(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2010 年 2 月 25 日(25.02.2010)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2010/021148 A1

(51) 国際特許分類:
G01B 11/24 (2006.01) *A61B 10/00* (2006.01)
A61B 5/107 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2009/003995

(22) 国際出願日: 2009 年 8 月 20 日(20.08.2009)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:
特願 2008-211895 2008 年 8 月 20 日(20.08.2008) JP

(71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 国立大学法人東北大学(TOHOKU UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒9808577 宮城県仙台市青葉区片平二丁目１番１号 Miyagi (JP).

(72) 発明者; および

(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 山本正樹(YAMAMOTO, Masaki) [JP/JP]; 〒9808577 宮城県仙台市青葉区片平二丁目１番１号 国立大学法人東北大学内 Miyagi (JP). 津留俊英(TSURU, Toshihide) [JP/JP]; 〒9808577 宮城県仙台市青葉区片平二丁目１番１号 国立大学法人東北大学内 Miyagi (JP).

(74) 代理人: 重信和男, 外(SHIGENOBU, Kazuo et al.); 〒1020094 東京都千代田区紀尾井町３番２８号 アドミラル紀尾井町ビル７Ｆ Tokyo (JP).

(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

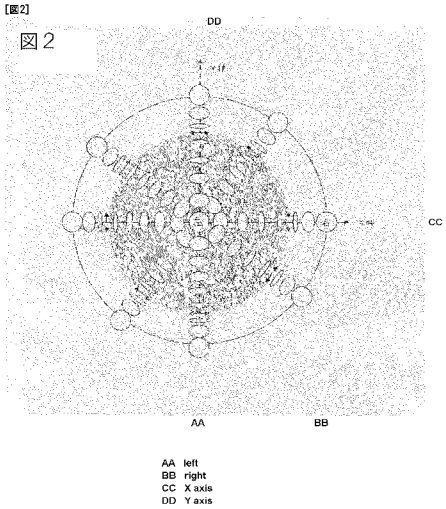
(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[続葉有]

(54) **Title**: OPTICAL DEVICE AND METHOD FOR SHAPE AND GRADIENT DETECTION AND/OR MEASUREMENT AND ASSOCIATED DEVICE

(54) 発明の名称: 形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置及び方法並びにその関連装置

[図2]
図２



AA left
BB right
CC X axis
DD Y axis

(57) **Abstract**: Provided are: an optical device for shape and gradient detection and/or measurement which has a simple structure, is robust to external disturbance, and enables accurate measurement of the gradient angle of an object surface, including a human body; a method for optical shape and gradient detection and/or measurement; and a circularly polarized light illumination device. The optical device for shape and gradient detection and/or measurement uses the optical reflection characteristics of the surface of an object to detect and/or measure the surface shape or gradient of an observed object, and is provided with an illumination device and a polarized light image detection device. The illumination device makes the incident light, which surrounds the periphery of the object and is essentially a known perfect polarized light, fall uniformly. The polarized light image detection device detects a polarized light ellipse of the perfectly polarized light component of a light beam group, which is specularly reflected by the object surface and radiated at a particular azimuth angle. The optical device measures the gradient angle with respect to the radiated light beam of the reflection surface in a step 1 in which the orientation of the incident plane is detected from the observed azimuth angle value of the polarized light ellipse for the reflecting surface of the object which forms an incident point for each reflected and radiated light beam, and a step 2 in which the incident angle is detected from the ellipticity logic value of the polarized light ellipse. The method for optical shape and gradient detection and/or measurement is carried out using the same operation.

(57) 要約:

[続葉有]

WO 2010/021148 A1

添付公開書類:

— 国際調査報告（条約第 21 条(3)）

簡便な構成で、外乱に強い、人体を含む物体表面の傾斜角を精密に計測できる形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置、光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法並びに円偏光照明装置を提供すること。物体の表面の反射光学特性を用いて観察物体の表面形状や傾斜を検知及び／又は計測する形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置は、該物体の周辺を囲んで実質的に既知の完全偏光状態の光を一様に入射させる照明装置と、該物体表面で正反射し特定の方位角に射出された光線群の完全偏光成分の偏光楕円を検知する偏光画像検出装置を備え、反射射出された光線ごとに、その入射点を成す該物体の反射面について、偏光楕円の観測方位角値から入射面の方位を知るステップ１と、偏光楕円の楕円率理論値から入射角度を知るステップ２によって反射面の射出光線に対する傾斜角を測定するもので、同様に操作して光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法が構成される。

明　細　書

発明の名称 ：

形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置及び方法並びにその関連装置

技術分野

[0001] 本発明は、形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置並びに物体情報の抽出法に関する。特に、本発明は、形状計測顕微鏡、バイオ顕微鏡、形状計測望遠鏡、医療診断装置、マンモグラフィー装置、傾斜センサーなど、に好適な観察試料の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置並びに物体情報の抽出法に関する。また、本発明は、円偏光照明装置および方法に関し、特に形状計測カメラ、バイオ顕微鏡、形状計測望遠鏡、円筒等の内面形状計測装置、非球面形状計測装置、マンモグラフィー装置、傾斜センサーなどに好適な観察試料の円偏光照明装置に関する。

背景技術

[0002] 顕微観測によって生体試料などの試料の形態を計測する場合、3次元形状の試料を適当な照明光で照明し、顕微光学系によって像を拡大投影する。この場合、投影面はCCD検出器などの2次元面であり、一般に試料の厚さ方向の形状に関する情報は失われる。特に、この2次元性を強調できる工夫によって、厚さ方向の断面の2次元画像を複数枚得て3次元画像を再構築する顕微鏡として、共焦点顕微鏡(confocal microscope)が実用化されている〔高田邦昭編、「初めてでもできる共焦点顕微鏡活用プロトコール」、羊土社、2003年12月発行、ISBN: 9784897064130（非特許文献１）、国際公開第WO2004/036284号パンフレット（特許文献１）〕。しかし、この方法では、時系列で複数の試料深さでの2次元像を逐次撮像することが不可欠であり、観測時間内で試料の変形が無いことを前提にしている。

また、特殊な構成で、2次元像の強度分布を高速に走査したり、アレイ検出器で同期検出したりする方法で高速化を達成する工夫も成されているが、装置が大掛かりであるばかりか、撮像条件と環境を複雑化するために、安定し

た動作を得るためには多大なコストがかかる。

[0003] 一方で、物体表面の形とその変化を精密に計測できる方法として、各種の干渉計測法が実用化されている。しかし、これらの方法では、一般に、光路を分割して観測光と参照光を形成し、その光路差を制御して干渉縞を生成して光路長を計測する。従って、それぞれの光路での外乱により計測値が影響を受けるために、除振対策や温度変動除去などに特別な環境を準備する必要があり、通常の環境では適用できない。また、光路方向の距離から形状を算出するので、等高線で表した地形図の様式で形状が表現される。従って、表面の形状、特に面の傾斜を直接に計測することはできない。さらに、人体表面の形状では、モアレトポグラフィーなどの縞投影法が実用化されているが、計測精度は1mm程度と低い。ホログラムを利用した干渉法では感度は高いが、手続きが煩雑である。

[0004] さらに、物体形状を非偏光で照明して、透明物体表面の偏光角反射では、偏りが生ずる、即ち、反射光がｐ偏光成分に比べてｓ偏光成分が多くなることを利用して物体の形状を認識する計測法がロボティックス応用で開発されている〔Recovery of Surface Orientation From Diffuse Polarization, G. Atkinson and E. R. Hancock, IEEE Transaction of Image Processing, Vol. 15, No. 6, June 2006）（非特許文献２）〕。ロボティックス応用では、実用を意識して、自然光（非偏光）の照明が前提とされ、形状認識の偏光計測は部分偏光を計測するポラリメトリー計測に属する。なお、初期の越川の開発では円偏光照明が採用された〔A Polarimetric Approach to Shape Understanding of Glossy Objects, K. Koshikawa, Proc. Int. Joint Conf. Art. Intell., pp. 493-495 (1979)（非特許文献３）、特公昭61-17281号公報「光沢面方向検知方法」（特許文献２）〕。しかし、計測法が部分偏光を扱うポラリメトリー計測であり、原理的に透明体では計測感度が得られるが、金属面では感度が得られないことから、その後の開発は非偏光照明下で偏光度を計測する簡便な計測に絞られている。

これらの方法は、透明体では形状再現が実現されているものの、計測角度

の精度は数度の程度である。また、金属試料では偏光角でp偏光成分の反射がゼロとならずに単に極小値を取るために反射強度の差が小さく、原理的に適用できない。

[0005] 偏光(polarization)とは、電場及び磁場が特定の方向に偏りを持って振動している光のことである。偏りの時間変化の形で区別すると、偏光は一般的には楕円偏光であるが、直線偏光、円偏光もある。ところで、光は電磁波であり、電磁場は進行方向と垂直に振動する横波で、直線偏光では、電場（および磁場）の振動方向が一定であり、直線偏光の振動面は、電場の方向を指す. 円偏光とは、電場（および磁場）の振動が伝播に伴って円を描くもので、回転方向により右円偏光と左円偏光とがある。楕円偏光とは、直線偏光と円偏光の一次結合で表現される、最も一般的な偏光状態であり、電場（および磁場）の振動が時間に関して楕円を描くものである。楕円偏光も、右楕円偏光と左楕円偏光がある。電界成分が入射面に垂直な光（電磁波）を、s波〔入射面に垂直(senkrecht), σ光〕、そして電界成分が入射面に平行な光（電磁波）を、p波〔入射面に平行(parallel), π光〕と呼び、進む方向に向かって時計回りの光を左円偏光（光を受け止める側からみて左回り）、そして進む方向に向かって反時計回りの光を右円偏光（光を受け止める側からみて右回り）と呼んでいる。特に、偏りの時間変化の形がただ一つに決まっている偏光を完全偏光という。また、偏りを持たない非偏光と完全偏光の和を部分偏光という。

ポラリメトリーに対比して、高い計測精度が得られる偏光計測方法としては、エリプソメトリーがある。ポラリメトリーでは、光の散乱などに伴う非偏光成分を含む部分偏光を計測する。一方、エリプソメトリーでは、散乱を生じない程度に滑らかな表面での反射を扱うために、完全偏光の偏光状態を示す偏光楕円の形を計測対象とするために計測精度が高い。偏光の測定及び解析法については、山本正樹、「偏光測定と偏光解析法」、小瀬輝次 他編、「光工学ハンドブック」、朝倉書店、1986、pp. 411-427（非特許文献４）及び小澤祐市、佐藤俊一、「軸対称偏光ビーム」、光学、35巻12号(2006), pp.

9-18（非特許文献５）を参照できる。

[0006] 光学的に物体の３次元形状を計測する方法として、各種の干渉計測法、モアレトポグラフィーなどの縞投影法、あるいは共焦点顕微鏡観察法が広く実用化されている。これらの光計測法では、基本的に距離の計測によって等高線で表した地形図の様式で形状を構築する。距離計測によらない計測法として、ロボティクス分野では、非偏光照明下で物体面の散乱光の“偏り”を利用した３次元形状の認識研究が進展し、形状再構築に成功している〔非特許文献６〕。また特許明細書も参照できる〔特許文献３：特開平11-211433号公報〕。これらの形状認識応用の計測原理はポラリメトリーであって、例えれば、雪面の散乱の“偏り”を示す偏光度の傾斜角依存性が水の偏光角で最大値１に近づくことを利用する傾斜計測法である。偏光度の計測精度が数%に留まるために、現状では形状認識に応用が限定されているものの、偏光を利用することで“傾斜”を直読し、物体形状を実時間で再構築できることを示している。

[0007] このロボティクス応用での、艶のある透明散乱体の形状認識の研究は、1979年に越川によって発案され〔非特許文献３、特許文献２：特公昭61-17281号公報〕、原理検証の実験では円偏光照明が用いられたものの、散乱試料による部分偏光計測であった。そのため、その後は専ら非偏光照明が用いられ、形状を精密計測する方向へは発展しなかった。しかし、このロボティクス応用で実時間計測に必要な偏光画像の検知では、偏光カメラ〔非特許文献７〕の開発も進展し、各種の物体形状の抽出の応用も発展している。

[0008] 一方、偏光を利用した精密計測法としてはエリプソメトリーが知られている。エリプソメトリーは、直線偏光をプローブとして平面試料に斜め入射し、反射の偏光状態の変化から試料の光学的性質や薄膜の厚さを精密計測する。このエリプソメトリー分野では、偏光反射特性の入射角依存性を精密計測に利用する主入射角法〔非特許文献４〕が知られているが、試料の光学特性を計測するという標準的な目的の手法であり、計測対象は平面試料に限定されている。

[0009] 発明者は、主入射角法に基づく偏光解析法の発明〔特許文献４：特公昭52-46825号公報、特許文献５：特公昭60-41732号公報、特許文献６：特公平2-16458号公報〕と応用を通して、反射の偏光状態の入射角依存性に関する光学特性を熟知している。

先行技術文献

特許文献

[0010] 特許文献1：国際公開第2004/036284号パンフレット(WO2004/036284, A)

特許文献2：特公昭61-17281号公報

特許文献3：特開平11-211433号公報

特許文献4：特公昭52-46825号公報

特許文献5：特公昭60-41732号公報

特許文献6：特公平2-16458号公報

特許文献7：特願2008-211895号

非特許文献

[0011] 非特許文献1：高田邦昭編、「初めてでもできる共焦点顕微鏡活用プロトコール」、羊土社、2003年12月発行、ISBN: 9784897064130

非特許文献2：G. Atkinson and E. R. Hancock, "Recovery of Surface Orientation From Diffuse Polarization", IEEE Transaction of Image Processing, Vol. 15, No. 6, pp.1653-1664, June 2006)

非特許文献3：K. Koshikawa, "A Polarimetric Approach to Shape Understanding of Glossy Objects", Proc. Int. Joint Conf. Art. Intell., pp.493-495 (1979)

非特許文献4：山本正樹、「偏光測定と偏光解析法」、小瀬輝次 他編、「光工学ハンドブック」、朝倉書店、1986、pp. 411-427

非特許文献5：小澤祐市、佐藤俊一、「軸対称偏光ビーム」、光学、35巻12号(2006), pp.9-18

非特許文献6：川上彰二郎、「積層型フォトニック結晶の産業的諸応用」、応用物理、77, 508-514 (2008)

非特許文献7：「正反射による物体表面の傾斜エリプソメトリーー精密実時間形状計測への基本概念ー」、光学、Vol.38, No.4 (2009) pp.204-212

非特許文献8：K. Kinoshita and M. Yamamoto, "Principal Angle-of-Incidence Ellipsometry", Surf. Sci. 56, 64-75 (1976)

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0012] 物体の三次元的形状を測定するための、従来の干渉法などの方法は、光路長の変化、すなわち距離の変化を精密に計測するという幾何学的な三角測量法である。例えば、傾斜を算出するには観測物体上の所定の距離Lだけ離れた位置での観測値との演算を行うので、Lの決定誤差も傾斜の誤差となる。また、観測される光路長は、光の伝搬中に外乱を受けやすい。

本発明の目的は、簡便な構成で、外乱に強い、人体を含む物体表面の傾斜角を精密に検知及び／又は計測できる形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置並びに光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法を提供することである。また、その物体の形状を計測する傾斜・形状計測法に用いて計測精度を確保することを可能にせしめる円偏光照明装置並びに円偏光照明手法を提供することである。

課題を解決するための手段

[0013] 本発明者は、鋭意研究を進めた結果、既知の偏光楕円の形を持つ完全偏光が物質表面で反射されたとき、光の電気ベクトルのp成分とs成分とで振幅と位相の変化が異なるために、反射光の完全偏光成分の偏光楕円の形状が変化するというエリプソメトリーの原理において、(1)「偏光楕円の方位角変化の基準は入射面方位」にあり、(2)「偏光楕円の楕円率の変化は、入射角に対して単調な関数」であることを利用すれば、反射光の偏光楕円を計測して、偏光楕円の方位角計測値から入射面の方位を知るステップ１と、偏光楕円の楕円率計測値から理論的に入射角を算出するステップ２によって、試料である物質表面であって且つ入射光を反射している微斜面、すなわち、接平面の傾斜を理論的に決定することが可能で、当該観測物質の表面は、観測視野内

で連続であるとすることができることから、決定された微斜面の傾斜を滑らかに接続することで三次元形状が再現できるということを見出すことに成功し、本発明を完成した。

[0014] 本発明は、次なる態様を提供する。

〔１〕物体の表面の反射光学特性を用いて観察物体の表面形状や傾斜を検知及び／又は計測する形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置において、該物体の周辺を囲んで実質的に既知の完全偏光状態を包含する偏光状態の光を一様に入射させる照明装置と、該物体表面で正反射し特定の方位角に射出された光線群の完全偏光成分を包含する偏光成分の偏光楕円を検知する偏光画像検出装置を備え、反射射出された光線ごとに、その入射点を成す該物体の反射面について、偏光楕円の観測方位角値から入射面の方位を知るステップ１と、偏光楕円の楕円率理論値を包含する偏光楕円の楕円率値から入射角度を知るステップ２によって反射面の射出光線に対する傾斜角を測定することを特徴とする形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

〔２〕該物体の周辺を囲んで実質的に既知の完全偏光状態を包含する偏光状態の光を一様に入射させる照明装置が、完全円偏光を包含する円偏光を照明するものであることを特徴とする上記〔１〕に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

〔３〕偏光楕円の観測方位角値から入射面の方位を知るステップ１が、(1)偏光楕円の観測方位角理論値を包含する偏光楕円の観測方位角値から入射面の方位を知るものであること、又は、(2)該物体の周辺を囲んで実質的に既知の完全偏光状態を包含する偏光状態の光を一様に入射させる照明装置において、右円偏光と左円偏光を切り替えて入射せしめることで、反射偏光楕円の観測方位角理論値を包含する反射偏光楕円の観測方位角値が物体の表面の反射光学特性に無関係に入射面に対称に切り替わることを利用して入射面方位を特定するものであることを特徴とする上記〔１〕又は〔２〕に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

〔４〕該物体の周辺を囲んで実質的に既知の完全偏光状態を包含する偏光状

態の光を一様に入射させる照明装置が、空間的に特定された入射光線を計測基準原点として含み、偏光画像検出装置によって特定した反射点における偏光楕円の観測値から、該反射面の光学的性質を特定できるものであることを特徴とする上記〔１〕～〔３〕のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

〔５〕該物体表面で反射し特定の方位角に射出された光線群の偏光楕円を検知する偏光画像検出装置が、実質的に同一な偏光楕円を有する光線群の方位角範囲を抽出できる機構を備えることを特徴とする上記〔１〕～〔４〕のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

[0015] 〔６〕該物体表面で反射し特定の方位角に射出された光線群の偏光楕円を検知する偏光画像検出装置が、反射光を空間的に少なくとも３以上の複数に分割し、互いに異なった特定の偏光楕円を検出できる検光子を複数割り当てて、偏光楕円を並列に同時検知する構造を有していることを特徴とする上記〔１〕～〔５〕のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

〔７〕反射光を偏光ビームスプリッターで直進するp成分と反射されるs偏光成分とに分割せしめ、それぞれを、結像レンズにより、２次元検出器上に結像せしめて、直交偏光像出力として物体像が取り出される直交直線偏光像検知ユニットを備えていることを特徴とする上記〔１〕～〔６〕のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

〔８〕該物体表面で反射し特定の方位角に射出された光線群の偏光楕円を検知する偏光画像検出装置が、物体の縮小投影像を得ることで物体表面の光線位置を特定する機構を有するものであることを特徴とする上記〔１〕～〔７〕のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

〔９〕該物体表面で反射し特定の方位角に射出された光線群の偏光楕円を検知する偏光画像検出装置が、物体の拡大投影像を得ることで物体表面の光線位置を特定する機構を有するものであることを特徴とする上記〔１〕～〔７〕のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

〔10〕該物体表面で反射し特定の方位角に射出された光線群の偏光楕円を検知する偏光画像検出装置が、コリメーターを備えることで物体表面の光線位置を特定する機構を有するものであることを特徴とする上記〔１〕～〔７〕のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

〔11〕該物体表面で反射し特定の方位角に射出された光線群の偏光楕円を検知する偏光画像検出装置が、該装置を実質的に無限遠方に配置することで物体表面の光線位置を特定する機構を有するものであることを特徴とする上記〔１〕～〔７〕のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

〔12〕該物体表面で反射し特定の方位角に射出された光線群の偏光楕円を検知する偏光画像検出装置が、ピンホールを備えることで物体表面の光線位置を特定する機構を有するものであることを特徴とする上記〔１〕～〔７〕のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

〔13〕人体または乳房を包含する人体の一部分を検知及び／又は計測物体とし、悪性腫瘍を包含する各種の病変によって引き起こされる表面傾斜角の特異的変化を検知特定するものであるマンモグラフィーを包含する医療診断装置であることを特徴とする上記〔１〕～〔12〕のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

〔14〕患者を包含する観察物体の姿勢変化を包含する力学的処理によって、所定の応力による変形を与え、変形前後での傾斜角の変化を検知及び／又は計測することで力学的な特性を抽出することを特徴とする上記〔１〕～〔13〕のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

〔15〕照明光を白色光として、皮膚を包含する観察物体表面からの侵入深さが波長とともに変化することを考慮した実質的な反射面として、該反射面の光学特性の変化を検知及び／又は計測することを特徴とする上記〔１〕～〔14〕のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

[0016] 〔16〕物体の表面の反射光学特性を用いて観察物体の表面形状や傾斜を検知及び／又は計測する光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法であって、照明

装置により、該物体の周辺を囲んで実質的に既知の完全偏光状態を包含する偏光状態の光を一様に入射せしめ、該物体表面で正反射し特定の方位角に射出された光線群の完全偏光成分を包含する偏光成分の偏光楕円を偏光画像検出装置で検知し、該検出装置の光学系のNAを最大値とするかあるいは偏光状態の計測精度に対する関数値としてあり、反射射出された光線ごとに、その入射点を成す該物体の反射面について、偏光楕円の観測方位角値から入射面の方位を知り且つ偏光楕円の楕円率理論値を包含する偏光楕円の楕円率値から入射角度を知ることによって反射面の射出光線に対する傾斜角を測定し、測定された傾斜角が該物体表面で滑らかに変化することを利用し、物体情報を抽出することを特徴とする光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法。

〔17〕人体または乳房を包含する人体の一部分を検知及び／又は計測物体とし、悪性腫瘍を包含する各種の病変によって引き起こされる表面傾斜角の特異的変化を検知特定するものであることを特徴とする上記〔16〕に記載の光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法。

〔18〕患者を包含する観察物体の姿勢変化を包含する処理によって、所定の変形を与え、変形前後での傾斜角の変化を検知及び／又は計測することを特徴とする上記〔16〕又は〔17〕に記載の光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法。

〔19〕照明光を白色光として、皮膚を包含する観察物体表面からの侵入深さが波長とともに変化することを考慮した実質的な反射面として、該反射面の光学特性の変化を検知及び／又は計測することを特徴とする上記〔16〕～〔18〕のいずれか一記載の光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法。

〔20〕物体の表面の反射光学特性を用いて観察物体の表面形状や傾斜を検知及び／又は計測する形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置において、該物体の周辺を囲んで実質的に既知の完全偏光状態を包含する偏光状態の光を一様に入射させる照明装置と、該物体表面で反射し特定の方位角に射出された光線群の完全偏光成分を包含する偏光成分の偏光楕円を検知する偏光画像検出装置を備え、反射射出された光線ごとに、その入射点を成す該物体の反射

面、すなわち、微斜面について、偏光楕円の方位角から入射面の方位角、すなわち、接平面の法線の方位角を、そして、該偏光楕円の楕円率から反射角度、すなわち、入射角度を、それぞれ知ることによって反射面の射出光線に対する傾斜角を測定し、接平面を成す微斜面を滑らかに接続する積分操作をなすことを特徴とする形状・傾斜検知及び／又は計測法。

[0017] 〔21〕一度の反射で起こる偏光楕円の変化の入射角依存性を利用し、観測物体表面の反射点での接平面の法線について観測方向である軸と成す角と該観測方向である軸と垂直な平面への射影成分の偏角を直接に計測することを特徴とする上記〔20〕に記載の光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法。

〔22〕観測物体表面の反射点の接平面の傾斜として、観測方向である軸成分の座標での偏微分係数を決定することを特徴とする上記〔20〕又は〔21〕に記載の光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法。

〔23〕観測物体表面の反射点の接平面の法線の傾きを計測し、物体の反射点での形状・傾斜の偏微分係数を求め、該偏微分係数の時間変化及び／又は空間変化を計測し、得られた計測値を直接利用して形状の特徴及び／又は傾斜の特徴を抽出することを特徴とする上記〔20〕～〔22〕のいずれか一に記載の光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法。

〔24〕エリプソメトリーで、観測対象試料の光学的な性質を表す光学モデルを使用して計算された複素振幅反射率比と、反射された偏光楕円の楕円率角と主軸の方位角とから求められる値Ψ,Δとを使用して、接平面の傾斜並びに観測物体の形状を計測することを特徴とする上記〔20〕～〔23〕のいずれか一に記載の光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法。

[0018] 上記した、試料の光学特性を既知として、試料面の幾何学的な方位を未知とする新たな発明、すなわち、物体表面を構成する傾斜面に円偏光を入射し、規定された観察方位に正反射される反射光線の偏光特性を用いて該傾斜面の三次元傾斜角および該傾斜面を成す該物体の形状・傾斜を計測する傾斜・形状計測法の発明による計測法開発研究の過程で、計測誤差とその起因の解析を行った結果、円偏光照明装置の仕様を新たな構成を採用して限定するこ

とで計測精度を確保することが出来ることを見出した。即ち、本発明の円偏光装置によって、発明者の提案する３D傾斜エリプソメトリーによる精密形状計測に於いて、エリプソメトリーの計測精度＜１%を実現することができた。この精度は、従来技術の偏光度計測の高々数%を大きく改善している。

[0019] さらに、発明者は、３D傾斜エリプソメトリーによる精密形状計測が従来の光学的形状計測が適用できなかった、内面を含む物体の表面の形状・傾斜計測に適用できることを見出した。特に、円筒状の物体の内面、さらには、一端を封じられた円筒状の物体の内面などの光学的手法が適用不可能であった対象に精密光学計測を適用できることを見出した。

発明者の提案する３D傾斜エリプソメトリーによる精密形状・傾斜計測に於いて、計測の誤差要因となる円偏光照明光の不完全性を排除し、期待されるエリプソメトリーの計測精度1%～0.1%を実現する。また、内面を含む物体表面の傾斜・形状の光学的精密計測を可能にする。

[0020] かくして、本発明は、さらに、次なる態様を提供する。

〔25〕 物体の形状や傾斜を計測する傾斜・形状計測法に用いる円偏光照明装置であって、内面を含む、物体表面を構成する傾斜面に円偏光を入射し、規定された観察方位に正反射される反射光線の偏光特性を用いて該傾斜面の三次元傾斜角および該傾斜面を成す該物体の形状・傾斜の計測用のもので、且つ、当該円偏光照明装置は光源装置を備えるもので、該光源装置は、該物体に正対する平面または曲面から成る円形または矩形、あるいは、その組み合わせの、多面体形状の照明区画を有し、該区画が、物体の外面を囲む凹面、または、物体の内面に向けた凸面で構成され、該区画を通して該物体に向けて実質的完全円偏光を包含する円偏光を照射でき且つ該物体表面に入射させる円偏光光線群が、反射の法則に従って観測方位に正反射できる全ての入射光線成分を含むようにせしめる光源装置であることを特徴とする円偏光照明装置。

〔26〕 前記照明区画を有する光源装置が、光源、光を該区画に導く光学素子、および、円偏光子をこの順に含み、所定の偏光度の完全円偏光を包含す

る円偏光を該区画から所定の角度範囲の入射角光線束として射出できる機能を具備せしめるものであることを特徴とする上記〔25〕に記載の円偏光照明装置。

〔27〕 前記照明区画を有する光源装置が、実質的に偏光度99%以上の円偏光光束群を該物体に照明できることを特徴とする上記〔25〕または〔26〕に記載の円偏光照明装置。

〔28〕 前記光源装置の照明区画が円に内接する正多角形のいずれか、または、その組み合わせから成る多面体区画を成すものであることを特徴とする上記〔25〕～〔27〕のいずれか一に記載の円偏光照明装置。

〔29〕 前記光源装置が、光ファイバー素子を所定の角度に配置して照明区画に垂直に入射させるものであることを特徴とする上記〔25〕～〔28〕のいずれか一に記載の円偏光照明装置。

〔30〕 前記照明区画を有する光源装置が、少なくとも、点発光源を配列した実質的面光源、及び／又は、面発光光源と、円偏光子とを、この順に含むことを特徴とする上記〔25〕～〔29〕のいずれか一に記載の円偏光照明装置。

〔31〕 前記光源装置が少なくとも一点から発散する光束を生成する光源機構と回転楕円体反射鏡を含み、該発散点と物体の位置を該回転楕円体反射鏡の焦点に一致させて配置して、反射によって照明光線を物体に収束せしめることで照明区画に垂直に入射させることを特徴とする上記〔25〕～〔30〕のいずれか一に記載の円偏光照明装置。

〔32〕 前記光源装置が少なくとも平行な照明光束を生成する光源機構と回転放物面鏡を含み、物体の位置を該回転放物面鏡の焦点に一致させて配置して、反射によって照明光線を物体に収束せしめることで照明区画に垂直に入射させることを特徴とする上記〔25〕～〔30〕のいずれか一に記載の円偏光照明装置。

〔33〕 前記光源装置の照明区画内に照明角度原点基準を有することを特徴とする上記〔25〕～〔32〕のいずれか一に記載の円偏光照明装置。

〔34〕 照明光束の円偏光状態を右円偏光と左円偏光で時間的または空間的に選択する機能を有することを特徴とする上記〔25〕～〔33〕のいずれか一に記載の円偏光照明装置。

〔35〕 内面を含む、物体表面を構成する傾斜面に円偏光を入射し、規定された観察方位に正反射される反射光線の偏光特性を用いて該傾斜面の三次元傾斜角および該傾斜面を成す該物体の形状や傾斜を計測する傾斜・形状計測法に用いる円偏光照明手法であって、測定対象物体に正対する平面または曲面から成る円形または矩形、あるいは、その組み合わせの、多面体形状の照明区画を有しており且つ該区画が物体の外面を囲む凹面または物体の内面に向けた凸面で構成されている光源装置を使用し、該区画を通して該物体に向けて実質的完全円偏光を包含する円偏光を照射して、該物体表面に入射させる円偏光光線群が、反射の法則に従って観測方位に正反射できる全ての入射光線成分を含むようにすることを特徴とする円偏光照明手法。

発明の効果

[0021] 本発明によれば、顕微鏡、望遠鏡、投影装置等の結像装置によって記録された、物体の2次元偏光像を解析して、物体を構成する表面の傾斜角(0°～90°)を0.01°から0.001°の精度で検知及び／又は計測できる。物体表面が滑らかにつながっていることを利用すると、計測した傾斜角を用いて物体の3次元形状を再構築できる3次元形状・傾斜検知及び／又は計測装置が得られる。また、このための装置は、複雑な機構を必要とせず、簡便な3次元形状・傾斜検知及び／又は計測装置である。

本発明では、偏光の反射によって反射面の傾斜角を直接に観測する。反射による偏光状態の変化は、計測部でただ1度起こる現象である。この反射現象を除いて、光の伝搬中には偏光状態の変化は起こらない。入射偏光および反射後の射出偏光は、共に、空気や液体などの等方で均一な媒質を通過するので、伝搬中には光の偏光状態には変化を起こさない。したがって、観測環境を選ばず、観測距離にも影響されない点が最大の特徴である。

本発明では、物体の傾斜が直読できる。傾斜の局所的な変化も精密に非接

触で観測できることから、簡単な画像処理によって、様々な応用が可能である。特に、環境を選ばないことから、顕微鏡下のナノサイズの試料のダイナミックス計測、悪性腫瘍による乳房表面の局所的な窪みを抽出するなどの人体などの医療診断、さらには、衛星画像による計測応用など、さまざまな環境での新規の検知及び／又は計測装置を提供でき、さらにそれを広範に応用できる。

さらにまた、本発明によれば、偏光カメラ等によって記録された、試料の2次元偏光像を解析して、試料の内面を含む表面の3次元傾斜と形状を精密計測できる3次元形状・傾斜計測装置で最適に用いることのできる円偏光照明装置が得られる。とくに、期待されるエリプソメトリーの計測精度1%～0.1%を実現する構成が得られる。

本発明のその他の目的、特徴、優秀性及びその有する観点は、以下の記載より当業者にとっては明白であろう。しかしながら、以下の記載及び具体的な実施例等の記載を含めた本件明細書の記載は本発明の好ましい態様を示すものであり、説明のためにのみ示されているものであることを理解されたい。本明細書に開示した本発明の意図及び範囲内で、種々の変化及び／又は改変（あるいは修飾）をなすことは、以下の記載及び本明細書のその他の部分からの知識により、当業者には容易に明らかであろう。本明細書で引用されている全ての特許文献及び参考文献は、説明の目的で引用されているもので、それらは本明細書の一部としてその内容はここに含めて解釈されるべきものである。

図面の簡単な説明

[0022] [図1]球状の試料に入射した光線（太線）が各反射点で反射され、観測方位に反射される様子を示す。観測方位はz軸方向であり、x-y平面での反射の場合、反射の法則で反射光線がz軸と平行になる様子が描かれている。試料は透明であるものとしてある。

[図2]球状の試料の観測面（円となる）及び該観測面である円内部の観測点での光の偏光状態を模式的に示す。偏光の状態が、図中に楕円で示されている

が、楕円の主軸方位が入射面に直交している。接平面の法線が観測方向であるz軸と成す角であって、屈折率n=1.5の媒質の偏光角φ=56°付近では、楕円率ε=0の直線偏光を経由することから、該直線偏光の内側領域（入射角がある特定の媒質の偏光角より小さい領域）を円形に影を付して示してある。影の付された領域では、左回り、影の外側の試料観測面周辺部では右回りの偏光となる。試料は透明であるものとしてある。試料が透明な細胞などの場合に該当する。

[図3]試料に吸収がある場合の図２に対応する球状の試料の観測面及び該観測面である円内部の観測点での光の偏光状態を模式的に示す。偏光の状態が、図中に楕円で示されているが、楕円の方位角が所定の量だけ回転していることがわかる。試料がアルミニウムなどの吸収体などの場合に該当する。

[図4]試料として屈折率n=1.5のガラスが空気中にある場合の入射角と偏光状態tanΨcosΔ及びtanΨsinΔとの関係を計算した結果を示す。試料が透明な細胞などの場合に該当する。

[図5]試料として屈折率n=1.5のガラスが空気中にある場合の入射角とp-s偏光成分の強度反射率との関係を計算した結果を示す。試料が透明な細胞などの場合に該当する。

[図6]試料が吸収体である場合の入射角と複素振幅反射率比Rp/Rsとの関係を計算した結果を示す。試料として酸化されたアルミニウム表面のものを想定し、波長405nm（青色発光ダイオード波長）での複素平面表示で示してある。なお、吸収があるので複素屈折率は、0.6－5.04iである。試料が金属などである場合に該当する。

[図7]試料が吸収体である場合の入射角と複素振幅反射率比Rp/RsのΨ及びΔとの関係を計算した結果を示す。試料として酸化されたアルミニウム表面のものを想定し、波長405nm（青色発光ダイオード波長）でのものである。なお、吸収があるので複素屈折率は、0.6－5.04iである。試料が金属などである場合に該当する。

[図8]試料としてアルミニウム（酸化されたアルミニウム表面を持つ）が空気

中にある場合の入射角とp-s偏光成分の強度反射率との関係を計算した結果を示す。なお、吸収があるので複素屈折率は、0.6－5.04iである。試料が金属などの場合に該当する。波長405nm（青色発光ダイオード波長）での値である。

[図9]本発明の形状計測光学装置の一つである形状計測望遠鏡の構成を示す。最も簡単な基本構成で装置が示してある。

[図10]本発明の形状計測光学装置の一つである形状計測顕微鏡の構成を示す。最も簡単な基本構成の一つで装置が示してある。

[図11]本発明の形状計測光学装置の一つの構成を示す。最も単純化された基本構成の一つで装置が示してある。

[図12]本発明の形状計測光学装置の一つの構成例を示す。

[図13]本発明の形状計測光学装置の別の一つの構成例を示す。

[図14]本発明の形状計測光学装置の一つであるマンモグラフィーの構成例を示す。

[図15]本発明の形状計測光学装置の一つであるマンモグラフィーのべつの構成例を示す。

[図16]本発明で利用される直交ユニットの一つの構成を示す。

[図17]本発明の形状計測光学装置の一つの構成例を模式的に示す。

[図18]本発明の形状計測光学装置の別の一つの構成例を模式的に示す。

[図19]２次元面内に規定されたエリプソメトリーの概念を、３次元物体の内面を含む表面の正反射に拡張する場合を説明する図である。物体表面を円偏光で一様に照明し、正反射光をｚ方向から観測すると、ｚ方向から見える表面内の任意の反射点で，反射の法則を満たす“明るい”正反射０次光成分光線が存在する。入射面は、入射光線と反射面の法線を含む面として定義され、反射面に垂直な法線ベクトルは、必ず入射面内に含まれ、反射角（＝入射角）は法線ベクトルがｚ軸と成す角に等しく、任意のｚ方向に進む光線について、入射面の方位角と入射角が決定できれば法線ベクトルが決定される。

[図20]円偏光照明下でｚ方向から観測される反射偏光の楕円を示す。(a)は、

誘電体試料による反射の場合を示し、(b)は、金属試料による反射の場合を示す。

[図21]右円偏光入射での観測楕円率角と入射角余弦の変換テーブルを示す。

[図22]物体表面を構成する傾斜面に円偏光を入射し、規定された観察方位に正反射される反射光線の偏光特性を用いて該傾斜面の三次元傾斜角および該傾斜面を成す該物体の形状を計測する傾斜・形状計測法の実験に使用した装置を示す。

[図23]図19の装置を使用して角錐台と半球を観測した結果を、左側と右側に並べて示す。上からa)楕円率角観測値、b)方位角観測値、c)試料写真である。

[図24]偏光子と検光子を一直線上に配置して、偏光子の透過軸を方位角0°に固定し、検光子の透過軸の方位をθとした場合の、透過光の強度変化を実線で示す。この強度変化を、右縦軸の目盛りに従って対数で示したものを、破線で表してある。

[図25]種々の消光率の偏光子によるマリュスの法則を観測強度Iの消光位置付近の方位角変化で示したものである。

[図26]複屈折を利用する位相子の位相角は原理的に入射角依存性を示すが、そうした場合、許容角度範囲が必要な精度に依存して限定される様子を説明するものである。

[図27]位相子の位相角と入射角との関係を平均屈折率1.5、1.4、1.0について計算した例を示す。

[図28]所定の精度で完全円偏光を生成するのに、偏光素子に対する光線の入射角または出射角を所定の許容角度範囲に収める必要があること、そして、許容角度を示す円内に内接する正多角形を要素とすると、それが満足できることを示す。

[図29]面発光光源に円偏光子を張り合わせることでコンパクトに構成されている照明区画の一例を示す。

[図30]光源装置の照明区画内に照明角度原点基準を有するものを構成した場

合の一例を示す。

[図31]光源装置において、測定対象物体に正対する正多角形を照明区画と成す照明領域の構成例を示すものである。

[図32]光源装置において、測定対象物体に正対する正八面体を照明区画と成す照明領域の構成にファイバー光源を組合せた形態の構成の一例を示すものである。

[図33]本発明の円偏光照明装置の具体例の一つを示す。

[図34]本発明の円偏光照明装置の具体例の別の一つを示す。

[図35]本発明に従っての内面形状観察の場合の具体例の一つを示す。

[図36]本発明に従っての内面形状観察の場合の別の具体例の一つを示す。

[図37]一端を封じられた内面形状観察の場合の、本発明に従っての具体例の一つを示す。

[図38]一端を封じられた内面形状観察の場合の、本発明に従っての他の具体例の一つを示す。

[図39]回転放物面を成す試料の内面形状を例に、内面形状観察の場合の、本発明に従っての他の具体例の一つを示す。

[図40]回転楕円面を成す試料の内面形状を例に、内面形状観察の場合の、本発明に従っての他の具体例の一つを示す。

発明を実施するための形態

[0023] 本発明は、形状・傾斜検知及び／又は形状・傾斜計測、特には、三次元形状計測の可能な光学装置及び三次元情報を包含する物体情報の抽出法に関する。特に、本発明は、形状計測顕微鏡、バイオ顕微鏡、形状計測望遠鏡、医療診断装置、マンモグラフィー装置、傾斜センサーなどに好適である観察試料の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置及び物体情報の抽出法に関する。

本発明では、電場及び磁場が特定の方向にしか振動していない光である偏光が物質表面で反射されたとき、光の電気ベクトルのp成分（電気ベクトルが入射面に対して平行な方向の成分）とs成分（電気ベクトルが入射面に対して

垂直な方向の成分）とで振幅と位相の変化が異なることより、反射光では偏光状態が変化すること、そして(1)当該「偏光状態変化の基準は入射面方位」にあって、この偏光状態の変化は、(2)「入射角に対して単調な関数」であることを利用すれば、反射光の偏光状態を計測して、計測値から入射面の方位と入射角を算出できて、試料である物質表面であって且つ入射光を反射している微斜面、すなわち、接平面の傾斜を決定することができ、そして当該観測物質の表面は、観測視野内で連続であるとすることも利用することにより、決定された微斜面の傾斜を滑らかに接続することで、三次元形状を再現するなどの形状を検知及び／又は計測するという技術を提供している。

本発明では、制御された既知の偏り（例えば右円偏光）を有する偏光を、滑らかな表面（界面）を持つ試料物質（例えば透明な球形細胞）に周辺から一様に照射し、そして、この試料を空間的に固定された観測方位から偏光像として観測することを通して、試料の形状・傾斜検知及び／又は形状・傾斜計測を可能としている技術を提供している。

[0024] 本発明の一つの態様では、観測方位に反射される光線は、それぞれ、試料の表面（界面）を形成する微斜面（接平面）で鏡面反射された微斜面成分から成っており、この微斜面成分は、微斜面での反射の法則を満たす反射の結果として生じており、円偏光入射では、透明体の表面で反射される光は楕円偏光となり、楕円の長軸は常に微斜面（接平面）に平行となり、また、楕円偏光における楕円の楕円率角は入射角と単純な線形関係にあるので、従って、偏光状態（楕円の長軸の方位と差円率）を計測することで、長軸方位から入射面（接平面の法線）の方位角を、楕円率から反射角（反射の法則により入射角に等しい）を決定できることとなり、結局、観測方向に対する反射微斜面の傾斜角を計測できることになる。また、このデータを用いて、球形細胞の表面が観測視野内で連続であることから、決定された微斜面の傾斜を滑らかに接続することで、3次元形状が再現できるのである。

かくして、本発明は、偏光の反射特性を利用して光軸方向の座標も含めて、試料の三次元形状を決定できる技術である。

[0025] 本発明は、偏光の観測物体表面の反射で起こる偏光状態の変化が入射角に依存性すること、観測物体表面の反射点での接平面の法線について、観測方向である軸と成す角度と、観測方向である軸に垂直な平面への射影成分の偏角を計測し、該計測された法線の傾きから、物体の反射点での偏微分係数を求め、当該偏微分係数の時間変化や空間変化の計測値を利用して、形状の特徴及び／又は傾斜の特徴を抽出するという技術を提供している。また、本発明は、観測面全体の領域で、計測された偏微分係数を積分することで、三次元形状の構築を行う技術を与える。さらに、本発明では、幾何学的な形状は観測波長に依存しないことに着目し、反射面の物理光学的な特性を抽出して検知及び／又は計測する技術をも提供する。

本発明では、光に対する全ての物質で共通な性質、すなわち、(a)複素振幅反射率比ρは、入射角ϕ＝0ラジアン＝0°で－1であり、ϕ＝π/2ラジアン＝90°で1であること並びに(b)入射角ϕが0からπ/2まで変化すると、複素平面上で複素量ρは－1から1まで単調に変化し、途中でρの実数部が0の虚軸（Δ＝±π/2）を必ず通過することという二つの性質に、特定の構成、すなわち、試料周辺から円偏光で一様に照明し、鏡面反射光の偏光状態を空間的に固定された方向から観測する構成を組み合わせることによって、試料断面座標上の所定の反射点で観測された反射楕円偏光の形状から、該反射点の入射面の傾きと入射角（＝反射角）を計測する、そして、さらに、計測された反射点の反射面を試料断面内の計測点間で順次滑らかに接続することで試料の形状を再構築するなどといった簡便で汎用な形状・傾斜検知及び／又は形状・傾斜計測と解析手法を提供するものである。

本発明は、上記技術を実現する形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置及び物体情報の抽出法を提供するものである。

[0026] （本発明の原理）

本発明で利用する偏光計測は、従来技術の精密偏光解析法であるエリプソメトリーに関連する。エリプソメトリーは、物体表面で反射する光（一般には電磁波）の基本的な特性である「偏り」の性質を利用して、薄膜試料の屈

折率と膜厚を精密計測する方法、あるいは、試料表面の光学的性質を精密計測する方法など、試料の光学的性質を計測する方法として古くから知られている。

一方、本発明の物体表面傾斜角の計測原理は、エリプソメトリーを、従来は全く用いられたことのない幾何学的な形状の精密計測に適用し、“傾斜エリプソメトリー”という新しい概念を提供する。

図１に示すように、試料の形状計測を目的として、特定の偏光状態（例えば右円偏光）の完全偏光を、滑らかな表面または界面を持つ試料物体（例えば透明な球形細胞）に周辺から一様に照射する。この試料を空間的に固定された観測方位から偏光像として観測する。観測方位をｚ方向とすると、ｚ方向に反射される光線は、それぞれ、試料の表面（界面）を形成する微斜面（接平面）で鏡面反射された微斜面成分から成る。この「微斜面成分」は、「微斜面での反射の法則を満たす反射の結果」として生じている。ここで、実際の物質表面での反射では、光の波長に対して無視できない大きさの表面粗さを含む場合は、反射光は一般に部分偏光となる。しかし、全ての部分偏光は、完全偏光成分と非偏光成分との和で記述され、エリプソメトリーでは、既知の完全偏光を入射して、反射される完全偏光成分の偏光状態を計測対象とする。非偏光成分は、必要に応じて偏光度として計測する。

ここでは、先ず、標準的なエリプソメトリーで扱う完全偏光の場合を考える。

微斜面の反射は、観測方向が固定されているために、接平面の法線の傾きで定義できる。

例えば、観測方向であるz軸と成す角ϕ_1と、z軸を回転軸としたx軸からの回転角θ_1で記述できる。θ_1は接平面の法線のx-y平面への射影成分の偏角に等しい。

図１に例示する球状の試料では、偏角0°のx-y平面内での反射を例に取ると、入射光線がそれぞれの反射点に太線で示されるように入射した場合に反射の法則を満たし、反射光線はz軸と平行になる。図１から明らかなように、

接平面の法線の傾きϕ_1とθ_1が、それぞれ、光線の入射角と入射面の偏角に等しい。

物質表面での光の反射では、一般に光の振幅と位相が変化するために、複素振幅反射率で反射特性が記述できる。光の偏りを考慮すると、複素振幅反射率は、入射面（入射光線と反射面の法線を含む面で定義される）内の偏りの成分である p 成分と、入射面に垂直（表面に平行）な s 成分とで異なった値をとる。入射する光の

[0027] [数1]

$$\text{p 成分の複素振幅反射率を } r_p$$
$$\text{s 成分の複素振幅反射率を } r_s$$

[0028] と書くと、偏りを持つ光である偏光が物質表面で反射されたとき、光の電気ベクトルのp成分とs成分とで振幅と位相の変化が異なるために、反射光では偏光状態が変化して、一般に楕円偏光となる。

楕円偏光は、二つの実変数で記述できる。楕円の主軸方位角と楕円率をとれば、「主軸方位角変化の基準はp-方向であり、接平面の法線を含む入射面方位に一致」する。また、楕円率の変化は、「入射角に対して単調な関数」である。本発明の傾斜エリプソメトリーでは、この２つの性質を利用して、反射完全偏光成分の偏光楕円を計測して、楕円の主軸方位角計測値から入射面の方位を決定するステップ１と、楕円の楕円率の計測値から入射角依存性の理論値を利用して算出するステップ２から、光の反射点における微斜面の傾斜を決定する。

即ち、本発明では、試料の形状・傾斜検知及び／又は形状・傾斜計測を目的として、制御された既知の偏り（例えば右円偏光）を有する完全偏光を、滑らかな表面（界面）を持つ試料物質（例えば透明な球形細胞）に周辺から一様に照射する。この試料を空間的に固定された観測方位から偏光像として観測する。

[0029] この構成では、図１に例示するように、観測方位に反射される光線は、それぞれ、試料の表面（界面）を形成する微斜面（接平面）で鏡面反射された

微斜面成分から成る。この微斜面成分は、微斜面での反射の法則を満たす反射の結果として生じている。

円偏光照明の場合を具体的に考察してみる。以下の記述では、特に断らない限り、偏光は偏光楕円の形がただ一つに決まった完全偏光である。具体的に円偏光を入射する条件で、透明体の表面で反射される光の偏光楕円を計算すると、図２に示すような楕円偏光群となる。図２の中央の「左」は左円偏光を、周辺の「右」は右円偏光が反射されることを示す。ϕ=0°の垂直入射では、反射によって光の進行方向が逆転するために偏光の回転方向が逆転し、入射された右回り円偏光は左回り円偏光として反射される。また、ϕ=90°のすれすれ入射では、物理現象の連続性から、入射光の偏光状態は変化せずにそのままの偏光状態で反射される。これらは、入射角ϕに関する境界条件に対応していて、空間の幾何学的な性質に起因するので透明体でも吸収体でも成立し、試料物質によらない。

物理現象の連続性から、右または左円偏光を入射した場合は、入射角を変化することで、反射偏光状態は、全ての物質で左（右）円偏光から右（左）円偏光まで連続に変化し、中間で必ず直線偏光状態を経由する。したがって、楕円の楕円率角で表せば、－45°から＋45°まで単調増加する。つまり、円偏光入射では、入射角変化の変域は偏光状態の変域と一致していて、最大の感度が保証されている。なお、負の楕円率角は左回り、正は右回りの偏光を示す。

[0030] 図２の偏光楕円群は、透明体では、後述する振幅反射係数が実数であるために、楕円の長軸は常に微斜面（接平面）に平行になり、楕円率角が入射角で変化することを模式的に示している。従って、偏光状態（楕円の長軸の方位と楕円率）を計測することで、長軸方位から入射面（接平面の法線）の方位角を、楕円率から反射角（反射の法則により入射角に等しい）を決定できる。このようにして、観測方向に対する反射微斜面の傾斜角を精密計測できる。

なお、以下の本明細書の記載において、適宜、反射による偏光状態の変化

について、透明な球形細胞と吸収のある金属光沢球の場合の計算例を示す。試料に吸収がある場合にも、図１の反射の法則が成立する。しかし、偏光状態の入射角依存性は、試料に吸収がある場合は、図２から変化し、例えば、Alが表面を覆っている球では、図３のように楕円の方位角が45°回転する。この回転は、全ての反射で系統的に所定の量だけ発生する。従って、微斜面の傾斜角を算出する際にz軸の周りに一定偏角のオフセットを生じる。反射面の素材によって偏光状態が変化する様子を知るには、エリプソメトリーの解析理論が適用できる。また、このデータを用いて、球形試料に限らず、一般形状の試料の表面が観測視野内で連続であることから、決定された微斜面の傾斜を滑らかに接続することで、3次元形状が再現できる。

[0031] 本発明で説明する面傾斜の計測原理は、全ての波長の電磁波で成立する。また、使用する光は、紫外、可視、赤外光からマイクロ波領域などを含めて、白色光であっても良いし、レーザーなどの単色光であってもよい。さらに、物体表面は鏡面反射が起こる程度に滑らかであると考えるが、反射光が検出器で検出できる程度の反射率があれば良く、人体などでは、赤外からマイクロ波領域の光でも良い。すなわち、物体表面の粗さに比べて長い波長を用いることで、表面からの散乱成分が生じない条件で計測することで、反射光を完全偏光として、形状計測精度を向上することができる。

[0032] 物体を右手系座標(x,y,z)の原点に置き、反射光の観測方向をzとする。観測は、物体の大きさに比べて十分遠方で行われるから、観測点は実質的にz=∞と考えてよい。観測は、十分遠方に位置するx-y平面上で行われ、所定の倍率（例えば、既知の倍率）の結像関係が維持されるとする。反射光線はz軸に平行であり、反射光線のx-y平面内の座標から、反射点のx-y平面への射影成分(x_1, y_1)は既知である。

物体の滑らかな表面を計測するには、反射点での物体の深さ方向のz軸成分の座標z_1を決定すればよい。通常の顕微鏡観察では、座標z_1は決定できない。本発明の傾斜エリプソメトリーでは、偏光の反射特性を利用して反射点(x_1, y_1, z_1)の接平面の傾斜として、z_1での偏微分係数を決定できる。

一般に、顕微観測などの結像系では、倍率や観測方向を選ぶことで物質表面が十分滑らかな状態で観測できるから、接平面を成す微斜面を滑らかに接続する積分操作で、z_1を順次決定することができる。

[0033] 本発明の傾斜エリプソメトリーの計測データは、傾斜およびその時間変化の精密データとしてさまざまに利用することができる。更に、傾斜データから試料の3次元形状を再構築したい場合には、その再構築アルゴリズムには、ロボティクス分野での透明体形状の３次元計測のアルゴリズムが応用可能である。非偏光照明下での透明物体の反射の偏光度の計測を利用する研究開発（D. Miyazaki, M. Saito, Y. Sato, K. Ikeuchi, "Determining surface orientations of transparent objects based on polarization degrees in visible and infrared wavelengths," J. Opt. Soc. Am. A, 19(4), pp.687-694, 2002; D. Miyazaki, R.T. Tan, K. Hara, K. Ikeuchi, "Polarizationbased Inverse Rendering from a Single View," Proc. IEEE Intl. Conf. Computer Vision, 2003. pp. 982-987, 2003; Daisuke Miyazaki, Katsushi Ikeuchi, "Inverse Polarization Raytracing: Estimating Surface Shape of Transparent Objects," in Proceedings of International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Diego, CA USA, 2005.06; 宮崎大輔, 池内克史, "偏光レイトレーシング法による透明物体の表面形状の推定手法," 電子情報通信学会論文誌D-II, Vol. J88-D-II, No.8, pp. 1432-1439, 2005.08）、特に、透明物体の表面の法線から物体形状を再構築するためのアルゴリズムについての研究が利用できる。

なお、接続を開始する座標は任意で、例えば観測画面中心から出発して、周辺へ接続を広げればよい。つまり、画面中のz座標は、相対値が決定できれば形を決定できる。

[0034] 球状の試料の観測面は円となり、円内部の観測点の光の偏光状態は、図２に模式的に示すようになり、楕円の主軸方位が入射面に直交する。また、楕円率εは入射角の関数として、ϕ=90°のすれすれ反射でのε=1の右円偏光（入射偏光と同一）から、ϕ=0°の垂直入射で反射されるε=－1の左円偏光ま

で連続的に変化する。

ϕ=56° 付近の屈折率n=1.5の媒質の偏光角（Brewster 角 $\phi_B=\tan^{-1}n$）では、ε=0の直線偏光を経由する。図２の中心部で、入射角がϕ_Bより小さい領域（直線偏光の内側）では（図２の試料輪郭線の円の内側に円形に影をつけて示す）、左回り偏光群が観察され、図２に示される影の外側の試料周辺部では、右回りの偏光群が観察されて、楕円率ε_1から入射角ϕ_1が、楕円の方位角から入射面の偏角θ_1が計測できる。

[0035] 図２は、試料が球の場合を例示している。試料が他の一般形状の場合は、容易に類推出来るように、図２に示す観測楕円の二次元分布が変化する。しかし、その場合でも、観測される楕円の形状と、その反射点の微斜面の傾斜は1:1の対応があり、試料表面が滑らかなことから、観測される楕円偏光の変化も連続であり、一般性は失われない。

[0036] 試料に吸収がある場合にも、図１の反射の法則が成立する。

しかし、偏光状態の入射角依存性は、試料に吸収がある場合は、図２から変化し、例えば、Alが表面を覆っている球では、図３のように楕円の方位角が45° 回転する。この回転は、全ての反射で系統的に所定の量だけ発生する。従って、微斜面の傾斜角を算出する際にz軸の周りに一定偏角のオフセットを生じる。反射面の素材によって偏光状態が変化する様子を知るには、エリプソメトリーの解析理論が適用できる。よって、表面形状は同じ手法で再構築できる。

反射による偏光状態の変化は、物質の複素屈折率によって次のように定式化できる。

観測される反射偏光状態は、試料の反射点での複素振幅反射率のp-s成分の比

[0037] [数2]

$$\frac{r_p}{r_s} \equiv \rho = \tan\psi \cdot \exp(i\Delta)$$

[0038] で記述できる〔山本正樹、「偏光測定と偏光解析法」、小瀬輝次 他編、「光工学ハンドブック」、朝倉書店、1986、pp. 411-427(非特許文献２)参照〕。

複素変数ρは、エリプソメトリー法（エリプソメトリー）のパラメーターであり〔山本正樹、「偏光測定と偏光解析法」、小瀬輝次 他編、「光工学ハンドブック」、朝倉書店、1986、pp. 411-427(非特許文献２)、特にはその(2.5.38)式を参照、非特許文献２では複素振幅反射率比ρとして記載されている〕、実際に計測される実変数Ψ・Δは複素変数ρの極座標表示に相当する。

光の偏光状態を、光の電気ベクトルの水平成分Exと垂直成分Eyを成分とするジョーンズベクトル

[0039] [数3]

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}$$

[0040] で表現し、ジョーンズ計算を用いると、偏光状態の変化は次のように記述できる。

右回りの円偏光

[0041] [数4]

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} -i \\ 1 \end{bmatrix}$$

[0042] が、法線の傾きϕ_1とθ_1の接平面に入射して、試料表面で鏡面反射する。試料の反射で、入射角$\phi = \phi_1$の時の

[0043] [数5]

$$\text{p成分の複素振幅反射率を } r_p\big|_{\phi=\phi_1}$$

$$\text{s成分の複素振幅反射率を } r_s\big|_{\phi=\phi_1}$$

[0044] と書くと、反射された光

[0045] [数6]

$$\begin{bmatrix} E_{ox} \\ E_{oy} \end{bmatrix}$$

[0046] は、強度の基準化の係数

[0047]

[数7]

$$\frac{1}{\sqrt{2}}$$

[0048] を無視すると、

[0049] [数8]

$$\begin{bmatrix} E_{ox} \\ E_{oy} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{\theta_1} \mathbf{R}_{\phi_1} \mathbf{T}_{-\theta_1} \begin{bmatrix} -i \\ 1 \end{bmatrix}$$

[0050] で表わされる。ここで

[0051] [数9]

$$\mathbf{T}_{\theta} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

[0052] は、座標系の回転に伴う角度θの旋光子行列、

[0053] [数10]

$$\mathbf{R}_{\phi_1} = r_s\big|_{\phi=\phi_1} \cdot \begin{bmatrix} \rho_1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0054] は、入射面が水平な鉛直試料面での入射角ϕ_1における偏光の反射を表すジョーンズ行列である。ここで、エリプソメトリー法のパラメーター〔上記非特許文献２の(2.5.38)式参照〕は

[0055] [数11]

$$\rho_1 \equiv \frac{r_p}{r_s}\bigg|_{\phi=\phi_1} = \tan\psi_1 \cdot \exp(i\Delta_1)$$

[0056] と書ける。円偏光は、

[0057] [数12]

$$\mathbf{T}_{-\theta}$$

[0058] で変化しないから、

[0059] [数13]

$$\begin{bmatrix} E_{ox} \\ E_{oy} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{-\theta_1} \begin{bmatrix} -i\rho_1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

[0060] となる。

試料が透明な場合、ρ_1は

[0061] [数14]

$$\rho_1 = \pm \tan \psi_1$$

[0062] で実数であり、楕円の傾きはθ_1に一致するので、ステップ１は単純な直読となる。また、ステップ２では、楕円率がρ_1に一致し、試料の屈折率を用いた後述のフレネル振幅反射係数の比の理論計算値から入射角を決定できる。

試料が金属である場合など、一般には、ρ_1は複素数である。ここで、理論計算の基準は入射面方向であるp-方向であることに注意して、エリプソメトリーの手法〔山本正樹、「偏光測定と偏光解析法」、小瀬輝次 他編、「光工学ハンドブック」、朝倉書店、1986、p. 420（非特許文献２）参照、特にはそこに開示の(2.5.36)式参照〕を用いて、反射楕円偏光のp-方向を基準としたジョーンズベクトル成分の比

[0063] [数15]

$$\xi_o = \frac{E_{oy}}{E_{ox}} = \frac{i}{\rho_1} = \frac{i}{\tan \psi_1 \cdot \exp(i\Delta_1)}$$

[0064] を、試料の複素屈折率を用いて後述のフレネル振幅反射係数の比の理論式に従ってΨ_1, Δ_1を算出し、さらに観測されるべき偏光楕円の主軸の方位角と楕円率の理論値を算出する。これらは共に入射角に関して単調な関数である。

なお、楕円の楕円率角と主軸の方位角はΨ_1, Δ_1と簡単な関係で結ばれているので、相互の変換は容易である。

かくして、試料に吸収がある場合は、まずステップ２によって、実測楕円率と一致する理論楕円率を与える入射角をユニークに決定できる。しかる後に、その入射角での偏光楕円の主軸の方位角の理論値から、ステップ１の入射面の方位角を決定する。　計測の精度は、完全偏光の偏光状態を計測の対象とする通常のエリプソメトリー技術では、Ψ, Δで0.01°から0.001°である。計測されたΨ_1, Δ_1は、共に試料への入射角ϕ_1の関数であり、入射角の計測精度も次に示すように、同等の0.01°から0.001°が達成できる。

[0065] 実際、エリプソメトリーでは、試料のΨ, Δを直接に計測する方法と同等に

、Δ＝±π／２となることで定義される主入射角Φ_Pと、主入射角でのψとして定義される主方位角ψ_Pを計測する主入射角法（K. Kinosita and M. Yamamoto, Principal Angle of Incidence Ellipsometry, Surface Sci., 56, 64-75(1976)：山本正樹、シリコン表面の光学定数の偏光解析法による測定について、応用物理, 50, 777-781(1981)）が知られており、主入射角が0.01°から0.001°の精度で決定できる（M. Yamamoto and O. S. Heavens, A Vacuum Automatic Ellipsometer for Principal Angle of Incidence Measurement, Surface Sci., 96, 202-216(1980)）。これらの入射角計測感度は、試料面の傾斜角に換算すると、それぞれ、1/6000から1/60000であり、幅6mmの両端での高さの差で1μmと0.1μm分の凹凸傾斜変化に感度があることに相当する。

次に、複素振幅反射率比の計算について説明する。

反射偏光の入射角依存性は、複素振幅反射率比ρを試料の光学的な性質を表す適当な光学モデルで計算して知ることができる。バルクの試料では、単純なフレネル振幅反射係数の比で記述できて、透明体でも吸収体でも共通の式で

[0066] [数16]

$$\tan\psi_1 \cdot \exp(i\Delta_1) = -\frac{\cos(\phi_1 + \phi_1')}{\cos(\phi_1 - \phi_1')}$$

[0067] と書ける。但し、

[0068] [数17]

$$\phi'$$

[0069] は複素屈折角であり、スネルの法則

[0070] [数18]

$$n_a \sin\phi = \tilde{n} \sin\phi'$$

[0071] で結ばれ、バルク物質の複素屈折率

[0072] [数19]

$$\tilde{n} = n - ik$$

[0073] の関数である。また、

[0074] [数20]

$$n_a$$

[0075] は媒質の屈折率で、可視光領域では、空気では1に等しく、水では1.33程度である。

一般に、媒質は透明で屈折率は実数であり、入射角も実数だから、スネルの法則の左辺は実数である。従って、右辺も実数となる必要があり、吸収のある物質では、屈折角も複素数となる。

[0076] [数21]

$$\tan\psi_1 \cdot \exp(i\Delta_1) = -\frac{\cos(\phi_1 + \phi_1')}{\cos(\phi_1 - \phi_1')}$$

[0077] の関数は、以下の計算例に示すように、入射角に対して単純な関数であり、物質ごとに容易にキャリブレーションできる。

図４では、透明な試料に対する変化を説明するために、屈折率n=1.5のガラスが空気中にある場合の計算例を示している。透明な物質では消衰係数k=0だから、ρの虚数部は常に0である。実数部は、入射角φが0°から90°まで増加すると、図示のように－1から1まで単調に変化する。

右円偏光で照明すると、偏光状態は、左円偏光から右円偏光まで変化する。途中の偏光角では直線偏光を通過する。したがって、楕円の楕円率角で表せば、－45°から＋45°まで単調増加する。なお、負の楕円率角は左回り、正は右回りの偏光を示す。

図５は、図４で示した試料でのp-s偏光成分の強度反射率の入射角依存性を示す。

図６には、吸収体の試料での入射角依存性の例として、波長405nmでのAl試料でのρの入射角依存性を複素平面表示で示す。吸収があるために複素屈折率

[0078] [数22]

$$\tilde{n} = n - ik$$

[0079] は0.6－5.04iである。

入射角φが0°から90°まで増加すると、図示のように、－1から1まで単調に変化する点は透明体と同様である。しかし、Alの吸収のために虚数部がゼロとならず、途中の変化は大きく異なる。Alの場合には、むしろ、半径1の円に沿った変化で、図７に示すように、Ψ・Δが特徴的な振る舞いをする。また、図８に示す強度反射率の変化から想定されるように、p-偏光もs-偏光も反射率が高く、Ψはほぼ40°から45°の間で一定である。s-偏光反射率がp-偏光反射率よりも高いという物質の共通な性質により、Ψの最大値は45°であると考えてよい。

従って、吸収の大きい金属体などでは、図７に示すように、Δに180°（図６の複素平面上で－1に相当する）から0°（図６の複素平面上で＋1に相当する）までの大きな変化が起こる。右円偏光で照明すると、偏光状態は、図７中の枠内に示すように左円偏光から右円偏光まで変化する点、途中のΔ＝±90°（図６の実軸上）の主入射角ではでは直線偏光を通過する点は、透明体の場合と全く同様である。但し、観測される全ての偏光は、入射面からΨに等しい方位角だけ傾く。図７の例ではΨは常にほぼ45°傾くことになり、途中の楕円も、直線偏光も、図３に示すように一様に45°傾く（円は傾いても円）。

[0080] [数23]

$$\tan\psi_1 \cdot \exp(i\Delta_1) = -\frac{\cos(\phi_1 + \phi_1')}{\cos(\phi_1 - \phi_1')}$$

[数24]

$$n_a \sin\phi = \tilde{n} \sin\phi'$$

[0081] は、試料物質の表面がバルクと見なせる場合の記述である。

本発明の方法は、試料表面がバルクと異なる場合、例えば、表面が酸化膜や細胞膜などに覆われている場合にも有効である。この場合、反射面を光学的にモデル化して複素変数ρを計算し、観測された偏光状態の変化と対応付けを行えばよい。この解析計算部分には、従来技術のエリプソメトリーで行われている方法論がそのまま使用できる。つまり、光が反射して、完全偏光

成分の偏光状態の変化が観測できる限り、観測値をどの様に利用し、どのような情報を抽出するかについては、エリプソメトリー技術の手法を導入すればよい。

エリプソメトリー技術については、例えば、H. G. Tompkins and W. A. McGahan, Spectroscopic Ellipsometry and Reflectometry: A User's Guide, John Wiley & Sons, New York, 1999; H. G. Tompkins, A User's Guide to Elllipsometry, Academic Press, San Diego, 1993; R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, Ellipsometry and Polarized Light, North Holland Press, Amsterdam, 1977, Second Edition, 1987; R. M. A. Azzam, Selected Papers on Ellipsometry, SPIE Milestone Series MS27, 1991; Spectroscopic Ellipsometry, A. C. Boccara, C. Pickering, J. Rivory, eds, Elsevier Publishing, Amsterdam, 1993; 藤原裕之著、分光エリプソメトリー、丸善株式会社、2003 (ISBN 978-4-621-07253-0)などを参照することができ、そこに引用されている文献とともにその内容は本明細書に開示に含められる。

[0082] このようにして、ただ一度の反射で起こる偏光状態の変化の入射角依存性から、観測物体表面の反射点(x_1, y_1, z_1)での接平面の法線について、観測方向であるz軸と成す角ϕ_1と、x-y平面への射影成分の偏角θ_1が直接に精密計測できる。計測された法線の傾きは、物体の反射点(x_1, y_1, z_1)での偏微分係数を与える。本発明の傾斜エリプソメトリーによれば、この偏微分係数の時間変化や空間変化の計測値を直接利用して、形状の特徴及び／又は傾斜の特徴を抽出できる。また、容易にわかるように、三次元形状の構築は、観測面全体の領域で、計測された偏微分係数を積分することで得られる。さらに、幾何学的な形状は観測波長に依存しないことに着目すると、反射面の物理光学的な特性を抽出して計測できる。ロボティクス応用で実施されている当該分野で知られた工夫（例えば、D. Miyazaki, M. Saito, Y. Sato, K. Ikeuchi, "Determining surface orientations of transparent objects based on polarization degrees in visible and infrared wavelengths," J. Opt. Soc. Am. A, 19(4), pp.687-694, 2002）を適用することも可能である。

上記では、物体表面で反射されて特定の方位角に射出された光線群の完全偏光成分の偏光楕円の観測方位角値から入射面の方位を知るステップ１としては、偏光楕円の観測方位角理論値から入射面の方位を知ることができるものを説明してきたが、例えば、下記で説明するように、照明装置として右円偏光と左円偏光とをそれぞれ切り替えて入射させることのできるものなどを使用し、すなわち、物体の周辺を囲んで実質的に既知の完全偏光状態の光を一様に入射させる照明装置において、右円偏光と左円偏光を切り替えて入射せしめることで、反射偏光楕円の観測方位角理論値が物体の表面の反射光学特性に無関係に入射面に対称に切り替わることを利用して入射面方位を特定するものであってもよい。

本発明を、表面が酸化膜や細胞膜などに覆われている試料に適用したばあい、例えば、膜の厚さの変化や表面に付着している汚れなどを容易に検知できる。従って、製造ラインでの不良品形状・汚れ監視装置などへの応用が考えられる。

[0083] 本発明では、物体の表面の反射光学特性を用いて観察物体の表面形状・傾斜を検知及び／又は計測する形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置が提供されるが、該形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置では、該物体の周辺を囲んで実質的に既知の偏光状態の光（例えば、完全偏光状態の光）を一様に入射させる照明装置と、該物体表面で正反射し特定の方位角に射出された光線群の偏光状態（例えば、光線群の完全偏光成分の偏光楕円）を検知する偏光画像検出装置を備え、反射射出された光線ごとに、その入射点を成す該物体の反射面について、偏光楕円の観測方位角値から入射面の方位を知るステップ１（例えば、偏光楕円の観測方位角理論値から入射面の方位を知るステップ１）と、偏光楕円の楕円率理論値から入射角度を知るステップ２によって反射面の射出光線に対する傾斜角を測定するし、より具体的には、反射射出された光線ごとに、その入射点を成す該物体の反射面について、偏光楕円の方位角から入射面の方位を知り、偏光楕円の楕円率から入射角度を知ることによって反射面の射出光線に対する傾斜角を測定する。上記偏光楕円の観

測方位角理論値から入射面の方位を知るステップ１に代えて、該物体の周辺を囲んで実質的に既知の完全偏光状態の光を一様に入射させる照明装置において、右円偏光と左円偏光を切り替えて入射せしめることで、反射偏光楕円の観測方位角理論値が物体の表面の反射光学特性に無関係に入射面に対称に切り替わることを利用して入射面方位を特定するものであってよい。　本発明の装置は、望遠鏡やカメラなどを含めて、縮小光学系のものであっても良いし、顕微計測などの拡大光学系のものとしても構成できる。

[0084]　本発明の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置では、該物体表面で反射し特定の方位角に射出された光線群の偏光状態を検知する偏光画像検出装置は、例えば、物体の縮小投影像あるいは物体の拡大投影像を得ることで物体表面の光線位置を特定する機構を有するもの、さらには、コリメーター及び／又はピンホールを備えることで物体表面の光線位置を特定する機構を有するものであることができる。また、該物体表面で反射し特定の方位角に射出された光線群の偏光状態を検知する偏光画像検出装置は、該装置を実質的に無限遠方に配置することで物体表面の光線位置を特定する機構を有するものであってよい。

光源は、左または右円偏光パネル、左右円偏光切り替えパネル、偏光フィルムを備えた発光ダイオード利用パネルなどが包含され、さらに、当該分野で光学顕微鏡、共焦点顕微鏡、蛍光顕微鏡、偏光顕微鏡などのための光源として知られたものの中から適宜適切なものを選択して使用でき、所望の目的を達成できる限り特に制限はないが、例えば、白色光源、コヒレント光を出すレーザー光源などが挙げられる。代表的な光源としては、ハロゲンランプ、キセノンランプ、重水素ランプ、グローバーランプ、ヘリウムネオン(He-Ne)レーザー、YAGレーザー、発光ダイオード(LED)、半導体レーザー、高圧水銀ランプ、メタルハライドランプ、高圧ナトリウムランプなどのHIDランプ(high intensity discharge lamps)などが挙げられる。光源は、408nm紫レーザダイオードなどの短波長レーザ光源と白色光源とを用いた2way光源方式など、入射光線を既知とする、入射面方位角と入射角の基準原点を包含する複数

の光源を備えているものであってもよいし、あるいは単独の光源を備えるものであってもよい。光源としては、上記した発光源よりの光を1/4波長板と直線偏光子板を透過せしめるように構成したもの、あるいは、直線偏光子フィルムに1/4波長フィルムを貼りあわせたものを、例えば、観察物体を囲むようにしたものを通して、上記した発光源よりの光を照射できるようにしたもののなどが包含されてよい。

[0085] 光源より出た光は、適宜、光ファイバーで入射光光学系に導入することもできる。該入射光光学系では、適宜、光強度スタビライザ、光濃度フィルタなどが備えられていることもできる。実質的に既知の偏光状態の光としては、光源より出た光を、入射光光学系に配置した偏光子を通すことで得られたものでよい。また、波長板を使用して、直線偏光を円偏光に、及び／又は、円偏光を直線偏光に変換したり、直線偏光の偏光軸を回転させるなどしてもよい。試料に対する入射光線、すなわち照明は、試料周辺から一様となるように照射せしめる。入射光学系を構成する照明装置は、試料である物体の周辺を囲んで実質的に一様に偏光を入射できるようになっている。当該入射光学系は、コンピュータと連動する制御系でコントロールされていて試料である物体の周辺を囲んで実質的に一様に光を入射できるようになっていてよい。例えば、レーザ光源であって、入射光線を既知とする、入射面方位角と入射角の基準原点を構成する点光源の場合は、X-Yスキャン光学系としてコンピュータと連動する制御系でコントロールされて、例えば、観察視野内を適当数のピクセルに分割してスキャンを行うことができるものが包含されてよい。

[0086] 物体表面で反射された光線は、偏光画像検出装置、例えば、偏光イメージングカメラなどで偏光画像として検出できるが、例えば、検光子を備えた検出光学系に導入され、偏光状態が検出されるものであってもよい。検光子を備えた検出光学系で受けられた反射光は、光源の光学帯域に同調されているモノクロメーターを包含していてよい分光器を通した後に、光検出器に供給され、受光素子で検出されるものであってもよい。分光器は、受容した光の

スペクトル分析を可能とする。すなわち、検出波長を変化させながら、受容光の検出を行うことができる。また、光を所定の機器に導くには光ファイバーを利用することができる。光ファイバーを利用することで、装置の可動部品及び／又は可動装置を、互いに独立且つ自由に動くように構成することが可能となる利点を得られる。

当該光を受光素子などを備える光センサで電気信号に変換することができる。光センサとしては、例えば、フォトダイオード、ダイオードアレイ、電荷結合素子(charge coupled device, CCD)型撮像素子(image sensor)、CMOS型撮像素子なども包含されてよく、さらに、光電子増倍管(photomultiplier, PMT)などと組み合わされていてよい。

[0087] 上記照明装置における入射光光学系及び偏光画像検出装置における検出光学系には、適宜、波長板、補償子（コンペンセーター）、光弾性変調器などの変調器（モジュレーター）、光線を導くためのミラー、スリット、フィルターさらにはレンズ（例えば、集光レンズなど）、透明版、ポリクロメーターなどを備えることもできる。検光子は、偏光子を使用して構成できる。当該入射光光学系にモノクロメーターを配置することもできる。入射光光学系の偏光子及び／又は検出光学系の検光子は、駆動部により可動とされていてよい。検光子は下記コンピュータシステムの制御下にある駆動装置により、制御下に回転されて偏光状態を解析可能なようにしてあるものでもよい。前記波長板も、駆動部により可動とされていてよい。さらに、観測試料の載置台に回転機構を含めている駆動部を設けてあることもできるし、入射光光学系全体及び／又は検出光学系全体を駆動部により可動とされていることもできる。本発明は、走査をしない方式を好適に採用できる。

[0088] 画像の信号がアナログの場合には、適宜、必要に応じて、変換器により、デジタルに変換することもできる。信号はコンピュータシステムに送られて、演算手段に付されて入射面の方位と入射角を算出して、試料である物質表面であって且つ入射光を反射している観察対象物体の微斜面、すなわち、接平面の傾斜を決定し、三次元形状を含めた物体の形状を再現する。再現され

た形状は、コンピュータシステムを構成している表示装置及び／又は出力装置を使用して可視化及び／又は認識可能にされる。当該コンピュータシステムは、データ記憶装置及び演算装置を備えており、例えば、ハードディスク、CPUを有しており、さらに、CD、MO、DVDなどの書込み及び／又は読取り装置を有するものであってよい。

[0089] 観察試料の載置台の駆動部は、当該コンピュータシステムのステージコントローラーのエレクトロニック制御の下にx-y-z軸に互いに独立且つ自由に動くことが可能とされていてよい。オートステージを好適に使用することもできる。回転偏光子を使用している場合には、偏光子の連続した回転の設定を当該コンピュータシステムのエレクトロニック制御の下に行うことができるようにされており、一方、回転検光子を使用している場合には、検光子の回転の設定を当該コンピュータシステムのエレクトロニック制御の下に行うことができるようにされていてよい。波長板を備えており、それを動かす場合も、当該コンピュータシステムのエレクトロニック制御の下に行うことができるようにされていてよく、それが好ましい場合もある。上記駆動部は、ステッピングモーターがエレクトロニック制御されており、それにより動くもので、その位置情報などと共に動作のデータが、当該コンピュータシステムに収集されるようになっていてよい。同様に、コンピュータシステムの制御装置は、モノクロメーターに作用し、その同調波長を定めたり、光源に作用して光束などを制御するものであってよいし、それぞれの位置情報、波長、楕円偏光の形状の情報を含めた偏光の状態の情報、測定位置の情報などの収集データの記録を制御し、適宜、コンピュータシステムの演算装置(例えば、CPU)に供給するものも包含されてよい。

[0090] 本コンピュータシステムは、所定のデータ処理プログラムを備えて、任意の適切なプログラムに従って収集データを使用し、計測された画像を、再構成する。当該処理プログラムとしては、偏光状態の入射光の下での測定データと偏光状態ではない入射光の下での測定データとを比較して較正する機能を有するもの、データを特徴付けるに十分なデータが蓄積されるまでデータ

収集を行う機能、集積データから三次元形状を含めた形状を構築する機能、表示装置及び／又は出力装置に表示及び／又は出力する機能、光学理論に基づいた光学モデルで解析する機能などを果たすものが挙げられる。上記光学理論に基づいた光学モデルで解析する場合に、光学モデルにより得られたデータと実測データとを比較し、回帰解析アルゴリズムで解析するなどを包含するものであってよい。

[0091] これまでの説明では、入射光の偏光状態として、円偏光を用いた場合を説明してきたが、原理的には照明光は偏光状態が既知であれば良く、例えば楕円偏光や直線偏光を照明光として用いて構成することもできる。一般には、どのような波長域でも、直線偏光子が製作できる。また、最近報告されている軸対称偏光ビーム（軸対称偏光ビーム、小澤祐市、佐藤俊一、光学、35巻12号(2006), pp.9-18：非特許文献３）を照明光として用いることもできる。該軸対称偏光ビームは、フォトニック結晶光学素子を使用して容易に得ることができる。例えば、レーザー発生器の出力ミラーを同心円型フォトニック結晶偏光子にして、同心円状もしくは放射状の偏光ビームを得ることができる。フォトニック結晶を使用した場合、反射率を容易に調整できるので、レーザー発振に適した反射率とすることができるし、構成材料が無機材料であることから高い耐久性能も得られる。軸対称フォトニック結晶は、同心円状もしくは放射状の偏光ビームを発振させるレーザー共振器用ハーフミラーのほか、同心円状もしくは放射状に透過軸を持つ偏光子、直線偏光を同心円／放射状偏光に変換する1/2波長板集積素子などが包含されてよい。

本発明の技術では、エプソメトリーでもって、光学的な性質を決定することを同時に行う方法並びに装置も包含されて良い。例えば、本発明の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置における照明装置は、空間的に特定された入射光線を計測基準原点として含み、偏光画像検出装置によって特定した反射点における偏光楕円の観測値から、該反射面の光学的性質を特定できるものであることができる。このように構成すると、照明中で色を変えたり、穴を開けておいたりして、偏光画像中の１点でエプソメトリー計測することが

可能である。

[0092] 本発明の傾斜エリプソメトリーは、ロボティックス応用での非偏光照明での計測応用を包含する。本発明の傾斜エリプソメトリーの原理は、ストークスパラメーターとミュラー行列を用いて、部分偏光状態を含む形で説明できる。試料面での反射が、散乱過程を含む場合は、反射光は部分偏光となる。反射による偏光状態の変化はより一般化され、非偏光や部分偏光を記述できるストークスパラメーターとミューラー行列を用いる。

[0093] [数25]

$$\begin{bmatrix} E_{ox} \\ E_{oy} \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{\theta_1} \mathbf{R}_{\phi_1} \mathbf{T}_{-\theta_1} \begin{bmatrix} -i \\ 1 \end{bmatrix}$$

[0094] に相当する式は、ミューラー計算では強度を1に規格化した基準化ストークスパラメーターを使って、右円偏光入射の場合は、

[0095] [数26]

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{\theta_1} \mathbf{R}_{\phi_1} \mathbf{T}_{-\theta_1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

[0096] となる。ここで座標系の回転に伴う角度θの旋光子行列は

[0097] [数27]

$$\mathbf{T}_\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & -\sin 2\theta & 0 \\ 0 & \sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0098] であり、入射面が水平な鉛直試料面での入射角ϕ_1における偏光の反射を表すミュラー行列は

[0099] [数28]

$$\mathbf{R}_{\phi_1} = \begin{bmatrix} 1 & -\cos 2\psi_1 & 0 & 0 \\ -\cos 2\psi_1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin 2\psi_1 \cos \Delta_1 & \sin 2\psi_1 \sin \Delta_1 \\ 0 & 0 & -\sin 2\psi_1 \sin \Delta_1 & \sin 2\psi_1 \cos \Delta_1 \end{bmatrix}$$

[0100] である。これらを

[0101] [数29]

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{\theta_1}\mathbf{R}_{\phi_1}\mathbf{T}_{-\theta_1}\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

[0102] に代入して

[0103] [数30]

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{\theta_1}\begin{bmatrix} 1 \\ -\cos 2\psi_1 \\ \sin 2\psi_1 \sin\Delta_1 \\ \sin 2\psi_1 \cos\Delta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -\cos 2\theta_1 \cos 2\psi_1 - \sin 2\theta_1 \sin 2\psi_1 \sin\Delta_1 \\ -\sin 2\theta_1 \cos 2\psi_1 + \cos 2\theta_1 \sin 2\psi_1 \sin\Delta_1 \\ \sin 2\psi_1 \cos\Delta_1 \end{bmatrix}$$

[0104] となる。すなわち、入射面の傾きθ_1による変化は、ポアンカレ球上でS_3を回転軸としてS_1、S_2座標をθ_1回転するだけで、楕円率角の変化は伴わない。

非偏光を入射した場合は、入射ストークスパラメーターを非偏光に置きなおして、

[0105] [数31]

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{\theta_1}\mathbf{R}_{\phi_1}\mathbf{T}_{-\theta_1}\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -\cos 2\theta_1 \cos 2\psi_1 \\ -\sin 2\theta_1 \cos 2\psi_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0106] となる。非偏光入射では、反射の位相角の情報は失われるが、p-s成分の強度反射率の変化を示すΨ_1は計測できる。したがって、透明体試料ではΨ_1の入射角依存性から、入射角ϕ_1を決定できる。

ロボティックス分野での形状計測では、偏光度の入射角依存性を利用する。部分偏光の偏光度Vは完全偏光成分の部分偏光に対する割合として、

[0107] [数32]

$$V = \frac{\sqrt{S_1^{\,2} + S_2^{\,2} + S_3^{\,2}}}{S_0} = \left|\cos 2\psi_1\right|$$

[0108] で定義・計算される。偏光度は実数で、当然ながら本発明の偏光楕円の２変数の情報を計測に利用する方法と比べると、適用が限定的な計測法となる。

非偏光照明下の形状計測の適用範囲が透明物体に限定される理由は、この

Ψ_1の絶対値の入射角依存性を利用するという限定された計測条件にある。また、極小値を持つ遇関数であることから、同一の偏光度を与える入射角が２つ存在し、真の値を判別するアルゴリズムの工夫も必要となる（D. Miyazaki, M. Saito, Y. Sato, K. Ikeuchi, "Determining surface orientations of transparent objects based on polarization degrees in visible and infrared wavelengths," J. Opt. Soc. Am. A, 19(4), pp.687-694, 2002）。本発明ではΨ_1は符号付きで決定できるので、これらのアルゴリズムは不要である。

吸収が大きい場合は、図６および図７で示すように一般にΨ_1の入射角依存性が小さい。従って、このような試料物体では、ロボティックス応用の非偏光照明による形状計測は出来ない。本発明の方法が適用できず、非偏光照明を適用したい特殊な応用の場合には、物体が透明な波長の光を用いる。物体が透明な波長の光とは、複素屈折率n－ikの虚数部の消衰係数kが小さい場合で、例えば、対象物体がSiなどでは、赤外領域では透明である。非偏光照明での計測は、例えば、太陽光など、偏光させることができない光源によって計測する場合で、本発明の開示した理論体系によれば、検出する波長を物体が透明な波長に設定することで計測感度が向上できることが明らかである。上記したように、非偏光照明では、Δの情報が失われるので、Ψの情報だけで入射角依存性を計測する。直線検光子だけあれば計測が可能であるが、一般には、照明光が非偏光であることを確認するには位相子が必要となる。

ところで、軟X線領域では全ての物質が透明になる。軟X線領域でも、偏光子と位相子が開発されており、放射光光源やレーザー生成プラズマ軟X線光源などで、本発明の検知及び／又は計測を実施できる。このような場合、物質の反射率は極度に小さいので、すれすれ入射に近い領域を主として使うことが好ましい。

[0109] 別の態様では、本発明では、物体情報の抽出方法、すなわち、物体の表面の反射光学特性を用いて観察物体の表面形状・傾斜を検知及び／又は計測する光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法が提供される。該方法は、物体の

表面の反射光学特性を用いて観察物体の表面形状・傾斜を検知及び／又は計測する光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法であって、照明装置により、該物体の周辺を囲んで実質的に既知の偏光状態の光を一様に入射せしめ、該物体表面で反射し特定の方位角に射出された光線群の偏光状態を偏光画像検出装置で検知し、反射射出された光線ごとに、その入射点を成す該物体の反射面について、偏光楕円の方位角と楕円率から入射面の方位と入射角度を知ること（例えば、偏光楕円の方位角から入射面の方位を知り、偏光楕円の楕円率から入射角度を知ることを含む）によって反射面の射出光線に対する傾斜角を測定し、測定された傾斜角が該物体表面で滑らかに変化することを利用することを含む手法で物体情報を抽出することを特徴とする。個々の具体的手法は上記で説明したとおりである。該方法は、さらに、人体または乳房などの人体の一部分を検知及び／又は計測物体とし、悪性腫瘍などの各種の病変によって引き起こされる表面傾斜角の特異的変化を検知特定するものであってよい。また、該方法は、患者などの観察物体の姿勢変化などによって、所定の変形を与え、変形前後での傾斜角の変化を検知及び／又は計測するものも包含する。該方法では、照明光を白色光として、皮膚を包含する観察物体表面からの侵入深さが波長とともに変化することを考慮した実質的な反射面として、該反射面の光学特性の変化を検知及び／又は計測するものであってよい。

[0110] （応用範囲）

＜表面傾斜角データの直接応用：基準化された形状データ＞

本発明の応用は、以上に説明した応用に限られない。傾斜エリプソメトリーで計測できる表面傾斜角データは、形状計測に限らず、物体形状のサンプリングと統計処理などによるデーターベース構築などへも応用できると考えられる。本発明の方法、例えば、傾斜エリプソメトリーでは、倍率を変えた計測に対しても表面の傾斜を記録するので、形状に関する情報だけを抽出する。

従って、個体差で大きさが変わっても、形状を基準化できる。

[0111] ＜他波長応用：波長が限定されない：白色円偏光が利用できる＞

さらに、本発明の傾斜エリプソメトリーの方法は、全ての電磁波に適用できる。特に、他の干渉を利用する方法と異なり、白色光をそのまま利用できる。従って、紫外光などの、吸収係数が大きく、光の侵入深さが小さい波長で形状を計測すれば、他の波長での計測結果で侵入深さの範囲の表面領域特性を評価できる。例えば、複素屈折率の波長分散は、3変数程度の分散式で記述できることから、表面の光学特性をより詳細に知ることが出来る。

[0112] ＜傾斜角計測は外乱に影響されない：計測環境を選ばない＞

さらに、本発明の傾斜エリプソメトリーの傾斜角計測は、入射角に敏感であり、外乱による振動などに起因する横シフトや縦シフト成分には感度が無い。従って、通常の環境における精密測定に適している。

[0113] ＜通常環境での精密傾斜計測に適する：傾斜変化の一次微分量で局所的な変形が抽出できる＞

例えば、人体や乳房などの部分の観測に適用することで、傾斜を直読できる。悪性腫瘍などは、皮下において正常細胞とは組織や力学特性が異なり、不均一である。従って、医師による触診でも診断がなされているが、本発明の傾斜エリプソメトリーを適用することにより、僅かな窪みや隆起などの局所的な変形は、データの微分量として容易に検出できる。特に、患者の姿勢の変化などによる乳房の変形を観測することにより、変形の様態が一様な正常細胞部分と明瞭に区別できることが期待できる。所定の変形には、気体流などを利用して皮膚への一定圧力を加えたり、必要に応じて乳房表面を走査したりすることもできる。また、体温に合わせた液体中に乳房が包まれる構成として、液体流を利用して更に大きな圧力変化を与えて観測することで、より深い部位の変形異常を見出すことが期待できる。観測波長を選ぶことで、腫瘍周辺に発達した血管組織の特徴を検出できる可能性もある。人体などの生体組織の光学的な観測では、散乱現象と照明光のコヒーレンスを積極的に取り込んだ光散乱計測法が発展している。この研究展開に、本明細書で開示した、「反射部分偏光の完全偏光成分の光学特性が特徴的な入射角依存性

を持つ」ことを取り込むことで新たな研究進展がありうる。

[0114] ＜時間変化を容易に記録できる：ダイナミクス観測に適する＞

本発明の傾斜エリプソメトリーでは、傾斜の直読を画像の取得と同時に行えることから、時間変化を記録することで、画像中の局所的な微細な変形を検知できる。この機能は、例えば、細胞の分裂やアポトーシスなどのダイナミックスを研究する上で、前駆現象を捉えるなどの応用に発展し得る。

[0115] ＜太陽光や電波での観測：平行照明による正反射光の観測：図１の光路の逆転＞

同様な応用は、例えば、衛星画像による地表の変形の検知や海洋表面の変形の検知などへも適用が考えられる。この場合は、照明光は無限遠方からの太陽光であり、図１の光線方向を逆転した観測になるが、反射の原理は同一である。更には、電波よる計測にも適用できる。

[0116] ＜固体、液体、気体、およびそれらの組み合わせの界面観測＞

その他、他の方法が適用しにくい液体や液滴表面の形状やダイナミクスを観測する応用にも有用である。融液中で成長する結晶のファセットやステップの観測などがこれに当たる。この計測対象は、気体中の液体、あるいは液体中の気体の界面へ一般化できる。同様に、固体と液体の界面、さらには、密度の異なる液体中の液体、気体中の気体、固体中の固体など、反射を起こし得る全ての物質界面へ適用が広がる。これらは、従来の干渉計測法などでは計測が不可能であったり困難である対象である。

＜極端環境下の観測＞

本発明の傾斜エリプソメトリーは、さらに、リモートセンシング法であることから、高温下、高圧化などの通常の方法を適用することが困難な環境下での定型、不定形の物体の形状の計測とダイナミックスの計測にも有用であると考えられる。

[0117] 本発明の第１の実施形態に属する実施例としては、図９で示すような形状計測望遠鏡が挙げられる。該形状計測望遠鏡に関し、第１の実施例としては、照明光を右または左円偏光とする場合である。そして、第２の実施例とし

ては、左右円偏光を切り替える場合である。

本発明の第２の実施形態に属する実施例としては、図10で示すような形状計測顕微鏡が挙げられる。該形状計測顕微鏡に関し、第１の実施例としては、照明光を右または左円偏光とする場合である。そして、第２の実施例としては、左右円偏光を切り替える場合である。

[0118] 以上に説明してきたように、本発明における傾斜エリプソメトリーでは、全ての物質の共通な性質である、

I. 複素振幅反射率比ρは、入射角ϕ＝0°で－1であり、ϕ＝90°で1であること

II. 入射角ϕが0°から90°まで変化すると、複素平面上でρは－1から1まで単調に変化し、途中でρの実数部が0の虚軸（Δ＝±90°）を必ず通過すること

という２つの反射偏光特性に着目し、特定の構成を組み合わせる。すなわち、試料周辺から円偏光で一様に照明し、鏡面反射光の偏光状態を空間的に固定された方向から観測して、試料断面座標上の任意の反射点について、観測された反射楕円偏光の形状から該反射点の入射面の傾きと入射角（＝反射角）を計測する。傾斜のその場観測データを直接に活用できるほか、さらに、計測された反射点の反射面を試料断面内の計測点間で順次滑らかに接続することで試料の形状を再構築する３次元形状計測応用などに利用でき、当該３次元形状計測応用では、非偏光照明で透明体に限定されて発展しているロボティックス応用の既手法の精度を完全偏光照明で改善して、簡便で汎用な形状・傾斜検知及び／又は形状計測と解析手法を提供するものである。

以下では、本発明の実施形態に属する具体例を示しながら、本発明の態様を説明するが、それは単に本発明の説明のため、その具体的な態様の参考のために提供されているものである。これらの例示は本発明の特定の具体的な態様を説明するためのもので、本願で開示する発明の範囲を限定したり、あるいは制限することを表すものではない。本発明では、本明細書の思想に基づく様々な実施形態が可能であることは理解されるべきである。全ての実施

例は、標準的な技術を用いて実施したもの、又は実施することのできるものであり、これは当業者にとり周知で慣用的なものである。

実施例 1

[0119] 〔縮小光学系装置〕

本発明の第１の実施形態に属する実施例としては、縮小光学系装置である形状計測望遠鏡が挙げられる。図９に、該形状計測望遠鏡に関し、最も簡単な構成でもって装置が示してある。本構成は、縮小光学系装置に適用できるもので、勿論、カメラなどにも適用できる。

本発明の形状・傾斜計測光学装置における照明装置は、図９では、円偏光照明装置として示してある。該円偏光照明装置は、試料周辺を円偏光パネルで囲うことで実現できる。円偏光パネルの技術要素としては、液晶パネルに類似の要素で構成されていてよく、例えば、発光ダイオードなどの光源、拡散板、直線偏光フィルム、位相子フィルムを含んでいて、輝度が一様な円偏光パネルを構成したものが包含される。実用的には、直線偏光照明となっている液晶パネル表面に位相子フィルムを所定の方位で貼って、円偏光パネルを構成したものであってよい。拡散板を利用して輝度が面内で一様な照明パネルを構成すると、測光の原理で観測方向に無関係に明るさが決まり、形は判別できなくなることになる。したがって、照明装置は、例えば、パネルで構成した箱型としても良いことになる。実質的には、各面に液晶パネルを利用して箱型にして、中に試料を入れることでもよい。

[0120] 本発明の形状・傾斜計測光学装置における偏光画像検出装置は、図９では、右側に示してある。図９中、偏光画像検出には、好適には、２D偏光検出器を備えた偏光イメージングカメラ〔株式会社フォトニックラティス（宮城県仙台市青葉区）〕を使用できる。このように偏光画像検出は、フォトニック結晶素子を使用したものを好適に使用でき、それと電荷結合素子(charge coupled device, CCD)とを使用したものであってよい。当該カメラでは画像信号をUSBケーブルを介してパソコン（コンピューター）に送り、適切なソフトウエアで処理されることができる。フォトニック結晶素子としては、例えば、

偏光子アレイ（パターン化偏光子）、λ/4波長板アレイ（パターン化波長板）などが挙げられる。偏光イメージングカメラは、コリメーター、プリズム、波長板アレイ、偏光子アレイ、CCDからなる群から選択されたものを使用して構成されたものであってよい。好ましくは、空間並列的に画像情報を取り込むことのできるものが挙げられる。代表的な態様のものでは、ピクセルごとの画像を処理して、画像データを機械認識することのできるものが挙げられる。

当該偏光子アレイとしては、例えば、画素と同サイズの偏光子が約100万個あるいは所定の数敷き詰められているチップであってよい。例えば、該偏光子アレイは、透過軸方位の少しずつ異なるほぼ正方形の偏光子が敷き詰められ、その偏光子アレイの近接する４画素の輝度を演算することにより、偏光の主軸方向、平均輝度、偏光成分の強さを瞬時に得ることができるものが挙げられる。また、偏光子アレイは、透過軸方位の少しずつ異なる縦長の偏光子が横に並ぶ構成としてあり、波長板アレイは、逆に、横長の波長板が縦に並ぶ構成としてあるものであってよい。

[0121] フォトニック結晶とは、屈折率の異なる材料が周期的に並んだ構造体であって且つ二次元あるいは三次元といった多次元の周期構造体であるものである。構造の周期は、通常、使用する光の波長の半分程度に設計され、例えば、可視光領域で利用される場合、そのフォトニック結晶は、周期が300nm程度となるように設計・作製される。フォトニック結晶の周期構造は、「結晶」と呼ばれるが、そのフォトニック結晶のその周期的な構造は数100nm程度のものとされており、光が透過する波長帯域の「フォトニックバンド」と、光の透過を遮断する波長帯域の「フォトニックバンドギャップ」とが配列及び／又は積層された構造、すなわち、高屈折率・低屈折率の二種の誘電体を一定の凹凸を保持したまま自己成形的に多層積層された多次元構造とされている。典型的なフォトニック結晶は、パターン化された凹凸基板の上にスパッタ積層とバイアスエッチングを組み合わせて定常的な三次元凹凸パターンなどの多次元積層・パターンを形成する技術で、例えば、自己クローニング法で

製造されるものなどが挙げられる。その製膜材料としては、様々なものが使用でき、例えば、Si, SiO_2, TiO_2, Ta_2O_5, Nb_2O_5, 希土類酸化物などが知られている。フォトニック結晶素子は、光の透過／反射／屈折特性を制御する機能を有している。

当該カメラの２D偏光検出器からはデータ処理ユニットを経由して、ストークスパラメーターの２次元分布データが出力され、その後のデータ処理系と、表示装置、データ蓄積装置等が配設され、必要な処理が可能となっている。

図９では、右のカメラ部分に、物体の上側部から出た光線がカメラ上の下側部分に結像する様子が模式的に光線で記入してある（光軸からのずれの角度を強調してある）。望遠鏡などの縮小光学系では、一般にこのような構成になり、結像に用いられる物体上の一点から発散する光束の開き角は十分小さいので、偏光状態は一様と見てよいことになる。

実施例 2

[0122] 〔拡大光学系装置〕

本発明の第２の実施形態に属する実施例としては、拡大光学系装置である形状計測顕微鏡が挙げられる。図10に、該形状計測顕微鏡に関し、最も簡単な構成で装置が示してある。本構成は、拡大光学系装置に適用できるもので、目的を達成できる限り特に限定されず、様々な装置に適用できる。

顕微計測などの拡大光学系では、光学系のNA (Numerical Aperture; 開口数)をあげると、試料上の一点から発散する光束のうち、結像系に取り込まれる開き角が大きくなるので、光束内での偏光状態の変化が有意の大きさになることから、一般的には、図10に示したような工夫をする構成となる。

拡大光学系で偏光検出装置に像を作る場合、像の解像度を上げるには、光学系のNAを大きくとることになる。しかし、NAを上げると、試料の1点で反射する成分の取り込み角度が広がるので、入射角にも広がりが出て、入射角の関数である偏光状態に対する解像度は落ちることになる。偏光解像ピンホールは、偏光の解像度を上げたい場合に挿入して使用することになる。かくし

て、図10で示すように、太い実線でしめす光線成分を取り出すことができる。実際には、偏光解像ピンホールを外して得た高空間分解能の像に、ピンホールを挿入して得られた偏光解像した像を重ねることにより、測定がなされることになる。

本ピンホールの機能は、異方性軸の直交する二つの1/4波長板を一体化したフォトニック結晶波長板アレイを使用して達成するものであることもできる。例えば、異方性軸の異なる二種類の波長板が接合境界の実質上ない形態で接合しているもの、すなわち、偏光縦スリット〔株式会社フォトニックラティス（宮城県仙台市青葉区）〕を使用するものであってよい。

結像の空間解像度が重要でない応用では、結像光学系を省略してしまうこともできる。この場合、さらに単純な構成としてよい。拡大でも縮小でもピンホールと検出器の位置関係で自由に選ぶことが出来る。図11参照。

本発明では、上記構成で複数の偏光画像を取得することが可能なようにしてあってよく、精度を上げることが可能となっているものが好ましい。

ここで、照明装置、偏光画像検出装置、データ処理系などは、実施例１と同様にして構成できる。

実施例 3

[0123] 〔他の形状計測光学装置〕

本発明の形状・傾斜計測光学装置は、例えば、図12又は13に示す構成図で示されるような装置であってよい。いずれも周知の技術の組み合わせで構成できることは、理解されなければならないし、多くの改変及び変形が可能である。これらの光学系やコリメーターの光学系は、レンズで構成しても良いが、白色光や多波長光を利用する光学系では、鏡を利用して光学系を構成しても良い。図12に示すような構成の場合では、鏡面での位相と振幅の変化は、必要であれば、予め計測して、補正する。折り返し反射鏡は、中央に開口を持たせたものであってよい。代表的な構成では、偏光照明装置と偏光画像検出装置の間の光学系として、反射型結像系、ビームエキスパンダーなどが包含されてよい。

次に、高空間分解強度画像と高分解偏光画像をピンホールの切り替えなしに同時観測するには、例えば、図13に示すような構成とする。代表的な構成では、偏光照明装置と偏光画像検出装置の間の光学系として、結像光学系、穴あき平面鏡などが包含されてよく、さらに強度画像検出装置などが含まれていてよい。

実施例 4

[0124] 〔マンモグラフィー装置〕

本発明の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置は、例えば、図14又は15に示す構成図で示されるような装置であってよい。本発明の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置は、マンモグラフィーを包含する医療診断装置として構成できる。該医療診断装置は、例えば、人体または乳房を包含する人体の一部分を検知及び／又は計測物体とし、悪性腫瘍を包含する各種の病変によって引き起こされる表面傾斜角の特異的変化を検知特定するものであることができる。

本発明の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置は、患者を包含する観察物体の姿勢変化を包含する処理によって、所定の変形を与え、変形前後での傾斜角の変化を検知及び／又は計測することを特徴とするものであってよい。所定の変形は、気体流あるいは液体流などによる皮膚への圧力変化を用いるものであってよい。さらに、本発明の形状・傾斜計測光学装置は、照明光を白色光として、皮膚を包含する観察物体表面からの侵入深さが波長とともに変化することを考慮した実質的な反射面として、該反射面の光学特性の変化を検知及び／又は計測することを特徴とするものを包含する。

[0125] マンモグラフィー応用などでは、図14に示すような構成が挙げられ、照明装置を2つの開口を持つベッド状に仕上げ、患者はベッドの所定の位置にうつ伏せの姿勢をとる方式が考えられる。この場合、検知部を体温に合わせた液体で満たし、液体中に乳房が包まれる構成として、液体流を利用して更に大きな圧力変化を与えて観測することで、より深い部位の変形異常を見出すことが期待できる。また、集団検診用など、立位で検査できることが望ましい

場合には、図15に示すような構成が挙げられ、筒状の検査ユニットに胸部を押し当てる方式で構成できる。この場合、気体流などを利用して皮膚への一定圧力を加えたり、必要に応じて乳房表面を走査したりすることもできる。

ここで、照明装置、偏光画像検出装置、データ処理系などは、実施例１と同様にして構成できる。本マンモグラフィー応用などでは、医師がわずかな窪みなどを検知しやすくする肉眼観測用の補助機器としての応用がありえる。当該検知では、患部の凹凸を明暗のコントラストに変換する機能があればよく、必ずしも定量計測を必要としなくてよい。

[0126] 例えば、最も単純な構成では、患部を右円偏光で照明し、医師がそれぞれ方位を回転できる1/4波長板と直線偏光子の組み合わせで構成した楕円偏光子を眼鏡のように装着して、患部の微細な凹凸を強度変化として肉眼観察できるようにすることで本発明を利用できる。当該眼鏡は、眼科で視力検査に使う、レンズ2枚を交換装着できるタイプをそのまま利用して、2枚のレンズの代わりに1/4波長円板と直線偏光子円板を装着するものであってよい。医師が、例えば左円偏光子の方位角構成で患部を観察し、必要に応じて1/4波長板と直線偏光子の方位角を回転して楕円偏光子の楕円形状を変えて消光状態に近い、形状変化のコントラストが高い状態等を利用して詳細な観察をすることができるものであってよい。また、1/4波長板と直線偏光子の方位角の回転を自動化して、ビデオカメラで撮像する構成のものも包含される。そのような装置では、画面上で拡大観察やその他の画像処理ができる。円偏光照明は、例えば、図15の円筒を直線偏光子フィルムに1/4波長フィルムを張り合わせて作成した透明な円偏光子円筒として、外から通常の照明で患部を照らしても良いし、検査室の壁を円偏光子パネルで構成してもよく、患者に精神的な負担とならないような工夫をいろいろと適用できる。

実施例 5

[0127] 〔エリプソメトリー型形状計測光学装置〕

本発明の形状計測光学装置は、例えば、図16～18に示す構成図で示されるような装置であってよい。本発明では、偏光状態の検知には、従来技術のエ

リプソメトリーの原理を利用することができる。

検知すべき偏光状態のうち、楕円率角の符号、すなわち、右回りの偏光と左回りの偏光を判別する必要が無い場合と、楕円率角の符号も含めた計測が必要な場合で偏光計測の構成を大別すると、

(A)偏光楕円の楕円率角の絶対値と方位角θを検知する「回転検光子法」に基づく構成

(B)符号（右回りが＋、左回りがー）も含めた楕円率角と方位角を検知する「回転位相子法」に基づく構成

の二つがある。

(A)の「回転検光子法」の場合には、検出は、ポアンカレ球上で、楕円率角が一定のS_3軸に垂直な面上のS_1、S_2の値またはその比を検知する。S_3の情報、あるいは楕円の回転方向の情報を必要としないために、1/4波長板などの位相素子を必要としない。

(B)では、S_3も含めた、楕円の回転方向も判別するための、1/4波長板などの位相素子を検出光学系に含み、ストークスパラメターを検知できる「回転位相子法」に属する検出技術を用いる。

これらの計測には、既に述べたエリプソメトリーの既存技術を適用すれば良い。

[0128] 一方、高速読み取りを必要とする応用では、(A)の回転素子型の検知の場合でも機械的な駆動部を排除する構成が望ましい。このために、ファラデー効果、カー効果、ポッケルス効果などの各種の偏光変調効果を利用した偏光変調素子を用いて偏光状態を変調し、ロックイン検波方式で$\cos\theta$信号の位相角を決定検知する構成をとることもできる。しかし、反射光を空間的に複数に分割し、特定の偏光状態を検出できる検光子を複数割り当てて、偏光状態を並列に同時検知する方式は、高速化の観点からは更に優れている。

例えば、複数のチャンネルを持った検出器の各チャンネルに方位角θの異なる直線検光子を割り当てて、回転位相子信号を同時に検知し、信号処理によって$\cos\theta$信号の位相角（楕円の主軸の方位角）を必要な有効数字桁数の多

重ビット信号として出力する。チャンネル数は、最低3つを設置する。チャンネル数を増加して、計測精度を向上してもよい。また、各チャネルが受け持つ検知方位角は、ポアンカレ球のS2、S3面上で互いにできるだけ離れ、且つ、互いに等間隔である配置を基準とする。

二次元偏光検出器の１つのチャンネルには、図16の直交直線偏光像検知ユニット（直交ユニット）を用いる。物体から発する偏光ビームは、偏光ビームスプリッターで直進するp-成分と反射されるs偏光成分とに分割され、それぞれ、結像レンズにより、物体像が２次元検出器上に結像され、直交偏光像出力として取り出される。破線で囲んだユニットを以下では「直交ユニット」と呼ぶ。この直交ユニットから出力される二つの偏光画像は、それぞれ、ポアンカレ球上で対称点に位置する。したがって、例えば、水平直線偏光の方位角0°に偏光検知チャンネルを配置した場合、検知される偏光状態は、水平直線偏光による画像（表チャンネル）と垂直直線偏光画像（裏チャンネル）とで構成される。

[0129] (A)の回転検光子方式を、例えば３チャンネルで構成する場合、検知方位角はポアンカレ球上で60°の等配が基準で、例えば、0°（裏180°）、60°（裏240°）、120°（裏300°）となる。実空間の方位角は、1/2になり、0°（裏90°）、30°（裏120°）、60°（裏150°）となる。実空間では、180°の方位角回転は偏光状態としては全く等価であり、区別できない。従って、実際の実空間配置では、0°、120°、240°の120°等配とすればよい。直線検光子をこれらの方位角で用いる構成をとることもできるが、1/4波長板などの位相子を用いて、所定の楕円検光子を各チャンネルに配置することでチャンネル毎の信号コントラストを最適化することもできる。なお、チャンネル数は、必要な計測精度で決定するが、例えば15とすると、30の画像情報が得られて、1/1000°の計測精度が得られる。

(B)のストークスパラメーター検知方式では、原理的に、1/4波長板などの位相子を用いて、偏光状態の位相を変化させた信号を得る。この場合も、高速読み取りには、回転位相子型の検知の機械的な駆動部を排除する構成が望

ましい。検出系の構成は、原理的には(A)での構成と同様で、複数のチャンネルに、特定の検光子を配置する。この場合の検光子は、直線偏光子や円偏光子を含めて、特定の楕円偏光状態に直交する楕円偏光検光子となる。配置の最適構成は、検知すべき偏光状態のポアンカレ球上での分布に対して、最大の感度を得られるように、分布領域内で工夫することができる。この場合、ポアンカレ球上での検知チャンネル数は、三角測量の原理から最低３つとなる。各チャネルは、ポアンカレ球上で特定の検知座標に位置し、チャネル出力は、検知座標からの距離に比例すると考えてよい。例えば、右円偏光子（S３軸=北極）をチャンネルに選ぶと、ポアンカレ球上で直交する左円偏光（－S3軸=南極）が裏チャンネル出力に得られる。楕円偏光検光子に対しても同様で、南半球の左回り楕円に対する楕円検光子では、裏チャンネルには北半球の同一楕円率で方位角が実空間で直交する楕円検光子像が出力される。

偏光状態がポアンカレ球面上の全てにわたる場合は、ポアンカレ球上で直交するS1、S2、S3、軸上の点を取っても良いが、(A)で述べた実空間での等配３軸0°、120°、240°の直線偏光子に加えて、－S3の左円偏光子を加える４チャンネルの構成が一つの最適解である。

[0130] 反射光を空間的に複数に分割し、各チャンネルに導くには、偏光特性の無い部分反射鏡を用いて反射光の光軸に沿って分割する方法を用いても良いが、反射光の光束をその断面内で複数に分割する方法も利用できる。この場合、例えば、偏光保持ファイバーの束を利用しても良いが、全反射プリズムを利用して位相子としての機能を設計してもよい。これらの構成の例を以下に示す。

二次元像のストークスパラメーターを計測する基本構成を図17に示す。破線で囲まれた部分は円偏光検知の直交ユニットで、1/4波長板と直交ユニットで構成される。白色光を光源とする構成では、通常の1/4波長板の代わりに、波長依存性の少ない全反射の位相とびを利用した1/4波長プリズムを用いても良い。光軸に挿入されている部分反射鏡は、偏光特性を少なくするために、できるだけ垂直入射に近い反射角、または、斜め入射で用いる。光源側から

、反射率は、1/3、1/2として、3つの直交ユニットに光を1/3ずつ等配し、それぞれ、（水平直線偏光成分S_1、垂直直線偏光成分－S_1）、（＋45°直線偏光成分S_2、－45°直線偏光成分－S_2）及び、（右円偏光成分S_3、左円偏光成分－S_3）の直交偏光成分を検出する。

一般に、ストークスパラメーターの計測精度を上げるには、チャンネル数を増加する。この場合、光軸に沿って部分反射鏡で分割しても良いが、より精密な分割には、プリズム方式が適している。図18の９チャンネルでは、計18の偏光画像出力が得られる。さらに、部分反射鏡を組み合わせて、光軸上で分割すれば、実用上十分な36の回転位相子方式の画像出力が得られる。

本発明の技術は、反射点から広がる反射光束のうち、観測方向へ反射される光線の偏光状態と実質的に同一となる偏光状態を持つ光線群の範囲で偏光計測の精度を確保する必要性を満たす技術である。例えば、偏光カメラが十分遠方にあれば、特別な工夫は不要となるが、像の空間分解能が低下することとなる。一方、偏光カメラが近ければ、像の空間分解能は十分に大きくできるが、偏光状態の計測精度が低下してしまう。両者を両立せしめるのには、例えば、図10、図11で示したような偏光解像ピンホールや図13で示したような穴あき平面鏡を設けた装置が有用である。同様に、検出系のNAをより小さくすれば、入射角計測値の分解能を上げることができる。したがって、こうした構成を採用したものも本発明の技術に包含される。

[0131] 本発明では、試料の形状・傾斜計測を目的として、右または左円偏光を、滑らかな表面（界面）を持つ物体の表面を一様に照射し、反射の法則に従って観測方位に正反射できる全ての入射光線成分を含ませる、円偏光照明装置を提供する。計測対象の物体表面には、物体内面も包含されてよい。本発明の構成では、円偏光照明装置は、被計測物体の外面を囲む凹面、または内面に向けた凸面を成す照明区画に照明光を供給する光源装置、該光源装置で生成された物体に向かう光束を、円偏光させて通過させる照明区画を有している。

[0132] 本発明で提供される円偏光照明装置は、内面を含む、物体表面を構成する

傾斜面に円偏光を入射し、規定された観察方位に正反射される反射光線の偏光特性を用いて該傾斜面の三次元傾斜角および該傾斜面を成す該物体の形状・傾斜を計測する傾斜・形状計測法に用いるものであることを特徴とする。本円偏光照明装置は、該物体表面に入射させる円偏光光線群が、反射の法則に従って観測方位に正反射できる全ての入射光線成分を含ませるための、該物体に正対する平面または曲面から成る円形または矩形、およびその組み合わせの多面体形状の照明区画を有し、該区画が、物体の外面を囲む凹面、または、物体の内面に向けた凸面で構成され、該区画を通して該物体に向けて実質的完全円偏光を照射できる光源装置を備えることを特徴とする。

[0133] 本発明に関わる技術領域である偏光による物体面の傾斜計測の原理は、発明者が新たに考案して“３D傾斜エリプソメトリー”として提案する精密光計測技術に属する。技術要件は、優先権主張の基礎出願たる特願2008-211895号の明細書〔特許文献７〕および「正反射による物体表面の傾斜エリプソメトリー－精密実時間形状計測への基本概念－」、光学、Vol.38、No.4(2009)〔非特許文献７〕の記載を参照できる。

[0134] 一般に、エリプソメトリーは、平面（薄膜）試料に偏光を斜め入射して、反射の法則に従って鏡面反射される“正反射光”の偏光状態を精密計測することで表面に存在する薄膜の屈折率と厚さを精密計測できる方法として知られている。この従来技術のエリプソメトリー技術では、平面試料に適用が限定される。すなわち、試料面は、その法線が所定の入射面内にあり、同時に、エリプソメーターの入射光線光軸と反射光線光軸に対して反射の法則を満たす入射角となるように試料面の入射面内での傾きを調整する。この試料面の傾き調整によって、計測時の光の入射角と入射面方位角は既知の変数とされ、計測中には固定される。

[0135] 一方、“３D傾斜エリプソメトリー”では、既存技術の平面試料による入射面（２次元面）内に規定されたエリプソメトリーの概念を、３次元物体の内面を含む表面の正反射に拡張する。物体表面を円偏光で一様に照明し、正反射光をｚ方向から観測する。この場合、図19に示すように、ｚ方向から見え

る表面内の任意の反射点で，反射の法則を満たす“明るい”正反射０次光成分光線が存在する。正反射して観測方向ｚに進行するこの光線を基準として、任意の方位の立体表面の一部を成す任意の微小な反射面は、ｚ軸を回転軸とした方位角－θの回転で図19の紙面内に入射面を一致させることができる。入射面は、入射光線と反射面の法線を含む面として定義され、反射面に垂直な法線ベクトルは、必ず入射面内に含まれる。図19から明らかなように、反射角（＝入射角）は法線ベクトルがｚ軸と成す角に等しく、任意のｚ方向に進む光線について、入射面の方位角θと入射角が決定できれば法線ベクトルが決定される。法線が決定できれば、積分操作で形状が再構築できる。ここで、入射面の方位角θと入射角φは、“３D傾斜エリプソメトリー”によって観測される偏光楕円の方位角と楕円率角から決定できる。

[0136] 円偏光照明下でｚ方向から観測される反射偏光の楕円は、図20のように図示できる。誘電体試料による反射の場合、楕円の長軸は入射面のｐ方向から90°傾くために、楕円の短軸が常に入射面のｐ方向に一致する（図20の上側の図）。従って、法線ベクトルを含む入射面方位角（ｚ軸を回転軸とする方位角）が直読できる。金属の場合は、図20の下側の図のように楕円の長軸は常に約45°傾く。この楕円長軸のオフセット角は反射面の光学特性で決まる定数で、エリプソメトリー計算で得られる。従って、全ての物質で、楕円長軸方位角から法線ベクトル方位角が決定できる。

[0137] さらに、観測される楕円の楕円率角は、光線の入射角の単調関数である。右円偏光入射での観測楕円率角と入射角余弦の変換テーブルを図21に示す。入射角余弦は、反射面の単位法線ベクトルの方向余弦のｚ成分に一致する。この計算例で示すように、ほとんどの物質は、実線（金属）と破線（誘電体）の間に変換曲線が存在する。図20に例示した楕円は、図21の入射角φが60°弱の場合を示し、誘電体では右回り、金属では左回りの楕円となる。このようにして、楕円率角から入射角余弦が直読できる。

[0138] なお、楕円の回転方向で楕円率角の符号が決まり、右回りで正、左回りで負である。変換テーブルの入射角範囲（０°から９０°）は楕円率角範囲（

－４５°から＋４５°）と一致する。従って、反射面の法線ベクトルは、正反射光の楕円偏光の方位角と楕円率角から同等の角度精度で精密決定できる。

[0139] 図22は、優先権主張の基礎出願たる特願2008-211895号の開示に基づき実施した計測実験に用いた実験装置を示す。この装置では、円偏光照明は、市販のドーム型照明に円偏光フィルム(circular polarization film)を円筒状に巻いて挿入して製作した。また、正反射光の偏光楕円は、ポラロイドシート製の偏光子(検光子: analyzer)、波長633nm用の干渉フィルター(interference filter)とCCD検出器を組み合わせて、回転検光子法を用いて観測した。角錐台(prismoid)と半球(hemisphere)の観測結果を図23の左側と右側に並べて示す。上からa)楕円率角観測値、b)方位角観測値、c)試料写真である。

[0140] グレースケールに示されるように、簡単な観察装置で6mm程度の小さい試料で十分な分解能の傾斜観測が実証できた。各試料の観測結果の左側中央部の偏光状態の乱れは、円偏光フィルムのつなぎ目による入射円偏光の不均一性に起因する。また、図23a)の楕円率観測値のグレースケールは、左図で5°から35°、右図で10°から35°の範囲を示す。右円偏光照明では、観測された楕円は左廻りで楕円率角が負の領域にあるが、右廻りと左廻りが判別できない回転偏光子法による計測データであったため正で示してある。また、右側の半球試料では、直入射に近い領域と、試料周辺部の切り立った斜入射領域は、空間的に正反射できる照明光が欠けているために観測されていない。

[0141] この実験で明らかになったように、３D傾斜エリプソメトリーに好適な円偏光照明装置の構成は、物体表面の傾斜情報を正確に反射偏光楕円に転写するために出来るだけ完全な円偏光を、観測可能な正反射成分として反射できる入射光線成分として含ませる必要がある。また、計測感度は、本質的にエリプソメトリー計測の計測感度で決定される。

[0142] エリプソメトリーの高精度は、プローブとして試料表面に入射する偏光が、偏光状態が唯一つに決まった完全偏光であることから、1組の偏光子による消光を記述するマリュスの法則で説明できる〔非特許文献８: Principal Ang

le-of-Incidence Ellipsometry, K. Kinoshita and M. Yamamoto, Surf. Sci. 56, 64-75(1976)〕。

[0143] 偏光子と検光子を一直線上に配置して、偏光子の透過軸を方位角０°に固定し、検光子の透過軸の方位をθとすると、透過強度は

[0144] [数33]

$$I(\theta) = I_{90} + (I_0 - I_{90})\cos^2\theta$$

[0145] と書ける。ただし、

[0146] [数34]

直交ニコル $\theta = 90°$ での非偏光成分の透過強度を I_{90}
平行ニコル $\theta = 0°$ での透過強度を I_0

[0147] と書く。この強度変化は、図24に実線で示す、良く知られたマリュスの法則による余弦２乗則に従う。この強度変化は、右縦軸の目盛りに従って対数で示すと破線で示されるように数桁に及ぶ。実際、方位角90°の消光位置付近の強度変化は急激で、消光率の良い偏光プリズムによる消光では、レーザー光であっても肉眼で観測できる程度に減衰する。

[0148] エリプソメトリーでは、反射面のp成分とs成分の振幅反射率の比

[0149] [数35]

$$\frac{R_p}{R_s} \equiv \rho = \tan\psi \exp(i\Delta)$$

[0150] を計測する。

高精度で知られる消光法のうち、P(偏光子)—S(試料)—C(1/4波長板)—A(検光子)配置を例に説明する。このPSCA配置で、Cは方位角45°に固定する。PとAの方位角を交互に調節して、消光を完成できたとする。この時、偏光子の方位角からΨを、検光子の方位角からΔが決定できる。即ち、偏光子方位角をp方向からΨ傾けた時、試料面で反射後のp偏光とｓ偏光の成分の強度が等しく、Δの値に関わらず、反射楕円偏光の主軸は方位角45°となる。従って、方位角45°に固定した1/4波長板によって、任意の楕円率角の楕円は、1/4波長板の中性軸から楕円率角だけ傾いた直線偏光に変換される。このとき、楕円率角はΔ/2に等しく、直線偏光を消光しているAの方位角からΔが決定さ

れる。

[0151] 結局、消光法では、計測する2変数に応じて偏光子と検光子の方位角が正しく調整されている条件で、直線偏光による消光が実現されて極小強度が得られることを利用する。したがって、図24の消光位置θ=90°付近の強度変化を対数目盛で示すように、

[0152] [数36]

強度 I

[0153] の落ち込みの鋭さで消光方位角の決定精度が決まる。この消光位置での透過強度の最低値は、偏光子の消光性能で決まる。

偏光子の性能は、最大透過強度に対する最小透過強度の比で定義される消光率

[0154] [数37]

$$Ex = I_{90} / I_0$$

[0155] で表せる（消光率は、この逆数で定義する場合もある）。図25は、種々の消光率の偏光子によるマリュスの法則を観測

[0156] [数38]

強度 I

[0157] の消光位置付近の方位角変化で示す。

[0158] [数39]

強度 I

[0159] は消光位置に対称に急激に変化する。検出感度は、検知可能な強度変化率で決まり、図25に示すように、消光強度

[0160] [数40]

$$I_{90}$$

[0161] から10%の変化が検知できるとすると、矢印で示す角度幅となる。この幅は、偏光子の

[0162]

[数41]

$$\text{消光率 } Ex$$

[0163] の関数として、

[0164] [数42]

$$0.1\sqrt{Ex}$$

[0165] に等しい。

[0166] [数43]

$$\text{消光率 } Ex$$

[0167] は、ポラロイドシート偏光子では10^{-4}から10^{-5}、グラントムソン偏光子等のプリズム型の偏光子では10^{-5}から10^{-6}、プリズム型で特に場所と向きを選べば、10^{-7}から10^{-8}が達成できる。

[0168] この消光状態での

[0169] [数44]

$$\text{消光率 } Ex$$

[0170] を決める最少透過強度

[0171] [数45]

$$I_{90}$$

[0172] の光は非偏光成分から成り、偏光子で生成される直線偏光が僅かながら非偏光成分を含む部分直線偏光であることに加えて、たとえ理想的な直線偏光であったとしても検光子によって僅かながら散乱されて、一定の非偏光成分が検光子を通過することを示す。エリプソメトリーの消光時の感度特性は、完全偏光成分の形が円偏光を含む任意の楕円偏光の場合にも、位相子を作用させて直線偏光とすることから、同等に成立する。つまり、エリプソメトリーの計測系では、計測誤差は、偏光の

[0173] [数46]

$$\text{偏光度 } V$$

[0174] で計測の誤差が記述出来る。

一般に、

[0175] [数47]

$$\text{偏光度 } V$$

[0176] は、任意の部分偏光を構成する非偏光成分の強度

[0177] [数48]

$$I_u$$

[0178] と完全偏光成分

[0179] [数49]

$$I_p$$

[0180] によって

[0181] [数50]

$$V = I_p / (I_p + I_u)$$

[0182] と書ける。ここで、消光時の最少透過強度

[0183] [数51]

$$I_{90}$$

[0184] は

[0185] [数52]

$$I_u$$

[0186] に等しく、最大透過強度

[0187] [数53]

$$I_0$$

[0188] が

[0189] [数54]

$$I_p + I_u$$

[0190] に等しいことから、消光率

[0191]

[数55]

$$Ex = I_{90} / I_0 = I_u /(I_p + I_u) = 1 - V$$

[0192] となり、計測感度は

[0193] [数56]

$$0.1\sqrt{1-V}$$

[0194] に比例する。

[0195] 円偏光子の偏光能は、使用する偏光子の偏光能で決まる。また、次に挙げる要因で、偏光状態に照射角依存性が生じ、垂直入射以外では円偏光から偏光状態が変化する。これが、結像される光の偏光度を結像位置で劣化せしめる要因となる。

１．偏光子の許容角度範囲が有限で、Glan-Thompsonプリズム型では最大±15°の程度であること。(参照：http://www.b-halle.de/EN/Catalog/Polarizers/Glan-Thompson_Polarizing_Prisms.php)また、

２．位相子の位相角は、原理的に角度依存性があること。

[0196] 特に、複屈折を利用する位相子の位相角は原理的に入射角依存性を示すために、図26に示すように許容角度範囲が必要な精度に依存して限定される。図27は、本発明に従って構成された照明区画を有する光源装置が、光源、光を該区画に導く光学素子、および、円偏光子をこの順に含むことにより、所定の偏光度の完全円偏光を該区画から所定の角度範囲の入射角光線束として射出できる機能を具備せしめることになることを説明する。平均屈折率1.5、1.4、1.0についての計算例を、図27に示す。偏光子の消光率10^{-6}を基準に置くと、位相角変化は、10^{-3}ラジアンから10^{-4}ラジアンが要求される。即ち、位相角変化で、0.1%から0.01%である。図27から読み取ると、これらはそれぞれ±12°および±4°の範囲で位相子の光軸からの触れ角が制限されることを意味する。図27の示すデータは、本発明に従って構成された照明区画を有する光源装置が、実質的に偏光度99%以上の円偏光光束群を該物体に照明できることを説明する。

[0197] これらの要素から、所定の精度で完全円偏光を生成するには、これらの偏

光素子に対する光線の入射角または出射角を所定の許容角度範囲に収める必要がある。この要件を満たす照明区画は、図28に例示するように、許容角度を示す円内に内接する正多角形を要素として照明領域を構成すればよい。かくして、光源装置の照明区画が円に内接する正多角形のいずれか、または、その組み合わせから成る多面体区画を成すものであればよい。具体的には、要求精度にしたがって、照明領域を所定の角度範囲で分割する必要がある。なお、照明区画は、図29に例示するように、面発光光源に円偏光子を張り合わせることで簡便にコンパクトに構成することもできる。この構成は、計測物体の内面を成す表面を計測する場合に特に有用であり、本発明に従った照明区画を有する光源装置としては、少なくとも、点発光源を配列した実質的面光源、及び／又は、面発光光源と、円偏光子とを、この順に含むといった構成のものであってよいことを説明する。

[0198] 以上の検討の結果、３D傾斜エリプソメトリーに好適な円偏光照明装置は、以下の要件を満たす必要がある。

(1)観測方向から見える物体表面で正反射し、観測方向に進行する反射光線を生成するための全ての入射光線を供給できること。

(2)上記(1)で生成した物体表面の照明光を完全円偏光とするために、照明領域を複数の照明区画で構成すること。

(3)該照明区画は、該区画から所定の角度範囲で所定の精度の完全円偏光を物体に向けて発する機能を有し、該区画の円偏光子以降の入射光線の光路で伝搬光の円偏光状態が乱されないこと。

(4)物体で正反射された結果生じた楕円偏光が、反射光路で、その偏光状態が乱されないこと。

[0199] さらに、利用形態によって、付加すべき次の要件がある。

３D傾斜エリプソメトリーでは、一般には物体の光学的性質は既知とする。しかし、既存技術のエリプソメトリー解析によって物体表面の光学特性を既知とする機構を付加することで、物体の光学的性質を決定する機能を付加して、適用範囲を広げることができる。

この場合、

(5)既知の基準光線の入射角と方位角を与える、照明角度原点基準を持つこと。

の要件が加わる。このための構成例を、図30に示す。図30は、本発明に従って光源装置の照明区画内に照明角度原点基準を有するものを構成すればよいことを説明する。図中の破線部が照明角度原点基準であり、他の領域と透過強度あるいは透過波長の特性を変えることによって、偏光画像検出時に画像内で座標を特定する機能を持たせる。

[0200] さらに、吸収体の楕円方位のオフセット角が入射面方位に対称に切り替わることを利用して、解析アルゴリズムを単純化して計測精度を向上する利用形態では、照明光束の円偏光状態を右円偏光と左円偏光で時間的または空間的に選択する機能を有することが着目され、

(6)円偏光照明を右円偏光と左円偏光で時間的または空間的に選択する機構を備えること。

の要件が有用である。かくして、本発明に従い、内面を含む、物体表面を構成する傾斜面に円偏光を入射し、規定された観察方位に正反射される反射光線の偏光特性を用いて該傾斜面の三次元傾斜角および該傾斜面を成す該物体の形状・傾斜を計測する傾斜・形状計測法に用いる円偏光照明装置にあっては、該物体表面に入射させる円偏光光線群が、反射の法則に従って観測方位に正反射できる全ての入射光線成分を含ませるための、該物体に正対する平面または曲面から成る円形または矩形、およびその組み合わせの多面体形状の照明区画を備えるように構成し、さらに、該区画が、物体の外面を囲む凹面、または、物体の内面に向けた凸面で構成され、該区画を通して、該物体に向けて実質的完全円偏光を照射できるようにすればよいことが明らかである。本発明ではこうした構成を有している光源装置を備えることを特徴とする円偏光照明装置が提供されることが理解できよう。

これらを満たす最適な実施形態例を以下に示す。

[0201] 測定対象物体に正対する平面または曲面から成る円形または矩形、あるい

は、その組み合わせの、多面体形状は、様々な構成例を提供できる。図31は、正多角形を照明区画と成す照明領域の構成例を示すものである。図31では、順に、正m面体をm＝４、６、８、12、20の場合について示してある。図31では、更に、円偏光フィルムでの円筒形、および、正五角形と正六角形を組み合わせたサッカーボール形状の多面体を示してある。図31において、中心部の球は、試料の外面を観察する場合は試料を、試料の内面を観察する場合には、光源を示す。正四面体と正六面体の場合に、球が試料の場合の光線の進行方向を矢印で例示する。球が光源の場合は、球に向かう光線方向が逆転して、全て多面体区画を通過して外に向かう光線となる。本発明の光源装置は、光ファイバー素子を所定の角度に配置して照明区画に垂直に入射させる構成としてよい。多面体構成にファイバー光源を組み合わせた構成例として、正八面体の場合を図32に示す。図32において、中心部の球は外面観測用の試料を示す。

[0202] 本発明の円偏光照明装置において、当該光源装置は、少なくとも一点から発散する光束を生成する光源機構と回転楕円体反射鏡を含む構成とすることができ、さらに、該発散点と物体の位置を該回転楕円体反射鏡の焦点に一致させて配置して、反射によって照明光線を物体に収束せしめることで照明区画に垂直に入射させるようにすることができる。こうした構成の好適実施例を、図33に示す。図33の具体例においては、左から、偏光カメラ、試料を内部に置く多面体照明区画、および、回転楕円体鏡と点光源で構成される円偏光照明装置が示されている。別の本発明の円偏光照明装置において、当該光源装置は、少なくとも平行な照明光束を生成する光源機構と回転放物面鏡を含む構成とでき、それはさらに、物体の位置を該回転放物面鏡の焦点に一致させて配置して、反射によって照明光線を物体に収束せしめることで照明区画に垂直に入射させるようにすることができる。こうした構成の好適実施例を、図34に示す。図34の具体例においては、左から、偏光カメラ、試料を内部に置く多面体照明区画、および、回転放物面鏡と平行光束を生成する光源機構（省略）で構成される円偏光照明装置を示す。

[0203] 図35は、内面形状観察の実施例を示す。本実施例では、固定円偏光パネル光源と絞りを用いて偏光カメラで一括撮像することが出来る。当該固定円偏光パネル光源は、少なくとも、点発光源を配列した実質的面光源、及び／又は、面発光光源と、円偏光子とを、この順に含むものであることができる。

図36は、内面形状観察の他の実施例を示す。本実施例では、円偏光光源と絞りを用いて、光源または絞りのいずれかを試料回転対称軸上を直線駆動走査して重ね撮像する。当該円偏光光源は、光源、光を該区画に導く光学素子、および、円偏光子をこの順に含み、所定の偏光度の完全円偏光を該区画から所定の角度範囲の入射角光線束として射出できる機能を具備せしめるもの、実質的に偏光度99%以上の円偏光光束群を該物体に照明できるもの、光源装置の照明区画が円に内接する正多角形のいずれか、または、その組み合わせから成る多面体区画を成すもの、光ファイバー素子を所定の角度に配置して照明区画に垂直に入射させるもの、少なくとも、点発光源を配列した実質的面光源、及び／又は、面発光光源と、円偏光子とを、この順に含むものなどであってよい。

[0204] 図37は、一端を封じられた内面形状観察の実施例を示す。円偏光パネル、ビームストップ、および絞りを用いて、偏光カメラで一括撮像することが出来る。

図38は、一端を封じられた内面形状観察の他の実施例を示す。円偏光光源と絞りを用いて、光源または絞りのいずれかを所定の直線駆動走査で重ね撮像する。

図39は、回転放物面を成す試料の内面形状を例に、内面形状観察の他の実施例を示す。円偏光平行光束を照射する光源と絞りを用いて、偏光カメラで一括撮像することが出来る。

図40は、回転楕円面を成す試料の内面形状を例に、内面形状観察の他の実施例を示す。円偏光光源と絞りを用いて、偏光カメラで一括撮像することが出来る。 上記したように、本発明の技術は、傾斜センサーに応用できる。本発明による新技術として、反射面で傾斜センサーを構成し、リアルタイム

で２軸傾斜を計測したい物体の表面・界面に配置することで新たな適用領域の発展が期待できる。この場合、センサーは円偏光照明を備えた１回反射の鏡面で構成できて、２軸の傾斜を直読できる。また、反射回数を２回の直角プリズム型、あるいは、３回のコーナーキューブ型とすれば往復光路型の１軸の傾斜センサーとなり、円偏光レーザーで照明して反射偏光状態で傾斜を計測するリモートセンシング応用が展開できる。　望遠鏡利用の新規応用として、例えば、従来は三角測量が用いられる大型建造物の計測では、必要な箇所に円偏光照明と反射面から成る２軸傾斜センサー、または、コーナーキューブ型の反射センサーによる１軸傾斜センサーを取り付けて、複数個所を同時にリアルタイム計測する応用がある。ビルや橋梁などの大型建造物全体のねじれ変形などの動特性を計測できると期待される。

産業上の利用可能性

[0205]　本発明の技術では、試料周辺から偏光で一様に照明し、反射光の偏光状態を空間的に固定された方向から観測することによって、試料断面座標上の所定の反射点で観測された反射偏光の状態から該反射点の入射面の傾きと入射角（＝反射角）を計測し、そして、計測された反射点の反射面を試料断面内の計測点間で順次滑らかに接続することで、試料の形状を再構築するなどの、簡便で汎用な形状・傾斜検知及び／又は形状・傾斜計測と解析が可能で、それにより物体表面傾斜計測装置、医療診断装置、マンモグラフィー装置、形状計測顕微鏡、形状計測望遠鏡、製造ラインでの不良品形状・汚れ監視装置、物体形状の微分値（傾斜）データによる形状の規格化データベースの構築（物体の大きさと無関係に、形で統計処理するデータベース）を開発し提供することができる。

本発明の円偏光照明装置及び円偏光照明手法を利用して、形状計測カメラ、形状計測望遠鏡、形状計測装置、傾斜センサー、製造ラインでの不良品形状・汚れ監視装置などを開発できる。

本発明は、前述の説明及び実施例に特に記載した以外も、実行できることは明らかである。上述の教示に鑑みて、本発明の多くの改変及び変形が可能

であり、従ってそれらも本件添付の請求の範囲の範囲内のものである。

請求の範囲

[請求項1] 物体の表面の反射光学特性を用いて観察物体の表面形状や傾斜を検知及び／又は計測する形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置において、該物体の周辺を囲んで実質的に既知の完全偏光状態を包含する偏光状態の光を一様に入射させる照明装置と、該物体表面で正反射し特定の方位角に射出された光線群の完全偏光成分を包含する偏光成分の偏光楕円を検知する偏光画像検出装置を備え、反射射出された光線ごとに、その入射点を成す該物体の反射面について、偏光楕円の観測方位角値から入射面の方位を知るステップ１と、偏光楕円の楕円率理論値を包含する偏光楕円の楕円率値から入射角度を知るステップ２によって反射面の射出光線に対する傾斜角を測定することを特徴とする形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

[請求項2] 該物体の周辺を囲んで実質的に既知の完全偏光状態を包含する偏光状態の光を一様に入射させる照明装置が、完全円偏光を包含する円偏光を照明するものであることを特徴とする請求項１に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

[請求項3] 偏光楕円の観測方位角値から入射面の方位を知るステップ１が、(1)偏光楕円の観測方位角理論値を包含する偏光楕円の観測方位角値から入射面の方位を知るものであること、又は、(2)該物体の周辺を囲んで実質的に既知の完全偏光状態を包含する偏光状態の光を一様に入射させる照明装置において、右円偏光と左円偏光を切り替えて入射せしめることで、反射偏光楕円の観測方位角理論値を包含する反射偏光楕円の観測方位角値が物体の表面の反射光学特性に無関係に入射面に対称に切り替わることを利用して入射面方位を特定するものであることを特徴とする請求項１または２に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

[請求項4] 該物体の周辺を囲んで実質的に既知の完全偏光状態を包含する偏光状態の光を一様に入射させる照明装置が、空間的に特定された入射光線

を計測基準原点として含み、偏光画像検出装置によって特定した反射点における偏光楕円の観測値から、該反射面の光学的性質を特定できるものであることを特徴とする請求項１～３のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

[請求項5] 該物体表面で反射し特定の方位角に射出された光線群の偏光楕円を検知する偏光画像検出装置が、実質的に同一な偏光楕円を有する光線群の方位角範囲を抽出できる機構を備えることを特徴とする請求項１～４のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

[請求項6] 該物体表面で反射し特定の方位角に射出された光線群の偏光楕円を検知する偏光画像検出装置が、反射光を空間的に少なくとも３以上の複数に分割し、互いに異なった特定の偏光楕円を検出できる検光子を複数割り当てて、偏光楕円を並列に同時検知する構造を有していることを特徴とする請求項１～５のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

[請求項7] 反射光を偏光ビームスプリッターで直進するp成分と反射されるs偏光成分とに分割せしめ、それぞれを、結像レンズにより、２次元検出器上に結像せしめて、直交偏光像出力として物体像が取り出される直交直線偏光像検知ユニットを備えていることを特徴とする請求項１～６のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

[請求項8] 該物体表面で反射し特定の方位角に射出された光線群の偏光楕円を検知する偏光画像検出装置が、物体の縮小投影像を得ることで物体表面の光線位置を特定する機構を有するものであることを特徴とする請求項１～７のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

[請求項9] 該物体表面で反射し特定の方位角に射出された光線群の偏光楕円を検知する偏光画像検出装置が、物体の拡大投影像を得ることで物体表面の光線位置を特定する機構を有するものであることを特徴とする請求項１～７のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装

置。

[請求項10] 該物体表面で反射し特定の方位角に射出された光線群の偏光楕円を検知する偏光画像検出装置が、コリメーターを備えることで物体表面の光線位置を特定する機構を有するものであることを特徴とする請求項１～７のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

[請求項11] 該物体表面で反射し特定の方位角に射出された光線群の偏光楕円を検知する偏光画像検出装置が、該装置を実質的に無限遠方に配置することで物体表面の光線位置を特定する機構を有するものであることを特徴とする請求項１～７のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

[請求項12] 該物体表面で反射し特定の方位角に射出された光線群の偏光楕円を検知する偏光画像検出装置が、ピンホールを備えることで物体表面の光線位置を特定する機構を有するものであることを特徴とする請求項１～７のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

[請求項13] 人体または乳房を包含する人体の一部分を検知及び／又は計測物体とし、悪性腫瘍を包含する各種の病変によって引き起こされる表面傾斜角の特異的変化を検知特定するものであるマンモグラフィーを包含する医療診断装置であることを特徴とする請求項１～１２のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

[請求項14] 患者を包含する観察物体の姿勢変化を包含する力学的処理によって、所定の応力による変形を与え、変形前後での傾斜角の変化を検知及び／又は計測することで力学的な特性を抽出することを特徴とする請求項１～１３のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

[請求項15] 照明光を白色光として、皮膚を包含する観察物体表面からの侵入深さが波長とともに変化することを考慮した実質的な反射面として、該反射面の光学特性の変化を検知及び／又は計測することを特徴とする請

求項１～１４のいずれか一に記載の形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置。

[請求項16] 物体の表面の反射光学特性を用いて観察物体の表面形状や傾斜を検知及び／又は計測する光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法であって、照明装置により、該物体の周辺を囲んで実質的に既知の完全偏光状態を包含する偏光状態の光を一様に入射せしめ、該物体表面で正反射し特定の方位角に射出された光線群の完全偏光成分を包含する偏光成分の偏光楕円を偏光画像検出装置で検知し、反射射出された光線ごとに、その入射点を成す該物体の反射面について、偏光楕円の観測方位角値から入射面の方位を知り且つ偏光楕円の楕円率理論値を包含する偏光楕円の楕円率値から入射角度を知ることによって反射面の射出光線に対する傾斜角を測定し、測定された傾斜角が該物体表面で滑らかに変化することを利用し、物体情報を抽出することを特徴とする光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法。

[請求項17] 人体または乳房を包含する人体の一部分を検知及び／又は計測物体とし、悪性腫瘍を包含する各種の病変によって引き起こされる表面傾斜角の特異的変化を検知特定するものであることを特徴とする請求項１６に記載の光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法。

[請求項18] 患者を包含する観察物体の姿勢変化を包含する処理によって、所定の変形を与え、変形前後での傾斜角の変化を検知及び／又は計測することを特徴とする請求項１６又は１７に記載の光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法。

[請求項19] 照明光を白色光として、皮膚を包含する観察物体表面からの侵入深さが波長とともに変化することを考慮した実質的な反射面として、該反射面の光学特性の変化を検知及び／又は計測することを特徴とする請求項１６～１８のいずれか一に記載の光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法。

[請求項20] 物体の表面の反射光学特性を用いて観察物体の表面形状や傾斜を検知

及び／又は計測する形状・傾斜検知及び／又は計測光学装置において、該物体の周辺を囲んで実質的に既知の完全偏光状態を包含する偏光状態の光を一様に入射させる照明装置と、該物体表面で反射し特定の方位角に射出された光線群の完全偏光成分を包含する偏光成分の偏光楕円を検知する偏光画像検出装置を備え、反射射出された光線ごとに、その入射点を成す該物体の反射面、すなわち、微斜面について、偏光楕円の方位角から入射面の方位角、すなわち、接平面の法線の方位角を、そして、該偏光楕円の楕円率から反射角度、すなわち、入射角度を、それぞれ知ることによって反射面の射出光線に対する傾斜角を測定し、接平面を成す微斜面を滑らかに接続する積分操作をなすことを特徴とする形状・傾斜検知及び／又は計測法。

[請求項21] 一度の反射で起こる偏光楕円の変化の入射角依存性を利用し、観測物体表面の反射点での接平面の法線について、観測方向である軸と成す反射角と該観測方向である軸と垂直な平面への射影成分の偏角を直接に計測することを特徴とする請求項２０に記載の光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法。

[請求項22] 観測物体表面の反射点の接平面の傾斜として、観測方向である軸成分の座標での偏微分係数を決定することを特徴とする請求項２０又は２１に記載の光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法。

[請求項23] 観測物体表面の反射点の接平面の法線の傾きを計測し、物体の反射点での形状・傾斜の偏微分係数を求め、該偏微分係数の時間変化及び／又は空間変化を計測し、得られた計測値を直接利用して形状の特徴及び／又は傾斜の特徴を抽出することを特徴とする請求項２０～２２のいずれか一に記載の光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法。

[請求項24] エリプソメトリーで、観測対象試料の光学的な性質を表す光学モデルを使用して計算された複素振幅反射率比と、反射された偏光楕円の楕円率角と主軸の方位角とから求められる値Ψ, Δとを使用して、接平面の傾斜並びに観測物体の形状を計測することを特徴とする請求項２

０～２３のいずれか一に記載の光学的形状・傾斜検知及び／又は計測法。

[請求項25] 物体の形状や傾斜を計測する傾斜・形状計測法に用いる円偏光照明装置であって、内面を含む、物体表面を構成する傾斜面に円偏光を入射し、規定された観察方位に正反射される反射光線の偏光特性を用いて該傾斜面の三次元傾斜角および該傾斜面を成す該物体の形状・傾斜の計測用のもので、且つ、当該円偏光照明装置は光源装置を備えるもので、該光源装置は、該物体に正対する平面または曲面から成る円形または矩形、あるいは、その組み合わせの、多面体形状の照明区画を有し、該区画が、物体の外面を囲む凹面、または、物体の内面に向けた凸面で構成され、該区画を通して該物体に向けて実質的完全円偏光を包含する円偏光を照射でき且つ該物体表面に入射させる円偏光光線群が、反射の法則に従って観測方位に正反射できる全ての入射光線成分を含むようにせしめる光源装置であることを特徴とする円偏光照明装置。

[請求項26] 前記照明区画を有する光源装置が、光源、光を該区画に導く光学素子、および、円偏光子をこの順に含み、所定の偏光度の完全円偏光を包含する円偏光を該区画から所定の角度範囲の入射角光線束として射出できる機能を具備せしめるものであることを特徴とする請求項２５に記載の円偏光照明装置。

[請求項27] 前記照明区画を有する光源装置が、実質的に偏光度99%以上の円偏光光束群を該物体に照明できることを特徴とする請求項２５または２６に記載の円偏光照明装置。

[請求項28] 前記光源装置の照明区画が円に内接する正多角形のいずれか、または、その組み合わせから成る多面体区画を成すものであることを特徴とする請求項２５～２７のいずれか一に記載の円偏光照明装置。

[請求項29] 前記光源装置が、光ファイバー素子を所定の角度に配置して照明区画に垂直に入射させるものであることを特徴とする請求項２５～２８の

いずれか一に記載の円偏光照明装置。

[請求項30] 前記照明区画を有する光源装置が、少なくとも、点発光源を配列した実質的面光源、及び／又は、面発光光源と、円偏光子とを、この順に含むことを特徴とする請求項２５～２９のいずれか一に記載の円偏光照明装置。

[請求項31] 前記光源装置が少なくとも一点から発散する光束を生成する光源機構と回転楕円体反射鏡を含み、該発散点と物体の位置を該回転楕円体反射鏡の焦点に一致させて配置して、反射によって照明光線を物体に収束せしめることで照明区画に垂直に入射させることを特徴とする請求項２５～３０のいずれか一に記載の円偏光照明装置。

[請求項32] 前記光源装置が少なくとも平行な照明光束を生成する光源機構と回転放物面鏡を含み、物体の位置を該回転放物面鏡の焦点に一致させて配置して、反射によって照明光線を物体に収束せしめることで照明区画に垂直に入射させることを特徴とする請求項２５～３０のいずれか一に記載の円偏光照明装置。

[請求項33] 前記光源装置の照明区画内に照明角度原点基準を有することを特徴とする請求項２５～３２のいずれか一に記載の円偏光照明装置。

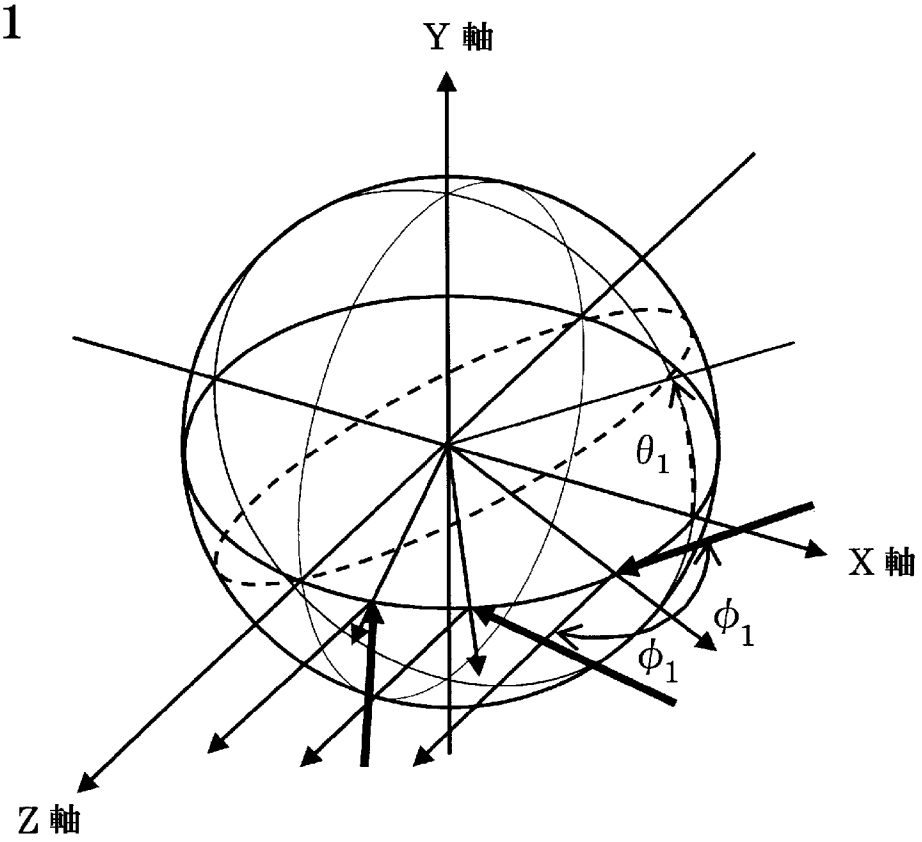
[請求項34] 照明光束の円偏光状態を右円偏光と左円偏光で時間的または空間的に選択する機能を有することを特徴とする請求項２５～３３のいずれか一に記載の円偏光照明装置。

[請求項35] 内面を含む、物体表面を構成する傾斜面に円偏光を入射し、規定された観察方位に正反射される反射光線の偏光特性を用いて該傾斜面の三次元傾斜角および該傾斜面を成す該物体の形状や傾斜を計測する傾斜・形状計測法に用いる円偏光照明手法であって、測定対象物体に正対する平面または曲面から成る円形または矩形、あるいは、その組み合わせの、多面体形状の照明区画を有しており且つ該区画が物体の外面を囲む凹面または物体の内面に向けた凸面で構成されている光源装置を使用し、該区画を通して該物体に向けて実質的完全円偏光を包含す

る円偏光を照射して、該物体表面に入射させる円偏光光線群が、反射の法則に従って観測方位に正反射できる全ての入射光線成分を含むようにすることを特徴とする円偏光照明手法。

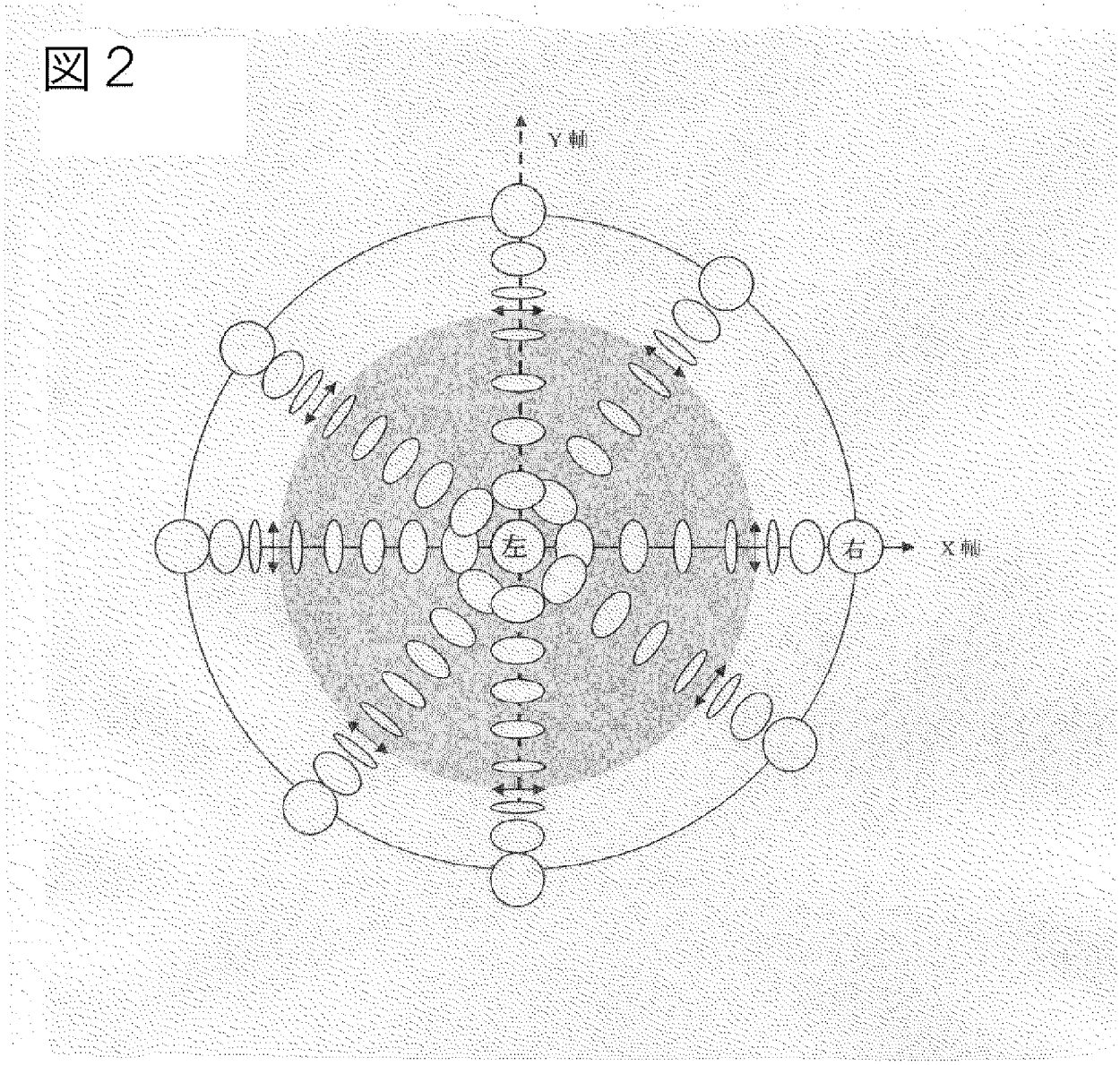
[図1]

図 1



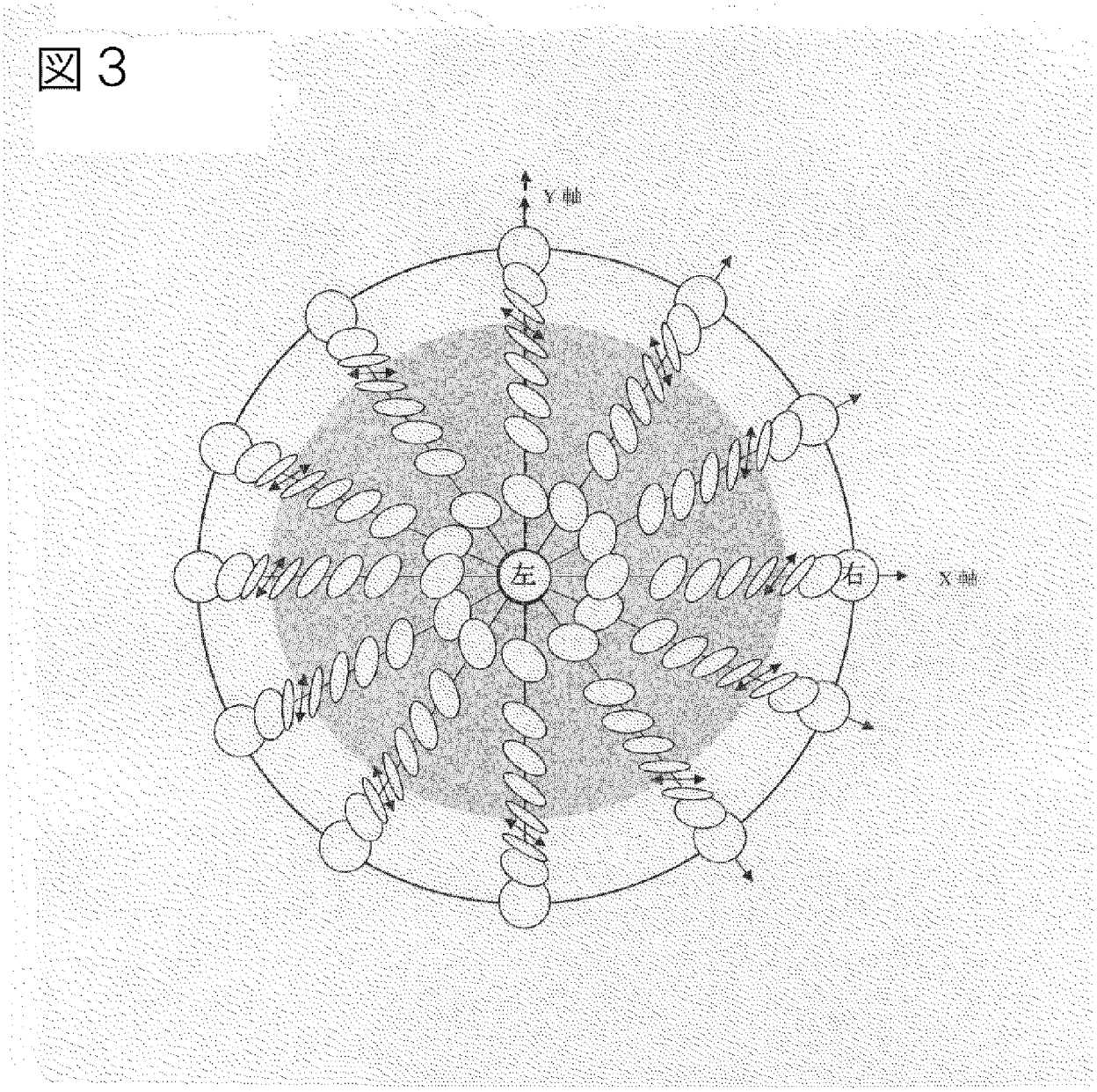
[図2]

図 2



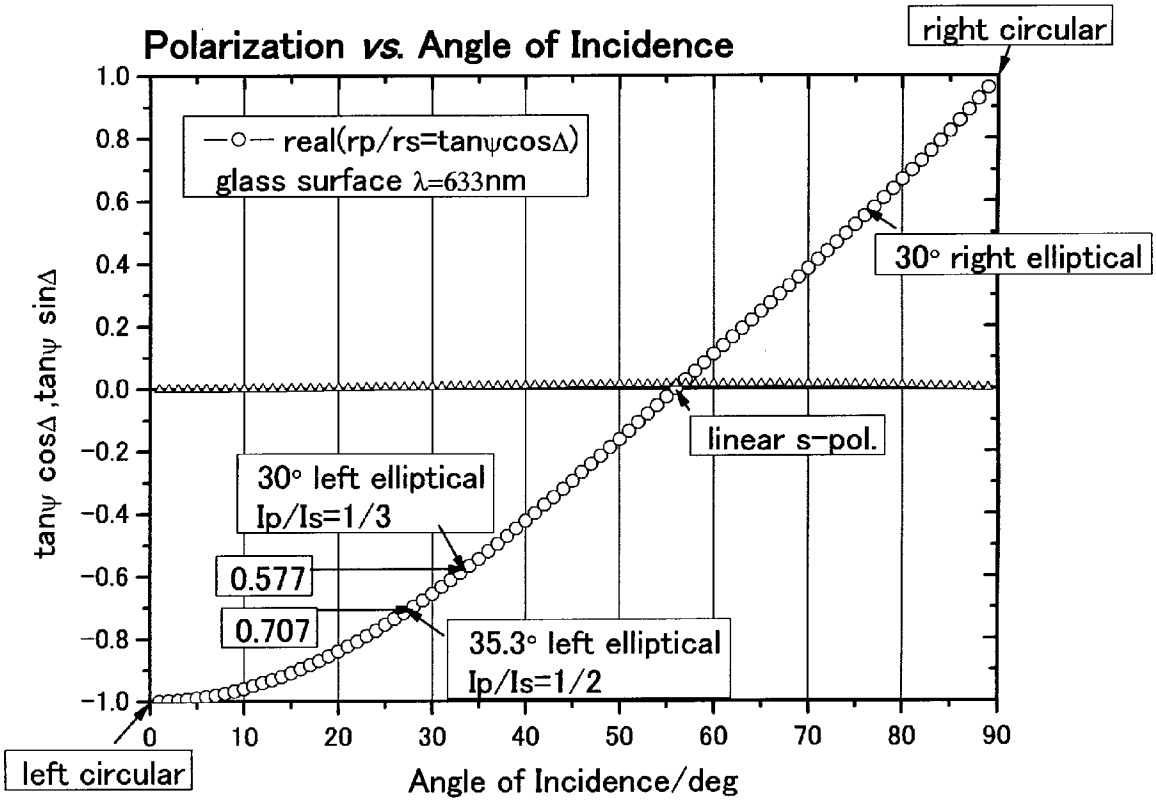
[図3]

図 3



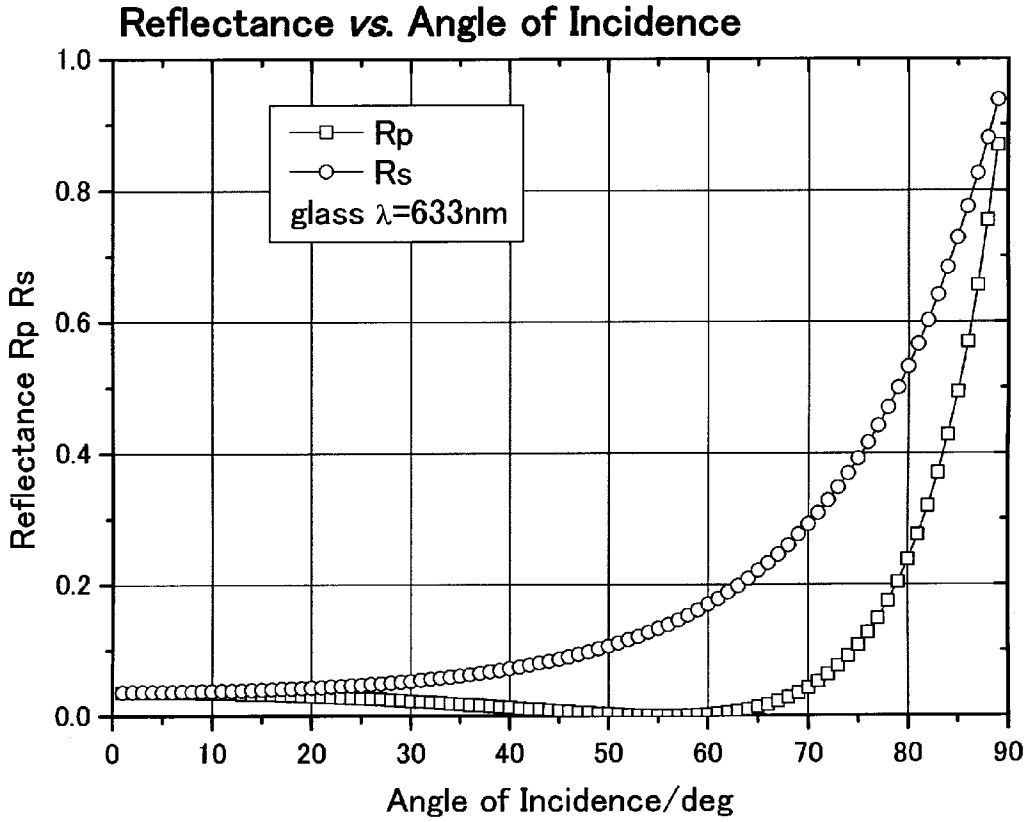
[図4]

図4


Polarization vs. Angle of Incidence
right circular
real(rp/rs=tanψcosΔ)
glass surface λ=633nm
30° right elliptical
linear s-pol.
30° left elliptical
Ip/Is=1/3
0.577
0.707
35.3° left elliptical
Ip/Is=1/2
left circular
tanψ cosΔ ,tanψ sinΔ
Angle of Incidence/deg
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
-0.2
-0.4
-0.6
-0.8
-1.0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90

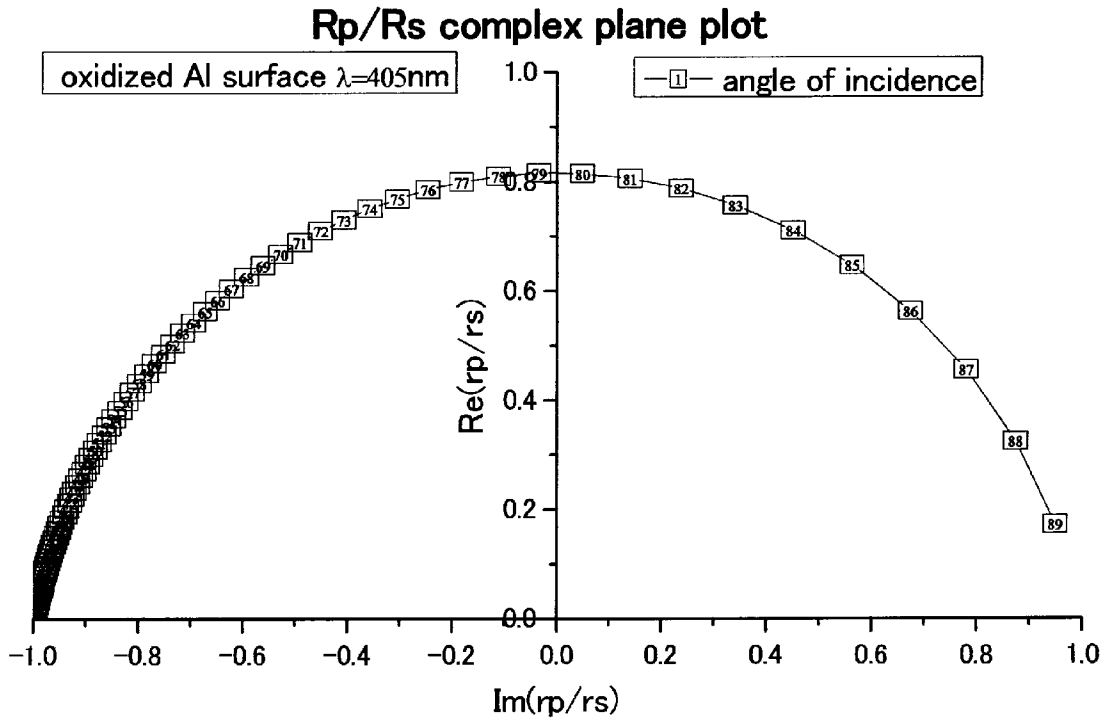
[図5]

図5


Reflectance vs. Angle of Incidence
Rp
Rs
glass λ=633nm
Reflectance Rp Rs
Angle of Incidence/deg
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90

[図6]

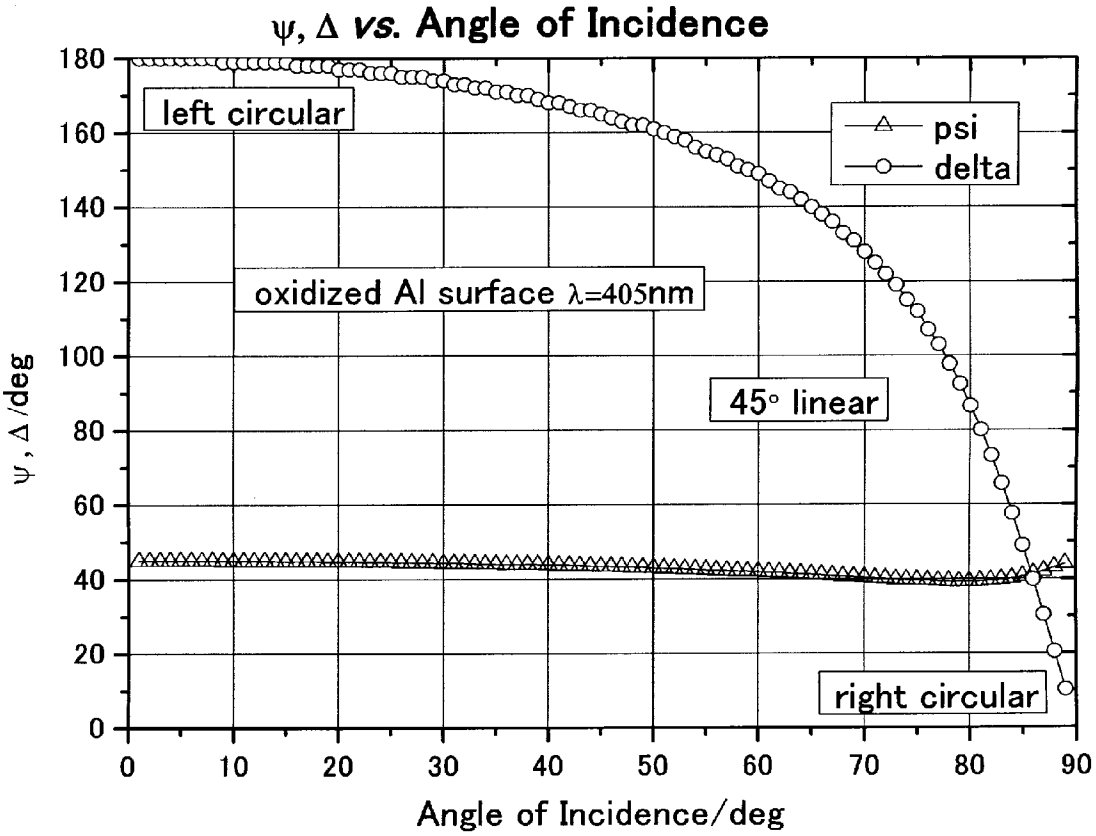
図6



R_p/R_s: 複素振幅反射率比

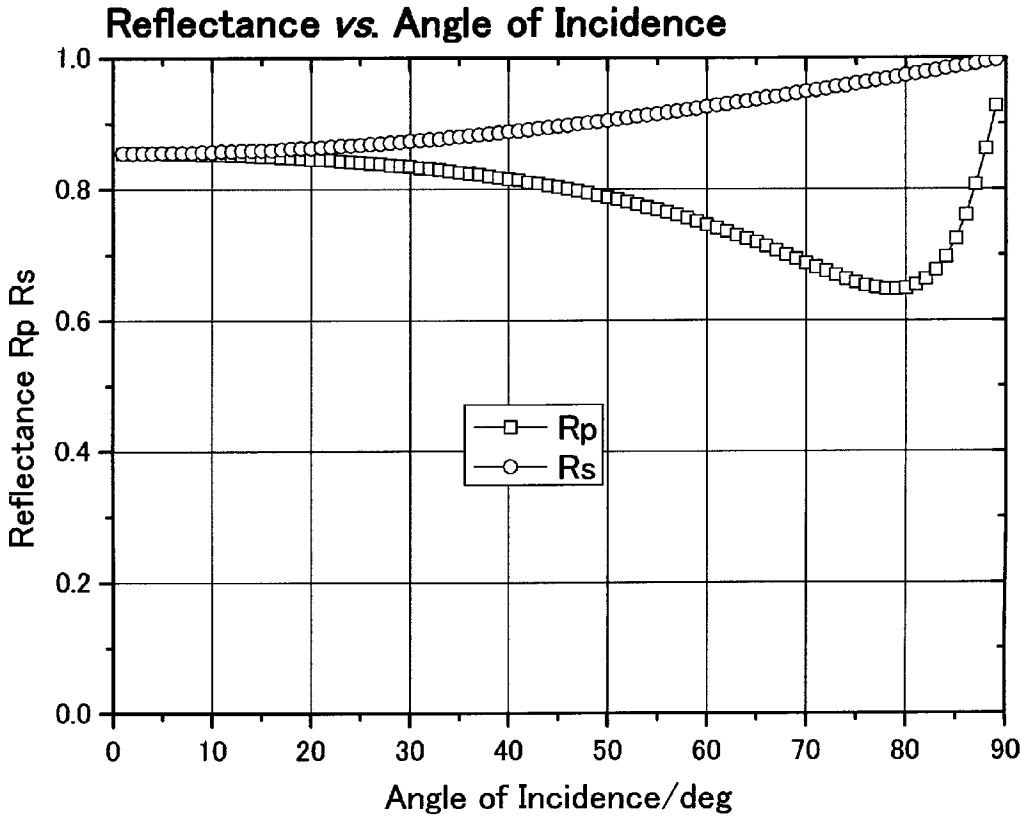
[図7]

図7


ψ, Δ vs. Angle of Incidence
left circular
psi
delta
oxidized Al surface λ=405nm
45° linear
right circular
ψ, Δ /deg
Angle of Incidence/deg
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90

[図8]

図8


Reflectance vs. Angle of Incidence
Reflectance Rp Rs
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
Angle of Incidence/deg
Rp
Rs

[図9]

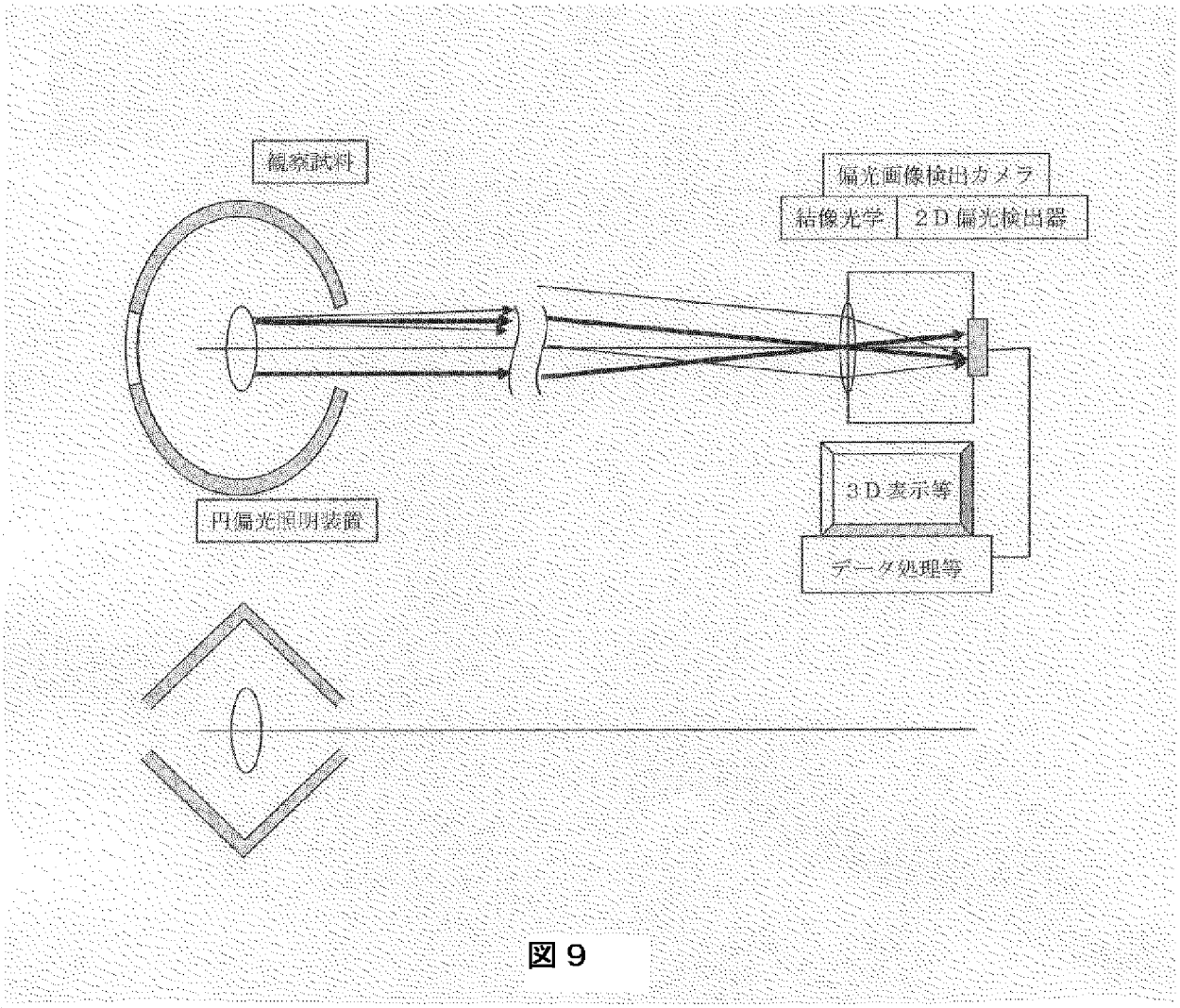

観察試料
偏光画像検出カメラ
結像光学
2D偏光検出器
3D表示等
データ処理等
円偏光照明装置

図９

[図10]

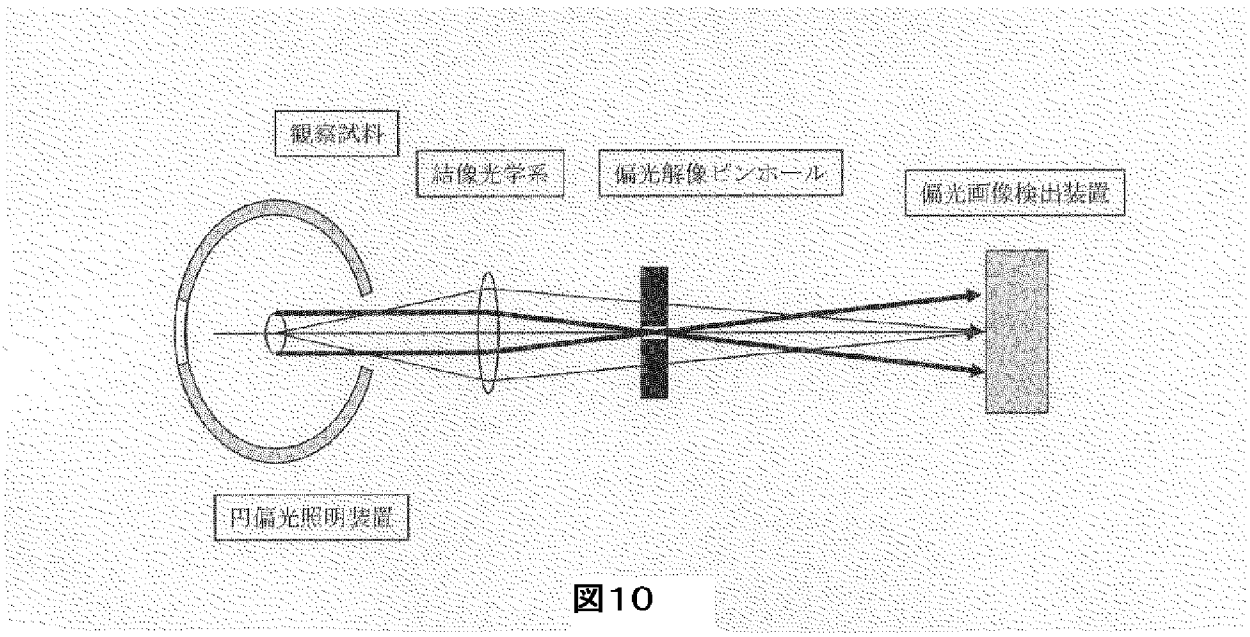

観察試料
結像光学系
偏光解像ピンホール
偏光画像検出装置
円偏光照明装置

図10

[図11]

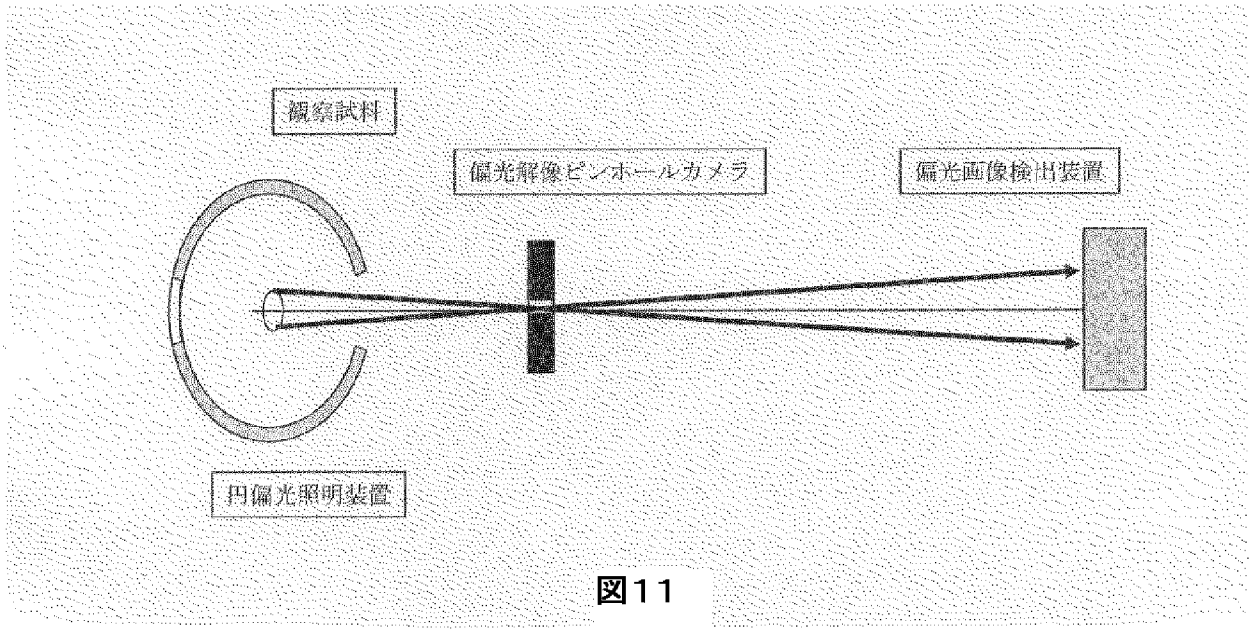


図11

[図12]

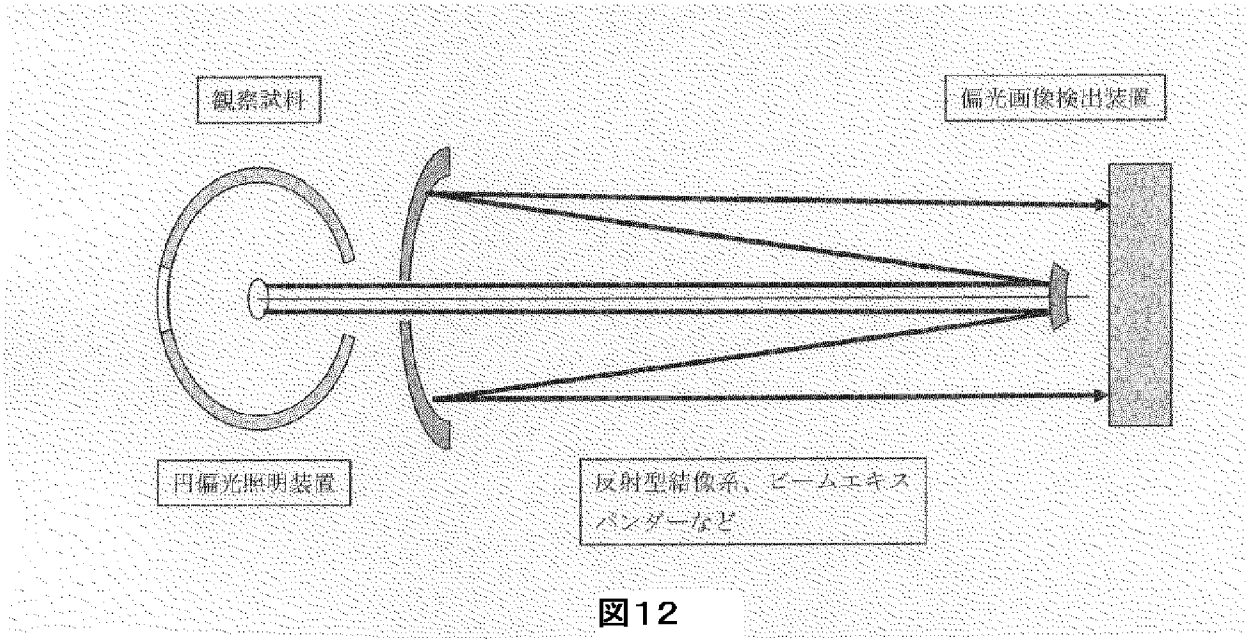


図12

[図13]

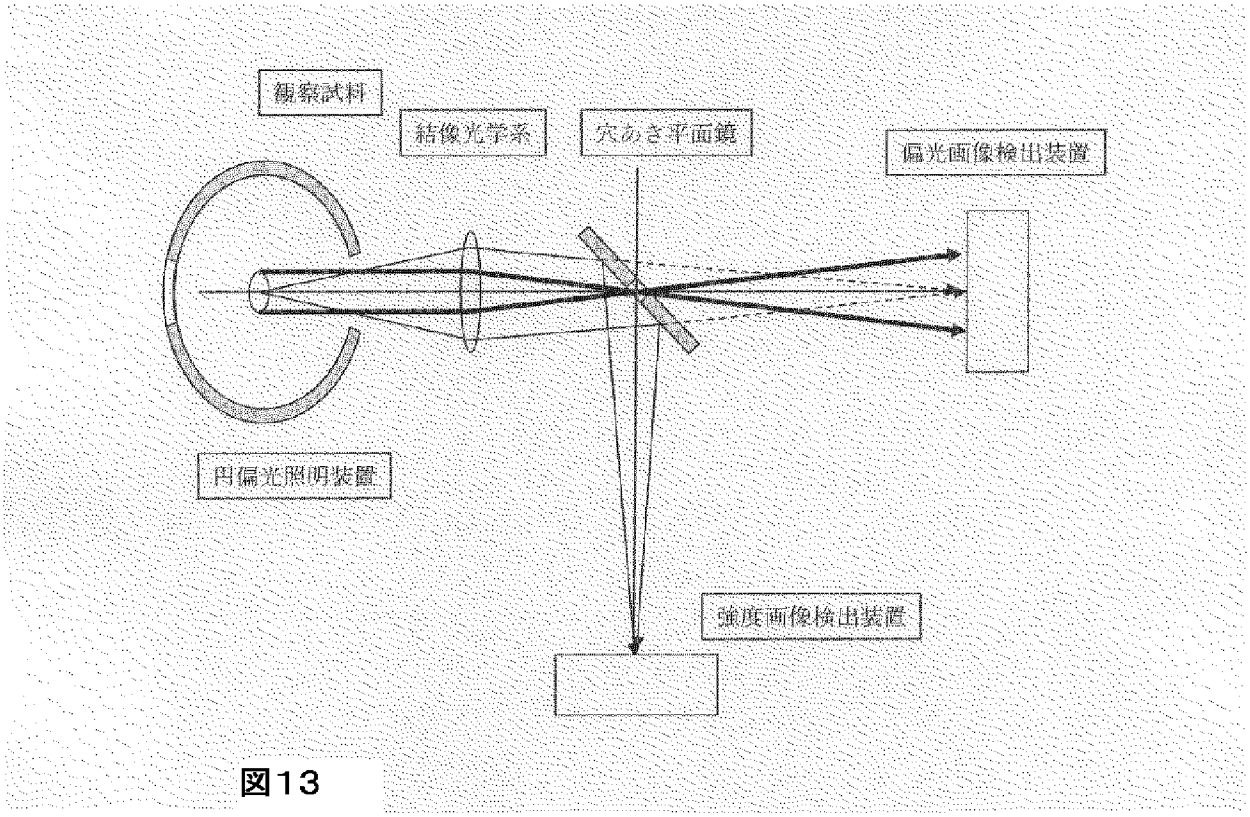


図13

[図14]

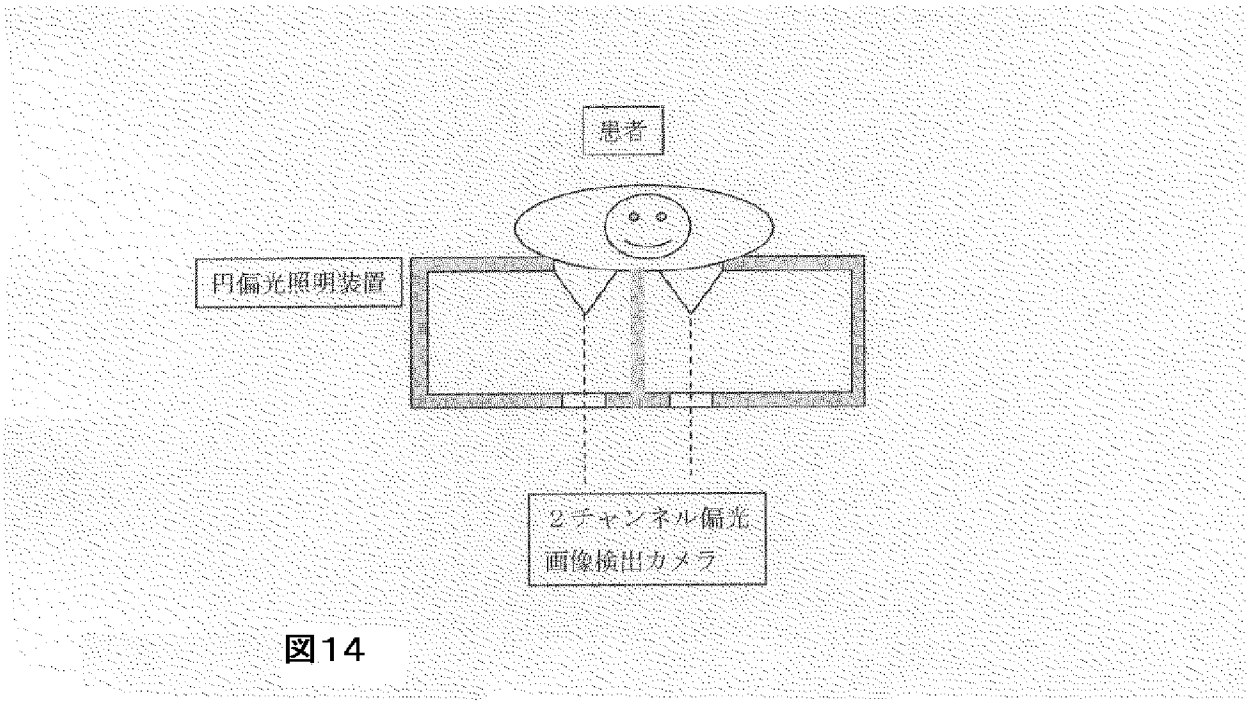


図14

[図15]

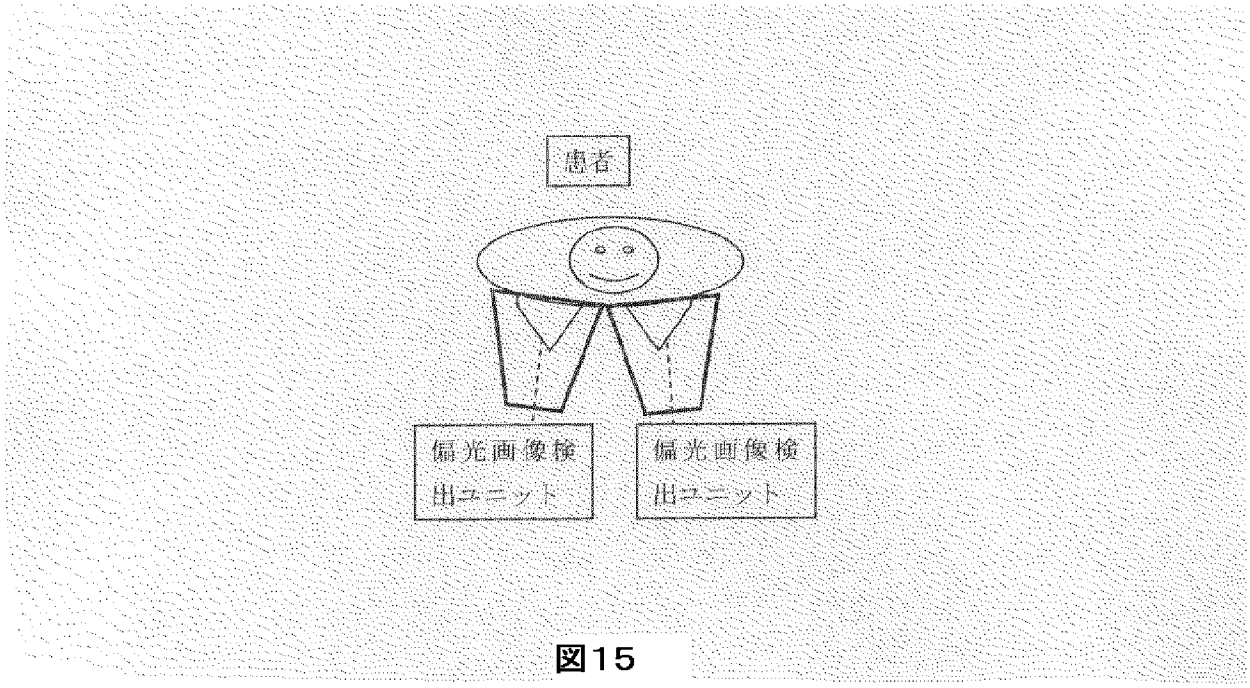


図15

[図16]

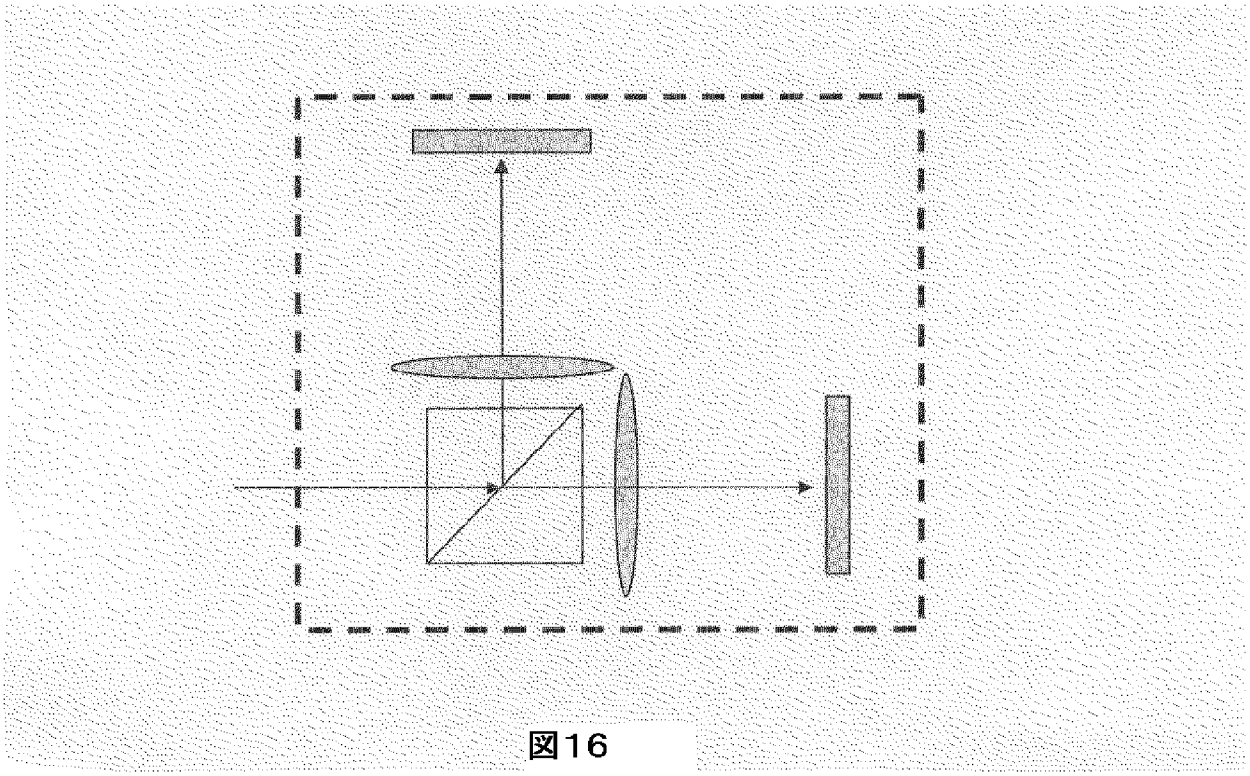


図16

[図17]

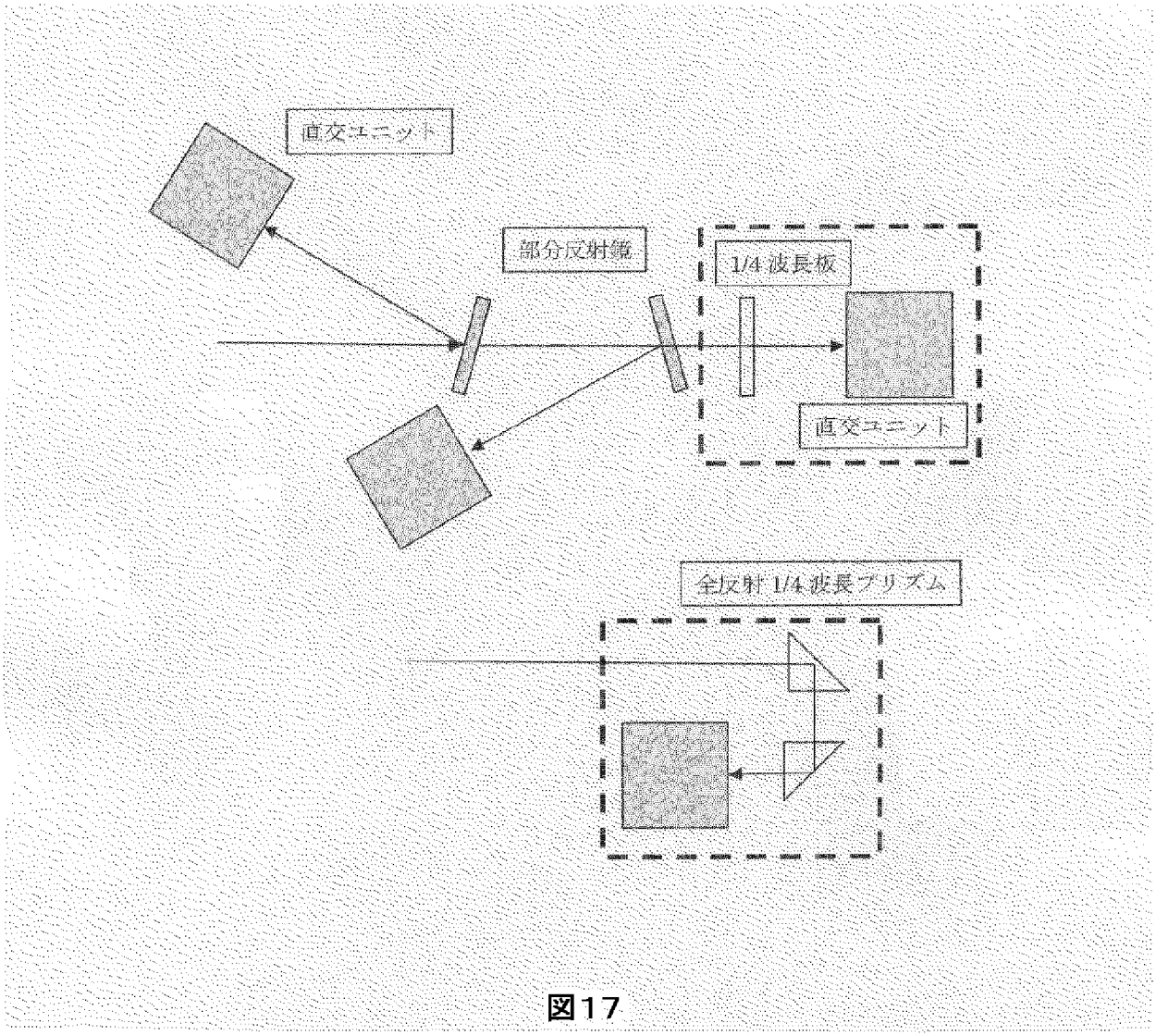


図17

[図18]

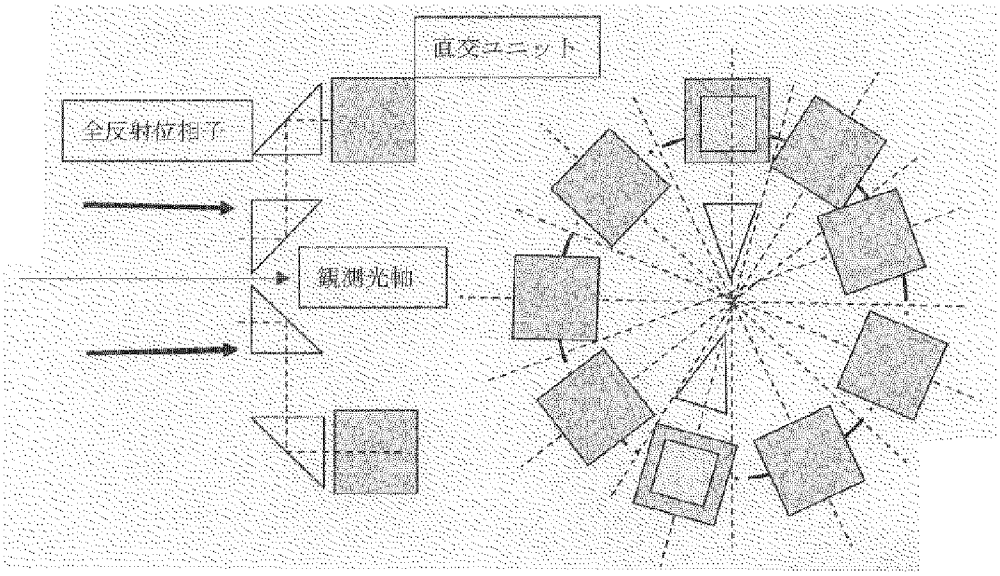


図18

[図19]

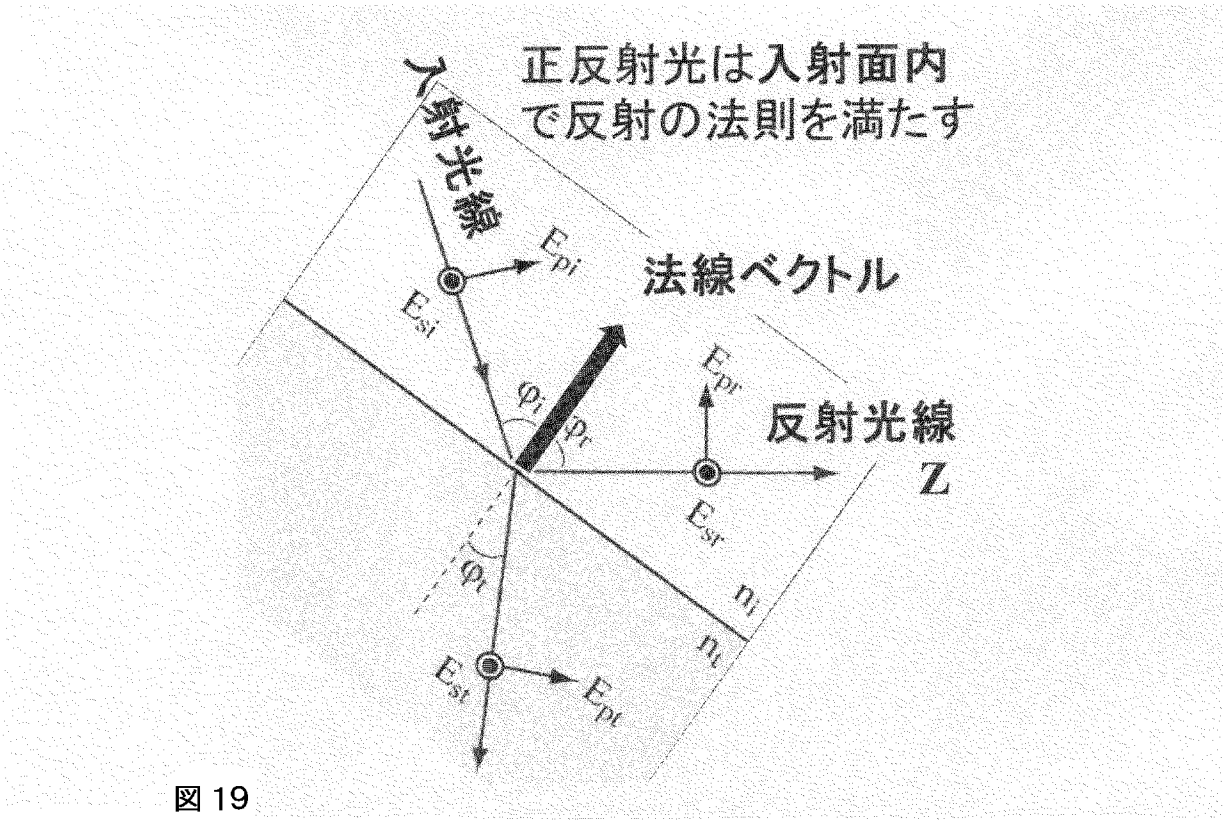


図19

[図20]

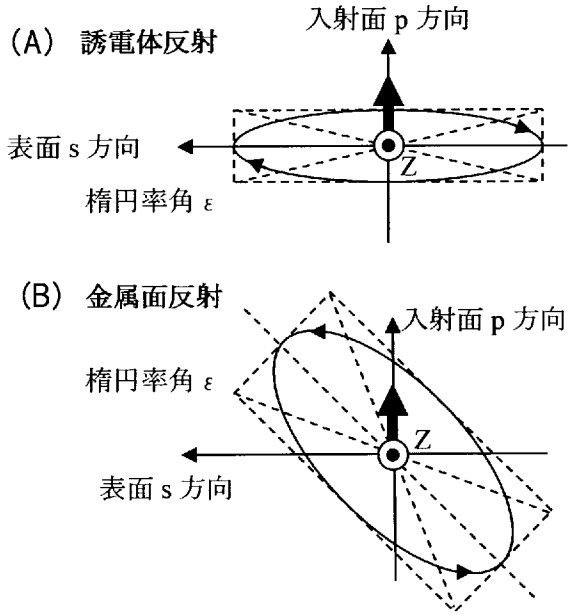


図 20

[図21]

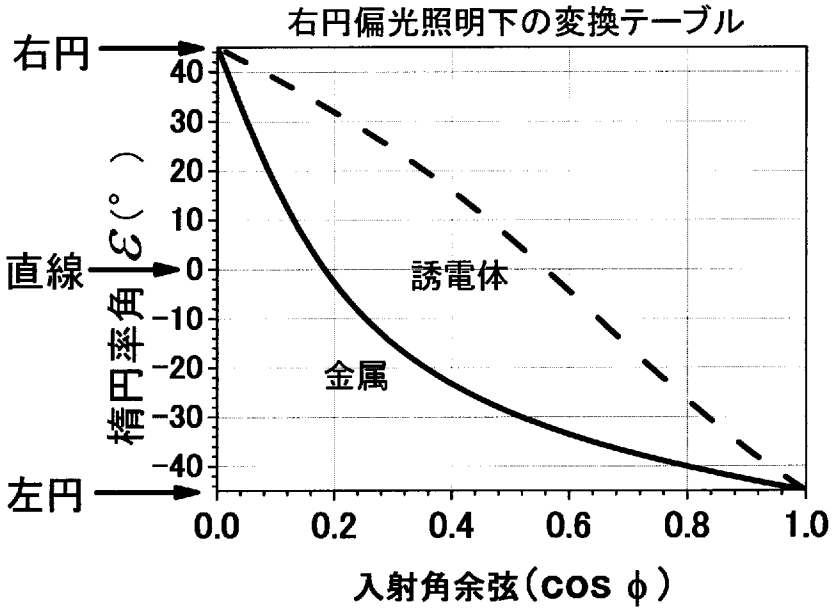


図 21

[図22]

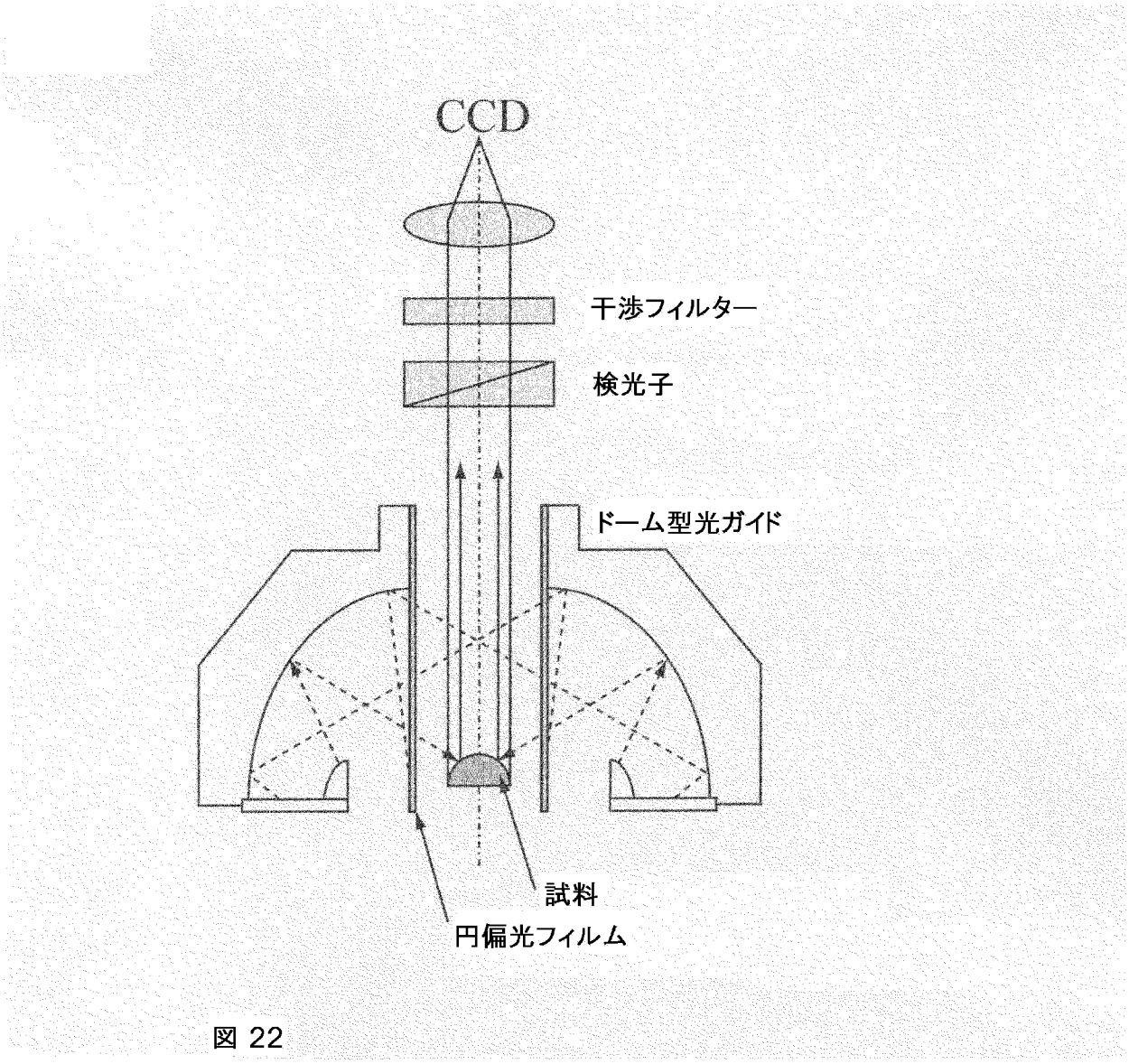
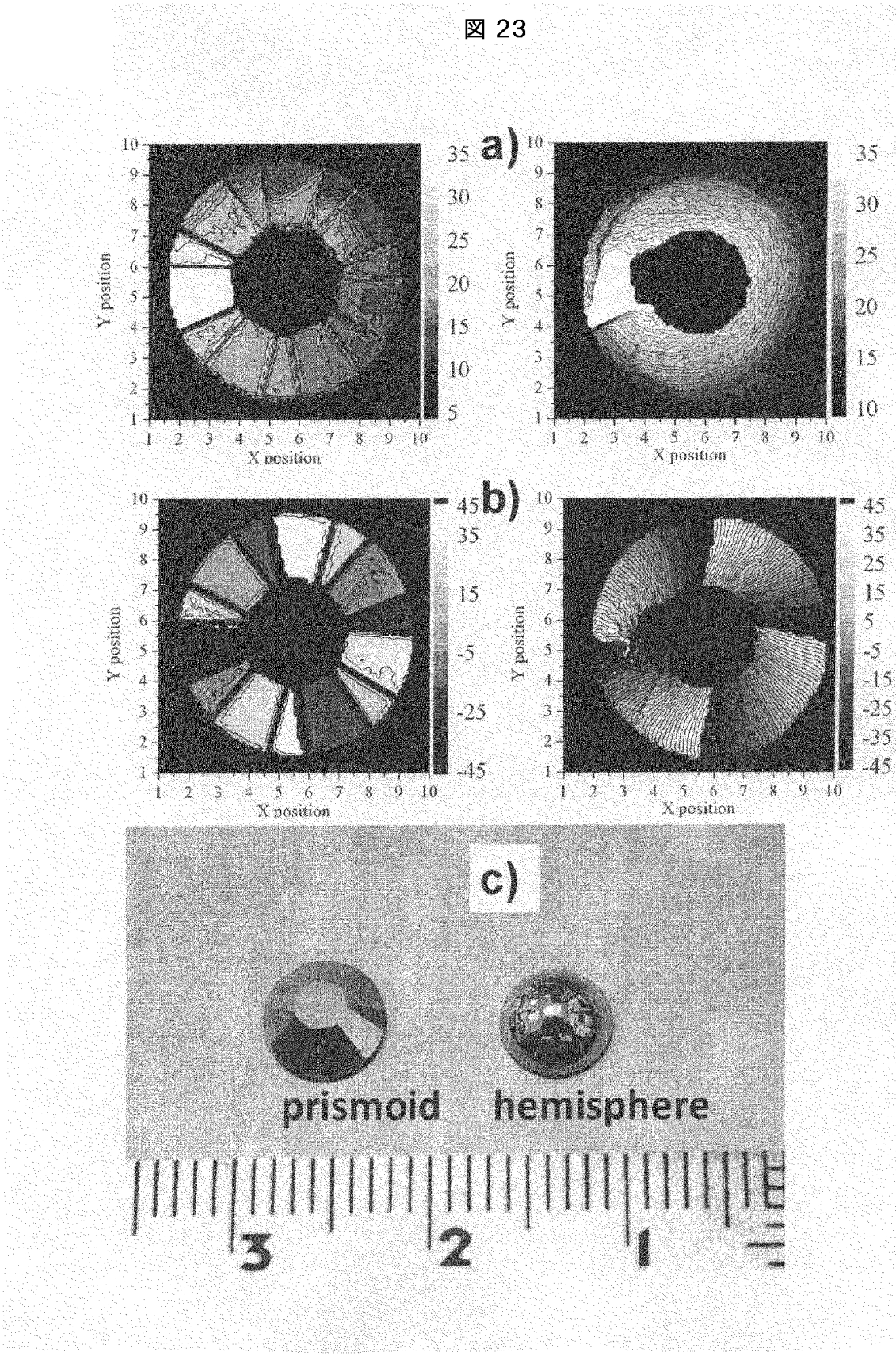


図 22

[図23]

図 23



[図24]

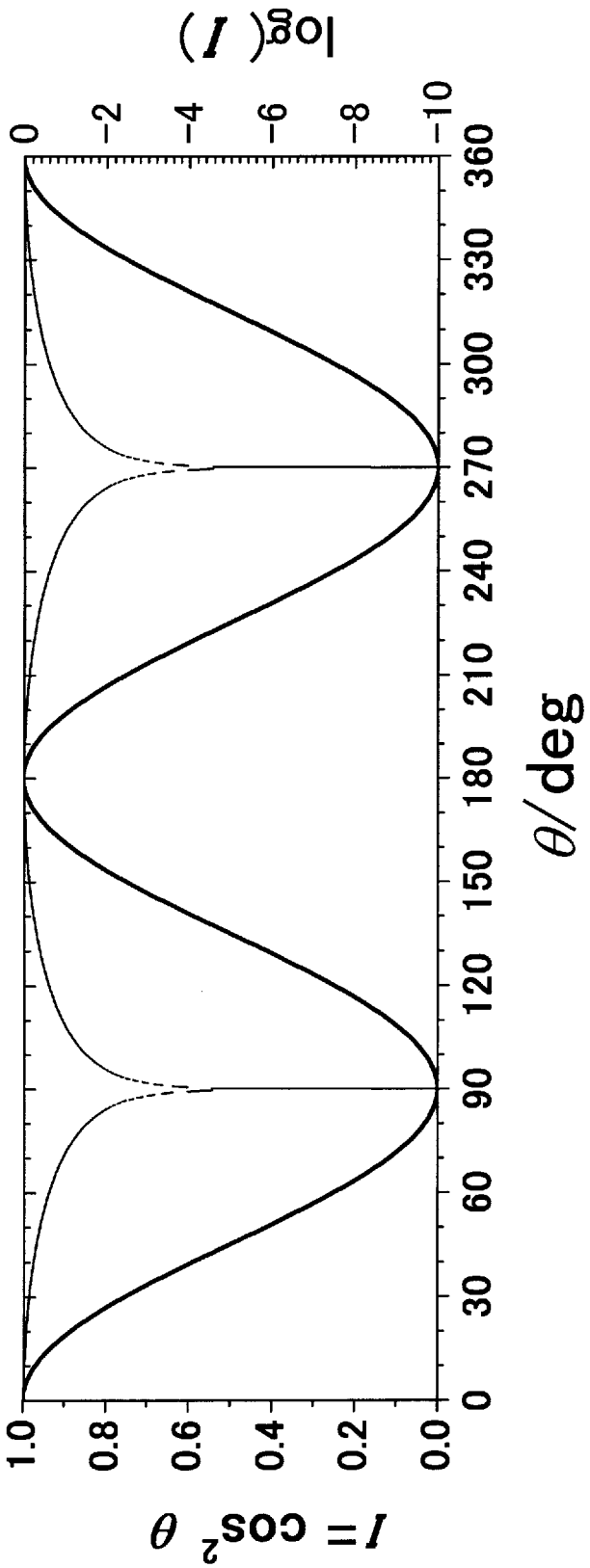
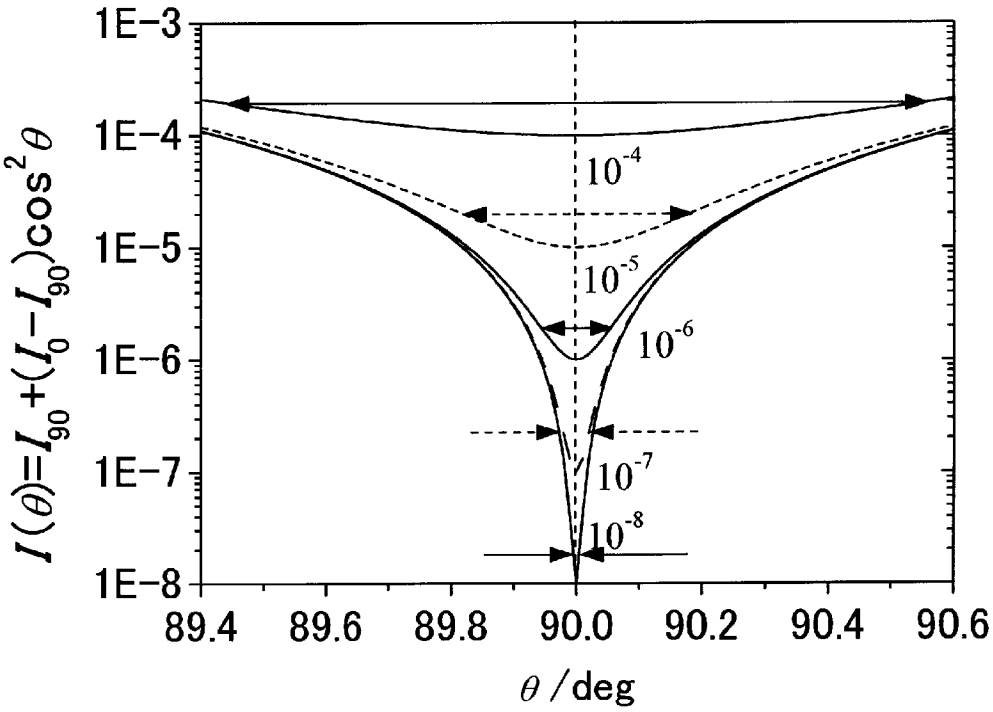

I = cos² θ
log(I)
θ/deg
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
−2
−4
−6
−8
−10
0
30
60
90
120
150
180
210
240
270
300
330
360

図 24

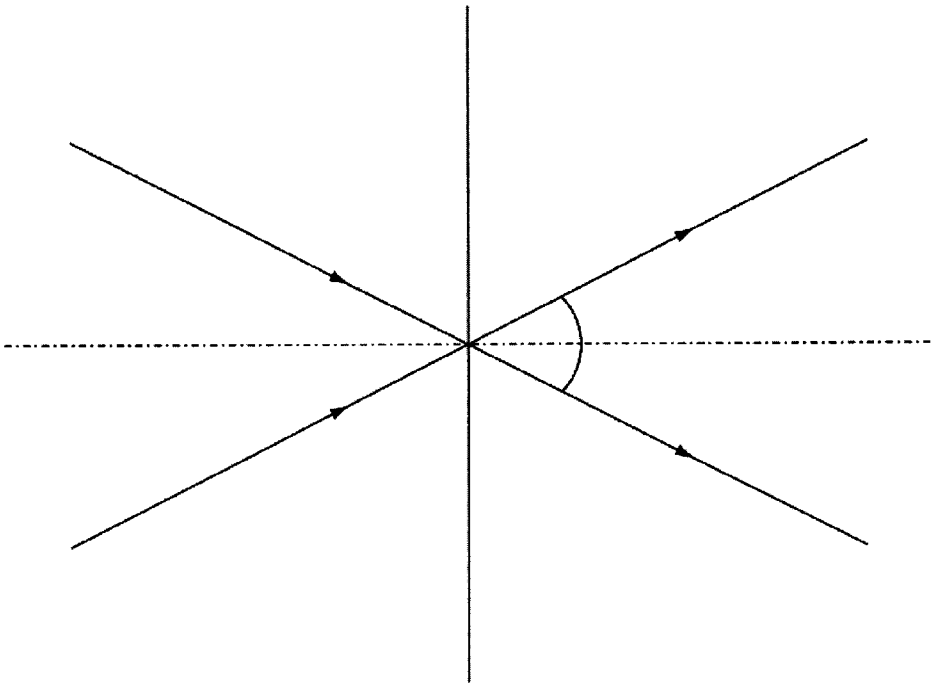
[図25]

図 25



[図26]

図 26



[図27]

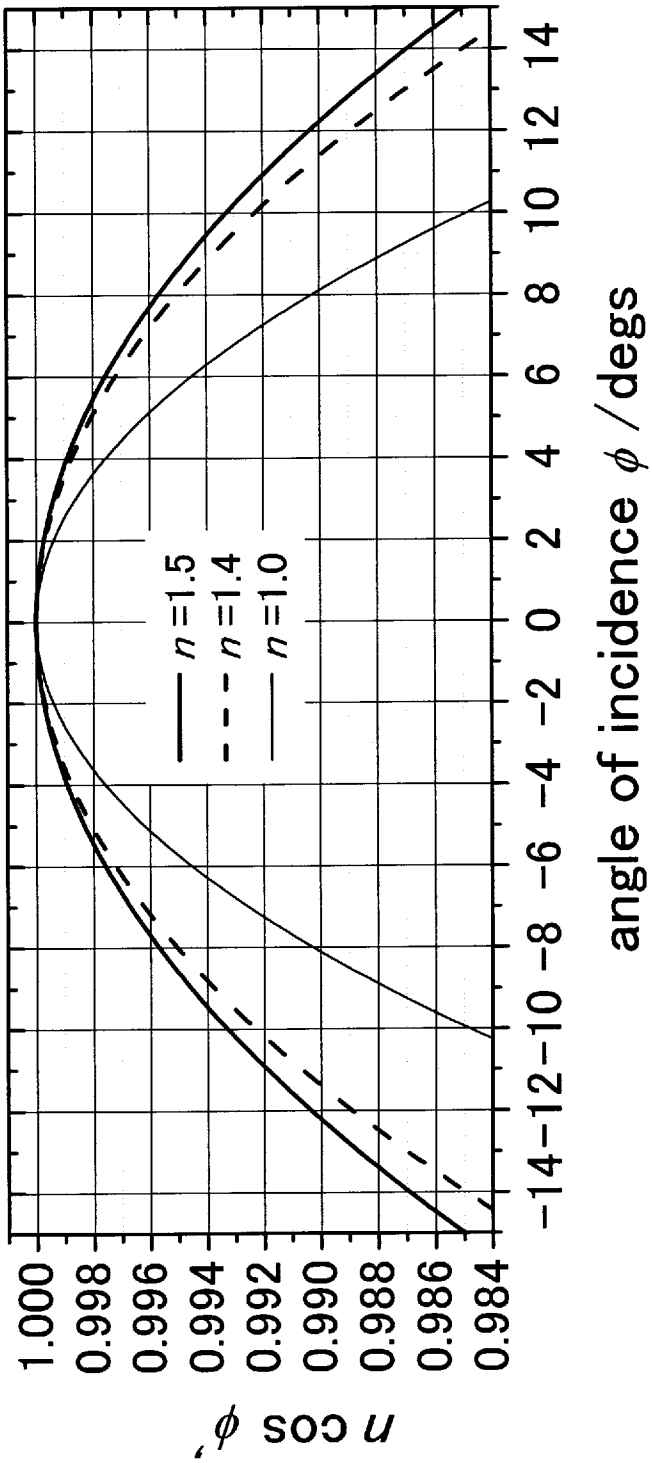

n cos φ'
1.000
0.998
0.996
0.994
0.992
0.990
0.988
0.986
0.984
−14 −12 −10 −8 −6 −4 −2 0 2 4 6 8 10 12 14
angle of incidence φ /degs
n =1.5
n =1.4
n =1.0

図 27

[図28]

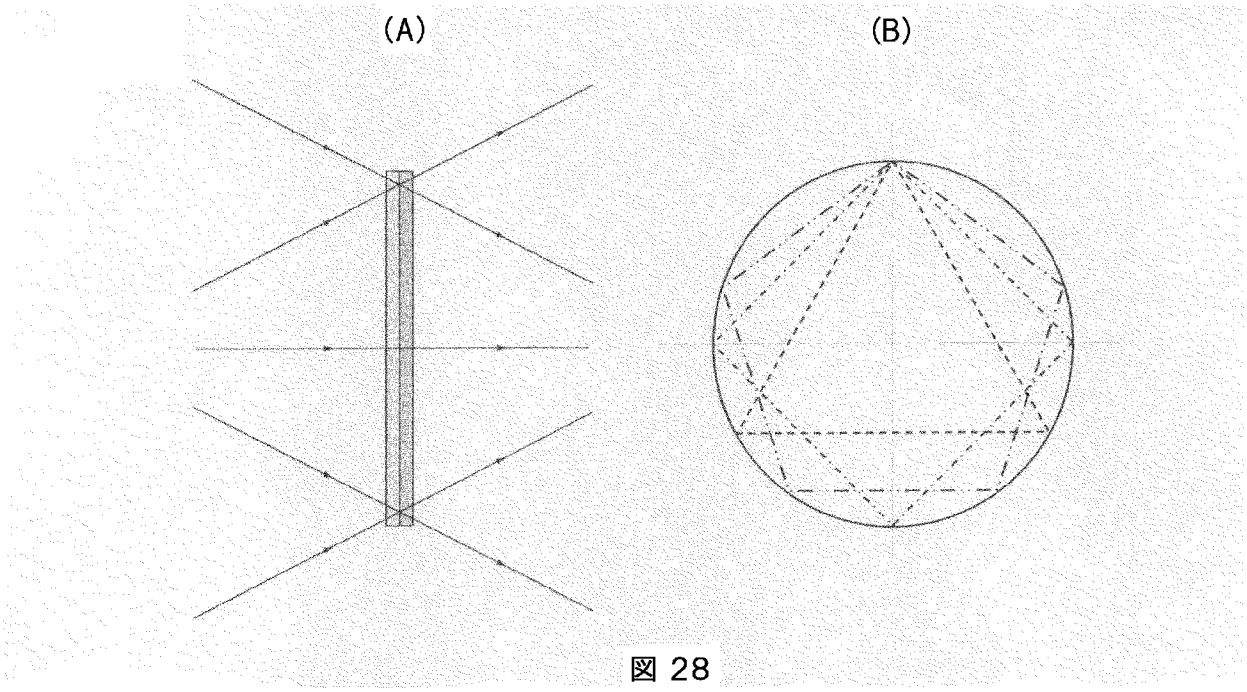


図 28

[図29]

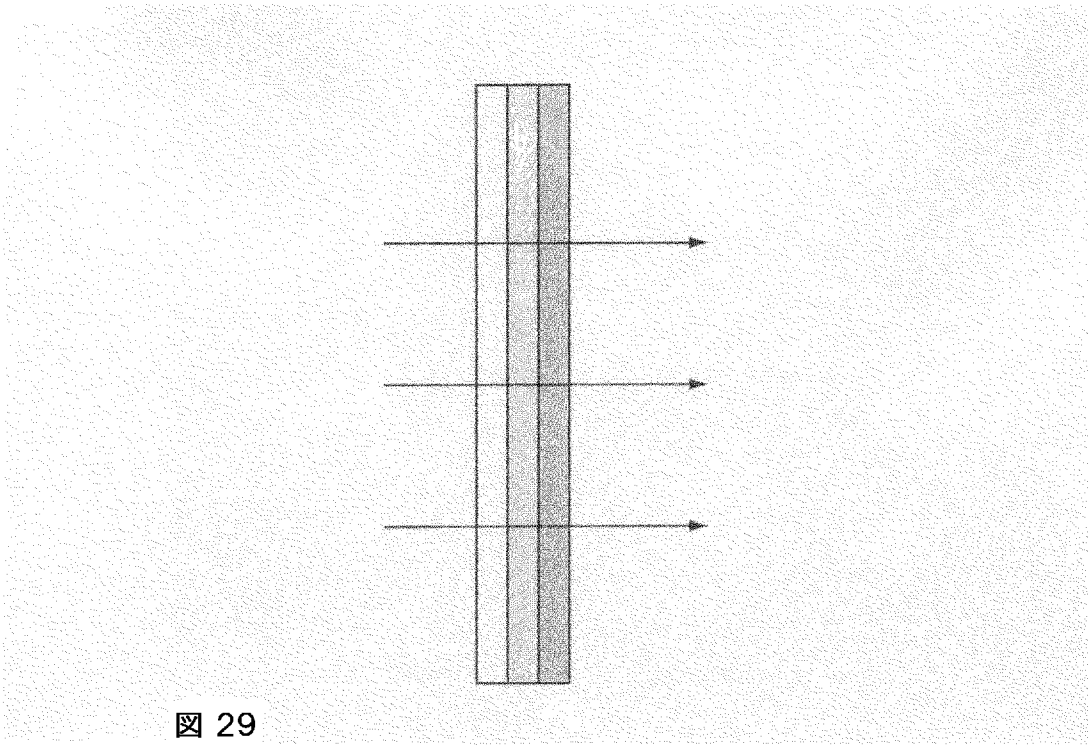


図 29

[図30]

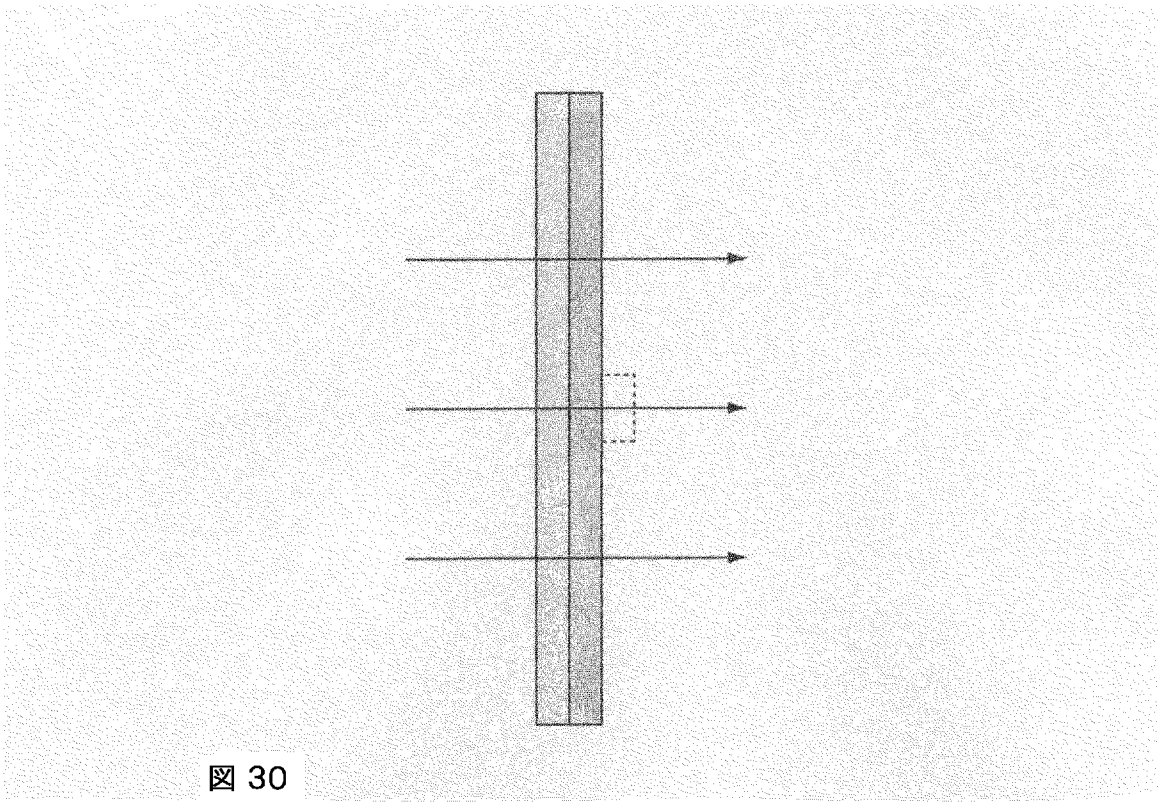


図 30

[図31]

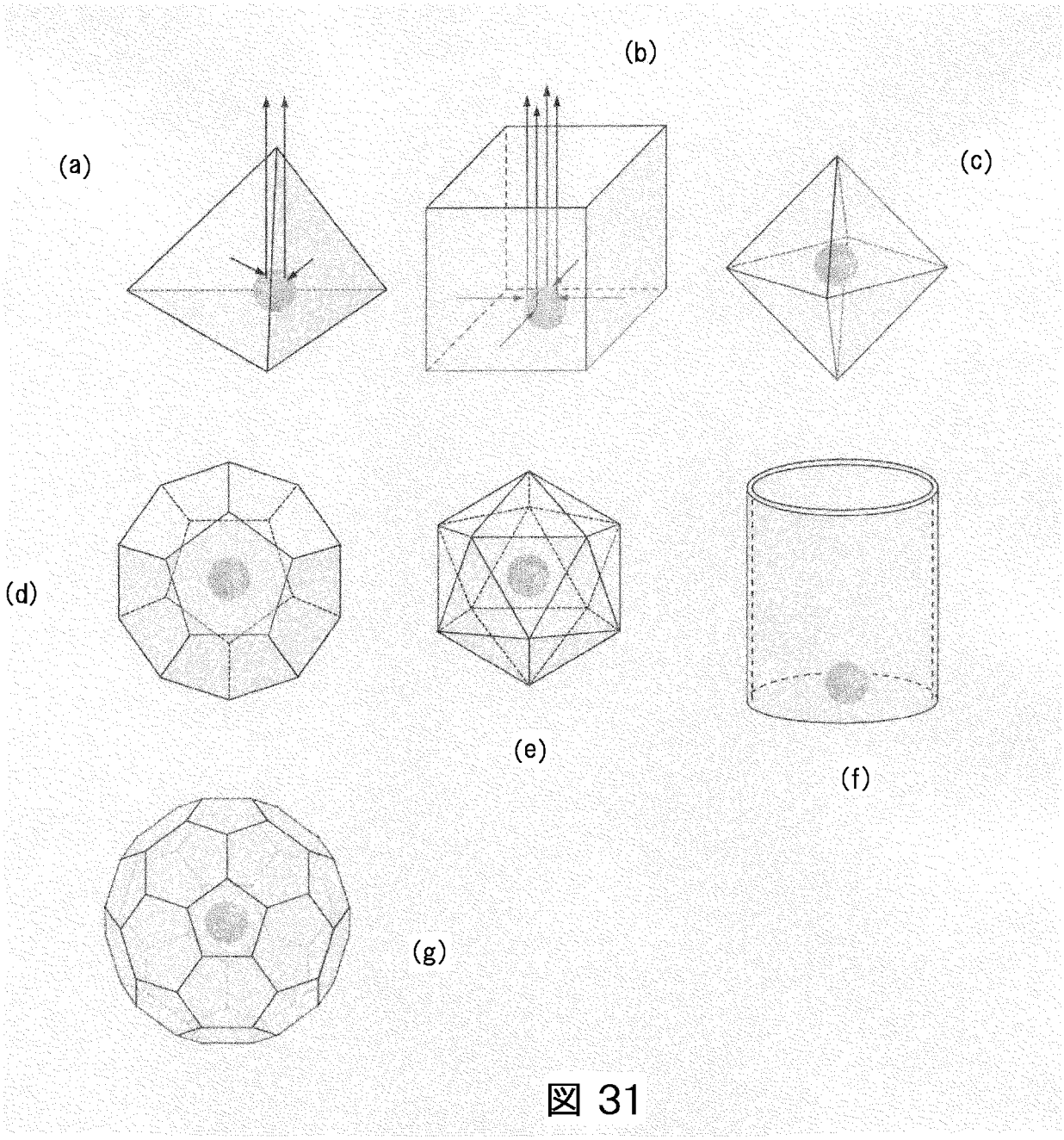


図 31

[図32]

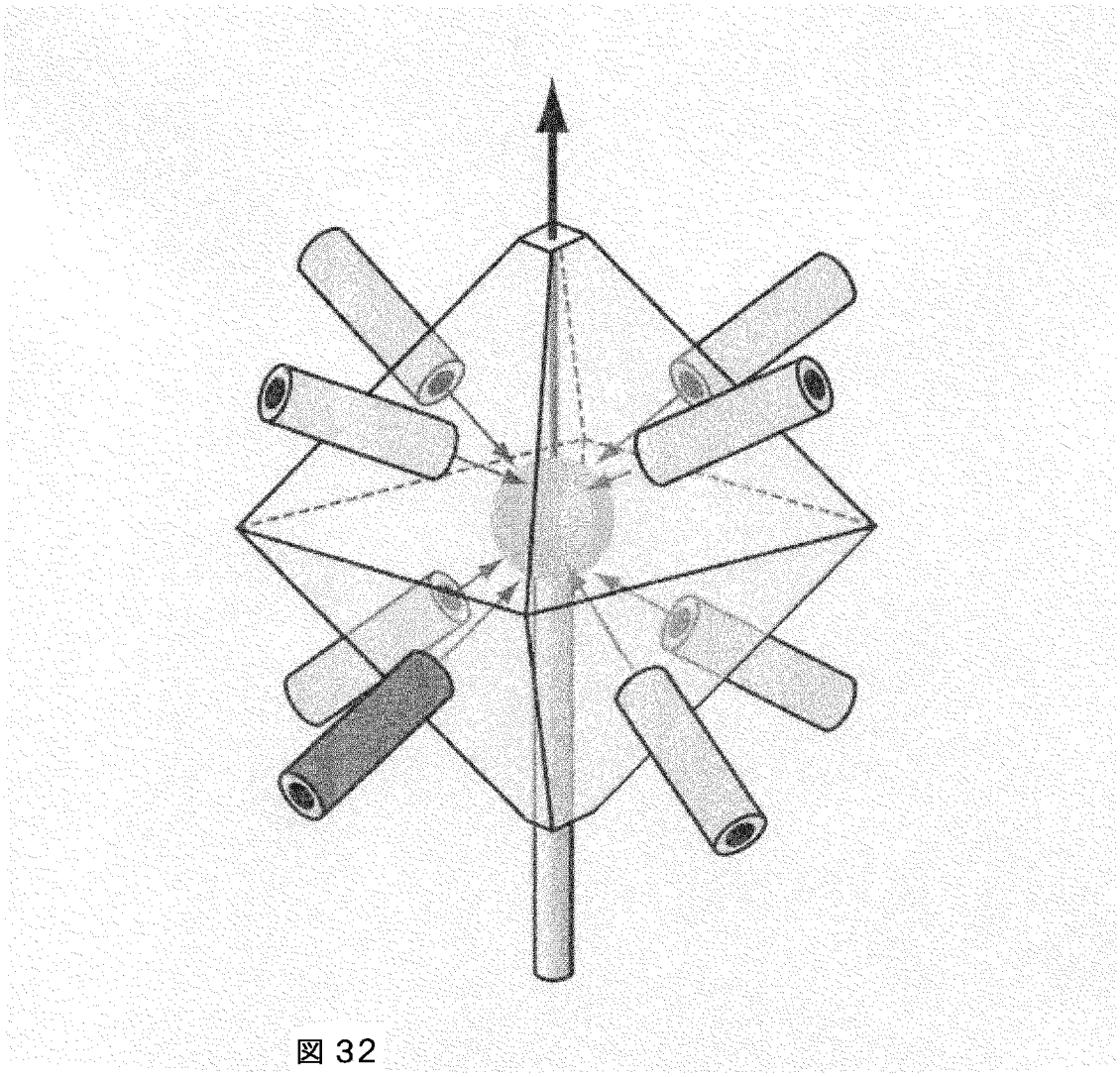


図 32

[図33]

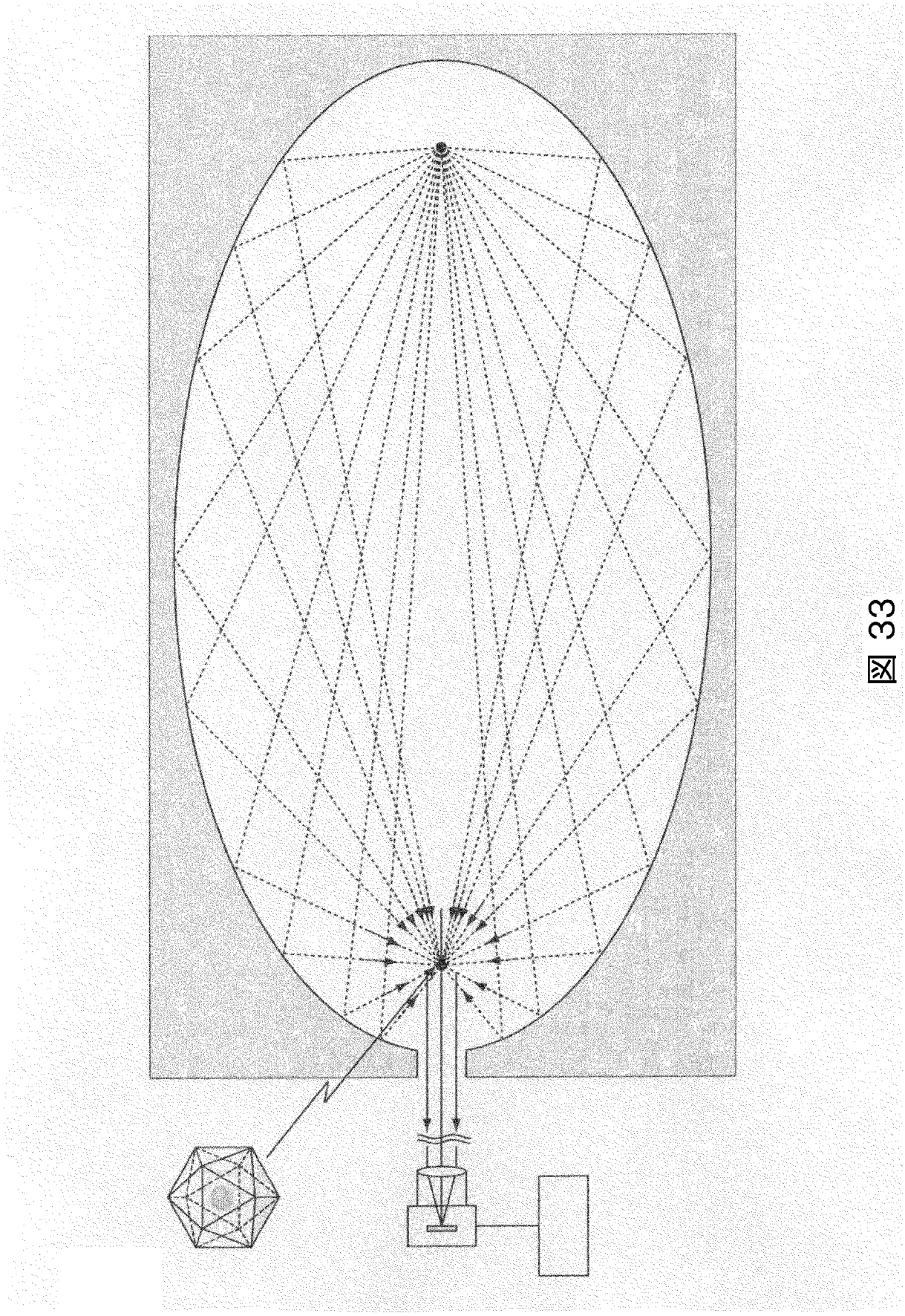


図 33

[図34]

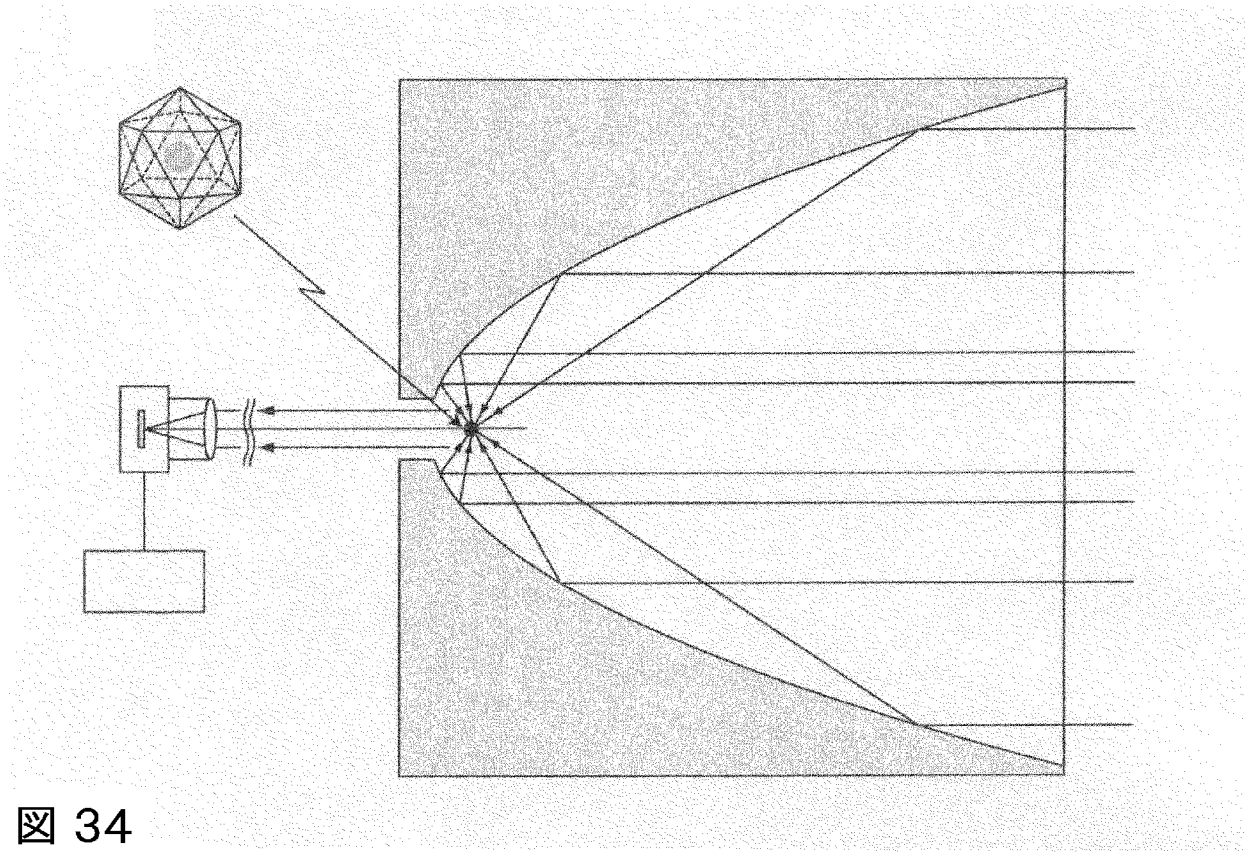


図 34

[図35]

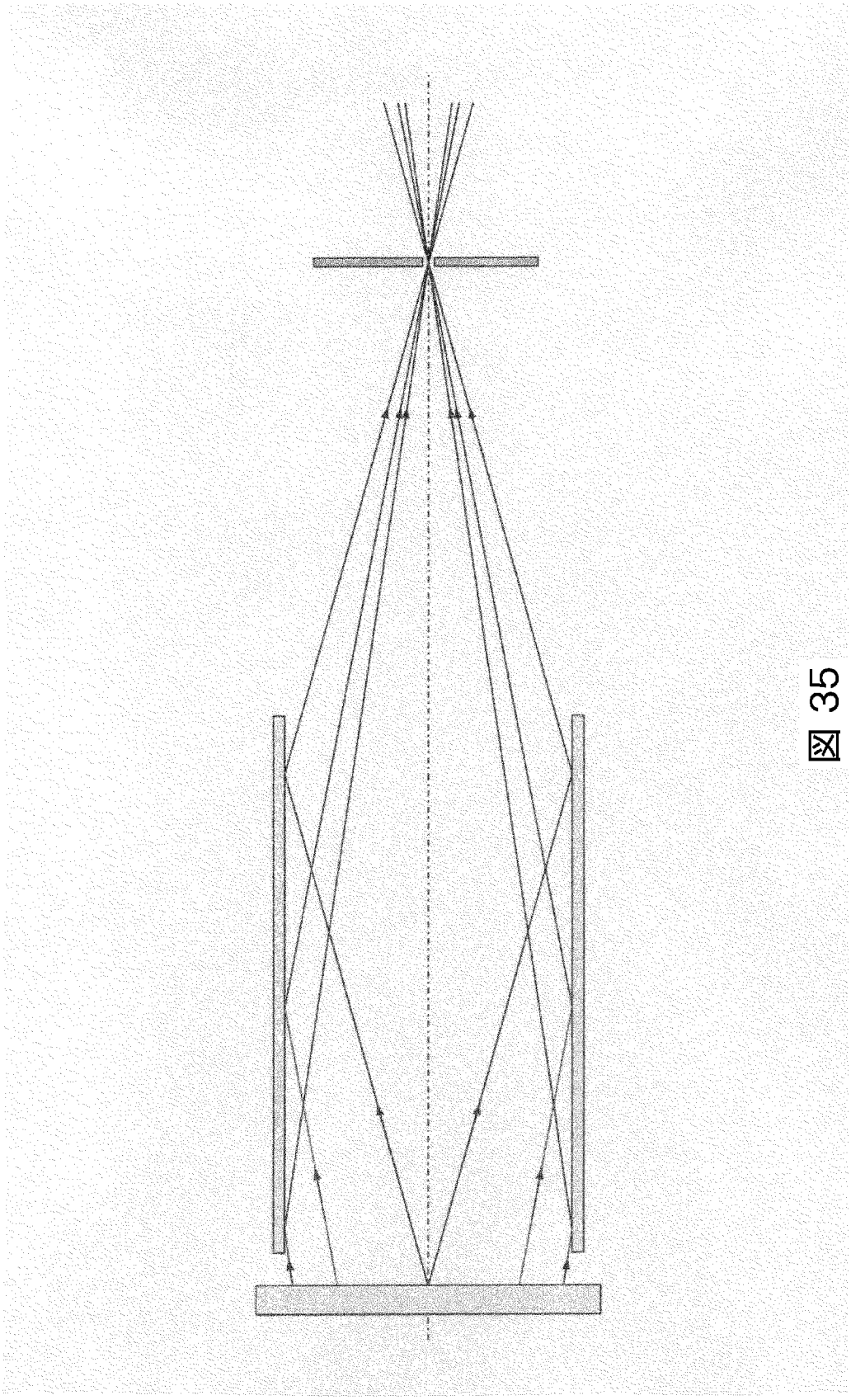


図 35

[図36]

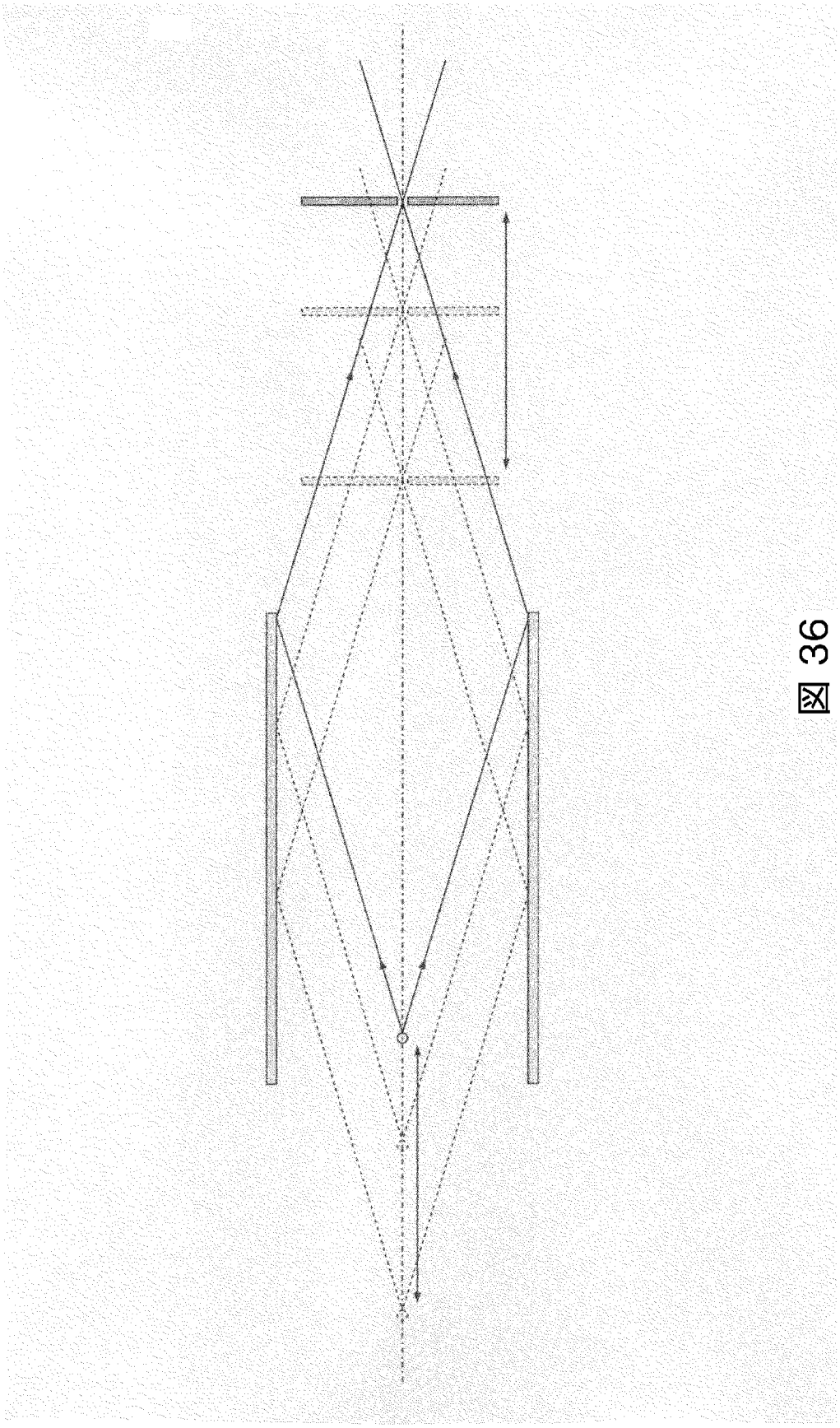


図 36

[図37]

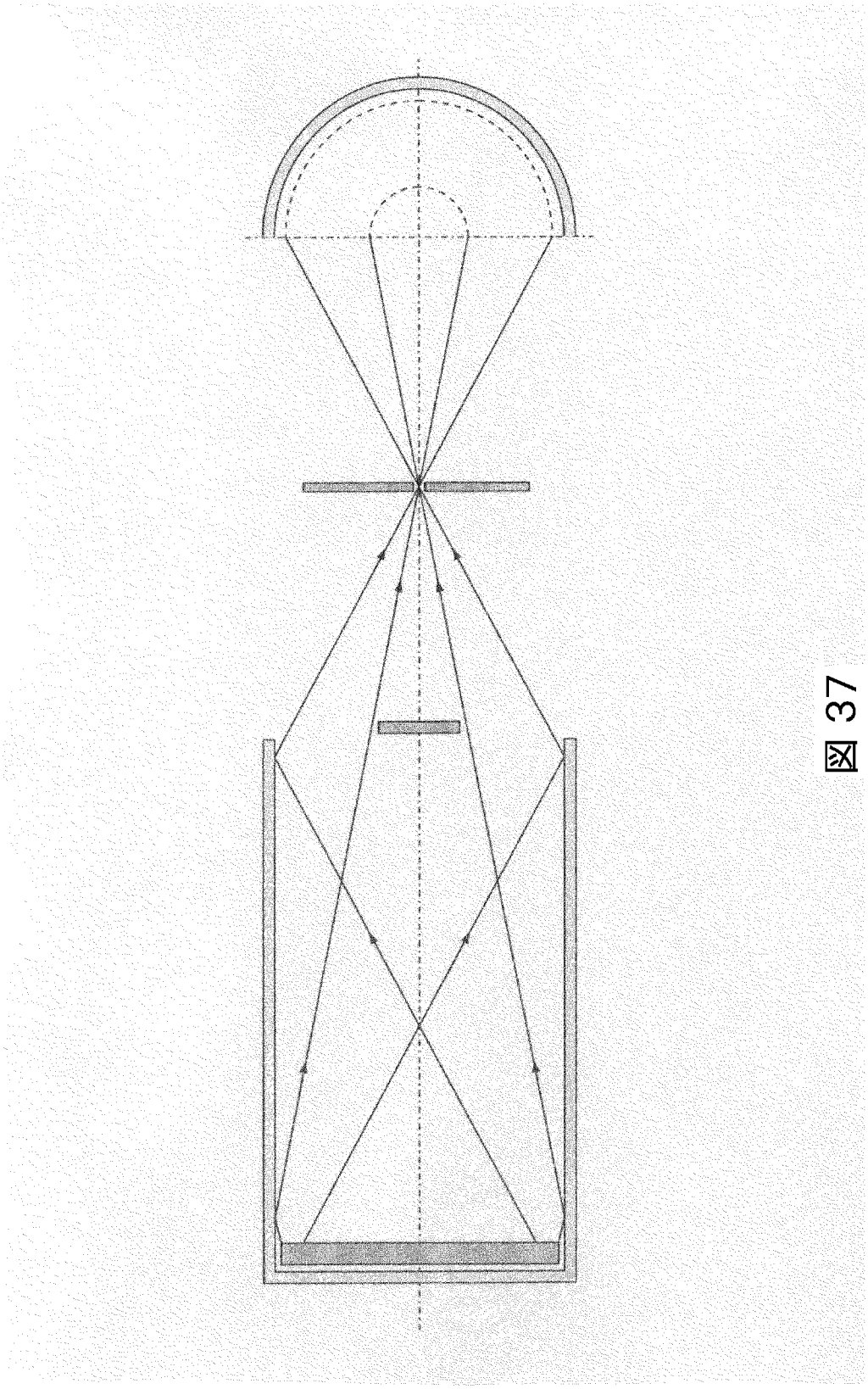


図 37

[図38]

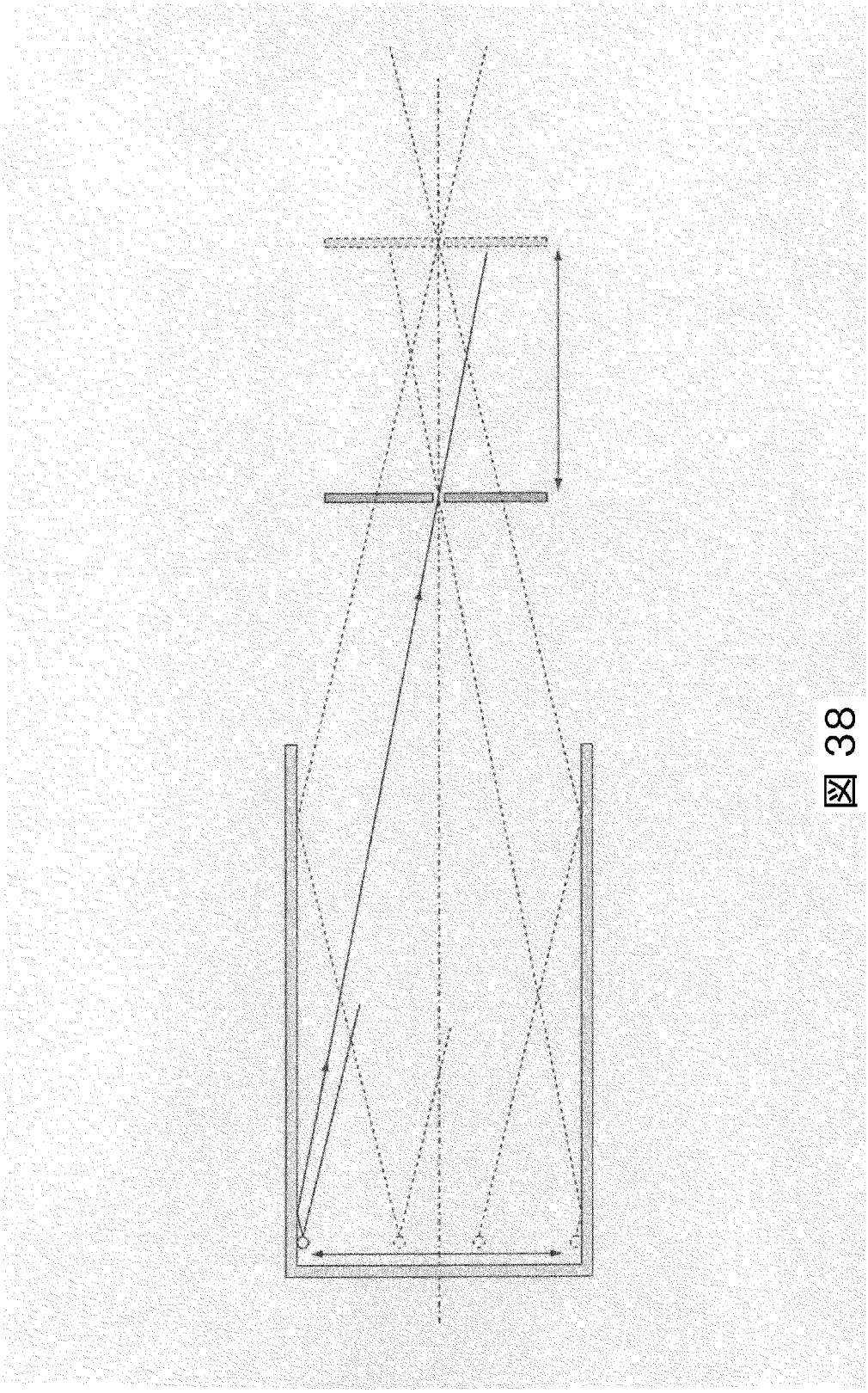


図 38

[図39]

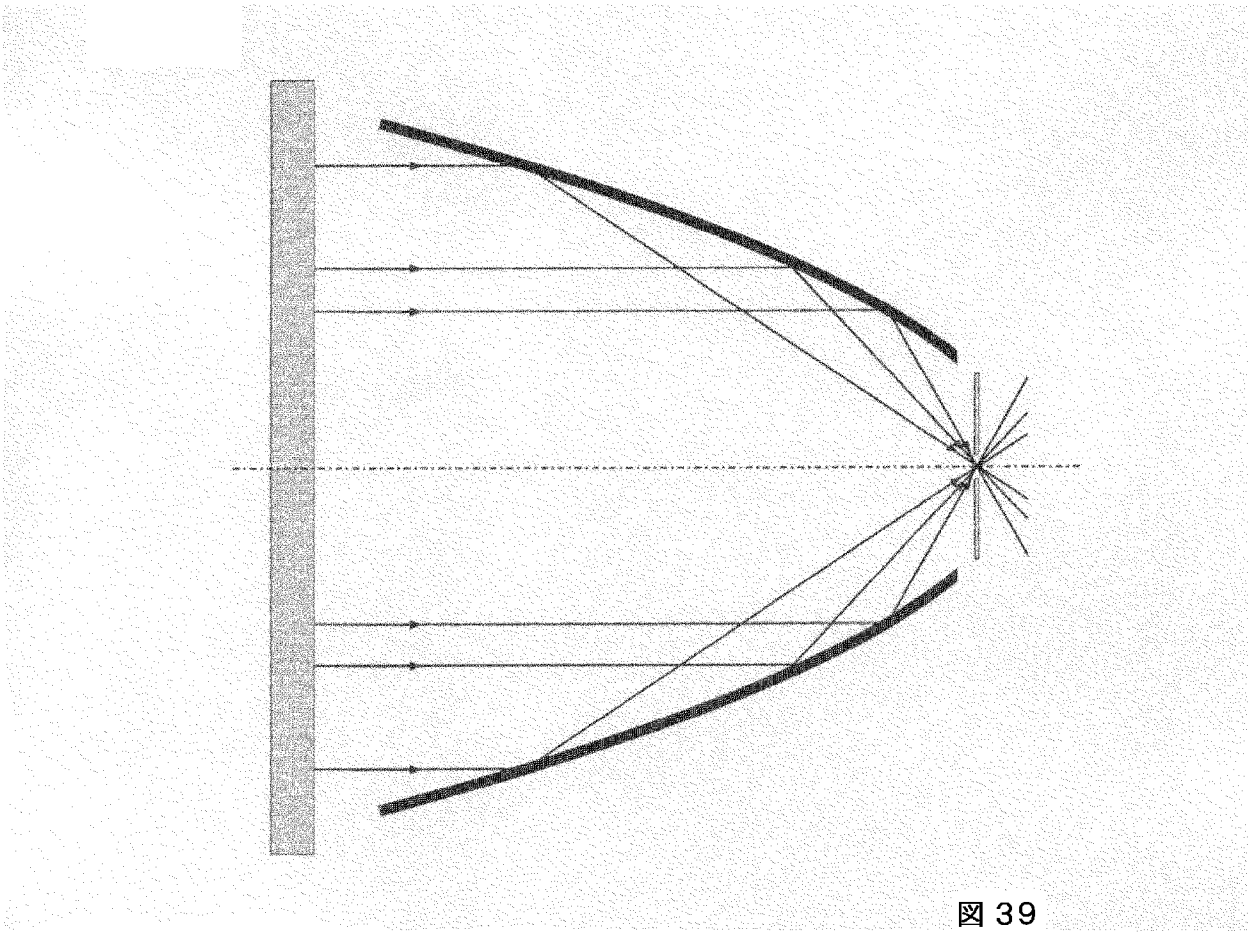


図 39

[図40]

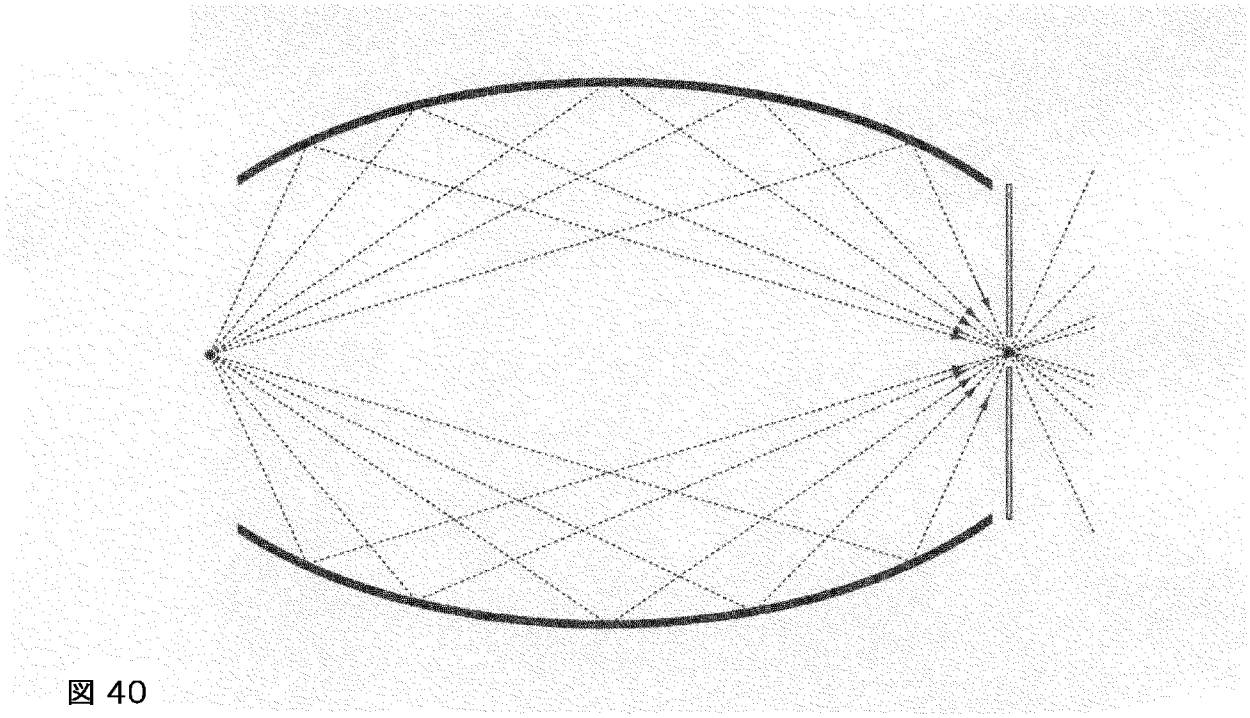


図 40

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2009/003995

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
G01B11/24(2006.01)i, *A61B5/107*(2006.01)i, *A61B10/00*(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G01B11/00-11/30, G01J4/00-4/04

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2009
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2009	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2009

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
JSTPlus(JDreamII)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X A	JP 61-17281 B2 (Director General, Agency of Industrial Science and Technology), 07 May 1986 (07.05.1986), page 4, lines 16 to 25 entire text; all drawings (Family: none)	25-30,33,35 1-24,31,32,34
A	JP 11-211433 A (Toppan Printing Co., Ltd.), 06 August 1999 (06.08.1999), entire text; all drawings (Family: none)	1-35
A	WO 2008/99589 A1 (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.), 21 August 2008 (21.08.2008), entire text; all drawings (Family: none)	1-35

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
13 November, 2009 (13.11.09)	24 November, 2009 (24.11.09)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office Facsimile No.	Authorized officer Telephone No.

国際調査報告

国際出願番号　ＰＣＴ／ＪＰ２００９／００３９９５

Ａ．　発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　G01B11/24(2006.01)i, A61B5/107(2006.01)i, A61B10/00(2006.01)i

Ｂ．　調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　G01B11/00-11/30,G01J4/00-4/04

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	１９２２－１９９６年
日本国公開実用新案公報	１９７１－２００９年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２００９年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２００９年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

JSTPlus(JDreamII)

Ｃ．　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー＊	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
X	JP 61-17281 B2（工業技術院長） 1986.05.07, 第４頁第16～25行（ファミリーなし）	25-30,33,35
A	全文,全図	1-24,31,32,34
A	JP 11-211433 A（凸版印刷株式会社） 1999.08.06, 全文,全図（ファミリーなし）	1-35
A	WO 2008/99589 A1（松下電器産業株式会社） 2008.08.21, 全文,全図（ファミリーなし）	1-35

☐　Ｃ欄の続きにも文献が列挙されている。

☐　パテントファミリーに関する別紙を参照。

＊　引用文献のカテゴリー

「Ａ」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「Ｅ」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「Ｌ」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）

「Ｏ」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「Ｐ」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献

「Ｔ」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「Ｘ」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Ｙ」特に関連のある文献であって、当該文献と他の１以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「＆」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日 １３．１１．２００９	国際調査報告の発送日 ２４．１１．２００９
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁（ＩＳＡ／ＪＰ） 郵便番号１００－８９１５ 東京都千代田区霞が関三丁目４番３号	特許庁審査官（権限のある職員）　２Ｓ　３１００ 丑田　真悟 電話番号　０３－３５８１－１１０１　内線　３２５８