

高感度と低ダメージを両立する レーザー照射式ウエハ検査装置

株式会社 日立製作所

代表執行役 執行役社長兼CEO 東原 敏昭

株式会社 日立ハイテクノロジーズ

代表執行役 執行役社長 宮崎 正啓

(株)日立製作所 研究開発グループ 浦野 雄太

(株)日立製作所 研究開発グループ 本田 敏文

(株)日立製作所 研究開発グループ 幕内 雅巳

(株)日立ハイテクノロジーズ 電子デバイスシステム事業統括本部 三ツ井 英男

(株)日立ハイテクノロジーズ 電子デバイスシステム事業統括本部 小川 和真

(株)日立ハイテクノロジーズ 電子デバイスシステム事業統括本部 近藤 貴則

(株)日立ハイテクノロジーズ 電子デバイスシステム事業統括本部 樹本 好央

はじめに

半導体集積回路（以下、半導体）は、現在の生活を支える多くの電子機器や電化製品、および交通や通信などの社会インフラに欠かせない部品である。IoTやAIを活用したスマート社会の進展に伴い、半導体市場は今後も年平均6%の成長が見込まれている。市場規模は2016年に3,640億ドルであり、2020年には4,700億ドルになると予想されている。

半導体は、シリコンウエハ上に成膜やエッチング、研磨などの加工を施し、微細な回路配線を形成して製造される。製造工程においてウエハ表面に異物やキズなどの欠陥が発生すると、配線が正常に形成されず、製品の品質不良や歩留まり低下につながる。最先端製品では配線幅は20nmを切る寸法であり（1nmは1mmの100万分の1）、これと同等な20nm程度の欠陥の発生が問題となる。

欠陥の発生を監視するために、ウエハ検査装置が用いられる。ウエハ検査装置はウエハ全面を3分以内に検査して、図1に示すようなウエハ上の欠陥マップを出力する。欠陥には膜上異物や膜中異物（後述）、キズなどの種類がある。欠陥の発生要因を判断するため、それらの種類を自動で判別する欠陥分類機能も必須である。

直径300mmのウエハ全面を検査して20nmの欠陥を検出することは、北海道全域(83,400km²)を検査して一円玉(直径2cm)を見つけることに相当し、非常に高速かつ高感度の検査技術が要求される。

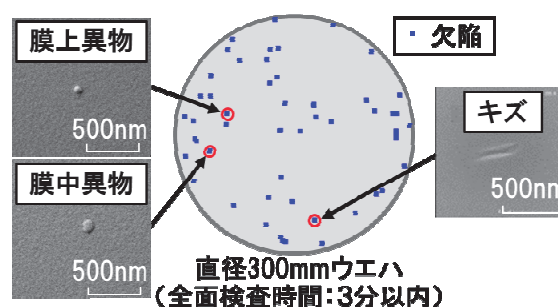


図1 ウエハ検査装置による欠陥マップ出力

半導体メーカーは、ウエハ検査装置を駆使して欠陥の発生を日々監視し、対策することで、高品質な半導体製品を安定して量産することが可能となる。弊社は、最先端の半導体製造工程の要求に応えるウエハ検査装置を開発し、顧客である半導体メーカーに提供し続けている。

開発のねらい

回路の配線幅が 20nm 以下の微細な最先端半導体の製造に向け、検出できる最小欠陥寸法が 20nm 以下となる性能が必須であった。さらに、欠陥の発生要因を特定して迅速に対策するため、従来は困難であった欠陥の種類を高精度に判別する欠陥分類機能も求められていた。

本開発は、最先端半導体の製造に必要な、これらの要求を満たすウエハ検査装置の開発をめざし、最小欠陥寸法 19nm の高感度検出と、精度 85% 以上の高精度欠陥分類の実現を目標とした。

装置の概要

開発したウエハ検査装置の概観を図 2 に、欠陥検出原理を図 3 に示す。ウエハにレーザー光を照射し、欠陥から発生する散乱光をレンズで集光して検出器で検出する。図 3 には検出器の配置を模式的に示した。本装置は、ウエハの上方を



(幅2.2m × 奥行2.3m × 高さ2.4m)

図2 ウエハ検査装置の概観

覆うように多数の検出器を配置したマルチディテクタ方式を特徴としている。多方向の散乱光を集光することで、光子数で数十個程度の微弱な欠陥散乱光の検出が可能となる。

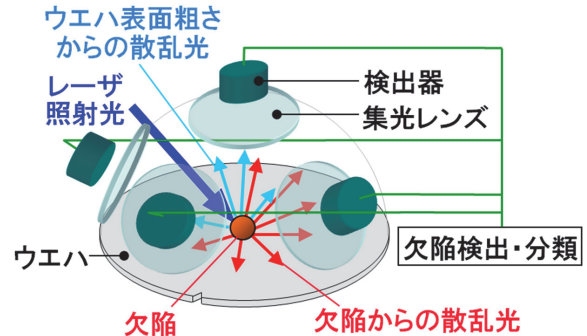


図3 欠陥検出原理の模式図

技術上の特徴

寸法が 100nm 以下の微小な欠陥にレーザーを照射した場合、その散乱強度は欠陥寸法（直径）の 6 乗に比例する。従来検出可能だった最小の 32nm 欠陥に対して、目標の 19nm 欠陥の散乱強度は 1/23 (4.3%) と非常に微弱となるため、目標の達成には従来比 23 倍と大幅な検出感度の向上が課題であった。

高感度化に有効な手段としてレーザー照射の短波長化が挙げられるが、半導体レジストなどに使われる有機膜にダメージを与えるという問題があるため、従来の波長を維持する方針とした。

本開発では、シミュレーションを駆使してウエハから発生する散乱光分布を解析した。散乱光を多方向から計測可能なマルチディテクタ方式の特徴を最大限に活用することで、欠陥検出の高感度化と欠陥分類の高精度化を実現した。

<欠陥検出の高感度化>

半導体向けに研磨されたウエハの表面粗さは原子数個レベルと極めて平滑であるが、そこから発生する微弱な散乱光の強度ばらつきがノイズとなる。

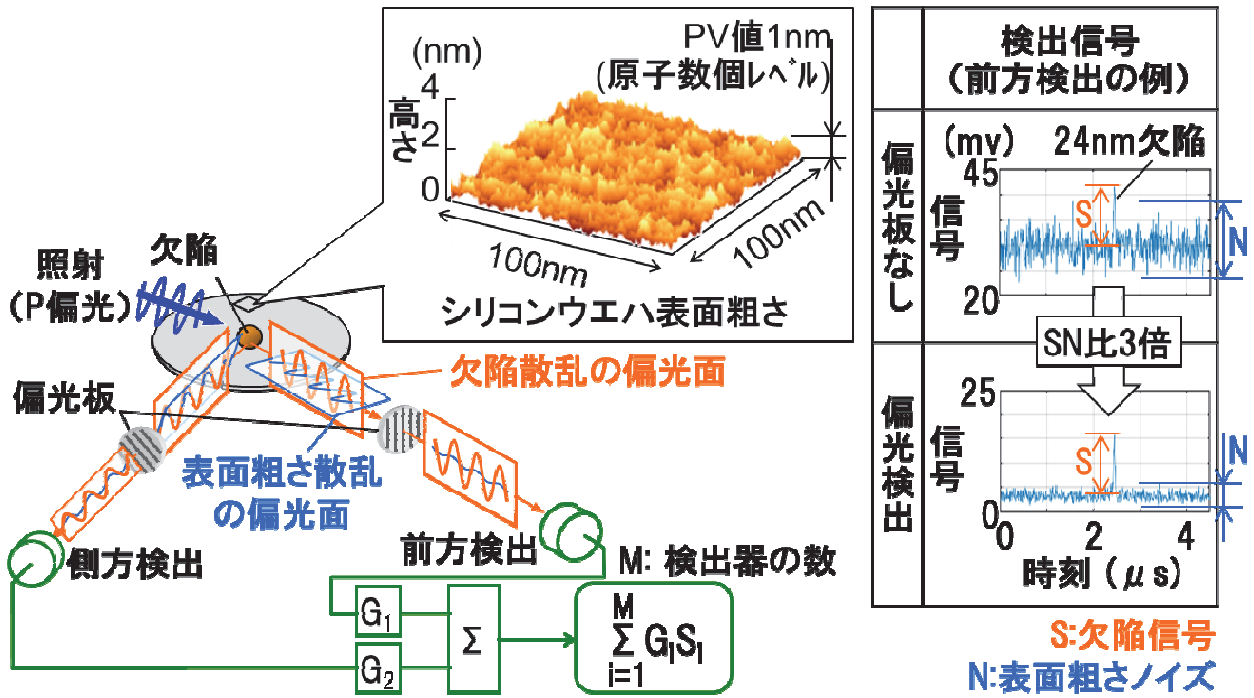


図4 多方向偏光検出・重み付け信号統合

このノイズ対策のため、欠陥と表面粗さの散乱光のシミュレーションを行い、光の電場の振動方向（偏光）の分布を解析した。その結果、図4の前方検出の場合には、欠陥による散乱光と表面粗さによる散乱光とで偏光面の角度が異なることを明らかにした。この結果に基づき、表面粗さ散乱光を遮る偏光板を用いてノイズを低減し、SN比を3倍に向上させた。

さらに、図4の側方検出のように、検出方向によって検出信号のSN比が異なることに着目した。多方向の検出信号を加算する際に最適な重み付けを行うことで、加算後のSN比を最大化する重み付け信号統合検出技術を開発した。

以上の、世界初となる多方向偏光選択・重み付け信号統合検出技術の開発に加えて、レーザー照射パワー密度の向上による欠陥信号増大などを行った。これらの開発により、従来のレーザー照射波長を維持しつつSN比を23倍向上させ、目標とする19nm欠陥の検出を実現した（図5）。

項目	本装置	従来装置
最小検出欠陥 (電子顕微鏡写真)	19nm 200nm	32nm 200nm

図5 欠陥検出感度の実験検証結果

<欠陥分類の高精度化>

欠陥分類が求められる典型例として、図6(a)に示す膜上異物と膜中異物との分類がある。これらを判別することで、異物が付着したのがシリコン窒化膜(SiN膜)などを形成する工程の前か後かが判別でき、異物が発生した製造工程の迅速な特定と対策が可能になる。

開発にあたり、網羅的にシミュレーションを行い、膜上と膜中欠陥の散乱光分布の特徴の違いがあることを明らかにした(図6(b))。なお、散乱光分布は図6(c)に示す方法で表示した。この結果に基づいて、マルチディテクタを活用して欠陥の散乱光分布の特徴を多面的に計測し、シミュレーションによって構築した散乱光

分布データベースと照合する、世界初の欠陥自動分類技術を開発した。

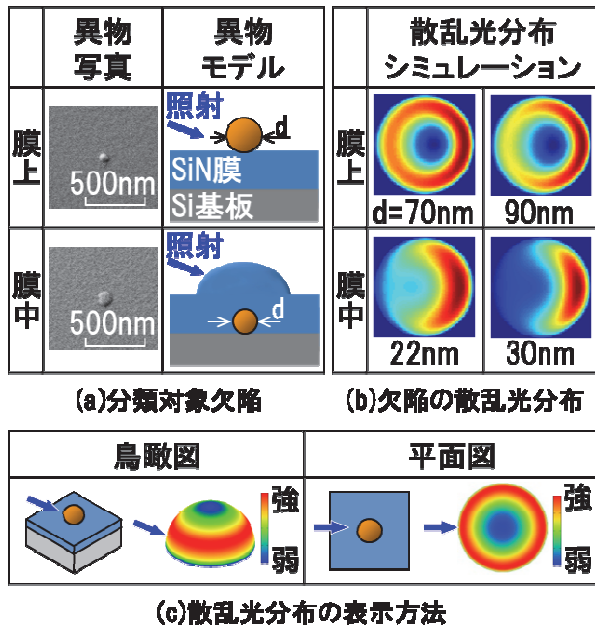


図6 欠陥の種類による散乱光分布の違い

SiN 膜を形成したウエハの膜上/膜中に散布した球状標準粒子を対象として、分類精度を評価した。膜上と膜中の粒子径がそれぞれ 70nm と 22nm、90nm と 30nm の場合、散乱光強度がほぼ同等であるため、従来、判別が困難であった。開発技術により、上記標準粒子を用いた評価において、目標を上回る精度 95%を達成した。

実用上の効果

本装置は、従来の照射波長を維持しつつ、最先端半導体の製造工程で要求される 20nm 以下の欠陥が検出可能な高感度検査を実現している。そのため、レジスト等の有機膜を成膜したウエハに対してもダメージを与えずに検査が可能である。高精度欠陥分類機能は、顧客の要求を上回る精度を達成し、欠陥が発生した工程の迅速な特定と対策に寄与している。

世界最大手の半導体メーカー各社は本装置を幅広く採用し、2017 年から量産を開始した最先端半導体にも適用している。半導体メーカーでの実

績に基づいて、ウエハメーカーや製造装置メーカーでも採用が進み、半導体製造の上流から下流まで幅広く活用されると見込んでいる。

情報・通信機器や自動車などに用いられる半導体製品は今日の生活に不可欠である。その安定供給に本装置は貢献しており、社会の基盤技術として役立っている。

知的財産権の状況

本装置に関して 40 件の特許が登録済みである。前記の開発技術に関わる代表的な特許を以下に挙げる。

① 日本国特許第 5784796 号

名称：表面検査装置およびその方法

概要：多方向に配置した検出器の信号を用いて欠陥の検出と欠陥種の判別を行う

② 日本国特許第 5572293 号

名称：欠陥検査方法及び欠陥検査装置

概要：複数方向の散乱光信号を散乱光分布データベースと比較して欠陥を分類する

むすび

本装置を半導体製造に関わる幅広い顧客に役立てていただくとともに、今後も様々な検査技術や装置を駆使したウエハ検査ソリューションの提供を通じて、スマート社会の進展に不可欠な半導体の安定供給に貢献していく。