

CVD 다이아몬드 박막의 열전도 특성

이 광 만* · 고 정 대** · 최 치 규**

Thermal Properties of CVD Diamond Thin Films

Kwang-Man Lee*, Jeong-Dae Ko** and Chi-Kyu Choi**

ABSTRACT

Diamond has outstanding thermal properties that make it the material of choice for heat spreading applications in microelectronic devices. In order to assess thermal properties of diamond films grown by microwave plasma CVD method, we have applied an ac thermal conductivity measurement technique where films are thermally excited at frequency ω while the thermal response is measured at the third harmonic via a lock-in amplifier. This method is insensitive to errors due thermal noise. Before the application to diamond, the measurement technique was tested on fused silica and sapphire. The results were in good agreement with published values. The thermal conductivity of CVD diamond films were measured to be around $3 \text{ W/cm} \cdot \text{K}$.

Key words : CVD diamond films, thermal conductivity, 3ω method

1. 서 론

다이아몬드는 여타 반도체물질의 절반 정도의 낮은 유전상수(상온, 약5.7)와 뛰어난 열적 특성(상온, 약 $23[\text{W/cmK}]$)가 지므로 전자 패키지 등의 열관리 응용을 위한 재료로 오랫동안 주목 받아왔다. 전력소자에 서부터 GDRAM소자에 이르기까지 SOI(silicon on insulator) 기판을 사용하게 되면 저전력 소모와 latch-up free 특성 등 장점을 가질 수 있는 미래의 기판 재료이다. 여기에 우수한 열전도성과 내열성을

지닌 다이아몬드를 적용한 SOD(silicon on diamond) 기판은 차세대의 새로운 패키징 물질로 각광 받을 전망이다.

CVD로 실리콘 기판위에 형성된 다결정 다이아몬드 박막의 열전도 특성이 지금까지 광범위하게 많은 사람들에게 의해 연구되어져 왔다. 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 중요한 역할을 한다. 지금까지 알려진 박막 혹은 벌크의 열전도도를 측정하는 방법으로 3ω 법¹⁾, 마이크로 히터와 열전대 어레이에 의한 온도 기울기 측정법²⁾, 순간 열적자법(transient thermal grating)³⁾, Joule 및 레이저

* 제주대학교 전기전자공학부, 산업기술연구소
Faculty of Electrical & Electronic Engineering, Res. Insti.
Ind. Tech., Cheju Nat'l Univ.

** 제주대학교 물리학과
Department of Physics, Cheju Nat'l Univ.

가열 측정법⁴⁾, 정상상태 4-탐침법⁵⁾ 등이 있다. 이 중에서 최근 개발된 3 ω 법은 상온이나 그 이상의 온도에서 샘플을 측정할 때 생기는 복사로 인한 열손실에 의한 오차를 극복할 수 있는 방법으로 알려져 있다.

본 연구에서는 새로운 전자소자 응용을 위한 다이아몬드 박막을 형성하기 위하여 마이크로파 플라즈마 CVD 법을 이용하였다. 다이아몬드 박막의 중요한 열전도 특성과 밀접한 관계를 가진 박막의 결정화적인 성질을 규명하기 위하여 3 ω 법을 이용한 열전도도 측정을 시도하였다. 또한 3 ω 법의 적용 타당성을 기존의 알려진 기판물질들의 열전도도 측정을 통하여 확인하였다.

II. 열전도도 측정법

고체의 열전도도는 보통 1차원구조에서 안정된 열의 흐름에 의하여 형성되는 온도기울기를 측정하므로서 결정되어진다. 50[K]이하에서, 샘플의 표면으로부터 열의 복사가 고체를 통한 열 수송에 비해 작은 곳에는 정상상태 기술이 정확하고 편리하다. 그러나 이 기술은 상온이나 그 이상의 온도에서 연장하여 적용하면 샘플로부터 상당량의 열이 복사로 소멸되는 오차를 유발한다.

최근 개발된 교류 열전도도 측정기술인 3 ω 기술은 이러한 어려움을 극복하게 한다. 이 방법은 샘플의 크기가 전형적인 크기 [1cm]의 표준 크기와 비교했을 때 극단적으로 작은 샘플의 유효 두께가 수십 [μ m]정도의 크기이기 때문에, 흑체 복사로부터 생기는 오차에 둔감하다. hot-wire와 hot-strip이 밀접하게 관련되어 있듯이 3 ω 법은 히터와 온도계로 상용되는 단일 소자로부터 열의 방사상 흐름을 이용한다. 신간-도메인 응답 대신에 온도발진에 의존하는 주파수를 사용하고 있다는 것이 주된 차이점이다. 실험의 측면도는 Fig. 1과 같다. 반무한 체적의 표면에 있는 무한히 좁은 선형 열원으로부터 $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ 만큼 떨어진 거리에서 온도 발진에 대한 정확한 해를 가지고 시작한다. Carslaw와 Jaeger에 의해 주어진 해

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

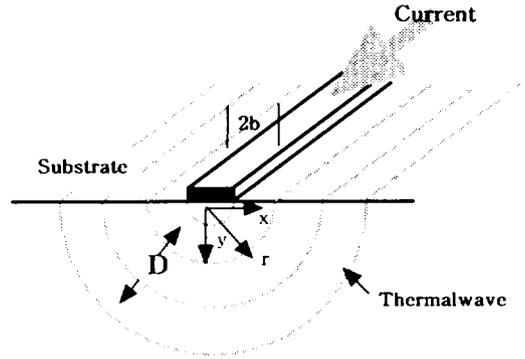


Fig. 1. Schematic diagram of sample structure and heater for 3 method. b is half of heater width. D is thermal diffusion coefficient.

여기서 K 는 반무한 체적의 열전도도이고 P/l 은 선형 열원의 주파수 2ω 에서의 단위길이당 전력의 진폭이다. 인자 2ω 는 주파수 2ω 의 전류가 주파수 2ω 의 Joule열을 발생하기 때문이다. 복합량 크기 λ 는

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

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

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

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

유한한 폭을 가진 열원으로부터 온도발진을 계산하기 위하여 x 축에 대하여 식(1)의 Fourier 변환을 취하는 것이 편리하다. 더구나 단지 샘플 표면의 온도 발진이 중요하며 $y=0$ 으로 두었다.

$$\Delta T(k) = \int_0^\infty \Delta T(x) \cos(kx) dx \quad (4)$$

$$\Delta T(k) = (P/2IK)[1/\sqrt{k^2 + \lambda^{-2}}] \quad (5)$$

좌표 x 의 함수로 열원의 Fourier 변환에 의해 식(5)를 곱하므로써 열원의 유한한 폭을 포함시킬 수 있다. 열이 선 $|x| < b$ 의 폭을 전체적으로 균일하게 샘플로 들어간다고 가정한다.

실공간 좌표계 x 에서 컨볼루션을 취하면 Fourier공간 k 에서 곱의 형태로 나타난다.

$$\Delta T(k) = \frac{P}{2IK} \int_0^\infty \frac{\sin(kb)}{kb\sqrt{k^2 + \lambda^{-2}}} dk \quad (6)$$

여기서 b 는 히터원 폭의 $1/2$ 이다. Fourier 역변환을 취하면

$$\Delta T(x) = \frac{P}{2\pi K} \int_0^\infty \frac{\cos(kx)\sin(kb)}{kb\sqrt{k^2 + \lambda^{-2}}} dk \quad (7)$$

식(7)은 유한한 폭 $2b$ 를 가진 히터원의 중앙으로부터 x 만큼 떨어진 표면에서의 온도발진을 나타낸다. 3ω 법에서 히터와 똑 같은 소자로부터 온도발진을 측정한다. 그래서 히터폭에 나타나는 어떤 평균온도를 측정하게 된다. 식(7)을 x 에 대해서 0에서 b 까지 적분하여 b 로 나누면 식(7)에 대한 평균치를 구하게되고 이는 온도계로 측정하는 온도발진 ΔT 를 제공하게 된다.

$$\Delta T(k) = \frac{P}{\pi K} \int_0^\infty \frac{\sin^2(kb)}{(kb)^2\sqrt{k^2 + \lambda^{-2}}} dk \quad (8)$$

식(8)로부터 열침투 깊이가 선폭보다 크면, $\lambda \gg b$ 제한범위를 시험해 볼 수 있고 적분은 k 에 의해 지배적이다. $1/\lambda < k < 1/b = 1$ 로 두고 또한 적분의 상한선을 $1/b$ 로 두고 간략화할 수 있다.

III. 실험

3.1. 다결정 다이아몬드 박막 형성

다결정 다이아몬드 박막을 증착할 기판은 (100) p

형 Si ($\rho = 1 \sim 10[\Omega \text{cm}]$)의 기판을 사용하였다. 다결정 다이아몬드 박막의 핵형성을 위하여 본 연구에서는 스크래치법을 사용하였다. 이 경우 Si 기판을 다이아몬드 분말(General Electric, $1/4 \mu\text{m}$)을 함유한 메탄올에 넣고 초음파 세척기로 10~30분 표면 처리한 후, 다시 메탄올과 탈이온수로 세척·건조하였다. 이때 얻은 기판 표면의 핵형성 밀도는 $10^9 \sim 10^{10}[\text{cm}^{-2}]$ 정도였다.

Fig. 2의 마이크로파 플라즈마 CVD 시스템을 이용하여 Table 1의 증착조건에서 다결정 다이아몬드 박막을 형성하였다. 이때 반응 챔버의 초기 진공도를 약 10^{-7} [Torr]로 배기시킨 다음 $\text{H}_2 + \text{CO}$ 혹은 $\text{H}_2 +$

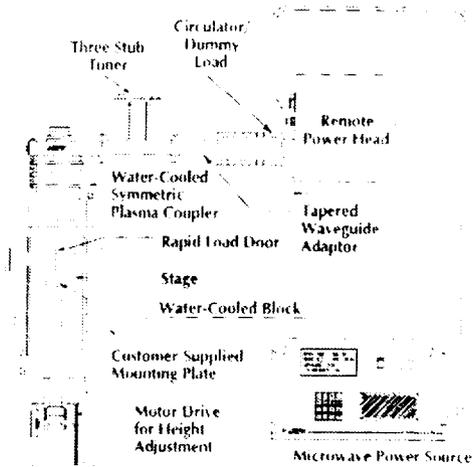


Fig. 2. Schematic diagram of microwave plasma CVD system.

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

Parameter	Value
Substrate	p-type, Si(100)
Microwave power	350~1100W
Working pressure	20~37Torr
Deposition time	~20 hrs
Source gases	
H ₂	90~200sccm
CO	10sccm
CH ₄	3~4sccm
Substrate temperature	700~900°C

CH₄ 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 다이아몬드 박막의 결정성 측정

본 연구에서 형성된 CVD 다이아몬드 박막의 상과 결정성을 측정하기 위하여 XRD, Raman, SEM 분석을 하였다. 막 형성조건은 CO/H₂=10sccm/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⁻¹]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.

3.3. CVD 다이아몬드 박막의 열전도도 측정

3 ω 법을 이용한 다이아몬드 박막의 열전도도를 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 교류전류 $I_s(t)$ 를 흘려주는 입력단과 교류전압 $V_s(t)$ 를 측정할 출력단을 독립적으로 정하고 전류가 흐르는 금속저항체가 히터로 작용한다. 이때 금속 저항체의 폭(W)과 박막의 두께(d) 사이에는 적어도 측정하고자 하는 막의 두께가 금속 저항체의 폭에 다섯 배가 넘도록 설계해야 한다($d \geq 5W$). 그래서 본 연구에서는 폭(W)과 길이(L)가 다양한 금속저항을 설계하고 패터닝을 위한 마스크를 제작하였다.

Fig. 4는 $W = 10[\mu\text{m}]$ 일 때 $L = 1, 2, 3$ 및 $4[\text{mm}]$ 가 되게 설계하고 또한 $L = 2[\text{mm}]$ 로 일정할 때는 $W = 5, 10, 15, 20, 25$ 및 $30[\mu\text{m}]$ 까지의 패턴을 설계하였다.

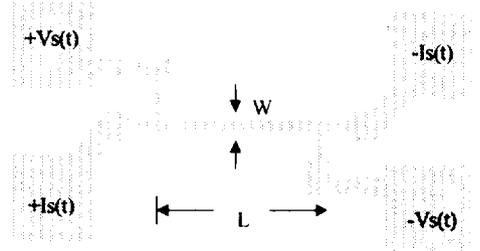


Fig. 3. Schematic diagram of a set of test sample for thermal conductivity measurement.

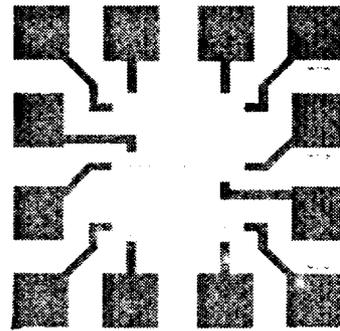


Fig. 4. Mask pattern of 4-electrode measurement device. $L = 1, 2, 3[\text{mm}]$ with $W = 10, 20, 30[\mu\text{m}]$.

전극물질로는 Au/Ti 이중층을 전자빔 증착기로 2000[Å]/100[Å] 두께로 증착하고 lift-off 방법⁶⁾을 사용하여 패터닝하였다. 측정소자의 제조공정은 다이아몬드 박막의 열전도도를 측정하기에 앞서 기존의 Fused silica(GE124)와 sapphire(100) 기판을 측정함으로써 본 연구에서 이용한 3 ω 법의 적용 타당성을 확인하였다.

Fig. 5는 제작한 측정소자의 현미경사진을 보여주고 있다. 우선 측정용 칩을 마운팅하여 Au 선으로 초음파 결선하여 패키징하였다. 제작된 측정소자의 저항치는 100[Ω]이하로 설계하였다.

Fig. 6은 3 ω 성분을 측정하기 위한 측정시스템의 개략도를 나타내고 있다. 함수 발생기를 통하여 주파수를 1[Hz]~10[kHz]로 변화시키면서 정현파의 입력 신호가 측정소자에 인가된다. 입력신호에 포함되어 있는 3 ω 성분을 제거하기 위하여 기준저항(10-turn potentiometer, 100[Ω])과 함께 연결된 회로가 필요하다. 입력전류 신호는 기준저항과 측정소자를 모두

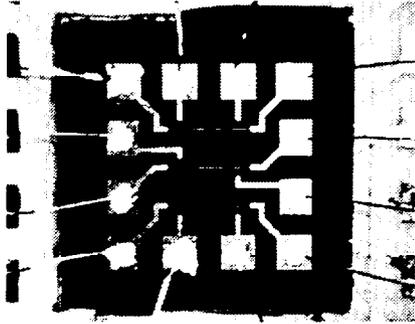


Fig. 5. Microphotograph of wire bonded test device sample for thermal conductivity measurement.

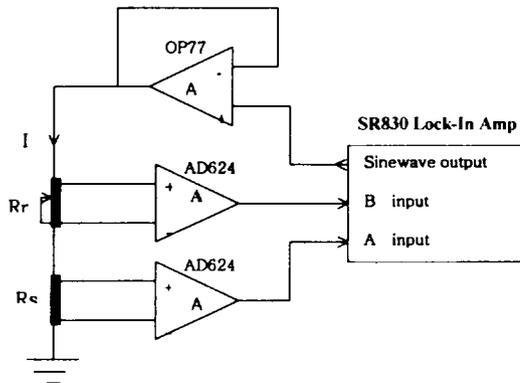


Fig. 6. Thermal conductivity measurement circuit using 3ω method.

통과하며, 각 저항과 측정소자 양단에 인가된 전압이 Locking 앰프에서 측정하게 되는데 이들 신호의 차동 입력이 Locking 앰프에서 측정된다. 이때 Locking 앰프에서는 두 신호의 차에 해당하는 신호가 검지된다.

IV. 결과 및 고찰

4.1. 다결정 CVD 다이아몬드 박막의 결정상

Fig. 7은 마이크로파 전력, 공정압력, 기판온도 및 반응가스의 주입량이 각각 350[W], 37.5[Torr], 890 [°C] 및 $CO/H_2 = 10[sccm]/90[sccm]$ 인 CVD 다이아몬드 박막 공정조건에서 5시간 동안 성장시킨 박막의 X선 회절 스펙트럼이다. 여기서 2θ 가 43.9, 75.3 및

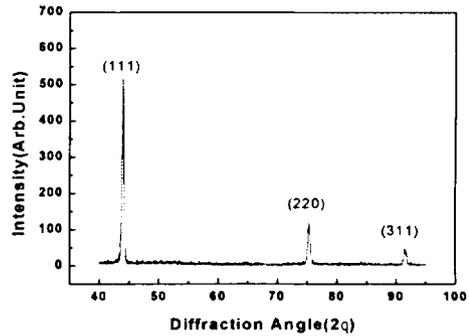


Fig. 7. X-ray diffraction spectrum of CVD diamond thin film.

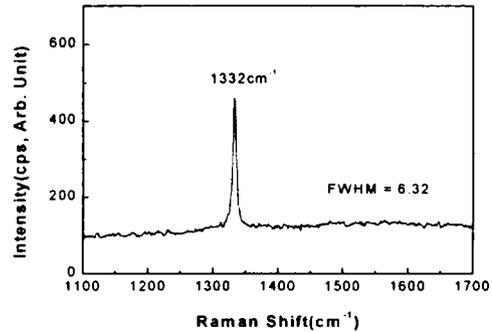


Fig. 8. Raman spectrum of CVD diamond thin film.

91.4에서 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 $I_{111}:I_{220} = 100:23$ 였으며 결정성이 좋은 다이아몬드 박막임을 보였다.

Fig. 8은 CVD법에 의하여 형성된 다이아몬드 박막의 전형적인 Raman 스펙트럼을 나타낸 것이다. 이 결과에서 다이아몬드 피크 ($1332[cm^{-1}]$)가 좁고 강하게 나타나 있다. 다이아몬드 피크 및 비정질탄소 ($1520[cm^{-1}]$)와 흑연($1580[cm^{-1}]$)과 같은 비다이아몬드(nondiamond) 박막의 피크가 관측되고 있다. 이와 같은 스펙트럼으로부터 1) 증착층내에 존재하는 상(다이아몬드, 흑연 및 비정질탄소)의 확인 및 이들 상에 의한 피크의 상대적 강도의 크기(I_D/I_G)에 의한 다이아몬드와 비다이아몬드 성분의 상대적인 양.

2) $1332[\text{cm}^{-1}]$ 에서 관측되는 다이아몬드 피이크와 백그라운드 준위와의 상대적인 강도의 크기 I_B/I_D 에 의한 다이아몬드 상내에서의 격자 무질서(lattice disorder).
 3) $1332[\text{cm}^{-1}]$ 에서 관측되는 다이아몬드 피이크의 반치폭(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.

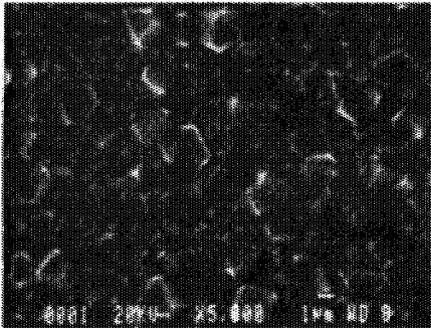


Fig. 9. SEM photographs for CVD diamond thin films using scratch method.

Fig. 9는 본 연구에서 증착한 다결정 CVD 다이아몬드 박막의 전자현미경 사진이다. 마이크로파 전력, 공정압력, 기판온도 및 반응가스 주입량이 각각 $350[\text{W}]$, $37.5[\text{Torr}]$, $890[^\circ\text{C}]$ 및 CO/H_2 의 혼합비를 $10[\text{sccm}]/90[\text{sccm}]$ 였으며 증착시간은 5시간이었다. 이 결과에서 형성된 다이아몬드 박막의 입자는 삼각의 $\{111\}$ 면이 사각의 $\{100\}$ 면에 혼합되어 있어 대체로 평탄한 표면을 보여주고 있다. 입자의 크기는 대체로 약 $2[\mu\text{m}]$ 정도의 크기로 증착시간이 증가함에 따라 증가하는 것으로 볼 수 있다.

4.2. CVD 다이아몬드 박막의 열전도도

3ω 법의 적용가능성을 평가하기 위하여 이미 잘 알려진 Fused silica (GE124)의 열전도도와 sapphire (100)의 열전도도를 측정하였다. Fig. 10은 약 $300[\text{K}]$ 에

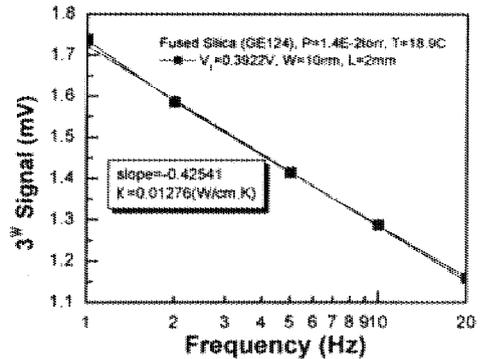


Fig. 10. Measured in-phase 3ω signal at $T=292[\text{K}]$ and $\text{Press.}=1.4 \times 10^{-2} [\text{Torr}]$ for a Fused silica(GE124) with $W/L=10[\mu\text{m}]/2[\text{mm}]$ heater.

서 Fused silica의 측정주파수($1[\text{Hz}] \sim 20[\text{Hz}]$)에서 히터에서 얻은 3ω 성분의 선형적인 상관관계를 나타내고 있다. 또한 광범위한 측정주파수($1[\text{Hz}] \sim 10[\text{kHz}]$) 범위에서도 선형성이 우수한 측정결과를 얻었다.

여기서 제 2 및 제 3고조파를 포함한 전압발전은

$$V(t) = V_0 + V_1 \cos(\omega t) + V_2 \cos(2\omega t) + V_3 \cos(3\omega t) + \dots \quad (9)$$

이고, 제 3고조파 전압 V_3 은 온도발전에 비례하므로

$$V_3 = \frac{\beta V_1}{4R} \Delta T \quad (10)$$

가 된다. 여기서 β 는 금속히터(Au/Ti)의 온도계수, V_1 은 주파수 ω 에서의 히터양단의 전압, R 은 히터의 저항이다.

전압 V_3 이 온도발전에 비례하므로 식 (8)과 식 (10)의 상관관계로부터 열전도도 K 는 제 3고조파 전압과 각주파수에 대한 기울기에 반비례하는 결과를 얻을 수 있다. 즉,

$$K = \frac{1}{4\pi l} \frac{V_1^3}{R_0^2} \frac{1}{\frac{dV_3}{d\ln\omega}} \frac{dT}{dR} = \frac{2.3\beta}{4\pi l} \frac{V_1^3}{R_0^2} \frac{1}{\frac{dV_3}{d\log\omega}} \quad (11)$$

식 (11)로부터 측정된 Fused silica의 열전도도는 0.013 [W/cm · K]로 General Electric사에서 제시한 GE124 Fused silica의 값(0.014[W/cm · K])과 근사하였다^{7,8)}.

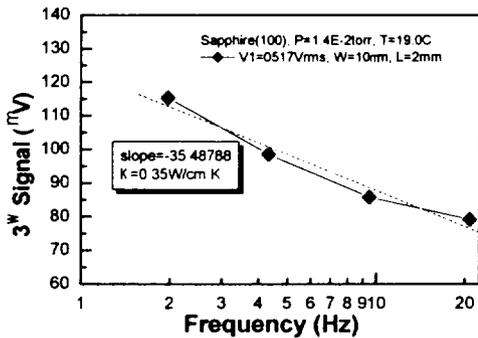


Fig. 11. Measured in-phase 3ω signal at $T = 292$ [K] and Press. = 1.4×10^{-2} [Torr] for a sapphire (100) with $W/L = 10$ [μ m]/2[mm] heater.

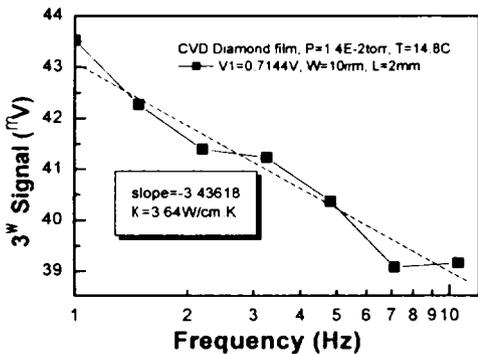


Fig. 12. Measured in-phase 3ω signal at $T = 292$ [K] and Pressure = 1.4×10^{-2} [Torr] for a microwave plasma CVD diamond thin film with $W/L = 10$ [μ m]/2[mm] heater.

Fig. 11은 sapphire (100) 기판의 입력 신호 주파수 (1[Hz] ~ 20[Hz])의 변화에 따른 측정된 3ω 신호를 나타낸 것이다. 열전도도 측정과정은 Fused silica와 거의 동일한 조건하에서 행하여졌다. 이 결과에서 측정된 열전도도는 0.35 [W/cm · K]였으며, 기존의 알려진 값과 일치하였다⁹⁾. 이상의 결과로부터 본 연구에서 이용한 열전도도 측정을 위한 3ω 법의 적용 가능성을 입증할 수 있었다.

Fig. 12는 본 연구에서 마이크로파 플라즈마 CVD 법으로 형성한 다결정 다이아몬드 박막의 열전도도 측정 결과를 나타낸 것이다. 이 결과로부터 얻은 CVD 다이아몬드 박막의 열전도도는 3.64 W/cm · K으로 타 연구결과와 비교해 볼 때 비교적 양호한 결과를 얻었다^{2~5)}.

이상의 연구결과로부터 일반적으로 벌크로 된 낮은 열전도도 물질을 측정하는데 이용하였던 3ω 법을 다이아몬드 박막과 같은 높은 열전도도를 갖는 물질에 적용하여 측정결과를 얻었다는 것은 크게 주목할 일이다. 향후 잘 정렬된 다결정 다이아몬드 박막을 형성하게 된다면, 이로부터 보다 높은 열전도도를 측정할 수 있을 것으로 기대된다.

V. 결론

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 3ω 법을 이용하여 열전도도를 측정하였다. 이와 더불어 본 연구에서 채택한 3ω 법의 적용타당성을 입증하기 위하여 기존의 Fused silica(GE124)와 sapphire (100) 기판의 열전도도를 측정하였다. 이 결과 0.013 [W/cm · K] 및 0.35 [W/cm · K]를 각각 얻었으며, 알려진 결과와 매우 가깝게 일치하였다. 또한 측정된 CVD 다결정 다이아몬드 박막의 열전도도는 3.64 [W/cm · K]의 크기로 비교적 양호한 열전도도를 나타내었다. 결론적으로 본 연구에서 채택한 열전도도 측정방법인 3ω 법이 다이아몬드의 열전도도를 측정하는데도 기존의 다른 방법과 비교하여 우수한 측정방법임을 알 수 있었다.

참고 문헌

- 1) D. G. Cahill, M. Katiyar, and J. R. Abelson, 1994. Thermal conductivity of a-Si:H thin films.

- Physical Rev. B. Vol.50. No.9. pp.6077-6081.
- 2) E. Worner, C. Sild, W. Muller-sebert, R. Locher, P. Koidl. 1996. Thermal conductivity of CVD diamond films : high-precision. temperature-resolved measurements. *Diamond and Rel. Mat.*, Vol.5. pp.688-692.
 - 3) J. E. Graebner, V. G. Ralchenko, A. A. Smolin, E. E. Obratsova, G. G. Korotushenko, and V. I. Konov. 1996. Thermal conductivity of thin diamond films grown from d.c. discharge. *Diamond and Rel. Mat.*, Vol.5. pp.693-698.
 - 4) K. E. Goodson, O. W. Kading, M. Rosler, and R. Zachai. 1995. Experimental investigation of thermal conduction normal to diamond-silicon boundaries. *J. Appl. Phys.*, Vol.77, No.4. pp. 1385-1392.
 - 5) D. T. Morelli, C. P. Beetz, and T. A. Perry. 1988. Thermal conductivity of synthetic diamond films. *J. Appl. Phys.*, Vol.64. No.6. pp.3063-3066.
 - 6) D. J. Elliott. 1982. *Integrated Circuit Fabrication Technology*, McGraw-Hill Book Co., New York, p.27.
 - 7) C. Luo, H. Marchand, S. Denbaars, D. R. Clarke. 1999. Thermal Conductivity of LEO GaN. Meeting on Compact Power Supplies Based on Heterojunction Switching in Wide Band Gap Semiconductors.
 - 8) GE Quartz. 2000. GE Quartz - Typical Physical Properties. Type 124 Clear Fused Quartz Table. <http://www.geqonline.com/english/properties.htm>.
 - 9) GoodYellow. 1995. 1995/96 Catalogue : Metals, Alloys, Compounds, Ceramics, Polymers, and Composites. U.K. p.413.