Si 単結晶の結晶方位が光弾性特性におよぼす影響*

五味 健 二^{*1}, 新 津 靖^{*1}Influence of Crystalline Orientation on Photoelastic Property
of Si Single Crystal

Kenji GOMI and Yasushi NIITSU

We developed an optical birefringence measurement method that uses a photoelastic modulator and a polarized laser. A He-Ne infrared laser is adopted as the light source for measuring the optical birefringence in silicon wafers. In this paper we explain the theory and process of measurement of stress in Si wafers. The magnitude of principal stress difference as well as the directions are obtained simultaneously and quantitatively using our developed equipment. The optical birefringences of {100}, {111} and {110} Si stressed specimens were measured. From the experimental results, it was found that the photoelastic constant depended on the crystalline orientation and the birefringence direction did not coincide with the principal stress direction. By stress strain analysis of the Si single crystal, it was found that the birefringence direction coincided with the principal strain direction and the relation between the principal strain difference and the retardation was independent of crystalline orientation.

Key Words: Experimental Stress Analysis, Nondestructive Inspection, Material Testing, Photoelastic Modulator, Laser Photoelasticity

1. 緒 言

高密度化, 高集積化された最近の電子デバイスの性能を制約している原因の一つとして, デバイスの製造時と使用時に生ずる回路パターンの剥離, 配線の断線, パッケージの破損, 半導体ウエハの微小な変形などの材料力学的問題が, 近年注目を集めている. そのため, このようなデバイスの製造時と使用時に生ずる材料力学的問題を克服するための評価技術の確立が望まれている.

これに応えるための非破壊検査技術として, 応力のテンソル量が計測できる光弾性法が注目されている. S. R. Lederhandler⁽¹⁾およびR. O. Denicola・R. N. Tauber⁽²⁾らは光弾性フリンジを利用してSiインゴットの残留応力分布を観察し合理的な結晶育成条件を得た. Date⁽³⁾らは, 繰回数が1に満たない材料の応力を光弾性法で定量的に計測する手法を考案した. これにより, Siウエハの一結晶方位における光弾性定数を求め, ウエハの定量的な応力場計測の可能性を示した⁽³⁾. Yamada⁽⁴⁾は, GaAsの残留ひずみを, 同じく干渉縞を用いない光弾性法にて定量的に計測する装置を開発し, 残留ひずみ分布を得た⁽⁴⁾.

著者らは, Siウエハに生ずる微小な応力を計測するため, 光弾性実験法に赤外線偏光レーザと光弾性変調器 (PEM) を採り入れ, 高精度かつ高感度な複屈折計測装置を開発してきた^{(5)~(9)}. この複屈折計測装置は試験片上のレーザスポット内における平均の主応力差と第一主応力の

方向を同時に定量的に得ることができる. また, この複屈折計測装置は, 試料もしくは光学素子の回転を要さないため, 一点の計測時間は0.1秒以下である. この装置を用いて, Si単結晶の結晶方位が光弾性特性におよぼす影響を調べた. このため, {100}, {111} および {110} Siウエハから種々の結晶方位に沿って矩形の試験片を切り出し, 種々の引張荷重を作用させて, 主応力差と複屈折量の関係を複屈折計測装置で調べた. その結果, Si単結晶の光弾性定数は結晶面および結晶方位に依存することが分かった. また, 第一主応力の方向と複屈折の主軸方向 (以後, 複屈折の方向とする) は一致しないことも分かった. 次に, Si単結晶の応力-ひずみ関係を用いて, 実験結果である主応力差と複屈折量の関係を主ひずみ差と複屈折量の関係に変換した. その結果, Si単結晶の主ひずみ差と複屈折量の比例係数は結晶方位に依存しないことが明らかになった. また, 第一主ひずみの方向と複屈折の方向は一致することも明らかになった. したがって, Si単結晶の応力場を光弾性法で計測する際は, 複屈折量から主ひずみ差を求め, 主応力差に変換する方法が合理的であることが分かった.

2. 実験装置および計測原理

2.1 実験装置 図1に実験装置を示す. この装置の最大の特長は, 試料を回転させることなく, 複屈折量の大きさと方向を同時に定量的に計測できる点にある.

図1に示すように, 二つの直線偏光板 (偏光子と検光子) を45°傾けて配置し, その間に光弾性変調器 (PEM) と

* 原稿受付 1996 年 4 月 22 日.

*¹ 正員, 東京電機大学工学部 (〒101 東京都千代田区神田錦町 2-2).

1/4波長板に挟まれた試験片を置く。図1中の θ_σ は、試験片に作用させる主応力の方向であり、 θ_{bir} は発生した複屈折の方向である。いずれの方向も1/4波長板の主軸の方向を基準にしている。光弾性変調器は負荷電圧に比例した光学的位相差を透過光に与える。この変調器の複屈折の軸は検光子の主軸と90°、偏光子の主軸とは45°傾けて配置され、1/4波長板の主軸は検光子の主軸と45°、偏光子の主軸とは90°傾けて配置されている。

光源には、出力8mWの赤外線He-Neレーザ(中心波長 $\lambda=1150\text{nm}$)を用いた。試験片上の1/e²ビーム径は2.18mmである。このレーザスポット内の複屈折の大きさと方向の平均値が、透過レーザ光の強度を測定することで直ちに数値で得られる。

2.2 透過レーザ光の強度と応力の関係 図1に示したフォトディテクタで検出されるレーザ光の強度 I は Jones の計算法より次式で与えられる⁽⁶⁾。

$$I = \frac{\alpha I_0}{4} \left\{ 1 + \sin\gamma \left(\cos\delta \cdot \sin 2\theta_{bir} - \sin\delta \cdot \cos 2\theta_{bir} \right) \right\} \quad (1)$$

ここで、 α は測定点における試験片の透明度、 I_0 は入射光の強度、 δ および γ は、それぞれPEMおよび測定点の複屈折量である。試験片の複屈折量 γ は、Brewster則によれば主応力差($\sigma_1 - \sigma_2$)に比例する。よって、式中の γ と θ_{bir} を求めることにより、測定点の主応力差($\sigma_1 - \sigma_2$)と複屈折の方向を得ることができる。また、PEMの位相差 δ は、PEMの機能を利用して約42kHzの共振周波数で変調する。複屈折量 γ および δ は次式で与えられる。

$$\gamma = \frac{2\pi C}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) d \quad (2)$$

$$\delta = \delta_0 \cdot \sin\omega t \quad (3)$$

ここで C はBrewster定数(光弾性定数)、 d は試験片の厚さ(光が通過する距離)、 λ はレーザ光の波長である。

σ_1, σ_2 は面内の最大および最小主応力である。また、 δ_0 は変調の振幅であり、PEMの交流印加電圧の振幅に相当する。 ω はPEM共振周波数の角速度である。式(2)、(3)を式(1)

に代入してフーリエ級数展開することにより以下の式が得られる。

$$I = I_{DC} + I_{AC1} \sin\omega t + I_{AC2} \cos 2\omega t + I_{AC3} \sin 3\omega t + \dots \quad (4)$$

$$I_{DC} = \frac{\alpha I_0}{4} \left\{ 1 + J_0(\delta_0) \cdot \sin\gamma \cdot \sin 2\theta_{bir} \right\} \quad (5)$$

$$I_{AC1} = -\frac{\alpha I_0}{2} J_1(\delta_0) \cdot \sin\gamma \cdot \cos 2\theta_{bir} \quad (6)$$

$$I_{AC2} = \frac{\alpha I_0}{2} J_2(\delta_0) \cdot \sin\gamma \cdot \sin 2\theta_{bir} \quad (7)$$

ここで、 $J_0(\delta_0) \sim J_2(\delta_0)$ はBessel関数である。 $J_0(\delta_0)=0$ となるように δ_0 (PEMの交流印加電圧の振幅)を調整することにより、式(5)は γ と θ_{bir} には依存しない値 $I_{DC} = \alpha I_0 / 4$ となる。したがって、受光部で検出されるレーザ光の、交流成分である I_{AC1} および I_{AC2} と、直流成分である I_{DC} の比をとることによって、以下に示すように、入射レーザ光の強度や試験片の測定点における透明度に依存しない2つの測定量を得ることができる。

$$\frac{I_{AC1}}{I_{DC}} = A \cdot \sin\gamma \cdot \cos 2\theta_{bir} \quad (8)$$

$$\frac{I_{AC2}}{I_{DC}} = B \cdot \sin\gamma \cdot \sin 2\theta_{bir} \quad (9)$$

ここで、 A および B は試験片の力学的な状態や、透明度に依存しない定数である。本実験装置では、1/4波長板を用いて調べたところ、それぞれ $A = -0.111$ 、 $B = 0.0167$ であった。式(8)、(9)より、複屈折量 γ および複屈折方向 θ_{bir} は以下の式により得られる。

$$\gamma = \sin^{-1} \left[\sqrt{\left(\frac{I_{AC1}}{I_{DC} \cdot A} \right)^2 + \left(\frac{I_{AC2}}{I_{DC} \cdot B} \right)^2} \right] \quad (10)$$

$$\theta_{bir} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{A \cdot I_{AC2}}{B \cdot I_{AC1}} \right] \quad (11)$$

3. 試験片

Siの結晶方位が光弾性特性におよぼす影響を調べるため、{100}、{111}および{110}Siウエハから種々の結晶方位に沿って矩形の引張試験片を切り出した。種々の引張荷重を作用させて、主応力差と複屈折量の関係を複屈折計測装置で調べるためである。図2中に示す3個の立方体はSiの単位格子を表しており、その中に実験に用いたウエハの種類を示した。それぞれのウエハから結晶の対称性を考慮して、図に示すように4本ずつ矩形の試験片を切り出した。切り出した試験片の両端をPMMA板と接着剤で補強した。試験片の中立軸上に穿孔し、そこに挿したピンを介して矩形Si試験片に引張荷重を作用させた。

4. Si単結晶の光弾性定数

0, 1.96, 3.92, 5.88, 7.84, 9.80MPaの一軸引張荷重を矩

Fig.1 Schematic figure of birefringence measurement system

形Si試験片に作用させ、図1に示した θ_σ を 0° から 5° ずつ 180° まで増加させながら試験片の複屈折量と複屈折方向の計測を行った。{110}ウエハから切り出した試験片の複屈折計測結果を図3(a)~(d)に示す。横軸は $I_{AC1}/(I_{DC} \cdot A)$ 、縦軸は $I_{AC2}/(I_{DC} \cdot B)$ を示す。白丸のプロット群は $\theta_\sigma = 0^\circ$ における複屈折計測結果である。 θ_σ の増加にともない複屈折計測結果はほぼ原点を中心に、左回りに円を描くように変化している。これらの円の中心と原点が若干ずれているのは装置のゼロバランスが完全にはとれていないためである。図3(a)は{110}ウエハから<100>結晶方位に沿って切り出した矩形試験片の複屈折計測結果である。図3(a)中に示す立方体とその断面の図が{110}ウエハと矩形Si試験片の結晶方位の関係を示す。図3(b)~(d)にも同様に矩形試験片の種類とその試験片の複屈折計測結果が示されている。本稿の複屈折計測装置は、計測の際試験片の回転を必要としない。あえて試験片を回転させた理由は、試験片の第一主応力の方向 θ_σ と、応力によって生じた複屈折の方向 θ_{bir} の関係を調べたためと、計測回数を増加させて計測値の正確さ向上をねらったためである。式(8),(9)は円の方程式になっている。すなわち、図3の各グラフの原点から各点へのベクトルの長さが複屈折量 γ に、ベクトルの向きが複屈折方向 θ_{bir} の2倍に、それぞれ相当する。円弧状の目盛りは θ_σ のグラフ上での方向を表す。 θ_{bir} と θ_σ をグラフ上で対比できる。

図3(a)~(d)から次のことが分かる。すなわち、同一の応力を作用させても複屈折量 γ は結晶方位に依存して異なる

Fig.2 Schematic figures of Si wafers and specimens

値を示す。 θ_σ と θ_{bir} の関係も結晶方位に依存して異なる値

(a) At <100> direction in {110} face, the birefringence direction coincides with the principal stress direction

(b) At <211> direction in {110} face, the birefringence direction doesn't coincide with the principal stress direction

(c) At <111> direction in {110} face, the birefringence direction doesn't coincide with the principal stress direction

(d) At <110> direction in {110} face, the birefringence direction coincides with the principal stress direction

Fig.3 The trajectories of $I_{AC1}/(I_{DC} \cdot A)$ and $I_{AC2}/(I_{DC} \cdot B)$ for four {110} face specimens that are tensed at; (a): <100>, (b): <211>, (c): <111>, (d): <110> directions

を示す。これは図3中の白丸のプロット群の水平軸に対するズレから確認できる。白丸のプロット群はいずれも図1に示した θ_0 がゼロであるときの計測結果である。もし、 $\theta_{bir} = \theta_0$ なら白丸のプロット群は水平軸上に一直線にならぶ。すなわち図3は、 $\theta_{bir} - \theta_0$ が結晶方位に依存することを示している(10)。図3(a)~(d)それぞれの右下に、 θ_{bir} と θ_0 の方向関係の模式図を示した。

図4にSi単結晶の“主応力差×試験片の厚さ”と複屈折量の関係を示す。式(2)より複屈折量は媒質の厚さにも比例するため、横軸に試験片の厚さを掛けた。各点は36点の測定結果の平均であり、その二乗平均誤差はプロットの大きさよりも小さかった。{111}面は力学的に面内等方であり、実験結果も4方位ともほとんど差がなかったため、

Fig.4 The relation between the retardation and applied stress for twelve specimens

{111}ウエハの結果は4方位の実験結果の平均で示した。各直線の傾きが、各試験片の光弾性定数を表す。光弾性定数は結晶面および結晶方位に依存することが分かる。

5. 考察

5.1 Si単結晶の応力-ひずみ関係 複屈折は誘電率の異方性によって生ずる。誘電率がひずみに比例すると仮定するならば、複屈折量は主ひずみ差に比例する。この仮定のもとでは、複屈折量 γ は主ひずみ差に、複屈折方向 θ_{bir} は主ひずみ方向に、それぞれ依存すると考えられる。そこで、Si単結晶の応力-ひずみ関係を用いて、図4に示した主応力差と複屈折量の関係を主ひずみ差と複屈折量の関係に変換し、結晶方位が光弾性特性におよぼす影響を考察する。Si単結晶の応力-ひずみ関係は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$C_{11} = 165.7 \text{ GPa}, \quad C_{12} = 63.9 \text{ GPa}, \quad C_{44} = 79.6 \text{ GPa}$$

ここで、 σ_{ij} と ϵ_{ij} は、それぞれ応力テンソルとひずみテンソルを示し、 C_{ij} はSiの材料定数である(11)。式(12)から、{100}、{111}および{110}面における、Si単結晶の、主応力差と主ひずみ差の関係、および主応力方向と主ひずみ方向の関係を求めた。表1の2列目にそれぞれの結晶面にお

Table.1 Equations of compliance and principal strain direction for each crystal face

Crystal face	Equations	Compliance
	$\epsilon_1 - \epsilon_2 = \sqrt{\frac{\cos^2 2\theta_{\sigma'}}{4C_{44}^2} + \frac{\sin^2 2\theta_{\sigma'}}{(C_{11} - C_{12})^2}} (\sigma_1 - \sigma_2)$ $\tan 2\theta_{\epsilon} = \frac{2C_{44}}{C_{11} - C_{12}} \tan 2\theta_{\sigma'}$	
	$\epsilon_1 - \epsilon_2 = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{(C_{11} - C_{12})} + \frac{1}{C_{44}} \right) (\sigma_1 - \sigma_2)$ $\tan 2\theta_{\epsilon} = \tan 2\theta_{\sigma'}$	
	$\epsilon_1 - \epsilon_2 = \frac{1}{8} \sqrt{\frac{f(\theta_{\sigma'})}{2(C_{11} - C_{12})^2 C_{44}^2}} (\sigma_1 - \sigma_2)$ $f(\theta_{\sigma'}) = 32C_{44}^2 (1 + 3\cos 2\theta) + (C_{11} - C_{12})^2 (19 - 4\cos 2\theta - 15\cos 4\theta) + 4C_{44}(C_{11} - C_{12} + 3C_{44})(1 - 4\cos 2\theta + 3\cos 4\theta)$ $\tan 2\theta_{\epsilon} = \frac{4(C_{11} - C_{12})\sin 2\theta_{\sigma'}}{-C_{11} + C_{12} + 2C_{44} + (C_{11} - C_{12} + 6C_{44})\cos 2\theta_{\sigma'}}$	

ける関係式を示す。式中の θ_σ' は各ウエハ面内に作用させた第一主応力の方位であり θ_ϵ は主ひずみの方位を示す。表1の1列目に θ_σ' と θ_ϵ の基準となる方位を図示した。図に示すように、{100}面では $\langle 110 \rangle$ 方位、{111}面では $\langle 211 \rangle$ 方位、{110}面では $\langle 100 \rangle$ 方位とした。表1の3列目のグラフは $(\epsilon_1 - \epsilon_2)/(\sigma_1 - \sigma_2)$ の理論計算結果の極座標表示である。同心の半円の半径は $(\epsilon_1 - \epsilon_2)/(\sigma_1 - \sigma_2)$ を示し、原点からの放射線は結晶方位を、太い曲線は計算結果を示す。グラフの下半分は上半分と対称であったので省略した。特に{111}面は、二次元応力状態では等方体であることが確認できる。

5.2 Si単結晶の主ひずみ差と複屈折量の関係 複屈折量は主ひずみ差に依存するという仮定を検証する。そこで、表1の主応力差と主ひずみ差の関係式を用いて、図4の横軸を主ひずみ差に変換した結果を図5に示す。横軸はSi単結晶の“主ひずみ差×試験片の厚さ”、縦軸は複屈折量である。図中の実線は最小二乗法で求めた代表直線である。{100}および{111}面の結果は直線上かやや上に、{110}面の結果は直線のやや下にある。また、各結晶面ごとで考えると複屈折量と主ひずみ差の比例係数は結晶方位によらずほぼ一定である。したがって、Si単結晶の応力場を光弾性法で計測する際は、複屈折量から主ひずみ差を求め、主応力差に変換する方法が合理的といえる。

5.3 Si単結晶の主ひずみ方向と複屈折方向の関係 複屈折方向は主ひずみの方向に依存するという仮定を検証する。表1に示した主応力方向と主ひずみ方向の関係式のグラフを図6(a)~(c)に示す。横軸は各結晶面内に作用させた第一主応力の方位 θ_σ' 、左側の縦軸は θ_ϵ と主ひずみ方向 θ_ϵ の差を示す。それぞれのグラフの真上に θ_σ' と θ_ϵ の方向関係の模式図を示した。グラフ中の実線が、 $(\theta_\epsilon - \theta_\sigma')$ の理論計算の結果を示す。特に{111}面では、主応力方向と主ひずみ方向の一致が確認できる。グラフ中のプロットは、図1に示した θ_σ と複屈折の方向 θ_{bir} の差であり実験結果を表す。右側の縦軸が、この実験結果に対応する。横軸の θ_σ' は、この場合矩形試験片を切り出した方位に相当す

Fig.5 The relation between the retardation and the principal strain difference for twelve specimens

る。それぞれのグラフの右に θ_σ と θ_{bir} の方向関係の模式図を、グラフの右上には対象となっている結晶面と矩形Si試験片の方位を示した。各点は36回の測定値の平均であり、その二乗平均誤差はプロットの大きさより小さかった。

(a) in {100} face

(b) in {111} face

(c) in {110} face

Fig.6 The relation between the applied stress direction θ_σ' and the birefringence direction θ_{bir}

Table.2 Photoelastic constants and strain-retardation coefficients of experimental results

Si wafer type	Applied stress direction	Photoelastic constant [$\times 10^{-5}$ 1/MPa]	Strain-retardation coefficient [m/m]
{100} face	<100>	2.89	2.94
	30deg. from <110>	2.56	2.82
	15deg. from <110>	2.24	3.06
	<110>	1.99	3.16
{111} face	<211>	2.27	3.04
	10deg. from <211>	2.29	3.07
	20deg. from <211>	2.13	2.85
	<110>	2.27	3.04
{110} face	<100>	2.58	2.63
	<110>	2.02	2.50
	<211>	1.67	2.37
	<111>	1.53	2.43

図6(a)~(c)から、複屈折の方向は主ひずみの方向に一致することが分かる。

表2に実験に用いたSi単結晶の光弾性定数と、主ひずみ差-複屈折量の係数を示す。

5.4 装置の計測精度と実験結果の信頼性 装置出力と複屈折量の関係を求める校正にシグマ光機製の1150nm用1/4波長板を用いたが、その精度は $\pm 1.5\text{nm}$ であり問題ない。本実験装置では、測定精度上の問題点はゼロバランスの変動にある。複屈折量がゼロの場合、すなわち試験片がない場合出力は、ゆっくりと変動しており、その変動幅は複屈折量にして $\pm 1.7\text{nm}$ 以内であった。これをSi単結晶の“主ひずみ差 $\times$ 試験片の厚さ”に換算すると、約 $6.1 \times 10^{-7}\text{mm}$ 以内である。また、複屈折方向の測定精度を調べるため、1/4波長板を試料として、測定点を中心に 5° 毎回転させながら複屈折方向を測定した結果、回転角と複屈折方向の差は $\pm 1.0^\circ$ 以内であった。また、Si試験片切り出しの際の角度精度は $\pm 0.5^\circ$ 程度であった。いずれの不確かさも実験における測定値よりも小さく、実験結果への影響は小さいと考えられる。

6. 結 言

Si単結晶の結晶方位が光弾性特性におよぼす影響について得られた結論を以下に示す。

- [1] Si単結晶の光弾性定数は結晶面および結晶方位により異なる値を示した。しかし、主ひずみ差-複屈折量の比例係数は結晶方位によらずほぼ一定値であった。ただし、その比例係数は結晶面により、やや差が認められた。
- [2] 複屈折方向は主ひずみ方向に一致した。
- [3] すなわち、Si単結晶の複屈折は主応力差を基準に考えるよりも主ひずみ差を基準に考える方が合理的である。

なお、本研究の一部は、平成7年度文部省科学研究費試験研究(B)の補助により行った。

参 考 文 献

- (1) S.R.Lederhandler, Infrared Studies of Birefringence in Silicon, J. Appl. Phys. 30-11 (1959), 1631-1638.
- (2) R.O.Denicola and R.N.Tauber, Effect of Growth Parameters the Residual Stress and Dislocation Density of Czochralski-Grown Silicon Crystal, J. Appl. Phys., 42-11 (1971), 4262-4270.
- (3) K. Date, Stress Measurement with High Sensitivity in Wafer Using Infrared Photoelasticity, Proc. of Advanced in Elec. Pack., Vol.2 (1992), 985-989.
- (4) M. Yamada, High-sensitivity computer-controlled infrared polariscope, Rev. Sci. Instrum., Vol.64, No.7 (1993), 1815-1821
- (5) 一瀬・新津・池上, 偏光レーザを用いた接着層残留応力の計測, 機論, 58-554, A (1992), 1900-1904.
- (6) 新津・一瀬・池上, 偏光レーザを用いた透明材料の応力計測法, 機論, 59-559, A (1993), 600-605.
- (7) 一瀬・新津, 偏光レーザを用いた新しい光弾性測定法, 機構論, No.930-9(I) (1993), 267-269.
- (8) Y. Niitsu, K. Ichinose and K. Ikegami, A stress Measuring Method by Polarized Laser and Photo-Elastic Modulator, Proc. of Int. Elec. Pack. Conf., Vol.1, (1993), 157-161.
- (9) 一瀬・新津, 偏光レーザを用いた走査型光弾性実験法(第1報), 機論, 60-572, A (1994), 1114-1119.
- (10) Y. Niitsu, K. Gomi, Influence of Crystal Orientation on Photoelastic Property of Silicon Single Crystal, Proc. of Advanced in Electronic Packaging ASME, EEP-Vol.10-2 (1995), 1239-1245.
- (11) 飯田修一 他, 物理定数表, (1978), 24, 朝倉書店