

## 마이크로파 플라즈마 화학기상증착법에 의한 HOD 박막 성장

이광만<sup>†</sup> · 최치규\* · Zlatko Sitar\*\*

<sup>†</sup>제주대학교 전기전자공학부, \*제주대학교 물리학과, \*\*노스캐롤라이나주립대학 재료공학과

## Growth of Highly Oriented Diamond Films by Microwave Plasma Chemical Vapor Deposition

Kwang-Man Lee<sup>†</sup>, Chi Kyu Choi\*, and Zlatko Sitar\*\*

<sup>†</sup>Faculty of Electrical and Electronic Eng., Cheju National University,

\*Dept. of Physics, Cheju National University,

\*\*Dept. of Materials Science and Eng., North Carolina State University,

### ABSTRACT

Highly oriented diamond (HOD) films in polycrystalline can be grown on the (100) silicon substrate by microwave plasma CVD. Bias enhanced nucleation (BEN) method was adopted for highly oriented diamond deposition with high nucleation density and uniformity. The substrate was biased up to  $-250$ [Vdc] and bias time required for forming a diamond film was varied up to 25 minutes. Diamond was deposited by using  $CH_4/CO$  and  $H_2$  mixture gases by microwave plasma CVD. Nucleation density and degree of orientation of the diamond films were studied by SEM. Thermal conductivity of the diamond films was  $\sim 5.27$ [W/cm · K] measured by  $3\omega$  method.

**Key Words** : CVD Diamond Films, HOD, Thermal Conductivity,  $3\omega$  Method

### 1. 서 론

다이아몬드는 전자소자의 열관리에 뛰어난 물질특성을 나타내고 있다. 다이아몬드는 여타 반도체물질에 비해 낮은 유전상수(상온, 약5.7), 높은 저항률(상온,  $\sim 10^{16}$ [ $\Omega \cdot cm$ ])과 우수한 열전도 특성(상온, 약23[W/cm · K])을 가지므로 전자 패키지 등의 열관리 응용을 위한 재료로 오랫동안 주목 받아왔다. 또한 다이아몬드는 전력소자에서부터 메모리 소자에 이르기까지 SOI (silicon on insulator) 구조를 사용하게 되면 저전력 소모와 latch-up free 특성 등 장점을 가질 수 있는 미래의 기관 재료이다. 여기에 우수한 열전도성과 내열성을 지닌 다이아몬드를 적용한 SOD(silicon on diamond) 기관은 차세대의 새로운 패키징 물질로 각광받을 전망이다.

반도체 응용에서 CVD 다이아몬드 열전도특성이 다이아몬드와 기관 내에 존재하는 커다란 결함을 지닌 핵 형성층과 그것의 계면에 존재하는 열적 산란에 의하여 크게 제한받고 있다. 이러한 CVD 다이아몬드의 열저항을 최소화하기 위하여 계면 결함을 제한하는 공정을 필요로 한다. 에피택셜(epitaxial) 다이아몬드의 잘 정렬된 결정은 높은 열전도 특성을 이용한 반도체 패키지 응용에 이용하여 성능을 개선할 수 있을 것으로 기대된다. 이러한 박막은 단결정 실리콘 위에 BEN (bias enhanced nucleation)법[1]을 이용한 다이아몬드 증착에 의하여 형성된다. 이러한 박막은 낮은 각도의 결정계면이 존재하므로 임의로 배열된 다이아몬드의 열전도 특성보다 개선된 특성을 나타낸다.

다이아몬드 박막의 열전도도는 핵 형성 단계에서부터 성장이 진행되는 동안에 일어나는 여러 가지 결정학적인 요인에 직접적으로 영향을 받는다. 그래서 박막의 열전도도를 측정하여 결과를 분석하는 일은 성장된 다이아몬드 박막의 결정학적 요소를 해석하는데 매우

<sup>†</sup>E-mail : kwangml@cheju.ac.kr

중요한 역할을 한다. 지금까지 알려진 박막 혹은 벌크의 열전도도를 측정하는 방법으로  $3\omega$  법[2], 마이크로 히터와 열전대 어레이에 의한 온도 기울기 측정법[3], 순간 열 격자법(transient thermal grating)[4], Joule 및 레이저 가열 측정법[5], 정상상태 4탐침법[6] 등이 있다. 이 중에서 최근 개발된  $3\omega$ 법은 상온이나 그 이상의 온도에서 샘플을 측정할 때 생기는 복사에 기인한 열손실에 의한 오차를 극복할 수 있는 방법으로 알려져 있다.

본 연구에서는 새로운 전자소자 응용을 위한 다이아몬드 박막을 형성하기 위하여 마이크로파 플라즈마 CVD 법을 이용하였다. 임의로 성장된 CVD다이아몬드 박막과 고도로 정렬된 CVD다이아몬드 박막의 상대적인 열적 특성을 다루었다. 다이아몬드 박막의 중요한 열전도 특성을 위하여  $3\omega$ 법을 이용한 열전도도 측정을 시도하였다. 또한  $3\omega$ 법의 적용 타당성을 기존의 알려진 기판물질들의 열전도도 측정을 통하여 확인하였다.

## 2. 고체의 열전도도

고체의 열전도도는 보통 1차원구조에서 안정된 열의 흐름에 의하여 형성되는 온도기울기를 측정하므로 결정되어진다. 최근 개발된 교류 열전도도 측정 기술인  $3\omega$  기술[2]은 상온이나 그 이상의 온도에서 연장하여 적용하면 샘플로부터 상당량의 열이 복사로 소멸되는 오차를 극복하게 한다. 이 방법은 샘플의 크기가 전형적인 1[cm]의 표준 크기와 비교했을 때 극단적으로 작은 샘플의 유효 두께가 수십[ $\mu\text{m}$ ]정도이기 때문에, 흑체 복사로부터 생기는 오차에 둔감하다.  $3\omega$ 법은 히터와 온도계로 사용되는 단일 소자로부터 열의 방사상 흐름을 이용한다. 선간-도메인 응답 대신에 온도발진에 의존하는 주파수를 사용하고 있다는 것이 주된 차이점이다. 실험의 측면도는 Fig. 1과 같다. 반무한 체적의 표면에 있는 무한히 좁은 선형 열원으로 부터  $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ 만큼 떨어진 거리에서 온도 발진에 대한 정확한 해를 가지고 시작한다.

Carslaw와 Jaeger에 의해 주어진 해는

$$\Delta T(r) = (P/\pi K) K_0(r/\lambda) \quad (1)$$

이다. 여기서  $K$ 는 반무한 체적의 열전도도이고  $P/\pi$ 는 선형 열원의 주파수  $2\omega$ 에서의 단위길이당 전력의 진폭이다. 인자  $2\omega$ 는 주파수  $2\omega$ 의 전류가 주파수  $2\omega$ 의 Joule열을 발생하기 때문이다. 복합량 크기  $\lambda$ 는

$$\lambda = \sqrt{D/i2\omega} \quad (2)$$

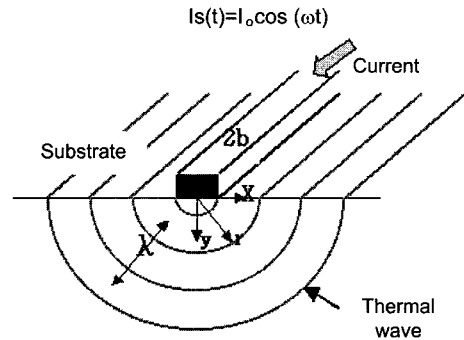


Fig. 1. Schematic diagram of sample structure and heater for  $3\omega$  method.  $b$  is half of heater width.  $D$  is thermal diffusion coefficient.

와 같고 열확산길이(thermal diffusion length) 혹은 열침투깊이(thermal penetration depth)라 부른다. 여기서  $D$ 는 열 확산계수  $K/\rho C$ 이며,  $\rho$ 는 밀도이고  $C$ 는 비열이다.  $|r/\lambda| \ll 1$ 의 범위에서 식 (1)은 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$\Delta T = \frac{P}{\pi K} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{D}{r^2} + \ln 2 - 0.9238 - \frac{1}{2} \ln(\omega) - \frac{i\pi}{4} \right] \quad (3)$$

식 (3)은 해의 주파수 의존부와 허수부로 분리하여 표기되었다. 온도 발진  $T$ 의 허수부와 실수부 어느쪽도 열전도도를 결정하는데 사용될 수 있다. 허수부(out of phase)는 열전도도를 곧바로 나타내나 실험적으로는 실수부(in phase)의 기울기 대  $\ln\omega$ 가 더 신뢰성이 있는 측정이다.

## 3. 실험

### 3.1. 다결정 다이아몬드 박막 형성

한쪽면만 연마한(100) p-형 실리콘 웨이퍼( $\rho=1\sim 10 [\Omega \cdot \text{cm}]$ )를 사용하여 다이아몬드 박막을 증착하였다. 실리콘 웨이퍼를 아세트산과 메틸알콜에 각각 세척한 후 탈이온수로 행구었다. 실리콘 웨이퍼를 몰리브덴늄 홀더에 올려서 성장 챔버에 넣었다. 마이크로파 플라즈마 CVD 시스템(ASTeX사)을 사용하여 2.45[GHz]의 마이크로파 전력으로 고순도 메탄가스와 수소가스를 써서 증착하였다. 이단계 공정을 이용하여 고도로 정렬된 다이아몬드(HOD) 박막을 증착하였다. DC-BEN(bias enhanced nucleation) 법을 이용하여 약 0.5[ $\mu\text{m}$ ]의 다이아몬드를 성장하였다. 그후 상온으로 냉각시킨 후 시스템으로부터 끄집어내었다.

**Table 1.** Deposition conditions for diamond thin films using microwave plasma CVD

Parameter	Carburization	Bias enhanced nucleation	Deposition
Substrate	p-type, Si(100)	p-type, Si(100)	p-type, Si(100)
Microwave power	~900 W	~900 W	~700 W
Working pressure	~25 Torr	~15 Torr	~25 Torr
Deposition time	1 hr	~25 min	~20 hrs
Source gases	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> (2%)	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> (2%)	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> (2%)
H <sub>2</sub>	~200 sccm	~200 sccm	~200 sccm
CH <sub>4</sub>	~4 sccm	~4 sccm	~2 sccm
Substrate temperature	~860°C	~860°C	~800°C
Bias		-250 Vdc	

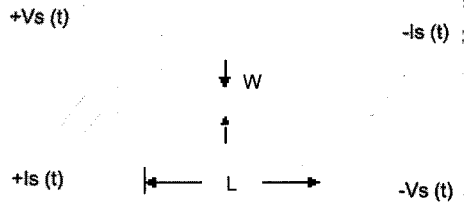
Table 1의 증착조건에서 다결정 다이아몬드 박막을 형성하였다. 이때 반응챔버의 초기 진공도를 약 10<sup>-7</sup> [Torr]로 배기시킨 다음 H<sub>2</sub>+CO 혹은 H<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub> 혼합가스를 각각 혼합비에 따라 주입하였다. 반응 챔버의 압력을 자동으로 조절하면서 플라즈마를 발생시켰으며 350~1100[W]의 전력을 공급하였다. 이때 기판의 온도를 적외선 온도계로 측정하여 기판의 온도를 일정하게 유지되도록 온도 컨트롤러로 조절하였다.

**3.2. CVD 다이아몬드의 결정성 측정**

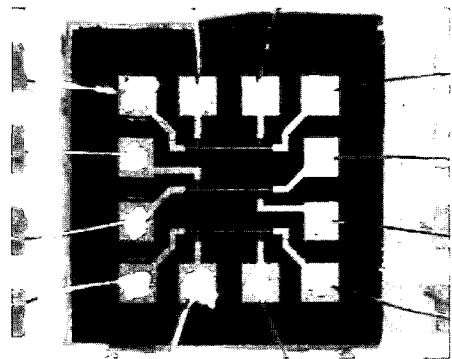
본 연구에서 형성된 CVD 다이아몬드 박막의 상과 결정성을 측정하기 위하여 XRD, Raman, SEM 분석을 각각 행하였다.

막 형성조건은 CO/H<sub>2</sub>=10[sccm]/90[sccm], 900[°C], 37.5[Torr]에서 5시간 성장하였다. Raman 분석실험은 파장 514.5[nm]의 Ar 레이저를 100[mW]로 1100~1700 [cm<sup>-1</sup>]의 범위에서 측정하였다. Raman 스펙트럼의 특성 피크로부터 다이아몬드 박막상의 존재를 확인하였고, 피크의 위치, 폭의 분석으로부터 각각 증착물의 스트레인, 무질서의 정도, 불순물의 함유 등을 분석하였다. SEM 분석은 다결정 다이아몬드 박막의 표면상태, 결정상 및 핵형성 상태, 계면상태 그리고 두께 등을 FESM(field emission scanning electron microscope: JEOL JSM-740)으로 조사하였다.

3ω법을 이용한 다이아몬드 박막의 열전도도를 측정하기 위하여 Fig. 2와 같이 교류전류 Is(t)를 흘려주는 입력단과 교류전압 Vs(t)를 측정할 출력단을 독립적으로 정하였다. 이때 금속 저항체의 폭(W)과 박막의 두께(d) 사이에는 적어도 측정하고자 하는 막의 두께가 금속 저항체의 폭에 다섯 배가 넘도록 설계해야 한다 (d≥5W). 본 연구에서는 폭(W)과 길이(L)가 다양한 금속저항을 설계하고 패터닝을 위한 마스크를 제작하였다. 시험소자는 W=10[μm] 일 때 L=1, 2, 3 및 4[mm]가 되게 설계하고 또한 L=2[mm]로 일정할 때는 W=5,



**Fig. 2.** Schematic diagram of the test sample for thermal conductivity measurement.



**Fig. 3.** Microphotograph of wire bonded test device sample for thermal conductivity measurement.

10, 15, 20, 25 및 30[μm]까지의 패턴을 설계하였다. 전극물질로는 Au/Ti 이중층을 전자빔 증착기로 2000[Å]/100[Å] 두께로 증착하고 lift-off 방법[7]을 사용하여 패터닝하였다. 측정소자의 제조공정은 다이아몬드 박막의 열전도도를 측정하기에 앞서 기존의 Fused silica(GE124)8)와 sapphire(100) 기판을 측정함으로써 본 연구에서 이용한 3ω법의 적용 타당성을 확인하였다.

Fig. 3은 제작한 측정소자의 현미경사진을 보여주고 있다. 우선 측정용 칩을 마운팅하여 Au 선으로 초음파

결선하여 패키징하였다. 제작된 측정소자의 저항치는 100[Ω]이하가 되게 설계하였다.

측정소자의 3 $\omega$  성분을 측정하기 위하여 기본적으로 차동증폭장치를 채택하였다. 함수 발생기를 통하여 주파수를 1[Hz]~10[kHz]로 변화시키면서 정현파의 입력 신호가 측정소자에 인가된다. 입력신호에 포함되어 있는 3 $\omega$ 성분을 제거하기 위하여 기준저항(10-turn potentiometer, 100[Ω])과 함께 연결된 회로가 필요하다. 입력전류 신호는 기준저항과 측정소자를 모두 통과하며, 각 저항과 측정소자 양단에 인가된 전압이 Lock-in 앰프를 이용하여 측정되는데 이들 신호의 차동 입력이 Lock-in 앰프(Stanford Research Inc., SR830)에서 측정된다. 이때 Lock-in 앰프에서는 두 신호의 차에 해당하는 신호가 검지된다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1. 다결정 CVD 다이아몬드 박막의 결정성

Fig. 4는 Table 1의 carburization 및 BEN과정을 거친 다이아몬드 박막의 XRD스펙트럼을 나타내고 있다. 박막의 공정 조건인 마이크로파 전력, 공정압력, 기판온도 및 반응가스의 주입량은 각각 700[W], 25[Torr], 800[°C] 및 CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>=2[sccm]/200[sccm]였다. 또한 BEN 법으로 -250[Vdc]에서 2분에서 25분 동안 핵형성 반응을 시킨 후, 20시간 동안 박막을 성장시켰다. Fig. 4에서 2 $\theta$ 가 43.9°, 75.3° 및 91.4°에서 나타난 피크는 다이아몬드 결정상의 (111), (220) 및 (311)면에 대한 회절 스펙트럼이다. 성장한 박막에서 나타난 다이아몬드 결정상의 (111)면과 (220)면에 대한 피크 강도의 비는 I<sub>111</sub>:I<sub>220</sub>=100:23 였으며 (111)면에 대한 선택적 배향이 두드러진 결정성이 좋은 다이아몬드 박막임을 보였다.

Fig. 5는 Fig. 4의 박막에 대한 전형적인 Raman 스펙트럼을 나타낸 것이다. 이 결과에서 다이아몬드 피이크 (1332[cm<sup>-1</sup>])가 좁고 강하게 나타나 있다. 비정질탄소(1520[cm<sup>-1</sup>])와 흑연(1580[cm<sup>-1</sup>])과 같은 비다이아몬드(nondiamond) 박막의 피이크는 거의 관측되지 않는다. 이와 같은 스펙트럼으로부터 1) 증착층내에 존재하는 상(다이아몬드, 흑연 및 비정질탄소)의 확인 및 이들 상에 의한 피이크의 상대적 강도의 크기(I<sub>C</sub>/I<sub>D</sub>)에 의한 다이아몬드와 비다이아몬드 성분의 상대적인 양, 2) 1332[cm<sup>-1</sup>]에서 관측되는 다이아몬드 피이크와 백그라운드 준위와의 상대적인 강도의 크기 I<sub>B</sub>/I<sub>D</sub>에 의한 다이아몬드 상내에서의 격자 무질서(lattice disorder), 3) 1332[cm<sup>-1</sup>]에서 관측되는 다이아몬드 피이크의 반치폭

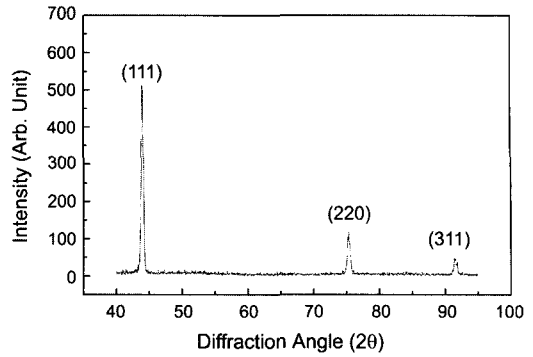


Fig. 4. X-ray diffraction spectrum of CVD diamond thin film.

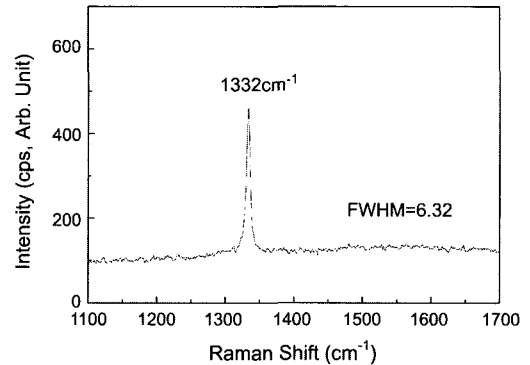
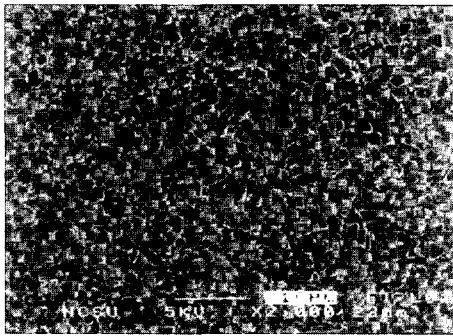


Fig. 5. Raman spectrum of CVD diamond thin film.

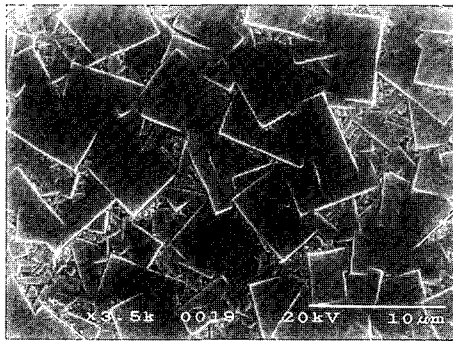
(FWHM: full width at half maximum)의 측정에 의한 다이아몬드 상내에서 격자 뒤틀림(lattice distortion) 정도 등에 대한 정보를 얻을 수 있으며, 격자 내의 무질서 정도 및 격자 뒤틀림 정도는 다이아몬드 박막내에 존재하는 격자결함(lattice defect) 및 다이아몬드와 함께 증착되는 비다이아몬드 성분의 격자 내의 침투와 밀접하게 관계된다. 본 연구에서의 다이아몬드 박막의 반치폭(FWHM)은 6.3[cm<sup>-1</sup>]로 측정되었다. 이것은 천연 다이아몬드와 인조 단결정 다이아몬드의 반치폭이 1.9[cm<sup>-1</sup>]와 6.7-7.5[cm<sup>-1</sup>]와 비교하여 볼 때 매우 우수한 결정성을 지닌 것으로 판단할 수 있다.

다음은 -250[Vdc]의 바이어스를 가하면서 2분에서 25분까지 핵형성 반응을 시도하였다. BEN법으로 핵형성 반응을 시킨 다이아몬드 박막에 대한 연구결과에서 바람직한 공정조건을 찾을 수 있었다.

Fig. 6은 본 연구에서 증착한 다결정 CVD 다이아몬드 박막의 SEM 사진이다. Fig. 6(a)와 (b)는 각각 10[min] 및 3[min] 동안 BEN 과정을 거친 박막을 보여주고 있다. 이 결과로부터 2[min]이 상 5[min]미만의



(a)



(b)

Fig. 6. SEM photographs for CVD diamond thin films using BEN method. Bias time is (a) 10[min] and (b) 3[min].

핵형성 과정을 거친 박막이 높은 균일성과 배열성을 보였으며, 5[min]이상 BEN과정을 거친 박막은 균일성과 배열성에서 좋지 않은 결과를 보였다. 본 연구에서는 3[min]동안 BEN법으로 핵형성 반응을 한 박막이 가장 좋은 결과를 보였다. 그리고 종래의 다이아몬드 분말로 초음파 전처리하여 성장한 다이아몬드 박막 보다 BEN법으로 핵형성 과정을 거친 박막이 {100}면이 발달한 더 높은 균일성과 배열성을 갖는다는 것을 알 수 있었다. 결정립의 크기는 대체로 약 5[μm] 정도의 크기로 증착시간이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다.

4.2. CVD 다이아몬드 박막의 열전도도

3ω법의 적용가능성을 평가하기 위하여 이미 잘 알려진 Fused silica(GE124)의 열전도도와 sapphire(100)의 열전도를 측정하였다. 약 300[K]에서 Fused silica는 광범위한 측정주파수(1[Hz]~10[kHz])에서 3ω성분과 주파수와의 상관관계에서 우수한 선형성을 보였다.

여기서 제 2 및 제 3고조파를 포함한 전압발진은

$$V(t) = V_0 + V_1 \cos(\omega t) + V_2 \cos(2\omega t) + V_3 \cos(3\omega t) + \dots \tag{4}$$

이고, 제 3고조파 전압  $V_3$ 은 온도발진에 비례하므로

$$V_3 = \frac{\beta V_1}{4R} \Delta T \tag{5}$$

가 된다. 여기서  $\beta$ 는 금속히터(Au/Ti)의 온도계수,  $V_1$ 은 주파수  $\omega$ 에서의 히터양단의 전압,  $R$ 은 히터의 저항이다.

전압  $V_3$ 이 온도발진에 비례하므로 식 (3)과 식(5)의 상관관계로부터 열전도도  $K$ 는 제 3고조파 전압과 각 주파수에 대한 기울기에 반비례하는 결과를 얻을 수 있다. 즉,

$$K = \frac{1}{4\pi l R_0^2} \frac{V_1^3}{dV_3/d\ln\omega} \frac{dR}{dT} = \frac{2.3\beta V_1^3}{4\pi l R_0 dV_3/d\log\omega} \tag{6}$$

식 (6)으로부터 측정된 Fused silica(GE124)와 sapphire(100) 기관의 열전도도는 각각 0.013[W/cm · K]와 0.35[W/cm · K]로 알려진 값들과 잘 일치하였다 [8~10].

Fig. 7(a)와 7(b)는 본 연구에서 마이크로파 플라즈마 CVD법으로 형성한 다결정 다이아몬드 박막의 열전도도 측정 결과를 나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 다이아몬드 분말로 초음파 전처리를 한 박막의 경우이고 7(b)는 BEN법을 이용한 핵형성과정을 거친 박막의 경우로 각각 측정된 열전도도는 3.64[W/cm · K] 및 5.27[W/cm · K] 을 얻을 수 있었다. BEN법을 이용하여 얻은 다이아몬드 박막의 경우가 다이아몬드 분말로 초음파 처리한 박막에 비해 2배에 가까운 높은 열전도도를 나타낸 것은 상대적으로 큰 다결정 다이아몬드 결정립과 높은 균일성 및 배열성으로 인하여 결정립 계면에서의 낮은 열적 산란에 기인한 것으로 생각된다. 이는 타 연구의 측정결과와 비교해 볼 때 매우 양호한 측정결과이다[3~6].

이상의 연구결과로부터 일반적으로 벌크로 된 낮은 열전도도 물질을 측정하는데 이용하여온 3ω법을 다이아몬드 박막과 같은 높은 열전도도를 갖는 물질에 적용하여 측정결과를 얻었다는 것은 크게 주목할 일이다. 또한 본 연구에서 채택한 BEN(bias enhanced nucleation)과정을 이용한 핵형성법이 양질의 높은 배열성과 결정성을 지닌 다결정 다이아몬드 박막을 형성하게 됨을 보였다.

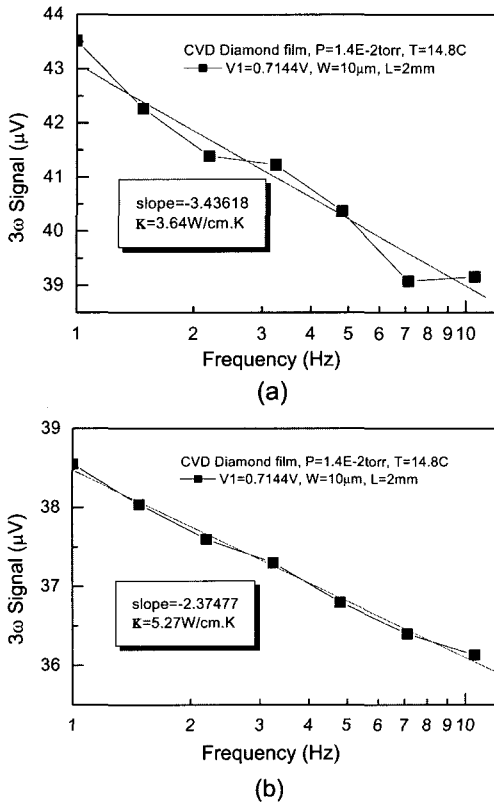


Fig. 7. Measured in-phase  $3\omega$  signal at  $T=292[\text{K}]$  and Pressure =  $1.4 \times 10^{-2} [\text{Torr}]$  for a microwave plasma CVD diamond thin film with  $W/L=10[\mu\text{m}]/2[\text{mm}]$  heater. (a) using convention diamond powder pretreatment method, (b) using BEN nucleation method.

## 5. 결 론

마이크로파 플라즈마 CVD 법에 의한 다결정 다이아몬드 박막을 형성하고 XRD, Raman 스펙트럼 및 SEM을 이용하여 결정성을 측정하여 양호한 결정성을 확인하였다. 다이아몬드의 우수한 열전도 특성을 측정하기 위하여 측정장치를 설계·제작하고  $3\omega$ 법을 이용하여 열전도도를 측정하였다. 이와 더불어 본 연구에서 채택한  $3\omega$ 법의 적용타당성을 입증하기 위하여 기존의 Fused silica(GE124)와 sapphire(100) 기판의 열전도도를 측정하였다. 이 결과  $0.013[\text{W/cm} \cdot \text{K}]$  및  $0.35[\text{W/cm} \cdot \text{K}]$ 를 각각 얻었으며, 알려진 결과와 일치하였다. 또한 측정된 CVD 다결정 다이아몬드 박막의 열전도도는  $5.27[\text{W/cm} \cdot \text{K}]$ 의 크기로 비교적 양호하였다. 결론적으로 본 연구에서 채택한 BEN을 이용한 핵형성법

은 기존의 다이아몬드 분말을 이용한 핵형성법에 비하여 우수한 결정성과 배열성을 지닌 다결정 다이아몬드 박막을 얻을 수 있음을 보였으며, 열전도도는 2배에 가깝게 증가하였다.

## 감사의 글

이 논문은 '제주대학교 발전기금 장기국외과건 연구 지원계획'에 의하여 연구되었음.

## 참고문헌

1. Wolter, S. D., Okuzumi, F., Prater, J. T. and Sitar, Z., "Frequency and Duty Cycle Dependence on the Pulsed Bias-enhanced Nucleation of Highly Oriented Diamond on (100) Silicon", *Phys. Stat. Sol., A* 186, pp. 331-337, 2001.
2. Cahill, D. G., Katiyar, M. and Abelson, J. R., "Thermal Conductivity of a-Si: H Thin Films", *Physical Rev. B*, 50(9), pp. 6077-6081, 1994.
3. Worner, E., Sild, C., Muller-sebert, W., Locher, R., Koidl, P., "Thermal Conductivity of CVD Diamond Films: High-precision, Temperature-resolved Measurements", *Diamond and Rel. Mat.*, 5, pp. 688-692, 1996.
4. Graebner, J. E., Ralchenko, V. G., Smolin, A. A., Obratsova, E. E., Korotushenko, G. G. and Konov, V. I., "Thermal Conductivity of Thin Diamond Films Grown from d.c. Discharge", *Diamond and Rel. Mat.*, 5, pp. 693-698, 1996.
5. Goodson, K. E., Kading, O. W., Rosler, M. and Zachai, R., "Experimental Investigation of Thermal Conduction Normal to Diamond-silicon Boundaries", *J. of Appl. Phys.*, 77(4), pp. 1385-1392, 1995.
6. Morelli, D. T., Beetz, C. P. and Perry, T. A., "Thermal Conductivity of Synthetic Diamond Films", *J. of Appl. Phys.*, 64(6), pp. 3063-3066, 1988.
7. Elliott, D. J., *Integrated Circuit Fabrication Technology*, McGraw-Hill Book Co., New York, p. 27, 1982.
8. Luo, C., Marchand, H., Denbaars, S., Clarke, D. R., "Thermal Conductivity of LEO GaN, Meeting on Compact Power Supplies Based on Heterojunction Switching in Wide Band Gap Semiconductors", 1999.
9. GE Quartz, *GE Quartz - Typical Physical Properties, Type 124 Clear Fused Quartz Table*, 2000. <http://www.geqonline.com/english/properties.htm>.
10. GoodYellow, *1995/96 Catalogue: Metals, Alloys, Compounds, Ceramics, Polymers, and Composites*, U.K. p. 413, 1995.