

Film Technology 應用을 위한 Ceramic Substrate의 熱 傳導度에 관한 考察

鄭命永 / 機具設計室

〈要 約〉

세라믹 재료의 基板에의 응용을 위한 열 전도도의 특성이 여러가지 영향 하에서 고찰되어졌다.

실온에서의 열 전도도는 주로 phonon에 의해 결정되며 phonon conductivity를 한정하는 몇 가지 요소의 제어를 통하여 열 전도도의 향상을 기대할 수 있다.

I. 序 論

Hybrid microcircuit 에 사용되는 기판은 강하고 가벼워야하며, 치수의 안정성, 電氣絶緣性, 우수한 열전도성 및 고온에 견딜 수 있는 특성이 요구된다.

이러한 특성을 고루 갖추고 있는 재료는 아직 개발되지 않고 있으나 알루미늄 세라믹스는 열전도성이 낫다는 점 이외에는 모든 특성이 만족할만 하여 대부분의 hybrid microcircuit 용 기판에 많이 사용되고 있다.

그러나 최근 경향은 회로의 高密度化에 따른 부품의 소형화로 단위 체적당 集積度가 높은 회로가 요구되며 이에따라 열 전도도 (Thermal

conductivity) 가 높은 기판을 필요로 하게 되었다.

그러므로 본 연구에서는 hybrid 제조용 기판으로 사용되는 세라믹 재료의 열 전도도 특성을 고찰함으로써 그것의 향상 방법을 제시하고자 한다.

II. 熱傳導 (Thermal Conduction)

열전도에 관한 관계식 (Fourier rate equation) 은 다음과 같다.

$$q/A = -K \nabla T$$

q : heat flux

A : 열 흐름 방향에 수직인 단면적

K : 열 전도도

∇T : 溫度 勾配

온도 구배하에서 열 에너지 전달의 전도 과정은 단위 체적당 에너지 집중, 이동속도, 외계 (Surroundings) 와의 熱 消散率 (The rate of thermal dissipation) 에 의존하므로 열 전도도에 관한 완전한 해석을 위해서는 이러한 인자들을 이해하여야 한다.

예로서 낮은 온도의 等方性 固體의 열 전도도 (熱傳導度) K는

$$K = \frac{2}{3} \int C_t(\omega) V_t(\omega) l_t(\omega) d\omega + \frac{1}{3} \int C_l(\omega)$$

$$V_e(\omega) l_t(\omega) d\omega$$

C : 비열

V : 이동속도

l : 평균 자유행로

t, l (첨자) : transverse and longitudinal acoustic phonon

ω : phonon frequency

로 표시되는데 C는 에너지 集中, V는 移動速度, l은 熱 消散率과 관계한다.

고체의 열전도는 주로 자유전자에 의존하지만 厚膜基板으로 사용되는 dielectric solid에서의 열전도는 phonon과 photon에 의해서 결정되므로 이 두가지의 전도에 관한 현상을 이해하는 것이 필요하다.

1. Phonon Conductivity

Phonon (Quantum of thermal energy)에 의한 열전도에서는 phonon사이의 相互作用 (Umklapp process)에 의해서 열 전도도가 한정된다. (<그림 1> 参照)



<그림 1> Umklapp Process

또한 格子 缺陷에 의한 anharmonicity는 phonon scattering을 야기시켜 평균 자유행로를 감소시키는데 이 현상도 열 전도도를 감소시키는 요인이 된다.

실온에서 dielectric material의 열전도는 대부분 phonon conduction에 의해 이루어지므로 phonon conduction은 본 연구에서 주로 다루어 질 것이다.

2. Photon Conductivity

Dielectric solid에서는 열전도는 진동 에너지에 의한 것 이외에 높은 주파수의 電磁氣 輻射 에너지로 부터도 나타난다. 복사에너지는 낮은 온도에서는 무시되지만 온도의 4 승값 ($E_r = 4\sigma T^4/c$, c : 광속)을 가지므로 높은 온도에서는 중요한 영향을 미친다. 복사에너지에 의한 열전도도 (K_r)는

$$K_r = \frac{16}{3} \sigma n^2 T^3 l$$

σ : Stefan - Boltzmann constant

n : 굴절지수

로 표시된다.

Photon conductivity에서는 에너지 분포와 평균 자유행로가 파장에 의존하므로 높은 온도에서 소결되는 투명 요업재료 (Translucent ceramic material)에서 중요하지만 실온에서 사용되는 세라믹 기판에서는 무시될 수 있다.

III. 單相 結晶 세라믹스의 Phonon Conductivity

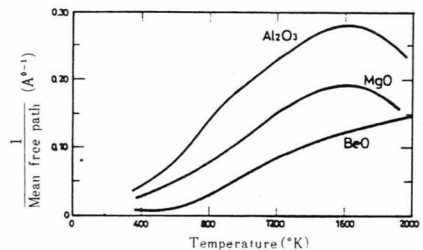
세라믹 기판으로 사용되는 단상 결정 세라믹스의 실온에서의 열전도는 주로 phonon conduction에 기인한다.

Phonon의 평균 자유행로를 한정시켜 열 전도도를 감소시키는 것에는 여러가지가 있으나 가장 근본적인 것은 Umklapp process와 格子缺陷으로 인한 phonon scattering이므로 여러 영향하에서의 이 두가지 현상을 살펴보기로 한다.

1. 溫度的 影響

열 전도도의 변화를 일으키는 온도는 열 전도도의 관계식에 따라서 比熱의 변화를 일으키는 Debye 온도 ($h\nu_{max}/k$: ν_{max} 는 최대 격자 진동수, h는 Planck 상수)와 photon conductivity를 일으킬 수 있는 온도일 것이다. Debye 온도보다 낮은 영역에서는 평균 자유행로의 역수는 온도에 따라 급격히 증가하며 Debye 온도 부근에서는 평균 자유행로의 역수는 線型的으로 증가한다.

높은 온도에서는 평균 자유행로의 역수는 감소하는 경향을 보이는데 이것은 photon conductivity 때문이다. (<그림2> 参照)



<그림 2> 결정 세라믹스의 Inverse phonon mean free path

그래서 열 전도도는 낮은 온도에서 최대가 된 후에 온도가 증가할수록 점점 낮아지다가 photon conduction에 의해 높은 온도에서 약간 증가할 것이다.

2. 構造와 造成의 影響

평균 자유행로의 변화와 이에따른 열 전도도가 온도에 따라 좋은 이론적 근거를 가지고 있고, 실험적 측정과의 좋은 일치를 보인다 하더라도 평균 자유행로의 절대적인 값은 정확하게 알 수 없다. Phonon scattering의 정도와 평균 자유행로의 값은 格子振動의 anharmonicity에 의존한다. 그렇기 때문에 절대적인 계산이 어렵다.

복잡한 구조를 가진 재료는 격자파(Lattice wave)의 thermal scattering의 경향이 커져서 낮은 열 전도도를 가진다.

이방성 결정 구조를 가진 재료의 열 전도도는 결정의 방향에 따라 변화한다. 그러나 온도가 증가함에 따라 이방성 결정이 점점 더 對稱性을 나타내기 때문에 결정의 방향에 따른 열 전도도의 변화율은 감소한다. 열 전도도는 가장 낮은 열팽창 계수를 가지는 방향에서 최대가 되며 격자 진동에 있어서의 anharmonicity는 구성원소의 원자 중량의 차이가 증가할 때 증가하므로 열 전도도는 단순한 구조를 가질 때 최대가 된다.

3. Impurity의 影響

복잡한 구조나 원자 크기의 차이가 격자파의 anharmonicity를 증가시켜 열 전도도를 감소시키는 것과 같이 impurity도 열 전도도를 감소시키는데 그 영향은 평균 자유행로에 의해서 설명된다.

Phonon scattering을 야기하는 요인은 격자에 치환된 원소의 질량차이와 결합력의 차이, 주위의 탄성 변형장으로부터 나타난다. Impurity scattering은 매우 낮은 온도에서는 온도 상승에 따라 증가하나 Debye 온도의 1/2이상되는 영역부터는 온도에 무관하다. 그러나 그 이유는 아직 밝혀지지 않고 있다.

Impurity에 기인하는 scattering의 영향은 단순 결정이고 낮은 온도에서 가장 크다는 것이 알려져 있는데, 이것은 impurity에 의한 평균 자

유행로는 thermal scattering에 의한 평균 자유행로가 최대일 때 최소가 됨을 나타낸다.

4. Boundary의 影響

실온에서 phonon의 평균 자유행로는 약 100Å⁰이나 온도가 증가함에 따라 훨씬 작아지므로 경계에서의 phonon scattering이 발생하게 되는 결정의 크기는 매우 작아진다. 그래서 다결정 구조와 단결정 구조를 가진 재료의 열 전도도는 약 200°C를 경계로 하여 단결정 구조가 큰 값을 가진다.

즉, 재료가 매우 낮은 온도에서 열 전도도가 최대로 되는 것은 입자 경계에서의 phonon scattering이 작기 때문이다. 또한 異方性 재료에서 틈과 같은 형태로 나타나는 기공은 열 전도도를 급격히 감소시킨다.

많은 경계를 가지는 재료는 phonon scattering에 의한 평균 자유행로의 감소로 열 전도도가 감소된다.

5. Crack의 影響

열 충격(Thermal shock)이나 열 팽창의 anisotropy, component material과의 열팽창의 mismatch로부터 발생하는 crack은 열전도에 큰 영향을 미친다.

열 전도도에 관한 crack의 영향은 방향에 따라 다른 값을 가지므로 다음과 같은 세가지 방향에서 해석되어진다.

여기서 crack은 長軸 b를 가진 편타원체로 단순화하여 생각한다.

가. 임의 방향의 crack

Crack이 발생하지 않을 때의 열 전도도를 k₀, 단위 체적당 crack의 수를 N이라고 할 때 열 전도도 K는

$$K = k_0 (1 + 8Nb^3/9)^{-1}$$

나. 열 흐름 방향에 수직으로 놓인 Crack
이러한 경우에는 열 흐름의 가장 큰 감소를 나타낼 것이다. Hasselman은 K를 $K = k_0 (1 + 8Nb^3/3)^{-1}$ 로 평가하였다.

다. 열 흐름에 평행한 Crack

열 흐름의 방해를 초래하지 않을 것이므로 $K = k_0$.

6. 電流의 影響

최근에 A. G. Guy는 비 평형 열역학의 방법을 사용하여 전류가 재료의 열 전도도에 미치는 영향을 다음의 관계식으로 제시하였다.

$$J_q = -\lambda_\infty \frac{dT}{dx} - \epsilon IT$$

$$\lambda_\infty : \lambda_\infty = \frac{\eta}{T} - \sigma T \epsilon^2 \quad (\sigma : \text{전기전도도}, \\ \eta : \text{현상 학적계수})$$

E : absolute thermopower

I : 전류밀도

전류가 흐르지 않을 때 $J_q = -\lambda_\infty \frac{dT}{dx}$ 로 되어 실험적인 결과에서 나타나는 K를 해석할 때 발생하는 오류를 설명할 수 있다. 또한 전류가 흐를 때는 Fourier's law가 더 이상 유효하지 않음을 나타낸다.

IV. 檢討 및 結論

열 전도도에 대한 제 영향의 고려로부터 다음 사항들이 예상될 수 있다.

온도에 대한 영향은 實驗과 理論에 의해 많이 밝혀져 있으나 응용을 위한 熱傳導度 향상에는 기대할 수 있는 인자가 못된다. 構造, 造成 및 impurity의 영향에 대한 고찰에서는 세라믹스 중에서는 beryllia가 열 전도성이 가장 좋은데 대한 근거를 마련해 주며, 구조와 조성의 변화, purity의 향상을 통한 열 전도도의 향상에 대한 방향을 제시하여 주고 있다. Boundary의 영향은 film technology와 관련하여 중요성을 나타내지만 자세한 연구가 필요한 분야이다. Crack

의 발생은 基板의 제작시에 氬空의 제어를 통하여 극소화할 수 있는 요소이다. 왜냐하면 立子境界에 있는 殘留氬空은 열팽창 계수의 불일치에 의한 内部應力이 발생할 때에 crack을 발생시키는 주된 요인이다.

이러한 기공은 충분히 높은 온도에서의 재가열로 擴散에 의하여 기공의 크기를 감소시켜 줄 수 있다.

기공의 크기는 입자의 크기에 의존하므로 열 전도도에 대한 crack의 영향은 입자의 크기에 의존한다고 할 수 있다.

즉, 경계에 의한 phonon scattering과 crack의 영향에 의한 입자의 크기는 서로 상반성을 나타내므로 열 전도도의 고려시에는 입자의 크기에 대한 입자 경계와의 관계가 필요하게 된다.

열 전도도에 대한 전류의 영향도 재료의 열 전도도 측정과 관련되어 연구가 수행되어야 할 분야이다.

參 考 文 獻

1. Jowett, C. E., Compatibility and Testing of Electronic Components, Butterworth & Co. Ltd., 1972
2. Kreith, F., Principles of Heat Transfer, IEP, 1976
3. Kingery, W. D., Introduction to Ceramics, John Wiley & Sons, Inc., 1976
4. Larsen, D. C., Thermal Conductivity, Vol. 16, Plenum, 1982