

解 説

周期加熱法による薄膜の厚さ方向の熱物性評価

池内 賢朗, 島田 賢次
アルバック理工株式会社

(受取日: 2014 年 1 月 22 日, 受理日: 2014 年 4 月 11 日)

Evaluation of Thermophysical Properties of Out-of-Plane Direction of Thin Films by a Periodic Heating Method

Satoaki Ikeuchi and Kenji Shimada

ULVAC-RIKO Inc.

(Received Jan. 22, 2014; Accepted Apr. 11, 2014)

We developed a thermophysical property evaluation instrument of the thin film in out-of-plane direction by the 2ω method. The 2ω method is based on periodic heating and thermoreflectance methods. The measurement result by the 2ω method agrees well with the calculation result on the basis of one-dimensional heat conduction model. The analysis method of the measurement result and the evaluated thermophysical property of the thin film depend on the heating frequency. The 2ω method is expected as the thermal conductivity evaluation of the thermoelectric material film.

Keywords: 2ω method, periodic heating method, thermoreflectance method, thermophysical property of thin film



池内 賢朗
Satoaki Ikeuchi
E-mail: satoaki_ikeuchi@ulvac.com

島田 賢次
Kenji Shimada

1. はじめに

ナノメートル・マイクロメートルオーダーの薄膜材料の開発が進められている。材料開発する上において、アモルファス膜や粒子サイズが小さい膜が求められる場合がある。これらの膜の熱物性値は単結晶の値と異なることが予想され、薄膜の熱物性評価技術の開発が求められている。

基板上に成膜された薄膜の熱物性評価方法は数多く報告されている。**Table 1** に薄膜の熱物性評価方法について示す。ピコ秒サーモフレクタンズ法^{1,2)}と Time-domain thermoreflectance method³⁾は、パルス加熱法によって薄膜の厚さ方向の熱物性を評価している。光交流法⁴⁾は、周期加熱法によって試料の面内方向の熱物性を評価している。光音響法⁵⁾、 3ω 法⁶⁻⁸⁾、光周期加熱サーモフレクタンズ法^{9,10)}、 2ω 法¹¹⁻²²⁾は、周期加熱法によって試料の厚さ方向の熱物性を評価している。これらの方法は、加熱方法と検出方法は異なるが、試料の加熱面と検出面も同じである。評価方法としては広義な意味で同じであるとみなせる。

周期加熱法では、周波数が高くなるに従って温度波の到達距離は短くなる。表層 (Layer 1) - 薄膜 (Layer 2) - 基板 (Layer 3) の3層から成り立つ系において、Layer 1 を加熱した場合、温度波が到達した距離を模式的に示したものを **Fig.1a, 1b, 1c** とする。 3ω 法・光周期加熱サーモフレクタンズ法・ 2ω 法では、表層は加熱・検出膜に対応し、光音響法では表層が存在しない場合、薄膜の表面を加熱している。薄膜は評価対象の膜を表している。

温度波が薄膜を完全に通過する条件 (**Fig.1a**) では、 3ω 法を用いて薄膜の熱伝導率が評価されている。^{7,8)} 薄膜を完全に通過していない条件 (**Fig.1b**) では、光音響法を用いて薄膜の熱伝導率と熱拡散率が評価されている。⁵⁾ 温度波が基板まで完全に到達していないとみなせる条件 (**Fig.1c**) は、2層系と考えることができる。この条件では、光周期加熱サーモフレクタンズ法を用いて薄膜の熱浸透率を評価され、^{9,10)} 3ω 法を用いて薄膜の熱伝導率が評価できる。⁶⁾ 2ω 法では、振幅と位相の両方を用い1次元伝熱モデルに基づいて評価を行うため、原理上3つの条件 (**Fig.1a, 1b, 1c**) 全てにおいて薄膜の評価が可能である。

温度波が薄膜を完全に通過する条件における薄膜の熱伝導率評価として、加藤らは 2ω 法の装置開発を進め製品化 (TCN- 2ω) に成功している。^{11,12)} 我々は、この装置の妥当性を評価するために、3つの条件で評価できることを検証した。本稿では、一次元伝熱モデルによる理論解を基に、各々の条件において 2ω 法で測定した結果を示す。また、応用例として熱電材料薄膜の評価例を記す。

2. 測定原理

2.1 測定原理

2ω 法の装置の模式図を **Fig.2** に示す。金属膜 (表層 Layer 1) 上部を角周波数 ω で電気加熱する。熱量は角周波数 2ω で金属膜に加わるので、金属膜は角周波数 2ω で温度変化する。金属膜表面に一定強度の光 (635 nm) を照射し、反射光中に温度変化に対応した周期変動成分であるサーモフレクタンズ信号が含まれている。温度と反射率の関係は Rosenzwaic らによって報告されている。²³⁾ 反射光はシリコンフォトダイオードで検出する。反射光の中で周期変動成分であるサーモフレクタンズ信号は非常に小さいので、信号を取り出すために、検出部は差動入力方式になっている。ロックインアンプで計測することにより、 2ω の時の振幅 A と位相 θ が得られる。角周波数を変えて測定することにより薄膜 (Layer 2) の熱物性値を得ることが可能である。

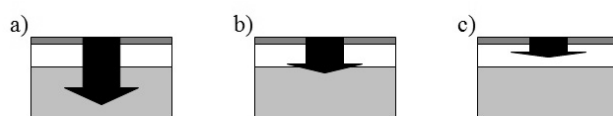


Fig.1 Condition that thermal wave a) perfectly passes to Layer 2, b) perfectly doesn't pass to Layer 2, c) hardly arrives to Layer 3. Layer 1, Layer 2 and Layer 3 shows front layer, thin film and substrate, respectively.

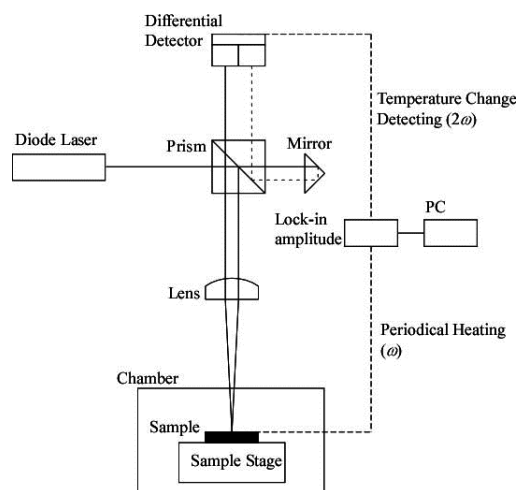


Fig.2 Schematics figure of measurement instrument by 2ω method.

Table 1 Thermophysical property evaluation method in thin film.

Method	Heating method	Detecting technique	Heating surface	Detecting surface
Pico-second thermoreflectance method	Light pulse heating	Thermoreflectance	Rear / Front	Front
Time-domain thermoreflectance method	Light pulse heating	Thermoreflectance	Front	Front
AC method	Light periodic heating	Thermocouple	Front	Rear
Light-acoustic method	Light periodic heating	Acoustic	Front	Front
3ω method	Electric periodic heating	Resistance	Front	Front
Light periodic heating thermoreflectance method	Light periodic heating	Thermoreflectance	Front	Front
2ω method	Electric periodic heating	Thermoreflectance	Front	Front

光の反射信号を検出するので、試料表面は鏡面研磨する必要がある。金属膜 (Layer 1) の条件は電氣的な周期加熱が可能であり光照射の波長でサーモフレクサンス信号が検出されることである。薄膜 (Layer 2) の条件は金属膜に比べて明らかに抵抗が大きく薄膜内部の発熱が無視できることである。

2.2 理論

厚さ方向の 1 次元伝熱に注目して伝熱モデルを構築する。伝熱モデルの仮定条件は、半無限な基板であり、界面熱抵抗が無視でき、金属膜内で一様に加熱がおこることである。以上を考慮して得られた金属膜の表面上の温度 $T_0(0,t)$ の時間依存性は次式になる。¹³⁾

$$T_0(0,t) = \frac{q}{i2\omega C_1} \left(1 - \frac{\sqrt{\omega C_2 \lambda_2} (\sqrt{\omega C_1 \lambda_1 c_1} + \sqrt{\omega C_2 \lambda_2 s_2})}{\sqrt{\omega C_2 \lambda_2 c_1} (\sqrt{\omega C_1 \lambda_1 c_1} + \sqrt{\omega C_2 \lambda_2 s_2}) + \sqrt{\omega C_1 \lambda_1 s_1} (\sqrt{\omega C_2 \lambda_2 c_1} + \sqrt{\omega C_2 \lambda_2 s_2})} \right) e^{i2\omega t}$$

$$c_1 = \cosh \left((1+i) \sqrt{\frac{\omega C_1}{\lambda_1}} d_1 \right), \quad c_2 = \cosh \left((1+i) \sqrt{\frac{\omega C_2}{\lambda_2}} d_2 \right),$$

$$s_1 = \sinh \left((1+i) \sqrt{\frac{\omega C_1}{\lambda_1}} d_1 \right), \quad s_2 = \sinh \left((1+i) \sqrt{\frac{\omega C_2}{\lambda_2}} d_2 \right) \quad (1)$$

q, ω, C, λ, d はそれぞれ体積当り熱量 J m^{-3} , 加熱の角周波数 s^{-1} , 体積比熱容量 $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$, 熱伝導率 $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$, 膜厚 m を示し、添え字 1,2,3 はそれぞれ金属膜 (Layer 1), 薄膜 (Layer 2), 基板 (Layer 3) を示す。式(1)は実部と虚部に分けることができる。

一方、金属膜表面上の温度 $T_0(0,t)$ を振幅 A と位相 θ で表記すると以下の式になる。

$$T_0(0,t) = A e^{i(2\omega t + \theta)} \quad (2)$$

$$= (A \cos \theta + i A \sin \theta) e^{i2\omega t}$$

$A \cos \theta$ は in-phase amplitude に対応し、 $A \sin \theta$ は out-of-phase amplitude に対応する。式(1)と式(2)を比較することにより解析できる。測定で振幅と位相を計測し、基板と金属膜の熱物性値及び金属膜と薄膜の厚さを代入することにより、薄膜の熱物性値は評価できる。実際の測定例を 3 章で紹介する。

式(1)は、薄膜を完全に通過している条件 (Fig.1a) で測定を行う場合か、基板まで完全に届かない条件 (Fig.1c) で測定を行う場合において、近似式で表すことができる。前者の例は加藤らによって式(3)で報告されている。¹²⁾

$$T_0(0,t) = q d_1 \left(\frac{1}{\sqrt{2C_3 \lambda_3}} \frac{1}{\sqrt{2\omega}} + \left(1 - \frac{C_2 \lambda_2}{C_3 \lambda_3} \right) \frac{d_2}{\lambda_2} + \left(\frac{1}{2} - \frac{C_1 \lambda_1}{C_3 \lambda_3} \right) \frac{d_1}{\lambda_1} - \frac{i}{\sqrt{2C_3 \lambda_3}} \frac{1}{\sqrt{2\omega}} \right) e^{i2\omega t} \quad (3)$$

式(3)は文献 11 の式から改訂されている。¹²⁾ 式(2)と式(3)の in-phase amplitude を比較し、基板と金属膜の熱物性値、薄膜の体積比熱容量及び金属膜と薄膜の厚さを代入することにより、薄膜の熱伝導率は評価することができる。実際の測定例を 4 章で紹介する。後者の例を式(4)に示す。

$$T_0(0,t) = q d_1 \left(\frac{1}{\sqrt{2C_2 \lambda_2}} \frac{1}{\sqrt{2\omega}} + \left(\frac{1}{2} - \frac{C_1 \lambda_1}{C_2 \lambda_2} \right) \frac{d_1}{\lambda_1} - \frac{i}{\sqrt{2C_2 \lambda_2}} \frac{1}{\sqrt{2\omega}} \right) e^{i2\omega t} \quad (4)$$

式(4)から熱物性値既知の薄膜の in-phase amplitude の傾きと未知薄膜の in-phase amplitude の傾きが比較できるならば、薄膜の熱浸透率 (熱伝導率と体積比熱容量の積の平方根) が評価できる。実際の測定例を 5 章で紹介する。

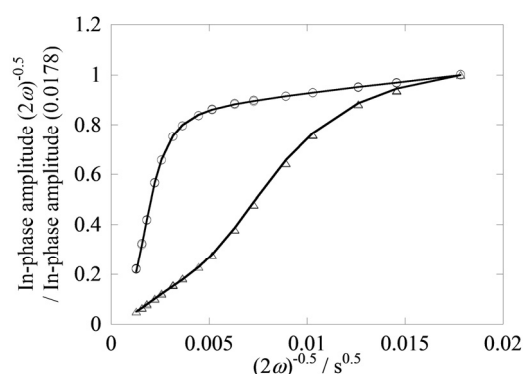


Fig.3 Dependence of relative in-phase amplitude on the minus square root of the angular frequency in polyimide film at 1 μm (open circle) coated on Si substrate and 5 μm (open triangle) coated on Si substrate. The vertical axis is $A \cos \theta$. Solid lines are results analyzed on the basis of one-dimensional heat conduction model.

3. 温度波が薄膜を完全に通過していない条件

3.1 測定試料と測定条件

Si 基板 (525 μm) 上に成膜されたポリイミド膜 1 μm と 5 μm を準備した。薄膜の中央部の 1.7 mm × 15 mm に RF スパッタ法 (RFS-200, アルバック機工製) で金膜を成膜した。金膜は 2.3 Pa の Ar 雰囲気下で 50 V の電圧を 18 分間かけることにより 100 nm に成膜した。測定は、室温・真空中で行い、加熱周波数が 250 Hz – 50000 Hz の領域で実施した。

3.2 測定結果

ポリイミド膜 1 μm と 5 μm の測定結果を Fig.3 に示す。図の横軸は、 $(2\omega)^{-0.5}$ である。図の縦軸は、in-phase amplitude ($A \cos \theta$) を $(2\omega)^{-0.5} = 0.0178$ の時の $A \cos \theta$ で規格化した値である。基板²⁴⁾と金属膜¹¹⁾の熱物性値は過去に報告されている値を用い、1 次元伝熱モデルに基づいてフィッティングした結果を実線で示す。測定結果は 1 次元伝熱モデルと非常によく一致した。¹³⁾

ポリイミド膜 1 μm の低周波数側の測定結果では、in-phase amplitude は、 $(2\omega)^{-0.5}$ に対して直線的に変化している。これは、温度波が基板まで完全に到達し、薄膜と基板の間の反射による影響が無視できることを示している。この周波数領域は Layer 3 まで完全に到達している条件 (Fig.1a) を示している。ポリイミド膜 1 μm の高周波数側になってくにつれて、直線から明らかに外れ、in-phase amplitude は急激に減少する。これは、温度波が短くなり、薄膜と基板の間の反射による影響を受けていることを示している。この周波数領域は Layer 2 を完全に通過していない条件 (Fig.1b) を示している。この周波数領域では、温度波の距離と反射の両方の影響を受けるため、薄膜の熱伝導率と体積比熱容量を同時に求めることができる。この現象は、ポリイミド膜 5 μm の低周波数側でも同様に見られる。ポリイミド膜 5 μm の高周波数側では、in-phase amplitude も $(2\omega)^{-0.5}$ に対して直線的に変化している。この周波数領域では、Layer 3 まで到達していないとみなせる条件 (Fig.1c) を示している。

Fig.3 の結果をフィッティングによって薄膜の熱伝導率と体積比熱容量に換算した結果を Table 2 に示す。これらの結果は、過去に報告されている高分子試料の結果と遜色なかった。²⁴⁾ 2ω 法は 1 次元伝熱モデルに適応した装置であり、薄膜の熱伝導率と体積比熱容量を同時に計測可能な装置である。

Table 2 Thermophysical property in polyimide film.

$d/\mu\text{m}$	$\lambda/\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$	$C/\text{J m}^{-3}\text{K}^{-1}$
1	0.23	1.6×10^6
5	0.26	1.6×10^6

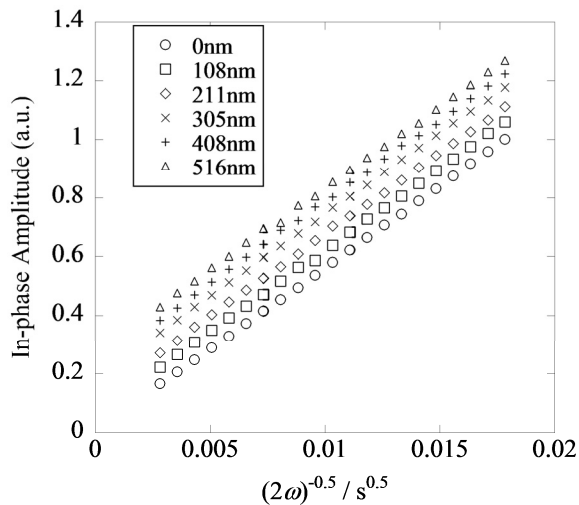


Fig.4 The measurement result of SiO₂ thin film by 2 ω method. Dependence of in-phase amplitude on the inverse of the square root of the angular frequency.

4. 温度波が薄膜を完全に通過している条件

4.1 測定試料と測定条件

鏡面研磨したアルミナ基板 (A473T, 京セラ製, 1000 μm) 上に PECVD 法により成膜した SiO₂ 膜を準備した。¹⁴⁾ 薄膜の中央部の 1.7 mm $\times$ 15 mm に RF スパッタ法 (RFS-200, アルバック機工製) で金膜を成膜した。金膜は 2.3 Pa の Ar 雰囲気下で 50 V の電圧を 18 分間かけることにより 100 nm に成膜した。測定は、室温・真空中で行い、加熱周波数が 250 Hz – 10000 Hz の領域で実施した。

4.2 測定結果

SiO₂ 薄膜の測定結果を **Fig.4** に示す。全ての測定結果は、式(3)の傾きが等しくなるように図示した。薄膜のない場合の測定結果を考慮したうえで式(3)を用い、薄膜の熱伝導率評価を行った。解析で必要なアルミナ基板の熱物性値については、3 ω 法で評価した熱伝導率 (16.4 W m⁻¹ K⁻¹)¹⁴⁾ とカタログ値の体積比熱容量 (密度 $\times$ 比熱容量) (2.8×10^6 J m⁻³ K⁻¹)²⁵⁾ を利用し、薄膜の体積比熱容量は (1.6×10^6 J m⁻³ K⁻¹) を仮定した。

薄膜の熱伝導率の結果を **Table 3** に示す。PECVD 法で作成した薄膜を 3 ω 法で評価した結果^{7,8)}と比較したデータを **Fig.5** に示す。今回の測定結果は、過去に報告されている結果と同様の値を示している。

Table 3 Thermal conductivity in SiO₂ thin film.

d/nm	$\lambda/\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
108	0.93
211	0.96
305	0.87
408	0.93
516	0.98

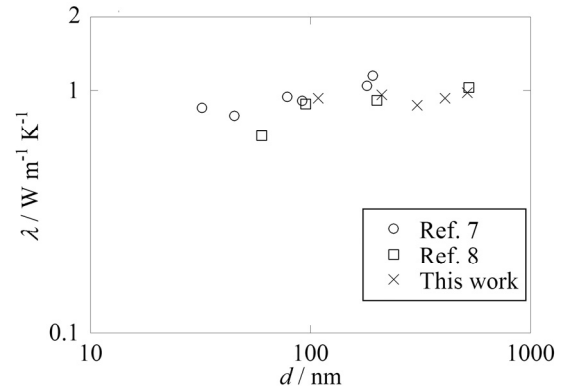


Fig.5 Thickness dependence of thermal conductivity in SiO₂ thin film.

5. 温度波が基板まで完全に到達していない条件

5.1 測定試料と測定条件

温度波が基板 (Layer 3) まで到達していない条件の評価を行うために、表面が鏡面研磨されているバルク材料に金属膜を成膜した試料を用いた。バルク材料は、 $\phi 10$ mm $\times$ 1 mm の Si, Ge, SrTiO₃, SiO₂ ガラスを用意した。バルク材料の中央部の 1.7 mm $\times$ 7 mm に RF スパッタ法 (RFS-200, アルバック機工製) で金膜を成膜した。金膜は 2.3 Pa の Ar 雰囲気下で 50 V の電圧を 18 分間かけることにより 100 nm に成膜した。測定は、室温・真空中で行い、加熱周波数が 200 Hz – 10000 Hz の領域で実施した。

5.2 測定結果

測定結果の一例を **Fig.6** に示す。図の横軸は $(2\omega)^{-0.5}$ であり、図の縦軸は表面温度振幅と投入熱量の商である。縦軸の値は $(2\omega)^{-0.5} = 0.0197$ の時の Si 基板の結果で規格化した値である。4 種類の基板とも測定結果は直線状で表されている。これは、今回の測定試料と測定条件が式(4)の仮定条件を満たしていることを示している。¹⁵⁾

測定結果の傾きの熱浸透率の逆数依存性を **Fig.7** に示す。各基板の熱浸透率は、文献値²⁴⁾の熱伝導率 $\cdot$ 比熱容量 $\cdot$ 密度から見積もった。傾きは熱浸透率の逆数で直線近似は可能である。これは、基板表面が鏡面研磨されており金膜の成膜条件が同じであるならば、金属膜表面のサーモリフレクタン信号が測定結果にほとんど影響を与えないことを示している。熱物性が既知の基板と比較することにより、未知基板の熱浸透率を評価できる。

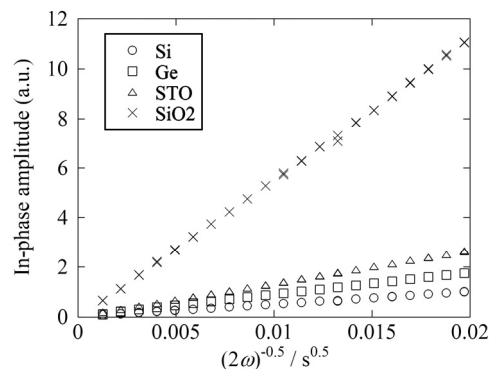


Fig.6 Dependence of in-phase amplitude on the inverse of the square root of the angular frequency in Si (open circle), Ge (open square), SrTiO₃ (open triangle) and SiO₂ glass (cross).

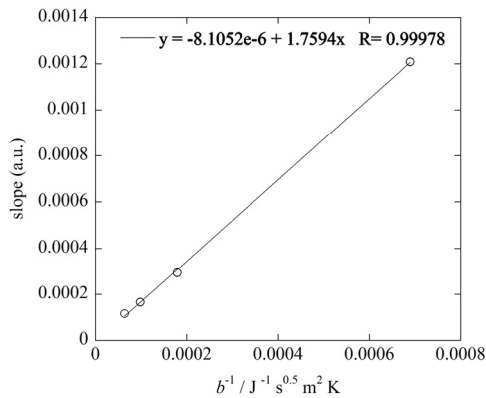


Fig.7 Dependence of slope of Fig.6 on thermal effusivity in Layer 2.

6. 熱電材料薄膜への応用

6.1 概要

熱電材料は温度の差を使って、電気的な信号を取り出せるため、近年研究が盛んになっている。熱電材料の性能指数 Z は、性能指数と温度の積 (ZT) として以下の式で表される。

$$ZT = \frac{S^2}{\lambda \rho} T \quad (5)$$

S , λ , ρ は、それぞれゼーベック係数 $V K^{-1}$ 、熱伝導率 $W m^{-1} K^{-1}$ 、電気抵抗率 Ωm を示す。ゼーベック係数の絶対値が高く、熱伝導率と電気抵抗率が低い材料が求められる。ナノ材料の場合、粒子径が小さく熱伝導率の著しい減少が期待される。ナノ構造を持つ熱電材料薄膜では、性能指数が大きくなることが報告されている。²⁶⁾

ナノメートルオーダーの熱電材料薄膜を評価するためには、熱伝導率が低い薄膜に適した評価方法で行う必要がある。光交流法の場合は、低熱伝導率基板上の高熱伝導率薄膜の評価に適しているが、 2ω 法のような手法では、高熱伝導率基板上の低熱伝導率薄膜の評価に適している。ナノメートルオーダーの熱電材料薄膜について 2ω 法による測定例を次節で示す。

6.2 測定例

Si 基板 (280 μm) 上の SiGe 薄膜 (200 nm) の測定結果を **Fig.8** に示す。横軸は $(2\omega)^{-0.5}$ であり、縦軸は in-phase amplitude である。傾きと切片から式(3)に基づいて熱伝導率を計算すると $5.8 W m^{-1} K^{-1}$ である。¹⁶⁾

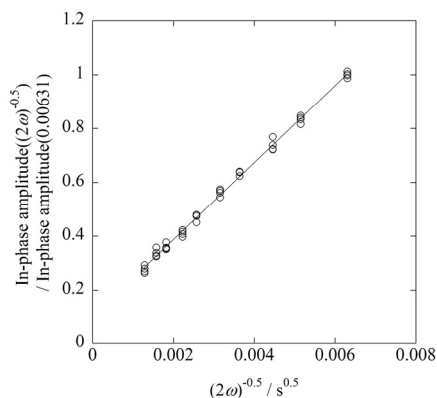


Fig.8 Dependence of in-phase amplitude on the inverse of the square root of the angular frequency in SiGe thin film.

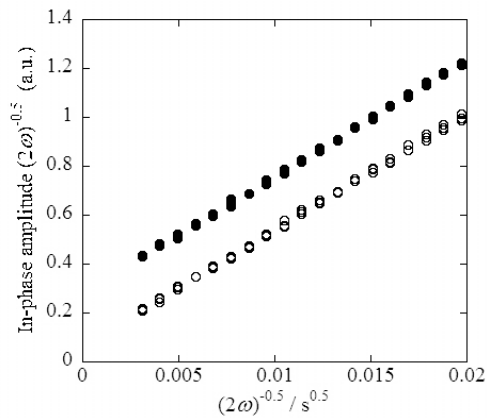


Fig.9 Dependence of in-phase amplitude on the inverse of the square root of the angular frequency in Au film - SiO₂ film - BiTe film - Sapphire substrate (closed circle) and Au film - SiO₂ film - Sapphire substrate (open circle).

熱電材料薄膜は電気抵抗率が低いことが求められる。 2ω 法で測定を行う場合、薄膜の電気抵抗が金属膜の電気抵抗と同程度の場合、金属膜と薄膜の間に絶縁膜を挿入する必要がある。この場合は、金属膜－絶縁膜－薄膜－基板の測定結果と金属膜－絶縁膜－基板の測定結果を比較して薄膜の熱伝導率を評価する必要がある。

BiTe 薄膜の熱伝導率を評価するために、サファイア基板 (1000 μm)-BiTe 膜 (200 nm)-SiO₂ 膜 (100 nm)-金膜の試料とサファイア基板 (1000 μm)-SiO₂ 膜 (100 nm)-金膜の試料を用意した。 2 試料の測定結果を **Fig.9** に示す。 2 試料で傾きが同じである場合、切片は明らかに異なる。これは、BiTe 薄膜の寄与を含んでいる。これらの結果から BiTe 薄膜の熱伝導率を計算すると $0.74 W m^{-1} K^{-1}$ である。¹⁷⁾

最近、 2ω 法を用いて熱電薄膜の熱伝導率を評価した結果が報告されている。¹⁸⁾⁻²⁰⁾ 今後、熱電薄膜の熱伝導率評価の需要は益々高まってくると推測される。

7. まとめと展望

周期加熱法とサーモリフレクタンス法に基づいた 2ω 法の検証を実施した。測定結果は 1 次元伝熱モデルに基づいていることを示した。測定周波数によって、解析方法と得られる熱物性量が異なることを示した。SiO₂ 薄膜については、他の薄膜評価方法で測定した結果と一致することを示した。

2ω 法は、熱電材料薄膜の研究¹⁸⁾⁻²⁰⁾だけでなく、界面熱抵抗の研究^{21,22)}にも応用されている。今後、この手法が低熱伝導率薄膜の評価法として一般化していくことが期待される。

謝 辞

本研究で取り上げた測定試料は、多くの皆様から提供していただきました。株式会社アルバックの大森大輔氏と池野卓人氏にポリイミド薄膜を提供していただきました。九州工業大学の宮崎康次教授、田中三郎博士 (現日本大学) に SiO₂ 薄膜と BiTe 薄膜と提供していただいただけでなく、アルミナ基板の熱伝導率については、自作の 3ω 法による測定もしていただきました。独立行政法人産業技術総合研究所 熱電変換グループの山本淳グループ長に SiGe 薄膜を提供していただきました。厚く御礼を申し上げます。

文 献

- 1) N. Taketoshi, T. Baba, and A. Ono, *Rev. Sci. Instrum.* **76** 094903 (2005).
- 2) M. Kuwahara, O. Suzuki, S. Takada, N. Hata, P. Fons, and J. Tominaga, *Microelectronic Engineering* **86**, 1009-1012 (2009).
- 3) D. G. Cahill, W. K. Ford, K. E. Goodson, G. D. Mahan, A. Majumdar, H. J. Maris, R. Merlin, and S. R. Phillpot, *J. Appl. Phys.* **93**, 793-818 (2003).
- 4) R. Kato, A. Maezono, and R. P. Tye, *Int. J. Thermophys.* **22**, 617-629 (2001).
- 5) 長坂雄次, 熱物性 **15**, 118- 123 (2001).
- 6) D. G. Cahill, M. Katiyar, and J. R. Abelson, *Phys. Rev. B* **50** 6077 (1994).
- 7) S.-M. Lee and D. G. Cahill, *J. Appl. Phys.* **81**, 2590-2595 (1997).
- 8) T. Yamane, N. Nagai, S. Katayama, and M. Todoki, *J. Appl. Phys.* **91**, 9772-9776 (2002).
- 9) T. Yagi, T. Baba, and H. Kato, *Physica C* **412-414** 1337-1342 (2004).
- 10) 池内賢朗, 八木貴志, 加藤英幸, 低温工学 **40**, 335-339 (2005).
- 11) R. Kato and I. Hatta: *Int. J. Thermophys.* **26**, 179-190 (2005).
- 12) 加藤良三, 八田一郎, 第 27 回日本熱物性シンポジウム講演予稿集 J141 (2006).
- 13) 池内賢朗, 島田賢次 第 29 回日本熱物性シンポジウム講演予稿集 B311 (2008).
- 14) 池内賢朗, 島田賢次, 田中三郎, 宮崎康次, 第 31 回日本熱物性シンポジウム講演予稿集, C305 (2010).
- 15) 池内賢朗, 島田賢次 第 30 回日本熱物性シンポジウム講演予稿集 B114 (2009).
- 16) 池内賢朗, 島田賢次, 山本淳: 第 5 回日本熱電学会学術講演会予稿集, S3-3 (2008).
- 17) 池内賢朗, 島田賢次, 田中三郎, 宮崎康次: 第 6 回日本熱電学会学術講演会予稿集, S2-1 (2009).
- 18) Y. Ohishi, K. Kurosaki, T. Suzuki, H. Muta, S. Yamanaka, N. Uchida, T. Tada, and T. Kanayama, *Thin Solid Films* **534** 238-241 (2013).
- 19) N. Uchida, T. Tada, Y. Ohishi, Y. Miyazaki, K. Kurosaki, and S. Yamanaka, *J. Appl. Phys.* **114** 134311 (2013).
- 20) S. Yamasaka, Y. Nakamura, T. Ueda, S. Takeuchi, Y. Yamamoto, S. Arai, T. Tanji, N. Tanaka, and A. Sakai, *Proc. The 32nd International Conference on Thermoelectrics (ICT2013)*, p235 (2013).
- 21) H. Wang, Y. Xu, M. Goto, Y. Tanaka, M. Yamazaki, A. Kasahara, and M. Tosa, *Materials Transactions* **47**, 1894-1897 (2006).
- 22) Y. Xu, H. Wang, Y. Tanaka, M. Shimono, and M. Yamazaki, *Materials Transactions* **48**, 148-150 (2007).
- 23) A. Rosencwaing, J. Opsal, W. L. Smith, and D. L. Willenborg, *Appl. Phys. Lett.* **46** 1013-1016 (1985).
- 24) 日本熱物性ハンドブック, 養賢堂 (2008).
- 25) 電子工業用セラミックス, 京セラ (<http://www.kyocera.co.jp/prdct/fc/product/pdf/electronic.pdf>).
- 26) John W. Fairbanks, Diesel Engine-Efficiency and Emissions Research (DEER) Conference, August (2006).