レーザー散乱光の多方向偏光検出による Si ウエハ上微小欠陥の高精度凹凸分類*

浦野 雄太** 本田 敏文***

High-Accuracy Concave-Convex Classification of Small Defects on Silicon Wafer Surface Using Laser Scattering Method with Multi-Directional Polarized Light Detection

Yuta URANO and Toshifumi HONDA

Wafer defect inspection is essential to control quality and yield of semiconductor device manufacturing. Wafer surface inspection tools with laser scattering method are employed for high-throughput and high-sensitivity inspection of defects with sizes of about several microns to sub-20 nm. In addition to detecting defects with various shapes and sizes, classification of defect types is required. Classification by multi-directional scattered light detection is known, which captures defect scattered light at multiple scatter direction and compares the intensities in different angles. We simulate concave-convex defect classification with multi-directional detection by analyzing polarized angular scattering distributions, obtained with discrete dipole approximation method, from defects that differ in shapes, sizes, and materials. As a result of classification performance evaluation with support vector machine classifier, when using only unpolarized light intensities, the maximum defect diameter that is accurately classified is limited to from 0.62 times as much as the illumination wavelength. By using both +45 and -45 deg linearly polarized light intensities, the limit is extended to from 1.47 times as much as the wavelength.

Key words: silicon wafer, defect classification, polarized scattering, discrete dipole approximation, machine learning

1. 緒 言

半導体デバイスの製造工程において、製品歩留りを向上・維持するためにシリコンウエハ表面の外観検査が行われる。検査対象の欠陥は、製造・加工装置内での発塵による異物や、表面研磨やシリコン結晶成長に起因する凸状、凹状の形状欠陥などであり、その寸法は、大きなものではマイクロメートルオーダーから、最小で 20nm 以下（波長のおよそ 1/20）に渡り、欠陥の発生原因を特定して対策を講じるために、検出した欠陥の種類と寸法の推定が求められる²⁾。

欠陥の検査にはレーザー散乱方式のウエハ表面検査装置が用いられる³⁾⁵⁾。その概略構成を図 1 に示す。ウエハ表面検査装置は、ウエハの数十 μm の照射スポットにレーザー光を集光して照射し、ウエハ全面を数十秒で高速に走査し、欠陥による散乱強度の変化を計測して欠陥を検出する。

Fig. 1 Wafer surface inspection tool

* 原稿受付 令和 3 年 8 月 15 日

掲載決定 令和 3 年 10 月 29 日

** 正 会 員 (株)日立製作所 研究開発グループ 計測イノベーションセンタ (東京都国分寺市東恋ヶ窪 1-280)

*** (株)日立製作所 研究開発グループ 計測イノベーションセンタ

測定の空間分解能が照射スポットの寸法で決まるため、数十マイクロメートル以下の欠陥の形状を直接計測することが困難である。そこで、検出した欠陥の種類を分類するために、複数の方向に設けた検出器によって得られる散乱光強度の角度分布の情報が用いられる。分類の主な対象は、異物や研磨起因欠陥、ウォーターマークなどの凸欠陥と、研磨痕や結晶欠陥 (Crystal Originated Pit) などの凹欠陥とを判別する凹凸分類である。その方法例として、2 方向の散乱光強度比を用いる方法が Stokowski ら、および Lorenzi らによって報告されている³⁾⁶⁾。

また、複数方向検出による欠陥分類を発展させた方法として、81 方向の散乱強度のパターンマッチングによって複数の欠陥種を分類する方法が Sugihara らによって報告されている⁷⁾。

本研究は欠陥の凹凸分類を対象とし、散乱強度分布を用いる従来の手法による分類性能を散乱光シミュレーションを用いて評価した。凸欠陥の材質は製造工程で 사용되는材料や異物源により様々であるため、様々な光学定数の物質の凸欠陥を想定し、それら各々に対する凹欠陥 (ウエハ表面の空乏) の判別性能を評価した。散乱特性は欠陥寸法に大きく依存するため幅広い寸法範囲の欠陥を対象とし、従来手法が有効な範囲を調査した。さらに、欠陥散乱光の強度に加えて、偏光強度を用いた欠陥判別による性能向上の可能性を評価した。

2. 欠陥凹凸分類性能の評価方法

2.1 シミュレーションによる欠陥分類性能評価

欠陥散乱光の角度分布は欠陥の形状・寸法や材質に依存する。分類手法の有効性を検討するには、欠陥種ごとに実際にとりうる様々な形状・寸法、材質のパリエーションを考慮する必要がある。そのような幅広いパリエーションを持った欠陥の試料を実際に作製、入手することが難しいため、本報告では光散乱の数値解析シミュレーションを行い、モデル化した種々の欠陥の散乱

光の強度および偏光の角度分布を求めた。そして、複数の散乱方向の強度および偏光を用いて欠陥分類を行った場合に得られる分類性能を評価した。

2.2 対象欠陥

Si 基板表面の凸欠陥と凹欠陥をモデル化した。凸欠陥、凹欠陥ともに、形状は円柱とし、直径は $\lambda/10$ (53.2 nm, λ は後述するウエハ表面欠陥検査装置モデルの照明波長 532 nm) から 2λ (1.06 μm) の範囲で 20 通り、高さあるいは深さは直径の 0.1 倍から 0.5 倍の範囲で 5 通り、合わせて欠陥種ごとに 100 通りずつの形状を対象とした (図 2)。

凸欠陥の材質は半導体製造工程で用いられる材料および発塵の典型的な物質のうち、低屈折率から高屈折率のものを含めた、Si, SiO₂, Si₃N₄, Cu, Fe とした。凹欠陥は Si 表面の空洞であるため、凹欠陥形状の部分に空気の屈折率で置き換えてモデル化した。これらの材質の屈折率設定値を表 1 に示す⁹⁾。

2.3 散乱光解析シミュレーション

欠陥散乱光の解析を Discrete Dipole Approximation 法 (離散双極子近似法, 以下, DDA 法)⁹⁾を用いて行った。DDA 法は、散乱体 (本研究では欠陥) の形状を多数の電気双極子の集合によりモデル化し、各双極子位置において照明光によって誘起される双極子モーメントを、他の双極子との相互作用を考慮して求め、それらが発する双極子放射の重ね合わせにより散乱光分布を求める手法である。

本研究では基板上の欠陥の散乱光を解析するため、散乱体と基板との相互作用を考慮した DDA アルゴリズム¹⁰⁾を使用した。

本研究で検討対象としたウエハ表面検査装置におけるレーザー光散乱光学系の配置と光学条件を図 1 および表 2 に示す。レーザー光散乱法は、基板に対して高入射角で照明光を照射し、基板の正反射光を検出せず散乱・回折光のみを検出する暗視野検出を行うことで、基板上の微小欠陥の検出を可能とする。照明条件は、高入射角の P 偏光照明が波長以下の微小欠陥の検出に有効であることが知られている¹¹⁾。本研究では照明波長を産業用高出力光源が入手可能な 532 nm (Nd:YAG レーザー 2 倍波長), 照明入射角を 80° とした。

Type	Convex	Concave
Shape		
Wafer Material	Si	
Defect Material	Si, SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , Cu, Fe	— (Air)
Φ (Diameter): 0.1 λ , 0.2 λ , ..., 2.0 λ H (Height): 0.1 Φ , 0.2 Φ , ..., 0.5 Φ D (Depth): 0.1 Φ , 0.2 Φ , ..., 0.5 Φ		

Fig. 2 Defect model for simulation

Material	$n (= \text{Re}(\tilde{n}))$	$k (= \text{Im}(\tilde{n}))$
Si	4.15	0.0518
SiO ₂	1.46	0.00
Si ₃ N ₄	2.06	0.00
Cu	1.12	2.60
Fe	2.89	2.92
Air	1.00	0.00

検出方向を、極角方向 ($\theta = 0^\circ \sim 90^\circ$) に 45° 間隔で 2 通りの角度, 方位角方向 ($\phi = 0^\circ \sim 180^\circ$, 対称性のため $180^\circ \sim 360^\circ$ は省略) に 45° 間隔で 5 通りの角度を組合せた計 10 通りの方向に設定し、それぞれで得られる検出強度および偏光成分 (ストークスパラメータ) を評価した。

以下、本稿では散乱光の方向の呼び方として、基板法線に近い方向 ($\theta \sim 0^\circ$) を高角度、基板表面に近い方向 ($\theta \sim 90^\circ$) を低角度と呼ぶ。また、散乱光の方位角方向で照明の正反射光に近い方向 ($|\phi| \sim 0^\circ, \theta \sim 90^\circ$) を前方、照明の正反射光から遠い方向 ($|\phi| \sim 180^\circ, \theta \sim 90^\circ$) を後方、前方と後方の中間 ($\phi \sim \pm 90^\circ$) を側方と呼ぶ。散乱光の偏光方向は、散乱光の検出方向を基準とした S 偏光および P 偏光の方向をそれぞれ $\psi = 0^\circ, 90^\circ$ とし、 ψ は検出器側から見て S 偏光方向から反時計回りを正とする。

2.4 分類性能の評価方法

上記の DDA 法による散乱光シミュレーションで、前述の欠陥モデルごとに、21 方向それぞれの散乱光の偏光状態を含む散乱強度 (ストークスパラメータ) のデータが得られる。これらデータの特徴量としてサポートベクターマシン (Support Vector Machine: SVM)¹²⁾に入力し、欠陥分類性能を評価した。

SVM は機械学習の分野で最も広く使われるアルゴリズムの一つであり、特に高次元の分類問題に対してロバストな手法として知られる。SVM によって、欠陥種ごとのデータ点が特徴空間において識別面の上下に分かれ、識別面から近傍の欠陥データ点までの最小距離 (マージン) を最大化するよう識別面が設定される (図 3)。本研究では、線形・ハードマージン (正則化パラメータ $C=1000$) SVM による凹凸欠陥分類結果の正解率とマージンを分類性能の尺度とした。

過学習による過大評価を避けるため、正解率は、K-分割交差検証 (Stratified K-fold cross-validation) (分割数 $K=5$) によって評価した。また、本研究はシミュレーションで得られる仮想的な散乱強度データを対象するため、実際の欠陥形状のパラツキや検出信号のノイズがデータに含まれない。実際にパラツキが加わったデータに対するロバスト性を考慮した指標として、前述のマージンを評価指標に加えた。図 3 に示すように、正のマージンは全データが正しく分類可能であり ((a), (b)), 負の

Item	Specification
Wavelength	532 nm
Incident angle	80°
Azimuth angle of detection (ϕ)	0°, -45°, ..., -180°
Polar angle of detection (θ)	25°, 70°
Analyzer of detection (ψ)	0° (S), 90° (P)

Fig. 3 Schematic diagram of margin for classification performance

マージンは一部のデータに誤分類が生じることを示す (c) . マージンが正の場合, マージンが大きいほど, 実データでパラツキが加わった場合にも正解率が低下しにくいと期待される.

3. 散乱光多方向検出による分類のシミュレーション

3.1 無偏光検出強度を用いた欠陥凹凸分類の評価

欠陥モデルの散乱光シミュレーションによって得られた散乱光分布の例を図 4 (a) に示す. 典型的な傾向を示すため, 欠陥形状のアスペクト比 (高さと直径の比) が 0.3 かつ直径が 0.1λ , 0.3λ , 1.0λ , 1.5λ の欠陥を抽出して表示した. 図 4 (a) は同 (b) に示したように, (θ, ϕ) 座標で表される三次元的な分布を, θ を半径, ϕ を方位として二次元で表示している. 照明の入射方向は左から右方向である. 欠陥ごとの散乱光の方向性を可視化するため, 欠陥ごとの最大強度値で正規化して表示した.

散乱強度分布の材質依存性を見ると, Si 凸欠陥が, 直径 0.3λ 以下で強度が後方よりになっている点, および直径 1.0λ 以上で前方の強度分布の広がりやや大きい点で, 凹欠陥の同寸法の分布と類似している. 同様の傾向は Fe, Cu, Si_3N_4 , SiO_2 の順, すなわち屈折率の絶対値が大きい順で強く現れている.

図 4 から, 凹欠陥の散乱光は高角度 (θ が小, 垂直上方近辺) に強く出のに対し, 凸欠陥は低角度 (θ が大) に強く出る傾向がある. 従来の高角度と低角度の散乱強度比を利用する凹凸分類手法³⁰⁾はこの性質を利用している. しかし, 図 4 欠陥直径の寸法別に見ると, 欠陥の直径が小さい場合 (0.1λ , 0.3λ) はこの性質が明確に見られるものの, 欠陥の直径が大きい場合 (1.0λ , 1.5λ) は欠陥の凹凸によらず散乱光が前方に強く出のため, 高角度と低角度の散乱強度比による凹凸分類が困難になる.

欠陥の直径が小さい (波長と同程度以下の) 場合はレイリー散乱の性質に従って散乱光の分布が等方的になるのに対し, 欠陥の直径が大きい (波長と同程度以上の) 場合はミー散乱の性質に従って散乱光の分布が前方散乱に偏る¹³⁾ため, このような傾向が現れると考えられる.

Fig. 4 Angular distribution of scattered light intensity of defect models (aspect ratio (defect height / diameter) = 0.3)

前述した 45° 間隔, 10 通りの検出方向 (表 2) の散乱強度を用いて SVM による凹凸欠陥の分類性能を評価した. 分類は凹欠陥と凸欠陥の 2 クラス分類とし, 対象は凸欠陥の材質が Si, SiO_2 , Si_3N_4 , Cu, Fe のうちいずれか一つとして, それぞれの材質について凹欠陥と凸欠陥の分類性能を評価した. SVM に入力する特徴量は, 各方向の散乱強度を全方向の散乱強度で正規化した相対強度とした. これは, 欠陥寸法の大小によって大きく変化する散乱強度総和の影響を除外して検出方向間の強度比の影響を反映するためである.

上述した欠陥分類難度への欠陥寸法の影響を調査するため, 対象とする欠陥寸法 (直径) 範囲の上限を変化させたときの分類性能の変化を評価した. その結果を図 5 に示す.

図 5 の横軸は分類対象とする欠陥の寸法範囲の上限値である. 寸法範囲の下限は図 2 の最小寸法に固定した. 欠陥寸法の上限が増加するごとに, 正解率およびマージンが低下していく. 交差検証において誤分類が発生し始める直径は, Si 凸欠陥では 0.6λ 以上, その他の凸欠陥ではおよそ 1.1λ 以上であった.

マージンの評価値はいずれの凸欠陥材質についても直径範囲の上限が拡大するにつれて単調減少する. 材質別に見るとマージンが小さい順に Si, 次に Fe, Cu, Si_3N_4 , 最も大きいのが SiO_2 であった. 図 5 の (a) と (b) の比較から, 欠陥材質による違いはあるが, 誤分類が発生し始める欠陥寸法が, マージン評価値が 0.6 から 0.2 の間で平均して 0.4 の条件に対応していた. そこで, 以下の評価では, 高い分類性能が得られる基準を「マージンが 0.4 以上」と設定した.

3.2 偏光検出強度を用いた欠陥凹凸分類の検討

散乱強度のみでは判別が困難な欠陥凹凸の分類に, 散乱光の偏光を用いることを検討した. シミュレーションによって得られた欠陥散乱光の偏光方向 (長軸の角度 ψ) の分布を図 6 に示す (以後, ϕ 正負での結果の対称性のため散乱光強度および偏光の角度分布は $-180^\circ \leq \phi \leq 0^\circ$ の範囲のみを図示する).

図 6 の凹欠陥を見ると, 寸法によらず, 散乱方位が後方から側方を経由して前方に近づくにつれて, 偏光方向が P 偏光から時計回りに回転し ($-\psi$ 方向), 側方近辺で S 偏光 ($\psi = 0$) を経由して前方で P 偏光 ($\psi = -90^\circ$) に近づく. 一方, 凸欠陥は寸法が 1.0λ 以上では一部例外が見られるものの, 方位角によらず特に低仰角では, P 偏光あるいは P 偏光から $+\psi$ 方向に傾斜した方向の偏光となることがわかった.

前節の散乱強度による分類において, 凸欠陥の材質ごとに誤分類が発生しはじめる寸法の欠陥について, 散乱の強度と偏光方向の分布を同じ寸法の凹欠陥 (空気) と横並びで図 7 に示す. 本図より, 強度分布では凸/凹欠陥が類似している組合せでも, 偏光分布には違いが明確に見られた.

欠陥凹凸による偏光の差は, S 偏光成分と P 偏光成分の大小 (図 6, 図 7 のカラーマップの濃淡差), および S 偏光成分

Fig. 5 Classification performance using unpolarized scattered light intensity

からの傾きの方向 (図 6, 図 7 のカラーマップの色味 (赤/青)) の両方に現れている。前者を反映する偏光検出量としては, S 偏光強度と P 偏光強度の組合せが, 後者を反映する偏光検出量としては $\psi = +45^\circ$ 直線偏光強度と -45° 直線偏光強度の組合せが有効と考えられる。次節にて, それらを特徴量として SVM に入力し, 散乱強度のみを入力した場合との比較を行った。

3.3 偏光検出強度を用いた欠陥凹凸分類の評価

偏光を用いた欠陥分類の効果を定量的に確認するため, SVM へ入力する欠陥散乱光の特徴量として, A: 無偏光強度のみ, B: S 偏光強度と P 偏光強度 (以後, S/P 偏光強度), C: $+45^\circ$ 直線偏光強度と -45° 直線偏光強度 (以後, $\pm 45^\circ$ 偏光強度), および D として B と C の両方 (以後, 4 方向偏光強度), をそれぞれ用いた場合の分類性能を評価した。用いられる特徴量の数は検出方向数と偏光数の積となり, それぞれ A: 10, B: 20, C: 20, D: 40 である。その結果得られたマージンを図 8 に示す。

いずれの凸欠陥材質でも, 評価対象とした欠陥直径の範囲内で正解率とマージンが偏光検出により向上し, C: $\pm 45^\circ$ 偏光強度のほうが B: S/P 偏光強度より高く, D: 4 方向偏光強度に近い分類性能が得られた。

Fig. 6 Orientation angle of polarization of defect-scattered light (aspect ratio of defect shape (defect height / diameter) = 0.3)

Fig. 7 Intensity and polarization orientation of defects which caused error when using only intensity (aspect ratio = 0.3)

正解率の比較の目安としてマージン 0.4 をしきい値として, それを満たす寸法範囲の上限値を表 3 に示した。偏光検出の効果は凸欠陥の材質によって異なる。無偏光検出で大直径の分類正解率が最も低かった Si 凸欠陥に対して特に大きな効果が得られ, $\pm 45^\circ$ 偏光強度の利用により評価対象である 2.0λ 以下の全ての欠陥でマージンしきい値を満たし, ほぼ 100% の正解率が得られた。その結果, 評価対象の全ての凸欠陥材質について, マージンしきい値を満たす欠陥直径範囲の上限のワースト値が, 無偏光検出での 0.62λ から, S/P 偏光検出では 0.97λ , $\pm 45^\circ$ 偏光検出では 1.47λ に向上した。

3.4 $\pm 45^\circ$ 偏光検出による偏光傾斜方向利用の効果

C ($\pm 45^\circ$ 偏光強度) によって B (S/P 偏光強度) より高い分類性能が得られた要因を以下のように考察した。図 9 は B と C で計測される偏光特徴の角度分布を示した図である。それぞれ 2 次元の特徴量であるが, 可視化するため各二つの特徴量間の差分を和で規格化した値を表示した。

図 9 (a) に示すように, S/P 偏光検出では, 方位角 ϕ が -180 から 0 に変化するにつれて, 凹/凸欠陥で共通して $P \rightarrow \pm 45^\circ \rightarrow S \rightarrow \pm 45^\circ \rightarrow P$ 偏光と変化する傾向が見られる。一方, $\pm 45^\circ$ 偏光検出の場合, 後方から側方 (第三象限, 以下, 斜め後方とする) に着目すると, 凹欠陥では P or $S \rightarrow -45^\circ \rightarrow P$ or S と変化するのに対して, 凸欠陥では P or $S \rightarrow +45^\circ \rightarrow P$ or S 偏光であり, 凹欠陥と偏光の傾斜方向が逆であることが顕在化される。この傾向は寸法が大きい場合でもある程度一貫している。このように, 斜め後

Fig. 8 Margin of classification using polarized scattered light intensity

Table 3 Upper limit of defect diameter that satisfies margin threshold

Material of convex defect	(1) Unpolarized detection	(2) S/P polarization	(3) $\pm 45^\circ$ deg polarization
Si	0.62λ	0.97λ	$> 2.0 \lambda$
SiO ₂	1.37λ	1.41λ	1.59λ
Si ₃ N ₄	1.15λ	1.19λ	1.47λ
Cu	1.10λ	1.30λ	1.67λ
Fe	1.05λ	1.31λ	$> 2.0 \lambda$

方における偏光の傾斜方向の違いを顕在化できることが、 $\pm 45^\circ$ 偏光検出が S, P 偏光と比較して有効である要因だと考えられる。

上記の凹凸による偏光方向の違いの物理的な要因を図 10 を用いて定性的に説明する。図 10 の上段の図は、照明の入射によって欠陥の位置に誘起される電場方向の模式図であり、中段は DDA の解析で得られる欠陥中心を通る断面の双極子モーメント（直径 $0.6 \mu\text{m}$ の SiO_2 凸と空気凹の例）である。P 偏光斜入射のため照明電場は xz 面内方向となる。高入射角 P 偏光照明により、基板上方の表面近傍には入射場と反射場の合成によって³⁾ 垂直に近い方向の電場が生じる。一方、基板内部では、屈折によってより水平に近い角度に傾斜した電場が生じる。

散乱光の偏光は双極子モーメントの方向に従うため、図 10 に示したように凸と凹とで斜め後方から見込む双極子モーメントの傾斜方向が異なることが、その方向における偏光方向の違いの原因であり、斜め後方・ $\pm 45^\circ$ 度偏光検出はその違いを捉えるのに有効な検出条件だと解釈できる。

4. 結 言

散乱光の多方向偏光検出強度に基づく Si ウエハ上微小欠陥の凹凸分類性能を、DDA 法による欠陥散乱光シミュレーションを用いて推定し、以下の結果を得た。

- (1) 寸法が照射波長以下から波長と同等以上にわたる場合に、多方向無偏光検出による分類が困難となる（検出確度間隔が 45° の条件で、高い正解率で分類可能な上限欠陥直径の評価値が 0.62λ ）。

Fig. 9 Angular distribution of polarization intensity features

Fig. 10 Direction of dipole moment of defect and scattered polarization

- (2) 多方向の $\pm 45^\circ$ 直線偏光検出強度を用いることで、分類性能の向上が推定される（同評価値が 1.47λ ）

本研究では多数の寸法の欠陥の解析所要時間の制約から、欠陥モデルの形状を円柱に絞った。今後、様々な形状ばらつきを持つ実ウエハの欠陥や、ウエハ表面のマイクロラフネスからの散乱光²⁾を主要因とする検出信号のばらつきも考慮して提案手法を評価する必要がある。

参 考 文 献

- 1) Mark LaPedus: Inspecting Unpatterned Wafers, <https://semiengineering.com/inspecting-unpatterned-wafers/>, accessed 2021.3.13.
- 2) J. C. Stover: Optical Scattering: Measurements and Analysis, Third Edition (SPIE Press, Bellingham, Wash, 2012) Third edition.
- 3) S. Stokowski et al.: Wafer inspection technology challenges for ULSI manufacturing, AIP Conference Proceedings, 449, 1 (1998) 405.
- 4) 井上晴行, 片岡俊彦, 押鐘寧, 遠藤勝義, 森勇蔵, 中野元博, 安弘, 里見慎哉, 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) A. Okamoto et al.: Detection of 30 - 40-nm Particles on Bulk-Silicon and SOI Wafers Using Deep UV Laser Scattering, IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 19, 4 (2006) 372.
- 6) G. Lorenzi et al.: in Process and Materials Characterization and Diagnostics in IC Manufacturing (International Society for Optics and Photonics, 2003) Vol. 5041 39.
- 7) Y. Sugihara et al.: Classification and Size Estimation of Wafer Defects by Using Scattered Light Distribution, Electron Comm Jpn, 98, 6 (2015) 36.
- 8) M. N. Polyanskiy: Refractive index database, <https://refractiveindex.info>, accessed 2021.3.13.
- 9) B. T. Draine et al.: Discrete-Dipole Approximation For Scattering Calculations, J. Opt. Soc. Am. A, JOSAA, 11, 4 (1994) 1491.
- 10) R. Schmehl et al.: Discrete-dipole approximation for scattering by features on surfaces by means of a two-dimensional fast Fourier transform technique, J. Opt. Soc. Am. A, 14, 11 (1997) 3026.
- 11) Y. Otani et al.: Enhanced Scattered Light Imaging of Nanoparticles by Controlling the Polarization Distribution with Photonic Crystals, Jpn. J. Appl. Phys., 52, 5R (2013) 052001.
- 12) C. C. Chang et al.: LIBSVM: A library for support vector machines, ACM Trans. Intell. Syst. Technol., 2, 3 (2011) 27:1.
- 13) C. F. Bohren et al.: in Absorption and Scattering of Light by Small Particles (John Wiley & Sons, Ltd, 1998) 57.