

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5216509号
(P5216509)

(45) 発行日 平成25年6月19日 (2013. 6. 19)

(24) 登録日 平成25年3月8日 (2013. 3. 8)

(51) Int. Cl.

F I

G O 1 Q 60/22 (2010.01)

G O 1 Q 60/22 1 O 1

請求項の数 20 (全 33 頁)

(21) 出願番号	特願2008-252097 (P2008-252097)	(73) 特許権者	000005108
(22) 出願日	平成20年9月30日 (2008. 9. 30)		株式会社日立製作所
(65) 公開番号	特開2009-236895 (P2009-236895A)		東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
(43) 公開日	平成21年10月15日 (2009. 10. 15)	(74) 代理人	100100310
審査請求日	平成23年2月28日 (2011. 2. 28)		弁理士 井上 学
(31) 優先権主張番号	特願2008-54245 (P2008-54245)	(74) 代理人	100098660
(32) 優先日	平成20年3月5日 (2008. 3. 5)		弁理士 戸田 裕二
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)	(72) 発明者	中田 俊彦
			神奈川県横浜市戸塚区吉田町292番地
			株式会社日立製作所生産技術研究所内
		(72) 発明者	渡辺 正浩
			神奈川県横浜市戸塚区吉田町292番地
			株式会社日立製作所生産技術研究所内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 走査プローブ顕微鏡およびこれを用いた試料の観察方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

レーザー光の照射によりプラズモンが発生する材料を有し、ナノチューブで形成され、
前記プラズモンが伝播する測定探針と、

前記測定探針を支持する支持部と、

前記支持部を駆動して前記測定探針を検査対象試料に対して走査する駆動部と、

前記測定探針を伝搬したプラズモンにより前記測定探針と前記検査対象試料表面との間に近接場光を発生させて、前記検査対象試料表面で反射した近接場光を検出する近接場光検出光学系とを備えたことを特徴とする走査プローブ顕微鏡。

【請求項 2】

前記支持部の変形を検出して得た信号を処理して前記検査対象試料表面の原子間力顕微鏡画像 (A F M 画像) を作成する A F M 画像作成手段を更に備えたことを特徴とする請求項 1 記載の走査プローブ顕微鏡。

【請求項 3】

前記測定探針の一端にレーザー光を照射するレーザ照射光学系と、

前記近接場光検出光学系で前記近接場光を検出して得た信号を処理して前記試料表面の近接場光画像を得る近接場光画像処理系とを備えたことを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の走査プローブ顕微鏡。

【請求項 4】

前記測定探針をカーボンナノチューブもしくは金属ナノチューブで形成し、該カーボン

ナノチューブもしくは金属ナノチューブの内部に金粒子もしくは銀粒子もしくは金ロッドもしくは銀ロッドを埋め込んだことを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の走査プローブ顕微鏡。

【請求項 5】

前記測定探針をカーボンナノチューブもしくは金属ナノチューブで形成し、前記検査対象試料の表面に近づける該カーボンナノチューブもしくは金属ナノチューブの先端部を先鋭化し、該先端部に金粒子もしくは銀粒子を埋め込んだことを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の走査プローブ顕微鏡。

【請求項 6】

前記測定探針の長さは、前記レーザ照射光学系から照射されるレーザ光の波長に応じて最大強度の近接場光が得られるように調整されることを特徴とする請求項 3 に記載の走査プローブ顕微鏡。

10

【請求項 7】

前記レーザ照射光学系は、前記測定探針の一端に照射するレーザの偏光の状態を制御する偏光制御部を更に備えたことを特徴とする請求項 3 又は 6 に記載の走査プローブ顕微鏡。

【請求項 8】

前記レーザ照射光学系は、白色レーザを前記測定探針の一端に照射し、前記近接場光検出光学系は前記測定探針の他端と前記検査対象試料の表面との間に発生する近接場光を波長分離して検出し、前記近接場光画像処理系において前記波長分離して検出したそれぞれの信号を処理して合成することにより前記試料表面のカラーの近接場光画像を得ることを特徴とする請求項 3 又は 6 又は 7 の何れかに記載の走査プローブ顕微鏡。

20

【請求項 9】

前記支持部は、前記レーザ照射光学系からの光を前記測定探針に導く角錐状の導光部を有することを特徴とする請求項 3 又は 6 又は 7 の何れかに記載の走査プローブ顕微鏡。

【請求項 10】

前記近接場光検出光学系は、前記測定探針の他端と前記検査対象試料の表面との間に発生する前記近接場光を選択的に通過させる遮光板を有することを特徴とする請求項 9 に記載の走査プローブ顕微鏡。

【請求項 11】

前記測定探針をカーボンナノチューブもしくは金属ナノチューブで形成し、該カーボンナノチューブもしくは金属ナノチューブの上端部に金属カーバイトもしくは蛍光粒子を、該カーボンナノチューブもしくは金属ナノチューブの下端部に金粒子もしくは銀粒子もしくは金ロッドもしくは銀ロッドを埋め込んだことを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の走査プローブ顕微鏡。

30

【請求項 12】

ナノチューブで形成された測定探針を支持する支持部を駆動して前記測定探針を検査対象試料に対して走査し、

レーザ光を前記測定探針に照射してプラズモン励起させ、

前記レーザ光により励起したプラズモンを前記測定探針を伝搬させ、

前記測定探針に伝播したプラズモンにより前記測定探針と前記検査対象試料表面との間で発生させて、前記検査対象試料表面で反射した近接場光を検出することを特徴とする走査プローブ顕微鏡を用いた試料の観察方法。

40

【請求項 13】

前記支持部の変形を検出して得た信号を処理して前記検査対象試料表面の原子間力顕微鏡画像（AFM 画像）を作成することを特徴とする請求項 12 に記載の走査プローブ顕微鏡を用いた試料の観察方法。

【請求項 14】

近接場光を検出して得た信号を処理して前記試料表面の近接場光画像を得ることを特徴とする請求項 12 に記載の走査プローブ顕微鏡を用いた試料の観察方法。

【請求項 15】

50

前記測定探針として、内部に金粒子もしくは銀粒子もしくは金ロッドもしくは銀ロッドが埋め込まれたカーボンナノチューブもしくは金属ナノチューブを用いて前記近接場光を検出することを特徴とする請求項 1 2 乃至 1 4 の何れかに記載の走査プローブ顕微鏡を用いた試料の観察方法。

【請求項 1 6】

前記測定探針として、上端部に金属カーバイトもしくは蛍光粒子が埋め込まれ、下端部に金粒子もしくは銀粒子もしくは金ロッドもしくは銀ロッドが埋め込まれたカーボンナノチューブもしくは金属ナノチューブを用いて前記近接場光を検出することを特徴とする請求項 1 2 乃至 1 4 の何れかに記載の走査プローブ顕微鏡を用いた試料の観察方法。

【請求項 1 7】

前記測定探針をカーボンナノチューブもしくは金属ナノチューブで形成し、前記検査対象試料の表面に近づける該カーボンナノチューブもしくは金属ナノチューブの先端部を先鋭化し、該先端部に金粒子もしくは銀粒子を埋め込んだことを特徴とする請求項 1 2 乃至 1 4 の何れかに記載の走査プローブ顕微鏡を用いた試料の観察方法。

【請求項 1 8】

前記測定探針の長さは、前記レーザ照射光学系から照射されるレーザ光の波長に応じて最大強度の近接場光が得られるように調整されることを特徴とする請求項 1 4 記載の走査プローブ顕微鏡を用いた試料の観察方法。

【請求項 1 9】

前記レーザ光は、偏光の状態を制御されたレーザ光であることを特徴とする請求項 1 2 記載の走査プローブ顕微鏡を用いた試料の観察方法。

【請求項 2 0】

前記レーザ光は白色レーザからの光であり、前記測定探針の他端と前記検査対象試料の表面との間に発生する近接場光を波長分離して検出し、該波長分離して検出して得た信号を処理することにより前記検査対象試料表面のカラーの近接場光画像を得ることを特徴とする請求項 1 4 又は 1 8 又は 1 9 の何れかに記載の走査プローブ顕微鏡を用いた試料の観察方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明は、走査プローブ顕微鏡技術および、これを用いた試料観察方法に関する。

【背景技術】

【0 0 0 2】

微細立体形状の計測技術として走査プローブ顕微鏡（SPM：Scanning Probe Microscope）が知られている。その中でも原子間力顕微鏡（AFM：Atomic Force Microscope）は、先端のとがった探針を制御して接触力を非常に小さな値に保ちながら試料表面を走査する観察技術であり、原子オーダの微細立体形状が計測できる技術として、広く用いられている。しかし、この原子間力顕微鏡は試料表面の反射率分布や屈折率分布といった光学的性質を測定することはできない。

【0 0 0 3】

一方、45 nmノード以降の極微細半導体デバイスでは、高速化のために歪シリコンの適用が予定されており、微小領域における応力分布の測定が歩留まり管理上不可欠とされる。また、さらなる微細化のためには、不純物原子の分布状況をナノメートルオーダの分解能できめ細かく管理することが要求されている。応力分布や不純物分布などの物性情報は、原子間力顕微鏡や寸法管理に用いられているCD-SEM（測長SEM（Scanning Electron Microscope））では測定不可能である。ラマン分光計測法等の光学的手法の検討がされているが、通常のラマン分光顕微鏡では空間分解能が不足している。

【0 0 0 4】

また、異物検査や欠陥検査で検出された異物や欠陥の発生要因を特定するため、レビュー

10

20

30

40

50

ーSEMと呼ばれる電子顕微鏡で異物や欠陥の分類作業が行われているが、形状や凹凸情報のみに頼る手法のため、分類性能に限界がきている。こちら、光学情報を付加することにより分類性能の向上が期待できるが、やはり通常の光学顕微鏡やレーザ走査顕微鏡では空間分解能が不足している。

【0005】

これらの課題を解決し、試料表面の光学的性質や物性情報を高分解能で測定する手段として、近接場走査顕微鏡(SNOM: Scanning Near-field Optical Microscope)が知られる。この顕微鏡は、非特許文献1に開示されているように、数十nmの微小開口から漏れる近接場光を、開口と試料との間隙を同じく数十nmに保ったままで走査することにより(開口プローブ)、光の回折限界を超えて開口と同じ大きさの数十nmの分解能で、試料表面の反射率分布や屈折率分布といった光学的性質を測定するものである。同様の手法として、非特許文献2には、金属探針に外部から光を照射して、探針の微小先端部で散乱した数十nmの大きさの近接場光を走査する(散乱プローブ)方法も開示されている。

10

【0006】

また、微小スポット光により金属表面に励起させた表面プラズモンが、金属表面を伝搬していくことが非特許文献3に記載されている。

【0007】

また、特許文献1には、ファイバ先端に微小な球形レンズを形成して微小スポット光を形成する方法が開示されている。

20

【0008】

また、特許文献2には、カーボンナノチューブ内部にフォトルミネセンス、エレクトロルミネセンスを発現するV、Y、Ta、Sb等の金属カーバイドや、ZnS蛍光体、CaS蛍光体を充填し、微小スポット光を得る方法が開示されている。

【0009】

【特許文献1】特表2006-515682号公報

【特許文献2】特開2002-267590号公報

【非特許文献1】Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 31, pp. L1302-L1304 (1992)

【非特許文献2】Optics Letters, Vol. 19, pp. 159-161 (1994)

30

【非特許文献3】分光研究、第54巻、第4号、pp. 225~237 (2005)

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

しかし、上記した近接場走査顕微鏡は測定分解能が数十nmオーダーであり、nmオーダーの分解能を有する原子間力顕微鏡や電子顕微鏡に比べ一桁以上分解能が不足している。また測定の再現性が極めて低いという工業応用にとっては致命的ともいえる問題も抱えている。すなわち、上記の方法のうち、開口プローブを用いる方法では、開口を安定に形成することが極めて困難であり、実用上数十nmが限界とされている。また、試料上を走査する際にプローブが試料に衝突して開口が損傷したり磨耗して、次第に開口が広がってしまい、測定画像の再現性が低下してしまう。

40

【0011】

一方、金属探針を用いる散乱プローブは、開口プローブに比べ分解能が高いとされるが、外部照明光が探針の根元や試料表面で散乱して背景雑音となったり、開口プローブと同様、試料上を走査する際にプローブが試料に衝突して先端部が損傷あるいは磨耗して、測定分解能が低下し十分な再現性が得られないという課題を有していた。

【0012】

また、ファイバ先端に微小な球形レンズを形成する方法も原理的に分解能は数十nmオーダー以上であり、さらに試料上を走査する際に球形レンズが試料に衝突して損傷したり磨

50

耗し、次第にスポット光が大きくなりその形状が劣化し、測定画像の再現性が低下してしまう。

【0013】

また、カーボンナノチューブ内部にフォトルミネセンス、エレクトロルミネセンスを発現する発光粒子を充填する方法も、粒子径がナノメートルオーダーになると発光効率が極端に低下し、高いS/N比での近接場光画像を得ることが困難である。

【0014】

そこで本発明では、プローブと試料の双方にダメージを与えることなく、ナノメートルオーダーの分解能でかつ高い再現性と高いS/N比で、試料表面の光学情報及び凹凸情報を測定することを可能とする走査プローブ顕微鏡を提供することを目的とする。

10

【0015】

また、本発明の別の目的は、半導体試料の応力分布や不純物分布などの物性情報や、異物や欠陥の分類に寄与する光学情報や凹凸情報をナノメートルオーダーの分解能で測定し、製造プロセス条件にフィードバックすることで、信頼性の高い半導体デバイスの高歩留まり生産を実現することにある。

【課題を解決するための手段】

【0016】

上記目的を達成するために、本発明では走査プローブ顕微鏡をレーザー光の照射によりプラズモンが発生する材料を有し、ナノチューブで形成され、前記プラズモンが伝播する測定探針と、前記測定探針を支持する支持部と、前記支持部を駆動して前記測定探針を検査対象試料に対して走査する駆動部と、前記測定探針を伝搬したプラズモンにより前記測定探針と前記検査対象試料表面との間に近接場光を発生させて、前記検査対象試料表面で反射した近接場光を検出する近接場光検出光学系とを備えて構成した。

20

【0017】

そして、更に、変位検出手段でカンチレバーの変形を検出して得た信号を処理して検査対象試料表面の原子間力顕微鏡画像（AFM画像）を作成するAFM画像作成手段を備えて構成した。

【0018】

また、本発明では、走査プローブ顕微鏡を用いた試料の観察方法において、ナノチューブで形成された測定探針を支持する支持部を駆動して前記測定探針を検査対象試料に対して走査し、レーザー光を前記測定探針に照射してプラズモン励起させ、前記レーザー光により励起したプラズモンを前記測定探針を伝搬させ、前記測定探針に伝播したプラズモンにより前記測定探針と前記検査対象試料表面との間で発生させて、前記検査対象試料表面で反射した近接場光を検出するようにした。

30

【0019】

そして、更に、カンチレバーの変形を検出して得た信号を処理して検査対象試料表面の原子間力顕微鏡画像（AFM画像）も作成するようにした。

【発明の効果】

【0020】

40

本発明によれば、プローブと試料の双方にダメージを与えることなく、ナノメートルオーダーの分解能でかつ高い再現性で、試料表面の光学情報や凹凸情報の測定が可能になる。その結果、半導体試料の応力分布や不純物分布などの物性情報の測定が可能になり、また異物や欠陥の分類に寄与する光学情報や凹凸情報を測定できるので異物・欠陥分類性能が向上する。さらに、これらの測定結果を半導体製造プロセス条件にフィードバックすることで、信頼性の高い半導体デバイスの高歩留まり生産が可能になるという効果を奏する。

【発明を実施するための最良の形態】

【0021】

金属の微粒子に光を照射すると金属内の自由電子が集団的に振動する表面プラズモンが発生し、照射した光により金属粒子の表面に発生するエバネッセント光がこの表面プラズ

50

モンとカップリングしてプラズモン共鳴を起こし、光吸収を起こすと共に局所的に著しく増強された電場を発生することが知られている。本発明は、この局所的に著しく増強された電場（近接場光）をその先端部に生成するプローブを作成し、このプローブを用いて試料表面の光学的状態を観察、または計測するものである。

本発明の実施の形態を、図を用いて説明する。

【実施例 1】

【0022】

本発明の第 1 の実施例を、図 1、図 9～図 12、及び図 23 に基づいて説明する。本実施例では、図 1 に示すように、多層構造カーボンナノチューブ（CNT：Carbon nanotube）1 あるいは金属ナノチューブ 1 の下端部を円錐状に先鋭化すると共に、内部空洞部分の上端部及び下端部に金（Au）の球形ナノ粒子 2 a 及び 2 b を充填しプラズモン増強近接場プローブを構成する。例えば、カーボンナノチューブの両端に電圧を印加し、印加電圧を大きくしていくと、やがて電流は飽和域に至る。さらに印加電圧を大きくすると、電流が階段状に減少し、ナノチューブは外層から一枚ずつはがされ細くなっていき、最終的にナノチューブ中央で切断される。このプロセスにより、ナノチューブ先端部を先鋭化させることができる。また、金ナノ粒子の充填方法は、例えば高圧電流印加や加熱により両端を開放したナノチューブ 1 と金ナノ粒子 2 を真空室内に入れて、加熱反応させることにより、毛細管現象を応用することにより、金ナノ粒子 2 をナノチューブ 1 内部に包含させることが可能である。この毛細管現象を応用することについては、例えば、web 上（<http://www1.accsnet.ne.jp/~kentaro/yuuki/nanotube/nanotube2.html>）で公開されているような技術を応用することができる。

【0023】

本実施例では、ナノチューブの外径は 20 nm、空洞部分の内径は 4 nm とした。金ナノ粒子 2 a 及び 2 b の直径は 4 nm である。ここで、プラズモンを発生させる限界の金属粒子径が 1 nm 以上であるとされており、金ナノ粒子の直径が 1 nm 以上であれば本発明の目的を達成できる。本実施例においては、比較的安定して製造が可能な金ナノ粒子径の限界として 4 nm にした。しかし、本発明では、金ナノ粒子の直径を 4 nm に限定するものではなく、1 nm～20 nm 程度の範囲の直径であれば、本発明の目的は達成できる。この場合、金ナノ粒子の直径に応じてナノチューブの外径も変える必要が有る。また、以下の実施例では金属粒子として金を用いた場合について説明するが、他の種類の金属、例えば銀ナノ粒子であっても同様な効果を得ることができる。

【0024】

このプローブを、例えば電子ビーム照射によりタングステン（W）をバインダとして絶縁体保持部 6 a 及び 6 b に溶融固着させる。そして、この絶縁体保持部 6 a、6 b 及びナノチューブ上端部に露出した金ナノ粒子 2 a から成る導光部 200 の上方から対物レンズ 320 により波長 532 nm のレーザ光 5 a 及び 5 b を集光して照射する。金ナノ粒子 2 a に励起されたプラズモン共鳴により、微小なスポット光が誘起される。この微小スポット光は、ナノチューブ 1 に表面プラズモンを励起し、この表面プラズモンは、破線矢印 7 a 及び 7 b に示すように、ナノチューブ 1 を上端部から下端部に伝搬していく。ナノチューブ 1 の下端部は円錐状に先鋭化されているので、電場強度が局所的に増強され、ナノチューブ 1 の下端部の金ナノ粒子 2 b に強い局在プラズモンが励起される。この局在プラズモンは試料 10 の表面構造と相互作用して強い共鳴現象を生じ、微小な近接場光 8 を発生させる。

【0025】

この近接場光 8 のスポット径は、金ナノ粒子 2 b が試料 10 に最接近した時に、金ナノ粒子 2 b とほぼ同じ大きさの 4 nm となる。すなわち、本プローブにより 4 nm の光学分解能が得られ、この分解能で、例えば試料 10 の異なる反射率の領域 11 及び 12 を識別することが可能になる。原子間力顕微鏡では、領域 11 及び 12 を識別することはできない。近接場光 8 の反射光は、伝播光 9 a 及び 9 b として対物レンズ 320 により集光され並行光となる。

10

20

30

40

50

【0026】

このプローブでは、導光部200、即ちナノチューブ1の上端部から下端部に向かうプラズモンと逆方向に反射するプラズモンが干渉して定在波が生じ、定在波の節（強度の弱い部分）と腹（強度の強い部分）が存在する。節と腹の位置は導光部200に照射するレーザ光の波長に依存する。従って、ナノチューブ1の長さLは、レーザ光の波長に応じて定在波の腹がナノチューブ1の下端部と一致するように調整することが望ましい。

【0027】

図9に、本プローブを搭載した走査プローブ顕微鏡の構成を示す。走査プローブ顕微鏡は、試料を載置してXYZの3次元方向に移動可能なステージ部1000と、ナノチューブ1を駆動して試料を計測し、得られた信号を処理して画像を生成する計測部2000、
10
ナノチューブ1先端と試料との間に近接場光を発生させるための光を照射する照明光学系3000、近接場光を検出して伝搬された光を集光して検出する検出光学系4000、試料上の被測定部を観察し位置決めするための試料モニタ光学系5000及び全体を制御する制御部6000とを備えて構成される。

【0028】

ステージ部1000は試料を載置してXYZの3次元方向に移動可能なXYZステージ100とドライバ101とを備えている。試料10はXYZステージ100上に載置され、ドライバ101で駆動されて検出光学系4000を介して試料モニタ光学系5000で試料10の表面を観察しながら所望の測定位置に位置決めされる。

【0029】

計測部2000は、ナノチューブ1にレーザ光を導光する導光部200とカンチレバー201、圧電素子アクチュエータ202、XYZ圧電素子アクチュエータ204、カンチレバー201の背面にレーザ光（波長405nm）208を照射する半導体レーザ206、カンチレバー201からの反射光を検出する4分割ポジションセンサ209、及び半導体レーザを制御する駆動回路207を備えている。

試料モニタ光学系5000は、図示していない駆動手段により検出光学系4000の光路中に出し入れ可能なミラー500と、結像レンズ330を透過してミラー500で反射された光の像を撮像する撮像カメラ501を備えている。試料10を載置したXYZステージ100をドライバ101で駆動して試料10の所望の測定位置をナノチューブ1の下に設定するときには、ミラー500を図示していない駆動手段で駆動して検出光学系40
30
000の光路中に挿入して試料からの反射光の光路を撮像カメラ501の方向に曲げ、撮像カメラ501で試料表面の光学像を観察する。試料10の所望の測定位置がプローブ1の下に位置決めされると、ミラー500を図示していない駆動手段で駆動して検出光学系4000の光路中から退避させる。

【0030】

ナノチューブ1は、図1に示した絶縁体保持部4a、4b及び金ナノ粒子2aから成る導光部200と共にカンチレバー201に固定される。このカンチレバー201はZ方向に微小振動させるための圧電素子アクチュエータ202に固定され、さらにXYZ方向に微動走査させるXYZ圧電素子アクチュエータ204に固定される。波長532nmの固体レーザ光源300から出射した光は、透過率：反射率＝96：4のビームスプリッタ3
40
02で2分割され、反射光303はホトダイオード等の光電変換素子304で受光され電気信号に変換される。この信号は、制御部6000中の全体制御ユニット420に送られ、個体レーザ光源300からの出射光の強度変動のモニタリングに使われ、出射光の強度が変動した場合には、固体レーザ光源300の出力を制御して強度を一定にする。

【0031】

照明光学系3000はレーザ光源300、ビームモニタ光学系3100、ビーム整形光学系305、偏光板307、ビームスプリッタ315、対物レンズ320を備えて構成されている。この構成において、レーザ光源300から発射されてビームモニタ光学系3100のビームスプリッタ302を透過した光301は、ビーム整形光学系305でビーム形状が円形の平行光306に変換され、さらに偏光板307を透過した後ビームスプリッ
50

タ 3 1 5 に入射し、円形状の反射領域 3 1 6 b で反射され、対物レンズ 3 2 0 により集束光 5 a、5 b として導光部 2 0 0 を介してナノチューブ 1 の上端部を照射する。

【0032】

計測部 2 0 0 0 においては、上記に説明したように金ナノ粒子 2 a に入射した収束光 5 a、5 b により金ナノ粒子 2 a にプラズモン共鳴が励起され、微小なスポット光が誘起される。この微小スポット光は、ナノチューブ 1 に表面プラズモンを励起し、この表面プラズモンはナノチューブ 1 を上端部から下端部に伝搬していく。ナノチューブ 1 の下端部は円錐状に先鋭化されているので、電場強度が局所的に増強され、ナノチューブ 1 の下端部の金ナノ粒子 2 b に強い局在プラズモンが励起される。この局在プラズモンは試料 1 0 の表面構造と相互作用して強い共鳴現象を生じ、微小な近接場光 8 を発生させる。試料 1 0 の表面構造と相互作用した近接場光 8 からの反射光は、伝搬光 9 a、9 b に変換される。偏光板 3 0 7 は、図 1 0 に示すように、偏光軸 3 0 8 が放射状（半径方向）に形成されており、導光部 2 0 0 に入射した収束光 5 a、5 b の偏光方向をナノチューブ 1 の長手方向と平行になるように制御することにより、プラズモンの励起効率と伝搬効率を向上させている。

10

【0033】

試料から反射した伝搬光 9 a、9 b を検出する検出光学系 4 0 0 0 は、対物レンズ 3 2 0、ビームスプリッタ 3 1 5、結像レンズ 3 3 0 および光電変換素子 3 4 0 を備えて構成されている。

【0034】

20

この検出光学系 4 0 0 0 において、伝搬光 9 a、9 b を対物レンズ 3 2 0 で集光して平行光とした後、ビームスプリッタ 3 1 5 の輪帯透過領域 3 1 6 a を透過させ、透過光 9 0 a、9 0 b を結像レンズ 3 3 0 でホトダイオードや光電子増倍管等の光電変換素子 3 4 0 の受光面上に集光し、光電変換する。

【0035】

計測部 2 0 0 0 の画像形成ユニット 4 1 0 では、光電変換素子 3 4 0 からの検出信号を、圧電素子アクチュエータ 2 0 2 を駆動するドライバ 2 0 3 の制御信号と X Y Z 圧電素子アクチュエータ 2 0 4 を駆動するドライバ 2 0 5 の制御信号とを生成する走査制御ユニット 4 0 0 からの制御信号を用いて処理して 2 次元近接場光画像を生成し、また 4 分割ポジションセンサ 2 0 9 からの出力を圧電素子アクチュエータ 2 0 2 と X Y Z 圧電素子アクチュエータ 2 0 4 とを駆動するドライバ 2 0 3、2 0 5 の制御信号を用いて処理して A F M 画像を生成する。

30

【0036】

画像形成ユニット 4 1 0 で生成された 2 次元近接場光画像及び A F M 画像は制御部 6 0 0 中の全体制御ユニット 4 2 0 に送られ、ディスプレイ等の出力ユニット 4 3 0 の出力画面にそれぞれの画像が別々の画面に、又は、同じ画面上に表示される。

【0037】

次に、光てこの原理を用いてカンチレバー 2 0 1 の先端部に固定されたプローブであるナノチューブ 1 が試料 1 0 に接触しているときの接触力の求め方について説明する。

【0038】

40

カンチレバー 2 0 1 の背面には、駆動回路 2 0 7 によって駆動された半導体レーザ 2 0 6 からのレーザ光（波長 4 0 5 n m）2 0 8 が照射され、その反射光が 4 分割ポジションセンサ 2 0 9 で受光される。

【0039】

ドライバ 2 0 5 で X Y Z 圧電素子アクチュエータ 2 0 4 を駆動してカンチレバー 2 0 1 を下降させ、先端部に固定されたナノチューブ 1 を試料 1 0 に接触させる。この状態でカンチレバー 2 0 1 を更に下降させると、カンチレバー 2 0 1 の傾きが変化してカンチレバー 2 0 1 の背面に照射されているレーザの反射方向が変化し、4 分割ポジションセンサ 2 0 9 上のレーザの入射位置が変化して 4 分割ポジションセンサ 2 0 9 からの出力信号が変化する。この変化した信号を、予め求めておいた 4 分割ポジションセンサ 2 0 9 からの出

50

力信号とカンチレバー 201 の傾きとの関係に基づく接触力のデータと比較して、接触力を求めることができる。

【0040】

次に、試料の表面を計測する手順について、図 23 を用いて説明する。まず、XYZ ステージ 100 を駆動して試料 10 の測定領域をカンチレバー 201 の先端部に取り付けられたナノチューブ 1 の下部に位置させる (S2001)。次に、図 11 に示すように、試料 10 の測定領域において、ナノチューブ 1 と試料表面との接触の状態 (接触力) を 4 分割ポジションセンサ 209 からの出力信号でモニタしながら、カンチレバー 201 を XYZ 圧電素子アクチュエータ 204 により下降させていき (Z 方向走査 501) (S2002)、所定の設定接触力になった時点で下降を停止する (S2003)。

10

【0041】

下降点 502 において近接場光の測定を行った後 (S2004)、カンチレバー 201 を上昇させ (Z 方向走査 503) (S2005)、4 分割ポジションセンサ 209 からの出力信号に基づいて、ナノチューブ 1 が完全に試料 10 から離脱したならば (S2006)、測定領域の計測が終了したか否かを判定し (S2607)、終了していない場合には XYZ 圧電素子アクチュエータ 204 を駆動してカンチレバー 201 を次の測定点に移動させる (X 走査 504) (S2009)。X 走査における移動量 (送りピッチ) は、観察において必要とする分解能に応じて決められる。次の測定点において、再度カンチレバー 201 を下降させ、近接場光の測定を行う (S2002 ~ S2006)。

【0042】

20

以上のステップイン動作を、XYZ 圧電素子アクチュエータ 204 により 2 次元の測定領域 (XY 領域) に渡って繰り返し行った後、測定を完了する (S2007)。ここで、上記 2 次元の測定領域を測定する方法は、テレビにおけるラスタスキャンと同じように走査する。このときの Y 方向への送りピッチ (隣り合う走査の間隔) は、観察において必要とする分解能に応じて決められる。

【0043】

ドライバ 205 によって駆動される XYZ 圧電素子アクチュエータ 204 の XYZ 方向走査、ドライバ 203 によって駆動される圧電素子アクチュエータ 202 の振動制御、XYZ ステージ 100 による試料 10 の位置決めは、計測部 2000 の走査制御ユニット 400 により統括制御され、またナノチューブ 1 と試料 10 との接触力の制御、及び近接場光の測定は、総て制御部 6000 中の全体制御ユニット 420 により統括制御される。走査制御ユニット 400 から XYZ 圧電素子アクチュエータ 204 の XYZ 走査信号が、また全体制御ユニット 420 から近接場光測定信号が、各々画像形成ユニット 410 に送られ、2 次元近接場光画像及び AFM 画像が生成されて、全体制御ユニット 420 を介してディスプレイ等の出力ユニット 430 に出力される (S2008)。

30

【0044】

ナノチューブ-試料間接触力と近接場光の測定タイミングとの関係を、図 12 に示す。図 12 (a) の接触力変化曲線 510 に示すように、ナノチューブ 1 が上昇して試料 10 から退避するに従い、接触力は押し込み方向から引き込み方向に以降し、試料から離脱する瞬間に引き込み力は最大となる。離脱後、次の測定点に移動し再び試料に接近する間は、接触力をまったく受けない状態となる。ナノチューブ 1 が再び接近し始め、試料 10 に接触した瞬間に押し込み方向の力が加わり、設定接触力に達した時点で、カンチレバー 1 は下降を停止する。

40

【0045】

一方、図 12 (b) の検出光強度曲線 520 に示すように、ナノチューブ 1 が上昇して試料 10 から退避するに従い、近接場光検出強度は徐々に低下し、試料から離脱した後退避動作から接近動作に変化する瞬間 T_F 時点で最小値 I_F となる。その後、ナノチューブ 1 が再び接近し始め、金ナノ粒子 2b が試料 10 に接触した瞬間に近接場光検出強度は最大値 I_C となり、設定接触力が維持される間は、この強度 I_C は維持される。接触している任意の時間 T_C での最大値 I_C と最小値 I_F との差分 $\Delta I = I_C - I_F$ を測定点にお

50

る反射光強度として、全体制御ユニット420に記憶する。以上の動作を2次元の測定領域に渡って繰り返し行うことにより、2次元領域の試料表面の反射率分布を金ナノ粒子径4nmとほぼ同じ光学分解能で測定することが可能となる。設定接触力は1nN以下、好ましくは、サブnN～pNで実行することが望ましい。

【0046】

尚、本実施例では、カンチレバー201のZ方向への微小振動は行わず、設定接触力となるための下降及び上昇動作のみとした。但し、接触力の検知は、上記光てこ方式に限定されるものではなく、圧電素子アクチュエータ202によりカンチレバーをサブナノメートルオーダの振幅、MHzオーダの周波数でZ方向に微小振動させ、振動振幅あるいは振動周波数の変化から、検知することも可能である。

10

【0047】

図1及び図12に示すように、本実施例によれば、AFM画像と近接場光画像の同時取得が可能であるばかりでなく、ナノチューブ1の下端部に露出した金ナノ粒子2bと試料10との間でスポット径4nmの近接場光8を常に安定に発生させることができ、さらにこのナノチューブ1を低接触力で試料10に接触させた、すなわち金ナノ粒子2bが試料10に接触した瞬間の近接場光8を検出することにより、近接場光の安定検出が可能となる。その結果、2次元近接場光画像の分解能が向上し、かつ画像再現性を飛躍的に向上させることが可能となる。

【0048】

[導光部200の変形例1]

20

導光部200の変形例を、図2に基づいて説明する。図2は、本実施例におけるプラズモン増強近接場プローブの構成を示したものである。ナノチューブの構成とその機能は、図1に示した例と同様である。第1の実施例では、ナノチューブ1の上端部に露出した金ナノ粒子2aの上方から波長532nmのレーザ光5a、5bを集光して照射し、金ナノ粒子2aに励起されたプラズモン共鳴により、ナノチューブ1に表面プラズモンを励起した。

【0049】

これに対し、本変形例では、図2に示すように、ナノチューブ1上端部に露出した金ナノ粒子2aに上方から金ウェッジ3を近接させ、その上方から波長532nmのレーザ光5a、5bを集光して照射する。金ウェッジ3の先端部3pと金ナノ粒子2aの間に励起されたプラズモン共鳴により、微小なスポット光が誘起される。この微小スポット光は、ナノチューブ1上端部に露出した金ナノ粒子2aに表面プラズモンを励起し、この表面プラズモンは、破線矢印7a及び7bに示すように、ナノチューブ1を上端部から下端部に伝搬していく。ナノチューブ1の下端部は円錐状に先鋭化されているので、電場強度が局所的に増強され、ナノチューブ1の下端部の金ナノ粒子2bに強い局在プラズモンが励起される。この局在プラズモンは試料10の表面構造と相互作用して強い共鳴現象を生じ、微小な近接場光8を発生させる。

30

【0050】

この近接場光8のスポット径は、ナノチューブ1が試料10に最接近した時に、金ナノ粒子2bとほぼ同じ大きさの4nmとなる。すなわち、本プローブにより4nmの光学分解能が得られ、この分解能で、例えば試料10の異なる反射率の領域11及び12を識別することが可能になる。

40

【0051】

本変形例によれば、AFM画像と近接場光画像の同時取得が可能であるばかりでなく、ナノチューブ1の下端部の金ナノ粒子2bと試料10との間でスポット径4nmの近接場光8を常に安定に発生させることができ、さらにこのナノチューブ1を低接触力で試料に接触させた、すなわち金ナノ粒子2bが試料10に接触した瞬間の近接場光8を検出することにより、近接場光の安定検出が可能となる。その結果、2次元近接場光画像の分解能が向上し、かつ画像再現性を飛躍的に向上させることが可能となる。また、金ウェッジ3が無い場合に比べより強いプラズモン共鳴が生じるので、近接場光8の強度が増加し、S

50

N比の高い近接場光画像を得ることが可能となる。

【0052】

[導光部200の変形例2]

導光部200の変形例を、図3に基づいて説明する。図3は、本実施例におけるプラズモン増強近接場プローブの構成を示したものである。ナノチューブの構成とその機能は、図1に示した例と同様である。第1の変形例では、ナノチューブ1上端部に露出した金ナノ粒子2aに上方から金ウェッジ3を近接させ、その上方から波長532nmのレーザ光5a、5bを集光して照射し、金ウェッジ3の先端部3pと金ナノ粒子2aの間にプラズモン共鳴を励起した。これに対し、本変形例では、図3に示すように、ナノチューブ1上端部に露出した金ナノ粒子2aに横方向から方から金ウェッジ3を近接させ、その上方から波長532nmのレーザ光5a、5bを集光して照射し、金ウェッジ3の先端部3pと金ナノ粒子2aの間にプラズモン共鳴を励起する。プラズモン共鳴により、微小なスポット光が誘起される。この微小スポット光は、ナノチューブ1上端部に露出した金ナノ粒子2aに表面プラズモンを励起し、この表面プラズモンは、破線矢印7a及び7bに示すように、ナノチューブ1を上端部から下端部に伝搬していく。ナノチューブ1の下端部は円錐状に先鋭化されているので、電場強度が局所的に増強され、ナノチューブ1の下端部の金ナノ粒子2bに強い局在プラズモンが励起される。この局在プラズモンは試料10の表面構造と相互作用して強い共鳴現象を生じ、微小な近接場光8を発生させる。

10

【0053】

この近接場光8のスポット径は、ナノチューブ1が試料10に最接近した時に、金ナノ粒子2bとほぼ同じ大きさの4nmとなる。すなわち、本プローブにより4nmの光学分解能が得られ、この分解能で、例えば試料10の異なる反射率の領域11及び12を識別することが可能になる。

20

【0054】

本変形例によれば、AFM画像と近接場光画像の同時取得が可能であるばかりでなく、ナノチューブ1の下端部の金ナノ粒子2bと試料10との間でスポット径4nmの近接場光8を常に安定に発生させることができ、さらにこのナノチューブ1を低接触力で試料に接触させた、すなわち金ナノ粒子2bが試料10に接触した瞬間の近接場光8を検出することにより、近接場光の安定検出が可能となる。その結果、2次元近接場光画像の分解能が向上し、かつ画像再現性を飛躍的に向上させることが可能となる。また、金ウェッジ3が無い場合に比べより強いプラズモン共鳴が生じるので、近接場光8の強度が増加し、S/N比の高い近接場光画像を得ることが可能となる。

30

【0055】

[検出光学系4000の変形例1]

本発明に係る検出光学系4000の第1の変形例を、図13に基づいて説明する。図13は、本実施例における走査プローブ顕微鏡の構成を示したものである。本走査プローブ顕微鏡の基本構成とその機能は、図9に示した実施例における走査プローブ顕微鏡と同様であるが、近接場光の検出部分に分光器611を配置した点異なる。すなわち、ナノチューブ1の下端部で出射し試料10で反射された近接場光8は、伝搬光9a、9bに変換されて対物レンズ320で平行光90a、90bとなり、結像レンズ330で分光器611の入射面に、ミラー610を介して集光される。

40

分光器611では、全体制御ユニット420からの制御信号に基づき、伝搬光の中から所望の波長の光が選択されて、ホトダイオードや光電子増倍管等の光電変換素子612の受光面上に集光され、光電変換される。この検出信号は全体制御ユニット420に送られ、特定波長の2次元近接場光画像が形成される。図9に示した実施例及びその変形例では、入射レーザ光の波長と同一の波長を検出していたのに対し、本変形例では、入射レーザ光から波長シフトした近接場光を検出することが可能である。例えば、歪シリコンを用いた半導体素子の微小場の応力分布を、ラマン分光を応用してナノメートルの分解能で画像化することが可能である。その場合、ナノチューブ1の接触によって試料自身に微弱な変形が生じラマンシフトが発生しないよう、ナノチューブ1と試料10間の接触力はサブn

50

N～p Nオーダー以下に設定するのが望ましい。

【0056】

また、固体レーザ300の代わりに、ブロードな波長帯域を有するLED等の光源を用いれば、波長帯域内の任意の波長の2次元近接場光画像の検出も可能である。また、分光器611を、CCD1次元センサ等のアレイセンサを用いた全波長一括検出タイプのものに変更すれば、2次元近接場分光画像を得ることができ、ナノメートル分解能で試料10の分光分析が可能となる。

【0057】

図9に示した実施例及びその変形例と同様、本変形例によれば、AFM画像と近接場光画像の同時取得が可能であるばかりでなく、近接場光8を常に安定に発生させることができ、また近接場光の安定検出が可能となる。その結果、2次元近接場光画像の分解能が向上し、かつ画像再現性を飛躍的に向上させることが可能となる。

10

【0058】

[検出光学系4000の変形例2]

検出光学系4000の第2の変形例を、図14に基づいて説明する。図14では、光源620に波長630nm、520nm、430nm近傍の3色の光を発する白色レーザ620を用い、近接場光の検出部分に色分離フィルタ625r、625g、624bを配置した。光源620から出射したレーザ光によりナノチューブ1と試料10との間に近接場光8を発生させ、その反射光が伝搬光9a、9bとして対物レンズ320、ビームスプリッタ315を透過して結像レンズ330に達するまでは、図9を用いて説明した実施例と同じである。

20

【0059】

対物レンズ330に達した平行光90a、90bは、ミラー610を介して結像レンズ330で集光された後、リレーレンズ615で平行光となり、さらにダイクロイックミラー621（波長600nm以上は透過、それ以下は反射）と干渉フィルタ625r（透過中心波長630nm）により、波長630nmの光が抽出される。この光は集光レンズ631により、ホトダイオードや光電子増倍管等の光電変換素子641の受光面上に集光され、光電変換される。ダイクロイックミラー621で反射された光は、ダイクロイックミラー622（波長480nm以上は反射、それ以下は透過）と干渉フィルタ625g（透過中心波長520nm）により、波長520nmの光が抽出される。この光は集光レンズ632により、ホトダイオードや光電子増倍管等の光電変換素子642の受光面上に集光され、光電変換される。ダイクロイックミラー622を透過した光は、ミラー623で反射された後、干渉フィルタ625b（透過中心波長430nm）により、波長430nmの光が抽出される。この光は集光レンズ633により、ホトダイオードや光電子増倍管等の光電変換素子643の受光面上に集光され、光電変換される。

30

【0060】

3波長の検出信号は全体制御ユニット420に送られ、3波長の2次元近接場光画像が形成される。また、この3波長信号を合成することにより、ナノメートル分解能のカラー画像を生成することも可能である。本実施例により、例えば、現在SEMを用いて、モノクロ画像のみから欠陥分類を行っている半導体用欠陥レビューを、ナノメートル分解能のAFM画像とカラー画像にて実行することが可能となり、欠陥分類精度が格段に向上する。本変形例によれば、AFM画像と近接場光画像の同時取得が可能であるばかりでなく、近接場光8を常に安定に発生させることができ、また近接場光の安定検出が可能となる。その結果、2次元近接場光画像の分解能が向上し、かつ画像再現性を飛躍的に向上させることが可能となる。

40

【0061】

[計測部2000の変形例1]

本発明に係る計測部2000の第1の変形例を、図15に基づいて説明する。図15は、本実施例における計測部2000の変更部分を示したものである。本構成では、図14に示した構成に図16の表441に示す半導体材料一分光反射率データセットを格納した

50

メモリユニット４４０を更に備えた構成となっている（図15においては、図14に記載した構成と共通する部分を大幅に省略して記載してある）。すなわち、図１６に示すように、半導体製造に使用されるSiやSiO₂などの各種材料と各光源波長 $\lambda_1 = 630\text{ nm}$ 、 $\lambda_2 = 520\text{ nm}$ 、 $\lambda_3 = 430\text{ nm}$ に対する反射光強度の組み合わせデータ（ I_{11} 、 I_{21} 、 I_{31} ）、（ I_{12} 、 I_{22} 、 I_{32} ）、（ I_{13} 、 I_{23} 、 I_{33} ）・・・を予めメモリユニット４４０に格納しておき、得られた３波長の検出光強度を表４４１に照合することにより、試料１０を構成する材料の判別をナノメートル空間分解能で実行できる。もちろん、波長は３波長に限定されるものではなく、４波長、５波長と増やすことにより、材料分析精度は向上する。

【００６２】

10

図１７は、本変形例における走査プローブ顕微鏡をコンタクトホールなどの深穴底の残膜検出に適用した例を示すものである。直径３０nm程度のコンタクトホール５０１の内部にナノチューブ１を挿入し、穴底に低接触力で接触した瞬間の分光信号を取得し、その分光信号を予めメモリユニット４４０に格納しておいた膜厚と分光強度との関係に照合することにより、残膜５０２の有無及びその材質情報を得ることができる。

【００６３】

本変形例によれば、AFM画像と近接場光画像の同時取得が可能であるばかりでなく、近接場光８を常に安定に発生させることができ、また近接場光の安定検出が可能となる。その結果、２次元近接場光画像の分解能が向上し、かつ画像再現性を飛躍的に向上させることが可能となる。

20

【００６４】

〔計測部２０００の変形例２〕

本発明に係る計測部２０００の第１の変形例を、図１８に基づいて説明する。図１８は、本実施例における走査プローブ顕微鏡の構成を示したものである。本走査プローブ顕微鏡の基本構成とその機能は、図９に示した実施例における走査プローブ顕微鏡と同様であるが、カンチレバー２０１をZ方向に微小振動させる点が異なる。ドライバ２０３によって圧電素子アクチュエータ２０２を駆動し、カンチレバー２０１をZ方向に一定周波数fで微小振動させ、近接場光８に強度変調をかける。一定周波数fの駆動信号を参照信号として、ロックインアンプ４５０で光電変換素子３４０の検出信号から周波数fの成分のみを抽出することにより、近接場光８の情報を感度よく検出することが可能である。ロックインアンプ４５０からの出力信号は全体制御ユニット４２０に送られる。以降の処理は、図９に示した実施例における走査プローブ顕微鏡と同様である。

30

【００６５】

本変形例によれば、AFM画像と近接場光画像の同時取得が可能であるばかりでなく、ナノチューブ１の下端部の金ナノ粒子２bと試料１０との間でスポット径４nmの近接場光８を常に安定に発生させることができ、さらにこのナノチューブ１を低接触力で試料に接触させた、すなわち金ナノ粒子２bが試料１０に接触した瞬間の近接場光８を検出することにより、近接場光の安定検出が可能となる。その結果、２次元近接場光画像の分解能が向上し、かつ画像再現性を飛躍的に向上させることが可能となる。また、近接場光８をロックイン検出することにより、SN比の高い近接場光画像を得ることが可能となる。

40

【実施例２】

【００６６】

本発明の第２の実施例を、図４及び図１９に基づいて説明する。図４は、本実施例におけるプラズモン増強近接場プローブの構成を示したものである。ナノチューブは第１の実施例及びその変形例と同様、多層構造カーボンナノチューブ１、あるいは金属ナノチューブ１であり、下端部を円錐状に先鋭化した構成となっている。第１の実施例及びその変形例では、内部空洞部分の上端部及び下端部に金（Au）の球形ナノ粒子２a及び２bを充填していたが、本実施例では、図４に示すように、上端部の金ナノ粒子２aの上部にフォトルミネセンス、エレクトロルミネセンスを発現するV、Y、Ta、Sb等の金属カーバイドや、ZnS蛍光体、CaS蛍光体、CdSe（コア）／ZnS（外殻）等の蛍光粒子

50

25を搭載し、導光部200を構成する。

【0067】

図19は、本プローブを搭載した走査プローブ顕微鏡の構成を示したものである。本走査プローブ顕微鏡の基本構成とその機能は、図9に示した実施例における走査プローブ顕微鏡と同様であるが、近接場光を検出するホトダイオードや光電子増倍管等の光電変換素子340の直前に、上記蛍光粒子25が発する蛍光波長±10nmの透過帯域を有する波長選択フィルタ355を配置した点が異なる。すなわち、図4に示すように、固体レーザ300から出射したレーザ光5a、5bを集光して上記蛍光粒子25に照射すると、レーザ光5a、5bとは波長の異なる蛍光が発生する。この蛍光により、金ナノ粒子2aにプラズモン共鳴が生じ、蛍光と同じ波長の微小なスポット光が誘起される。この微小スポット光は、ナノチューブ1に表面プラズモンを励起し、この表面プラズモンは、破線矢印7a及び7bに示すように、ナノチューブ1を上端部から下端部に伝搬していく。ナノチューブ1の下端部は円錐状に先鋭化されているので、電場強度が局所的に増強され、ナノチューブ1の下端部の金ナノ粒子2bに強い局在プラズモンが励起される。この局在プラズモンは試料10の表面構造と相互作用して強い共鳴現象を生じ、蛍光と同じ波長の微小な近接場光8を発生させる。

10

【0068】

この近接場光8のスポット径は、金ナノ粒子2bが試料10に最接近した時に、金ナノ粒子2bとほぼ同じ大きさの4nmとなる。すなわち、本プローブにより4nmの光学分解能が得られ、この分解能で、例えば試料10の異なる反射率の領域11及び12を識別することが可能になる。原子間力顕微鏡では、領域11及び12を識別することはできない。近接場光8の反射光は、伝播光9a及び9bとして対物レンズ320により集光され並行光90a、90bとなる。平行光90a、90bは、ビームスプリッタ315の輪帯透過領域316aを透過し、透過光は結像レンズ330を介し、波長選択フィルタ355で蛍光波長成分318のみが抽出され、ホトダイオードや光電子増倍管等の光電変換素子340で光電変換される。以降の処理は、図9に示した実施例における走査プローブ顕微鏡と同様である。

20

【0069】

尚、本実施例では、導光部200に蛍光粒子25を用いたが、これに限定されることなく、例えば非線形光学結晶などを用い、入射光の1/2の波長の近接場光を生成することも可能である。

30

【0070】

本実施例によれば、AFM画像と近接場光画像の同時取得が可能であるばかりでなく、ナノチューブ1の下端部の金ナノ粒子2bと試料10との間でスポット径4nmの近接場光8を常に安定に発生させることができ、さらにこのナノチューブ1を低接触力で試料に接触させた、すなわち金ナノ粒子2bが試料10に接触した瞬間の近接場光8を検出することにより、近接場光の安定検出が可能となる。その結果、2次元近接場光画像の分解能が向上し、かつ画像再現性を飛躍的に向上させることが可能となる。さらに、本実施例によれば、固体レーザ300から出射したレーザ光5a、5bによる途中の光路やナノチューブ自身での散乱光等、背景雑音を大幅に低減させることが可能となり、SN比の高い近接場光画像を得ることが可能となる。

40

【実施例3】

【0071】

本発明の第3の実施例を、図5及び図20に基づいて説明する。図5は、本実施例におけるプラズモン増強近接場プローブの構成を示したものである。ナノチューブは第1の実施例及びその変形例と同様、多層構造カーボンナノチューブ1、あるいは金属ナノチューブ1であり、下端部を円錐状に先鋭化すると共に、内部空洞部分の上端部及び下端部に金(Au)の球形ナノ粒子2a及び2bを充填した構成となっている。第1及び第2の実施例とその変形例では、ナノチューブ1の上端部に露出した金ナノ粒子2aに対し、その上方からレーザ光を集光して照射する構成となっていたが、本実施例では、図5に示すよう

50

に、ナノチューブ1の長手方向と平行な方向17の直線偏光レーザ光16を、集光レンズ5により横方向から集光して照射する導光部200とした点が異なる。

【0072】

図20は、本プローブを搭載した走査プローブ顕微鏡の構成を示したものである。本走査プローブ顕微鏡の基本構成とその機能は、図9に示した実施例における走査プローブ顕微鏡と概ね同様であるが、ナノチューブ1の上端部に露出した金ナノ粒子2aに上方からレーザ光を集光して照射する照明光学系3000の代わりに、図5に示すように、ナノチューブ1に対し横方向からレーザ光を集光して照射するレーザ光源を内蔵した照明光学系700を搭載した点が異なる。照明光学系700では、さらにレーザ光のモニタ信号を全体制御ユニット420に送り、レーザ光の強度が変動した場合には、レーザ光源の出力を制御して強度を一定にする。

10

【0073】

金ナノ粒子2aに励起されたプラズモン共鳴により、微小なスポット光が誘起される。この微小スポット光は、ナノチューブ1に表面プラズモンを励起し、この表面プラズモンは、破線矢印7a及び7bに示すように、ナノチューブ1を上端部から下端部に伝搬していく。ナノチューブ1の下端部は円錐状に先鋭化されているので、電場強度が局所的に増強され、ナノチューブ1の下端部の金ナノ粒子2bに強い局在プラズモンが励起される。この局在プラズモンは試料10の表面構造と相互作用して強い共鳴現象を生じ、微小な近接場光8を発生させる。

【0074】

20

この近接場光8のスポット径は、金ナノ粒子2bが試料10に最接近した時に、金ナノ粒子2bとほぼ同じ大きさの4nmとなる。すなわち、本プローブにより4nmの光学分解能が得られ、この分解能で、例えば試料10の異なる反射率の領域11及び12を識別することが可能になる。原子間力顕微鏡では、領域11及び12を識別することはできない。近接場光8の反射光は、伝播光9a及び9bとして対物レンズ320により集光され並行光90a、90bとなる。平行光90a、90bは、ビームスプリッタ315の輪帯透過領域316aを透過し、透過光は結像レンズ330を介し、ホトダイオードや光電子増倍管等の光電変換素子340で光電変換される。以降の処理は、図9に示した実施例における走査プローブ顕微鏡と同様である。

【0075】

30

本実施例によれば、AFM画像と近接場光画像の同時取得が可能であるばかりでなく、ナノチューブ1の下端部の金ナノ粒子2bと試料10との間でスポット径4nmの近接場光8を常に安定に発生させることができ、さらにこのナノチューブ1を低接触力で試料に接触させた、すなわち金ナノ粒子2bが試料10に接触した瞬間の近接場光8を検出することにより、近接場光の安定検出が可能となる。その結果、2次元近接場光画像の分解能が向上し、かつ画像再現性を飛躍的に向上させることが可能となる。

【0076】

[導光部200の変形例]

導光部200の変形例を、図6に基づいて説明する。図6は、本実施例におけるプラズモン増強近接場プローブの構成を示したものである。ナノチューブ1の構成とその機能は、図1に示した例と同様である。第3の実施例では、ナノチューブ1の上端部に露出した金ナノ粒子2aに対し、ナノチューブ1の長手方向と平行な方向17の直線偏光レーザ光16を、集光レンズ5により横方向から集光して照射する導光部200を構成していた。これに対し、本変形例では、図6に示すように、ナノチューブ保持部21a、21bを円筒形の金もしくは銀のロッドで構成し、これを導光部200とする。ナノチューブ保持部21a、21bに対し、ナノチューブ1の長手方向と平行な方向17の直線偏光レーザ光16を、集光レンズ5により横方向から集光して照射する。

40

【0077】

直線偏光レーザ光16の照射によって、金もしくは銀で構成された円筒状ナノチューブ保持部21a、21bには表面プラズモンが励起されてナノチューブ長手方向に伝搬し、

50

金ナノ粒子 2 a にプラズモンが励起され、微小なスポット光が誘起される。この微小スポット光は、ナノチューブ 1 に表面プラズモンを励起し、この表面プラズモンは、破線矢印 7 a 及び 7 b に示すように、ナノチューブ 1 を上端部から下端部に伝搬していく。ナノチューブ 1 の下端部は円錐状に先鋭化されているので、電場強度が局所的に増強され、ナノチューブ 1 の下端部の金ナノ粒子 2 b に強い局在プラズモンが励起される。この局在プラズモンは試料 10 の表面構造と相互作用して強い共鳴現象を生じ、微小な近接場光 8 を発生させる。金ナノ粒子 2 a を省略して、直接円筒状ナノチューブ保持部 21 a、21 b からナノチューブ 1 にプラズモンを励起・伝搬させることも可能である。

【0078】

この近接場光 8 のスポット径は、金ナノ粒子 2 b が試料 10 に最接近した時に、金ナノ粒子 2 b とほぼ同じ大きさの 4 nm となる。すなわち、本プローブにより 4 nm の光学分解能が得られ、この分解能で、例えば試料 10 の異なる反射率の領域 11 及び 12 を識別することが可能になる。原子間力顕微鏡では、領域 11 及び 12 を識別することはできない。近接場光 8 の反射光は、伝播光 9 a 及び 9 b として対物レンズ 320 により集光され並行光 90 a、90 b となる。平行光 90 a、90 b は、ビームスプリッタ 315 の輪帯透過領域 316 a を透過し、透過光は結像レンズ 330 を介し、ホトダイオードや光電子増倍管等の光電変換素子 340 で光電変換される。以降の処理は、図 9 に示した実施例における走査プローブ顕微鏡と同様である。

【0079】

本実施例によれば、AFM 画像と近接場光画像の同時取得が可能であるばかりでなく、ナノチューブ 1 の下端部の金ナノ粒子 2 b と試料 10 との間にスポット径 4 nm の近接場光 8 を常に安定に発生させることができ、さらにこのナノチューブ 1 を低接触力で試料に接触させた、すなわち金ナノ粒子 2 b が試料 10 に接触した瞬間の近接場光 8 を検出することにより、近接場光の安定検出が可能となる。その結果、2 次元近接場光画像の分解能が向上し、かつ画像再現性を飛躍的に向上させることが可能となる。

【実施例 4】

【0080】

本発明の第 4 の実施例を、図 7 及び図 21 に基づいて説明する。図 7 は、本実施例におけるプラズモン増強近接場プローブの構成を示したものである。ナノチューブは第 1 の実施例及びその変形例と同様、多層構造カーボンナノチューブ 1、あるいは金属ナノチューブ 1 であり、下端部を円錐状に先鋭化すると共に、内部空洞部分の上端部及び下端部に金 (Au) の球形ナノ粒子 2 a 及び 2 b を充填した構成となっている。本実施例では、図 7 に示すように、照明光学系 3000 を完全に排除し、ナノチューブ 1 上端部の金ナノ粒子 2 a 上に半導体レーザ (例えば波長 405 nm) などのレーザ光源 27 を搭載し、これを導光部 200 として構成した。

【0081】

図 21 は、本プローブを搭載した走査プローブ顕微鏡の構成を示したものである。照明光学系 3000 を完全に排除し、ナノチューブ 1 上端部の金ナノ粒子 2 a 上に半導体レーザなどのレーザ光源 27 を搭載した導光部 200 を設けた点以外は、本走査プローブ顕微鏡の基本構成とその機能は、図 9 に示した実施例における走査プローブ顕微鏡と概ね同様である。レーザ光源 27 は駆動回路 710 からの駆動信号 720 によって駆動され、またレーザ光のモニタ信号を全体制御ユニット 420 に送り、レーザ光の強度が変動した場合には、レーザ光源の出力を制御して強度を一定にする。

【0082】

レーザ光源 27 によって照明された金ナノ粒子 2 a にはプラズモンが励起され、微小なスポット光が誘起される。この微小スポット光は、ナノチューブ 1 に表面プラズモンを励起し、この表面プラズモンは、破線矢印 7 a 及び 7 b に示すように、ナノチューブ 1 を上端部から下端部に伝搬していく。ナノチューブ 1 の下端部は円錐状に先鋭化されているので、電場強度が局所的に増強され、ナノチューブ 1 の下端部の金ナノ粒子 2 b に強い局在プラズモンが励起される。この局在プラズモンは試料 10 の表面構造と相互作用して強い

10

20

30

40

50

共鳴現象を生じ、微小な近接場光 8 を発生させる。

【0083】

この近接場光 8 のスポット径は、金ナノ粒子 2 b が試料 1 0 に最接近した時に、金ナノ粒子 2 b とほぼ同じ大きさの 4 nm となる。すなわち、本プローブにより 4 nm の光学分解能が得られ、この分解能で、例えば試料 1 0 の異なる反射率の領域 1 1 及び 1 2 を識別することが可能になる。原子間力顕微鏡では、領域 1 1 及び 1 2 を識別することはできない。近接場光 8 の反射光は、伝播光 9 a 及び 9 b として対物レンズ 3 2 0 により集光され並行光 9 0 a、9 0 b となる。平行光 9 0 a、9 0 b は、ビームスプリッタ 3 1 5 の輪帯透過領域 3 1 6 a を透過し、透過光は結像レンズ 3 3 0 を介し、ホトダイオードや光電子増倍管等の光電変換素子 3 4 0 で光電変換される。以降の処理は、図 9 に示した実施例における走査プローブ顕微鏡と同様である。

10

【0084】

本実施例によれば、AFM 画像と近接場光画像の同時取得が可能であるばかりでなく、ナノチューブ 1 の下端部の金ナノ粒子 2 b と試料 1 0 との間でスポット径 4 nm の近接場光 8 を常に安定に発生させることができ、さらにこのナノチューブ 1 を低接触力で試料に接触させた、すなわち金ナノ粒子 2 b が試料 1 0 に接触した瞬間の近接場光 8 を検出することにより、近接場光の安定検出が可能となる。その結果、2 次元近接場光画像の分解能が向上し、かつ画像再現性を飛躍的に向上させることが可能となる。また、本実施例によれば、照明光学系 3 0 0 0 が不要となるので走査プローブ顕微鏡の構成が簡略化されると同時に、近接したレーザ光源によりプラズモンの励起・伝搬効率が向上し、S/N 比の高い近接場光画像を得ることが可能となる。

20

【実施例 5】

【0085】

本発明の第 5 の実施例を、図 8 及び図 2 2 に基づいて説明する。図 8 は、本実施例におけるプラズモン増強近接場プローブの構成を示したものである。ナノチューブは第 1 の実施例及びその変形例と同様、多層構造カーボンナノチューブ 1、あるいは金属ナノチューブ 1 であり、下端部を円錐状に先鋭化すると共に、内部空洞部分の上端部及び下端部に金 (Au) の球形ナノ粒子 2 a 及び 2 b を充填した構成となっている。本実施例では、図 8 に示すように、照明光学系 3 0 0 0 を完全に排除し、光ファイバ 3 0 で半導体レーザ (例えば波長 4 0 5 nm) 7 3 0 や固体レーザ 7 3 0 からのレーザ光を導光し、偏光板 3 0 7 を介して集光レンズ 3 1 でナノチューブ 1 上端部の金ナノ粒子 2 a を照明する光学系を構成し、これを導光部 2 0 0 とした。

30

【0086】

図 2 2 は、本プローブを搭載した走査プローブ顕微鏡の構成を示したものである。照明光学系 3 0 0 0 を完全に排除し、レーザ光源 7 3 0 と光ファイバ 3 0、集光レンズ 3 1、偏光板 3 0 7 から成る導光部 2 0 0 を設けた点以外は、本走査プローブ顕微鏡の基本構成とその機能は、図 9 に示した実施例における走査プローブ顕微鏡と概ね同様である。レーザ光源 7 3 0 のレーザ光モニタ信号は全体制御ユニット 4 2 0 に送られ、レーザ光の強度が変動した場合には、レーザ光源 7 3 0 の出力を制御して強度を一定にする。

40

【0087】

光ファイバ 3 0 からのレーザ光 3 2 によって照明された金ナノ粒子 2 a にはプラズモンが励起され、微小なスポット光が誘起される。この微小スポット光は、ナノチューブ 1 に表面プラズモンを励起し、この表面プラズモンは、破線矢印 7 a 及び 7 b に示すように、ナノチューブ 1 を上端部から下端部に伝搬していく。ナノチューブ 1 の下端部は円錐状に先鋭化されているので、電場強度が局所的に増強され、ナノチューブ 1 の下端部の金ナノ粒子 2 b に強い局在プラズモンが励起される。この局在プラズモンは試料 1 0 の表面構造と相互作用して強い共鳴現象を生じ、微小な近接場光 8 を発生させる。

【0088】

この近接場光 8 のスポット径は、金ナノ粒子 2 b が試料 1 0 に最接近した時に、金ナノ粒子 2 b とほぼ同じ大きさの 4 nm となる。すなわち、本プローブにより 4 nm の光学分

50

解能が得られ、この分解能で、例えば試料10の異なる反射率の領域11及び12を識別することが可能になる。原子間力顕微鏡では、領域11及び12を識別することはできない。近接場光8の反射光は、伝播光9a及び9bとして対物レンズ320により集光され並行光90a、90bとなる。平行光90a、90bは、ビームスプリッタ315の輪帯透過領域316aを透過し、透過光は結像レンズ330を介し、ホトダイオードや光電子増倍管等の光電変換素子340で光電変換される。以降の処理は、図9に示した実施例における走査プローブ顕微鏡と同様である。

【0089】

本実施例によれば、AFM画像と近接場光画像の同時取得が可能であるばかりでなく、ナノチューブ1の下端部の金ナノ粒子2bと試料10との間でスポット径4nmの近接場光8を常に安定に発生させることができ、さらにこのナノチューブ1を低接触力で試料に接触させた、すなわち金ナノ粒子2bが試料10に接触した瞬間の近接場光8を検出することにより、近接場光の安定検出が可能となる。その結果、2次元近接場光画像の分解能が向上し、かつ画像再現性を飛躍的に向上させることが可能となる。また、本実施例によれば、照明光学系3000が不要となるので走査プローブ顕微鏡の構成が簡略化される。

【0090】

尚、上記第1～第5の実施例では、ナノ粒子として金ナノ粒子を用いたが、本発明はこれに限定されるものではなく、プラズモン励起、プラズモン伝搬の観点から効率の良い粒子であれば、例えば銀やアルミニウムなどのナノ粒子も適用可能である。またナノチューブも、多層構造カーボンナノチューブや金属ナノチューブに限定されるものではなく、単層カーボンナノチューブや金属含有カーボンナノチューブなどナノメートルオーダーの円筒形構造もしくはそれに類するものであり、上記ナノ粒子との組み合わせによりプラズモン励起とプラズモン伝搬に好適な材質及び構成であれば、他の材質、構造でも構わない。

【0091】

また、上記第1～第5の実施例では、プラズモン励起波長は532nmや405nmとしたが、本発明はこれに限定されるものではなく、プラズモン励起とプラズモン伝搬の観点から、またナノチューブを共振器として考えたときの、ナノチューブ長さにとって、効率の良い波長（共振波長）を用いることが望ましい。

【0092】

また、上記第1～第5の実施例では、近接場光の検出はナノチューブ下端の試料表面からの伝搬光を検出する構成としたが、本発明はこれに限定されるものではなく、ナノチューブ下端から上端にプラズモン伝搬し、上端部から散乱する伝搬光を検出する構成でも構わないことは自明である。

【実施例6】

【0093】

本発明の第6の実施例を、図24、図25、図27、図28、図30、及び図31に基づいて説明する。図24は、本実施例におけるプラズモン増強近接場プローブの導光部の構成を示したものである。第1～第5の実施例では、ナノチューブ1へ励起光を導く導光部200をカンチレバー201の背面に設けていたが、本実施例ではカンチレバー201そのものを導光部として用いる。例えばSiから成るカンチレバー201の先端に同様にSiから成る三角錐状のチップ730が形成されており、その先端にナノチューブ1が固定されている。カンチレバー1の背面201sに伝搬光である励起光5a、5bを集束して照射する。この様子を図25に示す、カンチレバー201及びチップ730の断面図を用いて詳細に説明する。カンチレバー201及びチップ730がSiから成る場合、励起光5a、5bは、例えば波長830nmの近赤外レーザ光を用い、NA（Numerical Aperture：開口数）0.2で集束してカンチレバー201の背面201sに照射する。偏光方向5pはP偏光であり、集束角735は約23°である。入射角736は、表面反射による光量損失を抑えるため、ブリュースター角である75°近辺にするのが望ましい。入射した励起光は、屈折して三角錐状のチップ730の稜線730wに集束する。集束角737は約6°となる。稜線730wに対する入射角738は臨界角で

ある約 16° 以上に設定することが望ましい。チップ730の表面には金の薄膜730f、730rがコートされている。プラズモンの発生効率を考慮して、稜線730wに沿った金薄膜730fの膜厚は50nm程度、稜線730wを挟む二つの斜面の膜厚はそれよりも薄くすることが望ましい。稜線730wへのP偏光の励起光の照射により、金薄膜730f表面に沿ってTM(Transverse Magnetic)モード・プラズモン740が励起され、チップ730の先端に向かって伝播する。プラズモンが励起される共鳴ディップ入射角738の許容範囲はたかだか $2\sim 3^{\circ}$ であるので、励起光の集束角737の範囲は上述の通り、その2倍の約 6° 程度が望ましい。励起されたTMモード・プラズモン740は、図27の破線矢印7a及び7bに示すように、チップ730の先端に固定されたナノチューブ1の表面及び内部に充填された金ナノ粒子2a、2c、2bを上端部から下端部に伝搬していく。ナノチューブは第1の実施例及びその変形例と同様、多層構造カーボンナノチューブ1、あるいは金属ナノチューブ1であり、下端部を円錐状に先鋭化した構成となっている。図27に示すように、ナノチューブ1の下端部は円錐状に先鋭化されているので、電場強度が局所的に増強され、ナノチューブ1の下端部の金ナノ粒子2bに強い局在プラズモンが励起される。この局在プラズモンは試料10の表面構造と相互作用して強い共鳴現象を生じ、微小な近接場光8を発生させる。

【0094】

本実施例では、ナノチューブの外径は20nm、空洞部分の内径は4nmとした。金ナノ粒子2a、2b、2cの直径は4nmである。ここで、プラズモンを発生させる限界の金属粒子径が1nm以上であるとされており、金ナノ粒子の直径が1nm以上であれば本発明の目的を達成できる。本実施例においては、比較的安定して製造が可能な金ナノ粒子径の限界として4nmにした。しかし、本発明では、金ナノ粒子の直径を4nmに限定するものではなく、1nm $\sim$ 20nm程度の範囲の直径であれば、本発明の目的は達成できる。この場合、金ナノ粒子の直径に応じてナノチューブの外径も変える必要が有る。また、以下の実施例では金属粒子として金を用いた場合について説明するが、他の種類の金属、例えば銀ナノ粒子であっても同様な効果を得ることができる。

【0095】

この近接場光8のスポット径は、金ナノ粒子2bが試料10に最接近した時に、金ナノ粒子2bとほぼ同じ大きさの4nmとなる。すなわち、本プローブにより4nmの光学分解能が得られる。本実施例では、ナノチューブ1内に充填する金属構造として、金ナノ粒子列を示したが、本発明はこれに限定されることはなく、例えば図28に示すように、金ナノロッド702を充填しても同様の効果が得られる。ナノロッド材料は他の種類の金属、例えば銀ナノロッドであっても同様な効果を得ることができる。さらに、第1 $\sim$ 第5の実施例に示したように、ナノチューブ1の上端部と下端部のみに金ナノ粒子2a及び2bを充填した構造でも同様の効果が得られる。

【0096】

本実施例では、カンチレバー201とチップ730はSiから成るとしたが、本発明はこれに限定されるものではなく、例えば Si_3N_4 から成るカンチレバー201とチップ730も適用可能である。この場合、励起光として例えば波長532nmの可視光を用いることができる。波長532nmの可視レーザ光をNA(Numerical Aperture: 開口数)0.1で集束してカンチレバー201の背面201sに照射する。偏光方向5pはP偏光であり、集束角735は約 11.5° である。入射角736は、表面反射による光量損失を抑えるため、ブリュースター角である 63° 近辺にするのが望ましい。入射した励起光は、屈折して三角錐状のチップ730の稜線730wに集束する。集束角737は約 5.7° となる。稜線730wに対する入射角738は臨界角である約 30° 以上に設定することが望ましい。

【0097】

このプローブでは、ナノチューブ1の上端部から下端部に向かうプラズモンと逆方向に反射するプラズモンが干渉して定在波が生じ、定在波の節(強度の弱い部分)と腹(強度の強い部分)が存在する。節と腹の位置は導光部200に照射するレーザ光の波長に依存

10

20

30

40

50

する。従って、ナノチューブ1の長さLは、レーザ光の波長に応じて定在波の腹がナノチューブ1の下端部と一致するように調整することが望ましい。

【0098】

図30に、本プローブを搭載した走査プローブ顕微鏡の構成を示す。本走査プローブ顕微鏡の構成とその機能は図9に示す第1の実施例におけるそれと同様であるので、説明を省略する。尚、図9ではナノチューブ1へ励起光を導く導光部200をカンチレバー201の背面に設けていたが、本実施例では、カンチレバー201そのものを導光部としているので、図30に示すように導光部200は排除した構成となっている。また、励起光5a、5bはカンチレバー201背面に対しP偏光となっているので、偏光板307も排除した構成となっている。

10

【0099】

尚、励起光5a、5bの波長は830nmに固定するのではなく、励起されたTMモード・プラズモン740が損失なく、すなわち高いカップリング効率でナノチューブ1に伝播する波長に微調整することが望ましい。例えば白色レーザを用いて、最適なカップリング波長を選択して励起光に用いる、あるいは白色レーザ光を励起光に用いて、最適なカップリング波長のみを、光電変換素子340の直前に設置した波長選択フィルタにより選択的に検出することが望ましい。図25において、ナノチューブ1にカップリングしなかったTMモード・プラズモン740は、チップ730の先端で近接場光となり、これがナノチューブ1の先端部で生じる近接場光8に対する背景雑音となる。この背景雑音の影響を避けるため、チップ730の先端とナノチューブ1の先端との距離745は、チップ先端部の大きさ以上、例えば数十～数百nm以上離すことが望ましい。さらに、図31に示すように、光電変換素子340の直前のナノチューブ1の先端と共役な位置（結像位置）にピンホール750pを設けた遮光板750を設置することにより、ナノチューブ1の先端の近接場光8から変換された伝搬光757だけを選択に通過させ、チップ730の先端の近接場光から変換された伝搬光は遮光することが可能となる。

20

【0100】

本実施例によれば、第1の実施例と同様、AFM画像と近接場光画像の同時取得が可能であるばかりでなく、ナノチューブ1の下端部に露出した金ナノ粒子2bと試料10との間でスポット径4nmの近接場光8を常に安定に発生させることができ、さらにこのナノチューブ1を低接触力で試料10に接触させた、すなわち金ナノ粒子2bが試料10に接触した瞬間の近接場光8を検出することにより、近接場光の安定検出が可能となる。その結果、2次元近接場光画像の分解能が向上し、かつ画像再現性を飛躍的に向上させることが可能となる。

30

【0101】

[カンチレバー201の変形例]

導光部として用いるカンチレバー201の変形例を、図26に基づいて説明する。図26は、本変形例におけるプラズモン増強近接場プローブの導光部の構成を示したものである。カンチレバー201、チップ730、及びナノチューブ1の構成と機能は図25に示すものと同様である。

【0102】

本変形例では、三角錐状のチップ730の稜線730wのカンチレバー201に対する角度を調整することにより、励起光5a、5bのカンチレバー201背面201sへの入射角を0°、すなわち垂直入射とするものである。カンチレバー201及びチップ730がSiから成る場合、励起光5a、5bは、例えば波長830nmの近赤外レーザ光を用い、NA（Numerical Aperture：開口数）0.2で集束してカンチレバー201の背面201sに垂直に照射する。偏光方向5pはP偏光であり、集束角735は約23°である。入射した励起光は、三角錐状のチップ730の稜線730wに集束する。集束角737は約6°となる。稜線730wに対する入射角738は臨界角である約16°以上となるように、予め稜線730wのカンチレバー201に対する角度が調整された状態で、チップ730が形成されることが望ましい。チップ730の表面には金

40

50

の薄膜 730f、730r がコートされている。プラズモンの発生効率を考慮して、稜線 730w に沿った金薄膜 730f の膜厚は 50nm 程度、稜線 730w を挟む二つの斜面の膜厚はそれよりも薄くすることが望ましい。稜線 730w への P 偏光の励起光の照射により、金薄膜 730f 表面に沿って TM (Transverse Magnetic) モード・プラズモン 740 が励起され、チップ 730 の先端に向かって伝播する。プラズモンが励起される共鳴ディップ入射角 738 の許容範囲はたかだか 2~3° であるので、励起光の集束角 737 の範囲は上述の通り、その 2 倍の約 6° 程度が望ましい。励起された TM モード・プラズモン 740 は、図 27 の破線矢印 7a 及び 7b に示すように、チップ 730 の先端に固定されたナノチューブ 1 の表面及び内部に充填された金ナノ粒子 2a、2c、2b を上端部から下端部に伝搬していく。図 27 に示すように、ナノチューブ 1 の下端部は円錐状に先鋭化されているので、電場強度が局所的に増強され、ナノチューブ 1 の下端部の金ナノ粒子 2b に強い局在プラズモンが励起される。この局在プラズモンは試料 10 の表面構造と相互作用して強い共鳴現象を生じ、微小な近接場光 8 を発生させる。先の実施例と同様、Si₃N₄ から成るカンチレバー 201 とチップ 730 も適用可能である。

10

【0103】

この近接場光 8 のスポット径は、金ナノ粒子 2b が試料 10 に最接近した時に、金ナノ粒子 2b とほぼ同じ大きさの 4nm となる。すなわち、本プローブにより 4nm の光学分解能が得られる。本変形例では、ナノチューブ 1 内に充填する金属構造として、金ナノ粒子列を示したが、本発明はこれに限定されることはなく、例えば図 28 に示すように、金ナノロッド 702 を充填しても同様の効果が得られる。ナノロッド材料は他の種類の金属、例えば銀ナノロッドであっても同様な効果を得ることができる。

20

【0104】

本変形例によれば、AFM 画像と近接場光画像の同時取得が可能であるばかりでなく、ナノチューブ 1 の下端部に露出した金ナノ粒子 2b と試料 10 との間にスポット径 4nm の近接場光 8 を常に安定に発生させることができ、さらにこのナノチューブ 1 を低接触力で試料 10 に接触させた、すなわち金ナノ粒子 2b が試料 10 に接触した瞬間の近接場光 8 を検出することにより、近接場光の安定検出が可能となる。その結果、2次元近接場光画像の分解能が向上し、かつ画像再現性を飛躍的に向上させることが可能となる。

【0105】

[プラズモン増強近接場プローブの変形例]

プラズモン増強近接場プローブの変形例を、図 29 及び図 32 に基づいて説明する。図 29 は、本変形例におけるプラズモン増強近接場プローブの構成を示したものである。ナノチューブは第 1 の実施例及びその変形例と同様、多層構造カーボンナノチューブ 1、あるいは金属ナノチューブ 1 であり、下端部を円錐状に先鋭化した構成となっている。カンチレバー 201、チップ 730 の構成と機能は図 25 あるいは図 26 に示すものと同様である。

30

【0106】

本変形例では、図 29 に示すように、ナノチューブ 1 の上端部に、金ナノ粒子ではなく、フォトルミネセンス、エレクトロルミネセンスを発現する V、Y、Ta、Sb 等の金属カーバイドや、ZnS 蛍光体、CaS 蛍光体、CdSe (コア) / ZnS (外殻) 等の蛍光粒子 770 を充填し、下端部には他の実施例と同様金ナノ粒子 2b を充填する。図 26 あるいは図 27 に示すと同様、ナノチューブ 1 の途中に金ナノ粒子、あるいはナノロッドを充填しても構わない。

40

【0107】

図 32 は、本プローブを搭載した走査プローブ顕微鏡の構成を示したものである。本走査プローブ顕微鏡の基本構成とその機能は、図 9 に示した第 1 の実施例における走査プローブ顕微鏡と同様であるが、近接場光を検出するホトダイオードや光電子増倍管等の光電変換素子 340 の直前に、上記蛍光粒子 770 が発する蛍光波長 ± 10nm の透過帯域を有する波長選択フィルタ 755 を配置した点が異なる。すなわち、図 25 に示すように、

50

励起光 5 a、5 b によって励起された T M モード・プラズモン 7 4 0 は、チップ 7 3 0 の先端に向かって伝播する。この T M モード・プラズモン 7 4 0 は、図 2 9 に示すナノチューブ 1 の上端部に充填された蛍光粒子 7 7 0 を励起して、励起光 5 a、5 b とは異なる波長の蛍光が発生し、蛍光と同じ波長の微小なスポット光が誘起される。この微小スポット光は、ナノチューブ 1 に表面プラズモンを励起し、この表面プラズモンは、破線矢印 7 8 0 a 及び 7 8 0 b に示すように、ナノチューブ 1 を上端部から下端部に伝搬していく。ナノチューブ 1 の下端部は円錐状に先鋭化されているので、電場強度が局所的に増強され、ナノチューブ 1 の下端部の金ナノ粒子 2 b に強い局在プラズモンが励起される。この局在プラズモンは試料 1 0 の表面構造と相互作用して強い共鳴現象を生じ、蛍光と同じ波長の微小な近接場光 7 9 0 を発生させる。

10

この近接場光 7 9 0 のスポット径は、金ナノ粒子 2 b が試料 1 0 に最接近した時に、金ナノ粒子 2 b とほぼ同じ大きさの 4 n m となる。すなわち、本プローブにより 4 n m の光学分解能が得られる。近接場光 7 9 0 の反射光は、伝播光 9 a 及び 9 b として対物レンズ 3 2 0 により集光され並行光 9 0 a、9 0 b となる。平行光 9 0 a、9 0 b は、ビームスプリッタ 3 1 5 の輪帯透過領域 3 1 6 a を透過し、透過光は結像レンズ 3 3 0 を介し、波長選択フィルタ 7 5 5 で蛍光波長成分 7 6 0 のみが抽出され、ホトダイオードや光電子増倍管等の光電変換素子 3 4 0 で光電変換される。以降の処理は、図 9 に示した実施例における走査プローブ顕微鏡と同様である。

【0108】

尚、本変形例では、蛍光粒子 7 7 0 を用いたが、これに限定されることなく、例えば非線形光学結晶などを用い、入射光の 1 / 2 の波長の近接場光を生成することも可能である。

20

【0109】

本変形例によれば、A F M 画像と近接場光画像の同時取得が可能であるばかりでなく、ナノチューブ 1 の下端部の金ナノ粒子 2 b と試料 1 0 との間でスポット径 4 n m の近接場光 7 9 0 を常に安定に発生させることができ、さらにこのナノチューブ 1 を低接触力で試料に接触させた、すなわち金ナノ粒子 2 b が試料 1 0 に接触した瞬間の近接場光 7 9 0 を検出することにより、近接場光の安定検出が可能となる。その結果、2 次元近接場光画像の分解能が向上し、かつ画像再現性を飛躍的に向上させることが可能となる。さらに、本実施例によれば、図 2 5 において、ナノチューブ 1 にカップリングしなかった T M モード・プラズモン 7 4 0 によってチップ 7 3 0 の先端で発生する近接場光が励起光 5 a、5 b の波長そのものであるのに対し、ナノチューブ 1 の下端部で発生する近接場光 7 9 0 は異なる蛍光波長となる。すなわち、背景雑音となるチップ 7 3 0 の先端で発生する近接場光を波長分離して、ナノチューブ 1 の下端部で発生する近接場光 7 9 0 のみを検出できるため、S N 比の高い近接場光画像を得ることが可能となる。同様に、固体レーザー 3 0 0 から出射したレーザー光 5 a、5 b による途中の光路やナノチューブ自身での散乱光等、背景雑音を大幅に低減させることが可能となり、S N 比の高い近接場光画像を得ることが可能となる。

30

【0110】

以上、本発明者によってなされた発明を実施形態に基づき具体的に説明したが、本発明は上記実施形態に限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲で種々変更可能であることはいうまでもない。

40

【0111】

以上説明したように、本発明によれば、A F M とあわせてナノメートルオーダの光学分解能を有する走査プローブ顕微鏡が実現できる。その結果、半導体試料の応力分布や不純物分布などの物性情報の測定が可能になり、また異物や欠陥の分類に寄与する光学情報や凹凸情報を測定できるので異物・欠陥分類性能が向上する。さらに、これらの測定結果を半導体製造プロセス条件にフィードバックすることで、信頼性の高い半導体デバイスの高歩留まり生産が可能になる。

【図面の簡単な説明】

50

【0112】

【図1】実施例1におけるプラズモン増強近接場プローブの正面の断面図である。

【図2】実施例1におけるプラズモン増強近接場プローブ導光部200の変形例1におけるプローブの正面の断面図である。

【図3】実施例1におけるプラズモン増強近接場プローブ導光部200の変形例2におけるプローブの正面の断面図である。

【図4】実施例2におけるプラズモン増強近接場プローブの正面の断面図である。

【図5】実施例3におけるプラズモン増強近接場プローブの正面の断面図である。

【図6】実施例3におけるプラズモン増強近接場プローブ導光部200の変形例におけるプローブの正面の断面図である。

10

【図7】実施例4におけるプラズモン増強近接場プローブの正面の断面図である。

【図8】実施例5におけるプラズモン増強近接場プローブの正面の断面図である。

【図9】実施例1における走査プローブ顕微鏡の概略の構成を示すブロック図である。

【図10】偏光板の偏光軸を示す概略図である。

【図11】ナノチューブのステップイン走査を示す試料断面及びカンチレバーの斜視図である。

【図12】ナノチューブー試料間接触力と近接場光の測定タイミングとの関係を示すグラフである。

【図13】実施例1の検出光学系4000の変形例1における走査プローブ顕微鏡の概略の構成を示すブロック図である。

20

【図14】実施例1の検出光学系4000の変形例2における走査プローブ顕微鏡の概略の構成を示すブロック図である。

【図15】実施例1の計測部2000の変形例1における走査プローブ顕微鏡の概略の構成を示すブロック図である。

【図16】各種材料と各光源波長に対する反射光強度の組み合わせデータを示す概略図である。

【図17】実施例1の計測部2000の変形例1における走査プローブ顕微鏡をコンタクトホールなどの深穴底の残膜検出に適用した例を示す深穴の断面とプラズモン増強近接場プローブの正面の断面図である。

【図18】実施例1の計測部2000の変形例2における走査プローブ顕微鏡の概略の構成を示すブロック図である。

30

【図19】実施例2における走査プローブ顕微鏡の概略の構成を示すブロック図である。

【図20】実施例3における走査プローブ顕微鏡の概略の構成を示すブロック図である。

【図21】実施例4における走査プローブ顕微鏡の概略の構成を示すブロック図である。

【図22】実施例5における走査プローブ顕微鏡の概略の構成を示すブロック図である。

【図23】実施例1乃至5における試料表面を計測する手順を示すフロー図である。

【図24】実施例6におけるプラズモン増強近接場プローブ導光部の斜視図である。

【図25】実施例6におけるプラズモン増強近接場プローブ導光部カンチレバー201の側面の断面図である。

【図26】実施例6におけるプラズモン増強近接場プローブ導光部カンチレバー201変形例の側面の断面図である。

40

【図27】実施例6における金ナノ粒子充填プラズモン増強近接場プローブの正面の断面図である。

【図28】実施例6における金ナノロッド充填プラズモン増強近接場プローブの正面の断面図である。

【図29】実施例6におけるプラズモン増強近接場プローブ変形例の正面の断面図である。

【図30】実施例6における走査プローブ顕微鏡の概略の構成を示すブロック図である。

【図31】実施例6における走査プローブ顕微鏡において、ピンホール遮光板の配置を示すブロック図である。

50

【図 3 2】 実施例 6 における走査プローブ顕微鏡において、波長選択フィルタの配置を示すブロック図である。

【符号の説明】

【0 1 1 3】

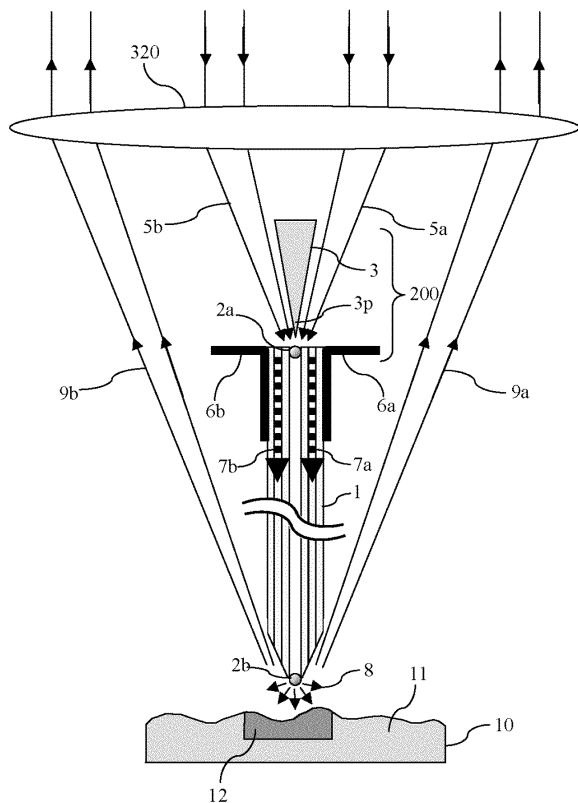
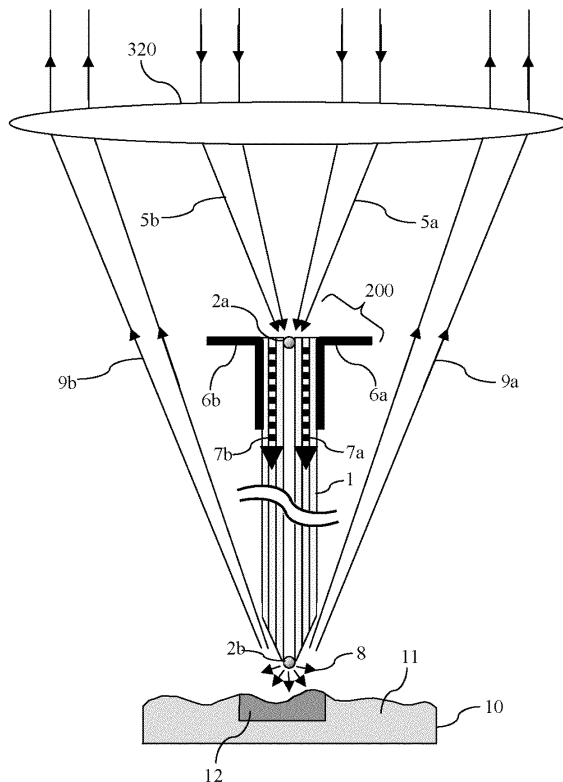
1 ナノチューブ	2 a、2 b、2 c 金ナノ粒子	1 0
. 試料	1 3 金ウェッジ	2 5、7 7 0 蛍光粒子
2 7 レーザ光源	1 0 0 X Y Z ステージ	2 0 0
. 導光部	2 0 1 カンチレバー	2 0 2 圧電素子アクチュエータ
2 0 4 X Y Z 圧電素子アクチュエータ	2 0 6	
. 半導体レーザー	2 0 7 駆動回路	2 0 9 4 分割ポジションセンサ
3 0 0 固体レーザー	3 0 7 偏光板	3 1 5
. ビームスプリッタ	3 0 4、3 4 0、6 1 2、6 4 1、6 4 2、6 4 3	
. 光電変換素子	3 0 5 ビーム整形光学系	3 0 7
偏光板	3 2 0 対物レンズ	3 3 0 結像レンズ
. 波長選択フィルタ	4 0 0 走査制御ユニット	4 1 0
. 画像形成ユニット	4 2 0 全体制御ユニット	4 3 0
. 出力ユニット	4 4 0 メモリユニット	5 0 0 ミラー
5 0 1 撮像カメラ	6 1 1 分光器	6 2 0
. 白色レーザー	6 2 5 r、6 2 5 g、6 2 4 b 干渉フィルタ	6 3 1、6 3 2、6 3 3
. 集光レンズ	7 0 2 金ナノロッド	7 3 0
. チップ	7 4 0 T M モード・プラズモン	7 5 0
. ピンホール遮光板	7 6 0 波長選択フィルタ	1 0 0 0
. ステージ部	2 0 0 0 計測部	3 0 0 0 照明光学系
3 1 0 0 ビームモニタ光学系	4 0 0 0 検出光学系	5 0 0 0
. 試料モニタ光学系	6 0 0 0 制御部	

【図 1】

【図 2】

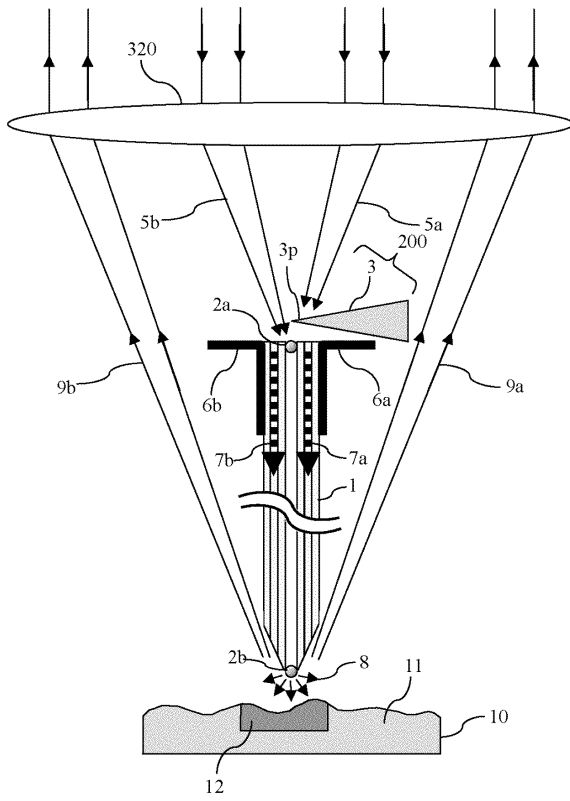
図 1

図 2



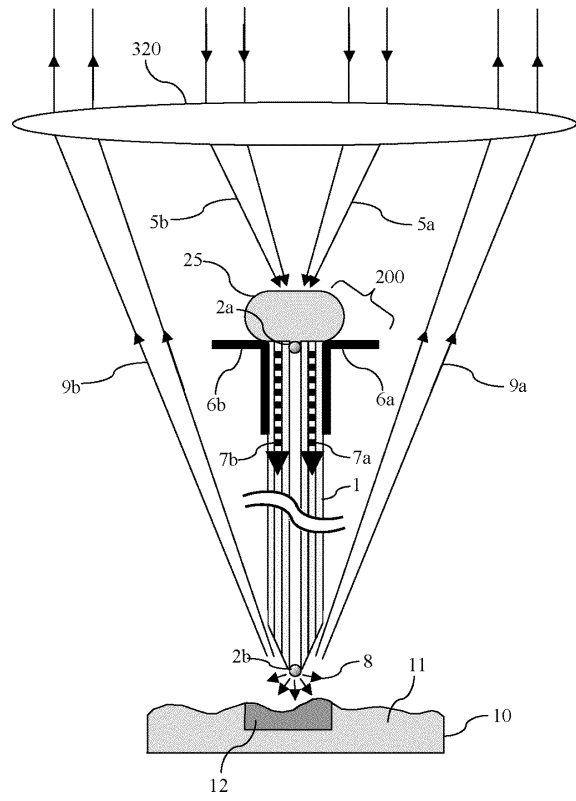
【図 3】

図 3



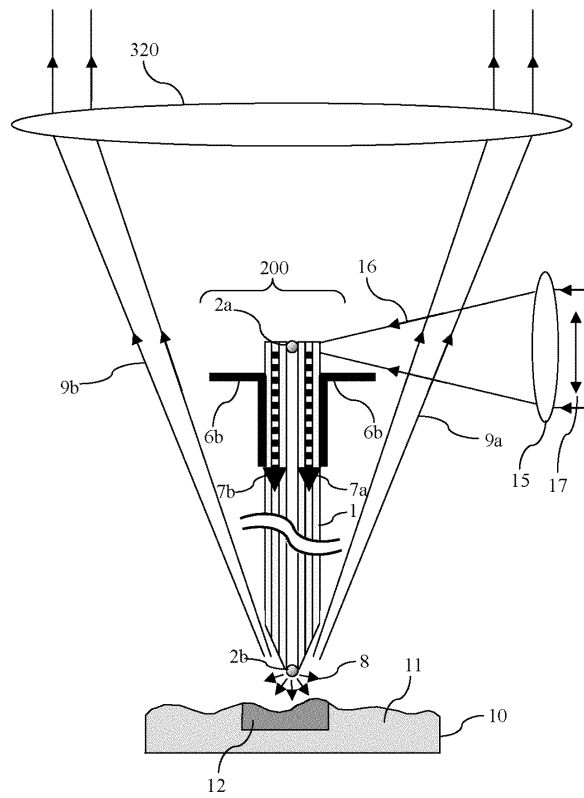
【図 4】

図 4



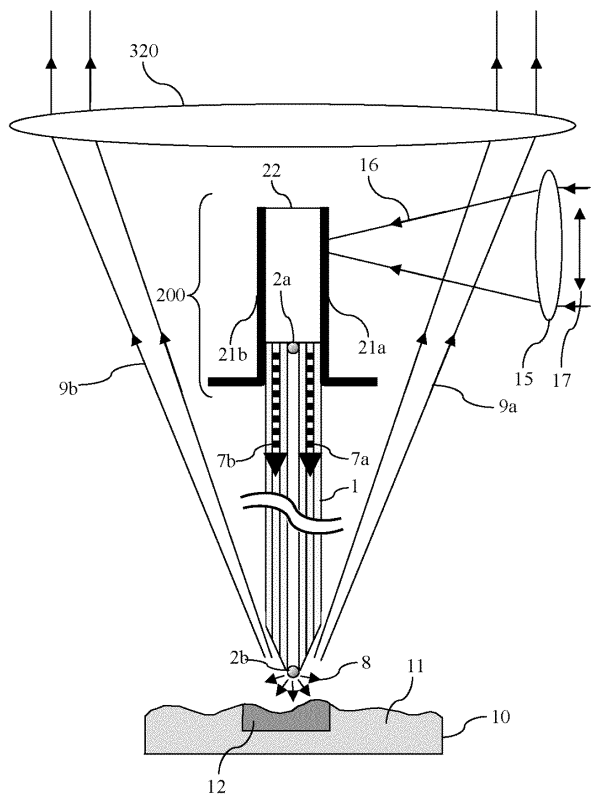
【図 5】

図 5



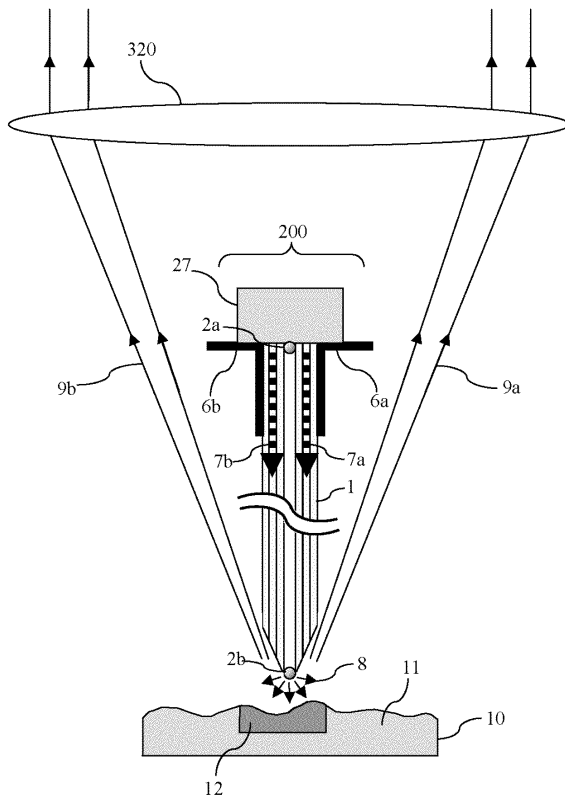
【図 6】

図 6



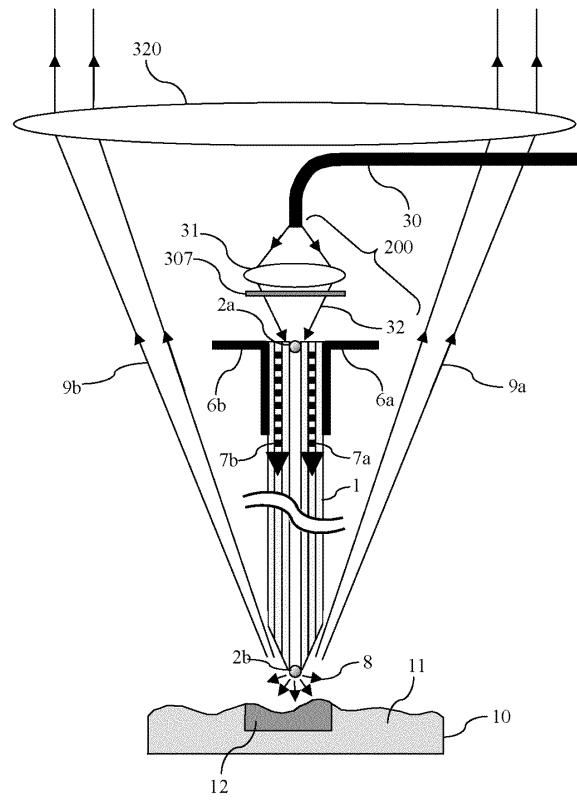
【図 7】

図 7



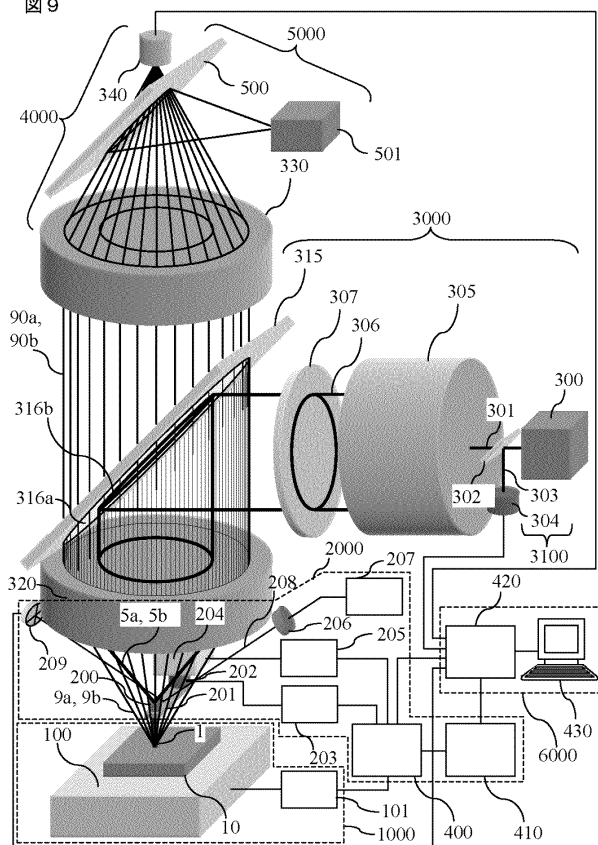
【図 8】

図 8



【図 9】

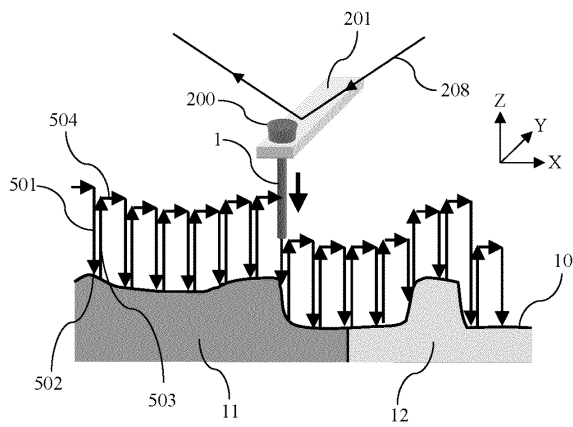
図 9



【図 10】

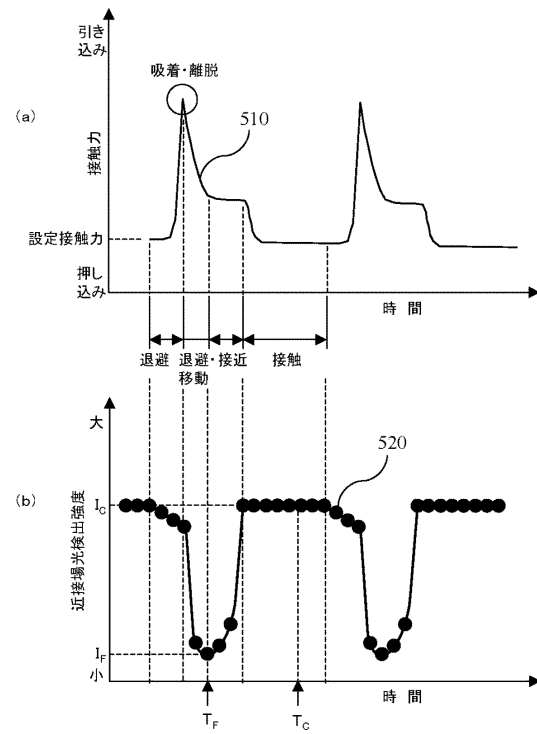
【図 1 1】

図 1 1



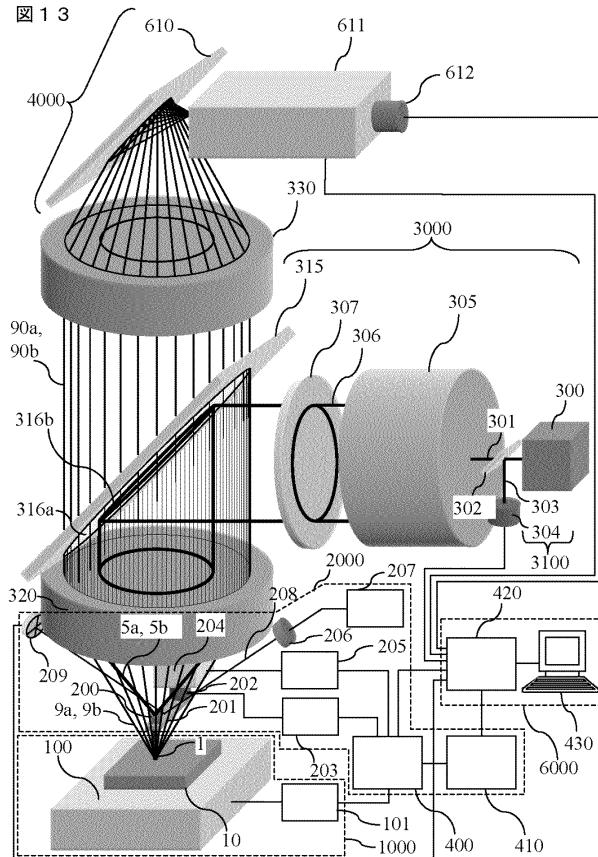
【図 1 2】

図 1 2



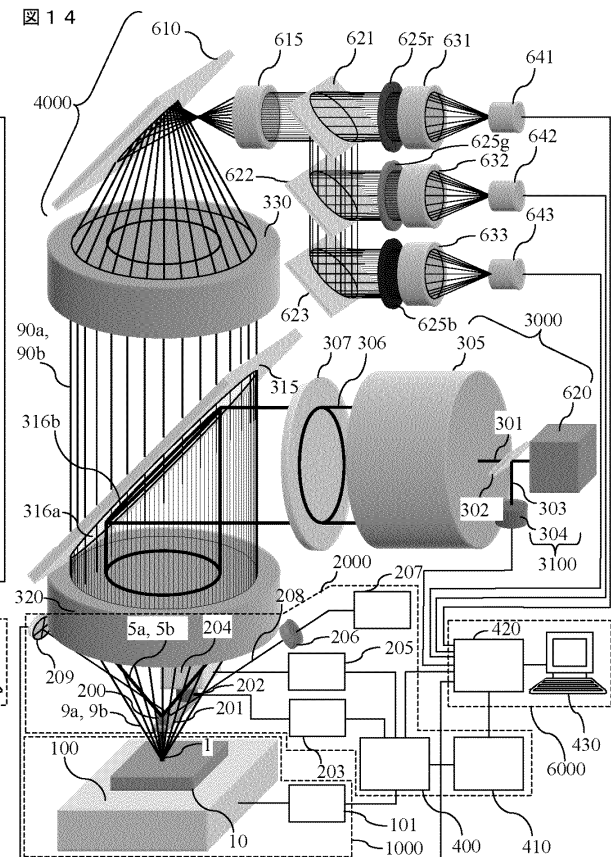
【図 1 3】

図 1 3



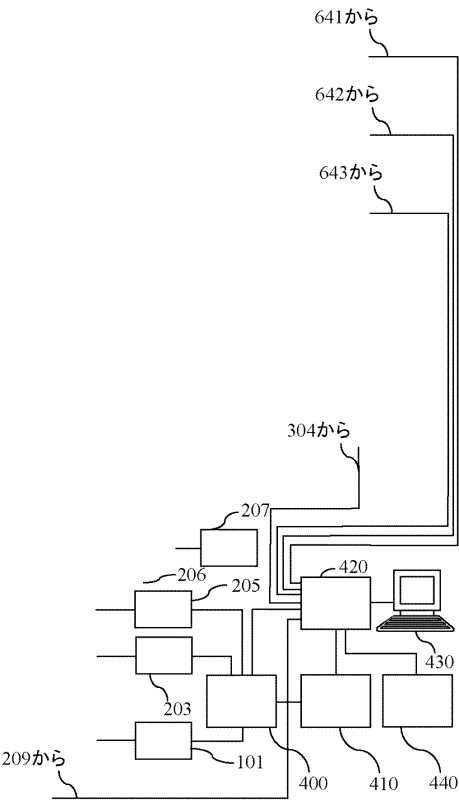
【図 1 4】

図 1 4



【図 1 5】

図 1 5



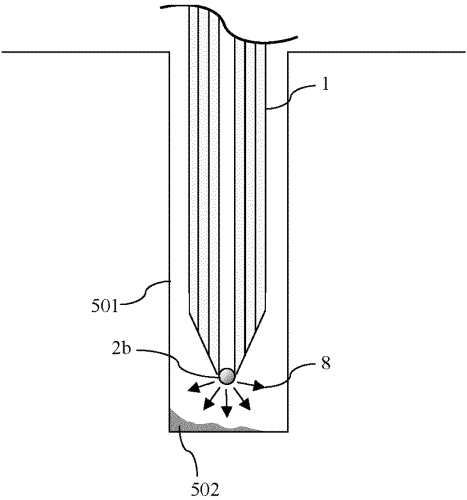
【図 1 6】

図 1 6

材 質	λ		
	λ_1	λ_2	λ_3
Si	I_{11}	I_{21}	I_{31}
SiO ₂	I_{12}	I_{22}	I_{32}
Si ₃ N ₄	I_{13}	I_{23}	I_{33}
Poly-Si	I_{14}	I_{24}	I_{34}
W	I_{15}	I_{25}	I_{35}
Al	I_{16}	I_{26}	I_{36}
Cu	I_{17}	I_{27}	I_{37}
⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮

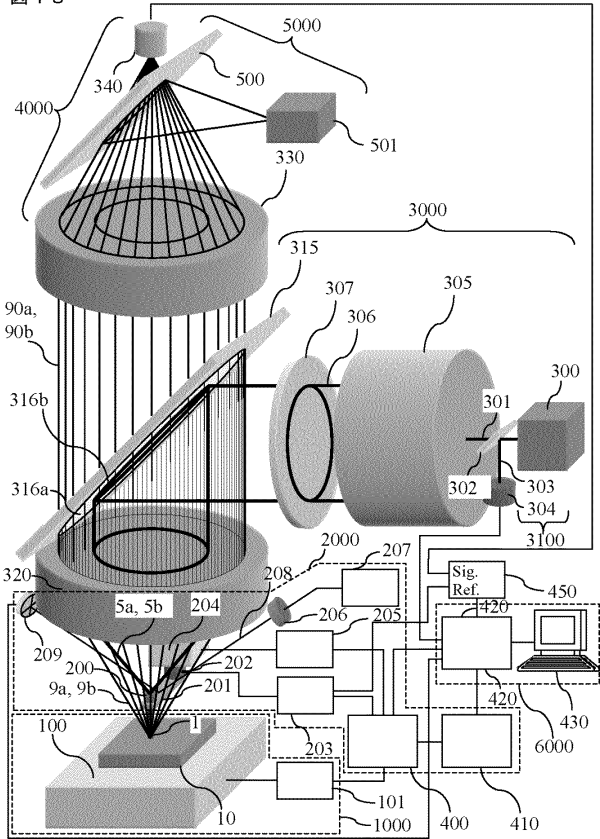
【図 1 7】

図 1 7

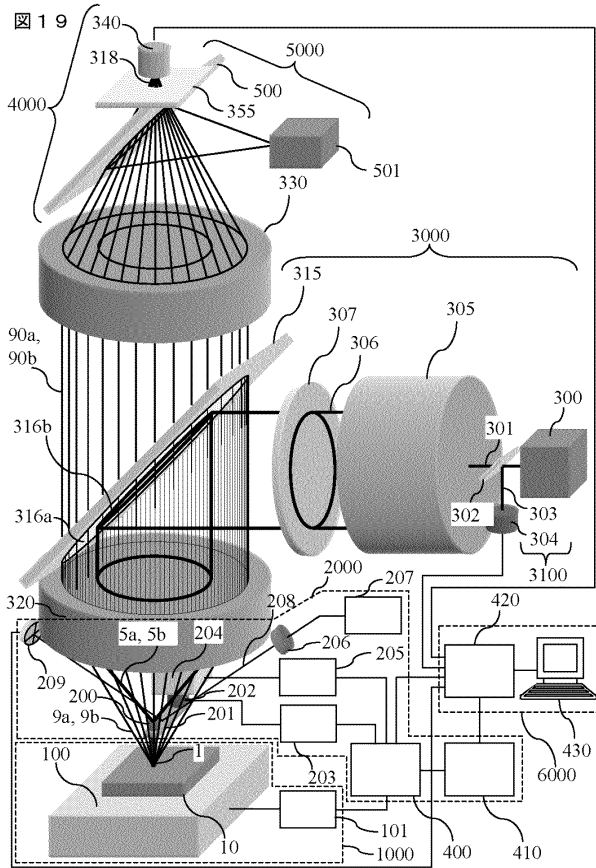


【図 1 8】

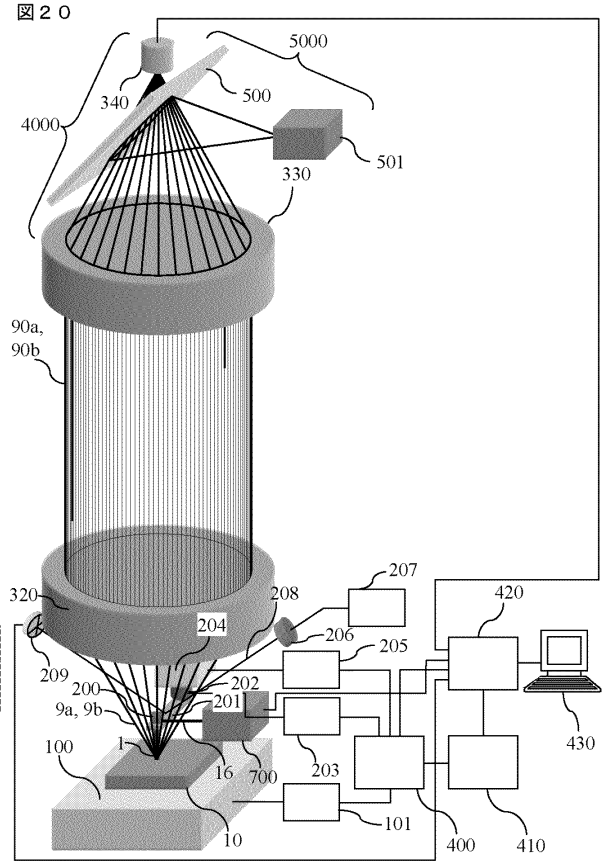
図 1 8



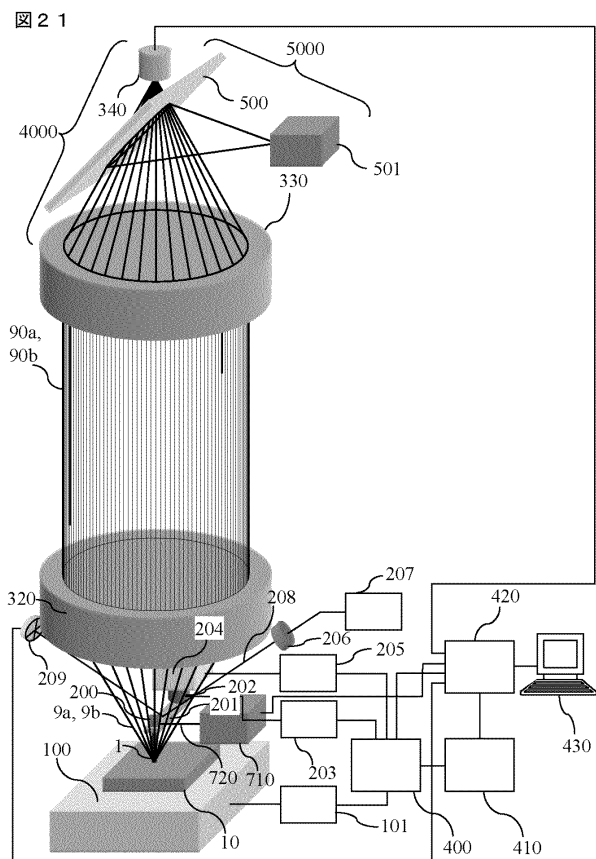
【図 19】



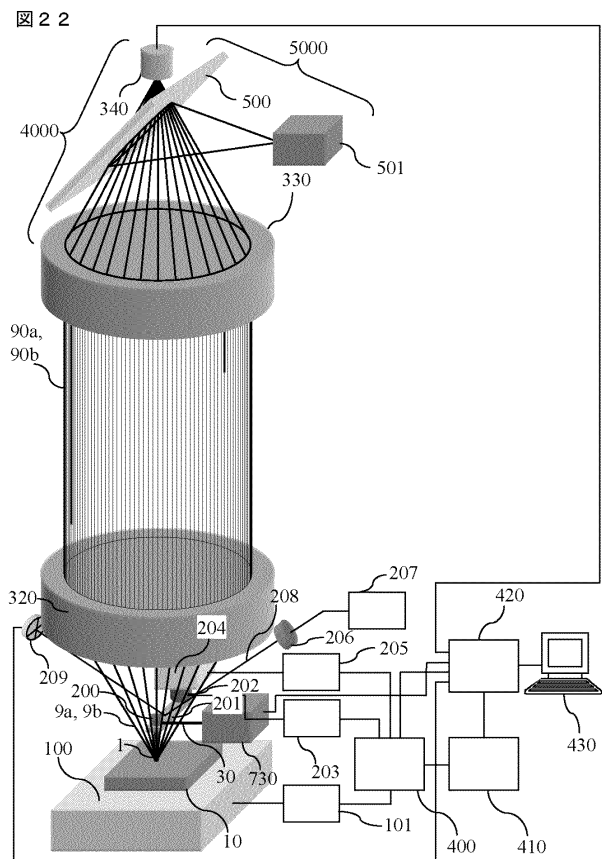
【図 20】



【図 21】

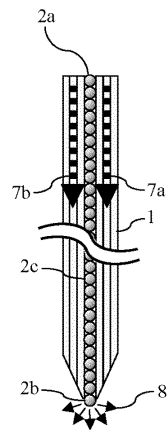


【図 22】



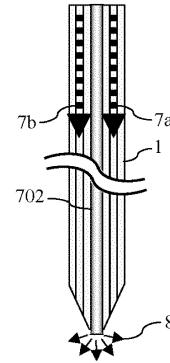
【図 27】

図 27



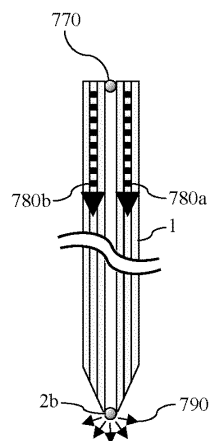
【図 28】

図 28



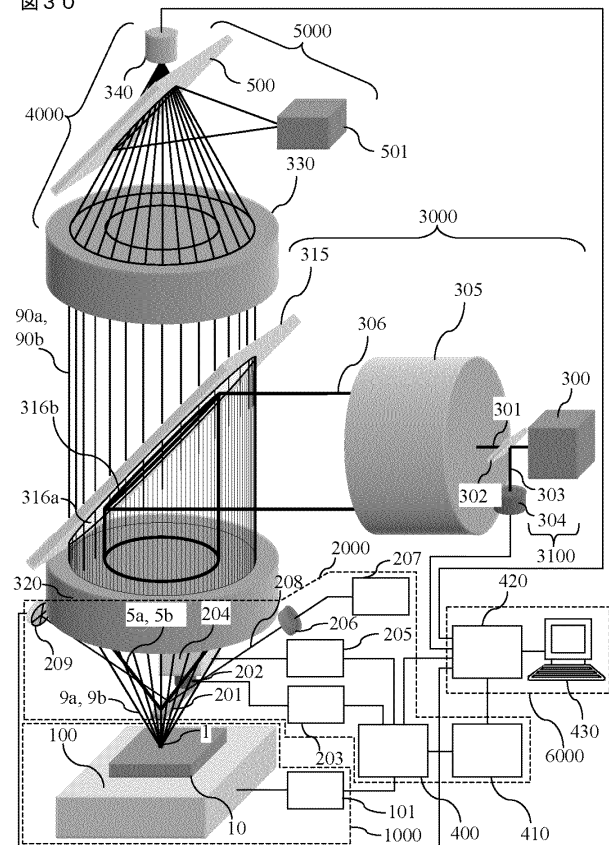
【図 29】

図 29

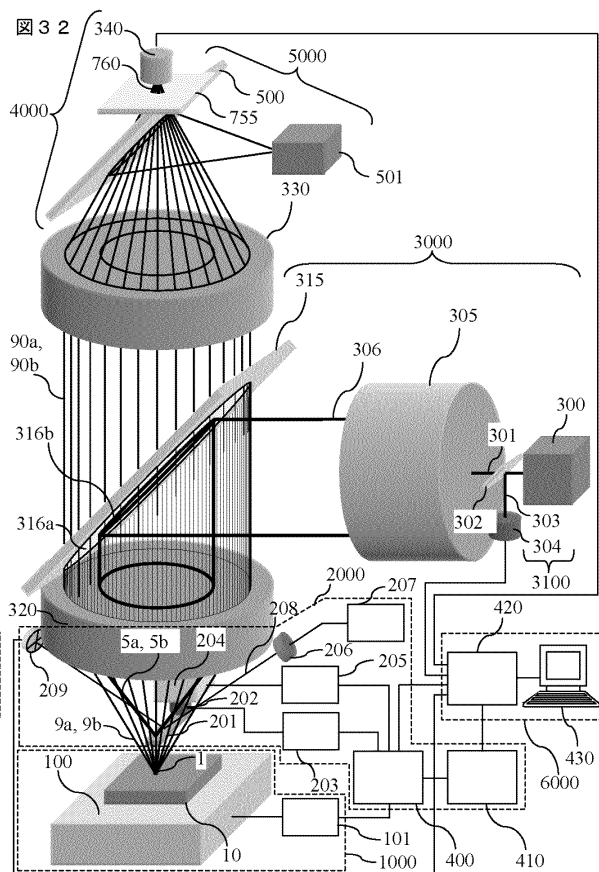


【図 30】

図 30



【図 3 2】



フロントページの続き

- (72)発明者 井上 隆史
神奈川県横浜市戸塚区吉田町292番地 株式会社日立製作所生産技術研究所内
- (72)発明者 日▲高▼ 貴志夫
茨城県日立市大みか町七丁目1番1号 株式会社日立製作所日立研究所内
- (72)発明者 岡井 誠
茨城県日立市大みか町七丁目1番1号 株式会社日立製作所日立研究所内
- (72)発明者 守田 俊章
茨城県日立市大みか町七丁目1番1号 株式会社日立製作所日立研究所内
- (72)発明者 廣岡 誠之
茨城県日立市大みか町七丁目1番1号 株式会社日立製作所日立研究所内

審査官 秋田 将行

- (56)参考文献 特開平09-297099 (JP, A)
特開平11-237391 (JP, A)
特開2002-267590 (JP, A)
特開2003-114184 (JP, A)
特開2005-249588 (JP, A)
国際公開第2006/113192 (WO, A1)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01Q 10/00-90/00