

平成 21 年 6 月 12 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19760083

研究課題名（和文） 大面積・薄肉パネルを測定対象としたナノ形状測定に関する研究

研究課題名（英文） Study on Shape Measurement of Large-Thin Panel
with Nanometer order accuracy

研究代表者

伊藤 幸弘 (ITO YUKIHIRO)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・助手

研究者番号：80431972

研究成果の概要：シリコンウェーハの形状測定において重要なパラメータの一つである板厚測定結果に含まれる誤差の要因を検討した。その結果、数値解析にて用いるシリコンウェーハの弾性定数である可能性を考え、適当な弾性率を用いることにより板厚測定の不確かさが向上することを示した。また、シリコンウェーハの弾性率の異方性がたわみや振動に与える影響の調査を行った。その結果、ウェーハ面内における結晶方位の誤差が形状測定に与える影響は大きく無視できないことがわかった。さらに、測定時の支持点に対する結晶方位を変化させてウェーハの共振周波数を変化させることにより、外乱振動により励起されるウェーハの共振を回避できることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	0	1,500,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	330,000	2,930,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：シリコンウェーハ，ナノ形状測定，板厚，反り，弾性率，異方性

1. 研究開始当初の背景

次世代超LSIの高集積化に伴いシリコンウェーハの大口径化，および薄肉化が急速に進んでいる。さらに，近年では半導体デバイスのデザインルールの微細化に伴いウェーハの形状精度の更なる向上が要求されている。ウェーハの反りや板厚偏差は半導体デバイスの性能や品質，および製造工程に多大なる影響をおよぼす。しかし，直径 300mm，厚さ 0.775mm の大口径・薄肉ウェーハなどの形状

測定においてウェーハは重力などの外力により容易に変形し，振動などの外乱の受け易いために測定精度の向上が困難となっていた。

2. 研究の目的

研究開始当初までに反りの一種である Warp の高精度な測定方法として三点支持裏返し法を提案していた。一方で，板厚の高精

度な板厚測定方法として縦型測定法が提案されていた。このように反りと板厚のどちらを高精度に測定する方法は個々に開発されていたが、両者を同時に高精度で測定する方法は確立されていなかった。そこで、三点支持裏返し法とウェーハの自重によるたわみの数値解析を組み合わせることに伴って反りと板厚の高精度な同時測定方法の開発を試みた。

3. 研究の方法

(1) 三点支持裏返し法の原理

三点支持裏返し法は測定装置の幾何学的な誤差の自己補正方法である反転法の原理を利用している。原理の概略を図1に、支持点とウェーハの結晶方位の関係を図2に示す。本測定方法では安定した測定を行うためにウェーハの中心から同心円上で120deg毎に配置した3点で支持する。そして、まずウェーハのおもて面を上面とした時のおもて面形状 $f(x,y)$ を測定する。表面形状測定の基準面は3つの支持点の頂点を通る平面とする。このとき、反り形状 $w(x,y)$ 、自重によるたわみ $g(x,y)$ とすると、図1において一点鎖線で示されているおもて面とうら面から等距離にある面の形状は $w(x,y)+g(x,y)$ で表される。そして、おもて面形状 $f(x,y)$ は板厚分布 $t(x,y)$ 、および補正值 $s_i(x,y)$ を用いて次式で表される。ここで、 $s_i(x,y)$ は3つの支持点上の板厚が互いに異なることから、3点での板厚の中心を結んで作られる平面の傾きを線形的に補間する補正值である。

$$f(x,y) = w(x,y) + g(x,y) + \frac{t(x,y)}{2} + \frac{s_i(x,y)}{2} \quad (1)$$

次に y 軸を回転軸としてウェーハを裏返し、同様にうら面形状を測定する。このとき、ウェーハを裏返してもたわみは常に重力方向に生じるが反り形状は上下反転する。さらに、反り、たわみ、および板厚の x 座標の正負が反転する。したがって、うら面形状 $b(x,y)$ は次式で表される。

$$b(x,y) = -w(-x,y) + g(-x,y) + \frac{t(-x,y)}{2} + \frac{s_i(-x,y)}{2} \quad (2)$$

式(1)と式(2)の関係から、反り形状 $w(x,y)$ と板厚 $t(x,y)$ はそれぞれ以下の式により得られる。

$$w(x,y) = \frac{f(x,y) - b(-x,y)}{2} \quad (3)$$

$$t(x,y) = \{f(x,y) + b(-x,y)\} - 2g(x,y) - s_i(x,y) \quad (4)$$

式(3)に示すように Warp は実測したおもて面形状 $f(x,y)$ とうら面形状 $b(-x,y)$ の差を取り、自重によるたわみ $g(x,y)$ や板厚分布 $t(x,y)$ の影響を相殺することにより求めることができ

きる。これに対し、式(4)に示すように板厚分布は実測した表面形状だけでは求まらず、自重によるたわみや板厚分布から求まる補正值 $s_i(x,y)$ が必要となる。しかし、自重によるたわみを実測することはできないため数値解析により算出する。一方で、自重によるたわみは板厚の影響を受ける。そこで、式(4)を用いた繰り返し計算により板厚分布 $t(x,y)$ についてつじつまの合う解を求めることで、三点支持裏返し法によりウェーハの板厚分布を求めることができる。

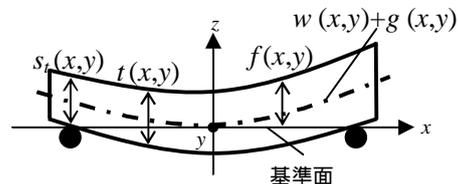


図1 原理の概略

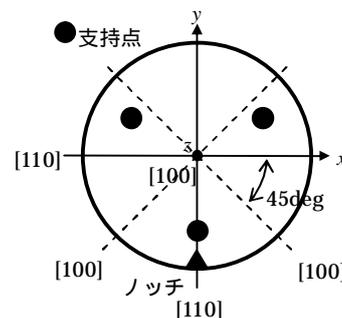


図2 三点支持と結晶方位の関係

(2) 板厚の測定誤差の低減

三点支持裏返し法を用いて得られた板厚と縦型測定法による板厚測定結果の比較から、図3に示す3つの支持点の位置において誤差が大きい特徴的な誤差分布が得られた。この形状は自重によるたわみの形状と同様である。ここで、三点支持裏返し法による板厚算出では前述のようにウェーハの自重によるたわみを数値解析により算出する。たわみの解析では単結晶シリコンの機械的物性である弾性率の異方性を考慮する。しかし、理科年表に記されている単結晶シリコンの物性値を用いて解析を行った場合には、ウェーハの自重によるたわみの実測値と解析値は厳密には一致しない。そこで、自重によるたわみの解析に用いる弾性率を同定した。

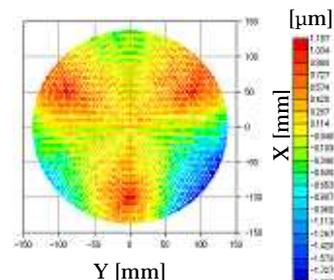


図3 三点支持裏返し法による板厚測定の誤差分布

(3) シリコンウェーハの弾性率の異方性を 利用した測定精度の向上

現在、シリコンウェーハに求められている板厚偏差は $1\mu\text{m}$ 程度である。したがって、形状測定、および自重によるたわみの解析結果に含まれる誤差は $0.1\mu\text{m}$ 以下である必要がある。しかし、三点支持裏返し法による形状測定の不確かさは $0.254\mu\text{m}$ である。ここで、ウェーハは弾性率に異方性を有する。そこで、弾性率の異方性がウェーハのたわみや振動に与える影響を調査し、測定精度向上の方法を検討した。弾性率の異方性がウェーハのたわみ与える影響として三点支持に対する結晶方位とたわみの関係を数値解析により求め、たわみの誤差への影響を調査した。また、図2に示すウェーハ面内において[110]方位を示しているノッチに対し、実際の[110]方位には誤差がある。また、ウェーハ面に垂直な方向は公称では[100]方位であるとしても、実際にはスライシングの精度により誤差がある。そこで、それらの公称の方位からの誤差が形状測定の誤差に及ぼす影響を数値解析により調査した。また、弾性率の異方性がウェーハの振動に与える影響として、ウェーハの結晶方位に対する支持点の位置がウェーハの共振周波数に与える影響を実験的に調査し、測定中のウェーハの共振を回避する方法を検討した。

4. 研究成果

(1) 弾性率の同定による板厚測定精度の向上

式(4)において、おもて面形状 $f(x,y)$ とうら面形状 $b(x,y)$ は表面形状測定装置による実測値であり、測定装置の運動などによる系統誤差なども十分補正されている。また、3つの支持点上の板厚の違いを考慮したオフセット量 $s_i(x,y)$ は x と y に関する線形式で表される。したがって、板厚の誤差の原因として、自重によるたわみ $g(x,y)$ の数値解析の誤差であると考えた。自重によるたわみの誤差の原因として、シリコンウェーハの剛性に注目した。剛性に影響を与えるパラメータとしては、板厚と弾性定数が考えられる。板厚については、シリコンウェーハ面内の何点かについて、縦型測定法による測定値と分解能 $1\mu\text{m}$ のデジタルマイクロメータによる測定値を比較した結果、 $1\mu\text{m}$ 以上の差は見られなかった。また、この程度の板厚の違いでは、図3に示す誤差を説明することはできなかった。したがって、自重によるたわみの誤差の原因を弾性定数であると考え、複数のパラメータの最適値を効率良く同定するパターン探索法により弾性定数の同定を行った。2枚のシリコンウェーハについて弾性定数の同定を行い、ウェーハが異なることにより同定結果も異

なることがわかった。この原因として、ウェーハに含まれる不純物の量の違いや、表面処理工程の研磨による残留応力の違いにより、ウェーハごとに剛性が異なる可能性を考えた。また、図4に例として Wafer A について、同定された弾性定数を用いた場合の、自重によるたわみの計算値の誤差分布を、図3と同じスケールを用いて示す。図3において見られた3つの支持点の位置で高い特徴的な分布を持つ誤差が、同定後には大幅に低減していることがわかる。板厚分布の不確かさについては $0.49\mu\text{m}$ から $0.30\mu\text{m}$ に改善された。

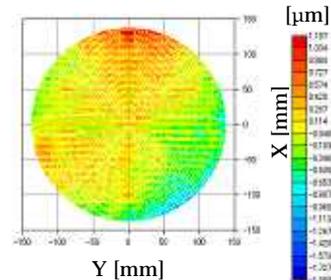


図4 弾性定数同定後の板厚測定の誤差分布

(2) 弾性率の異方性がたわみに与える影響 支持点の方角に対する結晶方位

表面形状測定におけるウェーハの自重によるたわみを小さくすることにより、測定センサに求められるダイナミックレンジを小さくすることができる。測定センサの分解能が向上することにより測定精度の向上が期待できる。一方、シリコンウェーハの弾性率の異方性のために、結晶方位によりたわみが異なる。そのため、支持点の方角に対する結晶方位の変化により自重によるたわみが変化する。したがって、支持点の方角に対する結晶方位を調整することにより、自重によるたわみをさらに低減できる可能性を調査した。しかし、自重によるたわみのみを直接測定することはできない。そこで、数値解析により、支持点の方角に対する結晶方位を回転させたときの自重によるたわみのP-V値の変化を求めた。3つの支持点と結晶方位の位置関係の対称性から、影響を調べるための回転角度は 30deg 以内で十分である。解析の結果、自重によるたわみのP-V値が約 $2\mu\text{m}$ しか変化しないことがわかった。

ウェーハ平面内の結晶方位の精度

シリコンウェーハに刻まれているノッチは、一般的に[110]方位を示している。しかし、シリコンウェーハへのノッチの加工における機械的な誤差により、ウェーハ平面内において公称の結晶方位に対する実際の結晶方位に $\pm 1\text{deg}$ 程度の誤差が生じる。ここで、自重によるたわみの数値解析では公称の結晶方位を用いている。したがって、公称の結晶方位と実際の結晶方位に誤差が生じてい

る場合には、数値解析と実際の自重によるたわみに誤差が生じる。そこで、ウェーハ平面内における結晶方位の回転が自重によるたわみに与える影響について検討した。図2に示すように[110]方位が正確にy軸上にある場合を基準とし、実際の結晶方位がz軸を回転軸として時計回りに1deg回転したときの自重によるたわみのP-V値の変化を求めた。その結果、自重によるたわみのP-V値の変化は0.248 μm となった。ここで、自重によるたわみの誤差がないと仮定した場合の三点支持裏返し法による板厚算出の不確かさは0.368 μm である。これに対し、前述のようにノッチが示す結晶方位の誤差により自重によるたわみに誤差が生じた場合には、不確かさは約1.7倍の0.618 μm になる。このように、ウェーハ平面内における結晶方位の回転による誤差が板厚測定精度の不確かさに与える影響は大きく、三点支持裏返し法による板厚測定においてノッチにより示される結晶方位の精度が重要であることがわかった。

ウェーハ平面に対する結晶面の傾き

一般的な直径300mmシリコンウェーハにおいて、公称ではウェーハ平面に垂直な方向は[100]方位とされている。しかし、シリコンインゴットからウェーハを切り出すスライシング工程において、[100]方位に対してワイヤソーが傾いて切断されることにより、ウェーハ平面に対する実際の[100]方位が傾く可能性が考えられる。そこで、例えば図2に示すy軸と平行な[110]方位を回転軸として時計回りに結晶方位が5deg回転したときの自重によるたわみのP-V値の変化を見積もった。この場合の自重によるたわみのP-V値の変化は0.035 μm となり、板厚算出の不確かさは0.375 μm となった。このように、ウェーハ平面に対して結晶方位が5degも回転したと考えた場合でも、三点支持裏返し法による板厚算出の不確かさの変化は十分に小さい。したがって、ウェーハ平面に対する結晶面の傾きが、板厚測定の不確かさに与える影響は無視できることがわかった。

(3) 表面形状測定におけるウェーハ共振回避による測定精度の向上

大面積・薄肉パネルは、測定装置の運動により生じる振動や地盤振動などの外乱振動の影響を受け易い。外乱振動の影響は表面形状測定精度の低下を招く。ここで、シリコンウェーハの弾性率は異方性を有し、弾性率の異方性はウェーハの振動に影響を与える。具体的には、3つの支持点と結晶方位の位置関係により境界条件が変化し、ウェーハの共振周波数が変化すると考えられる。そこで、支持点の方角に対する結晶方位を変化させてウェーハ共振周波数を変化させることによ

り、外乱振動により励起されるウェーハの共振を回避する方法を考案した。測定装置上で三点支持されたウェーハの表面を測定した。測定装置を運動させて、図2に示すようにノッチがy軸上にある場合を0degとし、ウェーハをz軸回りに15, 30deg回転させたときのウェーハの表面形状を測定した。測定結果のFFT解析結果を図5に示す。例えば0degで見られる約137Hz付近のウェーハの振動が30degでは見られない。以上の結果から、表面形状測定において支持点の方角に対する結晶方位を回転させることにより、測定装置の運動により励振されるウェーハの共振を回避できると考える。

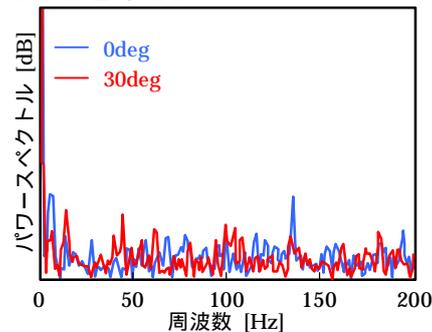


図5 シリコンウェーハの振動

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計2件)

伊藤幸弘, 夏恒, 国枝正典, シリコンウェーハの異方性が形状測定に与える影響, 第7回生産加工・工作機械部門講演会, 2008.11.22, 長良川国際会議場

伊藤幸弘, 夏恒, 国枝正典, 三点支持裏返し法によるシリコンウェーハ板厚測定精度の向上, 2008年度精密工学会春季大会学術講演会, 2008.03.18, 明治大学生田キャンパス

6. 研究組織

(1)研究代表者

伊藤 幸弘 (ITO YUKIHIRO)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・助手

研究者番号: 80431972

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし