電子デバイス用薄膜のヤング率測定用精密3点曲げ 試験装置の開発と測定例†

橋本清司* 坂根政男**
大南正瑛** 吉田敏博***

Development of Precision Three-Points Bending Machine for Measuring Young's Modulus of Thin Films for Electronic Devices

by

Kiyoshi HASHIMOTO*, Masao SAKANE**, Masateru OHNAMI**
and Toshihiro YOSHIDA***

This paper describes the precision three-points bending machine developed for measuring Young's modulus of thin films used for electronic devices. The developed machine has $0.05\text{ }\mu\text{m}$ displacement and $9.8\times 10^{-6}\text{ N}$ load resolution. The Young's modulus of $200\text{ }\mu\text{m}$ glass plate in thickness measured by the machine agreed with that of the published value within 3% difference, which shows that the machine has a sufficient performance and reproducibility of the data. The Young's moduli of sputtered Co-Ta-Zr amorphous thin films, of which thickness were ranged from $1\text{ }\mu\text{m}$ to $10\text{ }\mu\text{m}$, were measured. The Young's moduli of the thin films thicker than $4.5\text{ }\mu\text{m}$ showed a constant value of 150 GPa, but those smaller than $4.5\text{ }\mu\text{m}$ in thickness increased with decreasing film thickness. The Young's modulus of $1\text{ }\mu\text{m}$ in thickness showed a value of 250 GPa which is about 70% larger than that of $10\text{ }\mu\text{m}$ in thickness. The Young's moduli measured for the films more than $4.5\text{ }\mu\text{m}$ in thickness well agreed with the bulk Young's modulus of amorphous Co alloy.

Key words: Thin film, Young's Modulus, Composite beam, Precision three-points bending test, Electronic devices, Amorphous

1 緒 言

膜厚が $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下の薄膜の弾性定数の計測は、電子デバイスの強度評価を行う上で重要である。しかし、この分野の研究は、実験手法の困難さから信頼でき得る統一的な見解が得られていない。薄膜の弾性定数として、最も重要なものはヤング率であり、これまでに、薄膜のヤング率が表面効果や結晶の成長条件によってバルクのそれと異なるかどうかの議論が行われてきている。とくに、薄膜のヤング率は膜厚の減少に伴って増加する、あるいは変化しないといった研究例がある。しかし、国内外を通じて薄膜のヤング率を求める研究が活発に行われているものの、系統的に膜厚を変化させてヤング率の膜厚依存性を議論した研究例は少なく、統一的な見解が得られているとはいえない状況にある。この主要な原因は、広範囲の膜厚についての安定した薄膜のヤング率測定法が開発されてこなかっ

たことによると考えられる。

薄膜のヤング率の静的測定法として、これまでにバイメタル法⁷⁾、バルジ法^{5),8),11)}、インデンテーション法^{12),13)}、引張り試験法¹⁴⁾⁻¹⁶⁾および3点曲げ試験法⁴⁾が試みられている。しかし、バイメタル法とバルジ法は、ヤング率を決定する際ポアソン比を仮定する必要がある、薄膜のポアソン比が実験的に評価されていないことから、どちらかといえば、信頼性に難点がある。インデンテーション法は試料作成にマイクロデバイス技術を必要とするため試料作成に難点がある。一方、引張り試験法と3点曲げ試験法は、ポアソン比などの他の弾性定数の介在なしに実験的にヤング率を求めることができる。とくに、組合わせばりの理論に基づく3点曲げ試験法は、試料作成や試験法が容易であるという特徴を有している。

本研究では、まず、薄膜のヤング率の測定のために、新たに開発した精密3点曲げ試験装置について述べる。

† 原稿受理 平成5年7月5日 Received July 5, 1993

* 立命館大学大学院 〒525-77 草津市野路町, Graduate Student, Ritsumeikan Univ., Noji-cho, Kusatsu, 525-77

** 正会員 立命館大学理工学部機械工学科 〒525-77 草津市野路町, Dept. of Mech. Eng., Ritsumeikan Univ., Noji-cho, Kusatsu, 525-77

*** (株)日立製作所ストレージシステム事業部 〒256 小田原市国府津, Data Storage & Retrieval Systems Division, Hitachi Ltd., Kozu, Odawara, 256

さらに, 開発した装置を用いて組合わせばりの理論に基づいた薄膜のヤング率の測定結果について考察する. ヤング率の測定対象とした薄膜は, スパッタリングにより作成した $1\sim 10\ \mu\text{m}$ の膜厚のアモルファス Co-Ta-Zr 薄膜であり, これまでに研究例が皆無であった同薄膜のヤング率の膜厚に伴う変化を明らかにした.

2 解析方法

本研究では, Fig. 1(a), (b) に示すように厚さ h_s , 幅 b の長方形断面を有する基板に膜厚が h_f の薄膜を被覆した組合わせばりの曲げ変形を考える. このときたわみ y の方程式は,

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{E_s I_s + E_f I_f} \quad (1)$$

となる. ここで, M は曲げモーメント, E , I はそれぞれヤング率と断面 2 次モーメントであり, 下添字の s と f はそれぞれ基板と薄膜を表している. 基板と薄膜の組合わせばりの断面 2 次モーメント I_s , I_f はそれぞれ

$$I_s = \frac{bh_s^3}{12} + \frac{\alpha^2(1+\alpha)^2 E_f^2}{4(E_s + \alpha E_f)^2} bh_s^3 \quad (2)$$

$$I_f = \frac{bh_f^3}{12} + \frac{(1+\alpha)^2 E_s^2}{4(E_s + \alpha E_f)^2} bh_s^2 h_f \quad (3)$$

と表される. なお, 基板の厚さと薄膜の膜厚の比を $\alpha = h_f/h_s$ とした.

薄膜つき基板の負荷点での変位 δ_{s+f} は,

$$\delta_{s+f} = \frac{Pl^3}{48(E_s I_s + E_f I_f)} \quad (4)$$

と表すことができる. ここで, P は荷重, l は支点間距離であり, 下添字の $s+f$ は薄膜つき基板を表している.

Fig. 1. Three-points bending for a composite beam.

また, 薄膜を被覆していない基板の負荷点での変位 δ_s は,

$$\delta_s = \frac{Pl^3}{48E_s I}, \quad I = \frac{bh_s^3}{12} \quad (5)$$

と表される. I は薄膜を被覆していない基板の断面 2 次モーメントである.

荷重 P を負荷した場合の薄膜を被覆していない基板と薄膜つき基板の変位比を $\theta = \delta_{s+f}/\delta_s$ とする. α の 3 次以上の項を無視すれば, 薄膜のヤング率 E_f は,

$$\alpha^2(4\theta-1)E_f^2 + \alpha(5\theta+6\alpha\theta-2)E_s E_f - (1-\theta)E_s^2 = 0 \quad (6)$$

で与えられる. したがって, 基板のヤング率 E_s , 変位比 θ および厚さ比 α がわかれば, 式 (6) の 2 次方程式を解くことにより薄膜のヤング率 E_f を求めることができる.

ガラス基板を実験では使用したが, そのヤング率 E_s は, ガラス基板のみの 3 点曲げ試験で得られた荷重-変位関係の傾き m_s を最小 2 乗法によって求め, 次式から算出した.

$$E_s = \frac{l^3}{4bh_s^3 m_s} \quad (7)$$

また, θ はガラス基板のみと薄膜つきガラス基板のそれぞれの荷重-変位関係の傾き m_s および m_{s+f} から次式によって求めた.

$$\theta = \frac{\delta_{s+f}}{\delta_s} = \frac{m_s}{m_{s+f}} \quad (8)$$

3 試験装置の開発および実験方法

3・1 精密 3 点曲げ試験装置の開発

膜厚が $10\ \mu\text{m}$ 以下の薄膜のヤング率を高精度で測定するため, 精密 3 点曲げ試験装置を開発した. Fig. 2 および Fig. 3 に試験装置の構成と概観を, また, 同装置の仕様を Table I に示す.

本試験装置は, 荷重負荷部, 荷重計測部, 変位計測部および支点部から構成されている. 荷重は, 最大移

Fig. 2. Precision three-points bending machine.

Fig. 3. Photograph of precision three-points bending machine.

Table I. Performance of the three-points bending machine.

Test method	3-points bending	
Displacement measurement	Laser displacement meter	
	Resolution	0.05 μm
	Max range	5 mm
Loading device	Encoder auto micrometer	
	Resolution	0.1 μm
Load cell	Electromagnetic balance type	
	Max load	2.94 N
	Resolution	9.8×10^{-6} N
Span distance	30~50 mm	

動量 15 mm, 分解能 0.1 μm のエンコーダ式自動マイクロメータ（中央精機・AME-15）により負荷する機構となっている。このマイクロメータにより、ナイフエッジの移動量を 0.1 μm の精度で任意に制御することが可能である。荷重計測部には、最大秤量 2.94 N, 分解能 9.8×10^{-6} N の電子天びん用電磁平衡式ロードセル（エー・アンド・デイ・FX-300）を使用した。また、変位は、測定範囲 $\pm 500 \mu\text{m}$, 分解能 0.05 μm のレーザ式ミクロン変位計（キーエンス・LD-2500）を使用することによって、非接触で計測した。

支点には低起動ミニチュアベアリング（外径 $\phi 12$ mm）を用いて試料の支点での移動を容易にした。また、支点部は精密微動送りステージ（中央精機・LS-641）で構成されているため、支点間距離を 30~50 mm で正確に設定することが可能である。試験装置の各部の位置決め、支点間距離の計測およびナイフエッジの位置決めは、最大移動量 50 mm, 分解能 1 μm の光電式マイクロメータ付き精密送り装置（中央精機・LS-241-C₄）と前述のレーザ変位計により行った。なお、試験装置は空気ダンパ式防振台（東京光電子工業・AYN-1007）上に設置し、風防で装置全体を覆うことにより振動および外気の乱れによる計測結果のバラツキを極力小さくした。

本試験装置は、Fig. 2 に示すように試料をはさんで相対する位置にナイフエッジとレーザ変位計を設置した構造となっている。したがって、試料の負荷点での

Table II. Mechanical property of glass plate.

Corning's code number	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio ν	Density (g/cm^3)	Knoop hardness KHN ¹⁰⁰
#0211	74.4	0.22	2.57	608

変位を直接、高精度に計測できるところが特徴である。

3・2 ガラス基板および薄膜試料

薄膜を成膜する基板として $46^{\text{L}} \times 16^{\text{W}} \times 0.2^{\text{t}}$ mm³ のコーニング社製マイクロシートガラス（#0211）を使用した。Table II にガラス基板の機械的性質を示す。ヤング率を測定した薄膜は、Co を主成分とするアモルファス Co-Ta-Zr 薄膜である。アモルファス・スパッタリング装置を用いて成膜時間で膜厚を制御し、ガラス基板の片面の全領域に薄膜を成膜した。なお、

Fig. 4. Flow for measuring Young's modulus of thin films.

薄膜の膜厚は試験終了後、薄膜の一部をエッチングによって除去し、分解能 $0.005\ \mu\text{m}$ の段差計（テンカー・ α -step）で計測した。また、ガラス基板上の薄膜は均質であり、膜厚は全領域でほぼ均等であった。

3・3 実験方法

3点曲げ試験は大気中、常温で実施し、支点間距離は $36.000\ \text{mm}$ とした。初期荷重として $0.196000\ \text{N}$ を与えた状態から初期荷重を含めて $0.980000\ \text{N}$ の荷重を負荷し、その後、初期荷重まで除荷する方法で実験を行った。なお、変位は $0.098000\ \text{N}$ ごとに除荷方向のみで計測した。また、一つの試料に対して3回同じ実験を繰り返し、それらの平均値をデータとして採用した。なお、薄膜つきガラス基板では、成膜面を下にした状態で実験を行った。以上の実験条件は、後述する確性試験結果に基づいて決定した。

薄膜のヤング率の決定方法を Fig. 4 に示す。まず、ガラス基板の幅および厚さを分解能 $1\ \mu\text{m}$ の拡大投影機で計測する (Step 1)。幅は異なる6点での計測データの平均値とした。また、厚さは異なる10点での計測データの平均値とした。つぎに、ガラス基板のみについて3点曲げ試験を実施し、ガラス基板のみの荷重-変位関係の傾き m_s を得る (Step 2)。測定を終えたガラス基板上に所定の膜厚の薄膜をスパッタリングで成膜して薄膜つきガラス基板を作成する (Step 3)。さらに、この薄膜つきガラス基板について3点曲げ試験を実施し、薄膜つきガラス基板の荷重-変位関係の傾き m_{s+f} を得る (Step 4)。 m_s および m_{s+f} から式 (8) により θ を求め、式 (6) から薄膜のヤング率を決定する (Step 5)。なお、本研究では前述したような分解能を有している計測機器を用いたため、薄膜のヤング率を有効数字3桁で求めることができた。

4 実験結果および考察

4・1 試験装置の確性試験結果

新たに開発した精密3点曲げ試験装置の安定性とデータの再現性を確認するため、試験装置の確性試験を実施した。

まず、最大負荷荷重を求めるため、ガラス基板の静的3点曲げ破壊試験を実施した。ガラス基板がぜい性破壊した荷重が約 $1.176\ \text{N}$ であったことから、この荷重の83%に相当する $0.980000\ \text{N}$ を最大負荷荷重とした。

負荷および除荷に伴う荷重-変位関係のヒステリシスの有無を確認するため、初期荷重 $0.196000\ \text{N}$ を与えた後、初期荷重を含めて $0.980000\ \text{N}$ まで負荷し、その後、除荷する実験を行った。ここで、変位は負荷および除荷過程とも $0.098000\ \text{N}$ ごとに計測した。なお、実験はガラス基板のみと $10\ \mu\text{m}$ の薄膜つきガラス基板について実施した。両試料の測定結果を Fig. 5

Fig. 5. Load-displacement relationship under loading and unloading.

(a), (b) に示す。同図から、両試料ともに荷重-変位関係に良好な直線関係が成立しており、また、負荷および除荷過程の荷重-変位関係も良好に一致していることがわかる。すなわち、負荷および除荷に伴うヒステリシスは存在しないことが確認された。

実験の再現性を確認するため、上述の実験を3回繰り返した。なお、実験データは除荷方向でのみ求めた。この実験は Fig. 5 に示したものと別ガラス基板と $1\ \mu\text{m}$ の薄膜つきガラス基板について実施した。両試料について得られた測定結果を Fig. 6 (a), (b) に示す。両試料とも荷重-変位関係は Fig. 5 で示した結果と異なっているが、3回繰り返した実験の結果が良好に一致していることがわかる。とくに、初期荷重を含めて $0.980000\ \text{N}$ を負荷したとき、3回の繰り返し実験での変位の最大相対差は、ガラス基板のみでは 0.6% 、薄膜つきガラス基板では 0.8% であった。したがって、本試験装置を用いた3点曲げ試験で得られたデータは、十分な再現性を有していることが確認された。

また、Fig. 5 および Fig. 6 から、ガラス基板および

(a) Glass plate.

(b) Glass plate with 1 μm thin film.

Fig. 6. Reproducibility of load-displacement relationship.

薄膜つきガラス基板ともに、荷重-変位関係には良好な線形関係が成立していることがわかる。とくに、両図(b)から、膜厚が異なっても、線形性が失われていないことがわかる。また、図示を略したすべての実験結果においても、良好な線形関係が得られた。これらのことから、実験を行った荷重範囲では式(4)および式(5)で示される荷重-変位の線形関係が実験的にも成立することがわかる。

4・2 ガラス基板のヤング率

薄膜のヤング率の測定に先立って、15枚のガラス基板のヤング率を測定した。式(7)を用いて求めたガラス基板のヤング率をFig. 7とTable IIIに示す。コーニング社のカタログ値によると、ガラス基板のヤング率は74.4 GPa (Table IIIでRef.の値)である。Fig. 7から、各試料間のヤング率のバラツキは小さいことがわかる。また、Table IIIから、測定したガラス基板のヤング率はカタログ値と較べ、最大でも3.36%の差で良好に一致している。したがって、3点曲げ試験から得られた荷重-変位関係の傾きから求

Fig. 7. Young's modulus of glass plates.

Table III. Young's modulus of glass plates.

Testpiece number No.	Young's modulus (GPa)	Difference (%)	Testpiece number No.	Young's modulus (GPa)	Difference (%)
G1	76.8	+3.23	G9	74.6	+0.269
G2	75.4	+1.34	G10	76.8	+3.23
G3	76.0	+2.15	G11	75.7	+1.75
G4	76.1	+1.02	G12	76.3	+2.55
G5	75.7	+1.75	G13	75.2	+1.08
G6	75.0	+0.81	G14	74.8	+0.538
G7	75.6	+1.61	G15	76.9	+3.36
G8	73.8	-0.81	Ref.	74.4	—

めたガラス基板のヤング率が十分な精度を有していることが明らかになった。

4・3 アモルファス Co-Ta-Zr 薄膜のヤング率

スパッタリングにより作成した膜厚が1~10 μm のアモルファス Co-Ta-Zr 薄膜のヤング率を測定した。Table IVに測定した薄膜のヤング率の一覧を示す。また、Fig. 8にヤング率の膜厚に伴う変化を示す。

Table IV. Young's modulus of amorphous Co-Ta-Zr thin films with different thickness.

Testpiece number No.	Film thickness (μm)	Young's modulus (GPa)	Testpiece number No.	Film thickness (μm)	Young's modulus (GPa)
G1	10.2	134	G9	2.91	169
G2	9.36	180	G10	1.73	205
G3	8.26	155	G11	1.94	226
G4	4.03	190	G12	2.01	138
G5	4.37	186	G13	0.878	243
G6	4.66	149	G14	0.900	278
G7	2.62	166	G15	0.900	Fractured
G8	2.50	209	—	—	—

Fig. 8. Variation of Young's modulus of amorphous Co-Ta-Zr thin films with film thickness.

同図中には、Co-Ta-Zr と同様に Co を主成分とするアモルファス Co-Si-B のバルクのヤング率 149 GPa を破線で示した¹⁷⁾。

同図から、アモルファス Co-Ta-Zr 薄膜のヤング率は膜厚が 4.5 μm 以上で、ほぼ 150 GPa の一定値を示すことがわかる。また、この値は破線で示したアモルファス Co-Si-B のバルクのヤング率にはほぼ等しい。これらの結果は、本研究で開発した 3 点曲げ試験装置と組み合わせばりの 3 点曲げ試験による薄膜のヤング率測定法が有効であることを示している。

一方、4.5 μm 以下の膜厚の薄膜では、膜厚の減少に伴って大きくヤング率が増加することがわかる。特に、1 μm の薄膜のヤング率は 250 GPa であり、4.5 μm の薄膜のヤング率のおよそ 70% も大きな値で示している。アモルファス Co-Ta-Zr 薄膜のヤング率が 4.5 μm 以下の膜厚で上昇することは、本研究で明らかになった新しい知見である。

なお、膜厚の減少に伴って薄膜のヤング率が増加する研究例は、結晶材料については真空蒸着 Au 薄膜³⁾、スパッタ Cr 薄膜⁴⁾および Ti 薄膜⁵⁾について報告されている。これらの薄膜のヤング率増加の原因は、必ずしも明確にされていないが、これまでの研究では結晶方位の影響や酸化の影響であると推論されている。本研究で用いた試料はアモルファスであり、また酸化も考え難いことから上記以外の原因によってヤング率が上昇したものと考えられる。1つの原因として薄膜の表面エネルギーの寄与が推察されるが、今後、定量的な解析も含めて検討を行っていく予定である。

4.4 薄膜のヤング率測定法の検証

本研究で新たに提案した薄膜のヤング率を決定する式 (6) の有用性について考察する。すなわち、 α の 2 次の項を含む式 (6) から得られた薄膜のヤング率と、

Fig. 9. Comparison of Young's modulus of amorphous Co-Ta-Zr thin films calculated by Eq. (6) with that by Eq. (9).

塚本ら⁴⁾が提案した α の 2 次以上の項を無視した α の 1 次式から求めたそれの比較を行った。なお、 α の 1 次式による方法は次式で表される。

$$E_f = \frac{E_s(1-\theta)}{\alpha(5\theta-2)} \quad (9)$$

Fig. 9 に実験的に求められた E_s , θ および α の代表的な値を用いて式 (6) および式 (9) から得られたヤング率の比較を示す。同図から式 (6) で求めたヤング率に比べ、式 (9) のそれは 1 μm の膜厚の薄膜でおよそ 2.1%、また、膜厚が 10 μm では、16.5% も大きな値を示すことがわかる。前節では、式 (6) で求めた薄膜のヤング率が、4.5 μm 以上の膜厚でバルクのヤング率に近い良好なデータを示した。したがって、 α の値が大きい場合、すなわち、基板の厚さに対して膜厚が相対的に厚い薄膜については、 α の 2 次の項まで考慮した方が高精度なヤング率を測定できることがわかる。また、本研究のように異なる膜厚の薄膜のヤング率を同一厚さの基板を用いて測定する場合、式 (6) の方がより有効である。

Fig. 10 に $\theta (=m_s/m_{s+f})$ と $\alpha (=h_f/h_s)$ の関係を示す。膜厚が 10 μm ($\alpha=0.05$) の薄膜では、 θ がおよそ 0.78 であるのに対して、1 μm ($\alpha=0.005$) の薄膜では、0.96 である。すなわち、10 μm の薄膜のヤング率の測定では、薄膜つきガラス基板の荷重-変位関係の傾きはガラス基板のみのそれに比べ、22% も変化するのに対して、1 μm の薄膜ではわずか 4% の変化である。しかし、膜厚が 4 μm ($\alpha=0.02$) 以下での θ のバラツキは実線に関して $\pm 1.5\%$ 以下であり、今回測定した膜厚の範囲では膜厚が変化しても測定誤差が大きく変化することはないといえる。

θ および α を用いて薄膜のヤング率を決定する本測定法で 1 μm 未満の薄膜のヤング率をさらに高精度で

Fig. 10. Variation of θ with α .

求めるためには、板厚の薄いガラス基板を使用することが有効な手法であると考えられる。

5 結 言

(1) 膜厚が $10\ \mu\text{m}$ 以下の電子デバイス用薄膜のヤング率を測定するため、新たに精密3点曲げ試験装置を開発した。本試験装置は、薄膜のヤング率を有効数字3桁で求めるための荷重と変位の測定分解能を有している。また、今回開発した試験装置はデータの十分な再現性を有していることが判明した。

(2) ガラス基板のヤング率はカタログ値と比べ、最大でも3.36%の差で良好に一致することが明らかになった。したがって、3点曲げ試験で得られた荷重-変位関係の傾きからガラス基板のヤング率を求める方法が有効であることが確認された。

(3) 組合わせばりの理論に基づく3点曲げ試験による薄膜のヤング率測定法を用いて、アモルファス Co-Ta-Zr 薄膜のヤング率の測定を試みた。スパッタリングによって作成したアモルファス Co-Ta-Zr 薄膜のヤング率は、膜厚が $4.5\ \mu\text{m}$ 以上で、ほぼ $150\ \text{GPa}$ で一定値を示すことが判明した。この値は、アモルファス Co-Si-B のバルクのヤング率とほぼ等しいことが確認された。したがって、本研究で開発した手法が薄膜のヤング率測定に有効であることを確認した。

(4) アモルファス Co-Ta-Zr 薄膜では、 $4.5\ \mu\text{m}$ 以下の膜厚で、膜厚の減少に伴ってヤング率が増加することが明らかになった。特に $1\ \mu\text{m}$ の薄膜のヤング率

は $250\ \text{GPa}$ であり、 $4.5\ \mu\text{m}$ の薄膜のヤング率のおよそ70%も大きな値を示した。

(5) 本研究で提案した厚さ比 α の2次の項を含む式は、異なる膜厚の薄膜のヤング率を同一厚さの基板を用いて測定する場合に有効であることを示した。

本研究を行うに当たり、当時、立命館大学生尾崎勉君および真田恒明君の協力を得た。ここに謝意を表す。また、本研究は文部省科学研究費補助金(試験研究(B)(1)課題番号04555030)の補助を得て行った。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 板橋昌夫, 根本強一, 日本機械学会調査研究分科会成果報告書 (P-SC124), 111 (1989).
- 2) 金原 繁, 藤原英夫, “薄膜”, 105 (1980) 裳華房
- 3) A. Catlin and W. P. Walker, J. Appl. Phys., **31**, 2135 (1960).
- 4) 塚本雄二, 山口弘高, 柳沢雅弘, 電子通信学会技術研究報告, MR86-29, 9 (1986).
- 5) 高野 登, 広瀬幸雄, 七山幸夫, 日本材料学会第40期総会学術講演会前刷, 161 (1990).
- 6) K. Uozumi, H. Honda and A. Kinbara, Thin Solid Films, **37**, L49 (1976).
- 7) 清野 豊, 計量研究所報告, **36-2**, 81 (1987).
- 8) 田畑 修, 五十嵐伊勢美, 日本機械学会調査研究分科会成果報告書 (P-SC124), 90 (1989).
- 9) D. A. Hardwick, Thin Solid Films, **154**, 109 (1987).
- 10) W. D. Nix, Metall. Trans. A, **20**, 2217 (1989).
- 11) P. Lin and D. Senturia, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., **188**, 41 (1990).
- 12) T. P. Weihs, S. Hong, J. C. Bravman and W. D. Nix, J. Mater. Res., **3**, 931 (1988).
- 13) L. J. Farthing, T. P. Weihs, D. W. Kisker, J. J. Krajewski, M. F. Tang and D. A. Stevenson, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., **130**, 123 (1989).
- 14) 尾田十八, 山田耕作, 坂本二郎, 久保田隆司, 日本機械学会論文集, A-57, 214 (1991).
- 15) S. S. Brenner, J. Appl. Phys., **28**, 1023 (1957).
- 16) D. M. Marsh, J. Sci. Instrum., **36**, 165 (1959).
- 17) 井野博満, 村山和郎, 鯉沼秀臣, 七尾 進, “アモルファス材料”, 138 (1985) 東京大学出版会