

Title	ブリルアン振動を用いた酸化物薄膜の弾性定数測定と組織評価
Author(s)	舎川, 知広; 荻, 博次; 中村, 暢伴 他
Citation	日本機械学会論文集A編. 2009, 75(749), p. 72-78
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2917
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

ブリルアン振動を用いた酸化物薄膜の弾性定数測定と組織評価*

舎川知広*¹, 荻博次*², 中村暢伴*²
平尾雅彦*³, 小高秀文*⁴, 木原直人*⁴

Elastic Constant and Microstructure of Oxide Thin Films
Studied by Brillouin Oscillation

Tomohiro SHAGAWA, Hirotsugu OGI*⁵, Nobutomo NAKAMURA,
Masahiko HIRAO, Hidefumi ODAKA and Naoto KIHARA

*⁵ Graduated School of Engineering Science, Osaka University,
1-3 Machikaneyamacho, Toyonaka-shi, Osaka, 560-8531 Japan

This paper studies the elastic constant and microstructure of amorphous SiO₂ (a-SiO₂) thin films deposited on Si substrates. a-SiO₂ thin films were prepared by the reactive sputtering with a Si target in the argon/oxygen mixture gas. We measured the Brillouin-oscillation frequency using a femtosecond pump-probe method. We determined the longitudinal-wave elastic constant from the measured frequency and the refractive index measured by the thin-film ellipsometry. The results show that the elastic constant of the a-SiO₂ thin film highly depend on the microstructure and microcracks. The micromechanics model was developed to explain the decrease of the stiffness with thin pancake-shaped microcracks, which were randomly distributed in the a-SiO₂ matrix. This study demonstrates that the Brillouin oscillation technique is an effective tool for evaluation of not only acoustic properties but also reliability of transparent materials.

Key Words: Nondestructive Inspection, Elasticity, Reliability, Micromechanics, Brillouin Oscillation, Sound Velocity, Oxide Thin Films

1 結 言

金属酸化物は古くはセラミックの主成分として知られている。近年では圧電体や超伝導体、絶縁体、半導体など様々な機能性酸化物が見いだされ、その優れた機能とともに、化学的安定性と作成の容易さから多くの分野において利用されている。特に、酸化物薄膜は、小型化・高機能化が進んだ現代において欠かせない材料である。薄膜化の利点は単に小型化・薄型化のみでなく、薄膜化によって、もしくはそれを多層化することによって、機能性の向上やバルク材では見られなかった新機能の発現が挙げられる。したがって酸化物薄膜は実用・学術の両面から非常に注目されており、電気的、磁氣的、光学的特性及びその作成方法に関する多くの研究が行われてきた^{(1),(2)}。

酸化物薄膜の中でもアモルファス SiO₂ (以下 a-SiO₂ と表記) 薄膜は誘電体多層膜や電子デバイスの絶縁膜として広く利用されている。また近年、超高周波音響デバイスの構成材料としても注目されている⁽³⁾が、a-SiO₂ 薄膜の機械的性質に関する研究は少ない。一般に薄膜はその成膜条件によって異なる内部組織を有する。特

に微小欠陥や不完全結合部は薄膜の強度や寿命を著しく低下させ、デバイスの信頼性を損なう^{(4),(6)}。しかしながら薄膜の健全性を高い再現性と信頼性を持って評価する手法が確立されているとは言い難い。我々は、弾性定数が薄膜デバイスにおける健全性の指標になり得ると考えている。弾性定数は材料本来の値から微小欠陥や不完全結合部の影響を受け大きく変化するためである。また音響デバイスにおいては弾性定数自体が最も重要な設計パラメータであるにもかかわらず、バルク材の弾性定数が用いられている場合が多い。

本研究ではフェムト秒パルスレーザーによって高周波(数十～数百 GHz)の超音波を励起・検出する手法^{(7),(8)}を用いて透過性酸化物薄膜の弾性定数を精度良く測定する手法を提案する。ここでの透過性とは光が超音波の波長の数倍透過する程度の透過性を指す。これはブリルアン振動^{(9),(11)}という現象を利用した測定手法である。ブリルアン振動の周波数は、光の波長、物質の屈折率および音速に依存するため、光の波長と屈折率が既知であれば音速を決定することが可能である。しかも光学計測のため、非接触測定が可能である。本研究では、エリプソメトリー⁽¹²⁾を用いて屈折率を測定した。ブリルアン振動を用いて弾性定数を決定した研究はこれまで報告されていない。本測定手法は薄膜、バルク材に依らず多くの透過性物質へ適用できる。

本研究では、ブリルアン振動を用いて酸化物薄膜の弾性定数を精密に測定する手法の確立、および薄膜の

* 原稿受付 2008年6月27日。

¹ 学生員, 大阪大学大学院基礎工学研究科(〒560-8531 豊中市待兼山町1-3)。

² 正員, 大阪大学大学院基礎工学研究科。

³ 正員, フェロー, 大阪大学大学院基礎工学研究科。

⁴ 旭硝子(株)(〒221-8755 横浜市神奈川区羽沢町1150)。

E-mail: ogi@me.es.osaka-u.ac.jp

弾性定数と内部組織の関連を定量的に議論すること、を目的とする。今回、反応性スパッタリング法を用いて様々な成膜条件で α - SiO_2 薄膜を作成し、そのブリルアン振動の周波数を測定し、弾性定数を決定した。そしてその値が内部組織に強く依存して変化することを確認した。またマイクロメカニクス計算を用いて薄膜内部の欠陥が薄膜の音速に及ぼす影響を議論した。

2 試料

本研究ではアルゴン・酸素雰囲気気体中での Si ターゲットを用いた反応性スパッタリング法により Si 単結晶基板(001)面上に α - SiO_2 薄膜を成膜した。RF スパッタリング法で試料 S1 を、DC スパッタリング法で試料

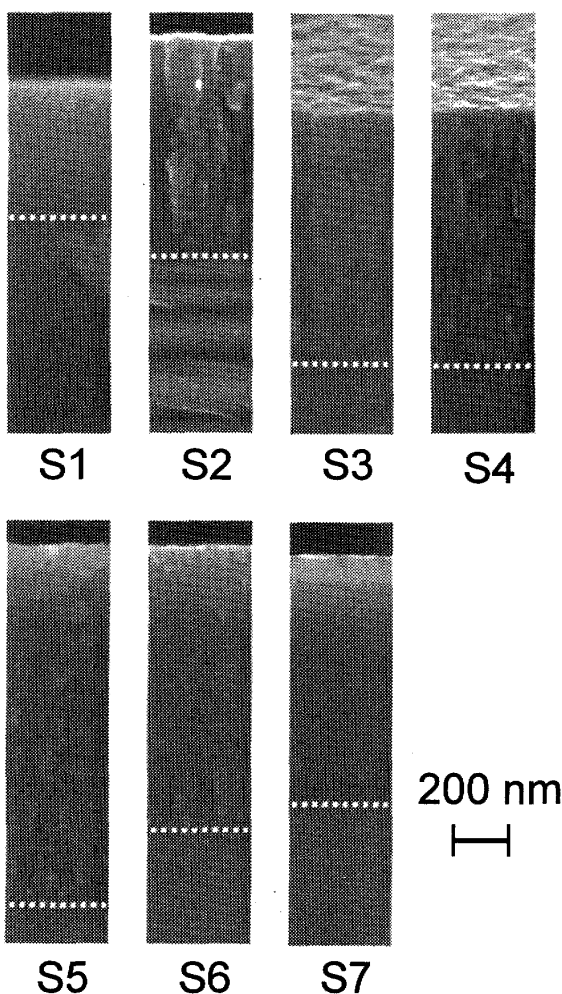


Fig. 1 Cross-section microstructures of α - SiO_2 thin films. The dashed lines indicate the interfaces with the Si substrate. Sputtering conditions (voltage or power, O_2 concentration, substrate temperature) are as follows; S1 (1 W, 80%, RT); S2 (160 V, 3.8%, RT); S3 (190 V, 3.8%, RT); S4 (142 V, 100%, RT); S5 (170 V, 3.8 %, 300 °C); S6 (180 V, 3.8 %, 300 °C); and S7 (190 V, 3.8 %, 300 °C).

S2 ~ S7 を作製した。DC スパッタリングにおいては成膜圧力を 1.3 Pa, 電圧を 140 ~ 190 V, 酸素割合を 3.8 ~ 100%, 成膜時の基板温度を常温 ~ 300°C の範囲で条件を変えながら、薄膜が種々の内部組織を示すように成膜を行った。膜厚は 500 ~ 1000 nm 程度とした。なお、作成した薄膜の内部組織とそれぞれの成膜条件は複雑に関連しており、一つの条件が支配的になることはなかった。作成した試料に対して、走査型電子顕微鏡 (Scanning electron microscopy : SEM) による断面観察を行った。

図 1 に SEM の断面観察結果の代表例を示す。S1 は RF スパッタリング法により作成した試料であり、この手法により成膜した試料は極めて平滑かつ均一な断面組織を示した。S2~S7 の試料は粒状組織を示した。試料 S7 においては明確な粒状組織は確認できなかったが、RF スパッタリング法で作成した試料 S1 に比べると組織の均一性は劣る。また X 線回折法 (X-Ray diffraction: XRD) による結晶構造解析を行った。XRD 測定結果より、全ての試料がアモルファス状態であることを確認した。したがって観測した粒状組織は結晶の配向性によるものではないと考えられる。本研究では粒状組織の他の原因として、微小欠陥や不完全結合部、含有物の偏析を考えた。しかしながら、SEM 画像ではそれらを特定・定量化することはできない。

3 ブリルアン振動を用いた弾性定数測定

本研究では、フェムト秒パルスレーザーを用いて α - SiO_2 薄膜内部に超高周波の超音波を励起し⁽⁷⁾⁽⁸⁾、その超音波によって生じるブリルアン振動⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾を観測することで音速を測定した。図 2 に本研究で構築した光学系を示す。実線は超音波を励起する励起光を表している。破線は超音波を検出するための検出光である。使用した光源にはチタン・サファイアパルスレーザーを用いた。パルス幅は 100 fs, 周期は 80 MHz, 中心波長は 800 nm である。励起光は音響光学素子を用いて 100 kHz の強度変調を与えた。検出光は非線形光学結晶を用いて半波長(400 nm)に変換した。励起光と検出光のパワーは試料表面においてそれぞれ約 40 mW, 10 mW とし、ビーム径はどちらも 50 μm 程度とした。励起光が薄膜表面に到達すると、薄膜表面近傍において局所的・瞬間的な熱膨張が発生し、これにより超音波が発生する。励起光のパルス幅は 100 fs と極めて短く、幅広い周波数成分(数十 ~ 数百 GHz)のひずみパルスを励起する。

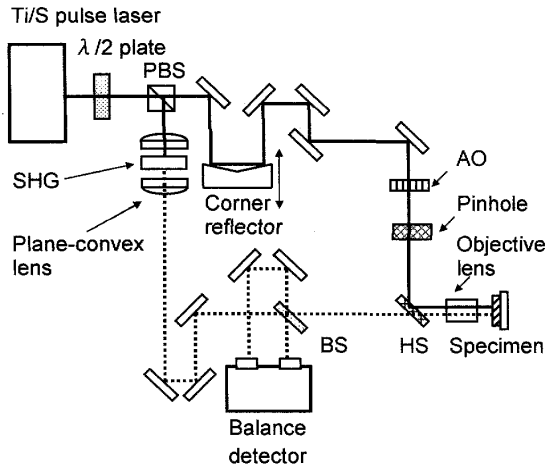


Fig. 2 Schematic of optics. Solid line represents the pump beam ($\lambda=800$ nm). Dashed line represents the probe beam ($\lambda=400$ nm).

図3にブリルアン振動の概略図を示す。超音波が透過性物質内を伝播している場合を考える。検出光は透過性物質内部にまで透過する。超音波は弾性波であるため、これによって物質の誘電率が変化し、さらに屈折率が変化する(光弾性効果⁷⁾。超音波によって生じる周期的な屈折率の変化は超音波の波長と同じ長さを持った屈折率の縞、つまり回折格子と見なせる。超音波の波長の2倍が透過性物質内を伝播する検出光の波長と等しいとき、式(1)で表される垂直入射の場合における Bragg の式を満たし、回折光は互いに強め合う。ここで、 λ_a は超音波の波長、 λ_o は検出光の真空中の波長、 n は物質の検出光の波長に対する屈折率である。

$$2\lambda_a = \frac{\lambda_o}{n} \quad (1)$$

実際は励起光によって様々な周波数の超音波が励起されているが、式(1)を満たす波長の超音波のみが有効な回折格子となりブリルアン振動を生じさせる。このとき、超音波の周波数 f_a は超音波の音速を v とした場合、式(2)のように表される⁸⁾。

$$f_a = \frac{2nv}{\lambda_o} \quad (2)$$

続いて、この回折光と薄膜表面での反射光が干渉を起こすが、超音波によって生じる回折格子は音速で移動しているため干渉光は時間的に変化する。ある時点で干渉光が強め合っていた場合、再び強め合いを起こすのは超音波が光の波長の半波長分だけ移動した時である。結局、強め合いの周波数は式(2)で表される。これがブリルアン振動と呼ばれる現象である。

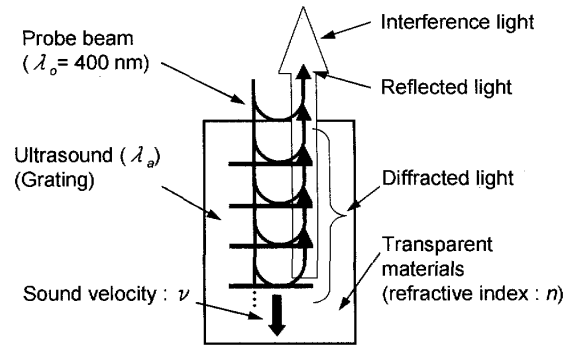


Fig. 3 Schematics of the Brillouin oscillation.

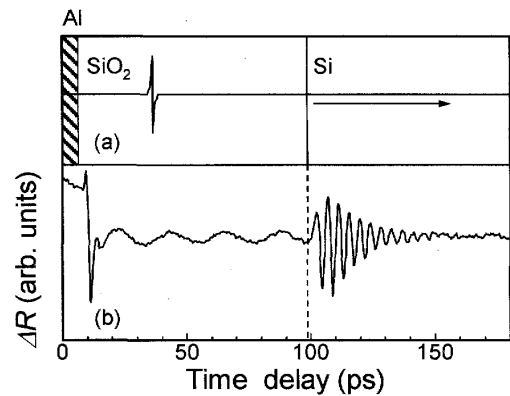


Fig. 4 (a) Acoustic wave propagation in the oxide thin film and Si substrate. Acoustic wave is generated by the pump beam in the Al thin film, and then propagates in the a-SiO₂ film and the Si substrate. (b) Measured Brillouin oscillation signal for the specimen SI (Al (10 nm)/ SiO₂ (500 nm)/ Si). The probe beam ($\lambda=400$ nm) propagates in the a-SiO₂ film and then penetrates into the Si substrate.

図4は励起光によって発生した超音波ひずみパルスが伝わっていく様子を示した模式図(a)と、実際に検出したブリルアン振動の測定結果の例(b)である。実際の測定において、ブリルアン振動は反射した検出光の強度の変化として観測される。試料には超音波を励起するための音源として、a-SiO₂薄膜上にAlを10nm程度成膜した。Al薄膜内で励起光により熱膨張を介して発生した超音波パルスは、a-SiO₂薄膜内を膜厚方向に伝播し、さらにSi基板との界面で一部が透過、一部が反射する。透過した検出光は急激に減衰してゆくが、この間、ブリルアン振動も発生する。したがって、a-SiO₂薄膜内でのブリルアン振動が観測された後、Si基板によるブリルアン振動が観測される。式(2)からわかるように、ブリルアン振動の周波数を測定することにより、物質の屈折率が既知であれば物質の音速を決定するこ

とができる。今回のように薄膜に適用した場合、薄膜内を膜厚方向に伝播する縦波の音速、およびSi基板内部を厚さ方向に伝播する縦波の音速が測定できる。今回の場合、試料がアモルファス材料であるため、試料を等方体と仮定した。このとき、薄膜の縦波弾性定数である $C_L (= \lambda + 2\mu)$ 、 λ と μ はラメの定数は音速を v 、密度を ρ とした場合、式(3)のように表される。

$$C_L = \rho v^2. \quad (3)$$

したがって、薄膜の密度と屈折率が既知であれば、ブリルアン振動の周波数を測定することで、薄膜の弾性定数を決定することが可能である。なおこの手法では、振動の周波数をFFT解析によって決定することが必要となるため、超音波の波長の数倍程度の膜厚が必要となる。

4 結果

図5にブリルアン振動の測定結果を示す。全ての試料において、 $a\text{-SiO}_2$ 薄膜からのブリルアン振動を観測できた。しかしながら、Si基板からのブリルアン振動はS1, S7の二つの試料のみで観測できた。そのほかの試料においては、後述するように $a\text{-SiO}_2$ 薄膜内でブリルアン振動を発生する高周波の超音波成分が減衰したため $a\text{-SiO}_2$ 薄膜からのブリルアン振動の後に見られるはずのSi基板からのブリルアン振動が観測できなかった、と考えられる。

振動の周波数を決定するため、FFT解析を行った。図6に $a\text{-SiO}_2$ 薄膜部分及びSi基板部分でのブリルアン振動のFFTスペクトルの例を示す。このように求めた周波数とエリプソメトリーを用いて測定した波長400 nmにおける屈折率、および一般的な熔融石英の密度($\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$)を用いて縦波弾性定数 C_L を計算した。密度に一般的な熔融石英の値を仮定した理由として、SEMによる断面観察結果では全ての試料において緻密な組織であり体積欠陥が見られなかったこと、体積欠陥に影響されやすい屈折率がばらつきの範囲内で一致していたこと、また、後で示すように、仮に欠陥によって密度の有意な変化が生じた場合、密度の変化が弾性定数に与える影響よりも、欠陥による弾性定数の低下の影響がはるかに大きく密度変化を無視しても本研究の議論における影響は小さいことが根拠となる。図7に C_L および屈折率 n を示す。弾性定数と屈折率の間に有意な相関は見られなかった。RFスパッタリング法を用いて作成したS1が最も高い弾性定数を示した。DC

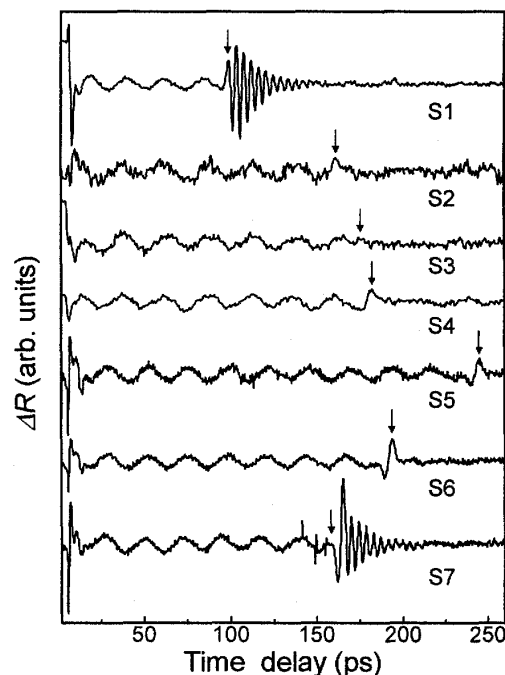


Fig. 5 Brillouin oscillation signals. S1 is the specimen deposited by the RF sputtering. S2~S7 are deposited by the DC sputtering. Arrows represent the time when acoustic wave arrives at the $a\text{-SiO}_2/\text{Si}$ interface, which was calculated by the sound velocity and the film thickness.

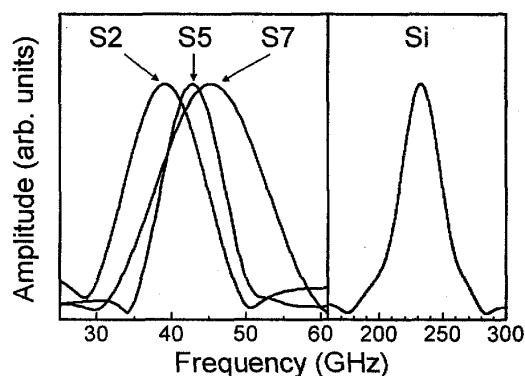


Fig. 6 FFT spectra of Brillouin oscillations of $a\text{-SiO}_2$ thin films (left) and Si substrate of S1 (right).

スパッタリング法を用いて作成したS2~S7の試料は様々な弾性定数を示したが、RFスパッタリング法を用いて作成した試料S1を超える弾性定数を示すものはなかった。

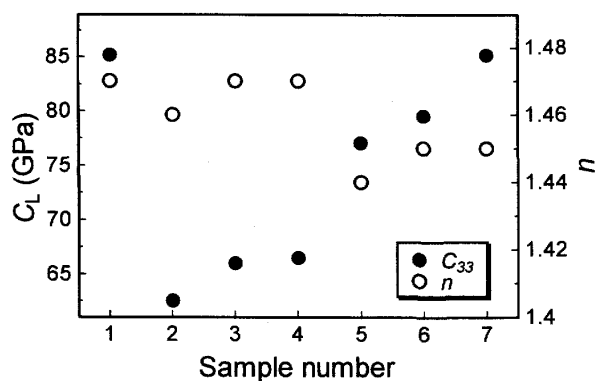


Fig. 7 Measured elastic constants C_L of a-SiO₂ and the refractive index n .

5 考 察

a-SiO₂ 薄膜によるブリルアン振動の周波数は試料によって異なる値を示した。S1 および S7 の二つの試料での Si 基板によるブリルアン振動の周波数は 0.4 % の差異で一致した(234±1GHz)。式(2)、式(3)および Si 単結晶におけるバルク材値($\rho = 2329 \text{ kg/m}^3$ ⁽¹³⁾, $n = 5.57$ ⁽¹⁴⁾)と試料 S1, S7 での Si 基板によるブリルアン振動の周波数から Si 基板の縦弾性定数を求めると $C_L = 164 \pm 1.5 \text{ GPa}$ と算出できる。今回、Si 単結晶の{001}面に垂直に伝播する縦波の音速から弾性定数を決定したため、この値は立方晶 Si の C_{11} に等しい。バルク材の C_{11} は 165.8 GPa と報告されており、1%の誤差で一致した。以上の結果は、この手法を用いて透過性材料の弾性定数を非接触状態で正確に決定できることを示している。

図5ではS1およびS7のみでSi基板によるブリルアン振動が見られた。その他の試料でSi基板によるブリルアン振動が見られなかった。この原因として、a-SiO₂ 薄膜内部での超音波の減衰が考えられる。超音波が、a-SiO₂ 薄膜内で減衰し、その強度が低下すると回折光の強度も低下する。今回の場合、超音波が減衰する原因としてフォノン同士の相互作用による吸収減衰⁽¹⁵⁾、散乱体による散乱減衰⁽¹⁶⁾の二つが考えられる。フォノン相互作用による減衰は超音波の周波数の2乗に比例し、散乱体による減衰は、例えば散乱体となる欠陥のサイズが超音波の波長(235 GHz で約 25 nm)よりも十分に小さいとき(Rayleigh 散乱領域)周波数の4乗に比例することが知られている。式(2)より a-SiO₂ 薄膜によるブリルアン振動では 45 GHz の周波数成分が貢献するのに対して、Si 基板では 235 GHz の周波数成分が貢献すると見積られる。つまり 5 倍以上の周波数差があるため、両者の周波数における減衰係数には大きな差が生じる。

フォノン相互作用による減衰はその要因が原子スケールの現象にあり物質の本質的なものであるため、これが原因となり同じ a-SiO₂ 間で Si 基板によるブリルアン振動が見られなくなるほどの減衰率に差が生じたとは考えにくい。一方で散乱体による散乱はマクロな構造に起因するものであり、その内部構造や欠陥の影響を強く反映する。Si 基板でのブリルアン振動が観測されなかった試料では、SEM 画像において粒状組織が確認できた。これらの試料では薄膜内部の欠陥が散乱体となり超音波が減衰したと考えることができる。また図7の弾性定数の測定結果からも、S1 や S7 といった平滑かつ均質な断面の試料では高い弾性定数を示す一方で SEM 画像において粒状組織が観察された試料では弾性定数が低い。以上より、薄膜内部に存在する欠陥の影響により、減衰の増大と弾性定数の低下が生じた、と考えられる。そこで、マイクロメカニクス計算を用いて欠陥が弾性定数に与える影響を解析した。

ある線形弾性体の母材中に、母材とは異なる弾性定数を有する微小な回転楕円体介在物が無数に存在するとき、この複合材の弾性定数は、Eshelby の等価介在物理論⁽¹⁷⁾および Mori-Tanaka の平均場近似⁽¹⁸⁾を用いることによって、母材の弾性定数と介在物の弾性定数、形状、体積分率から決定することができ、以下のように定式化することができる。

$$\begin{aligned} \mathbf{C}^c &= \mathbf{C}^M + [f_1(\mathbf{C}^I - \mathbf{C}^M)\mathbf{A}^d] \left[f_M \mathbf{I} + f_I \mathbf{A}^d \right]^{-1}, \\ \mathbf{A}^d &= \left[\mathbf{S}(\mathbf{C}^M)^{-1}(\mathbf{C}^I - \mathbf{C}^M) + \mathbf{I} \right]^{-1}. \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{C}^c , \mathbf{C}^M , \mathbf{C}^I はそれぞれ複合材、母材、介在物の弾性定数、 \mathbf{S} は母材のポアソン比および介在物の形状から決定される Eshelby テンソル、 f_M , f_I はそれぞれ母材および介在物の体積分率を表す。

図8に、マイクロメカニクス計算に用いた解析モデルを示す。母材である a-SiO₂ 薄膜内の粒状組織の界面に非常に薄い円盤状の介在物がランダムに存在する場合を仮定し、複合材の弾性定数を求めた。以下に計算手順を示す。

- (i) a-SiO₂ 母材中に短軸方向が一方向に配向した円盤状介在物が無数に存在した複合材料の弾性定数を、式(4)を用いて求める。この材料の弾性定数は巨視的に六方晶系の弾性対称性を示す。
- (ii) 等方体を仮定して(i)で求めた弾性定数を Hill 近似することにより、介在物がランダムに存在する複合材料の弾性定数を求める。

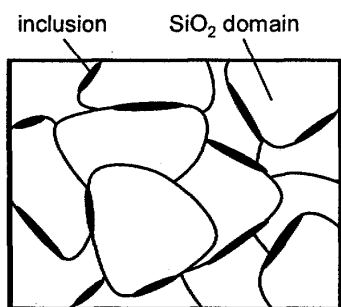


Fig. 8 Microstructure model for the micromechanics calculation. Thin pancake-shape inclusions are present at boundaries of a-SiO₂ particles.

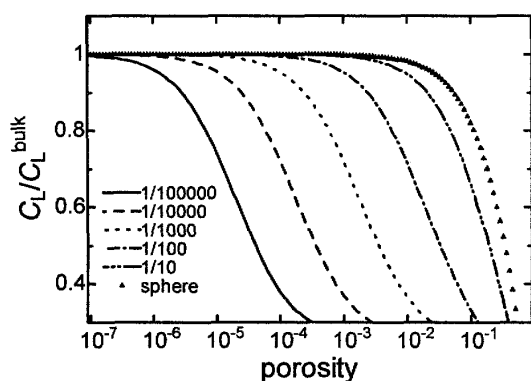


Fig. 9 Relationship between the elastic constants C_L and the volume fraction of the inclusion (porosity).

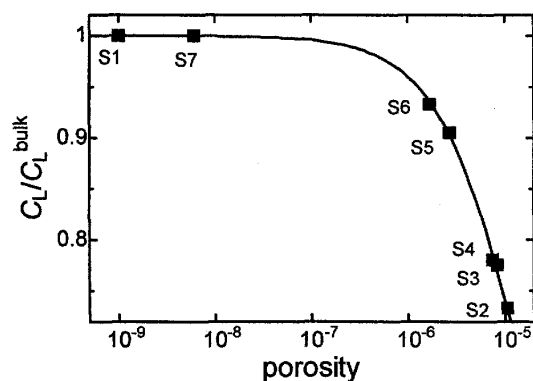


Fig. 10 Relationship between the measured and calculated elastic constants C_L for the defects with the aspect ratio 1/100000.

今回、介在物にはマイクロクラックとして空気を用い、形状は薄い円盤状回転楕円体および球を仮定した。薄い円盤状回転楕円体のアスペクト比には 1/100000~1/10 を用いた。計算に用いた母材の弾性定数は一般的な溶融石英の値($C_{11}=79$ GPa, $C_{44}=31$ GPa)⁽¹⁹⁾とした。以上のような条件の下、それぞれの体積分率に対する弾性定数を計算した。図9に計算結果を示す。アスペクト比が小さいほど気孔率の増加に対する弾性

定数の低下が著しいことがわかる。また、図9には球状の欠陥が存在している場合の計算結果も併せて示している。球状の欠陥を導入した場合、弾性定数の30%もの低下を生じさせるためには20%程度の体積分率を占める欠陥が必要であることがわかる。前述のとおり、SEMによる断面観察結果では、有意な体積分率を持った欠陥が観察できなかったことから、2章で述べた粒状組織の原因のうち、各粒状組織の界面に薄い欠陥や不完全結合部が存在していると考えられる。このようなアスペクト比の大きな欠陥が原因で弾性定数の低下が生じたと考えられる。

一例としてアスペクト比が 1/100000 の場合のマイクロメカニクス計算と測定結果を比較したものを図10に示した。各試料の弾性定数を S1 の弾性定数の値で正規化し、その変化率がマイクロメカニクス計算にフィットする体積分率を算出した。この場合、介在物である欠陥の体積分率が密度への影響が無視できる程度だとしても、その弾性定数は大きく低下することがわかる。また、試料 S5, S6 のような明確な柱状組織を確認できない試料での弾性定数の低下も以上の解析結果および Si 基板によるブリルアン振動が見られないことから、薄膜内部に欠陥が導入されたことが原因であると考えることができる。

6 結 言

本研究では反応性スパッタリング法を用いて、様々な成膜条件の下で a-SiO₂ 薄膜を作成した。フェムト秒パルスレーザーを用いて超音波を励起・検出する手法によりブリルアン振動を観測し、薄膜の弾性定数を測定した。その結果、薄膜の弾性定数は成膜条件によって大きく変化した。特に SEM による断面観察において粒状組織が観察できたもので弾性定数の著しい低下が生じた。弾性定数の低下の原因として、マイクロクラック等の欠陥の存在を考えた。マイクロメカニクス計算により、アスペクト比の極めて小さい円盤状回転楕円体欠陥を導入することで、介在物の体積分率が小さい場合においても弾性定数の大きな低下を再現することができた。以上の結果はブリルアン振動による弾性定数測定によって、薄膜材料を含めた酸化物・半導体材料の組織評価が可能であることを示している。本研究で得られた知見は、薄膜の健全性評価、デバイス開発において大きく貢献することが期待できる。

文 献

- (1) R. B. Laibowitz, R. H. Koch, P. Chaudhari, and R. J. Gambino, *Phys. Rev. B*, **35**, 8821 (1987).
- (2) M. Dawber, K. M. Rabe, and J. F. Scott, *Rev. Mod. Phys.*, **77**, 1083 (2005).
- (3) S. Rabaste, J. Bellessa, A. Brioude, C. Bovier, J. C. Plenet, R. Br eniera, O. Marty, J. Mugnier, and J. Dumas, *Thin Solid Films*, **416**, 242 (2002).
- (4) H. Ogi, G. Shimoike, M. Hirao, K. Takashima, and Y. Higo, *J. Appl. Phys.*, **91**, 4857 (2002).
- (5) N. Nakamura, H. Ogi, and M. Hirao, *Acta Mater.*, **52**, 765 (2004).
- (6) H. Ogi, N. Nakamura, H. Tanei, R. Ikeda, M. Hirao, and M. Takemoto, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 231904 (2005).
- (7) C. Thomsen, J. Strait, Z. Vardeny, H. J. Maris, and J. Tauc, *Phys. Rev. Lett.*, **53**, 989 (1984).
- (8) C. Thomsen, H. T. Grahn, H. J. Maris, and J. Tauc, *Phys. Rev. B*, **34**, 4129 (1986).
- (9) A. Devos and R. Côte, *Phys. Rev. B*, **70** 125208 (2004).
- (10) P. Emery and A. Devos, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 191904 (2006)
- (11) A. Devos, M. Foret, S. Ayrinhac, P. Emery, and B. Rufflé, *Phys. Rev. B*, **77**, 100201 (2008).
- (12) H. G. Tompkins, and W. A. McGahan, *Spectroscopic Ellipsometry and Reflectometry*, John Wiley & Sons, New York, 1999.
- (13) H. Ledbetter, and S. Kim, "Monocrystal elastic constants and derived properties of the cubic and hexagonal elements" in *Handbook of Elastic Properties of Solids Liquids, and Gases*, **2** Academic, San Diego (2001).
- (14) E. D. Palik, *Handbook of Optical Constants of Solids*, Academic Press (1985).
- (15) W. Mason, *Physical Acoustics*, vol. IIIB, p. 254, Academic, New York (1965).
- (16) C. F. Ying and R. Truell, *J. Appl. Phys.*, **27**, 1086 (1956).
- (17) J. D. Eshelby, *Proc. Roy. Soc. London*, **A241**, 376 (1957).
- (18) T. Mori and K. Tanaka, *Acta Meter.*, **21**, 571 (1973).
- (19) D. G. Holloway and D. A. Tawney, *The Physical Properties of Glass*, Wykeham Publications, London (1973).