

CVD 다이아몬드의 열전도도와 그 응용



채희백

순천향대학교 정보물리학과 부교수

1. 서 론

다이아몬드는 보석으로서 뿐만 아니라 여러 매력적인 물성을 갖고 있으므로 오래 전부터 많은 관심을 끌어들였다. 그 물리적 특성으로서(표 1) 가장 단단하며, 가장 높은 영율, 높은 원자밀도, 높은 원자 결합력, 가장 높은 디바이온도(2000 K)와 상온에서 가장 높은 열전도도를 가진다[1]. 상온에서 자연 다이아몬드의 열전도도는 열전도도가 가장 좋은 금속 중 하나인 구리 열전도도(약 4 W/cmK)의 4~5배 정도이다. 이는 전적으로 포논 즉, 원자진동에 의한 열에너지 전달이 디바이온도가 높은 비전도성 물질에서 얼마나 유효한가를 보여준다. 디바이온도가 높은 물질은 상온에서 포논population이 작기 때문에 평균자유행로를 결정하는 포논-포논 산란확율이 그만큼 작아지며 결과적으로 열저항이 작아지기 때문이다[2]. 좋은 열전도도와 함께 높은 전기저항을 갖고있으므로 고방열 패키지용 기판 재료로서 연구되어졌다. 특히, 기상합성에 성공한 이후 대면적합성이 가능하게되어 다이아몬드의 응용에 많은 연구가 이루어지고 있다. 본 논문의 전반부에서 CVD (Chemical Vapor Deposition) 다이아몬드 열전도도의 물리적 기본이 되는 포논산

란 메커니즘과 이론모델을 소개하였으며 후반부에서는 CVD 다이아몬드의 고방열 패키지로의 응용 연구에 대한 소개를 한다.

표 1. CVD 다이아몬드의 물성

물성	물성값	단위
열전도도		
필름과 평행방향	1000 -2000	W/mK
필름과 수직방향	> 2000	W/mK
비열	0.54	J/gm K
열팽창계수	2.6×10^{-6}	1/K
Thermal shock 계수	3.0×10^8	W/K
Debye temperature	> 2000	K
Resistivity	$10^{13} \sim 10^{16}$	Ω -cm
영율	1180	GPa
밀도	3.51	gm/cc
유전율	5.6	-
Loss tangent	0.0005	-
Flexural strength	1000	MPa

2. CVD 다이아몬드의 열전도도

1970년대에 다이아몬드의 기상합성에 성공한 이후 CVD 다이아몬드의 열전도도 측정에 많은 관심을 기울이게 되었다. 자연 다이아몬드(Natural diamond) type IIa는 상온에서 24 W/cmK의 열전도도를 갖는다. CVD 다이아몬드의 열전도도가 자연 다이아몬드 열전도도의 몇% 정도에 이르는지 측정함으로써 CVD 다이아몬드의 질을 평가할 수 있다. 자연 다이아몬드는 type I과 type II가 있는데 질소가 함유되어있는 것이 type I이고 함유되어있지 않는 것이 type II이다(IR 분석을 통해 결정됨. type II는 질소함량이 IR분석으로 측정이 안되는 정도의 미량을 갖고있다고 할 수 있음). 질소가 미량 함유되면 약한 노란 색을 띠게 된다. type I의 열전도도는 상온에서 10 W/cmK 정도의 값을 갖는다. 맨 끝에 붙이는 a 혹은 b는 전기전도성을 띠며 b이며 전기전도성을 띠지 않으면 a를 붙인다[1].

CVD 다이아몬드 필름을 처음 만들 당시에는 결정도가 떨어져 상온에서 이들 필름들의 열전도도를 측정하면 낮은 값을 가지며 온도에 대하여 양의 기울기를 갖게 되는데 이는 열전도도가 좋지 않음을 보이는 것이다[3~5]. 그 이후 CVD방법으로 만든 다이아몬드 필름을 Morelli[6] 혹은 Graebner[7~8] 등에 의하여 측정된 결과 이들의 열전도도가 상온 부근에서 음의 기울기를 보이면서 자연 다이아몬드 type IIa의 열전도도와 곡선모양이 유사하게 나타났다.

Graebner는 특히 CVD 다이아몬드 필름의 수평방향과 수직방향에 대한 열전도도를 측정하여 수직방향의 열전도도가 더 좋다는 사실을 밝혔다. 이 열전도도의 비등방성(anisotropy)은 필름의 낱알 경계(grain boundary)가 주상(columnar) 구조로서 필름의 수직방향과 나란하게 자람으로써 일어나는 현상이다. 또한, 낱알 경계으로 둘러싸인 내부의 순수 다이아몬드에 의한 국부적인 열전도도를 간접적으로 측정하여 양질의 자연 다이아몬드 결정(열전도도 : 24W/cm K)과 거의 같은 열전도도를 갖고 있음을 보여주었다. 이들은 또한 필름의 두께가 두꺼워짐에 따라, 즉 substrate에서부터 높아질수록 열전도도가 커지며 이는 grain boundary의 크기와 비례함을 보여주었다[8]. 그러므로 heat spreader로 사용할 다이아몬드는 substrate가까운 쪽의 필름보다는 먼 쪽의 필름(growth side)을 사용하는 것이 훨씬 효과적이라

는 것을 밝혔다.

2.1 동위원소 함량조절에 따른 열전도도 변화

CVD 다이아몬드 합성이 용이해지면서 디팩트의 농도를 줄여서 얼마나 열전도도가 증가하는지 확인하는 실험들이 이루어졌다[9~10]. 자연상태에서 ^{12}C 가 98.9%이며 탄소의 동위원소인 ^{13}C 는 1.1% 존재하며 이 동위원소가 순수 다이아몬드내의 원자 디팩트이다. 그러므로 자연 다이아몬드 type IIa이거나 CVD 다이아몬드이거나 모두 ^{13}C 를 최소한 1.1%는 함유하게 된다. 이들은 나중에 열전도도의 메커니즘설명에서 포논과 디팩트와의 산란에서 중요한 원인이 된다. 최근에 기상합성에서 사용되는 합성가스의 탄소농도중에서 ^{13}C 의 농도를 0.07%까지 줄여서 CVD 다이아몬드를 합성하였다. Olson 등[11]은 이들의 상온 열전도도가 자연 다이아몬드 type IIa 보다 더 좋은 30 W/cmK에 도달하였다.

2.2 열전도도 측정방법과 round-robin

다이아몬드는 열전도도가 매우 높기 때문에 열전도도 측정에서 주의를 하여야한다. 특히 CVD 다이아몬드는 필름의 형태를 갖고있으므로 기하학적인 형상에 맞추어 측정방법이 개발되어야한다. 고체 필름의 열전도도를 측정하는 방법은 비교적 최근에 개발되었다. 다이아몬드 필름의 열전도도 측정은 최초로 Ono[3] 등이 적외선 검출기로 시편의 양끝에서 공급된 열에너지의 온도분포를 측정하여 열전도도를 구하였다. 직접 열전도도를 측정하는 또 다른 방법으로는 2heater-2heated bar(혹은 dc-heated bar)방법과 3 ω 방법 등이 있다. Two Heater-Two Heated Bar Technique은 Grabner[7] 등이 고전적인 heat flow방법을 발전시켜 히터를 시편양끝에 설치하여 각 히터에 의한 온도기울기를 4개의 열전대로 측정하여 복사에 의한 열전달을 보상할 수 있는 방법이다[8].

또 한가지 얇은 필름의 열전도도를 직접 측정하는 방법인 3 ω 법은[12~13] 열선법을 개량한 방법으로서 DC를 사용하는 대신 AC를 사용하여 열선을 에너지 공급원으로 사용하는 동시에 주위 매질로부터의 온도응답도 같이 측정함으로써 열선을 에너지원과 센서로 동시에 사용한다. DC 열선법은 time domain에서 측정하고, 3 ω 방법은 Lock-In 앰프를 이용하여 frequency domain에서 측정한다. 이 방법은 복사열전달 효과를 줄이고 시편의 크기가 작아도 되므로 필름 형태의 열전도도 측정에 적당

한 방법이나 다이아몬드일 경우 고진동수 대역을 사용해야 한다는 단점이 있다.

초기에 여러 방법들로 측정된 열전도도와 측정오차를 비교하기 위하여 국제적으로 round-robin 테스트가 이루어졌다[14]. round-robin이라 함은 측정자의 신분이 노출되지 않고 측정방법만을 가지고 정확도를 결정하는 국제비교연구 프로젝트이다. 96년에 이루어진 두 번째 다이아몬드 열전도도 측정 round-robin은 NIST가 주관이 되어 7개국의 15개 연구소가 참여하여 이루어졌다. 그 결과 de-heated bar방법은 $\pm 5\%$, AC방법(혹은 modified Angstrom method)은 $\pm 10\%$, 기타 photo-thermal방법은 $\pm 15\%$ 정도의 측정정확도를 가짐이 밝혀졌다.

2.3 다이아몬드의 열전도도 매커니즘

앞에서 언급한 바와 같이 다이아몬드는 디바이온도가 매우 높기 때문에 상온에서 intrinsic 포논-포논 산란은 다른 물질에 비하여 매우 약하므로 열전도도가 높아진다. 다이아몬드는 밴드갭은 5.4 eV로서 wide-band-gap 반도체로 분류된다. 상온이상 고온영역에서 자유전자에 의한 열에너지 수송은 거의 이루어지지 않으며 전자에 의한 열전도도 기여는 거의 없다. 그러므로 대부분의 열에너지는 원자진동, 즉 포논에 이루어진다. 비전도성 고체의 열전도도에 대한 포논의 물리적인 이해는 디바이모델을 기본으로 relaxation-time approximation 방법에 의하여 이루어진다[2] [15]. 포논의 진동수와 온도에 따라 몇 개의 산란과정을 거쳐 열전도도(혹은 열저항)를 나타내게된다.

디바이 포논모델에 의한 열전도도 k 는 포논의 진동수와 온도의 적분형으로 다음과 같이 표현된다.

$$k = \frac{1}{3} v \int_0^{\theta/T} I(x) C(x) dx \quad (1)$$

여기서 v 는 고체내 음속, l 은 포논의 평균자유행로 (mean free path), θ 는 Debye 온도로서 포논의 최대 진동수 ω_{\max} 와 $\omega_{\max} = \theta k_B / \hbar$ 의 관계를 갖고 있으며, $x = \hbar \omega / k_B T$, C 는 고체의 비열로서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C(x) dx = \frac{3k_B}{2\pi^2 v^3} \left(\frac{k_B}{\hbar}\right) T^3 \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx \quad (2)$$

포논의 평균자유행로를 구하기 위하여 relaxation-time method을 도입하면 포논들의 산란에 의한 relaxation-time $\tau(x)$ 와 평균자유행로 $l(x)$

와의 관계는 다음과 같다.

$$l(x) = \frac{I(x)}{v} \quad (3)$$

그러므로 위식을 종합하여 열전도도 k 를 포논의 relaxation-time으로 표현하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$k = \frac{k_B}{2\pi^2 v} \left(\frac{k_B}{\hbar}\right)^3 \int_0^{\theta/T} \tau(x) \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx \quad (4)$$

포논산란은 진동수와 온도에 따라 몇 개의 과정으로 나뉘고 이들은 독립적으로 일어난다고 가정한다. 고온에서는 포논의 파장이 매우 짧아서 포논-포논 intrinsic scattering이 주로 일어난다. 이 산란은 Peierls[16]에 의하여 제안되었는데 결정내의 원자들의 포텐셜에너지의 anharmonicity로 인한 산란이다. 만일 결정내 원자들의 포텐셜이 정확히 quadratic-form을 갖는다면 포논들간의 산란이 발생하지 않으며 이 경우에 열전도도는 무한대가 된다. 포논-포논 산란은 두 그룹으로 나뉘는데 포논 모멘텀이 보존되는 normal process(N-process)와 보존되지 않는 umklapp process(U-process)이다. 열전도도에 직접 기여하는 과정은 U-process로서 두 포논이 작용하여 발생되는 제 3의 포논이 first Brillouin zone밖 에 있을 확률이 높아지고, 이때 역격자 벡터를 뺀 경우에 포논의 방향이 역 방향이 되어 결과적으로 열저항(역으로 열전도도)에 기여하게된다. 다이아몬드의 U-process에서 넓은 온도범위에 걸쳐 사용되는 relaxation time의 형태는 다음과 같다 [17].

$$\tau_p^{-1} = BvT\lambda^{-2} \exp(-C/T) \quad (5)$$

여기서 λ 는 포논의 파장, $B = 1.5 \times 10^{-12} \text{cm/K}$, $C = 670\text{K}$ 이다.

열전도도가 극대 값을 보이는 중간온도영역(100 - 200K)에서는 디펙트와의 산란이 일어나므로 Point-defect 산란이라 부른다. Rayleigh ω^4 비례항으로 다음과 같이 표현된다[18].

$$\tau_p^{-1} = \alpha \left[\frac{\hbar}{k_B} \right]^2 \omega^4 \quad (6)$$

여기서 α 는 Rayleigh 산란 상수로서 디펙트의농도, 질량차이 등에 관계되는 량이다. 저온에서는 장파장의 포논들이 그래인바운다리와 산란에 의

한 relaxation-time[19]로서 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_B^{-1} = BL/v \quad (7)$$

여기서 BL은 그레인 바운다리의 평균크기와 관계 있다. 이상 기술한 포논산란과정은 전부 열저항에 서로 독립적으로 기여하여

$$\tau^{-1} = \tau_U^{-1} + \tau_B^{-1} + \tau_P^{-1} \quad (8)$$

으로 쓸 수 있으며 위 식(4)에 대입된다. 이상의 이론식을 이용하여 측정된 CVD 다이아몬드 및 자연 다이아몬드 type IIa의 열전도도 데이터와 비교하여 커브피팅을 한 결과가 그림1에 나타나있다. 여기서 사용한 시편들은 다이아몬드 필름의 열전도도 round-robin[14]을 수행할 때 측정되어진 것들이다. 표 2에 측정된 시편들의 합성방법, 두께, 밀도를 나타내었다. 표 3에는 상온 열전도도와 핏팅파라미터를 보였다. grain boundary의 크기에 따라 열전도도가 잘 설명됨을 알 수 있다.

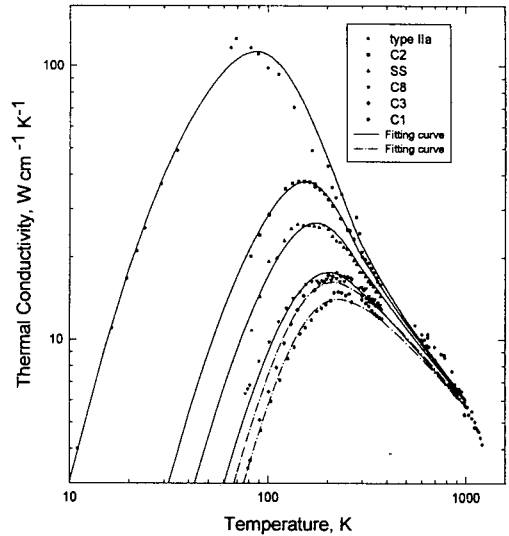


그림 1. 다이아몬드의 열전도도

3. CVD 다이아몬드의 열적응용

표 2. 열전도도 측정 시편의 합성방법, 두께 및 밀도

Specimen	Synthesizing Method	Thickness (mm)	Density (g/cc)
C1	Hot Filament CVD	0.528	3.465
C2	Micro-wave CVD	0.560	3.448
C3	Hot Filament CVD	0.496	3.459
C8	DC Arc Jet	0.709	3.476
SS	Micro-wave CVD	-	-

표 3. 상온 열전도도 및 핏팅파라미터

Specimen	상온 열전도도 (W/cmK)	α (sec ⁻¹ K ⁻⁴)	BL (μ m)
natural type IIa	22	0.04	1000
C1	14.0	0.03	4
C2	20.9	0.04	50
C3	14.5	0.03	5.5
C8	15.3	0.04	8
SS	17.6	0.04	21

CVD 다이아몬드의 고 열전도도는 고집적, 고속, 고출력 전자패키지의 효과적인 heat sink 혹은 heat spreader로서 이상적이다. 넓은 면적의 웨이퍼 스케일로 합성이 가능하므로 더욱 이 방면의 응용이 기대된다. 미국의 Norton Diamond사는 직경 6인치의 다이아몬드 웨이퍼[20]를 합성하고 있으며, 한국의 KIST에서는 4인치 직경의 웨이퍼 합성[21~22]에 성공하였다. 웨이퍼의 직경이 커짐으로서 다이아몬드의 코스트는 계속 떨어지고 있다. 이미 CVD 다이아몬드를 레이저 다이오드와 레이저 다이오드 어레이의 heat sink로 응용은 상용화되어있다. 단일칩 패키지 혹은 멀티칩 패키지에 다이아몬드를 응용하는 연구 등에 대한 소개를 한다[23].

3.1 레이저 다이오드 heat sinks

보통 레이저 다이오드에 1mm×1mm, 레이저 다이오드 어레이에 2~3mm×5~10mm 크기의 CVD 다이아몬드들이 사용된다. 레이저 다이오드 자체가 고열을 방출하므로 다이아몬드를 사용하여 열을 분산시킨다. AT&T에서 제일먼저 상용화에 성공하였다[24]. 레이저 다이오드 어레이에 CVD 다이아몬드의 응용은 Sakamoto[25] 등이 100W

이상의 출력을 내는 monolithic AlGaAs 레이저 다이오드레이에 heat sink로 사용한 결과 열저항을 50%이상 줄어들었음을 보였다.

3.2 Microwave substrates

MMIC(monolithic microwave integrated circuits)는 고열이 발생하여 빨리 열을 분산시킬 필요가 있다. 현재 상용화 되고있는 세라믹스 재료는 열저항이 때로 커지는 경우가 발생하고 있다. 그러므로 고 정밀도의 구멍을 뚫어서 다이를 heat sink에 직접 접촉시키는 방법이 사용되고 있다. 반면에 이러한 구멍은 다른 문제를 야기한다. 즉, 기판에 크랙이 발생하고, 구멍부근의 photoresist의 불균일한 도포문제, 혹은 MMIC 칩의 다이를 정밀하게 부착하는 문제 등이다. GDE System사는 CVD 다이아몬드를 최초로 마이크로웨이브 기판재로 응용하였다. 그림2에서와 같이 F-16전투기에 사용되는 frequency divider에 알루미늄 대신 CVD 다이아몬드를 사용한 예를 보여준다. 다이아몬드를 기판으로 하는 공정이 알루미늄을 기판으로 하는 공정보다 훨씬 간단하므로 전체 코스트는 더 줄어들었다. 더욱이 알루미늄 기판에서와 같은 구멍이 없으므로 전체 열분산이 균일하며 열저항도 현저히 줄어들었다.

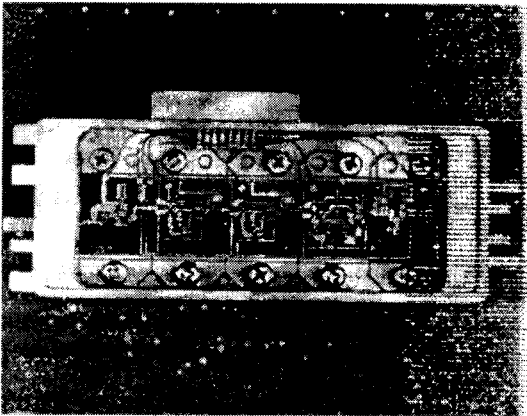


그림 2. 5개의 다이아몬드 substrate를 갖는 마이크로 웨이브 회로(Frequency Divider)

3.3 Single chip package

칩 패키지는 현재 20W정도의 열방출을 시킬 수 있으나 차세대에는 50~100W의 열방출이 요구되

고 있다. 현재 사용되고있는 구리/텅스텐 heat sink 대신 다이아몬드로 대체하면 매우 효과적이다.

Boudreaux 등[26]은 DIP(dual-in line package)와 PGA(pin grid array)에 알루미늄 기판 대신 다이아몬드기판을 사용하였다. 가열시킬 수 있는 저항과 다이오드 온도센서를 부착하여 실리콘테스트 칩을 실버에폭시로 기판에 붙여 테스트하였다. DIP에서 실버에폭시 두께가 180마이크로미터인 알루미늄기판일 때 열저항이 26℃/W이었던 것이 에폭시두께 260마이크로미터인 다이아몬드기판에서는 13℃/W, 130마이크로미터일 때 9.4℃/W로 떨어졌다. 40 pin PGA에서는 알루미늄일 때 열저항 21.2℃/W가 1.5cm×1.5cm×500microns의 다이아몬드를 사용할 경우 12.8℃/W로 떨어졌다.

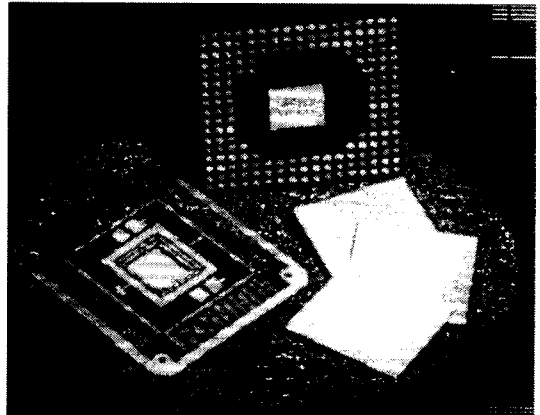


그림 3. Free-standing 다이아몬드와 다이아몬드 substrate를 갖는 electronic package 들의 예

3.4 Power device modules

MCT(MOS-Controlled Thyristors)나 IGBT(Insulated Gate Drive Bipolar Transistors)등의 디바이스에서는 heat flux가 200W/cm²이상일 때도 있다. Nguyen[27]은 고 출력트랜지스터를 여러 기판재에 soldering하여 테스트하였다. 다이아몬드패키지가 BeO와 DBC-BeO패키지보다 열저항이 낮아졌으며 펄스폭이 클수록 더 적어졌다. Fiegel 등[28]은 구리 heat sink와 다이아몬드기판사이에 알루미늄 layer를 넣어서 thermal-shock 흡수용으로 사용하였다.

모듈의 최고 온도가 DBC-Al₂O₃를 사용할 때보다 60% 낮아졌다.

3.5 Multi-chip modules

printed wiring board에서의 칩과 칩 사이의 연결에 따른 시간지연 때문에 MCM(Multi-Chip Module)이 요구되고 있다. Eden은 모듈사이의 2차원적인 연결은 중국적으로 한계가 있으므로 3차원적인 다이들 사이의 직접연결을 차세대 inter-connection으로 제안하였다[29]. 2차원 연결에서 timing clock이 최대 250~300MHz인데 대하여 3차원 패키징에서는 1GHz에 도달가능하다. 3차원적으로 연결된 MCM은 가장자리에서 열을 식혀주어야하므로 다이아몬드를 기판으로 하여 수직방향을 모듈과 모듈사이의 연결시킨 형태가 가능하다. 500W급 시스템에 두께 1mm, 열전도도 15W/cmK인 다이아몬드를 사용하여 가장자리에서 식혀줄 때 42℃상승하였다. 만일 동일 두께의 AlN을 사용할 경우 온도가 370℃까지 상승하게 된다. Eden은 Cray-3급 슈퍼컴퓨터(각 보드 당 36 개칩을 갖는 36개 보드의 천사팩사십만개의 게이트를 포함한 시스템)에서 방출되는 파워를 10cm 정방형 3차원 다이아몬드 MCM으로 컨트롤 가능하다는 것을 계산하였다. TI와 MicroModule Systems 사는 Cu-polyimide박막으로 연결된 다이아몬드 MCM 패키징을 연구하고 있다. TI사는 다이아몬드기판에 다른 종류의 polyimide 층을 깔아 연결구조를 만드는 연구를 하고 있다.

4. 결 론

다이아몬드의 고 열전도도, 높은 전기저항 등의 여러 물리적인 좋은 성질로 인하여 여러 분야에서 공업적인 응용이 기대되며 연구가 진행되고 있다. 특히, 90년대 후반부터 CVD 다이아몬드는 대면적 합성이 가능하여 다이아몬드 웨이퍼의 코스트가 내려가고 있으며 열적인 응용 뿐만 아니라 광학, 전자공학, 기계공학 등에서의 응용연구도 활발히 진행되고 있다. CVD 다이아몬드의 열적응용은 이미 불가능한 기술이 아니며 어떠한 다른 물질보다도 효과적인 thermal amnagement가 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] J. E. Field, Properties of Diamond (Academic, New York, 1979).
- [2] R. Berman, *Thermal conduction in solids*, Clarendon, Oxford, 1976.
- [3] A. Ono, T. Baba, H. Funamoto, and A. Nishikawa, Jpn. J. Appl. Phys. **25** (1986) L808.
- [4] J. A. Herb, C. Bailey, K. V. Ravi, and P. A. Dennig, Electrochem. Soc. Proc. **89-12**, First Internal Symposium on Diamond and Diamond-like Films, (1989) 366.
- [5] D. T. Morelli, C. P. Beetz, and A. Perry, J. Appl. Phys. **64** (1988) 3063.
- [6] D. T. Morelli, T. M. Hartnett, and C. J. Robinson, Appl. Phys. Lett. **59** (1992) 2121.
- [7] J. E. Graebner, J. A. Herb, Diamond Films and Technology, **1-3** (1992) 155.
- [8] J. E. Graebner, Proceedings of the 2nd International Conference on the Applications of Diamond Films and Related Materials, edited by M. Yoshikawa, M. Murakawa, Y. Tzeng, and A. Yarbrough (MYU, Tokyo, 1993).
- [9] T. R. Anthony, W. F. Banholtzer, J. F. Fleischer, L. Wei, P. K. Kuo, R. L. Thomas, and R. W. Pryor, Phys. Rev. B **42**, 1104(1990).
- [10] D. G. Onn, A. Witek, Y. Z. Qiu, T. R. Anthony, and W. F. Banholzer, Phys. Rev. Lett. **68**, 2806(1992).
- [11] J. R. Olson, R. O. Pohl, J. W. Vandersande, A. Zoltan, T. R. ANthony, and W. F. Banholzer, Phys. Rev. B **47**, 14850(1993).
- [12] D. G. Cahill and R. O. Pohl, Phys. Rev. B **35**, 4067(1987).
- [13] D. G. Cahill, Rev. Sci. Instrum. **61**, 802, (1990).
- [14] J. E. Graebner, H. Altman, N.M. Balzàretti, R. Campbell, H.-B. Chae, A. Degiovanni, R. Enck, A. Feldman, D. Fournier, J. Fricke, J. S. Goela, K. J. Gray, Y. Q. Gu, I. Hatta, T. M. Hartnett, R. E. Imhof, R. Kato, P. Koidl, P.K. Kuo, T.-K. Lee, D. Maillet, B. Remy, J. P. Roger, D.-J. Seong, R. P. Tye, H. Verhoeven, E. Worner, J. E.

- Yehoda, R. Zachai, B. Zhang, *Diam. Rel. Mat.* **7** 1589-1604 (1998).
- [15] P. G. Klemens, in *Solid State Physics*, Vol. 7, (F. Seitz and D. Turnbull, eds.), Academic Press, New York, 1958, p. 1.
- [16] R. Peierls, *Ann. Physik* **3**, 1055(1929).
- [17] J. E. Graebner, M. E. Reiss, L. Seibles, T. M. Hartnett, R. P. Miller, and C. J. Robinson, *Phys. Rev. B* **50** 3702(1994).
- [18] Y.-J. Han and H.-B. Chae, *Phy. Rev. B* **52** 27(1995).
- [19] H. B. G. Casimir, *Physica* **5**, 495 (1938).
- [20] G. Lu and W. T. Swann, *Appl. Phys. Lett* **59**, 1556 (1991).
- [21] 국방과학연구소보고서, TEMD-411-971473, 1997.
- [22] 과학기술처 보고서, UCN1518-5963-1, 1977.
- [23] G. Lu, 2nd International Conference on the Application of Diamond Films and Related Materials, ed. by M. Yoshikawa, M. Murkawa, Y. Tzeng, and W. A. Yarbrough, MYU, Tokyo, 269 (1993).
- [24] C. T. Troy, *Phonics Spectra*, Nov. (1992) 28.
- [25] M. Sakamoto, J. G. Endriz and D. R. Scifres, *Electron. Lett.* **28** 197 (1992).
- [26] P. J. Boudreaux, Z. Conner, A. Culhane, and A. J. Leyendecker : 1991 Governemnt Microcircuit Applications COncference Digest of Papers, XVII (1991) 251.
- [27] N. B. Nquyen, *Solid State Tech.*, Feb. (1993) 363.
- [28] B. Fiegel, M. Hibler, W. Kiffe, F. Koch, R. Kuhnert, R. Messer and H. Schwarzbauer, 9th European Hybrid Microelectronics Conference (1993).
- [29] R. C. Eden, *Proc. Int. Symp. Microelectron.*, ISHM (1991) 363.