光散乱パターンを用いたシリコンウエハ加工表面欠陥の インプロセス計測に関する研究 (第2報)*

—高速欠陥計測法の提案—

高橋 哲** 三好隆志** 高谷裕浩** 立野泰史***

Study on In-Process Measurement of Silicon Wafer Surface Defects by Laser Scattered Defect Pattern (2nd Report)
- Fast Defect Measurement Method using LSDP -

Satoru TAKAHASHI, Takashi MIYOSHI, Yasuhiro TAKAYA and Yasufumi TATSUNO

This paper presents a new in-process measurement method for evaluating small defects on a silicon wafer surface by detecting the intensity distribution, "Laser Scattered Defect Pattern (LSDP)," corresponding to the superposition of scattered light from a defect and reflected light from a surface. In order to apply this optical measurement method to in-process measurement, two-stage measurement is proposed. That is, the first stage means "detection of defect positions" and the second stage does "evaluation of defect type". The several basic scanning experiments show that the proposed two-stage measurement method is effective automatic in-process measurement technology for measuring the silicon wafer surface defects with the sub-micro meter scale size at high speed.

Key words: silicon wafer, surface defects, in-process measurement, Laser Scattered Defect Pattern

1. 緒 言

半導体集積回路の製造において、その基板となるシリコンウエハ加工表面に存在するサブマイクロメートル程度の微小欠陥は製品デバイスの歩どまりを直接支配する。ますます高機能化する次世代半導体デバイスの信頼性を高め、歩どまりの向上を図るためには、それら微小表面欠陥の発生状況に応じた高度なプロセス管理が不可欠である。そこで本研究は、そのようなプロセス管理を可能にする微小表面欠陥の検出・評価技術の確立を目的とし、従来の散乱光量に基づく手法^{1)~5)}とは異なった新しい測定原理に基づくシリコンウエハ加工表面欠陥計測法⁶⁾の開発を行っている。

提案手法は様々な形態を持つ微小欠陥から異なった分布で散乱する光波とウエハ表面から反射される光波のオンアキス型干渉現象に基づく光散乱パターン (LSDP) から微小欠陥の検出・評価を行うものである。すなわち、本手法は散乱光量から微小欠陥を計測する従来の高速欠陥計測法とは異なり、光散乱パターンという画像情報から微小欠陥の計測を行うもので、従来法として一般的な散乱光量を複数チャンネルで評価する手法と比較し、より詳細な欠陥形態の識別が可能であるという特徴を有する。前報⁶⁾では、一般化ローレンツ・ミー理論に基づいた理論解析と検証実験を行い、光散乱パターンより微小欠陥の検出が可能であるばかりでなく、従来困難であった欠陥形態の識別も可能になることを示唆した。

本報では、本手法の優れた欠陥識別能力^{6)~8)}を活かしながら、従来手法と同様な高速性を達成するため、二段階計測法を提案し、その妥当性の確認を行った。具体的には、まず、前報で報告した光散乱パターン検出基礎実験光学系をベースとしたSiウエハ加工表面欠陥計測装置を構築し、ポリスチレンラ

Fig.1 Principle of defect measurement by LSDP

テックス標準粒子を欠陥試料とした走査検証実験を行った。次に、光散乱パターンを光強度として検出する高速欠陥位置検出法を提案し、三種類の異なる粒径を有するポリスチレンラテックス標準粒子を散布したウエハに対し、欠陥位置検出と形態識別の二段階計測法を試み、本提案手法の有効性を実験的に検証したので報告する。

2. 二段階計測に基づいた高速欠陥計測法

図1は光散乱パターンを用いた欠陥計測法の測定原理である。高倍率の対物レンズによって集光されたレーザービームを、焦点位置からあるデフォーカス量をもって設置されるウエハ表面に照射する。ウエハ表面の微小欠陥およびその近傍表面から散乱・反射した光波を再度同一の対物レンズを通し、光散乱パターンとしてCCDエリアセンサで検出することによって微小欠陥の評価を行うものである。オンアキス型干渉現象に基づく光散乱パターンの強度分布は、散乱光の振幅分布だけでなく位相分布も反映されたものとなり、図1(a), (b)に示すように微小欠陥の形態によって光散乱パターンは大きく変化する⁶⁾。そのため、様々な種類の欠陥に対する光散乱パターンデータベースを準備することで、欠陥種類の識別が可能になる。

* 原稿受付 平成13年10月24日

** 正会員 大阪大学大学院工学研究科 (吹田市山田丘2-1)

*** 学生会員 大阪大学大学院工学研究科 (現、ソニー(株); 東京都品川区北品川6-7-35)

Fig.2 Concept of fast defect measurement method based on two-stage measurement

Fig.3 Schematic diagram of silicon wafer surface defects measurement system by detecting LSDP

本報では、この光散乱パターンに基づいた欠陥計測法の高速度化を目的として、二段階高速欠陥計測法（図2）を提案する。つまり欠陥の計測を、欠陥位置の検出（第一段階）と検出欠陥の形態評価（第二段階）の二段階に分けて実現することを考えたものである。まず第一段階では、ウエハ全面に対して高速にビームの走査を行い、検出光強度の変化から欠陥位置を特定する。次に第二段階として、第一段階で特定した欠陥位置に限定し光散乱パターンの取得を行い、その光散乱パターンを解析することで欠陥の識別・評価を行う。すなわち、CCDエリアセンサは情報量の多い画像データを一括して取得できるが比較的長い検出時間を必要とするため、光散乱パターンの取得のみに適用し、一方、欠陥位置の特定は、従来手法と同様に光電子増倍管といった高速サンプリングが可能な一次元の光量センサを適用することで、高速化を図るものである。

3. Si ウエハ加工表面欠陥計測装置

3.1 光散乱パターン検出光学系

二段階高速欠陥計測法の有効性について実験的に検討するため、前報で報告した基礎実験光学系に二次元ビーム走査機能を付加したSi ウエハ加工表面欠陥計測装置（図3）を構築した。本実験装置は、Ar⁺レーザ、光ファイバ、コリメートレンズ、対物レンズからなるレーザ集光・照射光学系と、対物レンズ、光散乱パターン伝搬用リレーレンズ、CCD エリアセン

サからなる反射・散乱光検出光学系の大きく二つに分けられ、一つの対物レンズを両者に併用させる構成となっている。Ar⁺レーザ光源（波長 488nm、出力 15mW）から出射した直線偏光のレーザ光は、光ファイバを用いて計測装置光学系へ導入される。光ファイバを出射したレーザビームは、レンズによりコリメートされ、偏光子を用いて再び直線偏光とされた後、高NA対物レンズ（開口数 0.95、倍率 200倍、焦点距離 1.0mm）へと至り、ウエハ表面に集光・照射される。高NA対物レンズは静電容量型フィードバックピエゾ位置決め装置にマウントされており、10nm という高精度なデフォーカス量（ δf ）制御が可能である。また、シリコンウエハは、1ステップ0.5 μ mのステッピングモータステージ上に設置され、PCにより自動制御を行うことで、相対的にウエハ表面上の二次元ビーム走査が可能となる。なお、光学素子やウエハ表面への塵埃の付着を最小限におさえるために、光学系全体をクリーン度 10レベルのクリーンベンチ内に設置した。

3.2 走査検証実験

開発したSi ウエハ加工表面欠陥計測装置の二次元ビーム走査機能を確認するため、ポリスチレンラテックス標準粒子を欠陥試料とした走査検証実験を試みた。実験は、(1) 標準粒子（粒径 0.21, 0.61 μ m）を無作為に散布したベアウエハを被測定ウエハとして、(2) 矩形検査領域（40 μ m × 50 μ m）の二次元走査（ピッチ間隔 2.5 μ m）を行い、欠陥部において生じる光散乱パターンを検出する、(3) 次にあらかじめ取得した標準光散乱パターンとのパターンマッチングから付着形態の推定を行い、

Fig.4 LSDPs detected by basic scanning experiment

Fig.5 Particle map based on LSDPs

Fig.6 Particle map observed by SEM

Defocal setting ($\delta f = 5 \mu\text{m}$) Non-defocal setting ($\delta f = 0 \mu\text{m}$)

Fig.7 Variation of LSDP at non-defocal setting

パーティクルマップの作成を試みる、(4)最後に走査電子顕微鏡 (SEM) を用いて、得られたパーティクルマップの検証を行う、といった手順で行った。なお、ここでは、欠陥形態、サイズに、それぞれ依存する光散乱パターンの明暗縞形状と一次明輪強度に注目してパターンマッチング⁶⁾を行った。また、本走査実験で設定したデフォーカス量 $\delta f = 5 \mu\text{m}$ においては、光軸を中心とする直径 $2.5 \mu\text{m}$ 範囲 (ピッチ間隔に相当) に存在する標準粒子からパターンマッチングの際に有効な光散乱パターンの検出が可能であった。

図4に本走査で取得された光散乱パターンを、その検出場所とともに示す。図のように、本走査により、14箇所から分布形態の異なる光散乱パターンが検出され、その明暗縞形状から検出ポイント C, E, M には2個凝集粒子が、検出ポイント F には3個凝集粒子が存在することが推定された。図5にその光散乱パターンから推定した標準粒子の付着マップ (パーティクルマップ) を示す。同領域の SEM 観察像 (図6) との比較から、推定されたパーティクルマップの妥当性が評価された。この評価結果から、開発した Si ウエハ加工表面欠陥計測装置により、光散乱パターンに基づいた二次元走査欠陥計測が可能であることが確認された。

4. 欠陥位置検出法

4.1 デフォーカス量制御による欠陥位置検出法

図7にデフォーカス量を設定しないときに得られる光散乱パターンを示す。ここでは、一例として粒径 $0.21 \mu\text{m}$ のポリスチレンラテックス標準粒子の検出例を示している。デフォーカス

Defocal setting ($\delta f = 5 \mu\text{m}$) Non-defocal setting ($\delta f = 0 \mu\text{m}$)

Fig.8 Variation of incident condition at non-defocal setting

量を設定 ($\delta f = 5 \mu\text{m}$) したときと比較すると、(1) 細かい縞状にはならず、大きな周期での明暗変化となり、光散乱パターンの形態自体が異なる、(2) 明暗の階調変化がより顕著になりコントラストが向上する、といった特徴があるのが分かる。このような明暗の変化は $\delta f = 0 \mu\text{m}$ のスポットサイズに相当する約 $1.5 \mu\text{m}$ の範囲で生じることが確認された。

本手法においては、ビームの照射に高 NA 対物レンズを使用しているため、入射する光束の入射角度は広範囲に渡っている。本実験で使用した NA0.95 の対物レンズでは、垂直入射に相当する 0° から入射角 72° の斜方入射にいたるまでの実に 72° もの角度幅を有する様々な入射角度の光束が、ウエハ表面に照射されることになる。一般に光の散乱現象は、散乱体に入射する光の方向に依存して大きく変化する⁹⁾ことを考慮すると、本手法においては、表面欠陥に直接照射される光束の入射角度が光散乱パターンの生成に大きく影響を及ぼすことが予想される。図8に示すようにデフォーカス量を変化させることは、表面欠陥に照射される光束の入射角度を変化させることを意味しており、これにより、光散乱パターンの形態に変化が生じたものと思われる。

一方、光散乱パターンの生成は表面欠陥からの散乱光とウエハ表面からの正反射光とのオンアキス型干渉現象に基づいており、通常、表面欠陥からの散乱光は微弱である。そのため、光散乱パターンは、ベースとなるガウシアン分布状の正反射光強度分布が、微弱散乱光により変調を受ける形態で検出される。デフォーカスさせずにビーム照射を行った場合は、ビーム照射領域が集約され、相対的に表面欠陥に照射される光量が増加し、それに伴い散乱光量も増加するため、光散乱パターンコントラストが向上することになる。

欠陥位置検出という観点からは、無欠陥部走査時に取得され

Fig.9 Defect detection based on LSDP at non-defocal setting

るなどかなガウシアンビーム状の正反射光強度分布が、欠陥検出時に大きく変化することが望ましいため、ノンデフォーカス設定、すなわち焦点位置におけるビーム走査が有効であることが分かる。

4.2 欠陥位置検出基礎実験

前節で提案したノンデフォーカス設定における欠陥位置検出法の有効性について検討を行うために、基礎実験を行った。前述のように、光散乱パターン強度分布は干渉現象に起因して生成するので、ベースとなるガウシアン状強度分布に明暗の縞が重なる形で検出される。そのため、パターンの強度和をモニタした場合、強めあう領域と弱めあう領域が相殺され、欠陥箇所においても、パターン全体としては、大きな強度変動は生じないことが予想される。そこで、光散乱パターンの領域全体における強度ではなく、光散乱パターン内の適当なポイントにおける強度をモニタすることにした。すなわち、明暗縞の周期より十分小さい領域を強度サンプリングポイントとすることで、欠陥検出時の強度変動の検知を試みた。図9は恣意的に付着させた微小標準粒子（粒径 $0.21\mu\text{m}$ ）に対し一次元の走査基礎実験を行った結果である。これは、図9右上部に示すように強度サンプリングポイントとして、光散乱パターン上に4箇所のポイント（各々のポイントはCCDエリアセンサの $10\text{pixel} \times 10\text{pixel}$ 領域（約 $150\mu\text{m}$ 四方）に相当）を設定し、それらのポイントにおける光強度変化を示したものである。無欠陥部を走査している（図9(a), (c)）ときは、ガウシアン状正反射光強度分布に相当するなだらかな強度分布が得られているが、標準粒子に集光レーザービームが照射される（図9(b)）と、その正反射光強度分布が大きく乱れていることが分かる。それに伴い、4箇所のサンプリングポイントにおける強度も鋭く変化する。また、それらは、取得ポイントにより、明るく変化する場合と暗く変化する場合の両者があることが分かる。これは、予想されたように、欠陥検出時における光散乱パターンの変化は全体が暗くなるといった一様なものではないこと、また、照射スポット内の微妙な欠陥位置変化により散乱形態が異なることを意味したものであるが、今回のように光散乱パターン上のポイントにおける強度をモニタすることで鋭いピークとして、欠陥位置の検出が可能であることが分かった。

Fig.10 Fast defect measurement method based on two stage measurement by controlling defocal length

Fig.11 Intensity variations at one of sampling point of LSDP

5. 二段階高速欠陥計測法検証実験

5.1 実験方法

デフォーカス量制御を用いた二段階高速欠陥計測法は以下の通りである（図10）。まず、第一段階計測では、ノンデフォーカス設定で、検査面のビーム走査を行い、欠陥検出時に生じる正反射光強度分布の強度変化から欠陥位置の検出を行う。次に、第二段階計測としてデフォーカス量を設定し、第一段階計測で位置を特定した欠陥の光散乱パターン検出を行い、欠陥形態の識別を試みるものである。

このようなデフォーカス量制御を用いた二段階高速欠陥検出法の有効性に関して検討を行うため、検証実験を行った。ここでは、提案手法の有効性の検証を目的としているため、第一段階計測用のディテクタとして、本来想定している光電子増倍管は用いなかった。すなわち、4.2節の欠陥位置検出基礎実験同様に、光散乱パターン評価用のCCDエリアセンサを、受光画素の微小領域（ $10\text{pixel} \times 10\text{pixel}$ ）で取得される輝度値の算出を行いポイントセンサとしてみなすことで、光電子増倍管設置時と擬似的に等価の強度変化検出を行った。また、測定試料としては、実際の製造プロセス内において、様々な種類で存在する表面微小欠陥を模擬するため、三種類の異なる粒径（ $0.21\mu\text{m}$, $0.61\mu\text{m}$, $1.16\mu\text{m}$ ）を有するポリスチレンラテックス標準粒子を散布したウエハを採用した。

5.2 実験結果

測定試料において $40\mu\text{m} \times 60\mu\text{m}$ 程度の検査領域を設定し $1.5\mu\text{m}$ ステップでのサンプリングで第一段階計測を行った。図11のグラフは第一段階計測において、代表例として1箇所の

Fig.12 Positions of defects estimated by 1st stage measurement

Fig.13 LSDPs detected by 2nd stage measurement

サンプリングポイントから得られた強度変化の様子を示したものである。強度がピーク状に変化をしているところが欠陥位置を意味している。ここでは、無欠陥部走査において取得される強度から±10%以上変化した領域を欠陥検出領域とすることにし、4箇所のサンプリングポイントのOR論理演算により、欠陥検出領域の算出を試みた。その結果、この検査領域内において8箇所の欠陥検出領域が推定された（図12）。これらの欠陥検出領域の大きさは場所により異なっているが、ここでは強度変化が最大の位置を欠陥位置として、第二段階計測を試みた。結果、8箇所の欠陥位置すべてから、光散乱パターンの検出を行うことができた（図13）。そして、検出された光散乱パターンに基づいて、付着形態、サイズの同定を行った結果（図14）、検査エリア内で1.16μmが1個、0.61μmが2個、0.21μmが5個の計8個の標準粒子が検出されており、図15に示す同領域のSEM写真との比較から本手法が有効であることが確認された。

6. 結 言

- (1) 高速サンプリングが可能な検出光強度変化のみに着目して光散乱パターン（LSDP）の微小領域における光強度の変化から欠陥位置の特定を行い、その後、位置が特定された欠陥に限定して光散乱パターンを取得する二段階高速欠陥計測法を提案した。
- (2) 提案手法の有効性について実験的に検討を行うため、高精度なデフォーカス制御とビーム照射位置を同定が可能な二段階高速欠陥計測法を実現できる新しい光散乱パターン検出光学装置の構築を行った。
- (3) デフォーカス量を0（焦点位置）に設定した条件で、粒径0.21μmのポリスチレンラテックス標準粒子の走査検

Fig.14 Particle map based on LSDPs

Fig.15 Particle map observed by SEM

出実験を行った結果、微小領域における光散乱パターンの強度変化から欠陥位置の検出が可能であることが分かった。

- (4) 三種類の異なる粒径（0.21μm, 0.61μm, 1.16μm）を有するポリスチレンラテックス標準粒子を微小欠陥試料とした欠陥位置検出と形態識別の検証実験から、二段階高速欠陥計測法の有効性が確認できた。

最後に、Siウエハ加工表面欠陥計測装置の構築にあたり、多大なご協力をいただいた（株）東京精密、瀬高雅文氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) B. R. Locke and R. P. Donovan : Particle Sizing Uncertainties in Laser Scanning of Silicon Wafers, J. Electrochem. Soc., **134**, 7 (1987) 1763.
- 2) H. R. Huff, R. K. Goodall, E. Williams, K. Woo, B. Y. H. Liu, T. Warner, D. Hirlman, K. Gildersleeve, W. M. Bullis, B. W. Scheer, and J. Stover : Measurement of Silicon Particles by Laser Surface Scanning and Angle-Resolved Light Scattering, J. Electrochem. Soc., **144**, 1 (1997) 243.
- 3) 秋山伸幸：半導体用異物検査技術, 精密工学会誌, **55**, 2 (1989) 294.
- 4) 森 勇蔵, 安 弘, 遠藤勝義, 山内和人, 杉山和久, 土屋八郎, 井出敏：光散乱法によるナノメートルオーダーの粒径測定法の開発, 精密工学会誌, **54**, 11 (1988) 100.
- 5) 井上晴行, 片岡俊彦, 遠藤勝義, 押鐘 寧, 森 勇蔵, 杉山和久, 安 弘, 井山章吾：レーザ光散乱法による Si ウエハ付着微粒子計測装置の開発, 精密工学会誌, **63**, 8 (1997) 1117.
- 6) 高橋 哲, 三好隆志, 高谷裕浩, 立野泰史, 平田文彦, 剣持安茂：光散乱パターンを用いたシリコンウエハ加工表面欠陥のインプロセス計測に関する研究（第1報）—微小付着異物の光散乱パターン特性解析—, 精密工学会誌, **65**, 9 (1999) 1284.
- 7) Takashi Miyoshi, Yasuhiro Takaya, and Katsumasa Saito, "Nanometer Measurement of Silicon Wafer Surface Texture Based on Faunhofer Diffraction Pattern", Annals of the CIRP, **44**, 1 (1995) 489.
- 8) S. Takahashi, Takashi Miyoshi, Yasuhiro Takaya, and Kenji Shirai, "Optical Measurement of COP Defects on Silicon Wafer Surface by Laser Scattered Defect Pattern", Proceedings of ASPE1999 Annual Meeting, **20** (1999) 344.
- 9) H. C. van de Hulst : Light Scattering by Small Particles, Dover Publications, New York, (1957).