

마이크로웨이브 플라즈마 화학기상증착에 의한 다이아몬드 박막의 성장 관찰을 위한 분광 Ellipsometry의 이용

홍병유

성균관대학교 전기·전자 및 컴퓨터 공학부, 수원, 440-743

The use of spectroscopic Ellipsometry for the observation of diamond thin film growth by microwave plasma chemical vapor deposition

Byungyou Hong

*School of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746,
Korea*

요약 화학기상증착 방법에 의한 다결정 다이아몬드 박막 성장을 위한 공정 가운데 가장 많이 사용되는 기법중의 하나가 바로 플라즈마에 의한 방법이다. 특히 플라즈마 화학기상증착(Plasma-Enhanced CVD)기술에 의한 다이아몬드 박막응용은 그 공정에 대한 세부 조정을 통하여 더욱 향상시킬 수 있다. 다이아몬드 박막 증착의 경우 중요 변수들은 다이아몬드 필름이 증착되는 기판(substrate)의 온도, CH_4/H_2 가스 비율, 전체 가스 압력 및 가스 excitation에너지 등이다. 분광 ellipsometry는 다이아몬드 필름 증착과 관련된 극단적인 환경에서도 물리적인 접촉이나 만들어지는 샘플의 손상없이도 필름자체의 여러 성질뿐만 아니라 기초 샘플의 온도까지도 결정할 수 있는 좋은 방법이다. 이러한 장점들을 이용하여 양질의 다이아몬드 박막을 성장시키기 위한 조건과 그에 따른 박막 특성을 얻기 위하여 분광 ellipsometry의 사용과 해석이 소개된다. 그리고, 분광 ellipsometry를 이용, 플라즈마 화학기상증착 기술에 의하여 성장되는 다이아몬드 박막으로부터 나타나는 중요 변수들이 결정될 것이며 이러한 변수들은 필름의 두께, 필름에 포함되는 void 및 비다이아몬드의 체적비와, 그들의 시간에 따른 변화 등을 포함한다. 그리고 샘플이 원하는 두께까지 성장된 후에 라만 분광기로 측정되어 다이아몬드 성분을 확인한다.

Abstract The plasma chemical vapor deposition is one of the most utilized techniques for the diamond growth. As the applications of diamond thin films prepared by plasma chemical vapor deposition(CVD) techniques become more demanding, improved fine-tuning and control of the process are required. The important parameters in diamond film deposition include the substrate temperature, CH_4/H_2 gas flow ratio, total gas pressure, and gas excitation power. With the spectroscopic ellipsometry, the substrate temperature as well as the various parameters of the film can be determined without the physical contact and the destructiveness under the extreme environment associated with the diamond film deposition. It is introduced how the real-time spectroscopic ellipsometry is used and the data are analyzed with the view of getting the growth condition and the accompanied features for a good quality of diamond films. And it is determined the important parameters during the diamond film growth, which include the final sample will be measured with Raman spectroscopy to confirm the diamond component included in the film.

1. 서 론

다이아몬드는 그 물질의 단단함, 높은 열전도율, 전자의 이동성, 아주 좋은 고주파 투과성(transparency), 그리고 탁월한 반도체 성질등 기술적으로나 과학적으로, 자연에서 찾을 수 있는 아주 귀중한 물질중의 하나임이 오래 전부터 알려져 왔다. 그러나 자연에서 발견되는 다이아몬드는 그 양이 한정되어 있고 그 값이 아주 비싸기 때문에 과학자들은 자연산 다이아몬드와 동등한 성질을 갖는 인공다이아몬드를 만들기 위해 오래 전부터 많은 연구를 거듭해 온 결과, 1797년 다이아몬드가 탄소 동소체라는 것이 발견된 이래, 1950년대에 고온고압에 의한 공정의 발달과 함께 스웨덴, 미국 및 소련 등을 비롯한 여러 나라에서 많은 연구를 해오고 있으며 훌륭한 연구성과들이 발표되었다. 그 결과, 오늘날 사용되고 있는 저온저압에서의 다이아몬드 공정[1] 개발에 이르기까지 되었다.

다이아몬드는 보오링과 드릴링들과 같은 작업을 위한 여러 공구표면에 입혀져 수명연

장에 큰 역할을 해오고 있을 뿐만 아니라 고주파 음을 위한 스피커의 진동판 코팅, heat sinks, 광 windows 및 비디오 헤드표면의 코팅등 다양한 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 특히 오늘날은 평면 디스플레이를 위한 유망한 물질로서 광범위한 연구가 이루어지고 있다. 더불어 다양한 화학기상증착(Chemical Vapor Deposition; CVD) 방법에 의한 다결정 다이아몬드 박막의 생성이 가능하다는 것이 발견됨으로써 다이아몬드에 대한 세계적 관심이 더욱 고조되어 가고 있다.

화학기상증착 방법에 의한 다결정 다이아몬드 박막의 공정 가운데 가장 많이 사용되는 기술중의 하나가 바로 플라즈마에 의한 방법이다[2,3]. 플라즈마 화학기상증착 기술에 의한 다이아몬드 박막응용이 더욱 요구되면서 박막 성장에 대한 정확한 관찰을 필요로 한다. 분광 ellipsometry는 다이아몬드 박막이 성장되는 환경하에서도 필름자체의 여러 성질뿐만 아니라 기초 샘플의 온도까지도 결정할 수 있는 훌륭한 방법이다[4].

본 연구를 통하여 플라즈마 화학기상증착

에 의한 다이아몬드 필름이 성장하면서 나타나는 여러 중요한 변수들이 실시간 분광 ellipsometry[5,6]를 이용하여 결정될 수 있다는 것을 보임으로써 다이아몬드 박막의 특성을 측정하는 또 다른 방법을 제시한다. 또한 분광 ellipsometry는 비단 다이아몬드 뿐만 아니라 그 밖의 여러 재료에 이용될 수 있으므로 어느 한 물질에 국한되는 제약이 없이 여러분야에서 사용될 수 있다.

2. 실험 방법

분광 ellipsometry는 Fig. 1에서 보여지는 것처럼 광원에서 방출되는 빛이 회전 편광소자(polarizer)를 통해 특정 방향으로 편광되고 편광이 샘플에서 반사되어 나와 고정 편광소자를 통해 탐지기로 들어간다. 이 탐지기는 1024개의 실리콘 발광 다이오우드로 구성되어 있어 그레이팅에 의해 분광되는 빛이 각각의 대응되는 실리콘 발광 다이오드상에 입사되어 탐지기 조정장치(detector controller)에 의해 컴퓨터로 전달, 저장된다.

다이아몬드 필름은 마이크로웨이브를 이용한 플라즈마 화학기상증착 기술에 의해 성장하게 된다. Mechanical 펌프에 의해 소개되는 chamber안의 일정한 압력을 유지하기 위해 배기밸브 조절기(exhaust valve controller)가 사용되며, 플라즈마는 2.45 GHz 마그네트론을 구동시키는 전원장치(power supply)에 의해 발생된다. 마이크로웨이브 에너지는 웨이브가이드를 따라 전달되고 튜너의 조절을 통하여, 반사되는 에너지가 최소(0~1 W)가 되도록 한다. 반응가스인 메탄과 수소는 chamber의 상단으로부터 유입되며, chamber의 상부는 수정자로 된 viewport가 있어서 광pyrometer를 이용해 기판의 온도를 측정할

수 있다. 또한 기판 지지대 밑에 thermometer가 부착되어 있어 기판의 온도를 근사적으로 알 수 있다.

다이아몬드 박막 성장에 대한 연구를 위해 우선 실리콘 샘플이 미세한 ($<0.25 \mu\text{m}$) 다이아몬드가루로 문질러진다. 이때 세심한 주의가 필요하며 다음과 같은 성질을 얻는데 매우 중요한 역할을 한다: 1) 초기 성장 단계에서의 고밀도의 핵형성, 2) 후기 성장 단계에서의 박막의 매끄러운 표면, 3) 거시적으로 균일한 필름. 다음순서로 다이아몬드가루로 처리된 기판이 샘플 지지대위에 놓이고, 일정한 압력 (7 torr)과 온도(800°C)로 유지되는 chamber안에 수소 가스가 주입되어 플라즈마가 발생된다(마이크로웨이브 전력은 500 W). 그 다음에 다이아몬드를 구성하는 탄소의 공급을 위해 메탄 가스를 주입하며 이때 플라즈마가 꺼지지 않도록 주의하여야 한다. 메탄 가스의 주입과 동시에 ellipsome

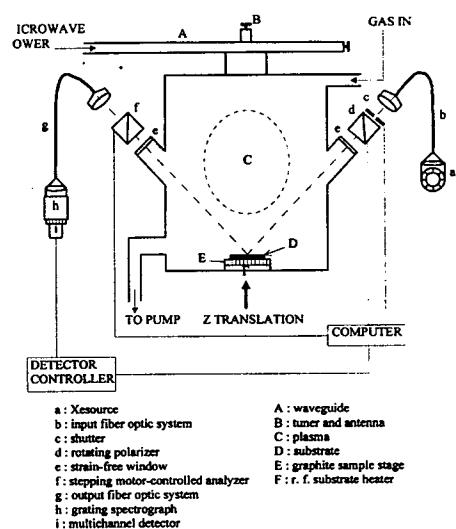


Fig. 1. Deposition system and multichannel spectroscopic ellipsometer employed to monitor microwave plasma-enhanced CVD of nanocrystalline diamond thin films in real time.

try의 데이터 측정이 시작된다($t=0$ 를 정의 한다). 따라서 다이아몬드 박막의 성장과 함께 분광 ellipsometry의 데이터 (Ψ , Δ)도 동시에 얻어지며 이렇게 해서 얻어진 데이터들은 실험이 완료된 후, 별도의 자체 제작용 소프트웨어를 사용해 컴퓨터 해석을 통해 필요로하는 정보를 추출한다.

Ellipsometry 데이터로부터 다이아몬드 필름의 성장과정을 지켜볼 수 있으며 기본적으로 박막의 두께, 핵형성과 grain의 합체와 같은 미세구조 (microstructure)의 전개과정 등을 추출할 수 있으며, 또한 그 과정 속에서 순수 다이아몬드 물질(sp^3 Carbon)과 함께 전개되는 비다이아몬드 물질(sp^2 Carbon; sp^2 C)이 양적으로 그리고 광학적으로 분리될 수 있다. 이러한 정보들을 사용하여 핵의 밀도(nucleation density), 표면의 거친 정도(surface roughness), 성장 속도 및 합성물질내의 미확인 물질의 광학적 특성 등을 관찰할 수 있다. Fig. 1은 다이아몬드 박막 성장을 위해 사용된 마이크로웨이브 플라즈마 화학기상증착 시스템과 ellipsometry의 각 성분을 보여준다.

기판에 증착된 다이아몬드 박막은 ellipsometry 데이터의 신뢰도를 높이기 위하여 다이아몬드 성분 및 비다이아몬드 성분을 검출하는데 가장 많이 사용되고 있는 라만 분광기를 이용해 관찰, 비교되었다. 일반적으로, 다이아몬드의 경우 1332 cm^{-1} 에서 라만 피크가 검출되고, 비다이아몬드가 존재할 경우 1500 cm^{-1} 부근에서 광범위한 밴드가 형성되는 것으로 보고되고 있다[7,8].

3. 실험 결과 및 해석

Atomic force microscopy (AFM)을 이용해,

다이아몬드 가루로 사전 처리된 기판의 이미지를 관찰해 보면 큰 scratch들 ($2000\text{ \AA} \times 20\text{ \AA}$) 사이의 seed된 기판은 비교적 매끄러운 면을 보여주며 roughness의 자승 평균 평방근값은 약 12 \AA 이다. 또한 다이아몬드 seed된 기판이 ex situ 분광 ellipsometry로 관찰되었다. Fig. 2-1과 Fig. 2-2는 최적의 모델과 함께 실온에서 관찰된 실험으로부터의 pseudo 유전함수(dielectric function)를 보여준다. Fig. 2-2에서 주어지는 as-seeded 기판상에서 수집된 ex situ 분광 ellipsometry 데이터에 대한 모델링은 기판 표면이 다이아몬드 가루로 문질러짐으로써 비결정화되는 것을 알 수 있다.

데이터 해석은 광자 에너지와 무관한 물질의 두께와 체적비율을 추출하기 위해서 Bruggeman의 effective medium approximation (EMA) least-squares regression analysis (LRA)[9]를 사용한다. EMA는 합성물질들[예:(다이아몬드)+(sp²C)+(void)]의 유전함수를 결정하기 위하여 각 성분의 유전함수와 그들의 체적비율을 사용한다.

Fig. 3은 박막 두께가 2140 \AA 까지 성장하는 동안 관찰되는 전형적인 ellipsometry 데이터를 보여준다. 다이아몬드 박막 성장을 위해 사용된 반응 가스양은 1 sccm 의 메탄과 99 sccm 의 수소이며 $[\text{CH}_4]/([\text{CH}_4]+[\text{H}_2])$ 비율은 0.01이었다. 또한, thermocouple이 가리키는 온도는 800°C (ellipsometry로 측정된 실제 기판 표면의 온도는 같은 조건하에서 785°C 였다.)이고, 전체 압력은 7 torr로 유지되었으며 플라즈마 전력은 500 W였다. Fig. 3에 보여지는 스펙트라는 pseudo 유전함수의 형태로 나타나고 있고 다음의 식을 사용하여 ellipsometry 데이터 (Ψ , Δ)로부터 계산된다.

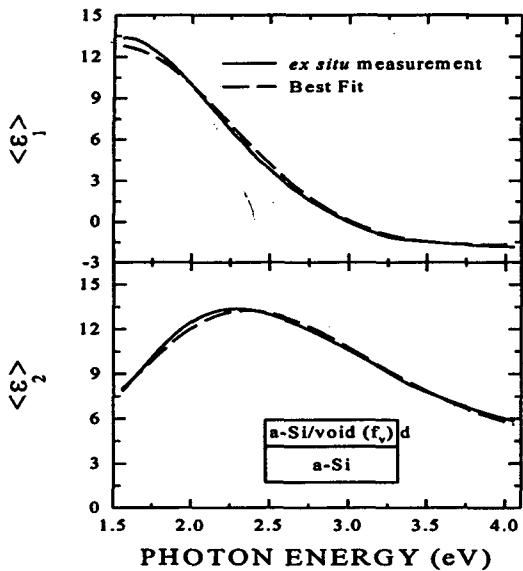


Fig. 2-1. Ex situ spectroscopic ellipsometry data for the diamond seeded substrate at room temperature along with the best fit calculated result. The layer thickness d is 152 Å and the void volume fraction f_v is 0.66.

$$\langle \epsilon \rangle = \epsilon_a \sin^2 \theta [1 + \tan^2 \theta \{ (1 - \rho) / (1 + \rho) \}^2]$$

여기서 ϵ_a 는 샘플 주위의 공기 유전율이고, θ 는 빛의 입사각, 그리고 $\rho = (\tan \Psi) \cdot \exp(i\Delta)$ 이다. Fig. 3의 데이터의 경우 시간에 대한 127쌍의 스펙트럼과 광자에너지를 나타내며 스펙트럼당 111개의 데이터점들로 구성되어 있다.

Fig. 4는 LRA로부터의 여러 변수들의 변화를 나타내는 것으로 다이아몬드 박막의 미세구조 상태를 시간에 대한 함수로서 보여준다. 이 경우 박막 성장의 초기단계에서 필름은 시간에 따라 크기가 증가하는 고립된 다이아몬드 핵들로 구성되어 있다고 생각된다. 이 단계에서 불연속적인 다이아몬드 필름에 대한 광학적 모델은 다이아몬드, sp^2C , 및 void 등이

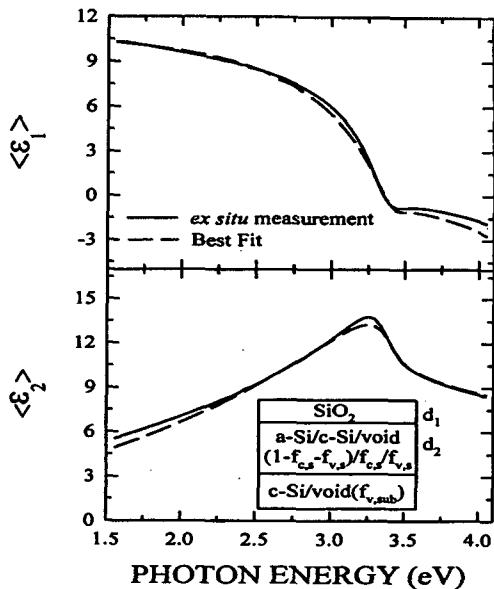


Fig. 2-2. Ex situ spectroscopic ellipsometry data for a diamond-seeded substrate measured at room temperature after annealing to the deposition temperature of 785 °C. Also shown is the best fit to the data. LRA indicates that d_1 is 66 Å, d_2 is 118 Å, the void volume fraction in the substrate $f_{v,sub}$ is 0.06, and the void and c-Si volume fraction in the surface roughness layer $f_{v,s}$ and $f_{c,s}$ are 0.44 and 0.41, respectively.

혼합되어 하나의 층을 형성하고 있으며 계속되는 성장과 함께 다이아몬드 핵들이 서로 합쳐져 결합되고 연속적인 필름을 형성하게 된다. 따라서, 핵의 합체 이후의 성장을 묘사하기 위해 두층으로 이루어진 광학적 모델이 발달하게 된다. 여기서 각 층은 다이아몬드, sp^2C 및 void 등으로 구성되어 있으며 표면층은 표면의 거친 정도를 나타낸다.

한 층을 사용하는 모델과 두 개의 층을 사용하는 모델을 나누는 분기점은 모델링시 나타나는 세가지의 현상에 의해 구분된다.

- 1) 단층만이 사용될 때 void 체적 비율이

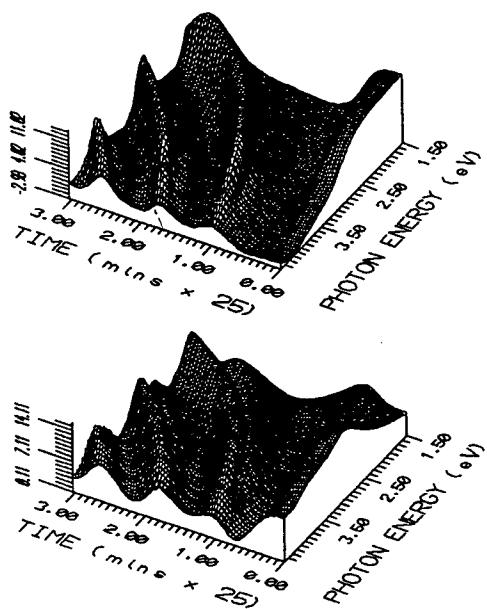


Fig. 3. Typical RTSE data collected during diamond film growth, shown in the form of the pseudo-dielectric function: real part, $\langle \epsilon_1 \rangle$ (top) and imaginary part, $\langle \epsilon_2 \rangle$.

시간에 따라 증가하면서 ~0.5아래로 강하된다.(사각형의 grid상에 놓여있는 반구에 대한 void 체적비율은 0.48이 됨을 참조하라.)

2) 최적의 모델링에 대한 척도를 나타내는 unbiasd estimator는 단층 모델이 사용될 경우 어느 순간 잠자기 큰 값으로 증가한다. 이것은 Fig. 4에서 보여지는 데이터의 해석에 대해 Fig. 5에 보여진다.

3) 두 층을 사용한 모델의 경우 bulk층의 두께는 시간이 감소함에 따라 0으로 접근한다.

따라서 Fig. 4와 Fig. 5에서 15분을 기준으로 이보다 작을 때 단층으로 이루어진 모델이 사용되고 그 이후에 두 개의 층으로 이루어진 모델이 사용된다.

핵이 형성되는 층과 bulk층의 두께가 극히 얇을 때는 필름의 성분을 추출하기가 어려운

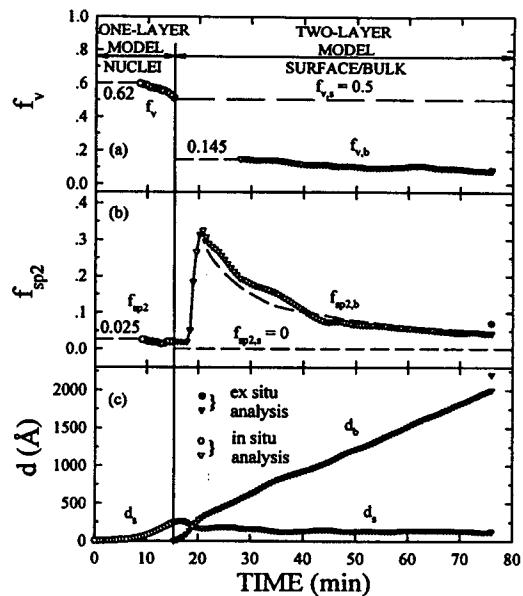


Fig. 4. Evolution of the microstructure during MPECVD diamond film growth, deduced from an analysis of real time spectroscopic ellipsometry data.

데 이는 본 연구에 사용된 분광 ellipsometry의 민감도에 대한 척도가 되는 점으로 $sp^2 C$ 에 대한 향상된 유전함수를 통해 더 나은 결과를 얻을 수 있으리라 기대된다. 그러나, 적절한 $sp^2 C$ 유전함수는 $sp^2 C$ cluster의 크기에 민감하게 반응하고 다이아몬드 박막의 전개단계와 성장 조건에 의존하는 것으로 여겨진다. 어느 조건하에서도, 상대적인 sp^2C 양은 60 Å 만큼의 얇은 필름에서도 아주 정확하게 결정될 수 있으며, 또한 void양도 50 Å(단층을 이용한 모델의 경우)과 500 Å(두 층을 이용한 모델의 경우)만큼 얇은 필름에 대해 결정될 수 있다. 이러한 민감도는 Fig. 4안의 점선을 설명하며, 그 점선들은 각 성분을 나타내는 고정된 변수값에 대응한다. 단층을 사용한 영역내에서, 핵의 높이가 50 Å보다 작은 8분내의 시간동안 $sp^2 C$ 과 void 체적

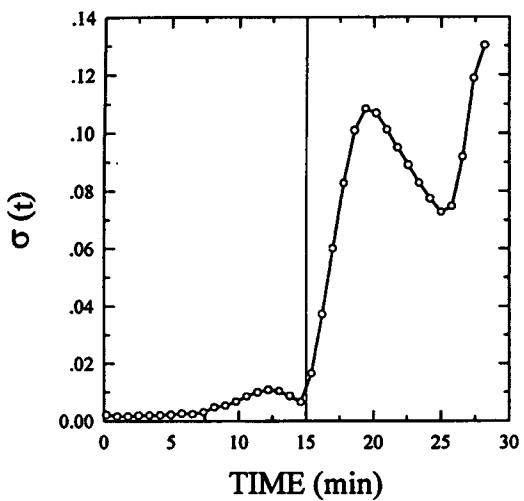


Fig. 5. Unbiased estimator of the mean square deviation obtained in a least-squares regression analysis of spectroscopic ellipsometry data collected during the deposition of Fig. 4.

비율은 $8 < t < 15$ 분 동안에 관찰되는 결과들과의 연속성을 갖기위해서 각각 0.025와 0.62로 고정된다. $t < 27$ 분 인 두 층을 사용한 영역안에서 bulk층안의 void비율은 27분 이후의 결과들과의 연속성을 가정하여 0.15로 고정된다.

단층을 이용한 영역으로부터 시작하여 이러한 데이터들에 대한 물리적인 해석은 다음과 같다. 처음 8분 동안은 성장속도가 매우 느리지만 (평균 4.9 \AA/min) induction시간이 없다. 7분이 더 경과한후에 성장속도는 27 \AA/min 으로 증가한다. 이 시간동안, $\text{sp}^2 \text{ C}$ 체적비율은 0.03의 비교적 일정한 값을 유지한다. 이 성분은 고립된 다이아몬드 grain내의 defect를 반영한다. 한편, void 체적 비율은 0.62로부터 0.5로 감소하며 이는 입자들의 크기가 증가하면서 서로 접촉을 하게되며 결국 두 층을 사용하는 영역으로 접근한다는 것을 의미한다. 이러한 특성들은 Fig. 6에서 강조

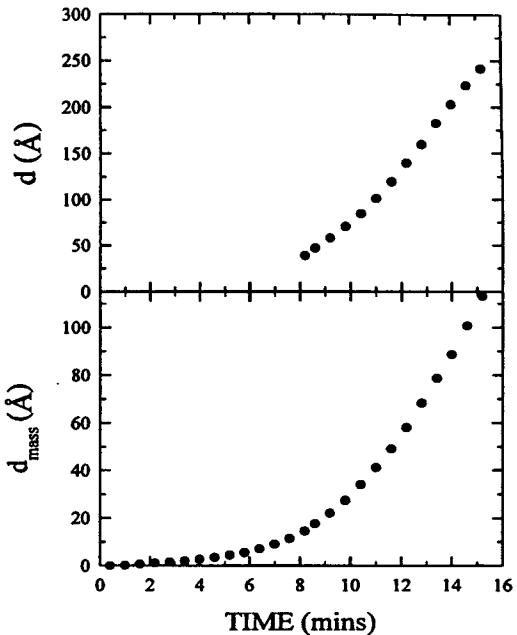


Fig. 6. The physical thickness for $8 < t < 15$ min and the diamond mass thickness for $0 < t < 15$ min as a function of time during diamond deposition.

되고 $8 < t < 15$ 분 동안의 실제 두께와 $0 < t < 15$ 분 동안의 다이아몬드의 mass thickness를 보여준다. 만약 입자들이 서로 접촉되어 있을 때 사각 grid상에 놓여있는 반구로서 가정된다면 핵 중심간의 평균 간격과 핵 밀도는 각각 480 \AA , 그리고 $4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 로 추산된다.

입자들이 접촉을 한후에 표면층과 bulk층의 두께는 명백한 경향을 보여준다. 처음, 표면층의 두께는 합체과정에 의해 감소하며 결과적으로, bulk층의 성장 초기에 270 \AA 였던 표면층이 125 \AA 의 안정된 값으로 떨어지는 표면을 고르게하는 과정이 관찰된다. 처음에 bulk층의 두께는 합체가 일어나는 초기에 갑작스럽게 증가하지만 그후, 시간에 따라 31 \AA/min 의 일정한 비율로 증가한다.

$\text{sp}^2 \text{ C}$ 의 체적비율은 한 층을 이용한 영역에서 비교적 작고 일정한 값을 유지한다. 그러

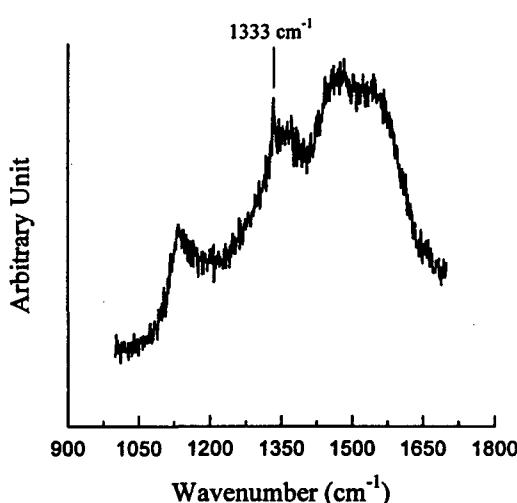


Fig. 7. First-order Raman spectrum of a microwave plasma CVD diamond film.

나 합체가 일어나는 영역에서 sp^2 C은 처음 300 Å의 bulk층이 형성되면서 빠른 증가를 보여준다. 그러한 영향은 합체동안 접촉을 하는 grain들 사이의 경계지역에서 defect의 형성에 관여된다. $f_{sp_2,b}$ 의 계속적인 감소가 관찰되고 이러한 감소는 축적되는 bulk층의 sp^2 C의 평균값의 감소에 의한다. 그래서, sp^2 C 체적비율의 감소는 필름내의 sp^2 C의 필름 두께에 대한 종속성을 반영한다. 합체가 일어나는 초기단계에 이웃하고 있는 grain들의 내부 표면은 플라즈마로부터 차단되어 있다. 이러한 차단은 플라즈마로부터의 수소원 자들의 유동을 감소시키고 defect 형성을 증진 시킨다. 필름이 합체되고 표면이 고르게 된 후에 플라즈마는 직접 표면상에 힘을 발휘하게 되고 완전히 합체된 필름위의 sp^2 C의 비율을 감소시키게 된다.

약 2140 Å의 두께까지 성장된 필름은 다이아몬드 성분의 존재를 확인하기 위하여 마이크로 라만 분광기를 사용하여 관찰되었다.

Fig. 7은 측정된 다이아몬드 phase의 라만 스

펙트라를 보여준다. 1333 cm⁻¹에서 관찰되는 피크는 다이아몬드 phase의 존재를 지시하며 1500 cm⁻¹에서의 넓은 영역의 피크는 sp^2 C의 존재를 나타낸다. 1140 cm⁻¹에서의 부가적인 특성은 disordered sp^3 C에 의해 나타난다고 제안되어진다[7]. 다이아몬드 phase보다 더 높은 주파수에 위치한 ~1355 cm⁻¹에서 관찰되는 또 다른 피크는 microcrystalline graphite에 의한다고 알려져있다[7,8].

4. 결 론

본 연구에서 마이크로웨이브 플라즈마 화학기상증착 방법에 의해 만들어진 다이아몬드 박막은 1 %의 메탄가스와 99 %의 수소가스를 이용, 800 °C의 기판온도, 7 torr의 압력, 그리고 500 W의 마이크로웨이브 파워 등의 조건하에서 증착되었으며 분광 ellipsometry를 이용하여 성장되는 과정을 관찰하였다. 약 2140 Å의 두께를 갖는 마지막 필름을 라만 분광기로 측정, 박막내의 다이아몬드 성분의 존재를 확인했다. 분광 ellipsometry로 관찰된 데이터를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 핵은 250~300 Å의 두께에서 서로 접촉한다.
- 2) 반구의 형태를 갖는 핵을 가정할 시 $4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 의 핵 밀도를 보여준다.
- 3) 약 500 Å의 bulk층내에 묶이는 void 체적비율은 0.15이다.
- 4) 핵의 형성단계에서 만들어지는 입자들은 grain내의 defect를 반영하는 극히 적은 양의 sp^2 C을 포함한다.
- 5) 합체동안 많은 양(500 Å의 필름에 대해 ~0.2)의 sp^2 C이 grain의 경계면에 묶인다.

분광 ellipsometry를 이용하여 다이아몬드

박막이 성장하는 동안 관찰되어 지고 이로부터 박막의 성격을 알 수 있다. 본 연구에서 얻어지는 박막의 특성을 나타내는 여러 변수들은 양질의 다이아몬드 박막을 얻는데 사용될 수 있으며 그 동안 대부분의 sp^2 C이 기판과 접하고 있는 grain들의 경계면에 한정되어 있다는 것이 거론되어 왔지만 구체적인 실험 결과가 제시되지 않았다는 점에서 분광 ellipsometry를 이용하는 한 장점을 제시하고 있다.

참 고 문 헌

- [1] J.-I. Suzuki H. Kawarada, K.-S. Mar, J. Wei, Y. Yokota and A. Hiraki, Japanese Journal of Applied Physics 28(2) (1989) L281.
- [2] C.-P. Chang, D.L. Flamm, D.E. Ibbotson and J.A. Mucha, Journal of Applied Physics 63(5) (1988) 1744.
- [3] K. Kobayashi, K. Nishimura, Y. Kawate and T. Horiuhi, Physical Review B 38(6) (1988) 4067.
- [4] P. Lautenschlager, M. Garriga, L. Vina and M. Cardona, Phys. Rev. B 36(9) (1987) 4821.
- [5] Y. Cong, R.W. Collins, G.F. Epps and H. Windischmann, Applied Physics Letters 58 (1991) 819.
- [6] Y. Cong, I. An, H.V. Nguyen, K. Vedam, R. Messier and R.W. Collins, Surface Coatings Technology 49 (1991) 381.
- [7] R.J. Nemanich, J.T. Glass, G. Locovsky and R.E. Shroder, J. Vac. Sci. Technol. A6 (1988) 1783.
- [8] R.E. Shroder, R.J. Nemanich and J.T. Glass, Phys. Rev. B 41(6) (1990) 3738.
- [9] D.E. Aspnes, Proc. SPIE 276 (1981) 188.