

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2012 年 9 月 7 日(07.09.2012)



(10) 国際公開番号
WO 2012/117493 A1

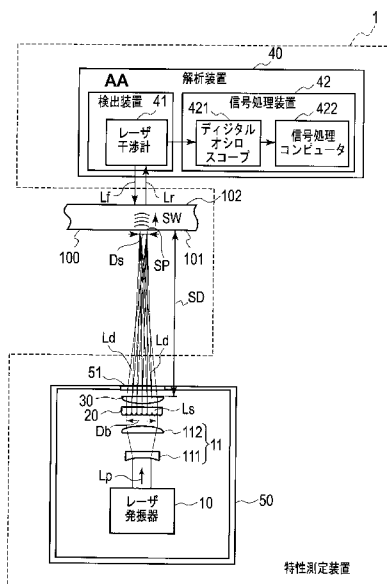
- (51) 国際特許分類:
G01N 29/00 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2011/054481
- (22) 国際出願日: 2011 年 2 月 28 日(28.02.2011)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 東芝三菱電機産業システム株式会社(TOSHIBA MITSUBISHI-ELECTRIC INDUSTRIAL SYSTEMS CORPORATION) [JP/JP]; 〒1080073 東京都港区三田三丁目 1 3 番 1 6 号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 佐野 光彦 (SANO, Mitsuhiko) [JP/JP]; 〒1080073 東京都港区三田三丁目 1 3 番 1 6 号 東芝三菱電機産業システム株式会社内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 三好 秀和, 外 (MIYOSHI, Hidekazu et al.); 〒1050001 東京都港区虎ノ門一丁目 2 番 8 号 虎ノ門琴平タワー Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT,

[続葉有]

(54) Title: APPARATUS FOR MEASURING CHARACTERISTICS OF METAL MATERIAL

(54) 発明の名称: 金属材料の特性測定装置

[図1]



(57) Abstract: This apparatus for measuring characteristics of metal material is provided with: a laser oscillator, which outputs a pulsed laser beam; a lens array, which has a plurality of small lenses having a same shape, said small lenses being spread in matrix on a surface perpendicular to the optical axis of the pulsed laser beam, and which is disposed such that a part of the pulsed laser beam, said part being obtained by dividing the pulsed laser beam with respect to a beam cross-section, is inputted to each of the small lenses; a light collecting lens, which collects output light from the small lenses of the lens array by overlapping the output light with a same region on the surface of a metal material to be measured; a laser interferometer, that detects, as an electrical signal, pulsed ultrasound, which has been excited by means of the pulsed laser beam collected by the light collecting lens, and which has propagated inside of the metal material.

(57) 要約: パルスレーザ光を出射するレーザ発振器と、パルスレーザ光の光軸と垂直な面にマトリクス状に敷き詰められた複数の同一形状の小レンズを有し、複数の小レンズの各々にパルスレーザ光をビーム断面について分割した一部分が入射するように配置されたレンズアレイと、レンズアレイの複数の小レンズからの出射光を測定対象の金属材料の表面の同一領域に重ねて集光させる集光レンズと、集光レンズにより集光されたパルスレーザ光により励起され金属材料の内部を伝播したパルス超音波を電気信号として検出するレーザ干渉計と、電気信号を処理する信号処理装置とを備える。

- 1 Characteristic measuring apparatus
40 Analytical apparatus
AA Detection apparatus
41 Laser interferometer
42 Signal processing apparatus
421 Digital oscilloscope
422 Signal processing computer
10 Laser oscillator



NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI 添付公開書類:

(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, — 国際調査報告 (条約第 21 条(3))
NE, SN, TD, TG).

明 細 書

発明の名称 : 金属材の特性測定装置

技術分野

[0001] 本発明は、レーザ光を用いた金属材の特性測定装置に関する。

背景技術

[0002] 近年、金属材の強度、成形性などの特性の向上は著しい。これに伴い、製造工程、及び検査工程において金属材の特性、及び、金属材の特性と強い相関を持つ諸特性を測定することの必要性が高まっている。

[0003] 例えば、金属材の強度と結晶粒径の間には強い相関があり、結晶粒径を数十 μm から1 μm 程度まで小さくすれば、強度が高いだけでなく、成形加工性、リサイクル性にも優れた高性能な金属材が得られる事が知られている。このような金属材の品質管理は、破壊試験によって行うことが多い。例えば、圧延後の製品コイルから試験片を切り出し、引張試験などにより強度を確認する。しかし、このような方法では測定値が得られるまでのリードタイムが数時間～数日と長く、その間に不良品が連続して発生することを防止できない。

[0004] これに対し、レーザ超音波法による金属材の特性測定が試みられている（例えば、特許文献1参照。）。レーザ超音波法は、金属材の表面にパルスレーザ光を照射し、そのときに発生する高周波のパルス状の超音波（以下において、「パルス超音波」という。）の金属材における伝播挙動を解析して、金属材の結晶粒径などの特性を非接触で測定する方法である。この方法によれば、迅速に測定結果が得られる。

[0005] パルス超音波の伝播挙動を用いて検出される金属材の特性は、例えば、結晶粒径、弾性率、成形性（ r 値）、弾性波速度など様々である。また、金属材の結晶粒径と、引張強度、降伏強度、及び降伏伸びとの間には強い相関関係があることが知られており、金属材の結晶粒径の測定方法と同様の測定方法によって、これらの特性値を得ることもできる。

先行技術文献

特許文献

[0006] 特許文献1：特開2008-116209号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0007] レーザ超音波法を用いた金属材の特性測定において、パルス超音波が金属材内部を伝播する間に、金属材の特性測定に利用する「(i) 結晶粒界での散乱によるパルス超音波の減衰」だけでなく、「(ii) パルス超音波の直進方向以外への拡散」によっても、パルス超音波の振幅が減少する。パルス超音波の振幅が減少すると、信号対ノイズ比が悪化し、特性測定装置の測定精度が低下する。

[0008] したがって、結晶粒界での散乱によるパルス超音波の減衰をより明確に検出するために、パルス超音波の拡散を抑制する必要がある。パルス超音波の拡散を抑制するためには、パルスレーザ光のスポットサイズを大きくする方法がある。つまり、スポットの外周部では、周囲の金属材により振動が拘束されるので、パルス超音波の進行方向が変化し拡散が生じるが、スポットサイズを大きくすれば、外周部による影響を相対的に小さくでき、パルス超音波の直進方向以外への拡散を抑制できる。

[0009] しかしながら、一般的なレーザ発振器から出射されるパルスレーザ光を単に拡大して照射するだけでは、十分な効果が得られないという問題があった。即ち、レーザ発振器から出射されるパルスレーザ光のビーム断面内の光量分布（ビームプロファイル）は均一でなく、ビーム中心付近の光量が周辺よりも大きいことが一般的である。このため、パルスレーザ光を単に拡大してスポットサイズを大きくした場合には、金属材のスポット中央部で励起されるパルス超音波の振幅は大きく、スポット周辺部で励起されるパルス超音波の振幅は小さい。

[0010] このパルス超音波の振幅差により、パルス超音波の伝播方向がパルスレー

ザ光の照射面に垂直な方向に揃わず、あたかもスポットサイズが小さい場合のようにパルス超音波が周辺へ拡散する。このため、伝播距離に対してパルス超音波の振幅が著しく減少し、検出するパルス超音波の波形の信号対ノイズ比が悪化する。その結果、測定精度が低下するという問題があった。

[0011] 上記問題点に鑑み、本発明は、測定精度の低下が抑制された、パルスレーザ光を用いた金属材の特性測定装置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

[0012] 本発明の一態様によれば、（イ）パルスレーザ光を出射するレーザ発振器と、（ロ）パルスレーザ光の光軸と垂直な面にマトリクス状に敷き詰められた複数の同一形状の小レンズを有し、複数の小レンズの各々にパルスレーザ光をビーム断面について分割した一部分が入射するように配置されたレンズアレイと、（ハ）レンズアレイの複数の小レンズからの出射光を測定対象の金属材の表面の同一領域に重ねて集光させる集光レンズと、（ニ）集光レンズにより集光されたパルスレーザ光により励起され金属材の内部を伝播したパルス超音波を電気信号として検出するレーザ干渉計と、（ホ）電気信号を処理する信号処理装置とを備える金属材の特性測定装置が提供される。

発明の効果

[0013] 本発明によれば、測定精度の低下が抑制された、パルスレーザ光を用いた金属材の特性測定装置を提供できる。

図面の簡単な説明

[0014] [図1]本発明の第1の実施形態に係る金属材の特性測定装置の構成を示す模式図である。

[図2]本発明の第1の実施形態に係る金属材の特性測定装置が有するレンズアレイの構成例を示す模式図であり、図2（a）は平面図、図2（b）は図2（a）のI I b-I I b方向に沿った断面図、図2（c）は図2（a）のI I c-I I c方向に沿った断面図である。

[図3]本発明の第1の実施形態に係る金属材の特性測定装置による集光スポット形状の例を示す写真である。

[図4]測定対象の金属材内部に励起されるパルス超音波の検出波形の例を示すグラフである。

[図5]ピストン音源から送信されたパルス超音波が拡散する様子を示す模式図である。

[図6]パルスレーザ光の光量分布の例を示すグラフであり、図6（a）はガウス分布を示し、図6（b）は均一分布を示す。

[図7]本発明の第1の実施形態に係る金属材の特性測定装置による波形解析方法の例を説明するためのフローチャートである。

[図8]本発明の第1の実施形態に係る金属材の特性測定装置によって検出されたパルス超音波の検出波形の例を示すグラフである。

[図9]本発明の第1の実施形態に係る金属材の特性測定装置の他の構成を示す模式図である。

[図10]本発明の第2の実施形態に係る金属材の特性測定装置の構成を示す模式図である。

[図11]パルスレーザ光のビームプロファイルの経時変化を示す写真であり、図11（a）は経時変化前のビームプロファイルを示す写真であり、図11（b）は経時変化後のビームプロファイルを示す写真である。

発明を実施するための形態

[0015] 次に、図面を参照して、本発明の第1及び第2の実施形態を説明する。以下の図面の記載において、同一又は類似の部分には同一又は類似の符号を付している。以下に示す第1及び第2の実施形態は、この発明の技術的思想を具体化するための装置や方法を例示するものであって、この発明の実施形態は、構成部品の構造、配置等を下記のものに特定するものでない。この発明の実施形態は、請求の範囲において、種々の変更を加えることができる。

[0016] （第1の実施形態）

本発明の第1の実施形態に係る金属材の特性測定装置1は、図1に示すように、パルスレーザ光 L_p を出射するレーザ発振器10と、パルスレーザ光 L_p の光軸と垂直な面にマトリクス状に敷き詰められた複数の同一形状の小

レンズ L_s を有するレンズアレイ20と、複数の小レンズ L_s からの出射光 L_d を測定対象の金属材100の表面101の同一領域に重ねて集光させる集光レンズ30と、出射光 L_d が照射されて金属材100の内部を伝播するパルス超音波SWを解析する解析装置40とを備える。レンズアレイ20の複数の小レンズ L_s には、パルスレーザ光 L_p の光軸に垂直なビーム断面について分割した一部がそれぞれ入射され、複数の小レンズ L_s は光軸に垂直なビーム断面の形状が互いに同一の出射光 L_d をそれぞれ出射する

図1に示した特性測定装置1では、金属材100の表面101にパルスレーザ光 L_p を照射して小規模な爆発を起こし、金属材100にパルス超音波SWを励起させる。このパルス超音波SWは金属材100内を伝播しながら減衰し、パルスレーザ光 L_p が照射された表面101に対向する金属材100の裏面102の微小な振動として現れる。

[0017] 解析装置40の検出装置が、この微小な振動を電気信号として検出する。図1は、検出装置としてレーザ干渉計41を採用した例である。レーザ干渉計41は、集光レンズ30により集光されたパルスレーザ光 L_p により励起され金属材100の内部を伝播するパルス超音波を電気信号として検出する。具体的には、レーザ干渉計41は金属材100の裏面102に微弱な検出用レーザ光 L_f を照射し、検出用レーザ光 L_f の金属材100からの反射光 L_r と基準光とを干渉させることにより、金属材100の裏面102に現れた微小振動を電圧の変化として検出する。レーザ干渉計41により検出された電気信号を解析装置40の信号処理装置42が処理して、金属材100の特性が測定される。例えば、検出された電気信号をデジタルオシロスコープ421を介して信号処理コンピュータ422に取り込み、波形解析により金属材100の特性が判定される。

[0018] 以下に、図1に示した特性測定装置1の詳細について説明する。

[0019] レーザ発振器10には、例えば、大出力で特性が安定しているQスイッチ固体パルスレーザを採用可能である。特に発振用固体媒質にネオジウムドープ：イットリウム・アルミニウム・ガーネット（Nd:YAG）を用いたパルス幅

数 n_s ～数十 n_s 程度のQスイッチ固体パルスレーザは、産業用途に広く用いられており、レーザ発振器10に好適である。

[0020] レーザ発振器10から放出されるパルスレーザ光 L_p は、一般に僅かな広がり角を持つ。このため、凹レンズ111と凸レンズ112を組み合わせた拡大系11を用いてほぼ平行光とされたパルスレーザ光 L_p が、レンズアレイ20に入射する。

[0021] レンズアレイ20の構成例を図2(a)～図2(c)に示す。レンズアレイ20は、入射されるパルスレーザ光 L_p の光軸と垂直な面に同一形状の多数の小レンズ L_s が敷き詰められた構造を有し、図2は n 個の正方形の小レンズ $L_{s1} \sim L_{sn}$ がマトリクス状に配置された例を示している。図2(a)でハッチングをかけた領域がパルスレーザ光 L_p のビームが照射される領域であり、パルスレーザ光 L_p のビーム径が D_b である。

[0022] 正方形の他、長方形、六角形、及び、円形などいずれの形状も小レンズ L_s に採用可能である。但し、小レンズ L_s 間に隙間があると集光効率が下がるので、レンズアレイ20に小レンズ L_s が隙間なく配置されていることが好ましい。図2(c)に示した小レンズ L_s の間隔 w は、入射されるパルスレーザ光 L_p のビーム断面内に、後述するように十分な数の小レンズ L_s が含まれるように定める。ここで、「小レンズ L_s の間隔」とは、隣接する小レンズ L_s の中心間の距離である。

[0023] レンズアレイ20にパルスレーザ光 L_p を入射させると、パルスレーザ光のビーム断面内に含まれるように配置されたレンズアレイ20を構成する個々の小レンズ L_s に、ビーム断面について分割したパルスレーザ光 L_p の一部がそれぞれ入射され、小レンズ L_s のそれぞれは小レンズ L_s の形状（例えば正方形）の像を結像する。レンズアレイ20に入射するパルスレーザ光 L_p のビーム断面内の光量分布（ビームプロファイル）がどのような分布であっても、パルスレーザ光 L_p のごく一部分から作り出された各小レンズ L_s の出射光 L_d は均一な光量分布を有する。

[0024] レンズアレイ20から出射された各出射光 L_d は、凸レンズの集光レンズ

30によって金属材100の表面101に集光される。なお、集光レンズ30の焦点距離は、スタンドオフ距離SD（集光レンズ30と金属材100の表面101との間隔）にほぼ等しい。

[0025] そして、複数の小レンズLsによる各像は、集光レンズ30の焦点位置、即ち、金属材100の表面101上の一点に重ね合わせて投影される。このようにして、小レンズLsと同じ形状（例えば正方形）で均一な光量分布の複数のパルスレーザ光が照射される集光スポットSPを金属材100の表面101に形成するように、パルスレーザ光Lpは整形される。集光スポットSPの形状は小レンズLsの形状と同一であり、大きさは集光レンズ30の焦点距離によって定まる。

[0026] この集光スポットSP内では複数の小レンズLsにより投影される像が重ね合わされているので、干渉縞による明暗が生じる。ただし、重ね合わされる像の数を十分に多くすれば、この干渉縞の間隔をごく小さくすることができる。集光スポットSP内においてほぼ均一な光量分布を得ることができる。重ね合わされる像の数が15個を下回ると、金属材100内部を伝播するパルス超音波SWの波形へ干渉縞が及ぼす影響が無視できない場合があり、また、光量均一化の効果が不十分となる場合がある。したがって、入射されるパルスレーザ光Lpのビーム断面内に15以上の小レンズLsが含まれるように、レンズアレイ20における小レンズLsの間隔が設定される。

[0027] レンズアレイ20の焦点距離は、金属材100の表面101に形成される集光スポットSPの大きさが所望の値になるように、実験または光線追跡シミュレーション計算により決定される。実用的には、レンズアレイ20の焦点距離は、スタンドオフ距離SDと同程度から、スタンドオフ距離SDの10分の1程度の範囲である。レンズアレイ20の製造には種々の制約があるため、所望の焦点距離の小レンズLsを得られない場合がある。この場合は、複数のレンズアレイ20を組み合わせ配置してもよい。

[0028] パルスレーザ光Lpは光量密度の尖頭値が高いため、レンズアレイ20の素材については、例えば、石英ガラスなどの損傷閾値の高いガラス製のもの

が好適である。ただし、金属材 100 の特性測定に必要な波長、出力によってはプラスチック製のレンズアレイ 20 なども採用可能である。

[0029] 金属材 100 の表面 101 における集光スポット SP の形状をバーンペーパーに焼き付け記録した例を図 3 に示す。図 3 は、小レンズ Ls を 1.1 mm 間隔で 18 行 18 列のマトリクス状に配置したレンズアレイ 20 に、ビーム径 Db が 1.4 mm のパルスレーザ光 Lp を入射して形成された集光スポット SP の形状である。したがって、図 3 は約 127 個の小レンズ Ls の像が重ね合わせされた例である。集光スポット SP の形状は、レンズアレイ 20 の小レンズ Ls の形状と同じ正方形であり、小レンズ Ls の形状が上手く重なり合って投影されていることがわかる。図 3 に示した例では、集光スポット SP のサイズ Ds は 4.5 mm である。

[0030] 集光スポット SP へのパルスレーザ光 Lp の照射によって金属材 100 にパルス超音波 SW が励起され、このパルス超音波 SW が金属材 100 内を伝播する。図 4 に例示するように、金属材 100 に励起されるパルス超音波 SW は様々な振動モードの成分をもつ。例えば金属材 100 の結晶粒径の測定には、縦波成分の繰り返し反射エコー（図 4 において矢印で示した、波形の尖った部分）を利用する。図 4 において、波形 E1、E2、E3 がそれぞれ縦波の第 1 エコー、第 2 エコー、第 3 エコーである。

[0031] なお、図 4 において、縦軸は相対的な振幅（単位 a.u. : Arbitrary Unit）を示している。横軸はパルスレーザ光 Lp が出射されてからの経過時間である。パルスレーザ光 Lp が出射された後で、最初に金属材 100 の裏面 102 にパルス超音波 SW が到達する時刻に第 1 エコーが検出される。そして、裏面 102 で反射された後、更に表面 101 で反射されたパルス超音波 SW が裏面 102 に到達する時刻に、第 2 エコー以降の反射エコーが検出される。したがって、第 1 エコーが検出されるまでの時間は金属材 100 の厚みに対応し、その後の各エコーが検出される間隔は金属材 100 の厚みの 2 倍に対応する。

[0032] ここで、金属材 100 の内部を伝播するパルス超音波 SW を、図 5 を参照

して説明する。図5は、平板状のピストン音源500から送信されたパルス超音波SWが拡散する様子を示す模式図である。

- [0033] パルス超音波SWがピストン音源500から送信された場合、平面波 W_p として直進する領域を近距離音場（フレネルゾーン）といい、パルス超音波SWが直進する距離（近距離音場限界距離 x ）は、以下の式（1）で表される：

$$x = d^2 / (4\lambda) \quad \cdots (1)$$

式（1）において、 d はピストン音源500の直径であり、金属材100に照射されたパルスレーザ光 L_p のスポットサイズに相当する。 λ はパルス超音波SWの波長（mm）である。

- [0034] 一方、近距離音場限界距離 x より遠い領域を遠距離音場といい、パルス超音波SWは球面波 W_s として拡散する。遠距離音場では、結晶粒径などの材質特性とは無関係に、パルス超音波SWの振幅が伝播距離の二乗に比例して急速に減少する。したがって、波形解析に用いるパルス超音波SWを明瞭に検出するには、スポットサイズを大きくし、近距離音場限界距離 x をより長くすることが好ましい。

- [0035] 例えば、厚み2mmの鋼材の粒径を測定するにあたり、繰り返し反射の第1～第5エコーの波形を鋼材の裏面から検出する場合、第5エコーの伝播距離は以下の式（2）で表される：

$$2 \text{ (mm)} \times (1 + 4 \times 2 \text{ (往復)}) = 18 \text{ (mm)} \quad \cdots (2)$$

鋼材の縦波超音波の伝播速度 v は約5900m/sなので、30MHzの縦波超音波の波長 $\lambda = v / f$ は、0.197mmである。したがって、式（1）によれば、波形解析に30MHz以上の周波数成分を用いる場合、スポットサイズの直径を4mm程度以上にすることが好ましいことが分かる。

- [0036] 上記の数値は設計上の目安であり、実際には、測定目的に応じて、どの程度のノイズ対信号比の劣化を許容できるかによって、より小さなスポットサイズにしても問題ない場合もある。また、拡散による振幅の減少を表す公知の式などを用いて超音波波形を補正することにより、より小さなスポットサ

イズの場合においても、超音波エコーを明瞭に検出することができる場合もある。

[0037] 一方、パルス超音波SWの拡散の抑制に関してはスポットサイズの上限についての制約は特に存在しない。但し、レーザ発振器10の出力に応じて、金属材100の表面101でアブレーションを起こすのに必要な光量密度を確保することのできるスポットサイズの上限值は存在するので、それ以下であればよい。したがって、金属材100の厚みなどに応じてスポットサイズの上限を調整することは特に必要ではない。

[0038] 上記のパルス超音波SWの拡散についての検討は、平板状のピストン音源500を前提とする。しかし、レーザ発振器10から出射されるパルスレーザ光Lpのビーム断面内の光量分布（ビームプロファイル）は、必ずしも均一ではない。特に、産業用途に広く利用されているレーザ発振器のパルスレーザ光の光量分布は、ビーム中心付近の光量が大きく、凸レンズによる集光性の良好な「ガウス分布（正規分布）」か、それに近い分布である。図6（a）に示すようにビームプロファイルがガウス分布である場合には、図6（b）に示したビームプロファイルが均一である場合と比較して、ビーム中心付近の光量と周辺部の光量との差が大きい。なお、図6（a）、図6（b）の縦軸は光量、横軸は集光スポット内の位置を示す。

[0039] ガウス分布を有するパルスレーザ光を、上述のように十分な大きさのスポットサイズで金属材100の表面101に集光する場合、数枚のレンズによる縮小光学系を介するのが一般的である。この場合、集光スポット内の光量分布は、レーザ発振器から出射されるパルスレーザ光の光量分布がそのまま投影される。このため、集光スポット中央部では励起される超音波エコーの振幅が大きく、逆に、集光スポット周辺部では励起される超音波エコーの振幅が小さい。既に述べたように、この振幅差によって、スポットサイズが小さい場合のようにパルス超音波が周辺へ拡散する。その結果、レーザ干渉計で検出する超音波波形の信号対ノイズ比が悪化、測定精度が低下する。

[0040] しかしながら、図1に示した特性測定装置1によれば、レンズアレイ20

を構成する複数の小レンズ L_s が、均一な光量分布を持つ像を集光レンズ30の焦点位置に重ね合わせて投影する。このため、パルスレーザ光 L_p は、金属材100の表面101において小レンズ L_s と同じ形状で均一な光量分布をもち、図6(b)に示すような光量分布の集光スポットを形成するように整形される。

[0041] したがって、パルスレーザ光 L_p により金属材100に励起されるパルス超音波SWの拡散を小さく抑えることができる。この結果、伝播距離に対してパルス超音波SWの振幅は減少しにくい。

[0042] パルスレーザ光 L_p により励起されたパルス超音波SWが金属材100内を伝播し、金属材100の裏面102に現れる微小振動がレーザ干渉計41によって電気信号として検出される。上記のようにパルス超音波SWの振幅の減少が抑制されているため、レーザ干渉計41で検出する超音波波形の信号対ノイズ比が向上し、良好な測定精度を得ることが可能である。

[0043] レーザ干渉計41には、金属材100の表面101が粗面であっても高周波数の振動を測定できるフォトリフラクティブ干渉計を採用可能である。或いは、ファブリペロー干渉計も粗面で高周波数の振動を測定できるため、同様に採用可能である。また、金属材100の表面101が鏡面であれば、マイケルソン干渉計なども採用可能である。

[0044] レーザ干渉計41で検出した電圧波形を、例えばデジタルオシロスコープ421に収録し、信号処理コンピュータ422で解析することで、金属材100の特性測定を行うことができる。

[0045] 金属材100内を伝播する縦波超音波の結晶粒での散乱による減衰率は、縦波超音波の周波数、及び、金属材100の結晶粒径により異なる。例えば、レイリー散乱、ストカスティック散乱などが知られている。

[0046] 散乱減衰に基づく波形解析方法の例を図7に示すフローチャートを参照して以下に説明する。

[0047] 図7のステップS1において読み込まれた波形データを、ステップS2において、フーリエ変換等により各周波数成分に分解する。次に、ステップS

3において、各々の周波数成分において各縦波エコーを抽出する。ステップS4において、抽出された縦波エコーの振幅の変化を対数関数で近似して、各周波数成分の減衰率 α (f) を計算する。

[0048] 減衰率 α 、周波数f、及び結晶粒径Dには、以下の式(3)の相関関係がある：

$$\alpha = K \times D^{n-1} \times f^n \quad \dots (3)$$

式(3)で、 α は減衰率(dB/mm)、Dは結晶粒径(mm)、fは周波数(MHz)、K及びnは係数である。

[0049] 式(3)を変形すると以下の式(4)が得られる：

$$D = \{ \alpha / (K \times f^n) \}^{1/(n-1)} \quad \dots (4)$$

ステップS5において、いずれかの周波数fの減衰率 α (f)に基づき、式(4)を用いて結晶粒径を判定する。なお、係数K、nの値は、結晶粒径が既知の試験材を測定する実験によって予め同定される。係数nの値は、理論的には結晶粒径Dと波長 λ の比 D/λ に応じて定まる。即ち、レイリー散乱域($0.03 \leq D/\lambda \leq 0.3$)で $n=4$ 、ストカスティック散乱域($0.3 \leq D/\lambda \leq 1$)で $n=3$ である。

[0050] 図8は、第1の実施形態に係る金属材の特性測定装置1で検出された超音波の波形の一例である。図8において、縦軸は相対的な振幅(単位a.u. : Arbitrary Unit)を示している。横時はパルスレーザ光 L_p が出射されてからの経過時間である。測定対象の金属材100は、板厚1.35mmの鋼板で、結晶粒径は約4 μ mである。レーザ干渉計41で検出した超音波波形が、縦波の第1エコー(波形E1)から第13エコー(波形E13)まで明瞭に検出できている。

[0051] 以上に説明したように、本発明の第1の実施形態に係る金属材の特性測定装置1によれば、測定対象の金属材100に照射されるパルスレーザ光のビーム断面内の光量分布を均一にすることができる。このため、金属材100に励起されるパルス超音波SWの拡散が抑制される。その結果、測定精度の低下が抑制された、パルスレーザ光を用いた金属材の特性測定装置1が提供

される。

- [0052] なお、集光レンズ 30 とレンズアレイ 20 の位置関係は図 1 に示した例と前後逆でも差し支えない。即ち、レーザ発振器 10 と集光レンズ 30 との間にレンズアレイ 20 が配置されていてもよいし、或いは、レーザ発振器 10 とレンズアレイ 20 との間に集光レンズ 30 が配置されていてもよい。
- [0053] 図 9 に、レーザ発振器 10 とレンズアレイ 20 との間に集光レンズ 30 が配置された例を示す。図 9 に示した特性測定装置 1 によっても、レンズアレイ 20 の複数の小レンズ L_s がそれぞれ出力する出射光 L_d を、集光レンズ 30 によって測定対象の金属材 100 の表面 101 の同一領域に集光させることができる。
- [0054] また、図 1、図 9 に示すように、レンズアレイ 20 及び集光レンズ 30 と金属材 100 と間には窓板 51 が設置される。窓板 51 は、レーザ発振器 10、レンズアレイ 20、及び集光レンズ 30 が格納された筐体 50 から外部にパルスレーザ光 L_p を出射するために、筐体 50 に設置されている。
- [0055] レーザ発振器をはじめ、レンズ、反射鏡などの光学機器は、その光学的な効率を高めるために、特殊な素材であったり、特殊なコーティングが施してあることが多く、塵などが付着すれば容易に損傷したり、光学的な効率が低下する。そこで、機器全体を密閉度の高い筐体に収め、窓板を介してレーザ光を取り出すのが一般的である。
- [0056] しかし、実際の生産ラインに窓板を設置した場合には、この窓板に液体や粉末などが付着する場合がある。この場合、窓板の当該部分の透過率が低下する。透過率が低下した部分にレーザ光が当たると、レーザ光のエネルギーを吸収して発熱し、窓板の当該部分が損傷する。そして、レーザ光の照射を継続すると、損傷が進展、拡大する。このような損傷が発生すると、従来の集光系では、損傷部分が言わば遮光マスクのように作用し、集光スポットの形状内の光量分布は不均一になってしまう。
- [0057] これに対し、図 1、図 9 に示した特性測定装置 1 では、金属材 100 の表面 101 の集光スポット S_P においてパルスレーザ光の光量分布を均一にす

ることができる。つまり、窓板 51 の液体や粉末などが付着した部分の損傷によって窓板 51 を通過するパルスレーザ光 L_p のビームプロファイルが劣化しても、金属材 100 に励起されるパルス超音波 SW の拡散が小さく抑えられる。その結果、伝播距離に対してパルス超音波 SW の振幅が減少しにくく、レーザ干渉計 41 で検出する超音波波形の信号対ノイズ比はほとんど変化しない。つまり、窓板 51 が損傷した場合でも、良好な測定精度を維持することが可能である。したがって、窓板 51 が損傷しても、即座に交換する必要がなく、生産スケジュール上の休止期間に合わせて窓板 51 の交換を行えばよい。このため、特性測定装置 1 の稼働率の低下を回避することが可能である。

[0058] (第 2 の実施形態)

本発明の第 2 の実施形態に係る金属材の特性測定装置 1 は、図 10 に示すように、レーザ発振器 10 から出射されたパルスレーザ光 L_p の波長を変換する波長変換結晶 60 を更に備えることが、図 1 に示した第 1 の実施形態と異なる点である。その他の構成については、第 1 の実施形態と同様である。

[0059] 金属材 100 の研磨した表面 101 におけるレーザ光の吸収率は、波長が短いほど大きい。したがって、レーザ発振器 10 から出射されるパルスレーザ光 L_p を波長変換結晶 60 によって短い波長に変換してから金属材 100 に照射することにより、研磨面などの反射率の高い金属材において、同一のパルスレーザ光出力に対してより大きな振幅のパルス超音波 SW を励起することができる。

[0060] 図 10 に示した特性測定装置 1 によれば、レーザ発振器 10 から出射されるパルスレーザ光 L_p が波長変換結晶 60 によってより短い波長に変換してから金属材 100 に照射される。波長が短いほど金属材 100 の表面 101 におけるパルスレーザ光の吸収率が大きいので、研磨面などにおいて同一のパルスレーザ光出力に対して振幅のより大きなパルス超音波 SW を励起することができる。例えば、波長 1064 nm の $\text{Nd} : \text{YAG}$ レーザからのパルスレーザ光 L_p を、 LBO (LiB_3O_5) 又は KTP (KTiOPO_4) などの

波長変換結晶 60 によって、波長 532 nm、或いは波長 355 nm のパルスレーザ光 Lp に変換して、金属材 100 の表面 101 に照射する。

[0061] 通常、波長変換結晶 60 の損傷を防ぐため、波長変換結晶 60 に入射するパルスレーザ光 Lp の光量密度を損傷閾値以下にする。したがって、使用するパルスレーザ光 Lp の出力が大きければ、サイズの大きい波長変換結晶 60 を用い、入射するパルスレーザ光 Lp のビーム径を大きくする必要がある。

[0062] ところが、サイズの大きな波長変換結晶 60 を用いると、結晶内の温度ムラや経時変化によって、波長変換結晶 60 から出射されるレーザ光のビームプロファイルが劣化するという問題がある。例えば、図 11 (a) 及び図 11 (b) は YAG レーザ光の波長を 532 nm に変換した場合のビームプロファイルの経時変化の例を示す。図 11 (a) は使用開始直後、図 11 (b) は 10 ヶ月経過後のビームプロファイルである。

[0063] 図 11 (b) では光量が多い領域 D1 と光量が少ない領域 D2 とが混在しているなど、図 11 (a) と図 11 (b) とを比較すると、ビームプロファイルが大きく経時変化していることがわかる。このようなビームプロファイルの劣化は、金属材 100 に励起されるパルス超音波 SW の拡散状況に無視できない影響を及ぼす。即ち、伝播距離に対して超音波振幅が著しく減少し、レーザ干渉計 41 で検出する超音波波形の信号対ノイズ比が悪化する。その結果、測定精度が低下するという問題がある。

[0064] これに対し、図 10 に示した特性測定装置 1 によれば、波長変換結晶 60 の経年変化や温度ムラ等によりビームプロファイルの劣化が生じて、金属材 100 の表面 101 の集光スポット SP におけるパルスレーザ光の光量分布を均一にすることができる。このため、金属材 100 で励起されるパルス超音波 SW の拡散を小さく抑えることができる。この結果、伝播距離に対してパルス超音波 SW の振幅が減少しにくくなり、レーザ干渉計 41 で検出する超音波波形の信号対ノイズ比が向上し、良好な測定精度を得ることが可能である。

[0065] 他は、第 1 の実施形態と実質的に同様であり、重複した記載を省略する。

[0066] 上記のように、本発明は第 1 及び第 2 の実施形態によって記載したが、この開示の一部をなす論述及び図面はこの発明を限定するものであると理解すべきではない。この開示から当業者には様々な代替実施形態、実施例及び運用技術が明らかとなろう。即ち、本発明はここでは記載していない様々な実施形態などを含むことは勿論である。したがって、本発明の技術的範囲は上記の説明から妥当な請求の範囲に係る発明特定事項によってのみ定められるものである。

産業上の利用可能性

[0067] 本発明の金属材の特性測定装置は、金属材の特性を非接触で測定する製造業に利用可能である。

符号の説明

[0068] 1 …特性測定装置
1 0 …レーザ発振器
1 1 …拡大系
2 0 …レンズアレイ
3 0 …集光レンズ
4 0 …解析装置
4 1 …レーザ干渉計
4 2 …信号処理装置
5 0 …筐体
5 1 …窓板
6 0 …波長変換結晶
1 0 0 …金属材
1 0 1 …表面
1 0 2 …裏面
1 1 1 …凹レンズ
1 1 2 …凸レンズ

4 2 1…デジタルオシロスコープ

4 2 2…信号処理コンピュータ

請求の範囲

[請求項1]

パルスレーザー光を出射するレーザー発振器と、

前記パルスレーザー光の光軸と垂直な面にマトリクス状に敷き詰められた複数の同一形状の小レンズを有し、前記複数の小レンズの各々に前記パルスレーザー光をビーム断面について分割した一部分が入射するように配置されたレンズアレイと、

前記レンズアレイの前記複数の小レンズからの出射光を測定対象の金属材の表面の同一領域に重ねて集光させる集光レンズと、

前記集光レンズにより集光された前記パルスレーザー光により励起され前記金属材の内部を伝播したパルス超音波を電気信号として検出するレーザー干渉計と、

前記電気信号を処理する信号処理装置と

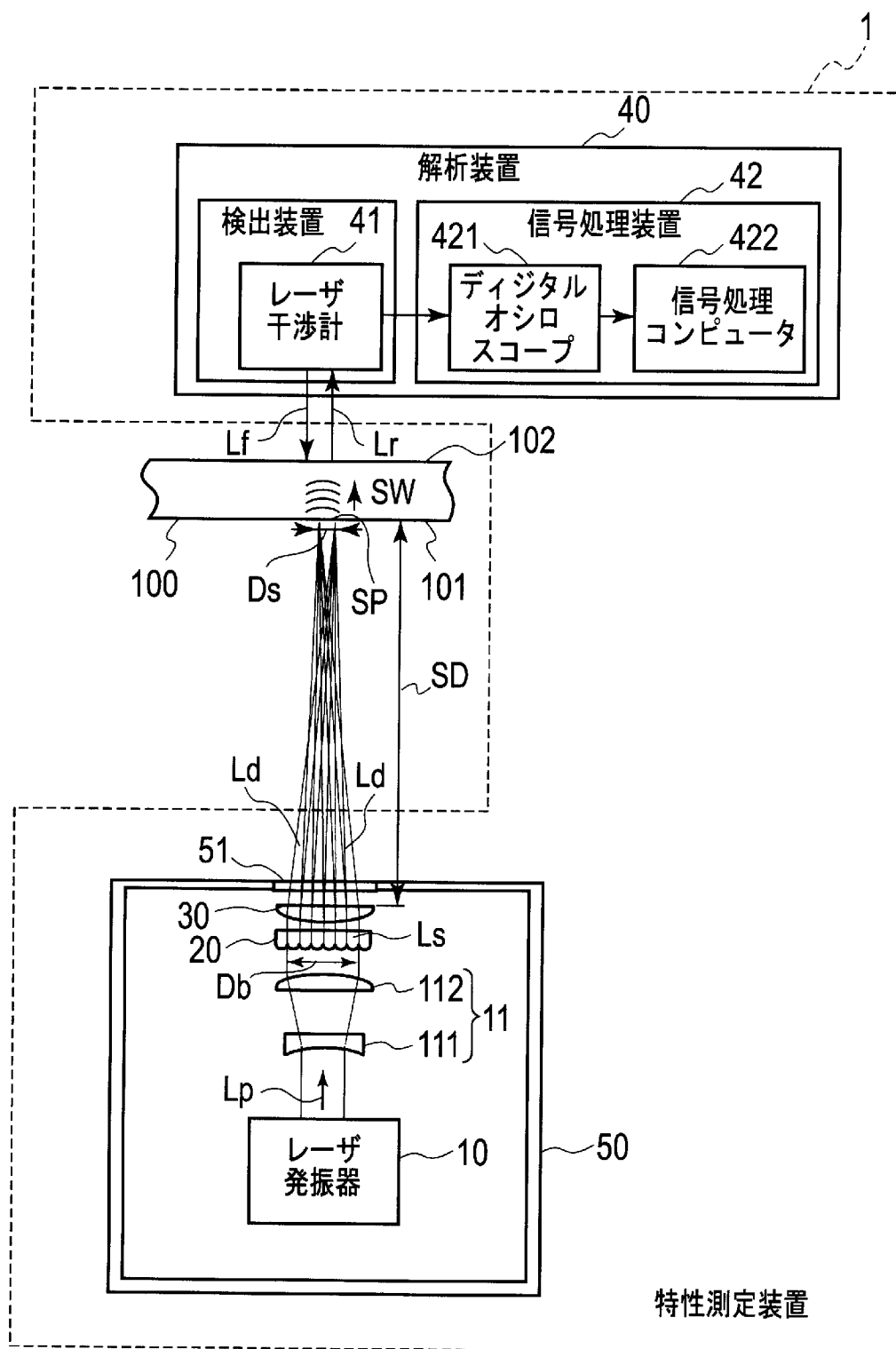
を備えることを特徴とする金属材の特性測定装置。

[請求項2]

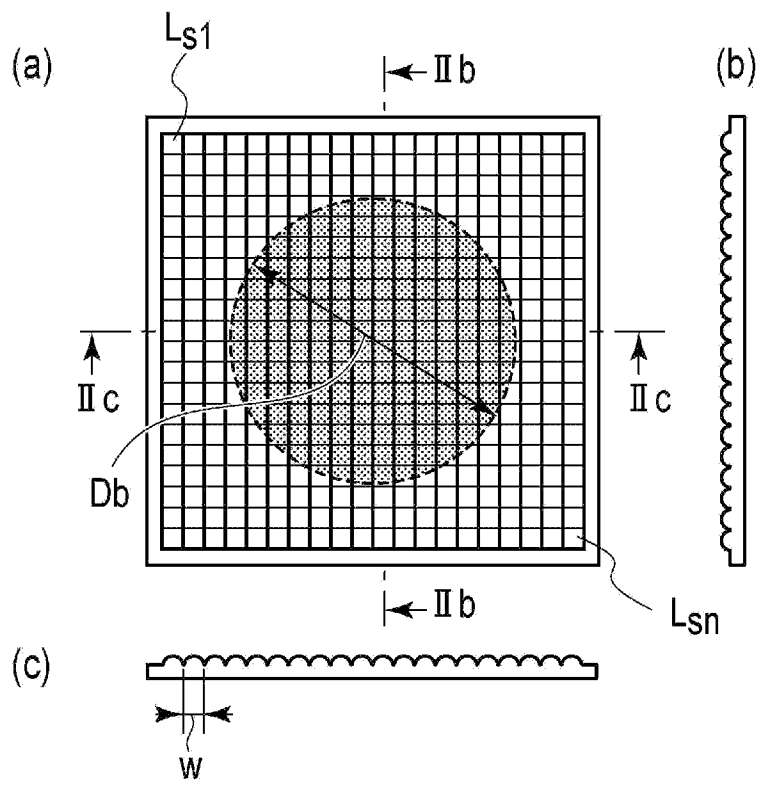
前記レーザー発振器と前記レンズアレイの間に前記レーザー発振器から出射された前記パルスレーザー光の波長を変換する波長変換結晶を更に備えることを特徴とする請求項1に記載の金属材の特性測定装置。

[請求項3]

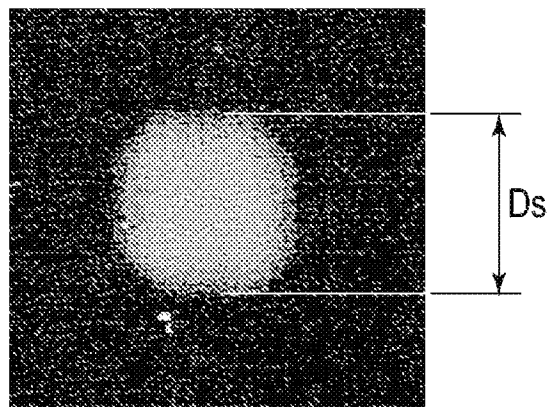
前記レーザー干渉計が、前記パルス超音波の縦波成分の繰り返し反射エコーを検出することを特徴とする請求項1に記載の金属材の特性測定装置。



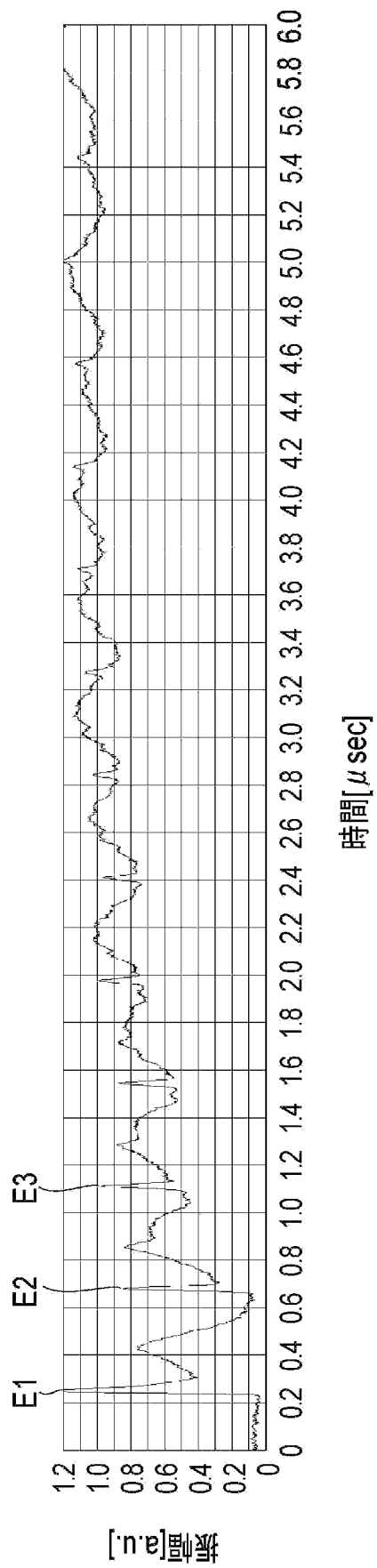
[図2]



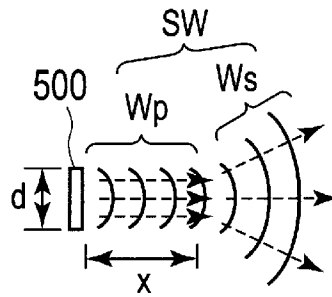
[図3]



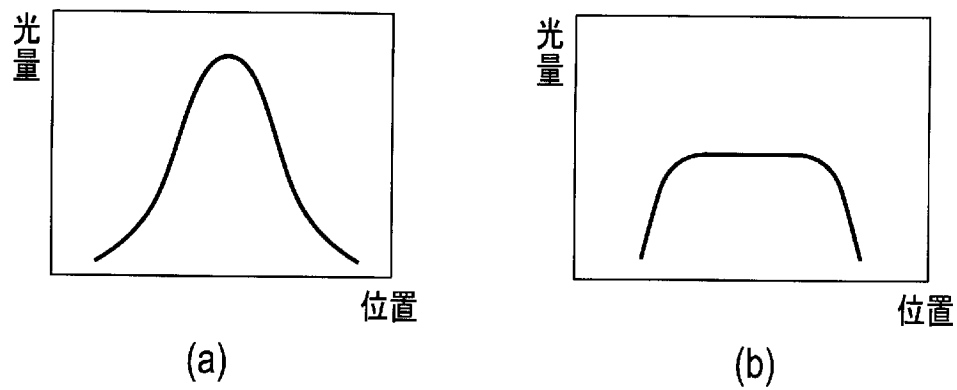
[図4]



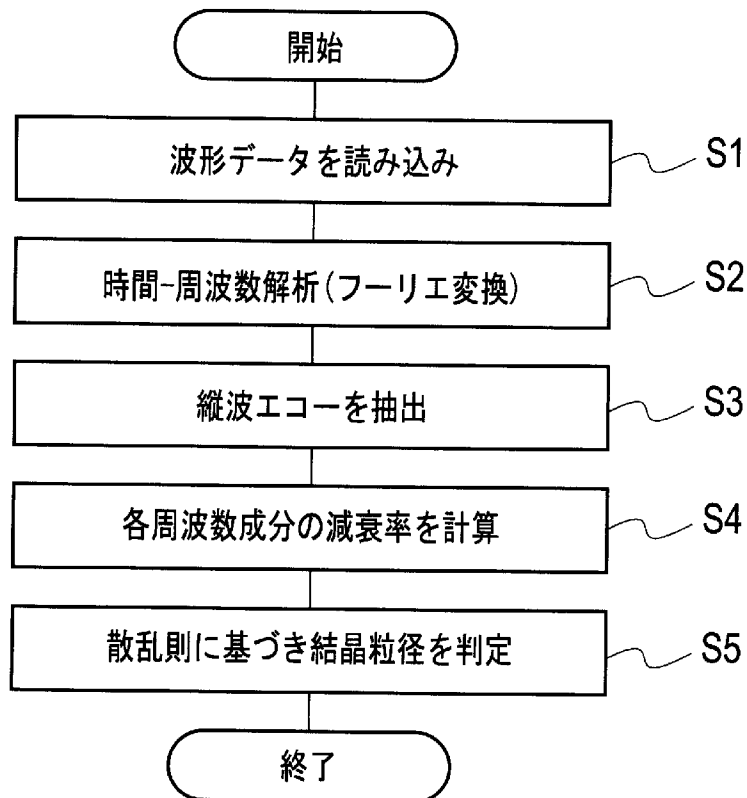
[図5]



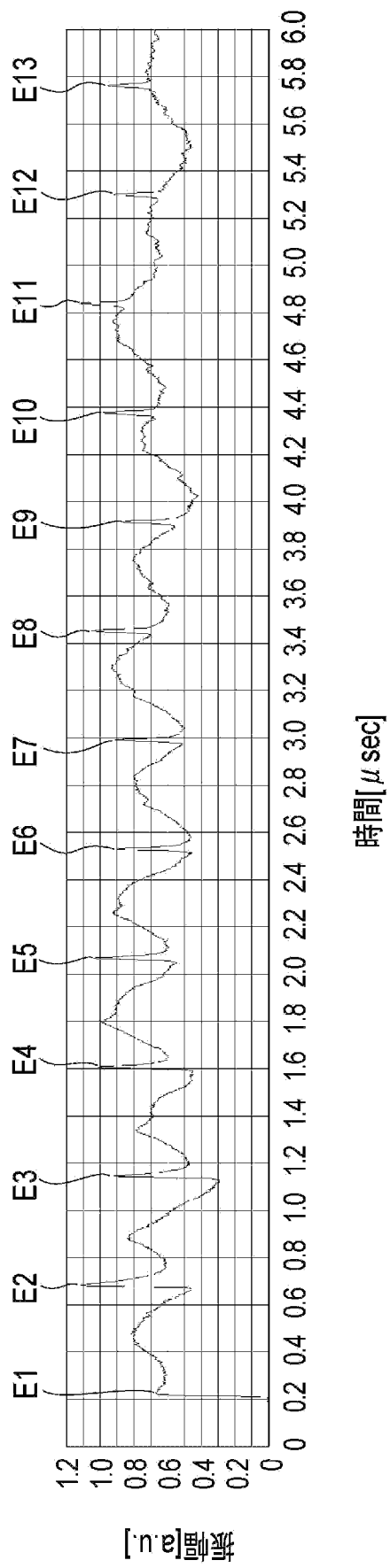
[図6]



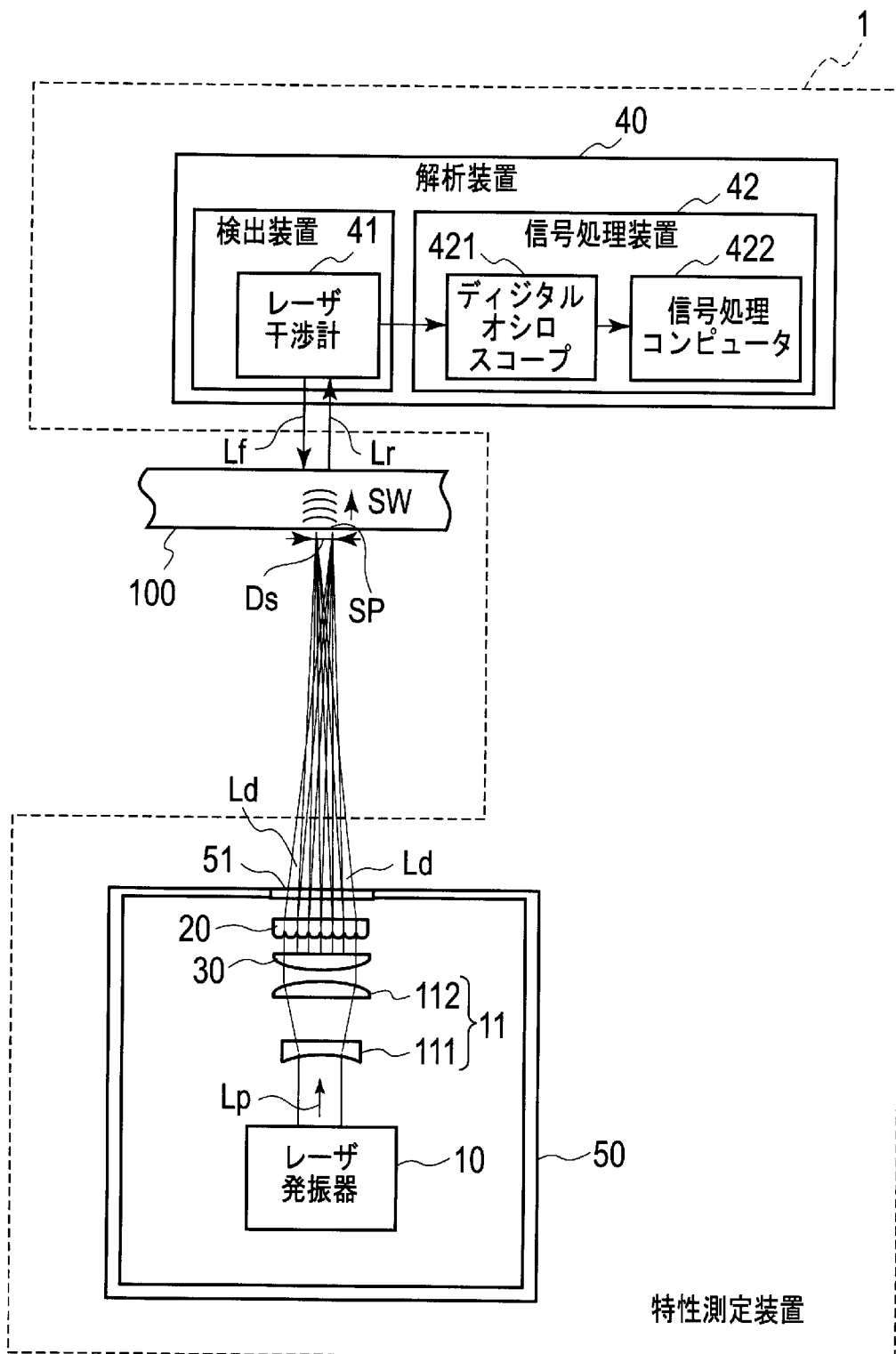
[図7]



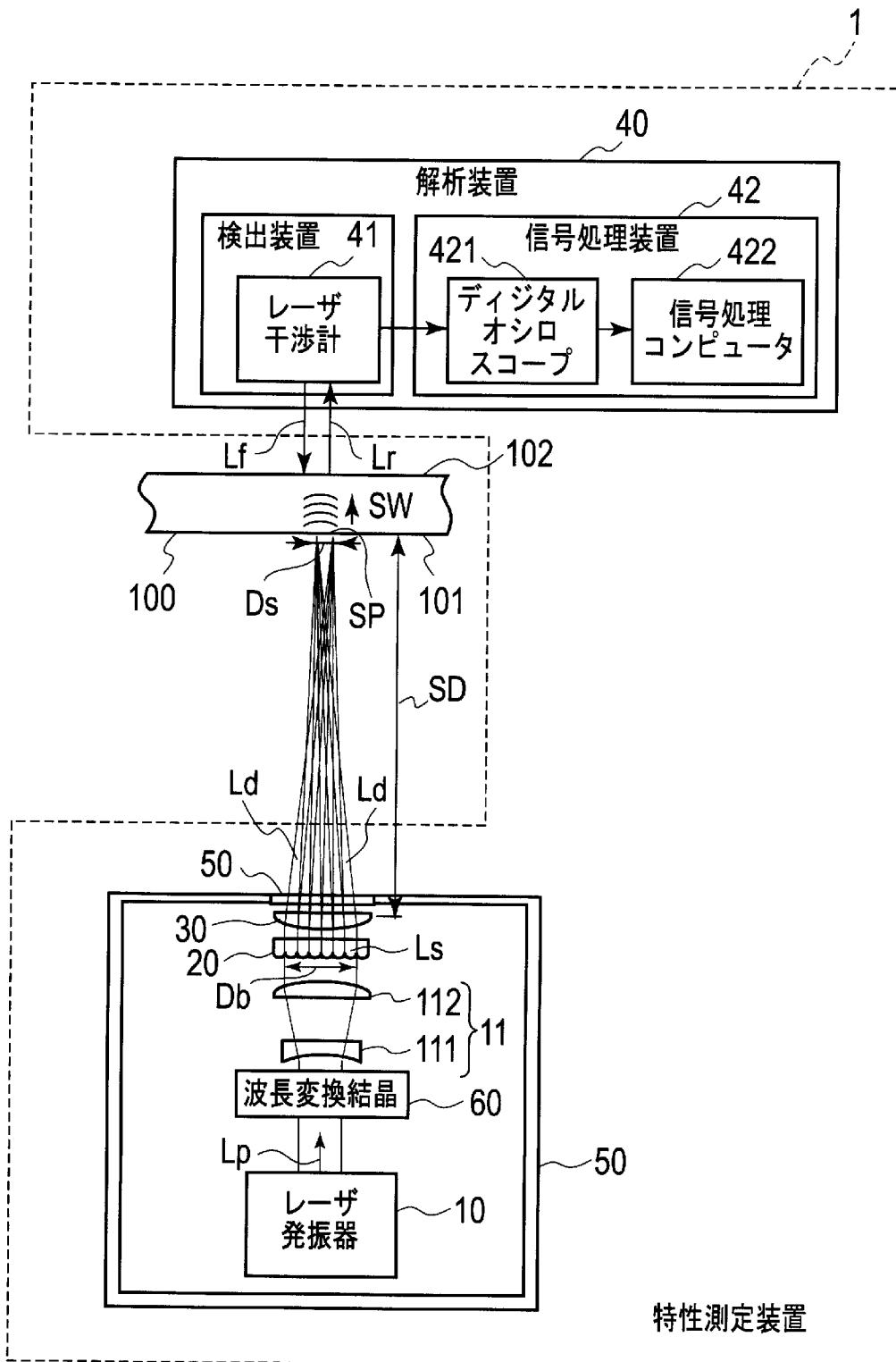
[図8]



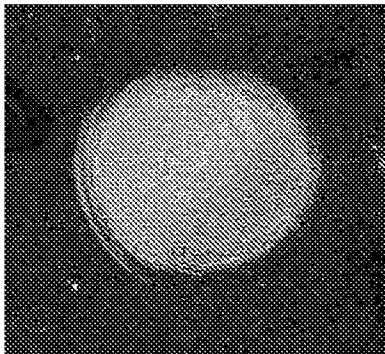
[図9]



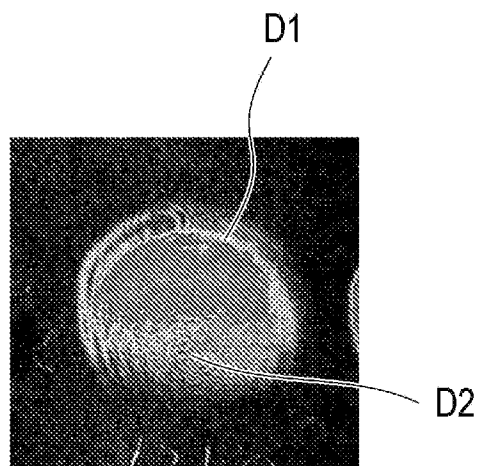
[図10]



[図11]



(a)



(b)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2011/054481

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N29/00 (2006.01) i

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

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01N29/00

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

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2011
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2011	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2011

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 2009-115830 A (Toshiba Corp.), 28 May 2009 (28.05.2009), paragraphs [0080], [0081]; fig. 9 (Family: none)	1-3
X	JP 2002-257793 A (Toshiba Corp.), 11 September 2002 (11.09.2002), paragraphs [0088], [0089]; fig. 9 (Family: none)	1-3
X	JP 2001-318081 A (Toshiba Corp.), 16 November 2001 (16.11.2001), fig. 14 (Family: none)	1-3

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

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
16 March, 2011 (16.03.11)

Date of mailing of the international search report
29 March, 2011 (29.03.11)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2011/054481

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 2008-116209 A (Toshiba Corp.), 22 May 2008 (22.05.2008), paragraphs [0062], [0063]; fig. 6 (Family: none)	1-3

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. G01N29/00(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. G01N29/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 1 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 1 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 1 年

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

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X	JP 2009-115830 A（株式会社東芝）2009.05.28, 【0080】【0081】【図9】（ファミリーなし）	1-3
X	JP 2002-257793 A（株式会社東芝）2002.09.11, 【0088】【0089】【図9】（ファミリーなし）	1-3
X	JP 2001-318081 A（株式会社東芝）2001.11.16, 【図14】（ファミリーなし）	1-3

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

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

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

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

「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

1 6 . 0 3 . 2 0 1 1

国際調査報告の発送日

2 9 . 0 3 . 2 0 1 1

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A / J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

森口 正治

2W

9403

電話番号 03-3581-1101 内線 3292

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X	JP 2008-116209 A (株式会社東芝) 2008.05.22, 【0062】【0063】【図6】 (ファミリーなし)	1-3