シリコンウェハ変形による加工変質層残留応力の評価*

—有限要素法を用いた数値シミュレーションによる薄いウェハの変形メカニズム解明—

高橋 清樹** 周 立波*** 清水 淳***

Evaluation of Subsurface Damage in Silicon Wafer Based on Deflection Analysis
- Thin Wafer Deformation Mechanism Revealed by Use of FEM -

Seiki TAKAHASHI, Libo ZHOU and Jun SHIMIZU

Diamond grinding is often used for silicon wafer thinning. This process brings about not only efficient material removal of wafer, but also the subsurface damage which is accompanied by residual stress on the wafer surface. The residual stress greatly contributes to the distortion of thin wafer. Reported in this paper are deflection behavior of wafer when it is subjected to the residual stress and a practical method of the residual stress estimation based on the wafer deflection. Based on the numerical FEM analysis results, the thin wafer is found to undergo three stages of deformation, dependent on the quantity of residual stress. When the residual stress is sufficiently small, the wafer is deflected into a sphere shape which is able to be described by the Stoney's Equation with its corrective coefficient. With an increase in the residual stress, the wafer deflection starts to depart from the sphere shape, but still maintains in axisymmetric form until the deflection reach to 1 ~ 2 times larger than the wafer thickness. Beyond this critical point, the shape of deflected wafer is transformed into a cylindrical warping. The amount of wafer deflection is then associated to the residual stress to provide an easy way of estimation for residual stress on wafer with different thickness.

Key words: thin wafer, damage layer, residual stress, deflection, warping, buckle, FEM

1. 緒 言

現在では半導体デバイスの高密度実装の焦点が3次元積層化に移行し、代表的手法に SiP (System in Package)¹⁾がある。50 μm 程度の極薄チップを5 ~ 6段積層した集合体を内包しつつ、パッケージ全体で1 ~ 2 mmの薄さを実現している。極薄チップに用いるシリコンウェハは一般にダイヤモンド研削によって薄片化する。この加工法は平坦性と加工能率で優れるが、表面に残留応力を持つ加工変質層を形成するため、薄いウェハでは反りや割れのリスクが大きな課題となる。

SD3000の研削により50 μm の厚さまで薄片化したウェハの断面TEM写真と残留応力により反り変形が50 mmに達した例を図1に示す。本例では加工変質層の厚さが1 ~ 2 μm であるが、この厚さと残留応力は砥粒サイズや加工条件に依存する。ウェハ薄片化の低コスト化においては適切なダイヤモンド研削加工条件の策定が重要な課題となる。この策定には様々な加工条件に対する多くの加工結果のデータ収集が必要であり、簡易的な加工変質層の残留応力評価技術が課題解決の1つの鍵と考える。

著者らは有限要素法による数値シミュレーションを用いて、加工変質層の残留応力によるウェハ変形メカニズムの解明を試み、残留応力と反り変形量の関係を検討した。微小変形の範疇では球面たわみ形状を示すウェハが、厚さを超えるたわみレベルでは変形形態を一変させ、最終的には図1に示す大きな円筒変形に達する。本研究では、球面変形から円筒変形までそのたわみ量を残留応力と関連付け、簡易的な残留応力の評価手法を

Fig.1 Typical subsurface damage and warping in a thin wafer²⁾

提案すると同時に、座屈変形の臨界条件や単結晶 Si の結晶方位が及ぼす影響を明らかにする。

2. 解析対象ウェハとその変形

2.1 解析モデル

図2に示すような LSI 用として最も普及している (001) 面 Si 単結晶 8 インチの薄片化ウェハを解析対象とする。結晶方向 [110] を示すオリフラ (orientation flat) と呼ばれる目じるしがノッチ加工される。ノッチ深さは約 1 mm と小さいため、変形への影響を無視してウェハを円板と仮定する。

解析対象ウェハの仕様と代表的方向の弾性係数³⁾を表1に示す。面内方向に限定すると結晶方位 [100] で最小、[110] で最大の弾性係数を示す異方性の応力ひずみ関係を持つ。Si 単結晶は立方晶系 (cubic crystal) に属し、その対称性から互いに直交する結晶方位 [100], [010] と [001] の弾性係数は等し

* 原稿受付 平成 28 年 8 月 29 日

掲載決定 平成 29 年 1 月 17 日

** 茨城大学工学部 (現在、㈱日立パワーソリューションズ)

*** 正会員 茨城大学工学部 (日立市中成沢町 4-12-1)

い、各方位を 1 ~ 3 軸として立方晶系の異方性弾性係数行列は C_{11} , C_{12} および C_{44} の 3 つの独立成分にて次式⁴⁾で表される。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ただし、

$$C_{11} = 165.64 \text{ GPa}, \quad C_{12} = 63.94 \text{ GPa}, \quad C_{44} = 79.51 \text{ GPa}$$

2.2 異方性板の純曲げ球面変形

板表面層の薄膜応力により面外曲げと面内伸びが生じる。薄膜の前提において面内伸び量 $|u|$ は面外たわみ量 $|w|$ より相対的に小さいので本節ではこれを無視して板の純曲げに着目する。高い対称性を持つ立方晶系の異方性板に純曲げが作用すると等方性板と同様に球面変形する。板の面内に X, Y 軸をとり、2 軸応力状態の応力ひずみ構成則を次式⁵⁾に示す。

$$\begin{aligned} \sigma_x &= E'_x \varepsilon_x + E'' \varepsilon_y \\ \sigma_y &= E'' \varepsilon_x + E'_y \varepsilon_y \\ \tau_{xy} &= G \gamma_{xy} \end{aligned} \quad (2)$$

$\sigma_x = \sigma_{11}$, $\sigma_y = \sigma_{22}$ において $\sigma_{33} = 0$ の拘束条件⁶⁾を課すると式(2)の弾性係数と式(1)の独立成分の関係は次式で表される。

$$E'_x = E'_y = C_{11} - \frac{C_{12}^2}{C_{11}}, \quad E'' = C_{12} - \frac{C_{12}^2}{C_{11}}, \quad G = C_{44} \quad (3)$$

この 2 軸応力状態を仮定した単位板幅当たりの曲げモーメント M と曲率 $1/\rho_x$, $1/\rho_y$ の関係は板の曲げ剛性 (flexural rigidity) D_x, D_y, D_1 を用いて次式⁵⁾で示される。ここで、 h は板厚である。

$$\begin{aligned} M_x &= -\left(D_x \frac{1}{\rho_x} + D_1 \frac{1}{\rho_y} \right), \quad D_x = \frac{E'_x h^3}{12}, \quad D_1 = \frac{E'' h^3}{12} \\ M_y &= -\left(D_y \frac{1}{\rho_y} + D_1 \frac{1}{\rho_x} \right), \quad D_y = \frac{E'_y h^3}{12} \end{aligned} \quad (4)$$

式(3)の対称性より、 $D_y = D_x$ 、純曲げとして作用するモーメントを $M_x = M_y = M$ とおくと曲率は次式で表される。

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_x} = \frac{1}{\rho_y} = -\frac{M}{D_x + D_1} \quad (5)$$

右辺 $D_x + D_1$ は面内 X 軸の方向に依存せず一定値を示すことから式(5)は球面変形を表す。また、次式の関係から、(001)面 Si 単結晶ウェハの純曲げ球面変形における曲率は結晶方位 $[100]$ の弾性係数を持つ等方性板の曲率に等しい。

$$D_x + D_1 = D_{[100]}(1 + \nu_{[100]}), \quad D_{[100]} = \frac{E_{[100]} h^3}{12(1 - \nu_{[100]}^2)} \quad (6)$$

微小変形を仮定するとき、円板中心 ($r = 0$) を座標原点として面外方向変位 w は次式で表される。

$$w(r) = -\frac{1}{2\rho} r^2 \quad (7)$$

2.3 薄膜応力による曲率

このようなたわみ量が微小な球面変形の評価に Stoney 式が適用されてきた。2 軸応力状態に対するストリップ表面層の薄

Fig.2 Wafer dimension for analysis

Table 1 Parameters used in FEM analysis

diameter	d	200 mm
thickness	h	0.2 ~ 0.01 mm
Young's modulus ³⁾	$E_{[100]}$	130 GPa
	$E_{[110]}$	170 GPa
Poisson's ratio ³⁾	$\nu_{[100]}$	0.279
	$\nu_{[110]}$	0.062

Fig.3 Comparison of uniaxial bending on thin strips

膜応力と曲率の関係を表す Stoney 式⁴⁾を次に示す。

$$\sigma_0 t = \frac{E h^2}{6(1 - \nu) \rho} \quad (8)$$

左辺 $\sigma_0 t$ は薄膜の応力、厚さであり、右辺 ρ は曲率半径、 E, ν はストリップのヤング率、ポアソン比、 h は板厚である。式(5)の単位板幅当たりの曲げモーメントと曲率の関係と式(6)の等方性板の曲げ剛性を式(8)に適用すると、Stoney 式のモーメント表示は次式となる。

$$M = \sigma_0 t \left(\frac{h}{2} \right) \quad (9)$$

$\sigma_0 t$ が薄膜荷重、 $h/2$ がモーメントの腕の長さに相当する。この腕の長さが薄膜の厚さ t に依存せず、板厚中心から表面までの距離に固定されていることが薄膜近似の所以である。この近似は $h \gg t$ の条件下で正確であるが、薄片化ウェハでは h が小さいために適用性の課題が生じる。そこで薄いストリップにおける Stoney 式の適用性を FEM 数値解と比較検証した。

幅方向に曲率ゼロの単軸曲げストリップを対象として式(8)曲率に基づくたわみ曲線と FEM 数値解変形後つり合い点の比較を図3に示す。ストリップ厚さ h をパラメータにとり、薄膜の応力と厚さを一定とした。薄くなると両者共に曲率を増すがたわみ曲線の差は拡大する。有限膜厚さを反映した数値解が正解に近いとすると差の原因は薄膜近似による Stoney 式の過大モーメントである。 $h \gg t$ の条件が成り立たない場合、加工変質層厚さ t の中央に残留応力による合力 αt が作用する場合のモーメントに変更することでより適正に評価できるため、腕の長さを次式のように補正する。

$$M = \sigma_0 t \left(\frac{h-t}{2} \right) \quad (10)$$

式(9)と式(10)の比として、 $e = (1-t/h)$ が曲率を補正する係数となる。 $h \gg t$ の条件では補正係数 $e = 1$ となって Stoney 式に一致する。図3の $h = 0.01$ mm の例では補正係数 0.8 となり、Stoney 式による曲率半径 $\rho \approx 29$ mm は 36 mm へ補正される。これに基づくたわみ曲線は、FEM 数値解にほぼ一致する。

したがって、Stoney の式(8)が次のように補正される。

$$\frac{1}{\rho} = \frac{6e(1-\nu)\sigma_0 t}{Eh^2} = \frac{6(1-\nu)(h-t)\sigma_0 t}{Eh^3} \quad (11)$$

上式を式(7)に代入すると、面外方向変位 w と残留応力 α の関係が構築できる。

$$w(r) = -\frac{1}{2\rho} r^2 = -\frac{3(1-\nu)(h-t)\sigma_0 t}{Eh^3} r^2 \quad (12)$$

あるいは

$$\sigma_0 = -\frac{E}{3(1-\nu)} \frac{h^3}{(h-t)t} \frac{w(r)}{r^2} \quad (13)$$

このように、ウェハ変形プロファイル $w(r)$ を測定すれば、その任意点データから残留応力 α を推定することができる。

2.4 大たわみドーム変形と分岐座屈による円筒変形

前記 2.3 節では微小たわみの仮定が成り立つ領域において純曲げが作用する円板の球面変形について述べた。たわみが大きくなって大たわみと呼ばれるレベルになると荷重とたわみの間に線形関係が成立せず、式(7)のたわみは過大な結果を与える。例えばたわみが円板厚さの 0.55 倍になると大たわみ理論では約 9% 小さいたわみを示す⁷⁾。たわみの増加に伴って径の収縮の影響が現れ始めるが、これを無視したことが原因である。具体的には円周方向の圧縮ひずみが増加してたわみを抑制する作用を無視している。変形形態としては軸対称形が維持されるものの、円板外周で最大となる圧縮ひずみのために曲率分布は一定でない非球面変形を示す。このたわみ水準までの軸対称変形を総称してドーム変形 (dome deflection) と呼ぶことにする。

更に大きいたわみをもたらす残留応力を持つ場合にはドーム変形とは別形態のつり合い変形に移行する臨界点に達する。臨界点を越える残留応力では圧縮ひずみを伴う軸対称変形が不安定となって非軸対称形へ分岐 (bifurcation) する。図1の反り変形写真に示した円筒変形 (cylindrical warping) は臨界点を越えた分岐座屈後の典型的な変形形態であると推定した。

3. 3次元 FEM 解析

FEM 数値解析を次の手順で実施する。

- (1) ウェハ厚さ h をパラメータとする。
- (2) 加工変質層厚さ t と残留応力 α をパラメータとする。
- (3) 各パラメータに対するたわみ w を数値解析で解く。

以上より、パラメータ h, t, α と数値解たわみ w が対応付けられる。実ウェハたわみと加工変質層厚さを w と t に置き換えると残留応力 α を評価できる。実ウェハの加工変質層厚さは薄片化加工条件等に依存すると考えられるが、その推定方法等は本報告の対象外とする。また、ウェハ変形を引き起こす加工変質層の残留応力とその厚さはウェハ内一定とし、ウェハ自重や周囲の空気の影響など、他の変形要因は対象外とした。

ウェハ変形の数値解析には有限要素法⁸⁾を使用した。ウェハを対象とした数値解析モデルを図4に示す。有限な大きさの 216 個のシェル要素から成る円板として近似した。2次元の板厚中央面において伸縮と曲げ挙動が表現され、その変位と傾斜角が直接解かれる。任意点の変位は中央面からの距離と中央面傾斜角を用いて間接的に決定される。特性の異なる基板層と加工変質層をシェル要素の板厚方向に積層した。ウェハ厚さ h 、加工変質層厚さ t として基板厚さは $(h-t)$ である。残留応力を等価な加工変質層の初期ひずみとして付与し、無拘束かつ静的つり合い状態に対する変形を数値的に解く。自由な変形のため境界条件は設定しない。数値解析上障害となる剛体変位を排除するため、円板中心変位を固定した。

初めに、円板の大たわみに対する検証のためにドーム変形シミュレーションを実施した。厚さ $h = 0.2$ mm の等方性円板の外周に一樣なモーメント $M_0 = 0.008$ N-mm を作用させたときの FEM 数値解析による変位コンタ (contour) を図5に示す。このモーメント M_0 は、後述する図6(a)で示すように、ウェハの加工変質層厚さ $t = 2$ μ m、残留応力 $\alpha = 40$ MPa の条件に相当する ($M_0 = t \times \alpha \times h/2$)。軸対称ドーム変形の最大たわみ

Fig.4 Numerical solution model for wafer deflections

Fig.5 A deflection by pure moment to demonstrate large displacement

量 $|w|_{\max} = 0.239 \text{ mm}$ は円板厚さの約 1.2 倍に相当するので大たわみ領域である。ちなみに微小たわみ仮定の式(7)を適用すると外周のたわみ量が約 0.4 mm と算出され、FEM 数値解は約 40% 小さいたわみを示した。図 5 の半径方向変位 u について大たわみ領域で顕著となる外周部の収縮を示す負の変位を確認した。

次に、分岐点と称されるドーム変形の限界点と分岐モードの推定のために座屈固有値シミュレーション⁹⁾を実施した。数値解の一例を図 6 に示す。厚さ $h = 0.2 \text{ mm}$ の等方性円板についてウェハ加工変質層に相当する円板表層部の残留応力層の厚さ $t = 2 \mu\text{m}$ の範囲に残留応力 $\sigma_0 = 40 \text{ MPa}$ を直接作用させた場合の面外方向変位コンタを図 6(a) に示す。これに見合う外周モーメントを付与した図 5 にほぼ同等のドーム変形を示した。このつり合い状態を基準として算定した座屈固有値と固有モードを図 6(b) に示す。その固有値は加工変質層の残留応力 68 MPa で分岐点に到達することを示し、鞍型面 (anticlastic surface) の固有モードは非軸対称形への分岐を示している。

残留応力 σ_0 とたわみ $|w|$ の関係を図 7 の "●" マークで示す。残留応力が大きくなるとたわみが大きくなる右上がりの曲線となり、大たわみ領域で顕著となるたわみ抑制効果も本曲線の傾きの増加から確認できる。この曲線上の 1 点、残留応力 69 MPa 、たわみ 0.32 mm において接線剛性行列の行列式が 0 (ゼロ) となり、より大きな残留応力に対するたわみ算出が不可能となった⁹⁾ため曲線を打ち切った。一方、"□" マークで示す右下がりの曲線は、図 6(b) に示した座屈固有値に基づく臨界座屈応力の推定結果の変化を示す。臨界座屈応力とは分岐点に達するときの残留応力を指す。各つり合い状態でたわみ抑制効果が変化するため、臨界座屈応力の推定結果も変化するが、分岐点に近いつり合い点からの推定値がより真値に近いと考えるのが一般的である。打ち切り点と分岐点推定結果はほぼ一致しており、この点が非軸対称形への分岐点であると推定した。

次に、円板厚さを変えて臨界座屈応力との関係を調査した。残留応力層の厚さ $t = 2 \mu\text{m}$ の結果を図 8 に示す。"■" マークで示す円板厚さ h と臨界座屈応力 σ_{cr} には正の相関があり、予想どおり薄い円板はより小さな残留応力で分岐する。"○" マークは分岐点をたわみ量で整理した結果を示す。このとき、臨界座屈たわみ $|w_{cr}|$ は円板厚さ h に比例し、その比例係数 $|w_{cr}|/h$ は約 1.6 であった。本結果に従うと、ウェハ厚さ約 0.7 mm の規格品¹⁰⁾においてドーム変形を維持できるたわみは 1 mm 程度であるが薄片化ウェハでは数 $10 \sim$ 数 $100 \mu\text{m}$ と小さい。残留応力評価の主対象である mm オーダのウェハ変形は分岐後変形であり、シミュレーション範囲を拡張する必要がある。

それには先に示した分岐点における接線剛性の特異行列を数値解析でどのように扱うかが課題となる。本 FEM 数値解析手法は荷重増分法を用いて静的平衡応答を算出している。既知の平衡状態として荷重が作用していない初期状態から出発して、そこから少しだけ荷重を増加したときの平衡状態を求める。これを繰り返すことでつり合い経路を辿る。分岐点はつり合い経路上の不連続な特異点であるため、分岐点に到達すると以降の平衡点を辿ることができない。裏を返すと分岐点に到達するには限られた経路上を辿る必要がある。本例の場合には純曲げが作用する円板の軸対称ドーム変形を高い精度で維持すること、いわゆる完全系が欠かせない。この点で数値解析モデルは実ウェハよりもバラツキなどの不完全性が少ないため分岐点に到達

Fig.6 An estimation of bifurcation point by using eigenvalue solution

Fig.7 History of the critical stress estimated for each deflection

Fig.8 The variation of critical stress and deflection for different thickness of wafer

(a) A method to induce cylindrical warping

(b) Additional moment M_t for including anticlastic shape

Fig.9 Additional moment for post-buckling solutions

したと考えられる。

そこで本シミュレーションでは図 9(a) に示すように軸対称ドーム変形に非軸対称の鞍型面の変形を加えることによって完全性を低下させる。これにより分岐点を回避し、分岐後変形へ誘導する。鞍型面を選定した理由は図 6(b) の固有モード形状で

あり、誘導効果が高いと判断したことである。平坦な円板に鞍型面の反りを表現した初期形状不整を付与する方法もあるが、本解析では鞍型面の変形を誘導するような図 9(b) に示すモーメントを追加する荷重不整の方法を採る。追加誘導モーメントの分布を表す関数が簡潔で数値解析モデルに対して付与する鞍型面の大きさや方向の制御が容易である。この関数式において、 M_t は誘導モーメントの振幅であり、残留応力由来のモーメント M_0 に比べて十分小さく設定する。また、 ϕ は位相角を表し、 $\phi=0$ の基準方向は X 軸に一致する結晶方位 $[100]$ に沿って下に凸、 Y 軸方向に沿って上に凸の放物線を持つ鞍型面を創出する。

分岐後変形のシミュレーション結果を図 10 に示す。等方性円板と単結晶 Si ウェハを想定した異方性円板について残留応力の昇順でたわみ状態を比較したものである。ここでは変形の違いが明確な代表例として誘導モーメントの位相角 $\phi=36^\circ$ を取り上げる。各ペアの残留応力は同条件である。たわみ基準は円板中心であり、すべての残留応力条件で上に凸の反り変形を示した。残留応力が小さいときは軸対称ドーム変形、大きくなると円筒形に分岐する変形を示した。その形態とたわみ量について等方性と立方晶系異方性での相違は無い。ただし、分岐後変形方向について顕著な相違が示された。等方性円板では最小曲率方向と誘導モーメント位相角がすべての残留応力条件で一致したのに対し、異方性円板では分岐後円筒形の最小曲率方向が結晶方位 $[100]$ に一致した。異方性円板の分岐後曲げ方向が結晶方位に依存することを示唆した。

様々な位相角 ϕ に対する分岐後変形方向を図 11 に示す。最小曲率は結晶方位 $[100]$ あるいは $[010]$ のいずれか一方で誘導方向に近い方向であった。以上を総じて、

- (1) 等方性円板の分岐方向は平坦度や加工変質層の条件のバラツキに依存する。よって、一般にその予測はできない。
- (2) 異方性円板の分岐方向は結晶方向に依存する。対象ウェハである (001) 面 Si 単結晶ウェハの最大曲率は結晶方位 $[100]$ あるいは $[010]$ の 2 つに限られる。

上記(2)の検証を目的として、先ず実研削したウェハのオリフラ位置を確認した。円筒分岐変形した実ウェハ写真を図 12 に示す。結晶方位 $[110]$ を示すオリフラは最小曲率方向からおおよそ 45° 方向と識別され、シミュレーション結果に一致した。次にひずみエネルギーの方向依存性を確認した。最大曲率方向が結晶方位 $[100]$ および $[010]$ に沿うとき、ひずみエネルギーが極小値をとると考えられる。変形をもたらす唯一の根源を残留応力とした条件下においては外力ポテンシャルが存在しないのでひずみエネルギーは全ポテンシャルエネルギーに等しい。異方性板の面積を S とするとひずみエネルギー U は次式で表される。

$$U = \int_S dS \int_h A dz, \quad A = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_y \\ E'_x & E'_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E'_x & E'' \\ E'' & E'_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \end{bmatrix} \quad (14)$$

A はひずみエネルギー関数¹³⁾であり、式(2)の弾性係数を用いて表した。ウェハ変形の近似として、 X 方向ゼロ曲率、 Y 方向一定曲率 $1/\rho$ とする。このとき、ひずみエネルギー最小とする曲率は残留応力 α の関数として次式で表される。

$$\frac{\partial U}{\partial (1/\rho)} = 0 \rightarrow \frac{1}{\rho} = \frac{6\sigma_0 t}{E'_x h^2} \left(1 - \frac{t}{h}\right) = \frac{6\sigma_0 t}{E'_x h^2} e \quad (15)$$

式(15)の曲率を適用して、ひずみエネルギー関数 A を具体的に求めると次のように表示できる。

Fig.10 Influence of anisotropy on warping direction

Fig.11 Warping shapes resulted by an additional moment with phase ϕ

Fig.12 Orientation flat location in warping wafers

$$\frac{A}{A_1} = \left(1 - \frac{3t}{2h} \left(1 - \frac{t}{h}\right) \left(1 + \frac{E''}{E'_x}\right)\right) \quad (16)$$

A_1 は円板を強制的に平面保持するときのひずみエネルギーである。曲げ方向に依存しないので、ここでは定数とみなす。式(16)で結晶方位に依存する項 $(1 + E''/E'_x)$ を図 13 に示す。横軸 θ は結晶方位 $[100]$ とゼロ曲率方向を示す X 軸の間の角度差を示す。ひずみエネルギーに負の作用として働く項が $\theta=0$ および $\theta=\pi/2$ で最大値を示す。結論としてひずみエネルギーはこれらの角度で最小値をとる。曲率一定近似の前提ではあるが Si 単結晶ウェハの曲げ方向限定の要因はその異方性特性

と考えられる。

4. 変形による加工変質層の評価

薄片化ウェハについて加工変質層の残留応力と最大たわみの関係を明らかにするために分岐後変形シミュレーションを実施した。図9に示す誘導モーメントとして、 $M/M_0 = 10^{-3}$, $\phi = 0$ の条件を適用した。

シミュレーション結果の一例として、ウェハ厚さ $h = 0.05$ mm, 加工変質層の残留応力と厚さが $\sigma_0 = 400$ MPa, $t = 2$ μ m の面外方向変位コンタを図14に示す。最大たわみは 54.8 mm に達しており、これは図1の実ウェハ反り変形写真に示した反り量に同じレベルである。

この数値解析シミュレーションをいくつかの代表的なウェハ厚さ h について実施した。数値解による残留応力 σ_0 と最大たわみ $|w|_{\max}$ の関係を、加工変質層厚さ $t = 2$ μ m について図15に示す。残留応力が大きくなると最大たわみも大きくなる正の相関があり、残留応力が同じであれば薄いウェハほどたわみが大きくなる。 $h = 0.01$ mm と $h = 0.02$ mm において 30 mm を超えるたわみ領域を示していないのは、十分な精度を持つ静的平衡収束解に到達しなかったことによる。

次に式(15)に示した一定曲率近似によるたわみを算出し、数値解と比較し近似解としての実用性を確認した。ウェハ不伸張を仮定すると曲率 $1/\rho$ によるたわみ w は次式で表される。

$$w(r) = \left(\frac{1}{\rho}\right)^{-1} \left(\cos\left(\frac{1}{\rho} r\right) - 1 \right) \quad (17)$$

近似解による残留応力と最大たわみ ($r = 100$ mm) の関係を図16に示す。図15の数値解をほぼ近似する結果であり、実用的と判断した。最後に、たわみ量より残留応力を算出する手順を示す。

- (1) ウェハたわみ w を測定する
- (2) 式(17)を用いて w に対応する曲率 $1/\rho$ を算出する
- (3) ウェハ厚さ h と加工変質層の厚さの推定値 t から式(15)を用いて残留応力 σ_0 を推定する

5. 結 言

反り変形が顕著となる薄片化シリコンウェハについて、FEM数値解析を適用し、変形メカニズムの解明と加工変質層の残留応力評価手法を提案した。本研究においては反り変形の主要因である加工変質層の残留応力のみに焦点を絞り、自重や他の変形要因は無視しているが、得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 軸対称ドーム変形を維持できるたわみ量はウェハ厚さの1~2倍であり、薄片化ウェハでは目視困難な量である。
- (2) たわみ量が増すとドーム変形の臨界点に到達し、非軸対称の円筒曲げ形態に分岐する。分岐座屈の発生原因はウェハ径の収縮に伴う外周部圧縮ひずみ増加である。
- (3) Si単結晶ウェハの異方性特性により円筒曲げの最大曲率は結晶方位 [100] あるいは [010] のいずれかに限定して生じる。
- (4) 円筒曲げ曲率一定によるたわみの近似解は実ウェハ反り変形をシミュレーションした数値解をほぼ再現するものであり、残留応力評価に際して実用的と判断した。
- (5) シリコンウェハのたわみ量から残留応力を推定できる関係式を導き出した。

Fig.13 Orientation dependency in energy function

Fig.14 A warping deflection by numerical solution for thin wafers

Fig.15 Numerically calculated relationship between maximum deflection and residual stress

Fig.16 Estimated relationship between maximum deflection and residual stress

謝 辞

本研究の一部は、科学研究費 (No. 15H02213) の助成によって行われたことを記し謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) V. Kripesh, S. E. Yoon, V. P. Ganesh, N. Khan, M. D. Rotaru, W. Fang and M. K. Iyer: Three Dimensional System-in-package Using Stacked Silicon Platform Technology, IEEE Trans. Adv. Pack., **28**, 3 (2005) 377.
- 2) L. Zhou, B. S. Hosseini, T. Tsuruga, J. Shimizu, H. Eda, S. Kamiya, H. Iwase, Y. Tashiro : Fabrication and Evaluation for Extremely Thin Si wafer, Int. J. of Abrasive Technology, **1**, 1 (2007) 94.
- 3) 例えば, UCS 半導体基盤技術研究会編, 大見忠弘, 新田雄久監修 : シリコンの科学, リアライズ社 (1996) 989.
- 4) G. Janssen, M. Abdalla, F. Van Keulen, B. Pujada, and B. Van Venrooy : Celebrating the 100th anniversary of the Stoney equation for film stress: Developments from polycrystalline steel strips to single crystal silicon wafers, Thin Solid Films, **517**, 6(2009) 1858.
- 5) S. Timoshenko and S. Woinowsky Krieger : Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill, 2nd, Ed, (1952) 364.
- 6) 例えば, コンピュータによる構造工学講座, 山田嘉昭著 : マトリックス法材料力学, 培風館 (1970) 33.
- 7) S. Timoshenko and S. Woinowsky Krieger : Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill, 2nd, Ed, (1952) 399.
- 8) Jacob Fish, Ted Belytschko 著, 山田貴博監訳, 永井学志, 松井和己訳 : 有限要素法 ABAQUS Student Edition 付, 丸善出版, (2008).
- 9) 非線形有限要素法の基礎と応用, 久田俊明, 野口裕久著, 丸善 (2002) 306.
- 10) 例えば, 電子情報技術産業協会規格, : JEITA EM-3602 シリコン鏡面ウェーハの寸法規格に関する標準仕様(2002).
- 11) コンピュータによる構造工学講座, 鷺津久一郎著 : エネルギー原理入門, 培風館 (1970) 27.