

(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2013-205231

(P2013-205231A)

(43) 公開日 平成25年10月7日(2013.10.7)

(51) Int.Cl.
G01N 21/63 (2006.01)

F I
G O 1 N 21/63 Z

テーマコード (参考)
2 G O 4 3

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2012-74762 (P2012-74762)
(22) 出願日 平成24年3月28日 (2012. 3. 28)

(71) 出願人 000183266
住友大阪セメント株式会社
東京都千代田区六番町6番地28
(74) 代理人 100064908
弁理士 志賀 正武
(74) 代理人 100108578
弁理士 高橋 詔男
(74) 代理人 100089037
弁理士 渡邊 隆
(74) 代理人 100094400
弁理士 鈴木 三義
(74) 代理人 100108453
弁理士 村山 靖彦

最終頁に続く

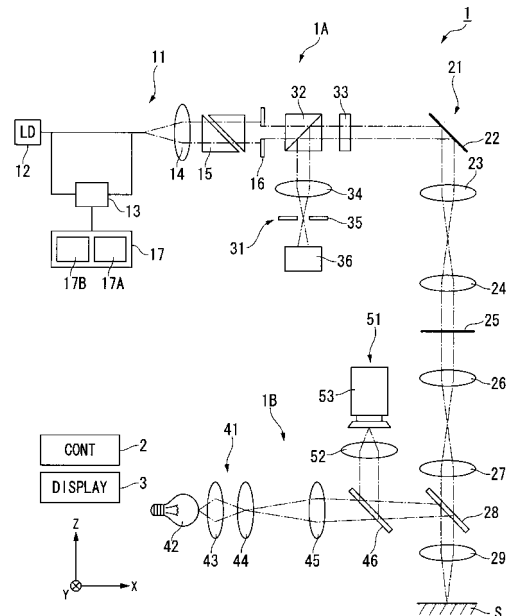
(54) 【発明の名称】 ブリルアン散乱顕微鏡

(57) 【要約】

【課題】 試料からのブリルアン散乱光の発光効率が高いブリルアン散乱顕微鏡を提供する。

【解決手段】 レーザ光を出射する発光素子12と、発光素子12から出射されるレーザ光を走査しつつ試料Sに照射する走査光学系21と、試料Sから発生する光を共焦点絞りを介して検出する検出光学系31とを備え、発光素子12と走査光学系21との間に、発光素子12から出射されるレーザ光の一部を導入して波長シフトレーザ光を発生するSSB変調器13を設け、このSSB変調器13から発生する波長シフトレーザ光を発光素子12から出射するレーザ光に重畳し、この重畳したレーザ光を走査光学系21にて走査しつつ試料Sに照射し、この試料Sから発生する誘導ブリルアン散乱光を検出光学系31にて検出して観察を行う。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

レーザ光を出射する光源と、前記光源から出射されるレーザ光を走査しつつ試料に照射する走査光学系と、前記試料から発生する光を共焦点絞りを介して検出する検出光学系とを備え、

前記光源と前記走査光学系との間に、前記光源から出射されるレーザ光の一部を導入して種光を発生する S S B 変調手段を設け、

前記 S S B 変調手段から発生する種光を前記光源から出射するレーザ光に重畳し、この重畳したレーザ光を前記走査光学系にて走査しつつ試料に照射し、この試料から発生する誘導ブリルアン散乱光を検出して観察を行うことを特徴とするブリルアン散乱顕微鏡。 10

【請求項 2】

前記光源は、発光素子からなり、

前記 S S B 変調手段から発生する種光を前記発光素子から出射するレーザ光に重畳し、この重畳したレーザ光を前記走査光学系にて前記試料の表面を縦横に走査しつつ前記試料に照射することを特徴とする請求項 1 記載のブリルアン散乱顕微鏡。

【請求項 3】

前記光源は、複数の発光素子を配列してなるライン光源からなり、

前記検出光学系は、前記複数の発光素子それぞれが出射するレーザ光に対応して配列された複数の検出素子からなるライン検出部を備え、

前記 S S B 変調手段から発生する種光を前記ライン光源から出射する複数のレーザ光それぞれに重畳し、これら重畳した複数のレーザ光を前記走査光学系にて前記試料の表面を前記複数のレーザ光の配列方向と直交する方向に走査しつつ前記試料に照射することを特徴とする請求項 1 記載のブリルアン散乱顕微鏡。 20

【請求項 4】

前記種光の最大波長は、前記 S S B 変調手段の変調周波数に対応して長波長側にシフトしていることを特徴とする請求項 1 ないし 3 のいずれか 1 項記載のブリルアン散乱顕微鏡。

【請求項 5】

前記試料からの誘導ブリルアン散乱光を基に、この試料の表面形状、成分の分布のいずれか一方または双方を 3 次元画像表示する表示手段を備えていることを特徴とする請求項 1 ないし 3 のいずれか 1 項記載のブリルアン散乱顕微鏡。 30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、ブリルアン散乱顕微鏡に関し、特に詳しくは、誘導ブリルアン散乱を利用することにより、ブリルアン散乱の発生効率の高いブリルアン散乱顕微鏡に関するものである。

【背景技術】

【0002】

レーザ顕微鏡は、レーザ光を試料の表面を X Y 方向に走査しながら対物レンズの高さ位置を上下動させ、X Y 平面上の各点にて共焦点となる Z 位置を測定することで、試料の表面形状の分布等を表示する装置である。 40

このようなレーザ顕微鏡の応用例としては、試料にレーザ光を照射し、この試料からのラマン散乱光を検出して成分組成の分析を行うラマン顕微鏡が提案されている（特許文献 1 参照）。

【0003】

一方、ブリルアン散乱光を用いても、成分組成や歪み、温度等の分析を行うことができる。

このようなブリルアン散乱光を用いた装置としては、レーザ光からブリルアン散乱光を分離する特殊な分光器を組み込むことにより、高い空間分解能とブリルアン散乱光の成分 50

組成とを両立したレーザ顕微鏡（非特許文献1参照）、ブリルアン散乱光を用いて、測定対象物の弾性及び粘性の分布を非接触かつ簡便に測定することのできる弾性粘性測定装置（特許文献2参照）等が提案されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2007-147357号公報

【特許文献2】再公表WO2007/034802号公報

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献1】小島誠治、「顕微ブリルアン散乱法によるギガヘルツ帯音波物性」、Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics、2009年、第30巻、p.419-422

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

ところで、従来のブリルアン散乱光を用いた装置では、試料からのブリルアン散乱光の発光効率が低く、試料の表面の歪みや温度の測定精度が著しく低下してしまい、その結果、試料の表面の歪みや温度等の3次元表示を充分に行うことができない場合があるという問題点があった。

その理由は、試料にレーザ光を照射した場合に、この試料中のフォノンによって、フォノン周波数に相当する波長の分だけ波長がシフトした誘導ブリルアン散乱光が発生するが、この誘導ブリルアン散乱光の発光効率が低く、したがって、発光するブリルアン散乱光の光強度も弱いものとなり、その結果、このブリルアン散乱光を単に増幅しても目的とする試料の表面の歪みや温度等を3次元表示する際の空間分解能が充分に得られないことにある。

【0007】

本発明は、上記事情に鑑みてなされたものであって、試料からのブリルアン散乱光の発光効率が高いブリルアン散乱顕微鏡を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明者等は、上記課題を解決するために鋭意検討を行った結果、前記光源から出射されるレーザ光の一部を用いて種光を発生するSSB変調手段をブリルアン散乱顕微鏡に組み込み、このSSB変調手段から発生する種光を光源から出射されるレーザ光に重畳し、この重畳したレーザ光を試料に照射することにより、この試料に誘導ブリルアン散乱光を発生させ、この誘導ブリルアン散乱光を基に、試料の表面形状や成分の分布を画像表示すれば、試料からのブリルアン散乱光の発光効率が高くなり、その結果、空間分解能及び測定精度が高い3次元表示画像が得られることを見出し、本発明を完成するに至った。

【0009】

すなわち、本発明のブリルアン散乱顕微鏡は、レーザ光を出射する光源と、前記光源から出射されるレーザ光を走査しつつ試料に照射する走査光学系と、前記試料から発生する光を共焦点絞りを介して検出する検出光学系とを備え、前記光源と前記走査光学系との間に、前記光源から出射されるレーザ光の一部を導入して種光を発生するSSB変調手段を設け、前記SSB変調手段から発生する種光を前記光源から出射するレーザ光に重畳し、この重畳したレーザ光を前記走査光学系にて走査しつつ試料に照射し、この試料から発生する誘導ブリルアン散乱光を検出して観察を行うことを特徴とする。

【0010】

前記光源は、発光素子からなり、前記SSB変調手段から発生する種光を前記発光素子から出射するレーザ光に重畳し、この重畳したレーザ光を前記走査光学系にて前記試料の表面を縦横に走査しつつ前記試料に照射することが好ましい。

10

20

30

40

50

【 0 0 1 1 】

前記光源は、複数の発光素子を配列してなるライン光源からなり、前記検出光学系は、前記複数の発光素子それぞれが出射するレーザ光に対応して配列された複数の検出素子からなるライン検出部を備え、前記SSB変調手段から発生する種光を前記ライン光源から出射する複数のレーザ光それぞれに重畳し、これら重畳した複数のレーザ光を前記走査光学系にて前記試料の表面を前記複数のレーザ光の配列方向と直交する方向に走査しつつ前記試料に照射することが好ましい。

【 0 0 1 2 】

前記種光の最大波長は、前記SSB変調手段の変調周波数に対応して長波長側にシフトしていることが好ましい。

10

前記試料からのブリルアン散乱光を基に、この試料の表面形状、成分の分布のいずれか一方または双方を3次元画像表示する表示手段を備えていることが好ましい。

【 発明の効果 】

【 0 0 1 3 】

本発明のブリルアン散乱顕微鏡によれば、光源と走査光学系との間に、光源から出射されるレーザ光の一部を導入して種光を発生するSSB変調手段を設け、このSSB変調手段から発生する種光を光源から出射するレーザ光に重畳し、この重畳したレーザ光を走査光学系にて走査しつつ試料に照射し、この試料から発生する誘導ブリルアン散乱光を検出して観察を行うので、種光を試料に照射することにより、この試料から発生するフォノン周波数に相当する波長の分だけ波長がシフトした誘導ブリルアン散乱光の光強度を増大させることができ、試料からのブリルアン散乱光の発光効率を高めることができる。したがって、この発光効率の高い誘導ブリルアン散乱光を用いて、この試料の表面形状や成分の分布を3次元表示すれば、空間分解能及び測定精度が高い3次元表示画像を容易に得ることができる。

20

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 1 4 】

【 図 1 】本発明の第1の実施形態のブリルアン散乱顕微鏡を示す概略構成図である。

【 図 2 】本発明の第1の実施形態のブリルアン散乱顕微鏡のSSB変調器を示す概略構成図である。

【 図 3 】本発明の第1の実施形態のSSB変調器を示す概略構成図である。

30

【 図 4 】本発明の第1の実施形態のブリルアン散乱顕微鏡のSSB変調器の光導波路の各点におけるレーザ光の周波数スペクトルと位相を示す図である。

【 図 5 】本発明の第1の実施形態のSSB変調の前後におけるレーザ光の波長と光強度との関係を示す図である。

【 図 6 】本発明の第1の実施形態における誘導ブリルアン散乱光の発生と自発的なブリルアン散乱光の発生の違いを説明する模式図である。

【 図 7 】本発明の第1の実施形態における発光効率の最も高い誘導ブリルアン散乱光を発生させるためのレーザ光の波長を特定する方法を示す図である。

【 図 8 】本発明の第1の実施形態のブリルアン散乱顕微鏡における試料の3次元表示画像の一例を示す図である。

40

【 図 9 】本発明の第2の実施形態のブリルアン散乱顕微鏡を示す概略構成図である。

【 発明を実施するための形態 】

【 0 0 1 5 】

本発明のブリルアン散乱顕微鏡を実施するための形態について説明する。

なお、この形態は、発明の趣旨をより良く理解させるために具体的に説明するものであり、特に指定のない限り、本発明を限定するものではない。

【 0 0 1 6 】

[第 1 の実施形態]

図 1 は、本発明の第1の実施形態のブリルアン散乱顕微鏡を示す概略構成図であり、このブリルアン散乱顕微鏡 1 は、レーザ光を走査することにより共焦点画像を取得する共焦

50

点顕微鏡であり、さらに非共焦点光学系を備えることによりピンホールを通さずに結像した非共焦点画像も取得することができる。

【0017】

このブリルアン散乱顕微鏡1は、共焦点光学系1Aと、非共焦点光学系1Bと、ブリルアン散乱顕微鏡1の動作制御及び信号処理を実行する制御部2と、ブリルアン散乱顕微鏡1からの3次元表示画像を表示するためのディスプレイ(表示手段)3とを備えている。

共焦点光学系1Aは、レーザ光を出射する第1照明光学系11と、レーザ光を走査しつつ試料Sに照射する走査光学系21と、試料Sから発生する光を共焦点絞りを介して検出する第1検出光学系31とを備えている。

【0018】

第1照明光学系11は、発光素子12と、SSB変調器(SSB変調手段)13と、コリメータレンズ14と、アナモルフィックプリズム15と、アイリス16とを備えている。

発光素子12は、例えば、紫色レーザ光や赤色レーザ光を発光する半導体レーザ(LD)である。この発光素子12は、制御部2により制御されるレーザ駆動回路(図示略)により駆動される。

【0019】

SSB変調器(Single Side Band modulator)13は、マイクロ波発生器17Aとオートバイアスコントロール回路17Bとからなるドライブ回路17を備えており、発光素子12からのレーザ光をRF(Radio Frequency)信号で変調した際に基本波周波数の+側と-側に発生する側波帯の片方を抑圧し、単一の側波帯からなる出力光を得ることができる光変調器である。このSSB変調器13によれば、RF信号の周波数を変更することにより、出力するレーザ光の波長を変化させることが可能である。

例えば、発光素子12から出射されるレーザ光の一部を導入し、このレーザ光の最大波長を、このSSB変調器13の変調周波数に対応して長波長側に波長だけシフトした波長+の波長シフトレーザ光(種光)を発生する。

【0020】

このSSB変調器13は、図2に示すように、SSB変調器111と、マイクロ波ドライバ112と、マイクロ波分岐器113と、位相シフタ(フェーズシフタ)114、115と、直流電源(DC Supply)116~118と、合波器(Bias Tcc)119、120を備えており、位相シフタ114及び直流電源116は合波器119を介してSSB変調器111に接続され、位相シフタ115及び直流電源117は合波器120を介してSSB変調器111に接続され、このSSB変調器111には光検出器121が接続され、これら直流電源116~118はオートバイアスコントロール回路17Bによりオートバイアスコントロール(ABC)されている。

【0021】

SSB変調器111は、図3に示すように、メインマッハツェンダー導波路131の各アームにそれぞれ第1及び第2のサブマッハツェンダー導波路132, 133が配置され、メインマッハツェンダー導波路131上かつ出力側には、直流電源118から電圧を印加することにより伝搬光の位相を変化させるための電極134が装荷され、サブマッハツェンダー導波路132上には、位相シフタ114及び直流電源116により周波数 f_m のRF電圧及びDC電圧を印加することにより伝搬光の位相を変化させるための電極135が装荷され、サブマッハツェンダー導波路133上にも同様に、位相シフタ115及び直流電源117により周波数 f_m のRF電圧及びDC電圧を印加することにより伝搬光の位相を変化させるための電極136が装荷されている。

【0022】

次に、コリメータレンズ14は、発光素子12から出射するレーザ光とSSB変調器13から発生する波長シフトレーザ光(種光)とを重畳し、この重畳したレーザ光を平行光化する光学素子である。

アナモルフィックプリズム15は、この重畳したレーザ光を成形する光学素子であり、

10

20

30

40

50

例えば、重畳したレーザ光の断面形状を楕円形から円形に成形する。

アイリス 16 は、重畳したレーザ光を所定のビーム径及び断面形状に整形する絞りである。

【0023】

走査光学系 21 は、第 1 走査ミラー 22 と、第 1 瞳リレーレンズ (f レンズ) 23 と、第 2 瞳リレーレンズ (f レンズ) 24 と、第 2 走査ミラー 25 と、第 3 瞳リレーレンズ (f レンズ) 26 と、チューブレンズ 27 と、ハーフミラー 28 と、対物レンズ 29 とを備えている。

【0024】

第 1 走査ミラー 22 はレゾナンスミラーにより構成されており、この第 1 走査ミラー 22 を紙面に垂直な Y 軸の回りに回転させることで、反射するレーザ光を X 軸方向 (紙面に水平な一方向) に偏向させる。

第 2 走査ミラー 25 はガルバノミラーにより構成されており、この第 2 走査ミラー 25 を紙面に水平な X 軸の回りに回転させることで、レーザ光を Y 軸方向 (紙面に垂直な一方向) に偏向させる。

このように、第 1 走査ミラー 22 及び第 2 走査ミラー 25 により、試料 S の表面にて、レーザ光を X 軸方向に偏向させる動作を、Y 軸方向に沿って繰り返し行うことにより、試料 S の表面 (XY 平面) の二次元走査が可能である。これら第 1 走査ミラー 22 及び第 2 走査ミラー 25 は、ミラー駆動部 (図示略) により回転可能であり、それぞれの回転駆動は制御部 2 により制御されている。

【0025】

第 1 走査ミラー 22 及び第 2 走査ミラー 25 は、それぞれ、第 1 瞳リレーレンズ 23、第 2 瞳リレーレンズ 24、及び第 3 瞳リレーレンズ 26 により、対物レンズ 29 の瞳位置と共役位置に配置されている。

これら第 1 走査ミラー 22 及び第 2 走査ミラー 25 により平面上で偏向されたレーザ光は、チューブレンズ 27 及びハーフミラー 28 を透過して対物レンズ 29 に入射し、試料 S 上に集光される。

【0026】

第 1 検出光学系 31 は、偏光ビームスプリッタ 32 と、1/4 波長板 33 と、ピンホールレンズ 34 と、ピンホール (共焦点絞り) 35 と、光検出器 36 とを備えている。

偏光ビームスプリッタ 32 及び 1/4 波長板 33 は、照明光学系 11 と走査光学系 21 との間に配置され、試料 S に照射するレーザ光と試料 S から発生するレーザ光とを分離する。

【0027】

ピンホールレンズ 34 は、偏光ビームスプリッタ 32 から入射する光をピンホール 35 に集光する。

光検出器 36 は、ピンホール 35 を通過して入射する光を検出し、その受光量を電気信号に変換して出力する素子であり、この光検出器 36 としては、光電子増倍管等を挙げることができる。

この光検出器 36 では、上記の電気信号を制御部 2 に出力し、制御部 2 にてブリルアン散乱顕微鏡 1 から電気信号に基づき 3 次元表示画像の電気信号を作製し、ディスプレイ 3 にて 3 次元表示画像を表示する。

【0028】

この共焦点光学系 1A においては、発光素子 12 から出射されたレーザ光の多くは、コリメータレンズ 14 に入射し、このレーザ光の一部は、SSB 変調器 13 に入射する。

SSB 変調器 13 では、図 3 に示すように、SSB 変調器 111 のメインマッハツェンダー導波路 131 に周波数 f_0 の光波が入力され、この入力光は、分岐後に 2 つのサブマッハツェンダー導波路 132, 133 に導入されて、変調を受ける。変調されたレーザ光は、再びメインマッハツェンダー導波路 131 にて合波され、出力される。

【0029】

10

20

30

40

50

ここでは、サブマッハツェンダー導波路 1 3 2 上の電極 1 3 5 に、変調信号 RF_A に対する位相差が π となるように位相シフタ 1 1 4 により位相が調整された変調周波数 f_m の RF 電圧 (変調信号 RF_A) を印加し、さらに直流電源 1 1 6 から出力される DC 電圧 (DC_A) を印加する。

また、サブマッハツェンダー導波路 1 3 3 上の電極 1 3 6 に、位相シフタ 1 1 5 により位相が調整された変調周波数 f_m の RF 電圧 (変調信号 RF_B) を印加し、さらに伝搬するレーザ光の位相差が π となるように直流電源 1 1 7 から出力される DC 電圧 (DC_B) を印加する。

さらに、メインマッハツェンダー導波路 1 3 1 上の電極 1 3 4 に、サブマッハツェンダー導波路 1 3 3 を伝搬するレーザ光に対するサブマッハツェンダー導波路 1 3 2 を伝搬するレーザ光の位相差が $\pi/2$ となるような DC 電圧 (DC_C) を印加する。

10

【0030】

図 4 は、SSB 変調器 1 1 1 の光導波路の各点 (図 3 中の点 A ~ 点 G) におけるレーザ光の周波数スペクトルと位相を示したものである。この図においては、横軸は周波数、周波数軸上の矢印は、その周波数のスペクトルを表し、矢印の向きはスペクトルの位相を表している。ここでは、位相の値は、上向き矢印が 0、右斜め上向き矢印が $\pi/2$ 、下向き矢印が π 、左斜め下向き矢印が $3\pi/2$ とする。

【0031】

点 A 及び点 B では、周波数 f_0 のレーザ光は、電極 1 3 5 に印加された DC 電圧 (DC_A) により互いに逆位相 (位相差 π) となっている。また、変調周波数 f_m の RF 電圧 (変調信号 RF_A) により位相変調を与えたことにより、レーザ光の周波数 f_0 を中心として周波数 f_m 間隔にて高周波成分が発生する。

20

ここでは、高周波成分のうち 2 次以上の高次成分は非常に小さいので無視することとし、 ± 1 次の成分のみを考えると、 $+1$ 次の変調光 (周波数 $f_0 + f_m$) 及び -1 次の変調光 (周波数 $f_0 - f_m$) は、いずれも点 A と点 B にて同位相 (位相差 0) となっている。

【0032】

第 1 サブマッハツェンダー導波路 1 3 2 の各アーム上の点 A, B にて、このような位相関係を有するレーザ光が点 E にて合波されると、逆位相である周波数 f_0 のレーザ光は打ち消しあって無くなり、 ± 1 次の変調成分だけが残ることとなる。

【0033】

30

点 C 及び点 D においても、点 A 及び点 B と同様、周波数 f_0 のレーザ光は、電極 1 3 6 に印加された DC 電圧 (DC_B) により互いに逆位相 (位相差 π) となっている。また、変調周波数 f_m の RF 電圧 (変調信号 RF_B) により位相変調を与えたことにより、レーザ光の周波数 f_0 を中心として周波数 f_m 間隔にて高周波成分が発生する。

ここでは、高周波成分のうち 2 次以上の高次成分は非常に小さいので無視することとし、 ± 1 次の成分のみを考えると、 $+1$ 次の変調光 (周波数 $f_0 + f_m$) 及び -1 次の変調光 (周波数 $f_0 - f_m$) は、いずれも点 C と点 D にて同位相 (位相差 0) となっている。

【0034】

第 2 サブマッハツェンダー導波路 1 3 3 の各アーム上の点 C, D にて、このような位相関係を有するレーザ光が点 F にて合波されると、逆位相である周波数 f_0 のレーザ光は打ち消しあって無くなり、 ± 1 次の変調成分だけが残ることとなる。

40

【0035】

さらに、メインマッハツェンダー導波路 1 3 1 上の電極 1 3 4 には、サブマッハツェンダー導波路 1 3 3 を伝搬するレーザ光に対するサブマッハツェンダー導波路 1 3 2 を伝搬するレーザ光の位相差が $\pi/2$ となるような DC 電圧 (DC_C) を印加するので、点 E 及び点 F では、 $+1$ 次の変調光は同位相、 -1 次の変調光は逆位相となっている。したがって、メインマッハツェンダー導波路 1 3 1 の出力側にある点 G においては、合波されたレーザ光は $+1$ 次の変調成分、すなわち周波数 $f_0 + f_m$ に対応する波長 $\lambda_0 + \lambda_m$ の変調成分、及び周波数 $f_0 - f_m$ に対応する波長 $\lambda_0 - \lambda_m$ の変調成分のみを有することとなる。

なお、電極 1 3 4 の DC 電圧により付与される位相差を $-\pi/2$ とした場合、点 G にお

50

いては、合波されたレーザ光は - 1 次の変調成分のみを有することとなる。

【 0 0 3 6 】

以上により、SSB変調器13では、周波数 f_0 のレーザ光と一方の側波帯が抑圧されて単一の側波帯からなるスペクトルを有するものとなる。

+側と-側のいずれかの単一側波帯となるかは、電極134に印加するDC電圧(DC c)の位相差により選択することができる。

【 0 0 3 7 】

図5は、SSB変調の前後におけるレーザ光の波長と光強度との関係を示す図であり、図5(a)は、SSB変調前におけるレーザ光の波長と光強度との関係を、図5(b)は、SSB変調後におけるレーザ光の波長と光強度との関係を、それぞれ示している。

図5によれば、レーザ光のピーク波長は、合波されたレーザ光の+1次の変調成分、すなわち周波数 $f_0 + f_m$ の変調成分及び周波数 $f_0 - f_m$ の変調成分それぞれに対応して、 $f_0 + f_m$ の波長及び $f_0 - f_m$ の波長の2つのレーザ光が生じており、 $f_0 + f_m$ の波長の光強度は、RF電圧(変調信号RF)の周波数 f_m により可変可能であり、 $f_0 + f_m$ の波長のレーザ光の光強度は、 $f_0 - f_m$ の波長のレーザ光の光強度と比べて極めて大きいことが分かる。

【 0 0 3 8 】

このようにして、SSB変調器13により変調されたレーザ光Gは、発光素子12から出射されたレーザ光と合波され、この合波されたレーザ光は、コリメータレンズ14により平行光とされた後、アナモルフィックプリズム15によりレーザ光の断面形状が成形され、アイリス16により所定のビーム径に絞られるとともに所定の断面形状に整えられる。アイリス16から出射されたレーザ光は、偏光ビームスプリッタ32を透過し、1/4波長板33により円偏光に変換された後、走査光学系21の第1走査ミラー22に入射する。

【 0 0 3 9 】

この走査光学系21に入射したレーザ光は、第1走査ミラー22及び第2走査ミラー25により試料Sの表面のXY平面内の任意の方向に偏向され、チューブレンズ27、ハーフミラー28を透過して対物レンズ29により試料Sの表面の任意の位置に焦点が合わされて照射される。

例えば、試料Sの表面にて、レーザ光をX軸方向に偏向させる動作を、Y軸方向に沿って繰り返し行うことにより、試料Sの表面(XY平面)の二次元走査が可能である。

【 0 0 4 0 】

試料Sの表面では、照射されたレーザ光によりフォノン周波数 ω_p に相当する波長 λ_p の分だけ波長がシフトした誘導ブリルアン散乱光が発生する。

従来では、図6(a)に示すように、試料Sからは照射されたレーザ光()によりフォノン p の周波数 ω_p に相当する波長 λ_p の分だけ波長がシフトしたブリルアン散乱光(+)が発生するが、このブリルアン散乱光の発光効率は非常に低い。

【 0 0 4 1 】

一方、本実施形態では、図6(b)に示すように、発光素子12から出射される波長のレーザ光()と、SSB変調器13から出射される波長 $f_0 + f_m$ の変調成分のみのレーザ光(+)とが合波されたレーザ光が試料Sに照射されるので、試料Sからは照射されたレーザ光(及び +)によりフォノン p の周波数 ω_p に相当する波長 λ_p の誘導ブリルアン散乱光(+)が発生する。この誘導ブリルアン散乱光(+)は、従来のブリルアン散乱光(+)と比べて光強度が高いので、この誘導ブリルアン散乱光の発光効率は非常に高いものとなる。

したがって、試料Sからの誘導ブリルアン散乱光(+)の発光効率を高めることができる。

【 0 0 4 2 】

この誘導ブリルアン散乱光は、レーザ光を試料Sの表面に照射して、レーザ光の共焦点位置を決定した後、この共焦点位置にてレーザ光の波長 λ を変化させて、この波長 λ のう

10

20

30

40

50

ち検出光量が低い波長 λ_1 を求める。この検出光量が低い波長 λ_1 は、この波長 λ_1 のレーザ光のエネルギーが試料 S 中のフォノンに移動しているために検出光量が低下していることを表しているため、誘導ブリルアン散乱光が最も生じる波長といえる。

【0043】

この試料 S の表面にて発生したフォノン周波数 ω に相当する波長 λ の分だけ波長がシフトした誘導ブリルアン散乱光 ($\lambda + \Delta\lambda$) は、対物レンズ 29、ハーフミラー 28、チューブレンズ 27、第3瞳リレーレンズ 26、第2走査ミラー 25、第2瞳リレーレンズ 24、第1瞳リレーレンズ 23、第1走査ミラー 22 を透過して $1/4$ 波長板 33 に入射する。

$1/4$ 波長板 33 に入射した誘導ブリルアン散乱光は、円偏光から直線偏光に変換されて偏光ビームスプリッタ 32 に入射する。この誘導ブリルアン散乱光は、第1照明光学系 11 の発光素子 12 から出射されるレーザ光とは振動方向の異なる直線偏光であるから、偏光ビームスプリッタ 32 により反射され、ピンホールレンズ 34 に入射する。ピンホールレンズ 34 により集光された誘導ブリルアン散乱光は、ピンホールレンズ 34 の焦点位置に配置されたピンホール 35 を通過し、光検出器 36 に入射する。

10

【0044】

光検出器 36 では、検出された誘導ブリルアン散乱光の受光量が電気信号に変換され、制御部 2 に出力される。制御部 2 では、入力された電気信号に基づいて試料 S の共焦点画像、すなわちブリルアン散乱顕微鏡 1 からの 3次元表示画像を形成する。

【0045】

20

例えば、図 7 (a) に示すように、対物レンズ 29 を Z 方向に沿って移動させ、ピンホール 35 における透過光量が最大となる対物レンズ 29 の位置 Z_L を特定し、この位置 Z_L にてレーザ光の波長を変化させて、光検出器 36 が検出する光量が最も低い波長 λ_L を特定する。この光量が最も低い波長 λ_L は、フォノン p にエネルギーが最も移動し易い波長であるから、この波長 λ_L のレーザ光を試料 S に照射すれば、試料 S にて誘導ブリルアン散乱が最も多く生じ、したがって、発光効率も高まる。

【0046】

ディスプレイ 3 では、制御部 2 から送られてくる試料 S の共焦点画像、すなわちブリルアン散乱顕微鏡 1 からの 3次元表示画像を表示する。

図 8 は、ブリルアン散乱顕微鏡 1 における試料 S の 3次元表示画像の一例を示す図であり、試料 S の表面の各スポット毎の組成の違いを表した 3次元画像である。

30

この図によれば、試料 S の表面の組成は、X 軸方向に沿って変化していることが分かる。したがって、試料 S の表面における組成の変化の程度を目視にて容易に判別することができる。

【0047】

一方、非共焦点光学系 1B は、試料 S に均一な照明光を照射する第2照明光学系 41 と、この照明光が照射された試料 S からの反射光を検出する第2検出光学系 51 とを備えている。

この非共焦点光学系 1B は、ハーフミラー 28 及び対物レンズ 29 を共焦点光学系 1A と共有しており、上述したハーフミラー 28 により光路を分岐させている。

40

【0048】

第2照明光学系 41 は、白色の照明光を出射する白色光源 42 と、コレクタレンズ 43 と、リレーレンズ 44 と、コンデンサレンズ 45 と、ハーフミラー 46、28 と、対物レンズ 29 とを備えている。この第2照明光学系 41 は、ハーフミラー 46 を第2検出光学系 51 と共有しており、このハーフミラー 46 により光路を分岐させている。

【0049】

白色光源 42 としては、例えば、ハロゲンランプが挙げられる。

コレクタレンズ 43 は、白色光源 42 から出射された白色光を集光して結像させる。リレーレンズ 44 は、コレクタレンズ 43 にて結像された光源像をリレーする。コンデンサレンズ 45 は、リレーレンズ 44 により形成された光源像を対物レンズ 29 の瞳位置に結

50

像させる。ハーフミラー 46 は、白色光源 42 から出射される光を透過させる一方、試料 S から発生する光を反射させる光学素子である。対物レンズ 29 は、ハーフミラー 46 を透過してコンデンサレンズ 45 から入射する照明光を試料 S の表面に集光させる。

【0050】

第2検出光学系 51 は、ハーフミラー 46 と、チューブレンズ 52 と、CCDカメラ 53 とを備えている。

ハーフミラー 46 は、第2照明光学系 41 のハーフミラー 46 を共有したもので、第2照明光学系 41 の光軸に配置されることで、試料 S にて反射された光をチューブレンズ 52 側へ反射させる。チューブレンズ 52 は、入射光を CCDカメラ 53 の撮像面に集光させる。CCDカメラ 53 は、入射光を検出することにより試料 S の画像を形成する。

10

【0051】

この非共焦点光学系 1B においては、白色光源 42 から出射された白色の照明光は、コレクタレンズ 43、リレーレンズ 44、コンデンサレンズ 45、ハーフミラー 46 を通過し、ハーフミラー 28 に入射する。その後、この白色の照明光はハーフミラー 28 にて反射され、対物レンズ 29 により試料 S 上に集光される。

【0052】

試料 S の表面にて反射された光は、対物レンズ 29 を通過し、ハーフミラー 28 にて反射され、さらにハーフミラー 46 にて反射されてチューブレンズ 52 に入射し、CCDカメラ 53 に入射して結像する。そして、CCDカメラ 53 により撮像され、試料 S の観察画像（非共焦点画像）が形成される。

20

【0053】

以上説明したように、本実施形態のブリルアン散乱顕微鏡 1 によれば、発光素子 12 を有する第1照明光学系 11 と走査光学系 21 との間に、SSB変調器 13 を設け、発光素子 12 から出射するレーザ光（ ）とSSB変調器 13 から発生する波長シフトレーザ光（ + ）とを重畳し、この重畳したレーザ光（ 及び + ）を走査光学系 21 にて走査しつつ試料 S に照射し、この試料 S から発生する誘導ブリルアン散乱光（ + ）を検出して観察を行うので、レーザ光に波長シフトレーザ光を重畳することで、この試料 S から発生するフォノン周波数 に相当する波長 の誘導ブリルアン散乱光の光強度を増大させることができ、試料 S からのブリルアン散乱光の発光効率を高めることができる。

30

したがって、この発光効率の高い誘導ブリルアン散乱光を用いて、この試料の表面形状や成分の分布を3次元表示すれば、空間分解能及び測定精度が高い3次元表示画像を容易に得ることができる。

【0054】

[第2の実施形態]

図9は、本発明の第2の実施形態のブリルアン散乱顕微鏡を示す概略構成図であり、このブリルアン散乱顕微鏡 201 は、レーザ光を出射する照明光学系 211 と、レーザ光を走査しつつ試料 S に照射する走査光学系 221 と、試料 S から発生する光を共焦点絞りを介して検出する検出光学系 231 と、ブリルアン散乱顕微鏡 201 の動作制御及び信号処理を実行する制御部 241 と、ブリルアン散乱顕微鏡 201 からの3次元表示画像を表示するためのディスプレイ（表示手段） 251 とを備えている。

40

【0055】

照明光学系 211 は、複数の発光素子を一列に配列してなるライン光源 212 と、SSB変調器（SSB変調手段） 13 と、コリメータレンズ 14 と、アナモルフィックプリズム 15 と、アイリス 16 とを備えている。

ライン光源 212 は、例えば、紫色レーザ光や赤色レーザ光を発光する半導体レーザ（LD）を複数個、例えば 256 個、1024 個、... 等、一列に配列したものである。

このライン光源 212 以外の構成要素であるSSB変調器 13～アイリス 16 は、第1の実施形態のSSB変調器 13～アイリス 16 と全く同様である。

【0056】

50

走査光学系 2 2 1 は、瞳リレーレンズ 2 2 2 と、走査ミラー 2 2 3 と、対物レンズ 2 9 とを備えている。

瞳リレーレンズ 2 2 2 は、シリンドリカルレンズにより構成されている。

走査ミラー 2 2 3 は、ガルバノミラーにより構成されており、この走査ミラー 2 2 3 を紙面に垂直な Y 軸の回りに回転させることで、一列に配列されたレーザ光を紙面に水平な一方向 (X 軸方向) に偏向させる。

この対物レンズ 2 9 は、第 1 の実施形態の対物レンズ 2 9 と全く同様である。

【 0 0 5 7 】

このように、1 つの走査ミラー 2 2 3 により、試料 S の表面の二次元走査が可能である。

10

この走査ミラー 2 2 3 は、ミラー駆動部 (図示略) により回転可能であり、この回転駆動は制御部 2 4 1 により制御されている。

この走査ミラー 2 2 3 は、瞳リレーレンズ 2 2 2 により、対物レンズ 2 9 の瞳位置と共役位置に配置されている。

【 0 0 5 8 】

検出光学系 2 3 1 は、偏光ビームスプリッタ 3 2 と、1 / 4 波長板 3 3 と、光検出器 2 3 2 とを備えている。

光検出器 2 3 2 は、偏光ビームスプリッタ 3 2 により反射される複数のレーザ光各々を検出し、それらの受光量を電気信号に変換して出力する素子であり、ライン光源 2 1 2 の複数の発光素子それぞれが出射するレーザ光に対応して配列された複数の検出素子を有するライン検出装置 (ライン検出部) であり、このライン検出装置としては、例えば、ライン CCD が好適である。

20

この光検出器 2 3 2 以外の構成要素である偏光ビームスプリッタ 3 2 及び 1 / 4 波長板 3 3 は、第 1 の実施形態の偏光ビームスプリッタ 3 2 及び 1 / 4 波長板 3 3 と全く同様である。

【 0 0 5 9 】

このブリルアン散乱顕微鏡 2 0 1 においては、ライン光源 2 1 2 が半導体レーザ (LD) を複数個一列に配列しているので、このライン光源 2 1 2 からは X 軸に沿って複数本のレーザ光が出射され、これら複数本のレーザ光は、Y 軸方向に沿って配列されることとなる。

30

これらのレーザ光は、X 軸方向に沿って伝搬した後、コリメータレンズ 1 4 に入射する。

一方、これらのレーザ光のうち一部のレーザ光は、SSB 変調器 1 3 に入射する。

SSB 変調器 1 3 では、第 1 の実施形態と同様、光強度変調器 1 1 1 のメインマッハツェンダー導波路 1 3 1 に入力した周波数 f_0 の入力光が分岐後に 2 つのサブマッハツェンダー導波路 1 3 2, 1 3 3 に導入されて、変調を受け、この変調されたレーザ光が再びメインマッハツェンダー導波路 1 3 1 にて合波され、出力されるので、+ 1 次の変調成分のみ、あるいは - 1 次の変調成分のみを有するレーザ光を出力することとなる。

【 0 0 6 0 】

このようにして、SSB 変調器 1 3 により変調されたレーザ光は、ライン光源 2 1 2 から出射された複数本のレーザ光それぞれと合波され、これらの合波された複数本のレーザ光は、コリメータレンズ 1 4 により平行光とされた後、アナモルフィックプリズム 1 5 によりレーザ光の断面形状が成形され、アイリス 1 6 により所定のビーム径に絞られるとともに所定の断面形状に整えられる。アイリス 1 6 から出射された複数本のレーザ光は、偏光ビームスプリッタ 3 2 を透過し、1 / 4 波長板 3 3 により円偏光に変換された後、走査光学系 2 2 1 の瞳リレーレンズ 2 2 2 を透過して走査ミラー 2 2 3 に入射する。

40

【 0 0 6 1 】

この走査ミラー 2 2 3 では、Y 軸の回りに回転させることで、Y 軸方向に互いに平行に配列された副数本のレーザ光を反射しつつ X 軸方向に偏向させる。これにより、試料 S の表面の二次元走査が可能になる。

50

【 0 0 6 2 】

試料 S の表面では、照射された複数本のレーザ光それぞれに対応して、フォノン周波数に相当する波長 の誘導ブリルアン散乱光がそれぞれ発生する。

これらの誘導ブリルアン散乱光は、照射された複数本のレーザ光それぞれに対応して発生するので、走査ミラー 2 2 3 により互いに平行に配列された副数本のレーザ光を X 軸方向に偏向させることにより、試料 S の表面 (X Y 平面) の二次元走査が可能である。

【 0 0 6 3 】

この試料 S の表面にて、照射された複数本のレーザ光それぞれに対応して発生した複数のフォノン周波数 に相当する波長 の誘導ブリルアン散乱光は、対物レンズ 2 9、走査ミラー 2 2 3、瞳リレーレンズ 2 2 2 を透過して 1 / 4 波長板 3 3 に入射する。

1 / 4 波長板 3 3 に入射した複数本の誘導ブリルアン散乱光は、円偏光から直線偏光に変換されて偏光ビームスプリッタ 3 2 に入射する。これらの誘導ブリルアン散乱光は、偏光ビームスプリッタ 3 2 により反射され、光検出器 2 3 2 に入射する。

【 0 0 6 4 】

光検出器 2 3 2 では、検出された複数本の誘導ブリルアン散乱光それぞれの受光量が電気信号に変換され、制御部 2 4 1 に出力される。制御部 2 4 1 では、入力されたそれぞれの電気信号に基づいて試料 S の共焦点画像、すなわちブリルアン散乱顕微鏡 1 からの 3 次元表示画像を形成する。

ディスプレイ 2 5 1 では、制御部 2 4 1 から送られてくる試料 S の共焦点画像、すなわちブリルアン散乱顕微鏡 1 からの 3 次元表示画像を表示する。

【 0 0 6 5 】

以上説明したように、本実施形態のブリルアン散乱顕微鏡 2 0 1 によれば、複数の発光素子を一行に配列してなるライン光源 2 1 2 及び S S B 変調器 1 3 を備えた照明光学系 2 1 1 と、瞳リレーレンズ 2 2 2、走査ミラー 2 2 3 及び対物レンズ 2 9 を備えた走査光学系 2 2 1 と、光検出器 2 3 2 を備えた検出光学系 2 3 1 とを備えたので、ライン光源 2 1 2 から X 軸方向に沿って出射される互いに平行な複数本のレーザ光と S S B 変調器 1 3 により変調されたレーザ光とを合波した複数本のレーザ光を、走査ミラー 2 2 3 を Y 軸の回りに回転させるだけで試料 S の表面にて二次元走査することができ、この試料 S から発生する複数本の誘導ブリルアン散乱光各々の光強度を増大させることができ、試料 S からの複数本のブリルアン散乱光各々の発光効率を高めることができる。

したがって、この試料の空間分解能及び測定精度が高い 3 次元表示画像を容易に得ることができる。

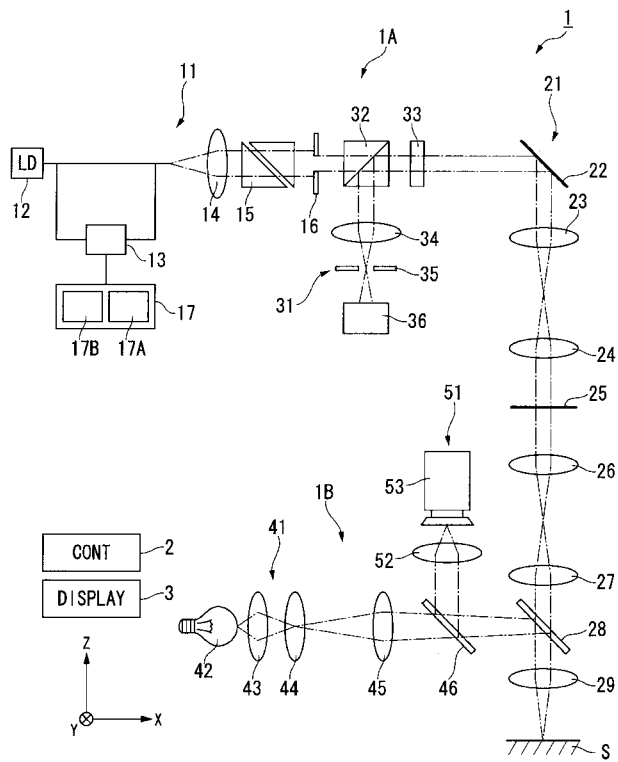
【 符号の説明 】

【 0 0 6 6 】

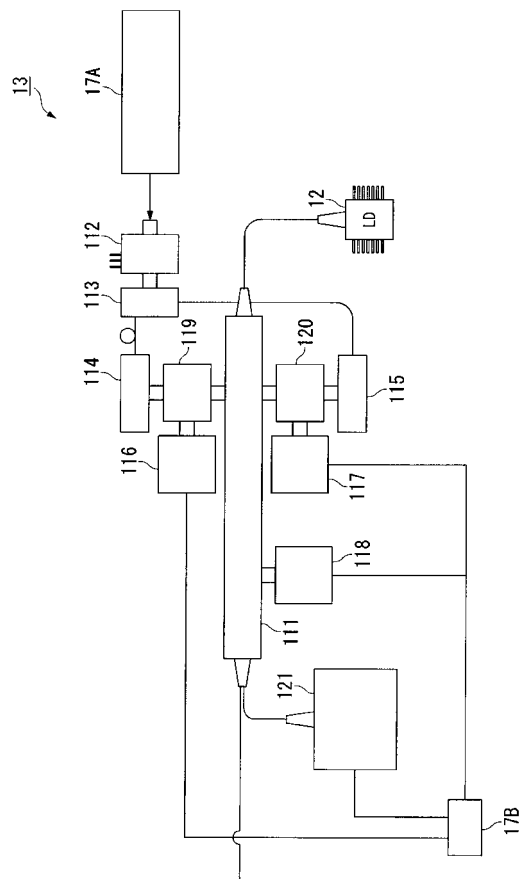
- 1 ブリルアン散乱顕微鏡
- 2 制御部
- 3 ディスプレイ (表示手段)
 - 1 1 第 1 照明光学系
 - 1 2 発光素子
 - 1 3 S S B 変調器 (S S B 変調手段)
 - 1 1 1 S S B 変調器
 - 2 1 走査光学系
 - 2 2 第 1 走査ミラー
 - 2 5 第 2 走査ミラー
 - 3 1 第 1 検出光学系
 - 3 6 光検出器
- 2 0 1 ブリルアン散乱顕微鏡
 - 2 1 1 照明光学系
 - 2 1 2 ライン光源
 - 2 2 1 走査光学系

- 2 2 3 走査ミラー
- 2 3 1 検出光学系
- 2 3 2 光検出器
- 2 4 1 制御部
- 2 5 1 ディスプレイ (表示手段)
- S 試料

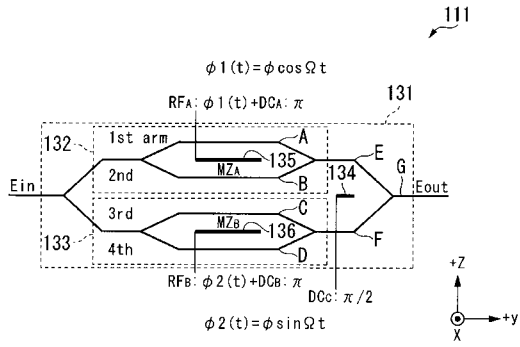
【 図 1 】



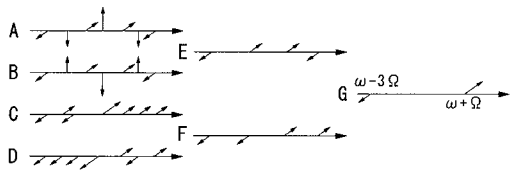
【 図 2 】



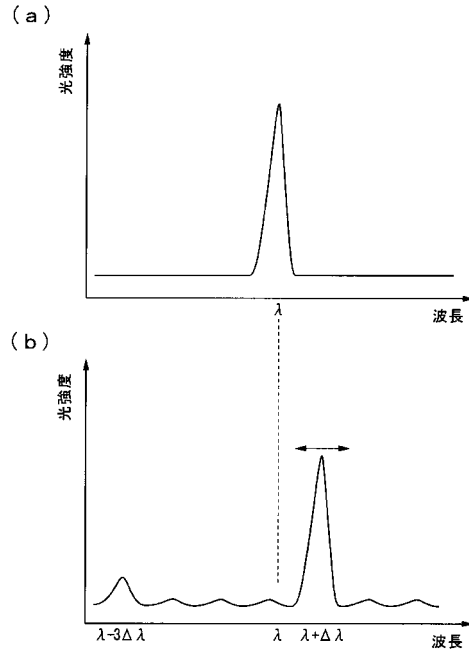
【 図 3 】



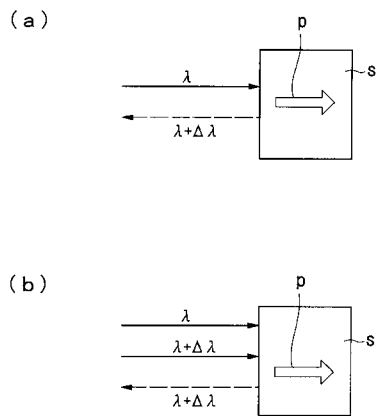
【 図 4 】



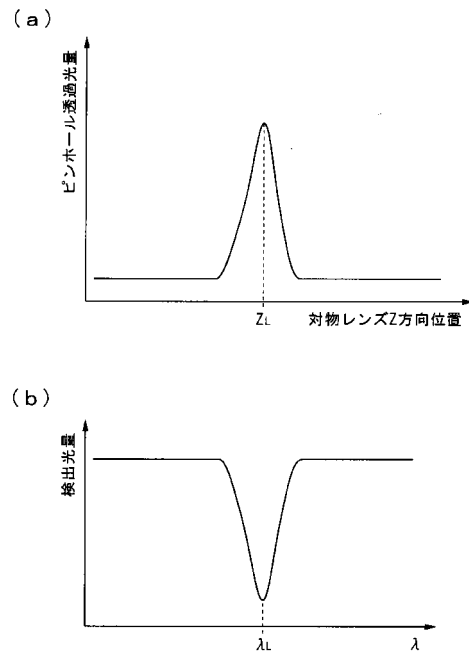
【 図 5 】



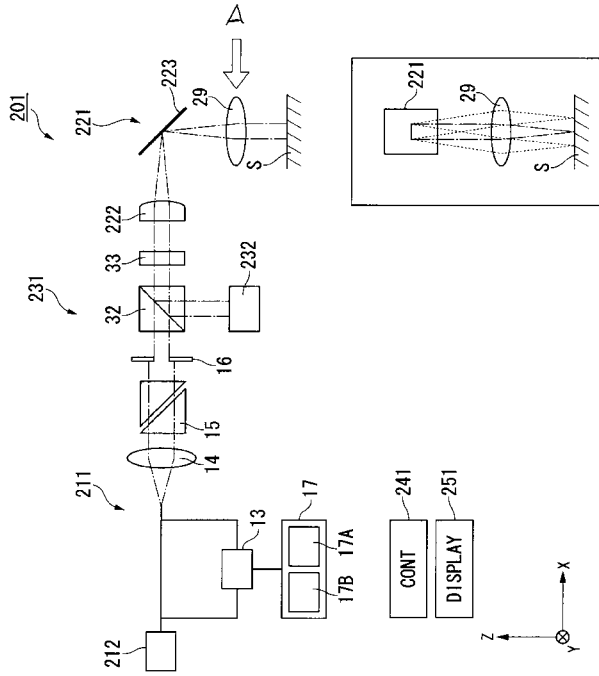
【 図 6 】



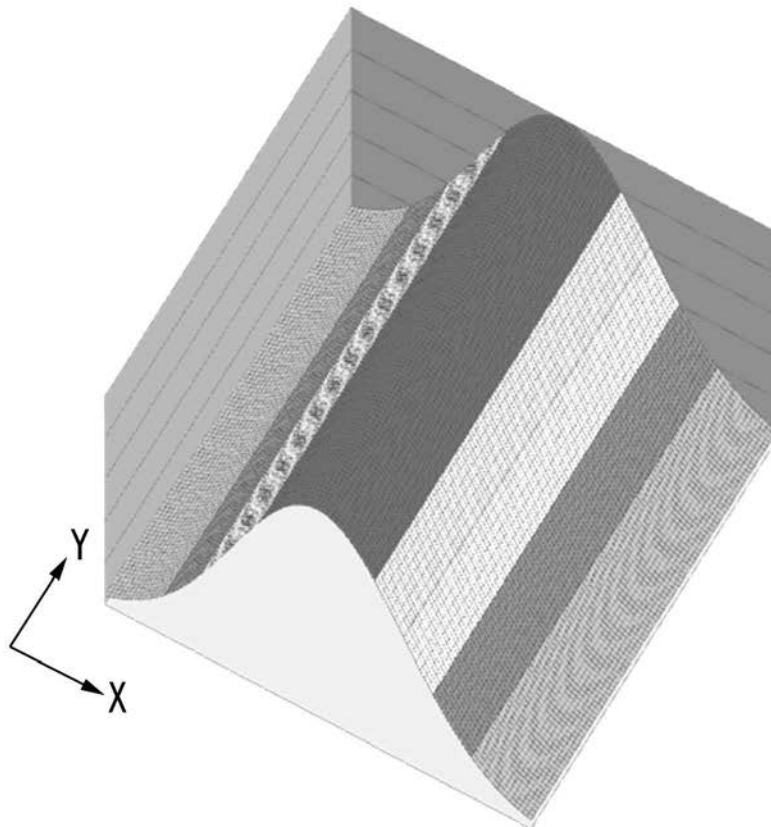
【 図 7 】



【 図 9 】



【 図 8 】



フロントページの続き

(72)発明者 小杉 純一

東京都千代田区六番町6番地28 住友大阪セメント株式会社内

(72)発明者 牟禮 勝仁

東京都千代田区六番町6番地28 住友大阪セメント株式会社内

Fターム(参考) 2G043 AA03 EA14 FA01 FA02 HA01 HA02 HA09 KA02 KA09 LA03