

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 29 日現在

機関番号：12101

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2015

課題番号：25709005

研究課題名(和文)2次元同時分光イメージング計測による大径極薄<10umウェハ機上全面厚さ計測技術

研究課題名(英文)On machine wide area thickness measurement technology for wafer thinning process development

研究代表者

小貫 哲平 (Onuki, Teppei)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：70400447

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,900,000円

研究成果の概要(和文)：次世代大口径ウェハ極薄化工程に必要な厚さ計に求められる性能を満たすため、(1)測定レンジ最適化(全レンジ網羅)・高精度化(公差評価、厚さ変動評価)・精度保証(誤差特性の解明)、(2)広域イメージング厚さ計測技術、(3)プロセス制御のためのオンマシン、インプロセス計測技術、の各要素技術を開発し、世界最高水準の半導体製造技術に資する技術に仕上げた。

研究成果の概要(英文)：Optical thickness measurement technologies for next generation of wafer thinning process are developed, for (1) optimized measurement range (whole range from initial to destination thickness), high precision (evaluations of tolerance and thickness variation within 0.1 micron order precision), precision assurance (calibration techniques and analysis of error characteristics), (2) wide area imaging thickness measurement techniques, and (3) on-machine and in-process measurements for process control.

研究分野：光計測

キーワード：ウェハ薄片化 厚さ計測 画像計測 干渉計 分光

1. 研究開始当初の背景

厚さ 30 μm 以下の薄基板（半導体又は強誘電体）の製造技術が IC チップ、携帯情報端末用デバイス、電力制御デバイス、LED 基板、撮像デバイスなどでその機能向上・省エネ・薄型軽量化のために求められている。薄基板電子デバイス製造法には回路形成後ウェハの裏面研削による直接薄化と張り合わせウェハの犠牲層エッチング剥離の 2 手法がある。どちらの場合においても厚さ 30 μm 級ではウェハ全面の厚さ（thickness）及び厚さ変動（thickness variation）に高い精度及び平坦性が求められ [R. Huemoeller, SEMICONwest 2010] この 2 項目の計測評価技術の重要性が従来厚ウェハ検査よりも一層高く、薄ウェハ製造技術のキーテクノロジーとなっている。この困難に対処するためには、

- (1) 測定レンジ最適化・高精度化・精度保証
- (2) 全面一括（エリア）検査、及び
- (3) ウェハ脱着搬送不要オンマシン検査

の 3 課題への対応が急務である。従来ウェハの検査法である、静電容量型変位計、レーザ変位計、近赤外レーザ厚さ計などは機械的走査による誤差発生や両面計測が必要など (1)(2) に問題がある。また測定装置の計測原理に基づく限界や大口径・薄化により顕著に生じる自重や残留応力による変形・破損の影響のため両面から計測する構成は使用できない。蘭国 Eindhoven University of Technology の M. Jansen ら [Annals of CIRP, 2006] のような白色干渉イメージング法でも、計測領域の継ぎ合わせ処理のための誤差発生や両面計測のため (1)(3) に問題がある。米国 NIST の R. Parks ら [American Society for Precision Engineering, 2003, Optics Express, 2012] のような近赤外レーザ干渉イメージング法は全面計測に適した方式ではあるが、スペックルノイズや位相渦による位相 Wrap エラーやゴースト発生、計測面と参照面が物理的に分離している為振動の影響を受けやすいなど精度劣化懸念や、高価な大口径平坦参照面を多数要するなど (1)(3) に問題がみられる。

2. 研究の目的

次世代極薄 (<10 μm) 半導体・強誘電体ウェハ製造におけるウェハ厚さ検査技術として上記 (1) 高精度化・精度保証、(2) 全面計測、及び (3) オンマシン計測、を可能とする技術の研究開発を推進し、本方式による

- (1) 厚さ計測範囲 0.1 μm ~ 100 μm , 厚さ計測精度 10nm 以内の保証
- (2) 300mm エリア一括計測 及び

(3) プロセス制御のための精密研削盤上でその場計測を実現させる。

3. 研究の方法

(1) 測定レンジ最適化・高精度化・精度保証
測定システムを構築する。【(3) オンマシン計測】に適した反射分光方式を用いる。装置設計・ハードウェア構築・解析方法の確立を行い、評価方法の確立そして本装置の評価を行う。

解析モデルの検討 入射光に対して表面と裏面との間の多重反射（いわゆる Fabry-Perot 干渉）での定在波条件に相当する干渉縞の間隔と厚さとの関係式を取り扱いやすい形で新たに導出する。この式を基に、測定レンジ・測定精度を得る指針を求める。

測定条件最適化 実用に即した測定レンジ・測定精度の要求仕様に対応した分光計測条件を の式を基に求める。

分光エリプソメータを用いた半導体ウェハの光学定数分散の測定を行い、屈折率分散と光吸収特性を把握して、最適な分光計測条件を調査する。

測定レンジ・測定精度に加えて測定ダイナミックレンジの最適化を実験的に検討・検証するために、高分解能かつダイナミックレンジの絶対値計測が可能な光スペクトラムアナライザを用いた測定装置を構築し、最適な測定条件の実証実験を行う。これら理論的および実験的な研究から、本手法での測定レンジおよび測定精度の限界を求める。

校正技術開発 厚さおよび表面性状（表面粗さ、表面形状）が既知の標準試料（購入あるいは自作）を準備し、測定確度を保証する校正技術を開発する。

不純物の条件が異なる半導体ウェハに対してエリプソメータを用いた広い波長範囲の光学定数の測定を行い、校正に対する屈折率分散とその変化の影響を調べる。

誤差要因と誤差特性 オンマシン計測におけるアライメント精度の制限や、研削加工面（仕上げ前）の劣悪な表面品位など理想的な測定条件から離れた計測において誤差要因が測定結果に与える影響について調べる。厚さや表面性状を既知とした試料を用いた実験と、誤差要因の条件を任意指定できるコンピュータシミュレーションによる解析技術を開発して、定量的な誤差特性の評価を

行い、実用条件の範囲での測定精度の限界を見積もる。

(2) 全面一括（エリア）検査

反射スペクトル（ λ 軸）を2次元的（ x 軸， y 軸）に取得するための方式を検討し、それぞれの長所短所を整理して、その中から本目的に最適な方式を選び出し、開発を進めていく。

測定方式の検討 分光には前分光と後分光の2方式がある。そして2次元像の計測にはミラーまたはステージ移動による空間掃引と撮像デバイスによる結像、およびその両方を用いた3方式がある。方式選定のポイントは、照明の光量、波長分解能、測定レートである。

スキャン方式 従来のピンポイント反射スペクトル計測（ λ ）に、ミラー掃引または被測定物のステージ2次元掃引など機械的掃引機構（ x, y ）を組み込む実装技術を検討する。

前分光イメージング方式 近赤外線カメラによる反射面のテレセントリック撮影（ x, y ）に対し、照明に単色波長掃引機構（ λ ）を付加し、広域かつ均一な照射域を形成する実装技術を検討する。

後分光イメージング方式 白色光照明に広域かつ均一な照射域を形成し、近赤外線カメラによる反射面のテレセントリック撮影に分光機構も付加（ x, y, λ ）する実装技術を検討する。

(3) ウェハ脱着搬送不要オンマシン検査

加工時計測 ウェハ加工用研削盤に開発した測定装置を組み込んでオンマシン計測（加工を止めての非同時計測）によりウェハ加工の時間的特性を取得する。

全面計測 オンマシンでのイメージング厚さ計測によりウェハ加工の空間的特性を取得する。

4. 研究成果

- (1) 測定レンジ最適化・高精度化・精度保証解析モデル完成 n 次多重反射における多光束干渉の定在波条件から Fabry Perot 干渉の厳密な表現式（離散的、パラメータが多数で取り扱いにくい）を導出し、

$$d = \frac{\lambda_i \lambda_{i+1}}{2(n_i \lambda_i - n_{i+1} \lambda_{i+1})} \quad (\text{式 1})$$

それを実用し易い近似的表現とした。

$$d = \frac{\lambda_{\max} \lambda_{\min}}{2n_c} \frac{1}{\lambda_{FSR}} \quad (\text{式 2})$$

この表式を基に要求仕様と測定レンジ・測定精度を両立することができる分光計測条件を求め、本研究で導入する分光器の選定に活用した。

多光束干渉における反射率の式を表面と裏面のフレネル係数を独立に取り扱う式を導出し、各々の面の表面粗さによる光拡散による正反射光の減衰をフレネル係数に補正係数として表現する計算方法を開発して、誤差特性の解析に活用した。

$$R = \frac{\langle r_1 \rangle^2 - 2\langle r_1 \rangle \langle r_2 \rangle (\langle r_1 \rangle^2 + \langle t_1 \rangle^2) \cos(2\delta_{local}) + \langle r_2 \rangle^2 (\langle r_1 \rangle^2 + \langle t_1 \rangle^2)^2}{1 - 2\langle r_1 \rangle \langle r_2 \rangle \cos(2\delta_{local}) + \langle r_1 \rangle^2 \langle r_2 \rangle^2} \quad (\text{式 3})$$

測定条件最適化 を基に最適な分光計測条件（分光レンジと分光分解能）を求め、最薄（最終厚さ < 1 μ m）のために > 600nm の分光レンジ、最厚（初期厚さ > 800 μ m）のために < 0.2nm の分光分解能が必要であることを明らかにした。

半導体の光学定数の波長分散をローレンツモデルを用いた理論モデルや実測データから調査し、波長 < 1 μ m およびその近傍は基礎吸収端による強い屈折率分散と吸収損失のため制限され、波長 > 5 μ m では自由担体のプラズマ共鳴応答による屈折率分散と吸収損失（特に p+ドープ）のため制限されることを明らかにした。

光スペクトラムアナライザを用いた測定装置による実験から、上記の結論を実験的に証明した。また分光測定における光学的スループットの絶対値計測を行い、高分光分解能化のダイナミックレンジ上の制限も定量的（0.1nm 分解能で -80dbm）に評価した。

校正技術開発 厚さ 25 μ m ~ 100 μ m（公差 1%、ウェッジ 5°、表面品質 10/5、面精度 $\lambda/50$ ）が保証されたシリコン薄片標準試料を用いて、光スペクトラムアナライザによる測定値を真値とした本開発装置の校正技術を開発した。これにより理想的な計測条件下での本装置の測定値の誤差 10nm クラスの精度保証が実現された。低品位研削面をもつウェハ薄片に対して Zygo 粗さ計による同一箇所の表面と裏面の表面粗さの実測によって任意の表面粗さを持つ試料を作成し、表面粗さが異なる標準試料を作成する手法を開発した。

校正による補正係数は（式 2）の屈折率 n_{eff} の誤差としてくり込むことで厚さと同時に屈折率を求めることにも相当する。近赤外 ~ 中赤外線分光エリブソ

メトリで測定した屈折率分散と比較し、有効数字2桁程度までの一致は確認できたが、10nmクラスの精度のためには校正が必須であることが示された。

誤差要因毎の誤差特性の解明 反射分光計測におけるアライメント誤差(焦点ボケ、計測角)および研削加工によるウェハ表面の品質(表面粗さ、形状、変質)の5因子を取り扱えるシミュレーション法を開発した。幾何光学(モンテカルロ光線追跡)と波動光学(式3 多光束干渉)の連成シミュレーション法により、アライメント誤差を幾何光学モデルで、ウェハ表面品質を波動光学モデルで取り入れ、それらの影響について定量的に調べた。その結果、光照射と光検出が同軸の場合、アライメント誤差の影響は軽微であることが確認された。支配的誤差要因はウェハ形状であり、形状の条件によっては深刻(誤差200%)な誤測定値を示す可能性がある事がわかった。2乗平均粗さ100nm以上の場合、光拡散による反射損失で測定そのものが困難であることも確認され、光拡散を回避するために分光帯域を長波長化することが有効であることも明らかとした。

(2) 全面一括(エリア)検査

測定方式の評価 各測定方式の利点欠点を分析し、前分光イメージング方式またはミラー掃引のスキニング方式が本研究の目的には適していることが確認された。

スキニング方式 まず現有機器で実験可能であったステージ掃引によって全面厚さ計測を行った。ピンポイント計測の2次元スキャンによるイメージング厚さ計測を実演した。光ファイバプローブによる取り回しの良さから機上計測にも適用することができた。

前分光イメージング方式 近赤外カメラと口径150mmテレセントリックレンズを購入し、照明(150Wハロゲンランプ)への単色波長掃引機構として液晶可変フィルタ、チューナブルFabry-Perot干渉フィルタ、および回折格子分光器を用い、広域かつ均一な照射域を形成する光学系を開発した。可視広域で分解能10nm直径70mmの照明を開発したが、適正波長帯からのずれ、照度不足、分解能不足のため厚さ計測は達成できていない。

後分光イメージング方式 まず、近赤外線カメラとバンドパスフィルタ(分解能10nm)の構成でくさび状断面のウェハ薄片の干渉縞イメージング観察を行い、本方式の実現可能性を示した。次にカメラの前に分光器を取り付け撮像素

子と1次元スキャンによるイメージング厚さ計測を実演した。厚さイメージを求めるため波長サンプリング532、空間サンプリング256x256を12bit、計52MBと大きなデータ量を分析するため計算高速化など課題が明らかとなった。空間サンプリングを64x64程度に抑え、波長サンプリングを範囲600nm/分解能0.2nm=3000で12bit、計12MB程度が実用的条件であることがわかった。また機上計測には大型な装置構成となり、コンパクト化が課題であることが確認された。

(3) ウェハ脱着搬送不要オンマシン検査

加工時計測 ピンポイント計測で8インチ径ウェハの厚さ100 μ mから7 μ mまでの極薄化加工におけるオンマシン計測による厚さ変化モニタリングを実演した。厚さを確認しながらの加工パラメータ調整などへの本計測技術の有用性を示した。

全面計測 8インチ径極薄ウェハ作製中におけるピンポイント計測の2次元スキャンによる全面イメージング厚さ計測を実演し、作製過程での全面厚さ分布(平均厚さ45 μ m、TTV8 μ mの凸型プロファイル)の評価を実現した。高平坦度加工のための研削盤ステージアライメント制御などへの本計測技術の有用性を示した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計11件)

Teppei Onuki, Yutaro Ebina, Hirotaka Ojima, Jun Shimizu and Libo Zhou, Wide range and accurate measurement of wafer thickness gauge using optical spectrum analyzer, Applied Mechanics and Materials, **806**, 581-585, 2015/10, 査読有

小貫哲平、小野竜典、尾島裕隆、清水淳、周立波、近赤外分光器を用いた反射分光方式の薄シリコンウェハ厚さ計、砥粒加工学会誌, **58/8**, 515-519, 2014/08, 査読有

Hirotaka Ojima, Libo Zhou, Jun Shimizu, Teppei Onuki, Taiju Suzuki, Development of Areal Wavelet Transform for the 2D images, Proc. of 15th International conference on Precision Engineering, 884-887, 2014/07, 査読有

Teppei Onuki, Hirotaka Ojima, Jun Shimizu, Libo Zhou, Comparative Investigations of Analysis Methods in Thickness Inspections of Ultra Thin Semiconductor Wafers by Means of White

Light Reflectometry, Proc. of 15th International conference on Precision Engineering, 836-837, 2014/07, 査読有

Teppei Onuki, Ryusuke Ono, Hiroataka Ojima, Jun Shimizu and Libo Zhou, Influence of surface integrity in silicon wafer thickness measurements by reflection spectroscopy, Advanced Materials Research, **1017**, 681-685, 2014/06, 査読有

周立波, 清水淳, 小貫哲平, 尾嵩裕隆, 山本武幸, 日本縦断研究室巡り 茨城大学 Nano-Engineering Laboratory (nLab), レーザ協会誌, **39/ 1**, 33-35, 2014/05, 査読無

Teppei Onuki, Ryusuke Ono, Akira Suzuki, Hiroataka Ojima, Jun Shimizu, Libo Zhou, A Thin Silicon Wafer Thickness Measurement System by Optical Reflectometry Scheme Using Fourier Transform Near-Infrared Spectrometer, Advanced Materials Research, **797**, 549-554, 2013/09, 査読有

[学会発表](計 15 件)

小貫哲平, 幾何光学と波動光学の連成解析によるウェハ厚さ計測の誤差特性, 第 63 回応用物理学関係連合講演会, 2016/3/21, 東京工業大学, 東京都・世田谷区

小貫哲平, 光学式ウェハ厚さ計測における測定精度特性に関する研究(第2報), 精密工学会秋季大会学術講演会, 2016/03/15, 東京理科大学・千葉県・野田市

Teppei Onuki, Wide range and accurate measurement of wafer thickness gauge using optical spectrum analyzer, The 18th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2015), 2015/10/06, Jeju (Korea)

小貫哲平, 光スペクトラムアナライザを用いたウェハ厚さ計測, 第 76 回応用物理学学会学術講演会, 2015/09/15, 名古屋国際会議場, 愛知県・名古屋市

小貫哲平, 光学式ウェハ厚さ計測における測定精度特性に関する研究(第1報), 精密工学会秋季大会学術講演会, 2015/09/04, 東北大学, 宮城県・仙台市

小貫哲平, イメージングウェハ厚さ全面計測技術の開発, 第 16 回高エネ研メカ・ワークショップ, 2015/04/10, 高エネルギー加速器研究機構, 茨城県・つくば市

小貫哲平, 極限加工グループの成果報

告-成果概要とウェハ検査技術-, 推進研究プロジェクト成果報告会・特別講演会, 2015/03/06, 茨城大学, 茨城県・日立市

Teppei Onuki, Influence of surface integrity in silicon wafer thickness measurements by reflection spectroscopy, The 17th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2014), 2014/09/23, Hawaii (USA)

小貫哲平, 白色反射光計測によるウェハ厚さ測定における表面性状の影響, 第 75 回応用物理学学会学術講演会, 2014/09/17, 北海道大学, 北海道・札幌市

Teppei Onuki, Comparative Investigations of Analysis Methods in Thickness Inspections of Ultra-Thin Semiconductor Wafers by Means of White Light Reflectometry, 15th International conference on Precision Engineering (ICPE2014), 2014/07/23, ホテル日航金沢, 石川県・金沢市

小貫哲平, ウェハ極薄加工におけるオンサイト厚さ計測技術, 第 15 回高エネ研メカ・ワークショップ, 2014/04/11, 高エネルギー加速器研究機構, 茨城県・つくば市

小貫哲平, 薄シリコンウェハ検査における白色光干渉断層計と白色光分光厚さ計の比較検討, 第 61 回応用物理学関係連合講演会, 2014/03/18 青山学院大学, 神奈川県・相模原市

Teppei Onuki, A Thin Silicon Wafer Thickness Measurement System by Optical Reflectometry Scheme Using Fourier Transform Near-Infrared Spectrometer, The 16th International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT2013), 2013/09/25, Hangzhou (China)

小貫哲平, 反射分光式シリコンウェハ厚さ計で用いる短波長近赤外帯 (SWIR) 光学定数分散の検討, 第 74 回応用物理学学会学術講演会, 2013/09/17, 同志社大学, 京都府・京田辺市

小貫哲平, 薄ウェハデバイス加工・検査工程の研究開発 反射分光計測技術をベースとした検査技術, 第一回 STARC ワークショップ, 2013/09/1, 新横浜国際ホテル, 神奈川県・横浜市

[その他]

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/nlabibara/kiuniv/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

小貫 哲平 (ONUKI TEPPEI)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：70400447

(2)研究分担者

無し

(3)連携研究者

無し

(4)研究協力者

周 立波 (Zhou Libo)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：90235705

清水 淳 (Shimizu Jun)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：40292479

尾鷲 裕隆 (Ojima Hirotaka)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：90375361

山本 武幸 (Yamamoto Takeyuki)

茨城大学・工学部・技術職員

研究者番号：40396594