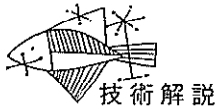


レーザ光散乱法によるSiウエハ表面上の微小欠陥計測



井上 晴行*

Measurement of fine defects on Si wafer surface using laser light scattering method

Key Words : laser light scattering, ultra fine particle, surface defect, micro-roughness, micro-scratch

1. はじめに

光を用いた計測技術は、これまで活発に研究開発されてきた。プローブとして光を使用することで物質の特性を高速で破壊することなく計測できる。光は直進する。その途中で物質などの障害物があると光は相互作用して、自由な進行が乱される。その結果、様々な方向に光は散乱される。

本研究は、このような散乱現象をSiウエハ表面上の微小欠陥計測に応用するものである。

ところで、半導体デバイスはめざましい進歩を続けており、高集積化にともなうデザインルールはますます微細化されてきた¹⁾。したがって、基板となるSiウエハは高品質で高潔度のSiウエハが求められている。一般のウエハ製造の最終行程の表面評価としては外観検査²⁾が行われる。しかし、次世代の高集積化・高性能化に対応した半導体デバイス製造用検査装置は未だ十分に開発されていない。

そこで、高感度で大面積を短時間で計測できる光散乱を利用したSiウエハ表面評価装置の開発を行った³⁾⁴⁾。本報では、開発した光散乱表面装置の概要と鏡面Siウエハ表面に存在する付着微粒子や超微小形状欠陥の計測例を紹介する。

2. 微小欠陥検出とその問題点

限外顕微鏡の原理に基づきレーザビームはSiウエハ表面に対して低傾斜角度で照射している。散乱光は、Siウエハ表面自身によるものとそれに付着した粒子や表面欠陥からのものがある。たとえば、付着粒子からの散乱光は、前方散乱・後方散乱成分とSiウエハ表面でレーザ光が正反射し、再照明して生じる散乱成分、さらに、Siウエハ表面で反射し得られる鏡像としての散乱成分とがある。この粒子に起因する散乱光だけを検出すれば良いのであるが、実際は、ノイズとなるSiウエハ表面からの散乱光も同時に検出してしまうことになる。付着している粒子や表面欠陥が小さくなってくると散乱光の光量は非常に小さくなり、表面の散乱光との差がなくなるため検出が困難になる。よって、欠陥からの散乱光がSi

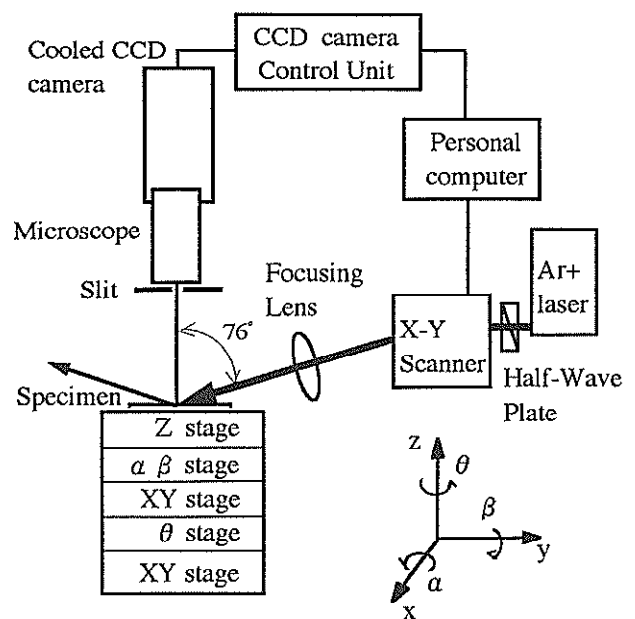


図1 開発した表面欠陥評価装置の概略図



* Haruyuki INOUE
 1948年6月生
 1971年大阪工業大学・工学部・機械工学科卒業
 現在、大阪大学・大学院工学研究科・精密科学専攻、助手、博士(工学)、光応用計測
 TEL 06-6879-7278
 FAX 06-6879-7278
 E-Mail inoue@prec.eng.osaka-u.ac.jp

ウエハ表面形状に起因するノイズに埋もれない所まで本計測法は有効である。本研究の微小欠陥計測において、散乱光の検出に光学的な手法を用いると、光の回折限界から直接欠陥の大きさを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ので、その輝点の強度から欠陥の大きさを求めれば良いことになる。もう一つの問題は計測域を均一に照明する点である。レーザー光の強度はガウス分布をしており、さらに、光学系の埃などによる回折像も含んでいるため一様にはなっていない。このため、単一ビームの照射では均一に照明することはできない。そこで、ビームを絞り込み、高速で2軸走査することによって、計測域を均一に照明する方法を採用した。

3. 表面欠陥評価装置

一般的には強力な光源と高感度の検出器が有れば、微小欠陥からの微弱な散乱光は得られる。まず、開発した表面欠陥評価装置の概略を図1に示す。光源には波長488nm、出力1.5Wのアルゴンイオンレーザーを用いた。装置の構成は大きく分けて、均一照明を可能とするためのレーザービーム走査部、6インチウエハを計測するための試料台、光学顕微鏡に冷却CCDカメラを取り付けた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。試料台は、xyステージに試料の傾きを補正する $\alpha\beta$ ステージ、高さを調整するzステージと θ 軸回転ステージを取り付け、さらに、その下部に冷却CCD画像と試料台の中心を高精度で合わせるためのxyステージを付け加えている。レーザー光はフォーカシングレンズ($f=300\text{mm}$)で集光し、ビーム径約 $100\mu\text{m}$ に絞っており、P偏光で反射率が最も小さくなる角度で試料のSiウエハに入射させた。この角度はシリコンのブリュースター角であり、計測の結果 76° である。なお、偏光面の調整は1/2波長板で行っている。試料からの散乱光はその法線方向から冷却CCDカメラで画像として計測するシステムである。散乱光は市販の光学顕微鏡に冷却CCDカメラ(浜松ホトニクス社製、C4880)を取り付け、対物レンズ(倍率 $\times 10$, N.A.0.3)と撮影用レンズ(倍率 $\times 6.7$)で結像された画像をリレーレンズ(倍率 $\times 0.3$)により20倍でCCD上に再結像させた。撮影

された画像は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、このように取り込まれた画像は 1018×1000 画素で構成され、各画素の輝度は4096階調のレベルに分割されている。CCDの1画素の寸法は $12 \times 12\mu\text{m}^2$ である。また、付着微粒子計測においては専用の粒子検出プログラムが用意されており、自動的に各粒子からの散乱光強度をカウントできるようになっている。次に、試料表面を均一に照明するためにレーザービームをガルバノメータスキャナーによりクランク状に2次元的に動かすXY方式で走査した。これによってレーザー光の強度が空間的に平均化され、計測領域内では均一な明るさとなった。また、冷却CCDカメラの撮影範囲は $600\mu\text{m}$ 四方であり、レーザー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素子に蓄えられた電荷は1フィールド分の画像信号として出力される。微弱光の検出にCCDカメラを用いているため、CCDカメラの露光時間を長くする必要がある。今回採用した冷却CCDカメラでは暗電流ノイズは非常に低く抑えられており、長時間露光に耐えられるようにできている。さらに、微弱光検出には十分な迷光対策が必要で、その対策として、散乱光検出部に遮蔽板、レーザービームの経路にも遮蔽板を覆った。また、対物レンズのホルダー一部にも遮蔽板を覆っている。

4. CCD画像上の欠陥からの散乱光強度の絶対値

本欠陥計測システムでは、顕微鏡の対物レンズの分解能から直接欠陥の大きさを知ることはできない。したがって、欠陥の大きさを知るには散乱光の強度を求める必要がある。CCDカメラの計測より散乱光強度の絶対値を次のようにして算出した。CCDカメラ上に結像されPCに取り込まれた画像は、 1018×1000 画素で構成されており、各画素の輝度は4096階調である。したがって、各画素に入射した光量を求めるためには、カウント数を絶対光量に変換しなければならない。CCD画像により計測された散乱光の強度 I は、式(1)となる。

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

ここに、 $\alpha = \frac{h \cdot c}{\lambda_0 \cdot \delta^2 \cdot \eta \cdot T}$ とおくと、定数となる。

まず、CCD画像より欠陥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、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 $\eta=0.35$ 、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。

ここに、具体的な各物性値は

$$\begin{aligned} h &= 6.626 \times 10^{-34} (\text{J}\cdot\text{s}) \\ c &= 3 \times 10^8 (\text{m/s}) \\ \lambda_0 &= 488 \times 10^{-9} (\text{m/s}) \\ \delta &= 12 \times 10^{-6} (\text{m}) \\ \eta &= 0.35 \\ T &= 0.72 \end{aligned}$$

t は露光時間(s)、 n はカウント数である。

また、レーザにより照射された入射光強度 I_0 はレーザ光の強度を P 、レーザビームに垂直な面をクランク状に走査した面積を S_0 とすると、

$$I_0 = \frac{P}{S_0} \quad (2)$$

で与えられる。レーザの入射光強度に対する散乱光強度の割合 I/I_0 が、

$$\frac{I}{I_0} = \alpha \cdot \frac{nS_0}{tP} \quad (3)$$

で表され、規格化された散乱光強度が求まることになる。

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の、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計測すると、空気からの散乱光は入射光強度の 10^{-14} 程度と非常に小さかった。また、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った。

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結果を図2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。このことは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強度の 10^{-13} 程度であった。これはウエハのマイクロラフネスによる散乱光でスペckルパターンを形成しており、一般的にはその強度をヘイズとも呼ばれている。このように鏡面加工された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ckルパターンが観測される。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。

6. ラテックス粒子測定による装置の検出限界

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最高値を粒子からの散乱光として値を求めた。

図3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、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。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3(b)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

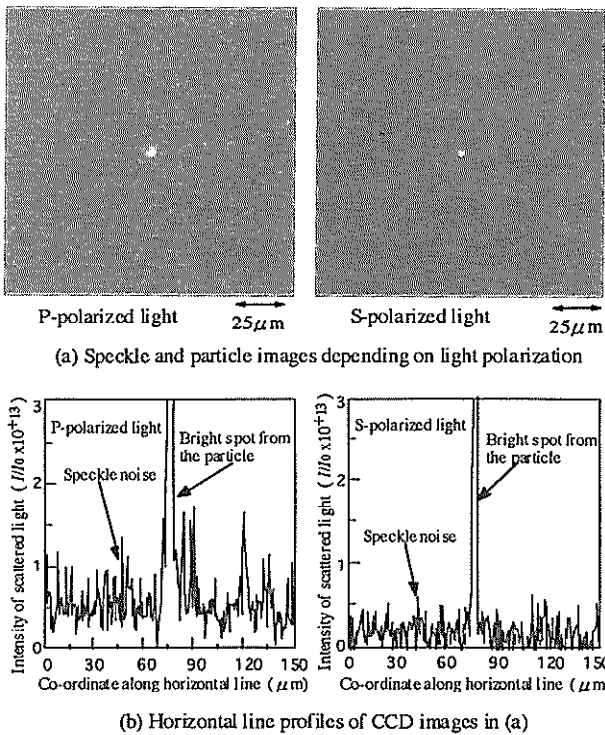


図2 Siウエハ表面の計測結果(レーザー光強度 0.43W, CCDカメラの露光時間63.6s)

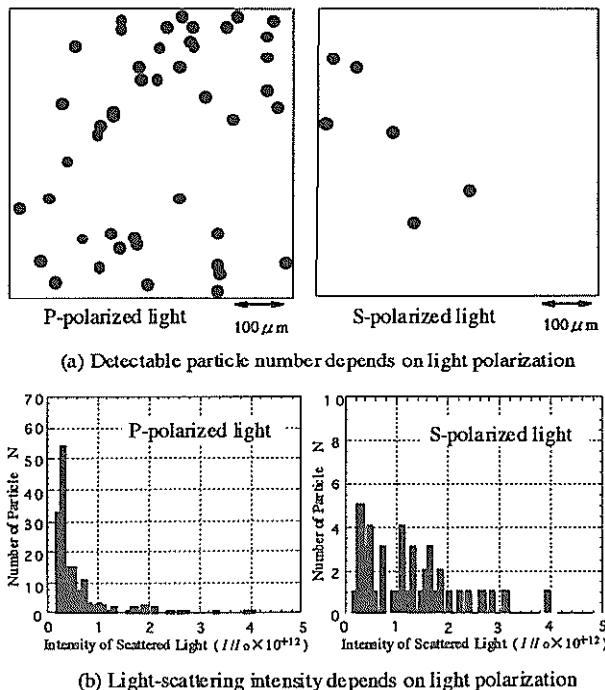


図3 37nmラテックス標準粒子の計測結果

布していることが分かる。また、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、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付近を中心にはらついており、粒子径が異なっていた。レーザー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僅かな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4は各粒子に対する散乱光を求め、ラテックス粒子を製造した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、レーザー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イリー散乱の理論から期待される散乱光強度と粒子径の関係で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。

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ー光を用いれば良いが、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。図4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。これがこの表面欠陥評価装置の検出限界となる。

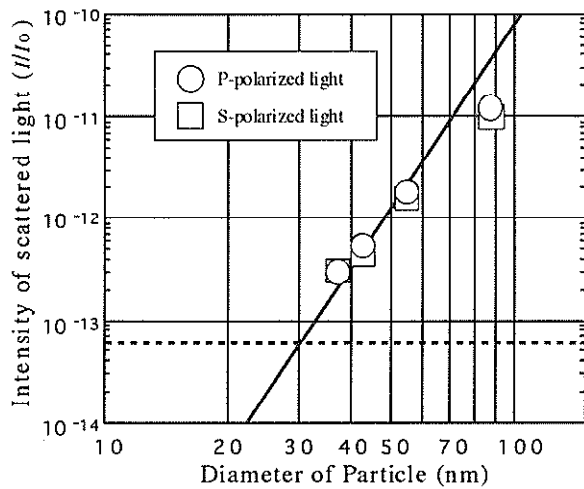


図4 散乱光強度の粒子径依存性

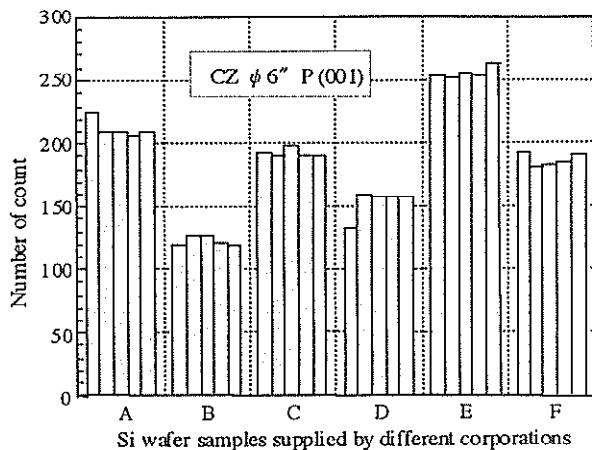


図5 各社Siウエハの散乱光強度の比較

7. Siウエハ表面のマイクロラフネスによる光散乱

鏡面加工されたSiウエハであっても表面のマイクロラフネスが原因でレーザー光が回折散乱され、スペックルパターンを形成する。スペックルパターンが直接表面粗さを表しているとは言えないが、その強度の平均値は表面粗さに対応して大きくなる。いま、国内のウエハメーカー6社のSiウエハ表面の散乱光計測を行った。この際、測定する各社のウエハは特殊用途向けに製作し市販されているCZφ6”P(100)の同じグレードのものを選択した。図5に計測結果を示す。計測条件はレーザーの入射光強度0.43W, CCDカメラの露光時間63.6sで、得られた画像の水

平軸方向の中央の1ラインに沿ったカウント数の平均値を、そのウエハ表面からの散乱光強度とした。測定場所はSiウエハ内の異なる5ヵ所について行っている。計測結果を見ると、測定場所の違いによる散乱光のバラツキは小さかった。また、同じグレードのSiウエハであってもメーカーによって、散乱光強度に約2倍程度の差があった。このことは、散乱光の原因となるウエハ表面上のマイクロラフネスにも相当な差異が存在することを示している。

8. Siウエハ表面の微小スクラッチの散乱光計測

Siウエハ表面上にはSi結晶中の欠陥や鏡面加工時に生じたと思われるマイクロラフネスや加工痕などの様々な微小欠陥が存在する。これらの欠陥の中で、引っ掻き傷のような欠陥をスクラッチと呼ぶこととする。このスクラッチは、スペックルパターンに埋もれて区別しにくい。Siウエハ表面上を詳細に観察すると、図6のように明るく光った輝点が直線状に並んだ筋として観察される。これが微小スクラッチである。前述と同じ計測条件である。レーザー光は画面の左側から入射角76°で入射し、反射して右側に出ていくようになっている。微小スクラッチが鏡面加工時に導入されたのであれば、加工法から考えてSiウエハ表面にはあらゆる方向のものが存在するはずである。しかし、図6から分かるように光散乱画像では微小スクラッチの伸びている方向はレーザー光の入射方向に対し垂直に近いものしか観察されない。

図7に微小スクラッチのサイズとそれから発する散乱光強度の計算結果を示した⁴⁾。この散乱光強度計算⁵⁾は、微小スクラッチを断面形状が正方形で無限に長い溝状であると仮定し、空気の屈折率を1, シリコンの複素屈折率を4.367-0.079i, レーザの入射角は76°とした。図の縦軸は微小スクラッチの散乱光強度 I を入射光強度 I_0 で、横軸は微小スクラッチの大きさ a をレーザーの波長 λ_0 でそれぞれ規格化している。図6で観察された微小スクラッチの最大の散乱光強度を図の白丸で示し、その散乱光強度に相当する微小スクラッチのサイズを求めると、深さ・幅が約1.4nmであることが分かった。この計算は近似計算であることから考えて、実際のスクラッチは今回求めた値よりも大きいと思われるが、非常に小さな溝状をした線状欠陥である。このようなサイズの欠陥は、現在市販されている干渉顕微鏡など光を

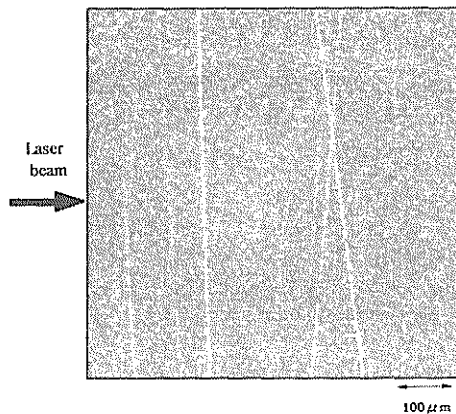


図6 Siウエハ表面のスクラッチのCCD画像
(レーザー光強度0.43W, CCDカメラの露光
時間63.6s)

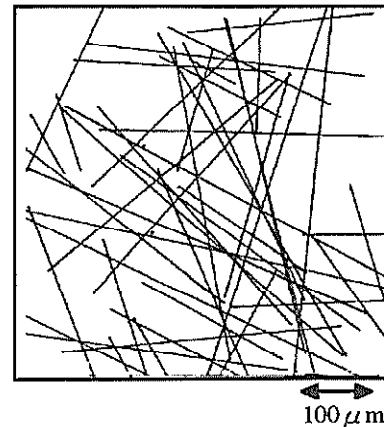


図8 鏡面加工されたSiウエハ表面上の
全スクラッチの観察結果

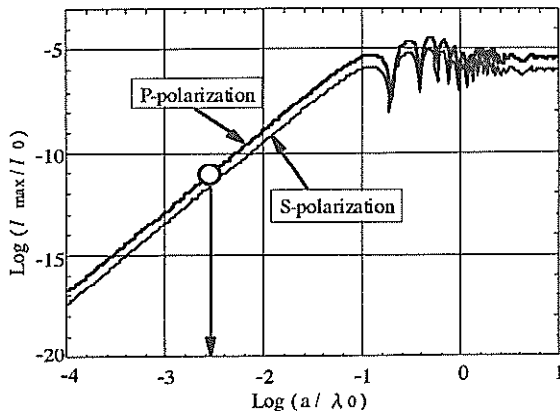


図7 Siウエハ表面上のスクラッチからの散乱光
強度のサイズ依存性の計算結果と計測値

用いた形状測定装置では観察することは不可能である。また、走査型トンネル顕微鏡を用いても観察領域内でのスクラッチの現れる頻度から考えると観察を行うのは困難と言える。

9. 全方向の微小スクラッチ観察

微小スクラッチの伸びている方向がレーザー光の入射方向に対して直角に近いものしか観察されない。そこで、 $\theta=0^\circ$ から $\theta=180^\circ$ までSiウエハを回転させて計測した。1回当たりの回転角は 15° とした。観察部位は同じウエハの同じ場所であり、前述と同じ計測条件である。その全ての画像から得られた微小スクラッチを一枚の図として示したのが図8である。これを見ると微小スクラッチは種々の方向を向

いていることが分かる。また、 $600\mu\text{m}$ 四方の計測域全てで微小スクラッチは直線状であった。このスクラッチは鏡面加工したとき、砥粒によって生じた引っかき痕が各種の表面処理を施しても取り切れないで残ったものである。よって、広い面積で観測すると円弧状をしているものと考えられるが、狭い領域では直線状に観察される。このように、市販されている鏡面Siウエハには理論計算から深さと幅が 1.4nm 程度と推定される微小スクラッチが多数存在していることが分かった。次世代のデバイス用Siウエハはスクラッチのような表面欠陥のないウエハが求められると予想され、今後、本研究で示したような高感度な表面欠陥評価装置が必要となってくるものと考えられる。

10. おわりに

本研究は光の散乱現象を微小表面欠陥計測に応用するものである。今回、開発したレーザー光散乱法によるSiウエハ表面欠陥評価装置で、Siウエハ表面の微小欠陥計測を行った。その結果、次世代の高集積化・高性能化に対応した半導体デバイス製造用検査装置としての性能が有ることを示せた。現在、洗浄表面や各種表面処理したSiウエハ表面の計測を精力的に行い本装置の有用性を実証している。さらに、検出感度はそのまま6インチウエハ全面を一度に計測できるシステムの立ち上げを行っている。

最後に、本稿をまとめるに際して、本研究の共同研究者である大阪大学大学院工学研究科精密科学専攻片岡俊彦教授、中野元博助教授、押鐘寧助手、山

内良昭助手, 和田勝男研究員をはじめ多くの方々に,
この場を借りましてお礼申し上げます。

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: 超精密ウェーハ表面制御技術, 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, 森勇藏, 中野元博, 安 弘, 竹村太一, 和田勝男: レーザ光散乱法によるSiウエハ付着超微粒子計測, 精密工学会誌, 68, 2(2002)264.
- 4) 井上晴行, 片岡俊彦, 押鐘寧, 遠藤勝義, 森勇藏, 中野元博, 安 弘, 里見慎也, 和田勝男: レーザ光散乱法によるSiウエハ表面上の超微小欠陥計測, 精密工学会誌, 68, 10(2002)1337.
- 5) 片岡俊彦, 井上晴行, 遠藤勝義, 押鐘寧, 森勇藏, 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一散乱光強度およびレンズによる像形成の計算一, 精密工学会誌, 66, 11(2000)1716.

