCVA방법을 이용하여 DLC 박막을 증착하는 경우, 일반적으로 DLC박막의 다양한 탄소 결합상 중에서 다이아몬드상(sp^3 phase) 결합의 분율이 높은 박막일수록 박막 내부의 응력이 강한것으로 알려져 있는데, 이와 같이 DLC 박막의 높은 내부응력(6~12 GPa)은 기판과 DLC 박막 경계면의 접착력 감소 및

증착 두께의 한계 뿐 아니라 타 물질과의 다층막 제작시 많은 어려움 등이 나타나 이는 결국 DLC 박막의 다양한 응용을 제한하는 요인이 된다. 따라서, 이러한 DLC 박막의 강한 내부응력을 완화하기 위하여 최근에는 일부 금속(Fe, Co 등)이나 Si를 탄소와 합성한 고상의 타겟을 이용하거나, 질소 혹은 붕소 등의 불순물을 첨가하여 DLC 박막을 증착한 경우 박막의 내부응력이 다소 감소할 수 있다는 연구 결과가 보고된 바 있으며, DLC 박막 증착 후 열처리를 함으로써 내부응력을 감소시키고자 하는 연구도 병행하여 진행되고 있다[2,3]. 그러나, 불순물을 첨가하거나 DLC 박막을 증착한 후 열처리 등을 수행한 경우, 내부응력의 변화와 동시에 박막내 탄소 결합상의 변화 등 다른 구조적 물성의 변화에 대한 체계적인 분석이 있어야 하는데 아직까지 이에 대한 충분한 연구가 부족한 실정이다. 특히, 열처리와 같이 박막 증착 후 후처리 실험을 수행하는 경우는, 박막을 증착하는데 사용되었던 여러 가지 증착 변수들의 조건에 따라 열처리 이전의 박막 물성이 각기 다르므로 열처리에 따른 박막의 물성 변화 현상은 증착 변수의 함수로 분석되어야 하는데, 이에 관한 연구 결과도 문헌에 거의 보고된 바 없다.

본 연구에서는 FCVA 증착법을 이용하여 기판전압, 증착 시간 및 질소 첨가량 등을 변화시키면서 DLC 박막을 증착한 후, 급속열처리(rapid thermal annealing, RTA) 장치를 이용하여 열처리를 수행하고, Raman spectroscopy, XPS(x-ray photoemission spectroscopy) 분석 등을 통하여 열처리 전·후 DLC 박막의 내부응력 변화 및 sp^3 분율, 표면 거칠기 등의 구조적 물성 변화를 분석하였다.

* 正 會 員 : 漢陽大 電子電氣制御計測工學科 碩士課程

** 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 電子電氣制御計測工學科 博士課程

§ 正 會 員 : 漢陽大 電子컴퓨터工學部 副教授·工博

接受日字 : 2002年 10月 23日

最終完了 : 2003年 6月 23日

2. 실험 방법

본 연구에서 DLC 박막의 증착에 사용된 FCVA 장치는 음극증발부, 아크 플라즈마의 수송 및 거대 입자(macroparticle)를 제거하기 위한 필터링(filtering)부와 전원 및 기체 공급부등 크게 3가지로 분류된다[4]. 특히 이온빔의 수송 효율을 극대화하기 위해 소스 전자석과 인출 전자석의 자극 방향이 동일한 거울형 자장 구조를 채택하였으며, 아크 스팟의 안정적인 식각거동을 위해 음극 주위에 영구자석을 사용하여 침점(cusp)형 자장구조를 갖도록하였다. 아크 플라즈마 발생시 방전전압 및 전류는 20~25V, 20A였고, 소스전자석, 인출전자석, 굽힘전자석 및 출구전자석에는 각각 1~3A, 4A, 3A 및 4A를 인가하였다. 초기 진공은 2×10^{-6} Torr 이하였고, 시편으로는 (100) P-type, 0.001~0.01Ωcm의 비저항을 갖는 Si 기판을 사용하였다. 습식 세정된 기판은 먼저 5×10^{-3} Torr에서 -500V의 기판전압을 인가하여 Ar으로 2분간 초기계면을 형성하고, 기판전압(0~-250V), 증착시간(5~20min), 질소 첨가량(0~6sccm)을 변화시키면서 DLC 박막을 증착하였다. 기판 전압과 질소첨가량 변화실험의 증착시간은 15분, 증착시간과 질소첨가량 변화실험의 기판전압은 -50V로 설정하였으며, 모든 조건에서 증착압력은 8.0×10^{-5} Torr 이하였다. 또한 증착된 DLC 박막을 RTA 장치를 이용하여 600℃에서 2분간 열처리를 한 후 황산(98%)으로 80℃에서 5분간 초음파세척을 수행하였다.

증착된 박막의 탄소 결합 구조분석은 triple Raman spectroscopy(Jobin Yvon T64000)를 이용하여 400~2400 cm^{-1} 범위에서 스펙트럼을 얻고, D-피크와 G-피크에 대한 상대적 강도비(intensity ratio, I_D/I_G)를 산출하였다. 일반적으로 DLC 박막의 Raman 스펙트럼의 피크강도는 측정된 피크를 2개의 Gaussian 함수로 분리 후 base line을 기준으로 분리된 피크의 높이를 계산하여 피크의 강도를 나타낸다. 피크의 높이를 이용하여 산출된 I_D/I_G 피크의 강도 비는 DLC 박막내 "graphitization"의 변화를 확인할 수 있는 지표이며, graphitization이 진행될수록 그 값은 증가하는 경향을 나타내므로[8], 이를 이용하여 DLC 박막의 물성변화를 평가하는 것이 일반적이다. Raman spectrum분석에 사용된 광원은 514.532nm 파장의 Ar 레이저이며, 측정시 레이저의 조사로 인한 열처리 효과를 피하기 위해 낮은 전력(3mW)으로 설정하였고, 장비의 분해능은 1.8cm^{-1} 이었다. DLC 박막의 화학적 결합 변화를 분석하기 위해 XPS(VG Scientific ESCALAB 200R)를 사용하였다. X-선 광원은 Al-K α (15kV, 20mA, 300W)를 사용하였고, 초기 진공은 5×10^{-10} Torr 이하였다. 또한, 광전 여기된 전자의 에너지는 CHA(concentric hemispheric analyzer)와 CAEM (constant analyzer energy mode) 방식을 통하여 검출하였다. XPS의 survey scan을 통하여 DLC 박막의 화학적 결합상태를 분석하였고, C1s 상태의 스펙트럼을 분해한 후, sp^3 분율을 산출하였다. DLC 박막의 두께는 FE-SEM(field emission scanning electron microscope, JSP-6330F, JEOL)을 이용하여 측정하였고, 박막의 표면 미세 구조 변화는 AFM(atomic force microscope, Park Instrument)의 sharpened-ML-cantilever를 사용하여 1Hz의 속도로 측정하였다. 내부용력의 변화는 surface profilometer(DEKTAK 3030)을 이용하여 박막

의 곡률 반경을 측정하고, Stoney식[4]을 적용하여 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

DLC 박막의 열처리 전, 후의 탄소 결합구조와 화학적 결합상태의 변화를 조사하기 위하여 Raman 및 XPS 분석을 수행하였다. 그림1은 기판전압(-50V 및 -250V), 증착시간(10min 및 15min), 질소첨가(6sccm) 등을 변화시키면서 증착한 DLC 박막의 Raman 스펙트럼 측정 결과를 나타낸 것이다. 일반적으로 DLC 박막의 Raman 스펙트럼은 그림1과 같이 1550cm^{-1} 부근의 피크를 중심으로 넓게 1350cm^{-1} 부

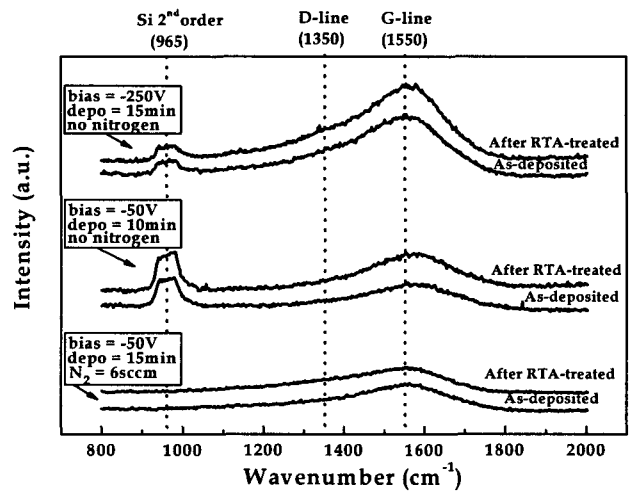


그림 1 열처리에 따른 DLC 박막의 Raman 스펙트럼
Fig. 1 The variation of Raman spectra of DLC films due to thermal treatment

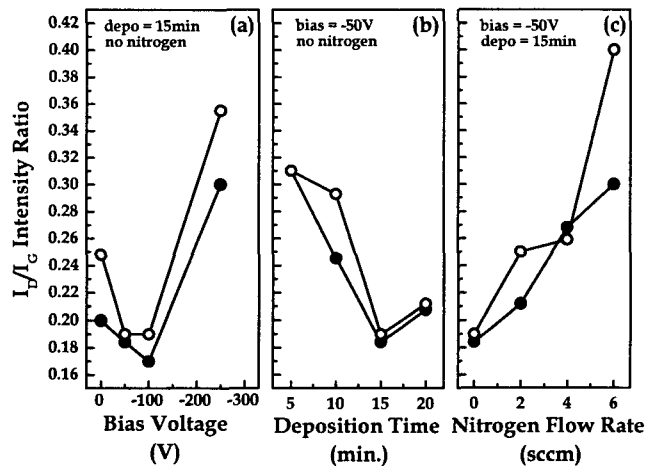


그림 2 열처리 전, 후의 DLC 박막의 증착조건별 I_D/I_G 강도 비의 변화 : (a) 기판전압, (b) 증착시간, (c) 질소첨가량 (●: 열처리 이전, ○: 열처리 이후)
Fig. 2 The variation of I_D/I_G intensity ratio of DLC films due to thermal treatment, as a function of (a) substrate bias voltage, (b) deposition time, and (c) nitrogen flow rate (●: as-deposited, ○: after RTA-treated)

근의 피크가 함께 나타난다. 1550cm^{-1} 에서 나타나는 피크는 E_{2g} zone center mode가 고려된 G-line에 해당하는 피크로 결정질 흑연의 특성 피크이며, 1350cm^{-1} 에서 나타나는 피크는 disorder-allowed zone edge mode와 관계된 D-line에 해당되는 피크이다[5]. 그리고 이 두 가지 피크는 증착조건과 박막의 물성에 따라 각 피크의 위치, 폭 그리고 두 피크의 상대적인 강도비(intensity ratio) 등과 연관성을 가지고 변화한다[6]. 그림1에 나타낸 Raman 스펙트럼을 Gaussian 함수를 이용하여 두 개의 피크로 분리한 후, 두 피크의 상대적인 강도비 I_D/I_G 에 대한 정량적인 산출 결과를 그림2에 정리하였다. 본 실험에 사용된 모든 박막들에 대하여 증착변수에 관계없이 열처리 이후에 1350cm^{-1} 부근의 D-피크에 대한 강도가 증가했음을 알 수 있다. 또한, Raman 스펙트럼에서 산출되는 I_D/I_G 강도비는 DLC 박막 내의 sp^3 분율과 일반적으로 서로 반비례하는 상관관계를 갖는다는 보고가 있었으며[7], 본 연구에서는 XPS 분석을 통하여 이를 규명하고자 하였다. 그림3은 그림1의 Raman 분석에 사용된 것과 동일한 박막들에 대한 XPS 스펙트럼 측정 결과를 나타낸 것으로서, 각 스펙트럼은 SiC(283.7eV), 흑연(284.4eV), 다이아몬드(285.2eV) 및 CO-contaminated(286.5eV) 피크들로 다시 분해할 수 있다. 이와 같이 분리된 스펙트럼 중에서 C1s 상태(state)에 대한 결과로부터 식(1)과[7] 같이 다이아몬드상(sp^3 phase) 피크와 흑연상(sp^2 phase) 피크의 면적을 이용하여 DLC 박막 내의 sp^3 분율을 산출하였으며, 이를 기판전압, 증착시간 및 질소첨가량의 함수로 정리하여 그림4에 나타내었다. 식(1)에서, D_{PA} 와 G_{PA} 는 각각 다이아몬드상과 흑연상의 피크 면적을 의미한다.

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

먼저, 그림4의 결과에서 기판전압, 증착시간 및 질소 첨가량 등에 따른 DLC 박막의 sp^3 분율의 변화 경향은 그림2에 나타낸 바 있는 I_D/I_G 강도비의 변화와 반비례 관계가 있다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 여기서 DLC 박막의 물성은 증착시 입사되는 탄소 이온의 에너지에 따라 달라지며, FCVA 방법 사용시 탄소 이온의 에너지는 기판전압에 의하여 결정된다. 그림2의 (a)와 그림4의 (a)의 결과를 살펴보면, 열처리에 관계없이 기판전압이 증가함에 따라 -100V 를 기준으로 I_D/I_G 강도비는 감소하였다가 다시 증가하고, 반대로 sp^3 분율은 증가하였다가 다시 감소하였음을 알 수 있다. 이는 박막 증착에 참여하는 탄소 이온이 박막 표면층을 침투하여 다이아몬드상 탄소 결합을 형성하는데 필요한 임계값이 될 때까지는 기판전압의 증가에 따라 막의 치밀도가 증가하고 sp^3 분율이 증가하지만, 그 이상의 에너지를 가지면 이온화의 잉여 에너지가 소위 thermal spike [9] 현상에 의해 DLC 박막 내부에 탄소의 흑연화(graphitization) 확률을 증가시켜 sp^3 결합이 감소되기 때문이다. 이러한 현상은 Robertson 모델[12]로 설명될 수 있다. 즉, 바이어스 전압의 증가는 탄소 이온이 갖는 에너지를 증진시키는데 탄소 이온이 박막 표면층을 침투할 때 필요한 문턱 값 이상의 이온화 에너지를 가지면 국부적인 'quenched-in'을 초래하여 박막의 밀도를 증가시킨다. 그러나 잉여 이온화 에너지는 밀도도

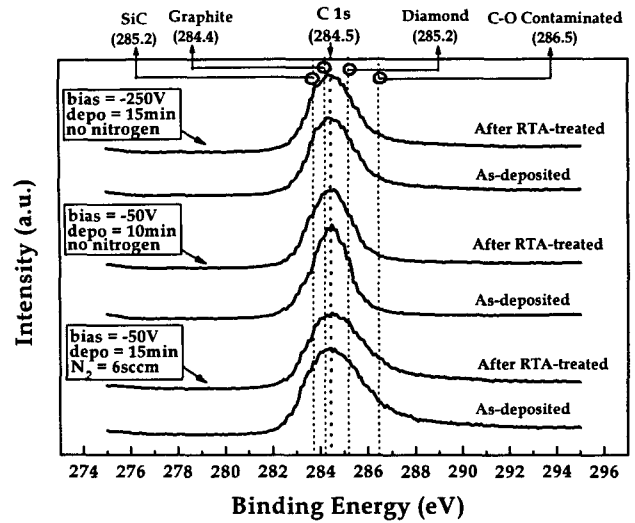


그림 3 열처리 전, 후의 DLC 박막의 XPS 스펙트럼 및 C 1s 피크의 변화

Fig. 3 Variations of XPS spectra and C1s peak due to thermal annealing

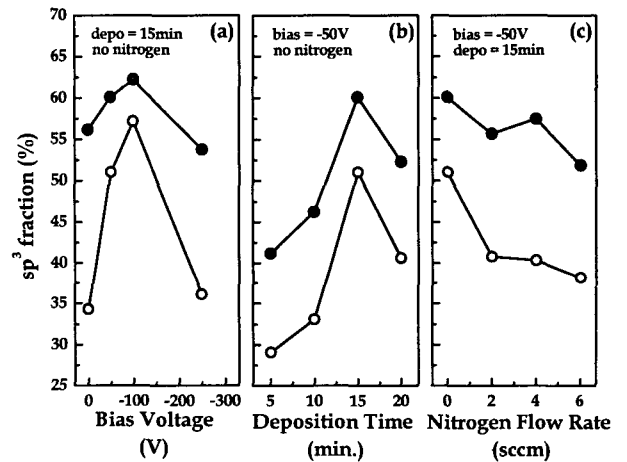


그림 4 열처리 전, 후의 DLC 박막의 증착조건별 박막내 sp^3 분율의 변화 : (a) 기판전압, (b) 증착시간, (c) 질소첨가량 (●: 열처리 이전, ○: 열처리 이후)

Fig. 4 The variation of sp^3 fraction due to thermal treatment, as a function of (a) substrate bias voltage, (b) deposition time, and (c) nitrogen flow rate (●: as-deposited, ○: after RTA-treated)

의 증분을 완화시키는 thermal spikes에 의해 소실된다. 이러한 과정이 계속되어 이온화 에너지의 증분으로 thermal spikes가 증가됨으로 인해 탄소의 "graphitization" 확률이 증가되고 sp^3 결합이 감소된다.

열처리를 수행한 후에 그림4의 결과에 나타낸 바와 같이 DLC 박막의 sp^3 분율이 증착변수들과 관계없이 모든 박막들에 대하여 감소하였음을 알 수 있는데, 이는 그림2에 제시한 바 있는 열처리에 따른 I_D/I_G 의 증가 현상과 역시 상관관계가 있는 바, 열처리에 의해 흑연상 원자의 이동도가 증가하게 되고 시간의 경과에 따라 흑연상 원자가 DLC 박막 표면 안으로 확산하면서 내부응력을 완화시켜 박막 내 흑연상

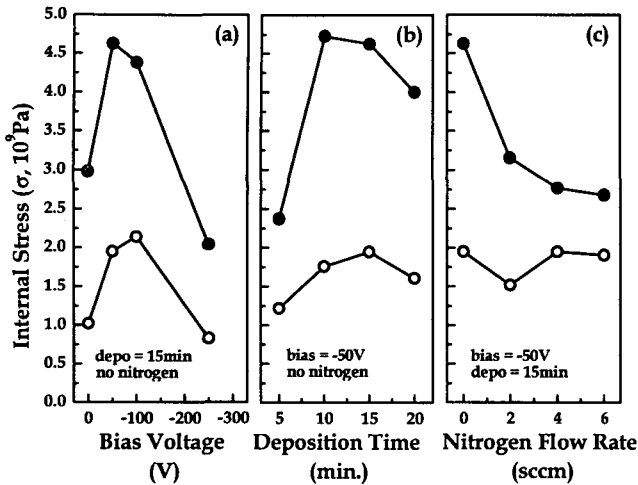


그림 5 열처리 전, 후의 DLC 박막의 증착조건별 내부응력의 변화 : (a) 기판전압, (b) 증착시간, (c)질소첨가량 (●: 열처리 이전, ○: 열처리 이후)

Fig. 5 The variation of internal stress due to thermal treatment, as a function of (a) substrate bias voltage, (b) deposition time, and (c) nitrogen flow rate(●: as-deposited, ○: after RTA-treated)

탄소 결합의 형성이 증가했기 때문이라 사료된다[11]. 특히, 열처리에 의한 DLC 박막의 sp^3 분율 감소 정도는 기판전압이 0, -250V 일 때 약 17~22% 정도로 상대적으로 크게 감소한 반면에, -50V와 -100V인 경우에는 약 5~9% 정도로 비교적 적게 감소하였는데, 그 이유는 -50V와 -100V에서 증착된 DLC 박막의 열처리 전 sp^3 결합비율이 0V와 -250V 보다 더 커서 보다 안정된 구조적 물성을 가지고 있었기 때문이라 사료된다. 그림2의 (b)와 그림4의 (b)에 나타난 증착시간에 따른 I_D/I_G 및 sp^3 분율의 열처리에 의한 변화에서도 증착시간이 너무 짧거나 길었던 박막들은 열처리 이전의 sp^3 분율이 상대적으로 작았으며 이러한 박막들은 열처리에 의한 구조적 물성의 변화가 더 크게 나타났다는 것을 알 수 있다. 또한, 그림1의 (c)에서 제시했던 바와 같이 질소 첨가량이 6sccm으로 상대적으로 많았던 DLC 박막의 경우는 다른 박막들에서와는 달리 $965cm^{-1}$ 부근에서 Si 기판의 second-order phonon scattering에[8] 의한 Raman 피크가 나타나지 않았으며, 그림2의 (c) 및 그림4의 (c)에 나타난 바와 같이 질소 함유량이 높을수록 열처리에 의한 I_D/I_G 의 증가폭이 현저히 크게 나타났음을 알 수 있다. 기존의 연구 결과에 의하면, FCVA 방법을 이용한 DLC 박막 증착시 주입된 질소 첨가 가스는 아크 플라즈마 내에서 비교적 쉽게 이온화되고, 이러한 N^+ 이온이 강한 반응성을 가지고 DLC 박막 내에 혼입될 수 있으며, DLC 박막내에 질소가 혼입되면 질소 원자 주위의 흑연화를 초래하여 박막내에 graphite-chain을 형성시켜 sp^2 cluster의 크기를 증가시켜 결국 sp^3 분율이 감소되는 현상이 나타난다고 알려져 있다[10]. 본 연구에서도 그림 4의 (c)에서 알 수 있듯이, 질소의 첨가량이 증가할수록 증착된 DLC 박막들의 sp^3 분율이 감소하는 것으로 나타났으며, 이에 따라 질소가 6sccm으로 첨가된 DLC 박막은 sp^2 결합상이 상대적으로 크기 때문에 514nm의 파장을 갖는 Raman 광원의 투과도가 낮았기 때문이라 사료된다. 또한,

열처리를 수행한 경우 질소가 첨가된 박막들의 경우 흑연상이 상대적으로 많이 포함되었기 때문에 열처리에 의한 I_D/I_G 및 sp^3 분율의 변화가 질소가 첨가되지 않은 경우의 박막에 비하여 상대적으로 더 크게 나타났다고 판단된다.

그림5에는 열처리 전, 후 DLC 박막의 내부응력 변화를 나타냈는데, 열처리가 수행된 후 모든 DLC 박막의 내부응력은 현저히 감소하는 경향이 나타났으며, 이는 앞에서 설명한 바와 같이 박막 내부의 열적 활성화로 인해 흑연상 원자가 박막 내부로 확산되어 내부응력이 완화되었기 때문이며, 이와 같은 내부응력의 감소 경향은 열처리에 따른 박막내 sp^3 결합상의 감소 경향과 일치하는 것이다[11]. 한편, AFM 분석 결과 DLC 박막의 표면 형상 및 표면 거칠기는 열처리 전 평균 RMS 값이 5.88Å이었으며, 열처리 후 평균 RMS 값은 5.82Å으로 나타났다. 즉, 박막 증착에 사용된 증착변수의 변화 범위내에서 표면 형상 및 거칠기의 변화가 없는 것으로 나타났다. 결국, FCVA 방법으로 증착된 DLC 박막을 RTA 장치 등을 이용하여 열처리하는 경우 내부응력은 어느 정도 효과적으로 완화할 수 있었으나, 이와 동시에 sp^3 결합이 감소하여 DLC 박막 고유의 다이아몬드적 성질이 상실될 수 있기 때문에, 증착된 DLC 박막의 다이아몬드적 성질을 어느 정도 유지하면서 내부응력을 완화시킬 수 있도록 열처리 온도, 시간 등의 세밀한 조절이 필요하다고 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 FCVA 증착법을 이용하여, 기판전압, 증착 시간 및 질소첨가량 등을 변화시키면서 증착한 DLC 박막에 대하여 RTA 장치를 이용한 열처리 실험을 수행한 후, 열처리 전, 후의 구조적 물성을 비교, 분석하였다. 특히, 열처리에 따른 박막의 내부응력 변화를 Raman 분석에 의한 I_D/I_G 강도 비 등의 변화 및 XPS 측정에 의한 sp^3 분율 등의 변화로 설명함으로써 기존에 정확하게 알려지지 않았던 박막의 구조적 물성 상호간의 상관관계 및 열처리 효과 등에 대한 실험적 결과를 제시하였다. 증착된 DLC 박막의 내부응력은 박막내 sp^3 탄소 결합상의 분율과 직접적으로 관계되며, 박막의 증착 조건별로 조사된 열처리 효과의 결과를 토대로 sp^3 탄소 결합상의 분율이 큰 박막일수록 열처리에 따른 구조적 물성의 변화가 상대적으로 크게 나타났다고 할 수 있다. 본 연구는 DLC 박막의 내부응력 완화의 방법으로 제안된 열처리 실험에서 발생할 수 있는 DLC 박막의 구조적 물성의 변화를 분석한 것으로서, 본 연구와 관련하여 현재 수행 중인 sp^2 -rich buffer층을 이용한 다층 구조의 DLC 박막 제작에 관한 연구를 비롯하여, 궁극적으로 DLC 박막의 다이아몬드적 성질을 유지하면서 내부응력을 줄일 수 있는 효과적인 방법 개발에 대한 연구를 지속적으로 수행한다면 DLC 박막의 응용 범위는 더욱 확대될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한양대 전자재료 및 부품 연구센터 (EM&C)의 2002년도 기본 프로그램 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] R. L. Boxman, V. Zhitomirskym B. Alterkop, E. Gidalevich, I. Beilis, M. Keidar, and S. Goldsmith, "Recent progress in filtered vacuum arc deposition", J. Surf. Coat. Technol, 86, pp.243-253, 1996
- [2] J. S. Chen, S.P. Lau, G.Y. Chen, Z. Sun, Y.J. Li, B.K. Tay, J.W. Chai, "Deposition of iron containing amorphous carbon films by filtered cathodic vacuum arc technique", Diamond Relat. Mater., 10, pp.2018-2023, 2001
- [3] B.K. Tay, "Stress relief of tetrahedral amorphous carbon films by postdeposition thermal annealing", J. Surf. Coat. Technol., 120, pp.448-452, 1999
- [4] 박창균, 엄현석, 서수형, 박진석, "거울형 자계구조를 갖는 진공여과 아크증착법을 이용한 다이아몬드상 탄소 박막의 증착 및 물성분석", 대한전기학회 하계학술대회, C권, pp.1717-1719, 2000
- [5] L.S Pan and D.R Kania, "Diamond: Electronic properties and applications", Kluwer Academic Publishers, pp.201, 1995
- [6] B.K. Tay, S. Xu, H.S. Tan, L. Zhang, Y.Q. Tu, "Properties of carbon ion deposited tetrahedral amorphous carbon films as a function of ion energy", J. Appl. Phys. 79(9), pp.7234-7240, 1996
- [7] E. Liu, X. Shi, B.K. Tay, L.K. Cheah, H.S. Tan, J.R. Shi, Z. Sun, "Micro-Raman spectroscopic analysis of tetrahedral amorphous carbon films deposited under varying conditions", J. Appl. Phys., 86(11), pp.6078-6083, 1999
- [8] B.K. Tay, X. Shi, H.S. Yang, and Z. Sun, "Raman studies of tetrahedral amorphous carbon films deposited by filtered cathodic vacuum arc", Surf. Coat. Technol., 105, pp.155-158, 1998
- [9] B.K. Tay, X. Shi, H.S. Tan, and D.H.C Chua, "Investigation of Tetrahedral Amorphous Carbon Films Using X-ray Photoelectron and Raman Spectroscopy", Surf. Interface Anal., 28, pp.231-234, 1999
- [10] J. Robertson, S.R.P. Silva, G.A.J. Amaratunga, B. Rafferty, L.M. Brown, J. Schwan, D.F. Franceschini, G. Mariotto, "Nitrogen modification of hydrogenated amorphous carbon films", Diamond Relat. Mater., 8(6), pp.2626-2634, 1997
- [11] X. Shi, H. Fu, J.R. Shi, L.K. Cheah, B.K. Tay, P. Hui, "Electronic transport properties of nitrogen doped amorphous carbon films deposited filtered cathodic vacuum arc technique", J. Phys. Cond. Matter, 10, pp.9293-9302, 1998
- [12] J. Robertson, "Deposition mechanisms for promoting sp³ bonding in diamond-like carbon", Diamond and Relat. Mater., 2, pp.984-989, 1993

저 자 소 개



김 영 도 (金 榮 道)

1976년 9월 9일생. 2002년 한양대 공학대학 전기공학과 졸업. 현재 한양대 대학원 전자전기제어계측공학과 석사과정
Tel : 031-400-4088, Fax : 031-419-3042
E-mail : ydkim@ihanyang.ac.kr



장 석 모 (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



박 창 균 (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



엄 현 석 (嚴 玄 錫)

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



박 진 석 (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