レーザ光散乱法によるSiウエハ付着超微粒子計測*

井上晴行** 片岡俊彦** 遠藤勝義** 押鐘 寧** 森 勇藏**

中野元博** 安 弘*** 竹村太一† 和田勝男††

Inspection of Ultra Fine Particles on the Si Wafer Surface Using a Laser Light Scattering Method

Haruyuki INOUE, Toshihiko KATAOKA, Katsuyoshi ENDO, Yasushi OSHIKANE, Yuzo MORI, Motohiro NAKANO, Hiroshi AN, Taichi TAKEMURA and Katuo WADA

We have been developed a surface inspection system for ultra fine particles on a bare silicon wafer. The system combines scanning laser beam illumination technique with a cooled CCD detector and ultramicroscopic technique in a single instrument. In this system, the wafer is illuminated by blue-green light from an argon ion laser source (wave length : 488nm, power: 1.5W) at oblique incidence 76 degree. The scattering light from the particles on the wafer is detected with a 12-bit cooled CCD camera at the upper side of the wafer. Lower limit of detection is about 30 nm in particle diameter. The limit is determined by comparing the light scattering from particle and micro-roughness on the surface. The scattering light from particle and surface is brighter with p-polarization illumination than that with s-polarization illumination. The light scattering intensity of ultra fine particle is strongly dependent on the particle size, and it is proportional to the sixth power of the particle diameter.

Key words: laser light scattering, polarization of light, ultra fine particle, bare Si wafer, cooled CCD camera, micro-roughness, ultramicroscope

1. 緒 言

近年、半導体デバイスの進歩はめざましく、高集積化・高性能化が急速に加速されている。このような状況において、半導体デバイス製造過程で生じる不良原因は、Siウエハに付着した異物に起因するパターン欠陥が大部分を占めていると言われている。不良原因となる付着異物の大きさは数十nm以下になろうとしており、ますます清浄なSiウエハが求められている¹⁾。この要求に応じるためには付着異物を高速・高信頼度で検出できる異物検査装置が必要である。それによって異物を定量的に把握し、適切な対策を施すことが可能となる。しかし、現在、広く用いられている異物検査装置は、その測定限界が0.1μm級と検出感度が低く、高集積化に伴う次世代のデバイス製造用の異物検査機としては使用することはできない²⁾。そこで、本研究では、次世代の半導体産業で用いられる検査装置の性能を十分備えた異物検査装置の開発を行ってきた³⁾。

開発した装置の特徴の一つは、Siウエハに対して大きな入射角でレーザ光を入射させ、ウエハ表面の上方向から散乱光を観察する限外顕微鏡法を採用したことである。もう一つは、単一ビーム照明観察ではレーザ光のガウス分布強度のため散乱光強度に不均一性が生じるが、レーザビームを走査する照明法でこのことを解決した点である。前報³⁾では、微粒子計測装置を試作し、装置に関して基本的な特性を把握した。本報では、散乱光の検出系に冷却CCDカメラを用いた改良を行ない、37nmから88nmの4種類の粒子径のラテックス粒子を用意し計測した。その結果、37nmの超微粒子まで感度良く計測することができた。また、粒子径が30nm程度になるとSiウエハ表面のマイクロラフネ

スによる散乱光と区別が付かなくなることが分かった。

2. Siウエハ上の微粒子による散乱光強度の計算

近似計算であるが、一つの散乱体を電気双極子の集まりと考え、それから放射される電磁場を散乱光として計算した⁴⁾。これは散乱体がどんな形状であっても容易に解を求めることができる手法で、結果的にはマクスウェルの方程式を近似的に解くことと同じことになる。図1はSiウエハ表面にアルゴンイオンレーザを入射角76度で入射させ、立方体の形をした微粒子からの散乱光をその表面に対して垂直方向から観察する場合を計算した結果である。これは開発した検出装置と同じ光学系の配置を想定している。縦軸の散乱光強度 I は入射光強度 I_0 で、横軸の立方体の一片の長さ a はアルゴンイオンレーザの波長 λ_0 でそれぞれ規格化している。P偏光、S偏光いずれの場合も粒子サイズが小さい領域では6乗に比例しており、一般的なレイリー散乱の様相を示している。しかし、空中に置かれた粒子による散乱と大

Fig. 1 Particle-size response of light scattering depending on light polarization (simulation)⁴⁾

* 原稿受付 平成13年7月12日

** 正 会 員 大阪大学大学院工学研究科 (吹田市山田丘2-1)

*** 正 会 員 大阪電気通信大学工学部 (寝屋川市初町18-8)

† 大阪大学大学院工学研究科 (現、キヤノン (株) ; 東京都大田区下丸子3-30-2)

†† 正 会 員 (株) シリコンテクノロジー (長野県北佐久郡望月町協和97-20)

Fig. 2 Light-intensity distribution near silicon/air boundary depending on light polarization⁴⁾

大きく異なる点は、P偏光による散乱も観察され、しかもその大きさがS偏光の場合よりも大きくなっている点である。また、粒子サイズが大きくなると、散乱光強度は粒子サイズに対して複雑な変化をし、ミー散乱の領域に入っていくのが分かる。ミー散乱領域になると、偏光による散乱光はレイリー散乱の領域とは異なりS偏光の値が大きくなっている。この附着微粒子からの散乱光強度の計算結果は、新田ら⁵⁾がPMS社の表面附着粒子計数器SASで解説した結果とは逆になっている。これは空中の粒子からの散乱光とは異なり、以下に示すように、Siウエハ表面の影響を受けているためである。

Siウエハ表面近傍の光の強度を計算した結果を図2に示す。縦軸の散乱光強度 I は入射光強度 I_0 で、横軸の表面からの位置 z はアルゴンイオンレーザの波長 λ_0 で規格化している。0の位置が表面であるが、表面近傍ではP偏光の方がS偏光より散乱光強度が大きいことが分かる。これはSiウエハ表面の空気側では入射光と反射光の干渉によりP偏光の電場成分が極端に大きくなったためと考えられる。しかし、表面より離れるとS偏光の方が極端に大きくなるとともに定在波が生じるため干渉フリッジが見られる。この計算結果から、十分小さな附着微粒子はP偏光で照明の方が散乱されやすいと言える。

本計測システムでは、ノイズとなるSiウエハからの散乱光であるスペックルパターンも同時に検出してしまう。したがって、粒子からの散乱光がSiウエハ表面形状に起因するノイズに埋もれない所まで有効である。また、散乱計算から分かるように、附着している粒子が小さくなるほど散乱光の光量が極端に小さくなる。本研究の微粒子計測では、散乱光の検出に光学的な手法を用いているので、光の回折限界により粒子形状を直接計測することができない。しかし、分解能より小さい物体であっても光を散乱すれば輝点として認知することができる。したがって、その輝点の強度から異物の大きさを見積もれば良いことになる。これが本計測法の特徴である。

3. 冷却CCDカメラを用いた微粒子計測装置

開発した計測装置の概略図を図3に示す。前報³⁾で報告した装置と基本的に同じである。光源に波長488nm、出力1.5WのArイオンレーザを用いた。装置の構成はレーザ光の光量調節部、偏光面回転部、レーザビーム走査部、試料台、観察計測部とこれらを総合的に制御するパーソナルコンピュータからなっている。レーザ光は焦点距離300mmのレンズで集光し、ビーム径約100 μ m

Fig. 3 Schematic diagram of wafer surface inspection system

(a) Laser-power response of CCD camera

(b) Exposure response of CCD camera

Fig. 4 Characteristics of CCD camera

mで試料のSiウエハに入射させた。レーザ光の偏光面の調節は1/2波長板で行った。レーザビームは、P偏光で反射率が最も小さいSiのプリスター角である76度で試料のSiウエハに入射させた。試料からの散乱光はその法線方向から計測するシステムである。次に、観察視野内を均一に照明するためにレーザビームをクランク状に動かすXY方式で走査した。今回、特に散乱光の検出系に重点をおいた改良を行った。用いたCCDカメラは浜松ホトニクス社製(C4880)である。このカメラは冷却型タイプでベルチェ素子によって冷却しているためCCDの暗電流ノイズが低く抑えてある。これにより長時間露光が可能となる。計測画像は顕微鏡の対物レンズ(倍率 $\times 10$, NA 0.3)、撮影用レンズ(倍率 $\times 6.7$)とリレーレンズ(倍率 $\times 0.3$)により20倍でCCD上に結像させた。撮影した画像はCCDカメラシステム付属ソフトによりパーソナルコンピュータに取り込んだ。このようにして取り込んだ画像は1018 $\times$ 1000画素で構成され、輝度は4096階調のレベルに分割されている。CCDの1画素の寸法は12 $\times$ 12 μ mである。前報のシステム

に比べて画素数で約4倍、諧調数で64倍繊細な画像となった。なお、この諧調数をカウント数と呼ぶこととする。また、冷却CCDカメラの撮影範囲は $600\mu\text{m}$ 四方であり、レーザビームの走査範囲は約 $1500\mu\text{m}$ 四方である。この走査時間(露光時間)の間にCCDに蓄えられた電荷は1フィールド分の映像信号として出力される。迷光対策として、散乱光検出部に遮蔽板、レーザ光の経路には円筒状の筒で覆った。さらに、数枚のアーチャーを配置し、対物レンズのホルダー部にも遮蔽板で覆った。

4. 散乱光強度測定

4.1 冷却CCDカメラの特性

冷却CCDカメラであっても、露光時間を長くしていくと、それに応じてCCD素子のむらやキズなどで特定の画素が明るくなるといった暗電流ノイズが現れてくる。本システムのように長時間露光計測になると暗電流ノイズが無視できなくなるため、計測した画面から暗電流ノイズ画面を差し引いた。

まず、冷却CCDの検出特性を調べてみた。図4(a)は散乱光のレーザ入射光量依存性、(b)は散乱光のCCDカメラ露光時間依存性を示す。これらは、粒子径が 37nm 程度のSiウエハ付着微粒子からのカウント数を示している。散乱光強度はレーザパワーと露光時間に対していずれも直線的に変化しており、このCCDカメラが微粒子検出器として使用できることを示している。さらに、同じ粒子からの散乱光を5回計測し、その測定値のばらつきを見ると約4%であった。

4.2 顕微鏡の偏光特性

散乱光の集光に用いた光学顕微鏡(オリンパス社製、BH2-UMA)に使用されているハーフミラーには偏光特性がある。そこで、ハーフミラーを取り外し、偏光特性を調べた。顕微鏡の対物レンズの直前に $1/2$ 波長板を置き、CCDカメラの位置にパワーメータを取り付け、 $1/2$ 波長板を回転しながら透過光強度を測定した。その結果、どのような偏光面の光を入射させても $\pm 2.6\%$ の光量変化であった。

4.3 散乱光強度の算出

微粒子計測では、顕微鏡の対物レンズの分解能から直接粒子径を知ることはできない。したがって、散乱体の大きさを決めるには散乱光の強度を求める必要がある。散乱光強度の絶対値を次のようにして算出した。

CCDにより計測された散乱光の強度 I は

$$I = \frac{n \cdot h \cdot c}{\lambda_0 \cdot t \cdot \delta^2 \cdot \eta \cdot T} \quad (1)$$

(1)式から求まる。まず、CCD画像より粒子からの散乱光のカウント数 n を求める。CCDカメラのゲインからカウント数と光子の数は1対1に対応しているので、その光子の数をプランク定数 h 、光速 c 、レーザの波長 λ_0 を用いてCCDの1画素に入射したエネルギーを得る。それをCCDの画素(一片の長さ δ 、面積 δ^2)とCCDカメラの露光時間 t で割ることによって粒子からの散乱光強度 I が求まる。この時、波長 488nm のCCD素子の量子効率 η ($\eta = 0.35$)、計測光学系の透過率 T ($T = 0.72$)を考慮しなければならない。次に、レーザにより照射された光の強度 I_0 はレーザ光の強度を P 、レーザビームのクラック状の走査範囲(一片の長さ b 、面積 b^2)とすると、

$$I_0 = \frac{P}{b^2} \quad (2)$$

(2)式より求まる。(1)(2)を用いてレーザの入射光強度に対する散

(a) CCD images of light scattering in air with P- and S-polarization light

(b) Vertical line profiles of CCD images in (a)

Fig.5 Dependency of light polarization on light scattering in air (Laser power 0.43W, Exposure time 10s)

乱光強度の割合 I/I_0 が

$$\frac{I}{I_0} = \frac{n \cdot h \cdot c \cdot b^2}{\lambda_0 \cdot t \cdot \delta^2 \cdot \eta \cdot T \cdot P} \quad (3)$$

(3)式より求まる。

5. 空気およびSiウエハ表面による散乱光

入射レーザ光の偏光面を自由に変えることができるので、P偏光およびS偏光の場合についてそれぞれ散乱光計測を行った。開発した装置は、レーザビームを走査することにより、均一照明を行っているため、走査されたビームが試料を照明するだけでなく、その光路中の空気や空気中の塵埃によって散乱された光も同時に検出してしまふ。レーザビームを静止させたときの空気からの散乱光を図5に示す。図(a)はCCD画像で、図(b)はビームと垂直な方向に沿ったプロファイルを示しており、縦軸の散乱光強度 I/I_0 は(3)式により求めた。空気からの散乱光は入射光の 10^{-14} 程度と非常に小さいが、S偏光の方がP偏光よりも約7倍程度明るく計測されていることが分かる。以下の計測ではこの空気からの散乱光を画像処理によって取り除いている。

次に、清浄なSiウエハ表面の同一場所をP偏光およびS偏光を用いて観察した。空気からの散乱光を差し引いたものを図6に示す。これは計測画像の一部を拡大したものであり中央付近に一個の輝点が観察される。この輝点が微粒子からの散乱光である。この粒子を横切る水平軸のプロファイルを見ると粒子およびSiウエハ表面からの散乱光は、いずれもP偏光の方がS偏光より大きく計測されている。また、P偏光の方がSiウエハ表面からの散乱光強度の変動も大きくなっている。Siウエハ表面からの散乱光が空気からの散乱光と大きく異なる点である。今回実験で用いたSiウエハ表面からの散乱光は入射光の 10^{-13} 程度であつ

(a) Speckle and particle images depending on light polarization

(b) Horizontal line profiles of CCD images in (a)

Fig. 6 Dependency of light polarization on light scattering from wafer surface (Laser power 0.44W, Exposure time 63.6s)

た。これはウエハのマイクロラフネスによる散乱光で一般的にはヘイズとも呼ばれている。ここで、実験で用いたSiウエハを位相シフト干渉顕微鏡(Zygo社製, New view 200CHR)で測定すると、PV値で3.69nm, Rrms値で0.48nmであった。このような鏡面加工されたSiウエハでも表面のマイクロラフネスが原因でレーザ光が回折散乱され、スペックルパターンが観測される。また、図2の理論計算で示したように、Siウエハ表面近傍では入射光と反射光の干渉によりP偏光の強度が極端に大きくなっている。このことはP偏光での測定値がS偏光より大きいことに対応しており、理論計算と計測結果が一致している。したがって、表面上の付着粒子の計測においては、付着粒子からの散乱光が大きく、ノイズとなるSiウエハ表面からの散乱光や空気からの散乱光は小さいほど検出感度が向上し、より小さな粒子まで計測できる。これらのことを考慮すると、計測にはP偏光のレーザ光を用いる方が有利である。なお、偏光によるSiウエハ表面からの散乱光強度について、前報³⁾で報告した結果とは逆になっている。この原因は装置の迷光対策が不十分であったのと、空気からの散乱光を取り除いていなかったためである。

6. Siウエハ表面上のラテックス粒子の計測

6.1 スペックルノイズ処理

粒子径が小さくなると、微粒子と極微小な凹凸(マイクロラフネス)を持つSiウエハからの散乱光の差が小さくなる。粒子からの散乱光を得るには、計測した画像から微粒子のみの散乱光を計測しなければならない。表面からの散乱光を除去するために、平均化画像を用いて画像処理することにした。平均化画像とは、清浄なSiウエハの異なる箇所の画像を8枚取得し、その画像を足し合わせ、それを撮影枚数で割った画像である。予め、

(a) Detectable particle number depends on light polarization

(b) Light-scattering intensity depends on light polarization

Fig. 7 Light - scattering data of 37nm standard particles on wafer surface

微粒子計測条件と同じ平均化画像をそれぞれ用意しておき、計測した画像から引き算処理して微粒子計測画像を得た。

6.2 CCD画像より微粒子検出の自動化

CCD画像は1018x1000画素のデータで構成され、一つの粒子からの散乱光は多画素にまたがって分布している。よって、CCD画像上の一つの輝点の中から最高値を持つ画素を検出するのに多くの時間が必要になる。そこで、粒子からの散乱光を自動的に検出するプログラムを開発した。まず、6.1の画像処理でも取りきれない表面からの散乱光が有ると、それを粒子として計測するため、実際の粒子数より多くカウントしてしまうことになる。そこで、表面からの散乱光を完全に排除するためにしきい値を決め、それより大きなカウント数を粒子の輝点とした。さらに、輝点と輝点の間隔は5画素以上として、CCD画像より粒子の輝点を識別した。全てのデータを判断した後、輝点の座標と最高値のカウント数や輝点の全散乱光の積算値などが自動的に出力できるようになっている。

6.3 標準ラテックス粒子の測定

既知の粒子径を持った市販のポリスチレン製ラテックス粒子をSiウエハ表面に散布したものを試料とした。ラテックス粒子は体積含有率が10%の水溶液で市販されており、一粒子ずつ分散させるために電子工業用エチルアルコールで希釈して使用した。ラテックス粒子の散布前後で計測することによって、COP(Crystal Originated Particle)などすでに存在する欠陥による計測誤差を防いだ。直径が88,55,43,37nmの4種類のラテックス粒子を用意し計測を行った。微粒子計測画像を5から6枚撮り、それぞれ粒子検出プログラムにかけ輝点中に含まれる各画素の値のうちで最高値を粒子からの散乱光として値を求めた。

図7に粒子径37nmの微粒子からの散乱光計測結果を示す。レーザの入射光強度は0.21WでCCDカメラの露光時間は63.6秒で、P偏光入射とS偏光入射の場合である。図(a)はCCD画像より粒子の輝点の座標に相当する箇所を黒丸でプロットしたものである。

Fig. 8 Particle-size response of light scattering depending on light polarization

CCD画像には様々な散乱光強度をもつ粒子からの散乱光が計測できる。図(b)の縦軸は粒子検出個数で、横軸は微粒子からの散乱光強度で、(3)式を用いて、レーザ光の入射光強度に対する割合で絶対値表示している。図7を見ると、P偏光・S偏光どちらの場合も散乱光強度はある値を中心に分布していることが分かる。また、CCD画像に見られるようにP偏光の方がS偏光に比べて散乱光強度が大きく計測されている。さらに、検出粒子の個数も多いことが分かる。次に、この散乱光分布の原因について調べた。用いたラテックス粒子を透過電子顕微鏡によって直接観察すると、粒子径は37nm付近を中心にばらついており、粒子径が異なっていた。レーザ光の波長より十分小さな粒子では、散乱理論より散乱光強度は粒子径の6乗に比例する。よって、この散乱光の分布は粒子径の違いを反映していると考えられる。また、図から分かるように散乱光強度の分布は左部分が欠けたように見える。この原因はしきい値を設けて表面からの散乱光とあまり差のない小さな散乱光を取り除いているためである。この散乱光強度分布のピークにおける強度をその微粒子からの散乱光とした。

図8は各粒子に対する散乱光を求め、ラテックス粒子製造メーカーの公称粒子径に対応させてプロットした結果である。縦軸の微粒子からの散乱光強度は、レーザ光の入射光強度に対する割合で絶対値表示している。37nmの微粒子まで感度良く計測できていることが分かる。斜めに引いた直線はレーリ散乱の理論から期待される散乱光強度と粒子径の関係が6乗の傾きを持ったものである。これらの結果を見ると粒子径が小さいものは、6乗の傾きの直線に良く一致しているが、88nmと粒子径が大きくなると、この直線より下側にずれる傾向にあった。また、今回、計測した全ての粒子径でP偏光の方がS偏光より散乱光強度が大きかった。さらに、図中の横に引いた太い破線はバックグラウンドであるSiウエハ表面からの散乱光強度を示したものである。これより下側では、粒子からの散乱光がSiウエハ表面の散乱光に埋もれてしまい粒子の検出が困難になることを示している。次に、図1で示した理論計算の散乱光強度とP偏光で測定した値を比較すると37から88nmの粒子で2桁小さく計測されて一致しなかった。この原因は、光の近接場領域では表面に物体を近づけるとそこから散乱される強度は表面と近づけた物体の複合的な物性値によって散乱光が生じるためと考えられる⁶⁾。Siウエハ表面とラテックス粒子の系では散乱光が極端に小さくなって

いる。今後、このような近接場光の影響を考慮した表面付着粒子の散乱理論を構築する必要がある。

一般に微粒子の検出感度を上げるために大きなパワーのレーザ光を用いればSiウエハ表面からのスペックルノイズによるバックグラウンド光も大きくなってしまふ。実際の計測では、粒子からの散乱光がバックグラウンド光とほぼ同じかそれ以下になると、粒子からの散乱光がそれに埋もれてしまい識別ができない。これがこの計測装置の検出限界となる。図8の計測結果より、Siウエハ表面からの散乱光は入射光強度の 10^{-13} 程度と非常に小さくラテックス粒子径に換算して約30nmである。これが本検出装置の現時点での粒子検出の限界である。この値は、森ら⁷⁾が迷光レベルから計算した粒子径とほぼ一致している。スペックルノイズを低く抑えることができれば、さらに小さな粒子が計測できる。

7. 結 言

開発したSiウエハ上の微粒子計測装置を用いて、Siウエハ表面に散布したラテックス粒子の計測を行った。その結果、次のような結論を得た。

- (1) 清浄なSiウエハを計測するとマイクロラフネスに起因するスペックルパターンが観測された。
- (2) 37nmの微粒子まで感度良く計測できた。また、計測した粒子および表面からの散乱光はP偏光の方が明るく計測された。したがって、Siウエハ上の微粒子計測にはS偏光よりもP偏光を用いる方が有利であることが分かった。この結果は理論計算と一致した。
- (3) ラテックスの粒子径分布に相当する散乱光の分布が得られた。また、粒子からの散乱光強度は、散乱理論で示される6乗則に従っていた。本装置の微粒子検出限界はラテックス粒子換算で直径30nmである。
- (4) レーザ光は空気や空気中の塵埃によって散乱され、散乱光強度はS偏光の方が大きかった。
- (5) 微粒子からの散乱光の理論計算と計測値はその絶対値において、2桁程度の差が生じた。これは近接場光の影響が原因と考えられる。

参 考 文 献

- 1) International Technology Roadmap for Semiconductors, 1998 Update.
- 2) 松下嘉明, 深谷栄, 津屋英樹, 高須新一郎編: 超精密ウエハ表面制御技術, サイエンスフォーラム, (2000)297.
- 3) 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.
- 4) 片岡俊彦, 井上晴行, 遠藤勝義, 押鐘寧, 森勇蔵, 中野元博, 和田勝男, 安弘: シリコンウエハ表面上の微粒子・微小欠陥による光散乱 - 散乱光強度およびレンズによる像形成の計算 -, 精密工学会誌, **66**,11(2000)1716.
- 5) 新田晃久, 吉田典生: 米国PMS社の表面付着粒子計数器, 空気清浄, **28**,1(1990)43.
- 6) T. Kataoka, K. Endo, Y. Oshikane, H. Inoue, K. Inagaki, Y. Mori, H. An, O. Kobayakawa, A. Izumi: Development of a scanning near-field optical microscope with a probe consisting of a small spherical protrusion, Ultramicroscopy, **63**,(1996)219.
- 7) 森勇蔵, 安弘, 遠藤勝義, 山内和人, 井出敏: 光散乱法によるナノメータオーダの粒径測定法の開発 (第2報) - シリコンウエハ表面付着微粒子の測定 -, 精密工学会誌, **56**,10(1990)1847.