

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号
特開2017-83473
(P2017-83473A)

(43) 公開日 平成29年5月18日(2017.5.18)

(51) Int.Cl.
GO1B 11/24 (2006.01)
GO2B 21/00 (2006.01)

F I
GO1B 11/24
GO2B 21/00

テーマコード (参考)
2F065
2H052

審査請求 有 請求項の数 8 O L (全 24 頁)

(21) 出願番号	特願2017-2271 (P2017-2271)	(71) 出願人	000101330 アストロデザイン株式会社 東京都大田区南雪谷1丁目5番2号
(22) 出願日	平成29年1月11日 (2017.1.11)	(74) 代理人	100101269 弁理士 飯塚 道夫
(62) 分割の表示	特願2012-110562 (P2012-110562) の分割	(72) 発明者	武居 利治 東京都大田区南雪谷1丁目5番2号 アス トロデザイン株式会社内
原出願日	平成24年5月14日 (2012.5.14)	(72) 発明者	武田 重人 東京都大田区南雪谷1丁目5番2号 アス トロデザイン株式会社内
		(72) 発明者	鈴木 茂昭 東京都大田区南雪谷1丁目5番2号 アス トロデザイン株式会社内

最終頁に続く

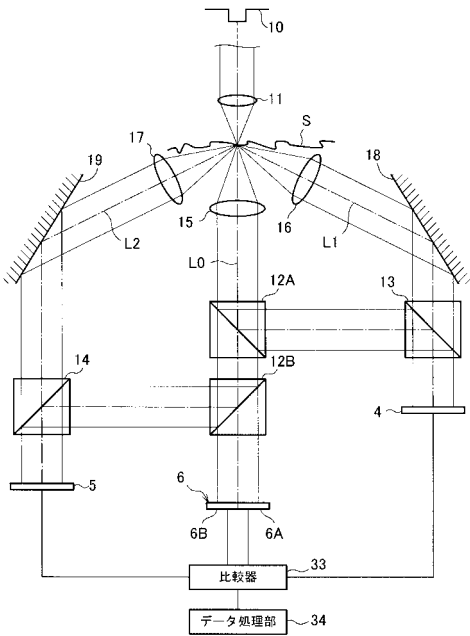
(54) 【発明の名称】 光学的分解能向上装置

(57) 【要約】

【課題】 通常の結像光学系の再現空間周波数では取得不可能な空間周波数を取得し、実効上、分解能の高い光学的分解能向上装置を提供する。

【解決手段】 レーザー光源10の照射光が収束照射されて試料Sを透過した光束をレンズ15が平行な光束に変換する。レンズ15の下方に光束を分割する第1のビームスプリッター12Aが配置され、分割受光素子6A、6Bにより構成される第1の受光素子6がこの下方に位置する。右側に傾きを有した光軸L1上のレンズ16が試料Sからの光束を平行な光束とし、反射鏡18に反射させる。第1のビームスプリッター12Aが分割した光束を反射鏡18の下方の第2のビームスプリッター13側に送り出し、レンズ15からの光束とレンズ16からの光束とを干渉させて第2の受光素子4で受光する。同様に第2の受光素子5でも受光する。受光素子6A、6B、受光素子群4、5が比較器33に接続され、データ処理部34が試料Sのプロフィール等を得る。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

測定対象物に光を照射する光源と、

光の照射光軸に対して傾きを有した傾斜光軸上に位置し、かつ、前記測定対象物から出射された平行な光の内の前記照射光軸に近い部分を通過する 0 次回折光とされる第 1 の光束と該照射光軸から遠い部分を通過する 1 次回折光とされる第 2 の光束を干渉させる第 1 の光学素子と、

第 1 の光学素子により干渉された光束を検出する第 1 の受光素子と、

前記照射光軸に対して前記第 1 の光学素子と反対方向に配置され、前記第 1 の光束と 1 次回折光とされる第 2 の光束を干渉させる第 2 の光学素子と、

第 2 の光学素子により干渉された光束を検出する第 2 の受光素子と、

第 1 の光束と第 2 の光束との重なり合った部分における、第 1 の受光素子の受光出力と第 2 の受光素子の受光出力との差の出力値を検出して、測定対象物のプロファイル情報を得る出力差検出部と、

該出力差検出部で得たプロファイル情報を表示あるいは蓄積する手段と、
を含む光学的分解能向上装置。

【請求項 2】

傾斜光軸上に位置して前記測定対象物から出射された光束を平行な光束とするレンズを有し、

前記第 1 および第 2 の光学素子は、

前記レンズを透過した平行な光束を収束させる収束レンズと、

第 1 の光束と第 2 の光束との干渉縞自体を拡大しつつ干渉させる拡大光学系と、

をそれぞれ含む請求項 1 記載の光学的分解能向上装置。

【請求項 3】

前記第 1 および第 2 の光学素子は、

前記第 1 の光束を反転する第 1 のプリズムと、

第 1 のプリズムからの光束と前記第 2 の光束とをシフトして重ねる第 2 のプリズムと、

を含む請求項 1 記載の光学的分解能向上装置。

【請求項 4】

前記第 1 および第 2 の光学素子は、

前記第 2 の光束を反射するミラーと、

前記第 1 の光束と該ミラーで反射された光束を合成するビームスプリッターと、

を含む請求項 1 記載の光学系分解能向上装置。

【請求項 5】

前記第 1 および第 2 の光学素子は、

前記レンズからの平行な光束を収束させる収束レンズと、

該収束レンズの焦点付近に配置されたグレーティングと、

を含む請求項 1 記載の光学的分解能向上装置。

【請求項 6】

測定対象物に光を照射する光源と、

光の照射光軸上に位置し、前記測定対象物から出射された 0 次回折光の光束を分割する第 1 のビームスプリッターと、

前記照射光軸を挟んだ各側にそれぞれ傾きを有した傾斜光軸上に位置し、かつ、前記測定対象物から出射された ± 1 次回折光の光束と第 1 のビームスプリッターで分割された 0 次回折光の光束とをそれぞれ干渉させる一対の第 2 のビームスプリッターと、

一対の第 2 のビームスプリッターにより干渉された各光束をそれぞれ受光する一対の受光素子と、

0 次回折光と ± 1 次回折光との重なり合った部分における、一対の受光素子間の出力差をそれぞれ検出して、測定対象物のプロファイル情報を得る出力差検出部と、

該出力差検出部で得たプロファイル情報を表示あるいは蓄積する手段と、

10

20

30

40

50

を含む光学的分解能向上装置。

【請求項 7】

前記照射光軸を挟んだ各側にそれぞれ傾きを有した傾斜光軸上に位置し、かつ、前記測定対象物から出射された光束をそれぞれ平行な光束にそれぞれする一対のレンズと、

該一対のレンズと前記一対の第 2 のビームスプリッターとの間に配置される一対の反射鏡と、を有し、

該一対の反射鏡が前記一対のレンズからの出射光を前記一対の第 2 のビームスプリッターに向かってそれぞれ反射させる請求項 6 記載の光学的分解能向上装置。

【請求項 8】

前記一対の受光素子が、複数の分割受光素子によりそれぞれ構成されている請求項 6 記載の光学的分解能向上装置。

10

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、レーザー光の照射により表面状態のプロファイルや細胞等の表面状態の計測や観察を極めて高い分解能で実現させる光学的分解能向上装置に関し、顕微鏡等の光学機器の分解能を向上するのに好適なものである。

【背景技術】

【0002】

微少なものを高精度に測定したり観察したりするには、周波数の異なる 2 つのレーザー光を干渉させて、その差の周波数のビート信号を作成し、このビート信号の位相変化を検出することで、被測定物を測定や観察することが考えられる。

20

【0003】

そして、下記特許文献 1 の特開昭 59-214706 号公報には、音響光学素子を用いて異なる波長からなる 2 つのビームを隣接して発生させ、これら 2 ビーム間の位相変化を検出し、その位相変化を累積して表面プロファイルを得る方法が開示されている。しかし、この特許文献 1 の技術では、ビームプロファイル内の情報を引き出すことはできず、面内であるビームプロファイル内の分解能を高くすることは出来なかった。

【0004】

他方、従来より DPC (Differential Phase Contrast) 法と呼ばれる手法が知られている。これは、最初 Dekkers and de Lang により電子顕微鏡に適用された技術であり、その後、Sheppard and Wilson 等により光学顕微鏡への拡張がなされた技術である。この DPC 法は、試料に照射された電磁波に対してファーフールドであって、電磁波の照射軸に対して対称に配置されたディテクタ同士で検出した 0 次回折光と 1 次回折光との干渉の結果の差動信号を求めることにより、試料のプロファイル情報を得るものである。しかし、この DPC 法も空間周波数が高くなると、これら 0 次回折光と 1 次回折光とが干渉できなくなり、その空間周波数が再現されない結果として、測定ができなくなることがあった。

30

【0005】

つまり、従来の電磁波を用いた結像型の顕微鏡においては、アッペの理論の限界とされる分解能を超えることはできなかった。したがって、光学顕微鏡はもとより、電子顕微鏡においても使用している実質的な波長による限界を打破することは困難であった。

40

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献 1】特開昭 59-214706 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

ここで、結像光学系を用いた従来の顕微鏡における対物レンズの OTF 特性について、

50

以下に説明する。

結像光学系を用いた従来の顕微鏡においては、対物レンズにて捉える対象物の空間周波数の１次回折光の成分と０次回折光の成分とが干渉して像形成を行うため、レンズの開口に１次回折光が入射されないと、その空間周波数は再現されないことになる。他方、低い周波数から高い周波数に至るにつれてその１次回折光の回折角は次第に大きくなるので、レンズに入力される１次回折光の量が減っていくことになる。その結果として、１次回折光が入力されない周波数がカットオフになり、低い周波数から高い周波数に至る途中で、変調度が次第に落ちていくようになる。

【０００８】

以上が対物レンズのＯＴＦ特性であり、したがって、結像系においては対物レンズに入力される１次回折光には自ずと限界があるので、再現される対象物の空間周波数に関連して分解能も自ずと限界があることになる。

【０００９】

以上の定性的な説明を定量化して、以下に詳細に説明する。

図１１のように開口半径が a で焦点距離が f の対物レンズ１１に平行光束が入射しているとす。なお、図１１においては、照射光軸を光軸 L_0 で表し、この光軸 L_0 に対して角度 θ だけ傾く傾斜光軸を光軸 L_1 で表している。通常の結像を用いた顕微鏡では、図１１のように光束が試料 S を透過する透過型となるが、光束が試料 S で折り返される反射型として考えてもよい。また、式を簡単にするために、１次元の開口として扱う。

【００１０】

また、簡単のために試料 S が高さ h でピッチ d の正弦波状の形状をしているものとする。すなわち、光学的な位相 θ が以下の式で表される。

$$\theta = 2\pi(h/\lambda)\sin(2\pi x/d) \cdots \cdots (1) \text{ 式}$$

試料 S から回折された光の振幅 E は、焦点距離 f だけ離れた面において、（１）式のフーリエ変換とレンズの開口とのコンボリューションとして、与えられるので、以下のように表される。ただし、（１）式の位相のフーリエ変換であるベッセル関数は、±１次まで取るものとする。

【００１１】

【数１】

$$E = \int (J_0(2\pi \frac{h}{\lambda})\delta(x) + J_1(2\pi \frac{h}{\lambda})(\delta(x - \frac{\lambda f}{d}) - \delta(x + \frac{\lambda f}{d}))) \text{rect}(\frac{x-x}{2a}) dx$$

$$= J_0(2\pi \frac{h}{\lambda}) \text{rect}(\frac{x}{2a}) + J_1(2\pi \frac{h}{\lambda})(\text{rect}(\frac{x - \frac{\lambda f}{d}}{2a}) - \text{rect}(\frac{x + \frac{\lambda f}{d}}{2a}))$$

.....(2) 式

【００１２】

ここで、（２）式のフーリエ変換が結像に寄与する。

したがって、強度 I は下記（３）式のようになる。

【００１３】

【数２】

$$I = (J_0(2\pi \frac{h}{\lambda}) * a * \text{sinc}(ka))^2 + 2 * (J_1(2\pi \frac{h}{\lambda}) * (a - \frac{\lambda f}{2d}) * \text{sinc}(k(a - \frac{\lambda f}{2d})))^2 * (4\sin^2(2\pi \frac{x}{d}))$$

.....(3) 式

【００１４】

この式の意味するところは、 $d = \lambda f / 2a = 0.5 \lambda / NA$ より小さいピッチの情報は欠落する

ということであるが、これは、矩形開口のビーム径 ($\text{sinc}(ka)=0$ の最初の暗環半径 w は、 $ka=\pi$ を満たすので、 $w=0.5\lambda/NA$ となる) と一致する。また、 $d>0.5\lambda/NA$ でも d が小さいほど変調度が低下することを意味している。これを $1/d$ の空間周波数と変調度との関係を示せば、MTF となっている。

【0015】

以上に示したように、通常の結像光学系では、対物レンズ 11 の NA によって再現される空間周波数のリミットは、必然的に $d=\lambda f/2a=0.5\lambda/NA$ となり、この値よりも小さいものは、どのようにしても再現されないことになる。

本発明は上記背景に鑑みてなされたもので、通常の結像光学系の再現空間周波数では取得不可能な空間周波数を取得し、実効上、分解能の高い光学的分解能向上装置を提供することを目的とする。

10

【課題を解決するための手段】

【0016】

上記目的を達成させるために、本発明は、測定対象物に光を照射する光源と、

光の照射光軸に対して傾きを有した傾斜光軸上に位置し、かつ、前記測定対象物から出射された平行な光の内の前記照射光軸に近い部分を通過する 0 次回折光とされる第 1 の光束と該照射光軸から遠い部分を通過する 1 次回折光とされる第 2 の光束を干渉させる第 1 の光学素子と、

第 1 の光学素子により干渉された光束を検出する第 1 の受光素子と、

前記照射光軸に対して前記第 1 の光学素子と反対方向に配置され、前記第 1 の光束と 1 次回折光とされる第 2 の光束を干渉させる第 2 の光学素子と、

20

第 2 の光学素子により干渉された光束を検出する第 2 の受光素子と、

第 1 の光束と第 2 の光束との重なり合った部分における、第 1 の受光素子の受光出力と第 2 の受光素子の受光出力との差の出力値を検出して、測定対象物のプロファイル情報を得る出力差検出部と、

該出力差検出部で得たプロファイル情報を表示あるいは蓄積する手段と、

を含む光学的分解能向上装置とされるものである。

【0017】

また、本発明においては、傾斜光軸上に位置して前記測定対象物から出射された光束を平行な光束とするレンズを有し、

30

前記第 1 および第 2 の光学素子は、

前記レンズを透過した平行な光束を収束させる収束レンズと、

第 1 の光束と第 2 の光束との干渉縞自体を拡大しつつ干渉させる拡大光学系と、

をそれぞれ含むものが好適である。

【0018】

さらに、本発明においては、前記第 1 および第 2 の光学素子は、

前記第 1 の光束を反転する第 1 のプリズムと、

第 1 のプリズムからの光束と前記第 2 の光束とをシフトして重ねる第 2 のプリズムと、

を含むものや、前記第 1 および第 2 の光学素子は、

前記第 2 の光束を反射するミラーと、

40

前記第 1 の光束と該ミラーで反射された光束を合成するビームスプリッターと、

を含むものが好適である。

【0019】

また、本発明においては、前記第 1 および第 2 の光学素子は、

前記レンズからの平行な光束を収束させる収束レンズと、

該収束レンズの焦点付近に配置されたグレーティングと、

を含むものが好適である。

【0020】

さらに、上記目的を達成させるために、本発明は、測定対象物に光を照射する光源と、光の照射光軸上に位置し、前記測定対象物から出射された 0 次回折光の光束を分割する

50

第1のビームスプリッターと、

前記照射光軸を挟んだ各側にそれぞれ傾きを有した傾斜光軸上に位置し、かつ、前記測定対象物から出射された±1次回折光の光束と第1のビームスプリッターで分割された0次回折光の光束とをそれぞれ干渉させる一対の第2のビームスプリッターと、

一対の第2のビームスプリッターにより干渉された各光束をそれぞれ受光する一対の受光素子と、

0次回折光と±1次回折光との重なり合った部分における、一対の受光素子間の出力差をそれぞれ検出して、測定対象物のプロファイル情報を得る出力差検出部と、

該出力差検出部で得たプロファイル情報を表示あるいは蓄積する手段と、

を含む光学的分解能向上装置とされるものである。

10

【0021】

さらにまた、この本発明においては、前記照射光軸を挟んだ各側にそれぞれ傾きを有した傾斜光軸上に位置し、かつ、前記測定対象物から出射された光束をそれぞれ平行な光束にそれぞれする一対のレンズと、

該一対のレンズと前記一対の第2のビームスプリッターとの間に配置される一対の反射鏡とを有し、

該一対の反射鏡が前記一対のレンズからの出射光を前記一対の第2のビームスプリッターに向かってそれぞれ反射させるものが好適である。

【0022】

また、この本発明においては、前記一対の受光素子が、複数の分割受光素子によりそれぞれ構成されているものが好適である。

20

【0023】

請求項に係る発明の作用を以下に説明する。

前述のようにDPC法は、試料に照射された電磁波に対してファーフールドであって、電磁波の照射軸に対して対称に配置されたディテクタ同士の差動信号を検出することにより、試料のプロファイル情報を得るものである。

この一方、本発明者たちは、音響光学素子等を用いることで、相互にわずかに異なる周波数を有しつつ相互にわずかな位置ずれを生じさせた2つのビームを走査させ、ファーフールドに配置した複数の受光素子の差動出力をヘテロダイン検波する方式を案出している。

30

そして、本発明は、DPC法とヘテロダイン法を融合させたような手法を用いたものともいえる。

【0024】

ところで、電磁波を用いての像の形成は、像自体の有する空間周波数の0次回折波と±1次回折波の干渉によるものと考えてよい。光学系のMTFカーブは、光学系の対物レンズが受け取る1次回折光の量に直接的に関係する。したがって、対物レンズに入射されない1次回折光を有する空間周波数は、結像に寄与しないために、必然的にカットされる。この最小の空間周波数が光学系のカットオフ周波数となる。

【0025】

一方、光学的なDPC法においては、レーザーのようなコヒーレント光を用いる。つまり、試料に照射されたコヒーレント光の1次回折光と0次回折光との干渉の結果が、コヒーレント光の光軸に対して対称でファーフールドに配置された受光素子に反映されることで、試料が測定または観察される。この際、試料の空間周波数が決定されるのは、結像光学系と同様になる。

40

【0026】

ここで、試料から反射され、あるいは試料を透過された光の0次回折光は、照射された時の光の絞り角、すなわち、対物レンズのNAに依存した広がり角を有して、試料から出射される。同様に1次回折光は、空間周波数に依存した方向に角度を変え、さらに0次回折光と同じ広がり角で出射される。このことから、受光素子上で0次回折光と±1次回折光が重なり合った部分だけで、試料のプロファイル情報が得られる。

50

【0027】

以上より、空間周波数が高いと、これら0次回折光と1次回折光とが干渉できなくなり、その空間周波数が再現されないことになる。そこで、これらの0次回折光と1次回折光とを受光素子に導く前に干渉させることで、再現される空間周波数の大幅な向上が実現される。このことから、試料と受光素子の間の空間に、干渉計（ファブリペロー、マッハ・ツェンダ等）を構築して、この箇所で0次回折光と1次回折光を干渉させるようにしている。

【0028】

他方、0次回折光および1次回折光の各主光線軸の間に光軸を有するレンズを配置し、試料から回折された0次回折光もしくは1次回折光を平行光束とし、その片方の光に対して、ダブリズムのような光学素子で像を反転し、さらに0次回折光と1次回折光が重なるようにロンボイドプリズムのような光学素子で平行シフトして、0次回折光と1次回折光を干渉させることが考えられる。これを1次回折光と0次回折光との間及び-1次回折光と0次回折光との間の2系統で行うことにより、ファーフールドに配置した2組の受光素子の差動信号がより大きな空間周波数情報を有することになり、実質的に分解能が向上する。

10

【0029】

また、0次回折光および1次回折光の各主光線軸の間に光軸を有するレンズを配置し、0次回折光の一部と1次回折光、-1次回折光の一部を拡大して分割受光素子のピッチと形成された干渉ピッチとがほぼ同じになるように調整して、選択的に受光素子を使うことが考えられる。

20

【0030】

さらに、0次回折光および1次回折光の各主光線軸の間に光軸を有するレンズを配置し、試料から回折された0次回折光もしくは1次回折光を平行光束とし、拡大レンズ系により受光素子に0次回折光と1次回折光とを導くことで、受光素子上では、拡大された干渉縞が形成される。この際、1次回折光と0次回折光との間及び-1次回折光と0次回折光との間の2系統で行い、一方の受光素子が最大光量のときに他方の受光素子でほぼ0になるように、受光素子を調整する。

さらに、0次回折光および1次回折光の各主光線軸の間に光軸を有するレンズを配置し、試料から回折された0次回折光もしくは1次回折光を平行光束とし、この平行光束をレンズにより集光し、ほぼレンズの焦点付近に配置した適正な格子ピッチを有するグレーティングにより、実質上0次回折光と1次回折光を相互にシフト重ね合わせることで、干渉させる。

30

【0031】

これにより、ファーフールドに配置した2組の受光素子の差動信号がより大きな空間周波数情報を有することになり、実質的な分解能が向上する。さらに、本発明は、試料から出射された0次回折光と1次回折光の干渉情報を用いているので、照射光学系の影響は少ない。したがって、照射スポットが多少大きくても検出される空間周波数を高くすることが可能である。

【0032】

本発明に係る光学的分解能向上装置は、画像処理等で行う推定法やレーリ限界にある変調度を無理やりデジタル処理等で引き上げる手法に比較して、本質的に高い空間周波数を物理的に取得しているので、試料の有する本来の情報を取得していることになる。したがって、似非信号となることはない。

40

また、ファーフールドに配置した2組の受光素子の差動信号が本来有する奥行き情報も同時に取得しているので、横分解能と同時に縦分解能にも優れた光学的分解能向上装置を提供することができ、レーザー走査顕微鏡に好適なものである。

【発明の効果】

【0033】

上記したように、本発明の光学的分解能向上装置では、試料に収束照射された光の信号

50

をファーフールドに配置された複数の受光素子の光軸を含む線に対して対称な受光素子同士の出力差として検出するような装置とし、試料からの 1 次回折光と 0 次回折光および -1 次回折光と 0 次回折光の全部あるいは一部を実効上干渉させる光学系を配置し、それぞれの干渉強度を受光する対称的に配置した受光素子間で差信号を取得することにした。

【0034】

実効上干渉させる光学系は、0 次回折光と ±1 次回折光を別個に入射させるレンズを用いて、平行光とした 0 次回折光と ±1 次回折光を干渉させるか、0 次回折光の光軸に対して傾斜させた光軸を有する 2 組のレンズにより、0 次回折光と ±1 次回折光の一部をシフトして重ねる光学系か結像系と拡大光学系を用いる。この様にすると、同じ NA を有するレンズを用いた結像光学系と比較して、1.5 倍以上の空間周波数を取得することが可能となる。したがって、通常の結像光学系では得られない鮮明な光学像を得ることができる。

10

【0035】

さらに、ヘテロダイン方式との融合により、位相変化および強度変化をきわめて精度よく検出することができる点と、受光素子で受光される光が非常に微弱でも検出回路系のゲインを高くすることで、高精度に検出できる点と、検出される信号は変調信号だけなので、外乱光の影響を受けることもなくなる点から、さらに高精度な検出ができ、非常に微弱でコントラストの低い位相情報やわずかな屈折率変化に対しても非常に高い分解能で観察、計測することが可能となる。

【図面の簡単な説明】

20

【0036】

【図 1】本発明の光学的分解能向上装置に係る実施例 1 を示した光学系を表す概略図である。

【図 2】DPC 法における透過光学系を表すブロック図である。

【図 3】DPC 法における反射光学系を表すブロック図である。

【図 4】DPC 法とヘテロダイン法とを組み合わせた透過光学系を表すブロック図である。

【図 5】DPC 法とヘテロダイン法とを組み合わせた反射光学系を表すブロック図である。

【図 6】本発明の光学的分解能向上装置に係る実施例 2 を示した光学系を表す概略図である。

30

【図 7】本発明の光学的分解能向上装置に係る実施例 3 を示した光学系を表す概略図である。

【図 8】本発明の光学的分解能向上装置に係る実施例 4 を示した光学系を表す概略図である。

【図 9】本発明の光学的分解能向上装置に係る実施例 5 を示した光学系を表す概略図である。

【図 10】本発明の光学的分解能向上装置に係る実施例 6 を示した光学系を表す概略図である。

【図 11】通常の結像光学系の原理を説明する原理図である。

40

【発明を実施するための形態】

【0037】

以下に、本発明に係る光学的分解能向上装置の実施例 1 から実施例 6 を各図面に基づき、詳細に説明する。

【実施例 1】

【0038】

本発明に係る光学的分解能向上装置の実施例 1 を以下に図 1 を参照しつつ説明する。

図 1 は、本実施例の光学的分解能向上装置の構成を示す概略図である。この図 1 に示すように、光を照射する光源であるレーザー光源 10 が図示しない光学機器を介して、対物レンズ 11 と対向して配置され、このレーザー光源 10 が照射した光が、透過物の測定対

50

象物である試料 S に収束照射されている。このレーザー光源 10 の収束照射の照射光軸とされる光軸 L0 上には、凸レンズとされる第 1 のレンズであるレンズ 15 が位置していて、試料 S を透過して出射された光束をレンズ 15 が平行な光束に変換している。

【0039】

このレンズ 15 の下方の光軸 L0 上には、レンズ 15 から出射された平行な光束をそれぞれ左右に分割する 2 つの第 1 のビームスプリッター 12 A、12 B が連続して配置されており、この下方にこの光を受光する第 1 の受光素子 6 が位置している。ただし、この第 1 の受光素子 6 は、光軸 L0 を挟んで位置する 2 つの分割受光素子 6 A、6 B により構成されていて、右側寄りの分割受光素子 6 A が、レンズ 15 からの透過光の内の光軸 L0 の右側寄り部分を受光し、左側寄りの分割受光素子 6 B が、レンズ 15 からの透過光の内の光軸 L0 の左側寄り部分を受光することになる。

10

【0040】

この一方、光軸 L0 に対して図 1 の右側に傾きを有した傾斜光軸とされる光軸 L1 上には、凸レンズとされる第 2 のレンズであるレンズ 16 が位置しており、このレンズ 16 が試料 S から出射された光束を平行な光束としている。この光軸 L1 上には、この平行な光束を反射するための反射鏡 18 が配置されており、また、この反射鏡 18 の下方には、第 2 のビームスプリッター 13 が位置している。このため、レンズ 16 と第 2 のビームスプリッター 13 との間に配置される反射鏡 18 が、レンズ 16 からの出射光を第 2 のビームスプリッター 13 側に反射させている。また、第 2 のビームスプリッター 13 の下方には、複数の分割受光素子から構成される第 2 の受光素子群 4 が位置している。

20

【0041】

さらに、2 つの第 1 のビームスプリッター 12 A、12 B の内の上側の第 1 のビームスプリッター 12 A が分割された光束を第 2 のビームスプリッター 13 側に送り出している。このため、レンズ 15 から出射された光束とレンズ 16 から出射された光束とを第 2 のビームスプリッター 13 が干渉させて、この光束を第 2 の受光素子群 4 が受光するようにさせている。

【0042】

他方、上記と同様の構成を有したレンズ 17、反射鏡 19、第 2 のビームスプリッター 14 および、第 2 の受光素子群 5 が照射光軸 L0 を挟んで対称に、図 1 の左側にも配置されている。以上より、2 つの第 1 のビームスプリッター 12 A、12 B および左右の第 2 のビームスプリッター 13、14 が、レンズ 15 から出射された光束とレンズ 16、17 から出射された光束とを干渉させている。

30

【0043】

さらに、前述の分割受光素子 6 A、6 B、受光素子群 4、5 が、これら受光素子 6 A、6 B、受光素子群 4、5 からの信号を比較するための比較器 33 にそれぞれ接続され、この比較器 33 が、最終的にデータを処理して試料 S のプロフィール等を得るデータ処理部 34 に繋がっている。このため、比較器 33 及びデータ処理部 34 が、光軸 L0 を挟んで位置する第 1 の受光素子 6 の分割受光素子 6 A、6 B 間の出力差および、一対の第 2 の受光素子群 4、5 間の出力差を検出する出力差検出部とされている。

【0044】

以上のことより、この図 1 に示す対物レンズ 11 で収束された光は、測定対象物である試料 S 上にスポットを形成する。このスポットは理想的には回折限界の径を有し、このスポット径内における試料 S のパターンの空間周波数情報が透過光として回折される。ここで、試料 S の有する空間周波数の 1 次回折光でレンズ 15 に入射されない空間周波数を考えた場合、レンズ 15 には試料 S を透過した 0 次回折光と上記空間周波数よりも低い空間周波数成分の光が入射される。このことで、レンズ 15 単体では、レンズ 15 の有するカットオフ周波数まで、試料 S のパターンが再現されうることになる。

40

【0045】

ところが、レンズ 15 に入射されない空間周波数はカットされ、像情報に欠落を生じることになる。そこで、図 1 に示すように 0 次回折光の光軸 L0 に対して、レンズ 16 及び

50

レンズ 17 が相互に対称な位置であって、ある傾きを有して配置されている。0 次回折光の光軸 L0 に対するこのレンズ 16 及びレンズ 17 の光軸 L1、L2 の傾き角は、試料 S のコントラストが最大になる空間周波数に匹敵するようにする。

【0046】

すなわち、レンズ 16 の光軸 L1 上の光束は、反射鏡 18 で折り返され、ビームスプリッター 12A により分離された 0 次回折光の光軸 L0 上の光束とビームスプリッター 13 により合成される。合成された光自体は受光素子群 4 に導かれる。したがって、0 次回折光とレンズ 16 から出射される 1 次回折光とを干渉させて受光素子群 4 が受光する。このとき、最も高いコントラストを有する光束は、レンズ 16 の光軸 L1 に一致する空間周波数の光束となるからである。

10

【0047】

上記した光学系と 0 次回折光の光軸 L0 に対して反対方向に同様な光学系について考えた場合、レンズ 17 の傾斜光軸とされる光軸 L2 上の光束は反射鏡 19 で折り返され、このレンズ 17 の光軸 L2 上の光束は、ビームスプリッター 12A を経てビームスプリッター 12B により折り返された 0 次回折光の光軸 L0 上の光束と、ビームスプリッター 14 により合成される。合成された光自体は受光素子群 5 に導かれる。0 次回折光とレンズ 17 から出射される -1 次回折光とを干渉しつつ受光素子群 5 が受光する。

【0048】

ここで、受光素子群 4 は複数の分割受光素子よりなり、おのおのの分割受光素子は 0 次回折光と 1 次回折光で干渉された干渉縞を適当なピッチでサンプリングした干渉縞強度を取得する。つまり、0 次回折光の光軸 L0 と 1 次回折光の光軸 L1 が傾きを持たなければ、光束内で一様な干渉強度となるが、多少傾きを有した場合には一様なピッチの干渉縞を生じるからである。この干渉縞のピッチは、1 次回折光の出射角度によるので、レンズ 16 に入射される空間周波数を反映したものとなる。

20

【0049】

また、受光素子群 5 も複数の分割受光素子よりなり、おのおのの分割受光素子は 0 次回折光と -1 次回折光で干渉された干渉縞を適当なピッチでサンプリングした干渉縞強度を取得し、上記と同様に動作する。

【0050】

したがって、受光素子群 4、5 は、複数の分割受光素子によりそれぞれ構成される形で配置され、空間周波数の反映した情報が取得できるようになる。受光素子群 4、5 の実質上対応する空間周波数を取得している受光素子の差の出力を取得することにより、より高い空間周波数情報を取得できるようになる。

30

【0051】

以上は、DPC 法の光学系および、発明者たちが提案する DPC 法とヘテロダイン法とを組み合わせた光学系において、特に有効となる。簡単のために上記においては透過光学系で説明したが、試料面に対して反射する方向に本光学的分解能向上装置を配置しても同様な効果をもたらすことになる。

【0052】

上記光学系により取得できる実質的な空間周波数を大きくできる点を以下に定量的に明らかにする。ただし、説明を簡単にするために試料 S が高さ h でピッチ d の正弦波状の形状をしているものとする。すなわち、光学的な位相 θ が以下の式で表される。

40

$$\theta = 2\pi h / \lambda \sin(2\pi x/d + \theta_0) \cdots \cdots (4) \text{ 式}$$

【0053】

試料 S から回折された光の振幅 E は、f だけ離れた面においては、(4) 式のフーリエ変換とレンズの開口とのコンボリューションとして、与えられるので、以下のように表される。ただし、(4) 式の位相のフーリエ変換であるベッセル関数は ± 1 次まで取るものとする。ここで、 E_0 、 E_1 は、おのおの 0 次回折光と 1 次回折光が入射されるレンズ 15、レンズ 16 を経た複素振幅分布である。おのおの (5)、(6) 式で表される。

【0054】

50

【数 3】

$$E_0 = \int J_0(2\pi \frac{h}{\lambda}) \delta(x) \text{rect}(\frac{x-x}{2a}) dX = J_0(2\pi \frac{h}{\lambda}) \text{rect}(\frac{x}{2a})$$

..... (5) 式

$$E_1 = \int J_1(2\pi \frac{h}{\lambda}) (j\sin\theta_0 - \cos\theta_0) \delta(x - \frac{\lambda f}{d}) \text{rect}(\frac{x-x}{2a}) dX$$

10

$$= J_1(2\pi \frac{h}{\lambda}) (j\sin\theta_0 - \cos\theta_0) \text{rect}(\frac{x - \frac{\lambda f}{d}}{2a}) \dots \dots \dots (6) \text{ 式}$$

【0055】

同様に E_{-1} を -1 次回折光が入射されるレンズ 17 を経た振幅分布である複素振幅分布であるとする、下記 (7) 式のようにになる。

【0056】

【数 4】

20

$$E_{-1} = \int J_1(2\pi \frac{h}{\lambda}) (j\sin\theta_0 + \cos\theta_0) \delta(x + \frac{\lambda f}{d}) \text{rect}(\frac{x-x}{2a}) dX$$

$$= J_1(2\pi \frac{h}{\lambda}) (j\sin\theta_0 + \cos\theta_0) \text{rect}(\frac{x + \frac{\lambda f}{d}}{2a}) \dots \dots \dots (7) \text{ 式}$$

【0057】

0 次回折光の複素振幅分布を表す (5) 式と 1 次回折光の複素振幅分布を表す (6) 式とから、レンズ 15 の光束とレンズ 16 の光束とをビームスプリッター 12A, 13 で合成して、受光素子群 4 上で干渉させた結果とされる受光素子群 4 上の強度 I_1 は、下記式のようにになる。

30

【0058】

【数 5】

$$I_1 = (J_0(2\pi \frac{h}{\lambda}) - J_1(2\pi \frac{h}{\lambda}) \exp(-j\theta_0))^2$$

【0059】

同様に 0 次回折光の複素振幅分布を表す (5) 式と -1 次回折光の複素振幅分布を表す (7) 式とから、レンズ 15 の光束とレンズ 17 の光束とをビームスプリッター 14, 12B で合成して受光素子群 5 上で干渉させた結果とされる受光素子群 5 上の強度 I_2 は、下記式のようにになる。

40

【0060】

【数 6】

$$I_2 = (J_0(2\pi \frac{h}{\lambda}) + J_1(2\pi \frac{h}{\lambda}) \exp(j\theta_0))^2$$

【0061】

ただし、上記強度 I_1 と強度 I_2 は簡単のために 0 次回折光および ±1 次回折光の光路差が実質上ないものとした。このようにして、受光素子群 4 と受光素子群 5 との差出力を表

50

すと下記式のようにになる。

【0062】

【数7】

$$\Delta I = I_1 - I_2$$

$$\propto -4 J_0(2\pi \frac{h}{\lambda}) J_1(2\pi \frac{h}{\lambda}) \cos \theta_0$$

【0063】

ここで、単独の受光素子を用いずに、適正個数の分割受光素子よりなる受光素子群としたのは、受光素子と空間周波数が対応関係にすることになるので、受光量より試料Sに含まれる空間周波数成分の分布も考慮に入れた解析ができるからである。

もし、0次回折光と1次回折光とを干渉させないと、±1次回折光の強度は、下記式のようになり、差出力を取得すると0となる。

【0064】

【数8】

$$I = E_1^2$$

$$= E_{-1}^2$$

$$\propto (J_1(2\pi \frac{h}{\lambda}))^2$$

【0065】

また、たとえ和の出力を取得したとしても位相情報 θ_0 は完全に失われることになり、試料Sにその空間周波数が存在するか否かの情報だけとなり、プロファイル情報等の知りたい情報を取得することはできない。

【0066】

以下、上記光学系を具体的に適用して効果のあるDPC法の光学系および、DPC法とヘテロダイン法とを組み合わせた光学系について述べる。ここで、図2はDPC法における透過光学系のブロック図を示し、図3はDPC法における反射光学系のブロック図を示す。

【0067】

まず、図2に示すように、レーザー光源21からの光束はコリメーターレンズ22により平行光束とされ、2次元走査デバイス26に入射される。この2次元走査デバイス26は光を面上に走査するデバイスであり、MEMSやガルバノミラー、レゾナントミラー等で構成されるものである。

【0068】

この平行光束は、2次元走査デバイス26の瞳位置を対物レンズ31の瞳位置に伝達するための瞳伝達レンズ系30を経て、対物レンズ31に入射された後、試料Sに収束される。試料Sに収束された光は透過光となり、受光素子29に入射される。この受光素子29は、試料Sから実質上ファーフールドとなる位置に配置され、光軸Lに対して対称に少なくとも2分割された受光素子とされている。

【0069】

この結果、光軸L上の平行光束が試料Sの屈折率分布や凸凹により0次回折光と±1次回折光とに分離され、分離されたこれらの光が干渉しつつ、受光素子29に受光される。これに伴い、試料Sの屈折率分布や凸凹の情報が、0次回折光と±1次回折光との干渉情報に基づき、受光素子29内の図示しない光電変換部において、変換される。このとき、光軸Lに対して対称な受光素子29の2つの受光素子間の差出力に試料Sの上記情報が反映される。

10

20

30

40

50

【0070】

これに対して、図3は反射光学系のブロック図であり、図2の透過光学系と異なるのは、コリメーターレンズ22と2次元走査デバイス26との間に配置されたビームスプリッター27により光束の一部を取り出し、この光束を少なくとも2分割された受光素子からなる受光素子29によりそれぞれ受光することにより、これらの差出力を検出することである。この際、試料Sからの反射平行光は、実質上ファーフールド情報であることになる。

【0071】

図4および図5は、発明者たちが提案するDPC法とヘテロダイン法とを組み合わせた光学系であり、これを以下に説明する。ここで、図4はこれらの方法を組み合わせた透過光学系のブロック図を示し、図5はこれらの方法を組み合わせた反射光学系のブロック図を示す。

これらの光学系が図2および図3に示す光学系と異なるのは、図4に示すように、音響光学素子23によりきわめて接近した2つの光束を作成し、試料Sに照射することにある。

【0072】

具体的には、この図4に示すように、レーザー光が出射されるレーザー光源21と、AODドライバー24が接続されて動作が制御される音響光学素子(AOD)23との間に、コリメーターレンズ22が配置されている。また、この音響光学素子23に対して、2群のレンズからなる瞳伝達拡大レンズ系25、入力されたレーザー光を分離して出射するビームスプリッター27、入力されたレーザー光を2次元走査する2次元走査デバイス26が順に並んで配置されている。

【0073】

さらに、このビームスプリッター27に隣り合って、2群のレンズからなる瞳伝達レンズ系30が位置し、この隣に対物レンズ31が試料Sと対向して配置されている。つまり、これら部材が光軸Lに沿って並んでいることになる。他方、光軸Lが通過する方向に対して直交する方向であってビームスプリッター27の右隣の位置には、光センサである受光素子28が配置されている。また、試料Sの背面側である下側には、同じく光センサである受光素子29が配置されている。これら受光素子28、29が、これら受光素子28、29からの信号を比較する比較器33にそれぞれ接続され、この比較器33が、最終的にデータを処理して試料Sのプロフィール等を得るデータ処理部34に繋がっている。

【0074】

以上に伴い、キャリア周波数 f_c と変調周波数 f_m の2つのDSB変調された信号を外部からAODドライバー24を経て、音響光学素子23に入力することで、きわめて接近したこれら2つの光束を作成することができる。これらきわめて接近した2方向に出射された光束は、音響光学素子23の実質的な瞳位置を2次元走査デバイス26の瞳位置に伝達する瞳伝達レンズ系25、光を面上に走査する2次元走査デバイス26および、2次元走査デバイス26の瞳位置を対物レンズ31の瞳に伝達するための瞳伝達レンズ系30を経て、対物レンズ31に入射される。

【0075】

この結果として、対物レンズ31で収束された光束は、きわめて接近された2つのスポットとして試料Sを面上に走査することになる。この2つのスポットは周波数 $f_c + f_m$ と周波数 $f_c - f_m$ の2つの信号となるので、これらの信号をヘテロダイン検波をすることにより、試料Sの凸凹情報、屈折率分布を反映した信号が得られる。

【0076】

本実施例において、ヘテロダイン検波を行うには、照射された変調信号の一部をビームスプリッター27で取り出して受光素子28でレファレンス信号を得て、このレファレンス信号と2分割された受光素子29で検出された信号とで差動出力を求め、比較器33により位相差情報および強度情報を取得し、データ処理部34に送る。データ処理部34では走査情報とともに取得された情報を画像やデータの形として、ディスプレイに表示した

り、メモリにデータとして蓄積したりする。

【0077】

ただし、受光素子28は必ずしも必要ではなく、音響光学素子23に出力する信号、すなわち音響光学素子23に印加される信号自体と比較してもよい。この場合、回路系や音響光学素子等による遅延が発生するが、予め補正するなどしておけば、位相差検出等に大きな影響を与えることはない。

【0078】

また、試料Sの表面を面上に走査する極めて接近した2つのスポット光は、相互に周波数の異なる光となるが、実質上、腫伝達レンズ系25、30等の拡大光学系を使用することにより、高い周波数でも極めて接近させたスポットにすることができる。これにより高速な走査により高速な情報取得ができることになる。

10

【0079】

これに対して、図5は反射光学系のブロック図であり、図4の透過光学系と異なるのは、試料Sから反射して戻ってきた光束をビームスプリッター27により取り出し、この光束を2分割された受光素子からなる受光素子29によりそれぞれ受光することで、これらの差出力を検出することである。この際、試料Sからの反射平行光は、実質上ファーフールド情報であることになる。

【0080】

この一方、このようにして得られた2つの光は、上記手法により分離度を非常に小さくすることができ、実質上1つのビームで走査した情報と変わらない。これに対し、一つのビームで走査し、ファーフールドに配置した少なくとも2分割された受光素子の差動出力を得る方法が、前記したDPC法である。

20

【0081】

つまり、DPC法に比較すると、このような本ヘテロダイン法をさらに使用した方法では、ヘテロダイン検出することにより、位相変化および強度変化をきわめて精度よく検出できる点と、受光素子29で受光される光が非常に微弱でも検出回路系のゲインを高くすることで、高精度に検出できる点と、検出される信号は変調信号だけなので、外乱光の影響を受けることもなくなる点とを有することから、さらに高精度な検出ができることになる。

【0082】

30

また、上記のような光学系の受光素子部分に図1に示す光学系を用いることで、さらに空間周波数の高い情報、すなわち横分解能の大幅な向上が図れるようになる。さらに、試料Sに照射する光束を平行光束として、図1に示すレンズ15、16、17を省き、その他の光学系は上記実施例と同じようにすることで、平行光束系に対する光学的分解能向上装置とすることもできる。

【0083】

以下の実施例においては、DPC法の光学系の受光素子部分および、DPC法とヘテロダイン法とを組み合わせた光学系の受光素子部分に、以下の実施例の受光素子系を適用すればよいので、受光素子系以外の光学系についての説明は省略する。

【実施例2】

40

【0084】

本実施例においては、0次回折光の光軸L0に対してレンズを傾斜して設置することで、0次回折光の一部だけでなく、同じレンズを用いた場合に比較してより高い空間周波数を有した1次回折光の一部を取り入れることで、これら0次回折光と1次回折光の干渉を実現している。

本実施例は、図6に示すように、平行光束が対物レンズ11に入射し、試料Sに収束されるまでは、図1と同様である。ただし、本実施例においては、試料Sを透過した0次回折光の一部と1次回折光の一部とを、0次回折光と1次回折光との間の中間的な傾き角を有した光軸L3だけ傾けた状態のレンズ36に取り入れる。そして、上記一部の1次回折光と上記一部の0次回折光をロンボイドプリズム39のようなものにより、光束同士をシ

50

フトして重ね合わせることで、お互いの光束同士を干渉させる。

【0085】

また、ロンボイドプリズム39の一面を半透鏡39Aとし、この半透鏡39Aと反対の面を半透鏡39Bにし、それぞれの面を通過して光を受光する受光素子40、41、42を配置する。ここで、受光素子40と受光素子41は、それぞれ0次回折光の一部と1次回折光の一部との干渉結果を反映し、受光素子42は、レンズ36の0次回折光の一部が含まれる領域に回折される低い空間周波数の1次回折光と0次回折光の一部との干渉結果を反映する。

【0086】

以下の式にて、0次回折光と1次回折光とが干渉した結果について説明する。

10

まず、図6で示した光学系と同様の光学系を、図6では示していないが0次回折光の光軸L0と対称となるように、-1次回折光に対しても配置する。これら対応する各受光素子の出力差を取得すると以下のように考えられる。説明を簡単にするために、試料Sが高さhでピッチdの正弦波状の形状をしているものとすれば、光学的な位相 θ が以下の式で表される。

【0087】

$$\theta = 2\pi h / \lambda \sin(2\pi x/d + \theta_0) \cdots \cdots (4) \text{ 式}$$

【0088】

試料Sから回折された光の振幅Eは、fだけ離れた面においては、(4)式のフーリエ変換とレンズの開口とのコンボリューションとして与えられるので、以下のように表される。

20

ただし、(4)式の位相のフーリエ変換であるベッセル関数は ± 1 次まで取るものとする。

図6に示すように光軸L3をレンズ36のほぼ $\sin^{-1}(NA)$ に相当する角度 ξ だけ傾ける。この際、光軸L3に対する垂直方向をy軸とし、(1)式の空間周波数 $1/d$ に相当する1次回折光の中心位置をY1とする。

このとき、上記(2)式を参考にして、光軸L3を角度 ξ だけ傾けた場合、(2)式の0次回折光は中心がaだけずれ、1次回折光の中心軸がy1になるので、下記の(8)式で複素振幅分布 E_1 が与えられる。

【0089】

30

【数9】

$$E_1 = J_0(2\pi \frac{h}{\lambda}) \text{rect}(\frac{y-a}{2a}) - J_1(2\pi \frac{h}{\lambda}) (\text{rect}(\frac{y-y_1}{2a}) \exp(-j\theta_0))$$

$\cdots \cdots (8) \text{ 式}$

【0090】

同様に0次回折光の光軸L0に対して、1次回折光と対称な光学系における-1次回折光に関しては、下記の(9)式となる。

40

【0091】

【数 1 0】

$$E_{-1} = J_0(2\pi \frac{h}{\lambda}) \text{rect}(\frac{y+a}{2a}) + J_1(2\pi \frac{h}{\lambda}) (\text{rect}(\frac{y-y_1}{2a}) \exp(j\theta_0))$$

・・・・・・・・ (9) 式

ここで y_1 は、 $f \tan(\Theta - \xi)$ である。

$$\tan(\Theta) = \lambda / d$$

10

$$\tan(\xi) = a / f = NA$$

なので、 y_1 は下記式となる。

$$y_1 = f \frac{\frac{\lambda}{d} - \frac{a}{f}}{1 + \frac{\lambda a}{df}}$$

【0 0 9 2】

20

図 6 の光学系は、レンズ 3 6 の光軸 L_3 を 0 次回折光と 1 次回折光との間の境界に実質上シフトして重ねているので、(8) 式は、下記の (8) ' 式となる。

【0 0 9 3】

【数 1 1】

$$E_1 = J_0(2\pi \frac{h}{\lambda}) \text{rect}(\frac{y}{2a}) - J_1(2\pi \frac{h}{\lambda}) (\text{rect}(\frac{y-y_1}{2a}) \exp(-j\theta_0))$$

・・・・・・・・ (8) ' 式

30

ただし、 $0 \leq y \leq a$

(8) ' 式は、

$$E_1 = J_0(2\pi \frac{h}{\lambda}) - J_1(2\pi \frac{h}{\lambda}) \exp(-j\theta_0)$$

ただし、 $y_1 - a \leq y \leq a$

【0 0 9 4】

40

このように $y_1 = a$ のときに複素振幅分布 E_1 は最も大きく、 $y_1 = 2a$ のときに 0 となる。
 $y_1 = 2a$ は、0 次回折光から見れば、 $3a$ に相当した空間周波数までの情報を取得したことになる。したがって、同じ NA のレンズを用いた時に比較して 1.5 倍の空間周波数まで取得できたことになる。その分、光学的な分解能が実質的に向上したことになる。

【0 0 9 5】

他方、0 次回折光の光軸 L_0 に対して、1 次回折光と対称な光学系における -1 次回折光に関しては、同様にして -1 次回折光の光軸 L_2 に垂直方向を y' 軸とすると、下記の (9) ' 式となる。

【0 0 9 6】

【数 1 2】

$$E_{-1} = J_0(2\pi \frac{h}{\lambda}) \text{rect}(\frac{y}{2a}) + J_1(2\pi \frac{h}{\lambda}) (\text{rect}(\frac{y-y_1}{2a}) \exp(j\theta_0))$$

・・・ (9) ' 式

ただし、 $-a \leq y \leq 0$

(9) ' 式は

10

$$E_{-1} = J_0(2\pi \frac{h}{\lambda}) + J_1(2\pi \frac{h}{\lambda}) \exp(j\theta_0)$$

ただし、 $-a \leq y' \leq y_1 + a$

【0097】

このように $y_1 = -a$ のときに複素振幅分布 E_{-1} は最も大きく、 $y_1 = -2a$ のときに0となる。 $y_1 = -2a$ は、0次回折光から見れば、 $-3a$ に相当した空間周波数までの情報を取得したことになる。したがって、同じNAのレンズを用いた時に比較して1.5倍の空間周波数まで取得できたことになる。その分、光学的な分解能が実質的に向上したことになるのは、1次回折光と同様である。

20

さて、この様にして得た情報に対して、受光素子40と受光素子41の和の出力とそれと等価な-1次回折光の受光素子間で差出力 ΔI を下記の式により得るようにする。

【0098】

【数 1 3】

$$\Delta I = E_1^2 - E_{-1}^2$$

$$\propto -4 J_0(2\pi \frac{h}{\lambda}) J_1(2\pi \frac{h}{\lambda}) \cos \theta_0$$

30

【0099】

これは、実質的に実施例1と同様な式となっている。ただし、実施例1に比較すると光学系はよりシンプルで、かつロンボイドプリズムのような簡単な素子で構成しており、レンズを一体的に成形するなどすれば、安定的な光学系とすることが可能である。なお、ロンボイドプリズムを、実質上2つのハーフミラーで構成しても同様な効果をもたらすことができる。

【実施例3】

【0100】

本発明に係る光学的分解能向上装置の実施例3を図7を参照しつつ、以下に説明する。

40

図7は、本実施例の光学的分解能向上装置の構成を示す概略図である。この図7に示すように、本実施例においては、0次回折光の光軸L0に対して、レンズ36を傾斜して設置することで、0次回折光の一部だけでなく、同じレンズを用いた場合に比較してより高い空間周波数を有した1次回折光の一部を取り入れ、結像光学系にて干渉を実現している。なお、図示しないものの、本実施例においては、軸L0に対して対称な位置に同様な光学系が配置されている。

【0101】

レンズ36を傾けて0次回折光の一部と1次回折光の一部を取得するところまでは、実施例2と同様である。本実施例では、レンズ36により平行光束にした回折光同士をレンズ52にて集光する。このレンズ52により回折光同士が焦点近傍で重なり合って、実質

50

的に干渉する。ただし、0次回折光と±1次回折光との干渉ではないので、試料S自体の結像とは異なる。

【0102】

さらに、レンズ52の実効的な焦点距離を長くすることで、干渉縞のピッチを広げることができる。もし、レンズ36とレンズ52の焦点距離が同じであれば、当然等倍となり、試料Sの空間周波数となる。これに対して、他方の-1次回折光の光学系にて干渉された結果は、ピッチがずれた干渉縞となる。しかしながら、干渉縞のピッチに対して受光素子が大きいと、±1次回折光を受光する素子の位置あわせが困難になる。

【0103】

そこで、拡大光学系53により干渉縞自体を拡大し、受光素子50の大きさにほぼ等しくすれば、±1次回折光で自然と逆位相となるので、0次回折光がバイアスになるような形で明暗が逆になる。この様にすれば、極めて簡単に空間周波数の高い領域まで、情報を取得することができるようになる。本実施例の場合、レンズ52を用いているので、このレンズ52に入射される0次回折光と1次回折光の位相差がそのまま反映される程度の波面収差は許容される。したがって、高額なレンズを用いる必要性はない。

【0104】

なお、本実施例においては、焦点距離が多少異なるレンズであっても、お互いの受光素子の受けとる光量に大きな変化がなく、レンズ面内の波面収差が大きくなければ、干渉縞のピッチが多少変わる程度なので、そのまま用いることができる。また、取得できる空間周波数の限界は、図6とほぼ同じ原理なので、1.5倍程度となる。この光学系は、レン

【実施例4】

【0105】

本発明に係る光学的分解能向上装置の実施例4を図8を参照しつつ、以下に説明する。

図8は、本実施例の光学的分解能向上装置の構成を示す概略図である。

この図8に示すように、本実施例においては、試料Sに収束した光を入射せず、比較的大きな径を有する平行光束を入射することとする。この場合において、0次回折光の光軸L0に対して、レンズ36を傾斜して設置することとした。このことで、0次回折光の一部だけでなく、同じレンズを用いた場合に比較してより高い空間周波数を有した1次回折光の一部を取り入れることができる。なお、図示しないものの、本実施例においては、軸

【0106】

ただし、レンズ36を傾けて0次回折光の一部と1次回折光の一部を取得するところまでは、実施例2と同様である。本実施例では、0次回折光および1次回折光をそれぞれ集光光束とするが、レンズ36のそれぞれの焦点位置に焦点を有する別々のレンズ64、65を配置し、これらのレンズ64、65により集光光束を平行光束とする。この様に平行光束にした以降は、図6および図7に示す光学系を用いて、0次回折光の一部と1次回折光の一部とを干渉させる。

【0107】

この場合、試料Sに入射される光束径は大きいので、面内の情報が平均化されてしまう。そこで、入射された平行光束に図示しない制限開口を設けることで、その部分の情報として解釈するか、もしくは規則正しいパターン中の不規則パターンの検出が可能となる。

つまり、規則正しい1次回折光の方向が設計上予め分かっているので、その1次回折光の方向はレンズ36の焦点にマスクすることで抑えることができる。

【0108】

この一方、それ以外の成分はレンズ64、65に入射されるので、欠陥部からの情報を検出することができる。たとえば、半導体ウェハー上の欠陥検査や、ナノ構造の不均一性の検査等への適用が可能である。なお、取得できる空間周波数の限界は、図6とほぼ同じ原理なので、1.5倍程度となる。

【実施例5】

【0109】

本発明に係る光学的分解能向上装置の実施例5を以下に図9を参照しつつ説明する。

図9は、本実施例の光学的分解能向上装置の構成を示す概略図である。本実施例は図7と同様な光学系に採用されるものであるが、本実施例においては、この図9に示すように拡大光学系53をなくす替りに、回折格子であるグレーティング54をレンズ52の焦点に配置した構造としている。なお、図示しないものの、本実施例においては、軸L0に対して対称な位置に同様な光学系が配置されている。

【0110】

この結果、試料Sにより回折された0次回折光と1次回折光がグレーティング54により、さらに回折され、0次回折光と1次回折光が実質上干渉するようになる。図9において、斜線を施した部分が、0次回折光と1次回折光が重なる干渉部Kであるが、光軸L3に対して、逆側にも同様な干渉部Kが存在する。

10

【0111】

ここで、グレーティング54が正弦波状で構成されていれば、グレーティング54による回折波は、0次回折光、±1次回折光で位相差がない。この場合、光軸L3に対して対称な部分の位相差は同じなので、重なった部分は同相となる。従って、本実施例では、受光素子50はグレーティング54から出力された少なくとも2つの領域の上記干渉部Kを含む部分の光量を取得すればよい。

【0112】

ただし、光軸L0に対して干渉部Kが対称で同相であるが、試料Sで回折された-1次回折光では、この干渉部Kの位相が180度反転する。これに対して、干渉部K以外の強度は、試料Sで回折された±1次回折光の方向で同一となるため、±1次回折光の強度の差動出力を取ると、干渉部Kのみの情報が残ることになる。

20

【0113】

この一方、グレーティング54が位相差を生じる実質上の正弦波状で構成されていると、グレーティング54による0次回折光と±1次回折光で位相差が180°生じる。この場合、上記したように受光素子50をグレーティング54から出力された少なくとも1つの領域の干渉部Kを含む光量を取得すればよい。ただし、上記と異なる点は、グレーティング54の有する位相差が反映することになるので、グレーティング54のビームに対する位置も反映する。従って、グレーティング54のビームに対する位置調整が必要になる。

30

【0114】

なお、位置調整は非常に簡単で、あらかじめ用意した、ある空間周波数を有する位相格子の試料Sに対して、走査による観察される両側の受光素子50の強度変調が最大になるように調整し、かつ、両側で位相差が180°になる様にすればよい。±1次回折光の強度の差動出力が、干渉部Kのみの情報が残ることは上記と同様である。

【実施例6】

【0115】

本発明に係る光学的分解能向上装置の実施例6を以下に図10を参照しつつ説明する。

図10は、本実施例の光学的分解能向上装置の構成を示す概略図である。

40

本実施例は図10と同様なグレーティング54を別の光学系に採用したものであるが、本実施例においては、この図10に示すように、レンズ15、16、17を有する他、反射鏡18、19を有する実施例1に近似した構造とされている。ただし、ビームスプリッター12A、12B、13、14等が無い替りに、レンズ55が反射鏡18の下方に配置され、このレンズ55と受光素子57との間であって、レンズ55の焦点位置にグレーティング54が配置された構造となっている。

【0116】

さらに、レンズ15が大型とされて、このレンズ15を透過した光束の一部がレンズ55に入射されて、実施例5と同様に作用する。また、レンズ56が反射鏡19の下方に配置され、上記と同様にこのレンズ56と受光素子58との間であって、レンズ56の焦点

50

位置にグレーティング 5 4 が配置された構造となっている。このため、これらレンズ 5 6、グレーティング 5 4、受光素子 5 8 等によっても、上記と同様に作用する。

【0 1 1 7】

以上、本発明に係る実施の形態を説明したが、本発明は前述の実施の形態に限定されるものではなく、本発明の趣旨を逸脱しない範囲で種々変形して実施することができる。

【産業上の利用可能性】

【0 1 1 8】

本発明は、顕微鏡だけでなく、さまざまな種類の光学機器や波動を有する電磁波を用いた計測機に適用でき、これら光学機器や波動を有する電磁波を用いた計測機の分解能を向上することができるものである。

10

【符号の説明】

【0 1 1 9】

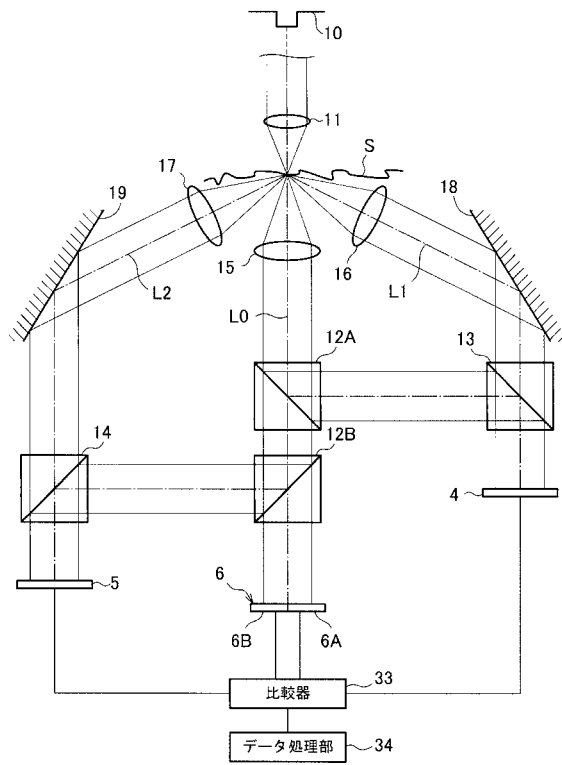
- 4、5 第 2 の受光素子群
- 6 第 1 の受光素子
- 1 0 レーザー光源
- 1 1 対物レンズ
- 1 2 A、1 2 B 第 1 のビームスプリッター
- 1 3、1 4 第 2 のビームスプリッター
- 1 5、1 6、1 7 レンズ
- 1 8、1 9 反射鏡
- 2 1 レーザー光源
- 2 2 コリメーターレンズ
- 2 3 音響光学素子
- 2 4 A O D ドライバー
- 2 5 瞳伝達拡大レンズ系
- 2 6 2 次元走査デバイス
- 2 7 ビームスプリッター
- 2 8、2 9 受光素子
- 3 0 瞳伝達レンズ系
- 3 1 対物レンズ
- 3 3 比較器
- 3 4 データ処理部
- 3 6 レンズ
- 3 9 ロンボイドプリズム
- 4 0、4 1、4 2 受光素子
- 5 0 受光素子
- 5 2 レンズ
- 5 3 拡大光学系
- 5 4 グレーティング
- 5 5、5 6 レンズ
- 5 7、5 8 受光素子
- 6 4、6 5 レンズ
- S 試料
- L 0、L 1、L 2、L 3 光軸

20

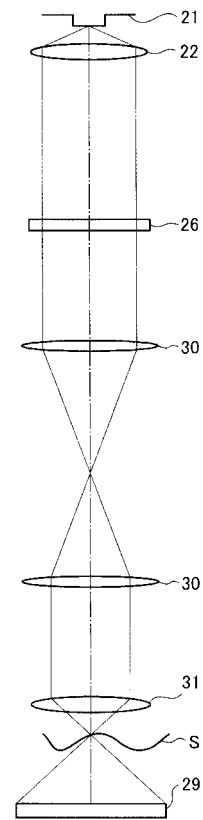
30

40

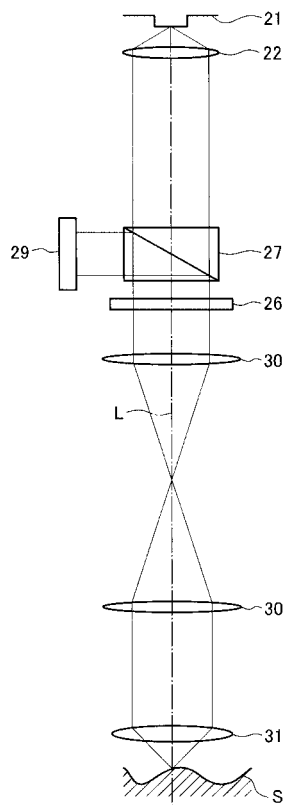
【図 1】



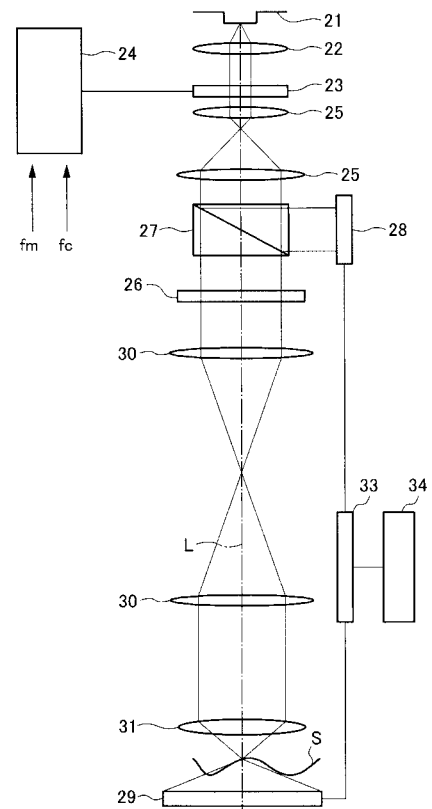
【図 2】



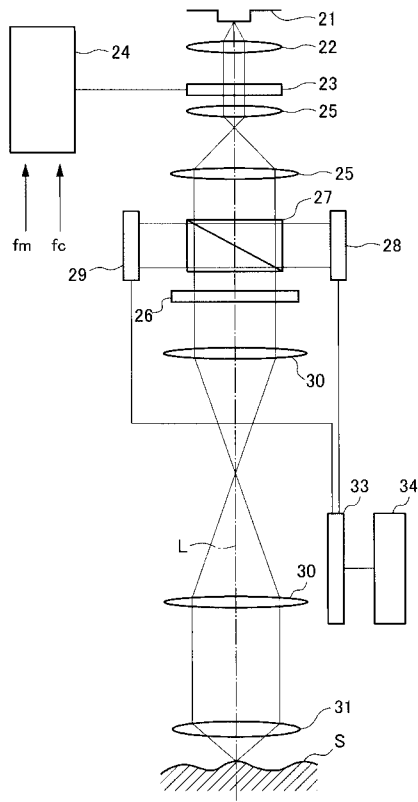
【図 3】



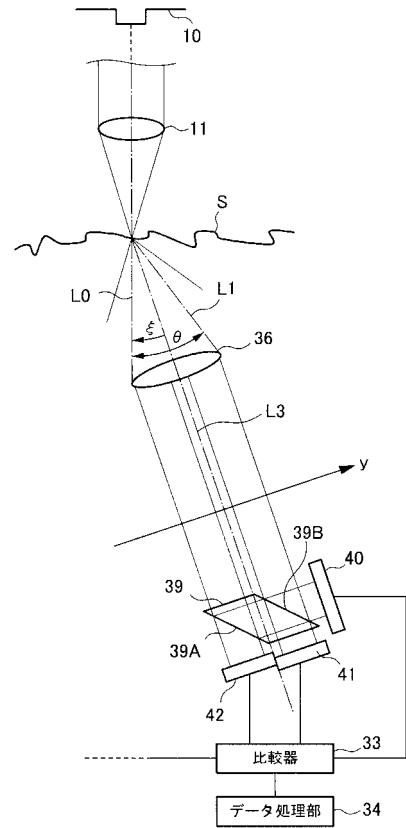
【図 4】



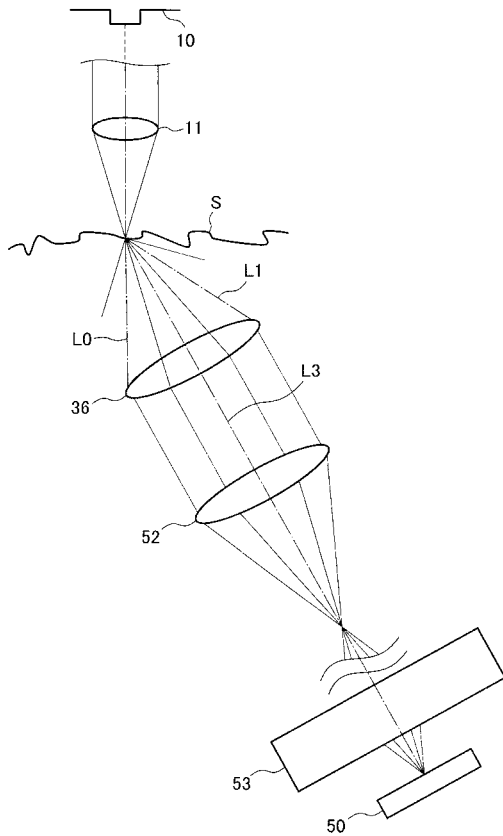
【図 5】



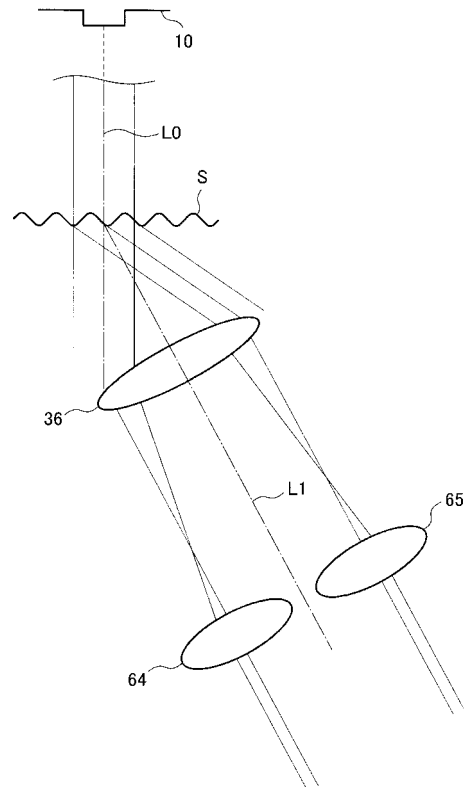
【図 6】



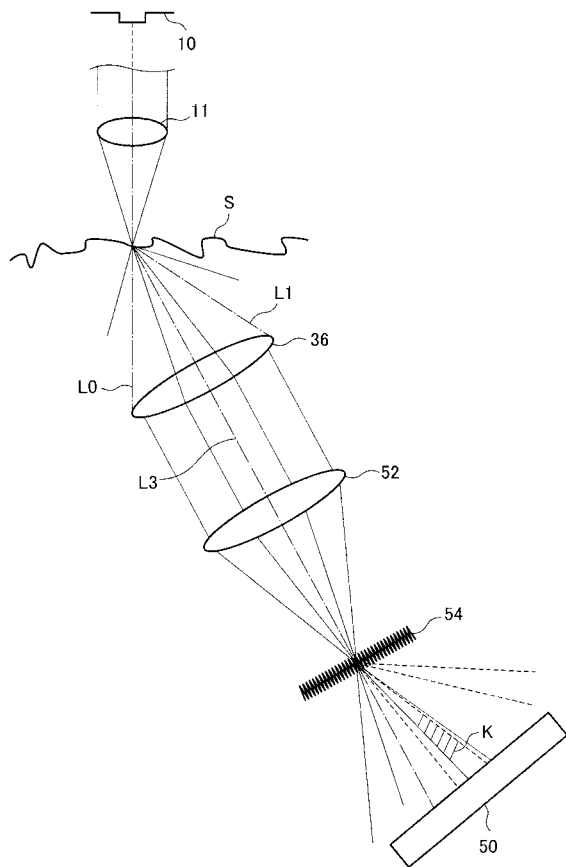
【図 7】



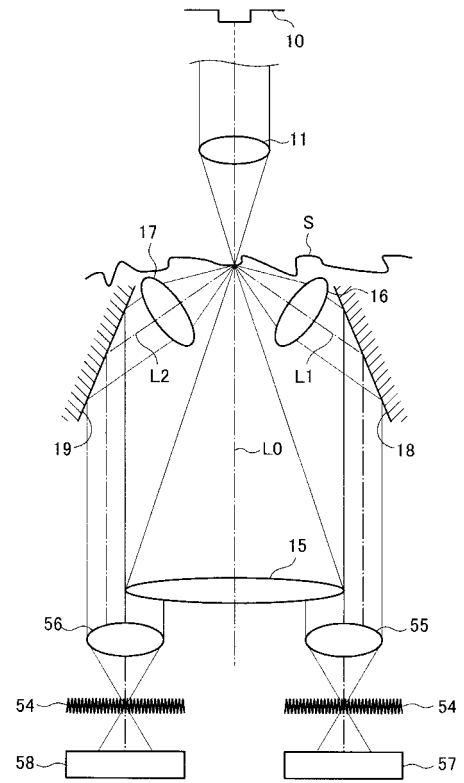
【図 8】



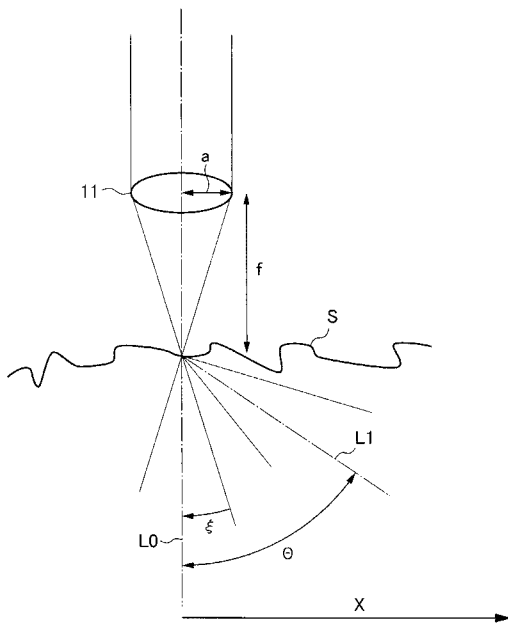
【図 9】



【図 10】



【図 11】



フロントページの続き

Fターム(参考) 2F065 AA51 DD03 FF48 FF51 GG04 HH03 JJ05 LL00 LL04 LL12
LL46 PP24 QQ25 SS02
2H052 AB24 AB26 AC15 AC34 AF02 AF03