

(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2018-51626
(P2018-51626A)

(43) 公開日 平成30年4月5日(2018.4.5)

(51) Int.Cl. F I テーマコード (参考)
 B 2 3 K 26/352 (2014.01) B 2 3 K 26/352 4 E 1 6 8
 B 2 3 K 26/073 (2006.01) B 2 3 K 26/073

審査請求 未請求 請求項の数 27 O L (全 37 頁)

(21) 出願番号 特願2017-164136 (P2017-164136)
 (22) 出願日 平成29年8月29日 (2017.8.29)
 (31) 優先権主張番号 特願2016-187221 (P2016-187221)
 (32) 優先日 平成28年9月26日 (2016.9.26)
 (33) 優先権主張国 日本国(JP)

(71) 出願人 504132881
 国立大学法人東京農工大学
 東京都府中市晴見町3-8-1
 (74) 代理人 100079049
 弁理士 中島 淳
 (74) 代理人 100084995
 弁理士 加藤 和許
 (74) 代理人 100099025
 弁理士 福田 浩志
 (72) 発明者 宮地 悟代
 東京都府中市晴見町3-8-1 国立大学
 法人東京農工大学内
 (72) 発明者 宮崎 健創
 京都市宇治市平尾台2-12-8

最終頁に続く

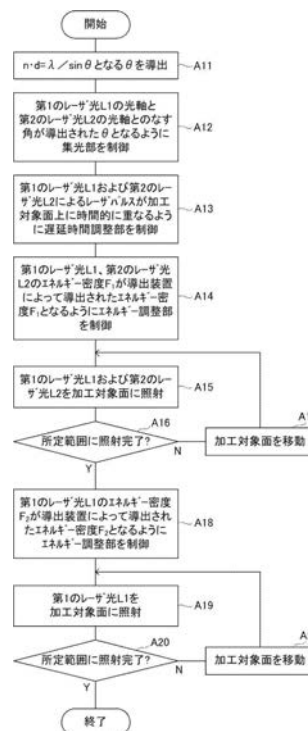
(54) 【発明の名称】 超短パルスレーザーを用いた微細加工方法、導出装置、加工装置および加工物

(57) 【要約】

【課題】加工対象物の加工対象面に直線性が高く且つ規則的に配列されたナノメートルオーダーの周期構造を形成するとともに周期構造の周期を制御する。

【解決手段】第1の工程において、加工対象面S1に形成しようとする周期構造120の周期dの、加工対象物100の材質に応じた倍数に相当する周期で配列された複数の直線状の溝を含む凹凸構造を加工対象面S1に有する加工対象物を用意する。第2の工程において凹凸構造110における複数の溝の伸びる方向に応じた偏光方向の偏光を有するレーザー光によるレーザーパルスを凹凸構造110が形成された加工対象面S1に照射して加工対象面S1に周期構造120を形成する。

【選択図】図9



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

加工対象物の加工対象面にレーザ光を照射して前記加工対象面に前記レーザ光の波長よりも短い周期を有する周期構造を形成する加工方法であって、

複数の直線状の溝を含む凹凸構造を前記加工対象面に有する前記加工対象物を用意する第 1 の工程と、

前記凹凸構造における複数の溝の伸びる方向に応じた偏光方向の偏光を有するレーザ光による超短パルスのレーザパルスを実記凹凸構造に照射して前記加工対象面に前記周期構造を形成する第 2 の工程と、

前記加工対象物と同じ材質の物体の表面に超短パルスのレーザパルスを実射した場合に、前記物体の表面に形成される微細構造の周期のうち、出現しやすい周期を導出する第 3 の工程と、を含み、

前記凹凸構造における前記複数の溝の配列周期を、前記第 3 の工程において導出した周期の整数倍とする

加工方法。

【請求項 2】

前記第 1 の工程において、互いに異なる方向から照射される同一波長の 2 つのレーザ光による干渉縞を前記加工対象面に形成することによって前記干渉縞の周期に応じた周期の前記凹凸構造を前記加工対象面に形成する

請求項 1 に記載の加工方法。

【請求項 3】

前記凹凸構造における前記複数の直線状の溝の配列周期が、前記周期構造の周期の、前記加工対象物の材質に応じた倍数に相当する周期となるように、前記 2 つのレーザ光の波長および前記 2 つのレーザ光の光軸のなす角の少なくとも一方を調整する

請求項 2 に記載の加工方法。

【請求項 4】

前記 2 つのレーザ光の波長を λ 、前記 2 つのレーザ光の光軸のなす角を θ としたとき、 $\lambda / \sin \theta$ が、前記周期構造の周期の、前記加工対象物の材質に応じた倍数に相当する値となるように、前記 2 つのレーザ光の波長および光軸のなす角の少なくとも一方を調整する

請求項 3 に記載の加工方法。

【請求項 5】

前記 2 つのレーザ光のうち的一方が、前記第 2 の工程において前記加工対象面に照射されるレーザ光と同じレーザ光であり且つ前記第 1 の工程および前記第 2 の工程において、前記加工対象面に対して垂直方向から照射される

請求項 2 から請求項 4 のいずれか 1 項に記載の加工方法。

【請求項 6】

前記加工対象面に照射された前記 2 つのレーザ光が前記加工対象面において散乱することにより生じる散乱光を撮像し、

撮像された前記散乱光に基づいて前記 2 つのレーザ光の行路の長さを一致させる

請求項 2 から請求項 5 のいずれか 1 項に記載の加工方法。

【請求項 7】

撮像された前記散乱光において観測される干渉縞の明瞭度が最大となるように前記 2 つのレーザ光の少なくとも一方の行路の長さを調整する

請求項 6 に記載の加工方法。

【請求項 8】

前記第 1 の工程において前記 2 つのレーザ光の前記加工対象面における照射位置を順次移動させることにより、前記加工対象面の所定範囲に前記凹凸構造を形成し、

前記第 2 の工程において前記レーザパルスの前記加工対象面における照射位置を順次移動させることにより、前記加工対象面の前記所定範囲に前記周期構造を形成する

10

20

30

40

50

請求項 2 から請求項 7 のいずれか 1 項に記載の加工方法。

【請求項 9】

前記第 1 の工程において、前記凹凸構造における前記複数の直線状の溝に対応する凹部の幅と、前記凹凸構造における前記凹部以外の凸部の幅とが互いに異なる前記加工対象物を用意する

請求項 1 から請求項 8 のいずれか 1 項に記載の加工方法。

【請求項 10】

前記第 2 の工程において前記加工対象面に照射される前記レーザーパルスの照射回数を調整することにより、前記凹部に対応する部分に形成される周期構造の周期と前記凸部に対応する部分に形成される前記周期構造の周期を調整する

請求項 9 に記載の加工方法。

【請求項 11】

前記第 2 の工程において前記加工対象面に照射される前記レーザーパルスのエネルギー密度を調整することにより、前記周期構造の周期を調整する

請求項 1 から請求項 10 のいずれか 1 項に記載の加工方法。

【請求項 12】

加工対象物の加工対象面にレーザー光を照射して前記加工対象面の 2 方向に前記レーザー光の波長よりも短い周期を有する周期構造を形成する加工方法であって、

前記周期構造の第 1 の方向における周期の、前記加工対象物の材質に応じた倍数に相当する周期で配列された複数の直線状の溝を含む第 1 の凹凸構造を前記加工対象面に有する前記加工対象物を用意する第 1 の工程と、

前記第 1 の凹凸構造における複数の直線状の溝の伸びる方向に応じた偏光方向の偏光を有するレーザー光による超短パルスの第 1 のレーザーパルスを前記第 1 の凹凸構造に照射して前記第 1 の方向に周期性を有する第 1 の周期構造を前記加工対象面に形成する第 2 の工程と、

前記第 2 の工程の後に、前記周期構造の前記第 1 の方向と交差する第 2 の方向における周期の、前記加工対象物の材質に応じた倍数に相当する周期で配列され且つ前記第 1 の凹凸構造における複数の直線状の溝の伸びる方向と交差する方向に伸びる複数の直線状の溝を含む第 2 の凹凸構造を前記加工対象面に形成する第 3 の工程と、

前記第 2 の凹凸構造における複数の直線状の溝の伸びる方向に応じた偏光方向の偏光を有するレーザー光による超短パルスの第 2 のレーザーパルスを前記第 2 の凹凸構造に照射して前記第 2 の方向に周期性を有する第 2 の周期構造を前記加工対象面に形成する第 4 の工程と、

を含む加工方法。

【請求項 13】

前記第 1 の工程において、互いに異なる方向から照射される同一波長の 2 つのレーザー光による第 1 の干渉縞を前記加工対象面に形成することによって前記第 1 の干渉縞の周期に応じた周期の前記第 1 の凹凸構造を前記加工対象面に形成し、

前記第 3 の工程において、互いに異なる方向から照射される同一波長の 2 つのレーザー光による第 2 の干渉縞を前記加工対象面に形成することによって前記第 2 の干渉縞の周期に応じた周期の前記第 2 の凹凸構造を前記加工対象面に形成する

請求項 12 に記載の加工方法。

【請求項 14】

前記第 1 の工程および前記第 2 の工程において前記加工対象面に垂直な軸を回転軸とした場合の前記加工対象面の回転角度位置を第 1 の位置に固定し、

前記第 3 の工程および前記第 4 の工程において前記加工対象面の回転角度位置を前記第 1 の位置とは異なる第 2 の位置に固定する

請求項 13 に記載の加工方法。

【請求項 15】

前記第 1 の工程および前記第 2 の工程において前記加工対象面に垂直な軸を回転軸とし

10

20

30

40

50

た場合の前記 2 つのレーザ光の光軸の回転角度位置を第 1 の位置に固定し、

前記第 3 の工程および前記第 4 の工程において前記第 2 つのレーザ光の光軸の回転角度位置を前記第 1 の位置とは異なる第 2 の位置に固定する

請求項 13 に記載の加工方法。

【請求項 16】

前記第 1 の工程において互いに異なる方向から照射される同一波長の 2 つのレーザ光の前記加工対象面における照射位置を順次移動させることにより、前記加工対象面の所定範囲に前記第 1 の凹凸構造を形成し、

前記第 2 の工程において前記第 1 のレーザパルスの前記加工対象面における照射位置を順次移動させることにより、前記加工対象面の前記所定範囲に前記第 1 の周期構造を形成し、

前記第 3 の工程において互いに異なる方向から照射される同一波長の 2 つのレーザ光の前記加工対象面における照射位置を順次移動させることにより、前記加工対象面の所定範囲に前記第 2 の凹凸構造を形成し、

前記第 4 の工程において前記第 2 のレーザパルスの前記加工対象面における照射位置を順次移動させることにより、前記加工対象面の前記所定範囲に前記第 2 の周期構造を形成する

請求項 13 から請求項 15 のいずれか 1 項に記載の加工方法。

【請求項 17】

加工対象物の加工対象面にレーザ光を照射して前記加工対象面に前記レーザ光の波長よりも短い周期を有する周期構造を形成する場合の前記周期構造の周期を示す情報の入力を受け付ける入力手段と、

前記入力手段に入力された情報によって示される前記周期構造の周期の前記加工対象物の材質に応じた倍数に相当する値を導出する導出手段と、

を有する導出装置。

【請求項 18】

加工対象物の加工対象面にレーザ光を照射して前記加工対象面に前記レーザ光の波長よりも短い周期を有する周期構造を形成する場合の前記周期構造の周期を示す情報の入力を受け付ける入力手段と、前記入力手段に入力された情報によって示される前記周期構造の周期の前記加工対象物の材質に応じた倍数に相当する値を導出する導出手段と、有する導出装置と、

超短パルスのレーザ光を出射するレーザ光源と、

前記レーザ光を第 1 のレーザ光および第 2 のレーザ光に分割し、前記第 1 のレーザ光を第 1 の方向から前記加工対象面に照射するとともに前記第 2 のレーザ光を前記第 1 の方向とは異なる第 2 の方向から前記加工対象面に照射するように構成された光学系と、

前記第 1 のレーザ光の光軸と前記第 2 のレーザ光の光軸とのなす角が、前記導出手段によって導出された値に応じた大きさとなるように前記光学系を制御する制御部と、

を含む加工装置。

【請求項 19】

前記第 1 のレーザ光および前記第 2 のレーザ光の波長を λ_1 、前記第 1 のレーザ光の光軸と前記第 2 のレーザ光の光軸とのなす角を θ としたとき、前記制御部は、 $\lambda_1 / \sin \theta$ が前記導出装置によって導出された値に一致するように、前記第 1 のレーザ光の光軸と前記第 2 のレーザ光の光軸とのなす角を制御する

請求項 18 に記載の加工装置。

【請求項 20】

前記光学系は、前記第 1 のレーザ光の行路の長さおよび前記第 2 のレーザ光の行路の長さの少なくとも一方が可変であり、

前記制御部は、前記第 1 のレーザ光の行路の長さおよび前記第 2 のレーザ光の行路の長さが一致するように前記光学系を制御する

請求項 18 または請求項 19 に記載の加工装置。

10

20

30

40

50

【請求項 2 1】

前記加工対象面に垂直な軸を回転軸として前記加工対象物を回転させる回転機構を更に含む

請求項 1 8 から請求項 2 0 のいずれか 1 項に記載の加工装置。

【請求項 2 2】

前記加工対象面に垂直な軸を回転軸として前記光学系を回転させる回転機構を更に含む
請求項 1 8 から請求項 2 0 のいずれか 1 項に記載の加工装置。

【請求項 2 3】

前記第 1 のレーザ光および前記第 2 のレーザ光の前記加工対象面における照射位置を移動させる移動機構を更に含む

請求項 1 8 から請求項 2 2 のいずれか 1 項に記載の加工装置。

【請求項 2 4】

前記第 1 のレーザ光のエネルギー密度を調整する第 1 のエネルギー調整部と、
前記第 2 のレーザ光のエネルギー密度を調整する第 2 のエネルギー調整部と、
を更に含む請求項 1 8 から請求項 2 3 のいずれか 1 項に記載の加工装置。

【請求項 2 5】

前記加工対象面において前記第 1 のレーザ光および前記第 2 のレーザ光が散乱されることにより生じた散乱光を撮像する撮像部を更に含み、

前記制御部は、前記撮像部で撮像された前記散乱光に基づいて前記第 1 のレーザ光の行路の長さと同記第 2 のレーザ光の行路の長さを一致させる

請求項 2 0 に記載の加工装置。

【請求項 2 6】

前記光学系は、前記第 1 のレーザ光が前記加工対象面に対して垂直方向から照射されるように構成されている

請求項 1 8 から請求項 2 5 のいずれか 1 項に記載の加工装置。

【請求項 2 7】

第 1 の方向および前記第 1 の方向と交差する第 2 の方向において周期性を有するナノメートルオーダーの周期構造が表面に形成された加工物。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0 0 0 1】**

本発明は、加工対象物の加工対象面に超短パルスレーザ光を照射して加工対象面にレーザ光の波長よりも短い周期を有する周期構造を形成するレーザ微細加工技術に関する。

【背景技術】**【0 0 0 2】**

固体表面にフェムト秒レーザパルスを複数回に亘り照射することにより、ナノ周期構造を形成する技術が知られている。

【0 0 0 3】

例えば、特許文献 1 には、直線偏光で所定波長のフェムト秒レーザを、固体材料表面に照射することにより、その偏光方向と直交する方向に沿って配列された細長い突起部を含む微細構造を形成することを特徴とする微細加工方法が記載されている。

【0 0 0 4】

また、例えば、非特許文献 1 には、加工対象物の加工対象面にレーザ照射によって規則的な凹凸を形成した後、その上から重ねてフェムト秒レーザパルスを照射することで、加工対象面にナノメートルオーダーの周期構造が形成されることが記載されている。

【先行技術文献】**【特許文献】****【0 0 0 5】**

【特許文献 1】特許第 4 2 6 3 8 6 5 号公報

【非特許文献】

10

20

30

40

50

【 0 0 0 6 】

【非特許文献 1】宮崎, 宮地, J. Appl. Phys., vol.114, pp.153108-1-6 (2013)

【非特許文献 2】宮崎, 宮地, Appl. Phys. Lett., vol.107, pp.071103-1-5 (2015)

【非特許文献 3】宮地, 宮崎, Opt. Express, vol.24, pp.4648-4653 (2016)

【非特許文献 4】宮崎, 宮地, Appl. Phys. Lett., vol.91, pp.123102-1-6 (2007)

【非特許文献 5】宮地, 宮崎, Opt. Express, vol.16, pp.16265-16271 (2008)

【非特許文献 6】宮地, 宮崎, 張, 吉藤, 藤田, Opt. Express, vol.20, pp.14848-14856 (2012)

【非特許文献 7】安丸, 宮崎, 木内, Appl. Phys. A, vol.76, pp.983-985 (2003)

【非特許文献 8】宮地, 宮崎, Appl. Phys. A, vol.98, pp.927-930 (2010)

10

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 0 7 】

上記の特許文献 1 に記載の方法によれば、加工対象物の表面に形成された細長い突起部は、直線性が低く、周期も一定ではない。このようなランダムな微細構造は工業的な用途が限定され、利用価値が高いとはいえない。また、上記の非特許文献 1 ~ 7 においては、レーザを用いて形成されるナノメートルオーダーの周期構造の周期を制御する方法については開示されていない。

【 0 0 0 8 】

本発明は、上記の点に鑑みてなされたものであり、加工対象物の加工対象面に直線性が高く且つ規則的に配列されたナノメートルオーダーの周期構造を形成するとともに周期構造の周期を制御することを目的とする。

20

【課題を解決するための手段】

【 0 0 0 9 】

本発明に係る加工方法は、加工対象物の加工対象面にレーザ光を照射して前記加工対象面に前記レーザ光の波長よりも短い周期を有する周期構造を形成する加工方法であって、複数の直線状の溝を含む凹凸構造を前記加工対象面に有する前記加工対象物を用意する第 1 の工程と、前記凹凸構造における複数の溝の伸びる方向に応じた偏光方向の偏光を有するレーザ光による超短パルスのレーザパルスで前記凹凸構造に照射して前記加工対象面に前記周期構造を形成する第 2 の工程と、前記加工対象物と同じ材質の物体の表面に超短パルスのレーザパルスで照射した場合に、前記物体の表面に形成される微細構造の周期のうち、出現しやすい周期を導出する第 3 の工程と、を含む。前記凹凸構造における前記複数の溝の配列周期を、前記第 3 の工程において導出した周期の整数倍とする。

30

【 0 0 1 0 】

本発明に係る他の加工方法は、加工対象物の加工対象面にレーザ光を照射して前記加工対象面の 2 方向に前記レーザ光の波長よりも短い周期を有する周期構造を形成する加工方法であって、前記周期構造の第 1 の方向における周期の、前記加工対象物の材質に応じた倍数に相当する周期で配列された複数の直線状の溝を含む第 1 の凹凸構造を前記加工対象面に有する前記加工対象物を用意する第 1 の工程と、前記第 1 の凹凸構造における複数の直線状の溝の伸びる方向に応じた偏光方向の偏光を有するレーザ光による超短パルスの第 1 のレーザパルスで前記第 1 の凹凸構造に照射して前記第 1 の方向に周期性を有する第 1 の周期構造を前記加工対象面に形成する第 2 の工程と、前記第 2 の工程の後に、前記周期構造の前記第 1 の方向と交差する第 2 の方向における周期の、前記加工対象物の材質に応じた倍数に相当する周期で配列され且つ前記第 1 の凹凸構造における複数の直線状の溝の伸びる方向と交差する方向に伸びる複数の直線状の溝を含む第 2 の凹凸構造を前記加工対象面に形成する第 3 の工程と、前記第 2 の凹凸構造における複数の直線状の溝の伸びる方向に応じた偏光方向の偏光を有するレーザ光による超短パルスの第 2 のレーザパルスで前記第 2 の凹凸構造に照射して前記第 2 の方向に周期性を有する第 2 の周期構造を前記加工対象面に形成する第 4 の工程と、を含む。

40

【 0 0 1 1 】

50

本発明に係る導出装置は、加工対象物の加工対象面にレーザ光を照射して前記加工対象面に前記レーザ光の波長よりも短い周期を有する周期構造を形成する場合の前記周期構造の周期を示す情報の入力を受け付ける入力手段と、前記入力手段に入力された情報によって示される前記周期構造の周期の前記加工対象物の材質に応じた倍数に相当する値を導出する導出手段と、を有する。

【0012】

本発明に係る加工装置は、加工対象物の加工対象面にレーザ光を照射して前記加工対象面に前記レーザ光の波長よりも短い周期を有する周期構造を形成する場合の前記周期構造の周期を示す情報の入力を受け付ける入力手段と、前記入力手段に入力された情報によって示される前記周期構造の周期の前記加工対象物の材質に応じた倍数に相当する値を導出する導出手段と、を有する導出装置と、超短パルスのレーザ光を出射するレーザ光源と、前記レーザ光を第1のレーザ光および第2のレーザ光に分割し、前記第1のレーザ光を第1の方向から前記加工対象面に照射するとともに前記第2のレーザ光を前記第1の方向とは異なる第2の方向から前記加工対象面に照射するように構成された光学系と、前記第1のレーザ光の光軸と前記第2のレーザ光の光軸とのなす角が、前記導出手段によって導出された値に応じた大きさとなるように前記光学系を制御する制御部と、を含む。

10

【0013】

本発明に係る加工物は、第1の方向および前記第1の方向と交差する第2の方向において周期性を有するナノメートルオーダーの周期構造が表面に形成された加工物である。

【0014】

ここで、超短パルスのレーザパルスとは数百ピコ秒以下のパルス幅を有するレーザパルスを意味する。

20

【発明の効果】

【0015】

本発明によれば、加工対象物の加工対象面に直線性が高く且つ規則的に配列されたナノメートルオーダーの周期構造を形成するとともに周期構造の周期を制御することが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【0016】

【図1A】本発明の実施形態に係る加工対象面に凹凸構造を形成する方法の一例を示す図である

30

【図1B】本発明の実施形態に係る加工対象面に形成される凹凸構造の一例を示す図である。

【図2A】本発明の実施形態に係る加工方法を示す図である。

【図2B】本発明の実施形態に係る加工対象面に形成された周期構造の一例を示す図である。

【図3】図2Bにおける3-3線に沿った断面図である

【図4】本発明の実施形態に係る加工装置の構成の一例を示す図である。

【図5】本発明の実施形態に係る遅延時間調整部の構成の一例を示す図である。

【図6】本発明の実施形態に係るエネルギー調整部の構成の一例を示す図である。

40

【図7】本発明の実施形態に係る集光部の構成の一例を示す図である。

【図8】本発明の実施形態に係る導出装置において実施される処理の一例を示すフローチャートである。

【図9】本発明の実施形態に係る制御部において実施される処理の一例を示すフローチャートである。

【図10A】窒化ガリウム基板の表面に形成された凹凸構造の電子顕微鏡画像である。

【図10B】窒化ガリウム基板の表面に形成された周期構造の電子顕微鏡画像である。

【図11】本発明の実施形態に係る凹凸構造が形成された加工対象物の断面の電子顕微鏡画像である。

【図12A】窒化ガリウム基板の表面に形成された凹凸構造の一例を示す図である。

50

- 【図 1 2 B】窒化ガリウム基板の表面に形成された周期構造の一例を示す図である。
- 【図 1 2 C】窒化ガリウム基板の表面に形成された周期構造の一例を示す図である。
- 【図 1 3 A】窒化ガリウム基板の表面に形成された凹凸構造の一例を示す図である。
- 【図 1 3 B】窒化ガリウム基板の表面に形成された周期構造の一例を示す図である。
- 【図 1 4 A】本発明の実施形態に係る加工方法の一例を示す図である。
- 【図 1 4 B】本発明の実施形態に係る加工方法の一例を示す図である。
- 【図 1 4 C】本発明の実施形態に係る加工方法の一例を示す図である。
- 【図 1 4 D】本発明の実施形態に係る加工方法の一例を示す図である。
- 【図 1 5】本発明の実施形態に係る加工装置の構成の一例を示す図である。
- 【図 1 6】本発明の実施形態に係る導出装置において実施される処理の一例を示すフローチャートである。 10
- 【図 1 7 A】本発明の実施形態に係る制御部において実施される処理の一例を示すフローチャートである。
- 【図 1 7 B】本発明の実施形態に係る制御部において実施される処理の一例を示すフローチャートである。
- 【図 1 8 A】窒化ガリウム基板の表面に形成された第 1 の凹凸構造の電子顕微鏡画像である。
- 【図 1 8 B】窒化ガリウム基板の表面に形成された第 1 の周期構造の電子顕微鏡画像である。
- 【図 1 8 C】窒化ガリウム基板の表面に第 1 の周期構造に重ねて形成された第 2 の凹凸構造の電子顕微鏡画像である。 20
- 【図 1 8 D】窒化ガリウム基板の表面に第 1 の周期構造に重ねて形成された第 2 の周期構造の電子顕微鏡画像である。
- 【図 1 9 A】窒化ガリウム基板の表面に形成された周期構造における X 方向における空間周波数分布を示すグラフである。
- 【図 1 9 B】窒化ガリウム基板の表面に形成された周期構造における Y 方向における空間周波数分布を示すグラフである。
- 【図 2 0 A】加工対象面に円偏光を有するレーザ光によるレーザパルスを照射することによって加工対象面に形成された比較例に係る構造物の電子顕微鏡画像である。
- 【図 2 0 B】図 2 0 A に示す構造物の動径方向における空間周波数分布を示すグラフである。 30
- 【図 2 1】本発明の実施形態に係る加工装置の構成の一例を示す図である。
- 【図 2 2 A】物体の平坦な表面に対して超短パルスのレーザパルス照射した場合に、物体の表面に形成される微細構造の一例を示す図である。
- 【図 2 2 B】微細構造の周波数解析結果の一例を示す図である。
- 【図 2 2 C】第 3 の工程において形成される微細構造の周期と、第 2 の工程において形成される周期構造の周期との関係の一例を示す図である。
- 【発明を実施するための形態】
- 【0017】
- 以下、本発明の実施形態の一例を、図面を参照しつつ説明する。なお、各図面において同一または等価な構成要素および部分には同一の参照符号を付与している。 40
- 本発明の実施形態に係る加工方法は、加工対象物の加工対象面にレーザ光を照射して加工対象面にレーザ光の波長よりも短いナノメートルオーダーの周期を有する周期構造を形成するものである。
- 【0018】
- 本発明の各実施形態に係る加工方法を用いて加工される加工対象物の材質は、特に限定されるものではなく、例えば、CrN、TiN、サファイアおよびSiO₂等の誘電体、Si、InP、GaAs、GaNおよびSiC等の半導体、Au、Ag、Al、CuおよびSUS等の導電体を加工対象物とすることができる。
- 【0019】 50

[第1の実施形態]

本発明の第1の実施形態に係る加工方法は、加工対象物の加工対象面に形成しようとする周期構造の周期 d の、加工対象物の材質に応じた倍数に相当する周期 $n \cdot d$ で配列された複数の直線状の溝を含む凹凸構造を加工対象面に形成する第1の工程を含む。すなわち、第1の工程において加工対象面に形成される凹凸構造の周期 $n \cdot d$ と、加工対象面に形成しようとする周期構造の周期 d との間に下記の(1)式が成立する。

$$n \cdot d = d \cdot \dots (1)$$

(1)式において n は正の整数である。整数 n は、加工対象物の材質に応じて定められる。加工対象物が例えば GaN である場合、整数 n は4または5のいずれかであり、従って第1の工程において GaN の表面に周期 $4d$ または $5d$ の凹凸構造を形成する。また、加工対象物が例えば SiC である場合、整数 n は3または4のいずれかであり、従って第1の工程において SiC の表面に周期 $3d$ または $4d$ の凹凸構造を形成する。

10

20

【0020】

図1Aは、加工対象面に周期 d で配列された複数の直線状の溝を含む凹凸構造を形成する方法の一例を示す図である。図1Aに示すように、互いに異なる方向から照射される第1のレーザ光 L_1 および第2のレーザ光 L_2 によるレーザパルスを、加工対象物100の加工対象面 S_1 上に時間的、空間的に重ねることで加工対象面 S_1 に干渉縞を形成する。加工対象面 S_1 は、XY平面内に存在しているものとする。第1のレーザ光 L_1 および第2のレーザ光 L_2 は、同一の波長を有し且つお互いの偏光方向は直交してない。第1のレーザ光 L_1 および第2のレーザ光 L_2 は、1つのレーザ光をビームスプリッタを用いて分割した2つのレーザ光であってもよい。加工対象面 S_1 に2つのレーザによる干渉縞を形成することで、干渉縞の明部と暗部に対応した凹凸構造が加工対象面 S_1 に形成される。

【0021】

図1Bは、2つのレーザ光を用いて加工対象面 S_1 に干渉縞を形成することによって加工対象面 S_1 に形成される凹凸構造110の一例を示す図である。第1のレーザ光 L_1 および第2のレーザ光 L_2 が、偏光方向がX方向である偏光を有することで、Y方向に沿って直線状に伸びる複数の溝111が、X方向に周期的に配列された凹凸構造110が形成される。なお、本実施形態において、溝111に相当する凹部の幅と、溝111以外の部分に相当する凸部の幅の比率は一例として1:1である。

【0022】

凹凸構造110の周期 $n \cdot d$ (すなわち複数の溝111の配列周期)は、第1のレーザ光 L_1 および第2のレーザ光 L_2 の波長 λ によって制御することが可能である。また、凹凸構造110の周期 $n \cdot d$ は、第1のレーザ光 L_1 の光軸と第2のレーザ光 L_2 の光軸とのなす角 θ によって制御することが可能である。ここで、 λ 、 θ および n の間に下記の(2)式が成立する。

$$n \cdot d = \lambda / \sin \theta \cdot \dots (2)$$

従って、第1の工程では、 $n \cdot d$ を満たすように、(2)式に基づいて λ および θ の少なくとも一方を調整する。すなわち、 $\lambda / \sin \theta$ が、加工対象面 S_1 に形成しようとするナノメートルオーダーの周期構造の周期 d の倍数 $n \cdot d$ に相当する値となるように、 λ および θ の少なくとも一方を調整する。

30

40

【0023】

本実施形態に係る加工方法では、第1の工程において、第1のレーザ光 L_1 および第2のレーザ光 L_2 の加工対象面 S_1 における照射位置を順次移動させることにより、加工対象面 S_1 の所定範囲に凹凸構造110を形成する。なお2つのレーザ光の照射位置の移動は、加工対象物100をXY方向に移動させることにより行ってもよいし、第1のレーザ光 L_1 および第2のレーザ光 L_2 をXY方向に走査することにより行ってもよい。また、エネルギーロスを抑制する観点から第1のレーザ光 L_1 および第2のレーザ光 L_2 のうちの一方が、加工対象面 S_1 に対して垂直方向から照射されることが好ましい。図1Aに示す例では、第1のレーザ光 L_1 が加工対象面 S_1 に対して垂直方向から照射されている様子が示されている。

50

【0024】

加工対象面 S 1 に干渉縞を形成するためには、第 1 のレーザ光 L 1 によるレーザパルスと、第 2 のレーザ光 L 2 によるレーザパルスとが同一時間帯に加工対象面 S 1 に照射されることが必要である。従って、例えば、各レーザ光のパルス幅が 100 フェムト秒程度である場合、第 1 のレーザ光 L 1 の行路の長さ、第 2 のレーザ光 L 2 の行路の長さとの差が 30 μm 以下であることを要する。第 1 のレーザ光 L 1 の行路の長さ、第 2 のレーザ光 L 2 の行路の長さを一致させる方法として、以下の方法が挙げられる。例えば、第 1 のレーザ光 L 1 および第 2 のレーザ光 L 2 を加工対象面 S 1 において散乱させ、その散乱光を CCD (Charge Coupled Device) カメラ等の撮像装置で撮像する。そして、撮像された散乱光において観測される干渉縞の明瞭度が最大となるように第 1 のレーザ光 L 1 および第 2 のレーザ光 L 2 の少なくとも一方の行路の長さを調整する。第 1 のレーザ光 L 1 の行路の長さ、第 2 のレーザ光 L 2 の行路の長さが一致したとき干渉縞の明瞭度が最大となる。なお、第 1 のレーザ光 L 1 および第 2 のレーザ光 L 2 を加工対象面 S 1 において散乱させる方法として、加工対象面 S 1 のレーザ照射位置に、穴または突起等の微細な構造物を形成し、この微細な構造物に第 1 のレーザ光 L 1 および第 2 のレーザ光 L 2 を照射する方法が挙げられる。微細な構造物は、例えば、加工対象面 S 1 に第 1 のレーザ光 L 1 または第 2 のレーザ光 L 2 を照射することにより形成してもよい。

10

【0025】

第 1 の工程において、加工対象物の加工対象面に周期 λ の凹凸構造を形成する他の方法として、公知のフォトリソグラフィ技術およびエッチング技術を用いてもよい。周期 λ は、マイクロメートルオーダーであることが想定されるので、公知の微細加工技術を用いて加工対象物に周期 λ の凹凸構造を形成することは比較的容易である。

20

【0026】

本発明の実施形態に係る加工方法は、第 1 の工程において加工対象面に形成された凹凸構造における複数の溝の伸びる方向に応じた偏光方向（例えば溝の伸びる方向に直交する偏光方向）の偏光を有するレーザ光による超短パルスのレーザパルスを凹凸構造に照射してレーザ光の波長よりも短い周期の周期構造を加工対象面に形成する第 2 の工程を含む。

【0027】

図 2 A は、第 2 の工程において加工対象面 S 1 にレーザ光 L によるレーザパルスを照射している様子を示す図である。第 2 の工程において加工対象面 S 1 に照射されるレーザ光 L のエネルギー密度は、加工対象物 100 の材質に応じて適宜定められるが、例えば、10 mJ/cm^2 以上 1000 mJ/cm^2 以下であることが好ましい。また、第 2 の工程において加工対象面 S 1 に照射されるレーザ光 L のパルス幅は、加工対象物 100 の材質に応じて適宜定められるが、例えば、10 フェムト秒以上 100 フェムト秒以下であることが好ましい。また、第 2 の工程において加工対象面 S 1 に照射されるレーザ光 L のパルス数は、加工対象物 100 の材質に応じて適宜定められるが、例えば、1 以上 1000 以下であることが好ましい。なお、第 2 の工程において使用されるレーザ光 L は、第 1 の工程において、凹凸構造 110 を形成するために用いた第 1 のレーザ光 L 1 または第 2 のレーザ光 L 2 と同じであってもよい。この場合、加工対象物 100 の材質によっては非特許文献 8 に記載されているように、レーザ光の入射角度によって非対称な形状を有する微細周期構造が形成される場合があるため、対称な形状を有する微細周期構造を形成する場合には、レーザ光 L は、加工対象面 S 1 に対して垂直方向から照射されることが好ましい。このように、第 1 の工程において加工対象面 S 1 に形成された周期 λ ($= n \cdot d$) の凹凸構造 110 に重ねて超短パルスのレーザ光 L を照射することで、凹凸構造 110 が微細化され、レーザ光 L の波長よりも短いナノメートルオーダーの周期 d を有する周期構造が加工対象面 S 1 に形成される。

30

40

【0028】

図 2 B は、第 1 の工程において形成された凹凸構造 110 に重ねて偏光方向が X 方向である超短パルスのレーザパルスを照射することにより、加工対象面 S 1 に形成された周期構造 120 の一例を示す図、図 3 は、図 2 B における 3 - 3 線に沿った断面図である。第

50

1の工程において形成された凹凸構造110に重ねて、凹凸構造110における溝の伸びるY方向に対して直交するX方向に偏光面を有する超短パルスレーザを照射することで、Y方向に沿って直線状に伸びる複数の溝121が、X方向に周期的に配列された周期構造120が形成される。周期構造120の周期dは、第1の工程において形成された凹凸構造110の周期の1/n倍(nは正の整数)である($d = \text{周期} / n$)。すなわち、加工対象面S1に予め形成した凹凸構造110に重ねて超短パルスレーザを照射することで、凹凸構造110の周期の1/nに相当する周期dの周期構造120が加工対象面S1に形成される。また、図2Bに示すように、周期構造120における複数の溝121の周期は均一であり且つ各溝121は直線性に優れている。また、図3に示すように、溝121の幅Wと深さDとの比(D/W)であるアスペクト比は6程度であり、高アスペクト比を実現できる。

10

【0029】

なお、第1の工程において形成された凹凸構造110に重ねて超短パルスレーザを照射することにより均一且つ直線性に優れる周期構造120が形成されるのは、超短パルスレーザによって励起されるプラズモンの空間分布が、先に形成された凹凸構造110により規制されるためであると考えられる。従って、凹凸構造110の周期を制御することによって、周期構造120の周期dを制御できるものと考えられる。

【0030】

上記のように、(1)式における整数nは、加工対象物100の材質に応じて定められる。加工対象物100が例えばGaNである場合、第1の工程において加工対象面S1に形成される凹凸構造110の周期の1/4または1/5に相当する周期dの周期構造120が第2の工程において加工対象面S1に形成される。周期構造120の周期dが凹凸構造110の周期の1/4になるか1/5になるかは、第2の工程において加工対象面S1に照射されるレーザ光Lのエネルギー密度に依存する。具体的には、エネルギー密度が所定の閾値よりも高い場合に1/4となり、所定の閾値よりも低い場合に1/5となる傾向がある。従って、第1の工程において形成される凹凸構造110の周期を制御するとともに、第2の工程において加工対象面S1に照射されるレーザ光Lのエネルギー密度を制御することによって、所望の周期dを有する周期構造120を加工対象面S1に形成することができる。

20

【0031】

本実施形態に係る加工方法では、第2の工程において、レーザ光Lの加工対象面S1における照射位置を順次移動させることにより、加工対象面S1の所定範囲に周期構造120を形成する。なお2つのレーザ光の照射位置の移動は、加工対象物100をXY方向に移動させることによって行ってもよいし、第1のレーザ光L1および第2のレーザ光L2をXY方向に走査することにより行ってもよい。

30

【0032】

本実施形態に係る加工方法によれば、第1の工程において、最終的に加工対象面S1に形成しようとするナノメートルオーダーの周期構造120の周期dの、加工対象物100の材質に応じた倍数n・dに相当する周期で配列された複数の直線状の溝を含む凹凸構造110を加工対象面S1に形成するので、第2の工程において所望の周期d($= \text{周期} / n$)の周期構造120を得ることができる。例えば、加工対象物がGaNである場合、第1の工程において形成する凹凸構造110の周期を4dまたは5dとしておくことで、第2の工程において所望の周期dの周期構造120を得ることができる。凹凸構造110を2つのレーザ光による干渉縞によって形成する場合には、 $\lambda / \sin \theta$ が、4dまたは5dに相当する値となるように、 λ および θ の少なくとも一方を調整すればよい。

40

【0033】

第1の工程において形成される凹凸構造110の周期は、例えば、以下のようにして定めることができる。すなわち、本実施形態に係る加工方法は、加工対象物100と同じ材質の物体の表面に、超短パルスのレーザパルス照射した場合に当該物体の表面に形成される微細構造の周期のうち、出現しやすい周期を導出する第3の工程を含む。そして、

50

凹凸構造 110 における複数の溝の配列周期 を、第 3 の工程において導出した周期の整数倍とする。

【0034】

第 3 の工程における微細構造は、凹凸構造が形成されていない平坦な表面に対してレーザパルスを照射することにより形成される。また、第 3 の工程における微細構造を形成する際に照射されるレーザパルスの照射条件（パルス幅、エネルギー密度及び照射回数）は、第 2 の工程において周期構造 120 を形成する際に照射されるレーザパルスの照射条件に一致していることが好ましい。物体の平坦な表面に超短パルスのレーザパルスを照射することで、第 2 の工程において形成される周期構造 120（図 2B 参照）とは異なり、図 22A に示すように、物体表面には周期が不均一なナノメートルオーダーの微細構造が形成される。このようにして形成された微細構造を観察し、空間周波数分析を行うことで、微細構造において出現しやすい周期を導出することができる。図 22B は、凹凸構造が形成されていない平坦な表面に対して超短パルスのレーザパルスを照射することにより形成された微細構造の空間周波数分析を行った結果の一例である。図 22B に示される、微細構造の空間周波数分析を行うことによって得られるスペクトルは、当該加工対象物 100 における、周期毎の構造のできやすさを示している。図 22C は、第 3 の工程において形成される微細構造の周期と、第 2 の工程において形成される周期構造 120 の周期との関係の一例を示す図である。図 22C には、第 2 の工程において形成される周期構造 120 の周期 d （ $= \lambda / n$ ）を定める整数 n のうち、最も形成されやすい $n = 5$ とする周期 d （ $d = \lambda / 5$ ）の周期構造 120 が形成されることが例示されている。このように、第 3 の工程において、加工対象物 100 と同じ材質の物体の表面に超短パルスのレーザパルスを照射した場合に当該物体の表面に形成される微細構造を観察することで、第 2 の工程において形成される周期構造 120 の周期を予測することができる。従って、第 1 の工程において形成される凹凸構造 110 における複数の溝の配列周期 を、第 3 の工程において導出した周期の n 倍（ n は正の整数）とすることで、第 2 の工程において、周期 d が λ / n の周期構造 120 を形成することができる。なお、第 2 の工程においてより均一で直線性のよい周期構造 120 を得るためには、整数 n は、小さい方が好ましい。

10

20

【0035】

図 4 は、上記した加工方法を実現する本発明の実施形態に係る加工装置 1 の構成の一例を示す図である。

30

【0036】

レーザ光源 10 は、一例として、中心波長が 800 nm 程度、パルス幅が数百ピコ秒以下の超短パルスレーザを出力するチタンサファイアレーザシステムであり、レーザ発振器、パルス伸長器、レーザ増幅器およびパルス圧縮器を含んで構成されている。

【0037】

加工装置 1 は、レーザ光源 10 から出射されたレーザ光 L0 を第 1 のレーザ光 L1 および第 2 のレーザ光 L2 に分割し、第 1 のレーザ光 L1 を垂直方向から加工対象物 100 の加工対象面 S1 に照射するとともに第 2 のレーザ光 L2 を、加工対象面 S1 における第 1 のレーザ光 L1 の照射位置に向けて斜め方向から照射するように構成された光学系を備えている。光学系は、ビームスプリッタ 11、遅延時間調整部 20、エネルギー調整部 31、32 および集光部 41、42 を含んで構成されている。

40

【0038】

ビームスプリッタ 11 は、レーザ光源 10 から出射されたレーザ光 L0 を第 1 のレーザ光 L1 および第 2 のレーザ光 L2 に分割し、それぞれ互いに異なる方向に出射する。

【0039】

遅延時間調整部 20 は、第 2 のレーザ光 L2 の行路内に配置されている。遅延時間調整部 20 は、第 2 のレーザ光 L2 が加工対象面 S1 に到達するまでの行路の長さを変化させることにより、第 2 のレーザ光 L2 が加工対象面 S1 に到達するタイミングを変化させる機能を有する。

【0040】

50

図5は、遅延時間調整部20の構成の一例を示す図である。遅延時間調整部20は、反射ミラー201、202および203と、反射ミラー202および203が載置された移動ステージ204と、を含んで構成されている。遅延時間調整部20に入射した第2のレーザー光L2は、反射ミラー201、202および203の反射面で順次反射され、反射ミラー203で反射された第2のレーザー光L2が次段のエネルギー調整部32に入射するように構成されている。移動ステージ204が、P方向に移動することで、第2のレーザー光L2の行路の長さが変化する。移動ステージ204の移動は、後述する制御部60によって制御される。第2のレーザー光L2の行路の長さは、制御部60によって第1のレーザー光L1の行路の長さとは一致するように制御される。

【0041】

エネルギー調整部31は、第1のレーザー光L1のエネルギー密度を調整する機能を有する。同様に、エネルギー調整部32は、第2のレーザー光L2のエネルギー密度を調整する機能を有する。図6は、エネルギー調整部31および32の構成の一例を示す図である。エネルギー調整部31および32は、互いに同じ構成を有し、それぞれ、半波長板301と、偏光子302と、入射するレーザー光の光軸を回転軸として半波長板301を回転駆動する駆動機構(図示せず)を含んで構成されている。半波長板301は、その回転角度位置が変化することにより、入射した第1のレーザー光L1または第2のレーザー光L2の偏光方向を変化させる。半波長板301の回転角度位置は、制御部60によって制御される。偏光子302は、半波長板301から出射された偏光のうち、特定方向の成分のみを透過させる。従って、半波長板301の回転角度位置に応じて、半波長板301から出射される偏光のX方向成分の強度が変化する。すなわち、エネルギー調整部31、32において、半波長板301の回転角度位置を制御することで、第1のレーザー光L1および第2のレーザー光L2のエネルギー密度を調整することができる。

【0042】

集光部41は、エネルギー調整部31によってエネルギー密度が調整された第1のレーザー光L1を加工対象面S1に集光するためのレンズ(図示せず)を含んで構成されている。集光部41は、第1のレーザー光L1を加工対象面S1に対して垂直方向から照射する。

【0043】

一方、集光部42は、エネルギー調整部32によってエネルギー密度が調整された第2のレーザー光L2を、加工対象面S1に対して斜め方向から照射する。図7は、集光部42の構成の一例を示す図である。集光部42は、反射ミラー401、403、反射ミラー403が載置された移動ステージ404、集光レンズ406およびシャッター407を含んで構成されている。集光部42に入射した第2のレーザー光L2は、反射ミラー401および403の反射面で順次反射され、集光レンズ406を介して加工対象面S1に照射される。反射ミラー401は、回転軸402を中心として回転することで、その反射面の向きを変化させることが可能である。また、集光レンズ406は、加工対象面S1に第1のレーザー光L1が入射する点と一致した回転軸408を中心として回転することで、集光レンズ406の位置を第2のレーザー光L2の行路に整合させることが可能である。移動ステージ404が、Q方向に移動するとともに反射ミラー401の反射面の向きおよび集光レンズ406の位置が変化することで、第2のレーザー光L2の加工対象面S1に対する照射角度が変化する。シャッター407は開状態となることで第2のレーザー光L2が加工対象面S1に照射され、閉状態となることで第2のレーザー光L2が遮断される。反射ミラー401の反射面の向き、移動ステージ404および集光レンズ406の移動およびシャッター407の開閉は、制御部60によって制御される。

【0044】

加工装置1は、加工対象物100を支持する支持軸81を備えた支持部80を有している。支持軸81は、XY面内に延在する加工対象面S1をXY方向において移動させることが可能である。加工対象面S1がXY方向に移動することで、第1のレーザー光L1および第2のレーザー光L2の加工対象面S1における照射位置を移動させることが可能である。支持軸81による加工対象面S1の移動は、制御部60によって制御される。

10

20

30

40

50

【0045】

加工装置1は、第2のレーザ光L2によるレーザパルスの照射タイミングを第1のレーザ光L1によるレーザパルスの照射タイミングに一致させるための手段として、照明用光源50、顕微装置51および撮像・解析装置52を備えている。

【0046】

照明用光源50は、加工対象面S1における第1のレーザ光L1および第2のレーザ光L2の照射位置を照明する照明光を出射する光源である。照明用光源50から出射される照明光の波長は特に限定されず、照明用光源50として、例えば、ハロゲンランプ、LEDおよび半導体レーザ等を用いることが可能である。

【0047】

顕微装置51は、加工対象面S1を顕微観察するための複数のレンズを含んで構成されている。顕微装置51による観察領域のサイズは、加工対象面S1における第1のレーザ光L1のスポットサイズと同程度(数百 μm 程度)である。加工対象面S1において散乱された第1のレーザ光L1および第2のレーザ光L2の散乱光による像は、照明用光源50によって照明されるとともに顕微装置51によって拡大され、撮像・解析装置52に導入される。

【0048】

撮像・解析装置52は、第1のレーザ光L1および第2のレーザ光L2の散乱光による像を撮像するCCDカメラ等の撮像装置と、撮像装置によって撮像された画像を解析する画像解析装置と、を含んで構成されている。画像解析装置は、例えば、画像解析プログラムがインストールされたコンピュータによって構成され得る。撮像・解析装置52は、加工対象面S1に形成される第1のレーザ光L1および第2のレーザ光L2による干渉縞を撮像し、干渉縞の明瞭度を示す情報を生成する。撮像・解析装置52によって生成された干渉縞の明瞭度を示す情報は、制御部60に供給される。制御部60は、撮像・解析装置52から供給された情報によって示される干渉縞の明瞭度が最大となるように、遅延時間調整部20によって第2のレーザ光L2の行路の長さを調整することで、第2のレーザ光L2によるレーザパルスの照射タイミングを第1のレーザ光L1によるレーザパルスの照射タイミングに一致させる。

【0049】

加工装置1は、導出装置70を備えている。導出装置70は、加工対象面S1に形成すべき周期構造120(図2B参照)の周期 d および加工対象物100の材質を示す情報の入力を受け付ける入力手段と、受け付けた入力情報に基づいて加工条件を導出する導出手段と、を含んで構成されている。導出手段は、加工条件の1つとして、入力情報によって示される周期 d の、加工対象物100の材質に応じた倍数 $n \cdot d$ に相当する値を導出する。なお、 n は正の整数である。また、導出手段は、入力情報に基づいて、第1の工程において加工対象面S1に照射される第1のレーザ光L1および第2のレーザL2のエネルギー密度 F_1 、第2の工程において加工対象面S1に照射される第1のレーザ光L1のエネルギー密度 F_2 およびパルス数 N_2 を導出する。

【0050】

導出装置70は、例えば、加工対象物100の材質および加工対象面S1に形成すべき周期構造120の周期 d と、倍率 n 、エネルギー密度 F_1 、 F_2 およびパルス数 N_2 とを対応付けたテーブルを有し、このテーブルを参照することで、入力情報によって示される加工対象物100の材質および加工対象面S1に形成すべき周期構造120の周期 d に対応する倍率 n 、エネルギー密度 F_1 、 F_2 およびパルス数 N_2 を抽出する。上記のテーブルは、例えば、実験結果に基づいて作成することが可能である。導出装置70は、抽出した倍率 n と入力情報によって示される周期 d との積を、倍数 $n \cdot d$ として出力する。また、導出装置70は、抽出したエネルギー密度 F_1 、 F_2 およびパルス数 N_2 を出力する。導出装置70によって導出された倍数 $n \cdot d$ 、エネルギー密度 F_1 、 F_2 およびパルス数 N_2 は、制御部60に供給される。導出装置70によって導出された倍数 $n \cdot d$ は、制御部60において周期構造120の形成に先立って加工対象面S1に形成される凹凸構造1

10

20

30

40

50

10 (図1A参照)の周期として扱われる。

【0051】

導出装置70は、例えば、倍数 $n \cdot d$ 、エネルギー密度 F_1 、 F_2 およびパルス数 N_2 を導出するための処理を記述した導出プログラムがインストールされたコンピュータによって構成され、導出プログラムを実行するプロセッサと、加工対象物100の材質および加工対象面S1に形成すべき周期構造120の周期 d と、倍率 n 、エネルギー密度 F_1 、 F_2 およびパルス数 N_2 とを対応付けたテーブルを記憶したメモリと、入力情報を受け付ける入力手段としてのキーボード、タッチパネルまたはその他の入力装置と、を含んで構成されている。

【0052】

制御部60は、導出装置70から供給される倍数 $n \cdot d$ (=)および撮像・解析装置52から供給される干渉縞の明瞭度を示す情報に基づいて、遅延時間調整部20、エネルギー調整部31、32、集光部42を制御する。制御部60は、例えば、制御プログラムがインストールされたコンピュータによって構成され、制御プログラムを実行するプロセッサやメモリ等を含んで構成されている。なお、制御部60と導出装置70とは同一のコンピュータで構成されていてもよい。

【0053】

以下に、加工装置1の動作について説明する。はじめに、導出装置70の動作について説明する。図8は、導出装置70において実施される処理の一例を示すフローチャートである。

【0054】

ステップA1において導出装置70は、加工対象面S1に形成すべき周期構造120の周期 d および加工対象物100の材質を示す情報の入力を受け付ける。

【0055】

ステップA2において導出装置70は、上記のテーブルを参照することで、入力情報によって示される加工対象物100の材質および加工対象面S1に形成すべき周期構造120の周期 d に対応する、倍率 n 、エネルギー密度 F_1 、 F_2 およびパルス数 N_2 を抽出する。

【0056】

ステップA3において導出装置70は、抽出した倍率 n と入力された周期 d との積を、倍数 $n \cdot d$ として出力する。

【0057】

ステップS4において導出装置70は、抽出したエネルギー密度 F_1 、 F_2 およびパルス数 N_2 を加工条件として出力する。

【0058】

次に、制御部60の動作について説明する。図9は、制御部60において実施される処理の一例を示すフローチャートである。

【0059】

制御部60は、導出装置70によって導出された倍数 $n \cdot d$ を、凹凸構造110の周期として扱う。

【0060】

ステップA11において制御部60は、導出装置70によって導出された倍数 $n \cdot d$ と、 $\lambda / \sin \theta$ とが等しくなる λ を導出する。 λ は第1のレーザ光L1および第2のレーザ光L2の波長であり、 θ は第1のレーザ光L1の光軸と第2のレーザ光L2の光軸とのなす角である。ここでは、第1のレーザ光L1および第2のレーザ光L2の波長 λ は、既知の固定値であるものとする。

【0061】

ステップA12において制御部60は、第1のレーザ光L1の光軸と第2のレーザ光L2の光軸とのなす角が、ステップA11において導出された λ となるように集光部42における反射ミラー401の反射面の向きおよび移動ステージ404および集光レンズ40

10

20

30

40

50

6 (図7参照)の移動を制御する。

【0062】

ステップA13において制御部60は、第1のレーザ光L1によるレーザパルスの照射タイミングと第2のレーザ光L2によるレーザパルスの照射タイミングとが一致するように、遅延時間調整部20における移動ステージ204(図5参照)の位置決めを行う。すなわち、制御部60は、第1のレーザ光L1の行路の長さと、第2のレーザ光L2の行路の長さを一致させる。制御部60は、撮像・解析装置52によって生成される情報に基づいて遅延時間調整部20を制御する。以下に、第1のレーザ光L1によるレーザパルスの照射タイミングと第2のレーザ光L2によるレーザパルスの照射タイミングとを一致させるための処理の詳細について説明する。

10

【0063】

はじめに、第1のレーザ光L1のみを加工対象面S1に照射して、加工対象面S1に微細な穴を形成する。微細な穴の形成位置は、周期構造120を形成する領域の外側であることが好ましい。第2のレーザ光L2は、集光部42におけるシャッター407が閉状態となることで遮断される。

【0064】

次に、第1のレーザ光L1および第2のレーザ光L2のエネルギー密度を、加工対象面S1においてアブレーションが生じない程度の大きさに調整した後、第1のレーザ光L1によるレーザパルスおよび第2のレーザ光L2によるレーザパルスを加工対象面S1に照射する。第1のレーザ光L1および第2のレーザ光L2は、加工対象面S1に形成された微細な穴によって散乱され、その散乱光は顕微装置51を経由して撮像・解析装置52に導入される。

20

【0065】

次に、第1のレーザ光L1および第2のレーザ光L2の散乱光の強度が等しくなるように、エネルギー調整部31、32を制御する。

【0066】

次に、第1のレーザ光L1によるレーザパルスおよび第2のレーザ光L2によるレーザパルスを加工対象面S1に照射しながら、遅延時間調整部20における移動ステージ204の位置を徐々に変化させることで第2のレーザ光L2の行路の長さを徐々に変化させる。第1のレーザ光L1によるレーザパルスおよび第2のレーザ光L2によるレーザパルスが加工対象面S1において時間的に重なると、撮像・解析装置52において撮像される散乱光の像において干渉縞が現れる。撮像・解析装置52は、撮像された干渉縞の明瞭度を示す情報を生成し、これを制御部60に供給する。なお、干渉縞は一定の空間周波数を有していることから、撮像・解析装置52は撮像した画像に対してフーリエ変換等の画像処理を施し、特定の空間周波数成分の強度を干渉縞の明瞭度を示す情報として導出してもよい。

30

【0067】

制御部60は、撮像・解析装置52から供給された情報によって示される干渉縞の明瞭度が最大となる位置において移動ステージ204を停止させる。以上の処理によって、第1のレーザ光L1および第2のレーザ光L2によるレーザパルスが加工対象面S1上に時間的に重なることが保証される。

40

【0068】

ステップA14において制御部60は、第1のレーザ光L1および第2のレーザ光L2のエネルギー密度 F_1 が、導出装置70によって導出されたエネルギー密度 F_1 となるようにエネルギー調整部31、32を制御する。

【0069】

ステップA15において制御部60は、レーザ光源10を駆動する。これにより、レーザ光源10からレーザ光L0によるレーザパルスが出力される。本ステップにおいてレーザ光源10から出力されるレーザパルスのパルス数 N_1 は1である。レーザ光L0によるレーザパルスは、ビームスプリッタ11によって第1のレーザ光L1および第2のレーザ

50

光 L 2 に分割される。第 1 のレーザ光 L 1 は、エネルギー調整部 3 1 および集光部 4 1 を経由して加工対象面 S 1 に対して垂直方向から照射される。一方、第 2 のレーザ光 L 2 は、遅延時間調整部 2 0、エネルギー調整部 3 2 および集光部 4 2 を経由して加工対象面 S 1 に対して斜め方向から照射される。第 2 のレーザ光 L 2 は、第 1 のレーザ光 L 1 の光軸と第 2 のレーザ光 L 2 の光軸とのなす角が、ステップ A 1 1 において導出された となり、加工対象面 S 1 における第 1 のレーザ光 L 1 の照射位置と同じ位置に照射される。また、第 1 のレーザ光 L 1 によるレーザパルスと第 2 のレーザ光 L 2 によるレーザパルスが加工対象面 S 1 上にほぼ同じタイミングで照射される。

【 0 0 7 0 】

互いに異なる方向から照射される第 1 のレーザ光 L 1 によるレーザパルスおよび第 2 のレーザ光 L 2 によるレーザパルスが、加工対象物 1 0 0 の加工対象面 S 1 上に時間的、空間的に重なることで、加工対象面 S 1 に干渉縞が形成される。加工対象面 S 1 に 2 つのレーザによる干渉縞を形成することで、干渉縞の明部と暗部に対応した凹凸構造 1 1 0 が加工対象面 S 1 に形成される。第 1 のレーザ光 L 1 および第 2 のレーザ光 L 2 の光軸が存在する面と垂直な Y 方向に沿って直線状に伸びる複数の溝 1 1 1 が、X 方向に周期的に配列された凹凸構造 1 1 0 が形成される（図 1 B 参照）。第 1 のレーザ光 L 1 の光軸と第 2 のレーザ光 L 2 の光軸とのなす角が、ステップ A 1 1 において導出された とされることで、凹凸構造 1 1 0 の周期 は、導出装置 7 0 によって導出された倍数 $n \cdot d$ に一致する。

【 0 0 7 1 】

ステップ A 1 6 において制御部 6 0 は、第 1 のレーザ光 L 1 および第 2 のレーザ光 L 2 によるレーザパルスの加工対象面 S 1 における所定範囲に亘る照射が完了したか否かを判定し、完了していないと判定した場合には処理をステップ A 1 6 に移行し、完了したと判定した場合には処理をステップ A 1 7 に移行する。

【 0 0 7 2 】

ステップ A 1 7 において制御部 6 0 は、X Y 方向に支持部 8 0 の支持軸 8 1 を移動させることで、加工対象面 S 1 を X Y 方向に移動させ、第 1 のレーザ光 L 1 および第 2 のレーザ光 L 2 によるレーザパルスの照射位置を移動させ、処理をステップ A 1 5 に戻す。これにより、加工対象面 S 1 の新たな位置に凹凸構造 1 1 0 が形成される。

【 0 0 7 3 】

ステップ A 1 8 において制御部 6 0 は、加工対象物 1 0 0 を初期位置に戻し、集光部 4 2 におけるシャッター 4 0 7 を閉状態とし、第 1 のレーザ光 L 1 のエネルギー密度 F_2 が導出装置 7 0 によって導出されたエネルギー密度 F_2 となるようにエネルギー調整部 3 1 を制御する。

【 0 0 7 4 】

ステップ A 1 9 において、制御部 6 0 は、レーザ光源 1 0 を駆動してレーザ光源 1 0 からレーザパルスを出射させる。本ステップにおいてレーザ光源 1 0 から出力されるレーザパルスのパルス数 N_2 は、導出装置 7 0 によって導出されたパルス数 N_2 に設定される。レーザ光 L 0 によるレーザパルスは、ビームスプリッタ 1 1 によって第 1 のレーザ光 L 1 および第 2 のレーザ光 L 2 に分割される。第 1 のレーザ光 L 1 は、エネルギー調整部 3 1 および集光部 4 1 を経由して加工対象面 S 1 に対して垂直方向から照射される。一方、第 2 のレーザ光 L 2 は、シャッター 4 0 7 によって遮断され、加工対象面 S 1 に照射されない。

【 0 0 7 5 】

加工対象面 S 1 に形成された周期 $(= n \cdot d)$ の凹凸構造 1 1 0 に重ねて第 1 のレーザ光 L 1 によるレーザパルスを照射することで、凹凸構造 1 1 0 が微細化され、第 1 のレーザ光 L 1 の波長よりも短いナノメートルオーダーの周期 d を有する周期構造 1 2 0 が加工対象面 S 1 に形成される。すなわち、加工対象面 S 1 に形成された凹凸構造 1 1 0 の周期 に応じて定まる周期 d $(= / n)$ の周期構造 1 2 0 が加工対象面 S 1 に形成される。

【 0 0 7 6 】

10

20

30

40

50

ステップ A 2 0 において制御部 6 0 は、第 1 のレーザ光 L 1 によるレーザパルスの加工対象面 S 1 における所定範囲に亘る照射が完了したか否かを判定し、完了していないと判定した場合には処理をステップ A 2 1 に移行し、完了したと判定した場合には処理を終了させる。

【 0 0 7 7 】

ステップ A 2 1 において制御部 6 0 は、X Y 方向に支持部 8 0 の支持軸 8 1 を移動させることで、加工対象面 S 1 を X Y 方向に移動させ、処理をステップ A 1 7 に戻す。これにより、加工対象面 S 1 の新たな位置に周期構造 1 2 0 が形成される。

【 0 0 7 8 】

なお、上記の実施形態では、第 1 の工程においてレーザ加工またはフォトリソグラフィ技術およびエッチング技術を用いて加工対象面 S 1 に凹凸構造 1 1 0 を形成する場合を例示したが、本発明は、この態様に限定されない。すなわち、第 1 の工程は、加工対象物に形成しようとする周期構造の周期の、加工対象物の材質に応じた倍数に相当する周期で配列された複数の直線状の溝を含む凹凸構造を加工対象面に有する加工対象物を用意できればよい。例えば、表面に凹凸構造が形成された加工対象物を購入するなどして取得してもよい。

10

【 0 0 7 9 】

[実施例 1]

以下、実施例により本発明の第 1 の実施形態を詳細に説明するが、本発明は、以下の実施例に限定されない。加工対象物として窒化ガリウム (Ga N) 基板を用いた。レーザ光源として、中心波長 8 0 0 n m 、パルス幅 1 0 0 フェムト秒の直線偏光を出射するチタンサファイアレーザシステムを用いた。

20

【 0 0 8 0 】

第 1 のレーザ光 L 1 および第 2 のレーザ光 L 2 のエネルギー密度 F_1 をそれぞれ、 400 m J / c m^2 に設定した。窒化ガリウム基板の表面に周期 d が 250 n m の周期構造を形成するべく (1) 式および (2) 式から 2 つのレーザ光の光軸のなす角 θ を 53° に設定した。なお、(1) 式における整数 n の値は 4 である。

【 0 0 8 1 】

第 1 のレーザ光 L 1 によるレーザパルスと第 2 のレーザ光 L 2 によるレーザパルスとが時間的、空間的に重なるように各レーザ光を窒化ガリウム基板の表面に照射した。照射したレーザパルスのパルス数 N_1 を 1 とした。これにより、窒化ガリウム基板の表面に干渉縞が形成され、窒化ガリウム基板の干渉縞の明部に対応する部分においてアブレーションが生じ、周期的に配列された複数の溝を含む凹凸構造が形成された。図 1 0 A は、窒化ガリウム基板の表面に形成された凹凸構造の電子顕微鏡画像である。凹凸構造の周期 d は、 $1 \mu \text{ m}$ 程度であった。

30

【 0 0 8 2 】

続いて、第 1 のレーザ光 L 1 のエネルギー密度 F_2 を 440 m J / c m^2 に設定した。その後、第 1 のレーザ光 L 1 によるレーザパルスを窒化ガリウム基板の表面に形成された凹凸構造に重ねて照射した。第 1 のレーザ光 L 1 の偏光方向は、窒化ガリウム基板の表面に形成された凹凸構造における溝の伸びる方向と直交する方向とし、照射したレーザパルスのパルス数 N_2 を 40 回とした。これにより、窒化ガリウム基板の表面に形成された凹凸構造が微細化され、第 1 のレーザ光 L 1 の波長よりも短いナノメートルオーダーの周期を有する周期構造が加工対象面 S 1 に形成された。図 1 0 B は、窒化ガリウム基板の表面に形成された周期構造の電子顕微鏡画像である。周期構造の周期 d は、先に形成された凹凸構造の周期 d_1 の $1/4$ 倍に相当する周期 250 n m であった。

40

【 0 0 8 3 】

以上のように、本発明の第 1 の実施形態に係る加工方法および加工装置 1 によれば、加工対象物の加工対象面に直線性が高く且つ規則的に配列されたナノメートルオーダーの周期構造を形成するとともに周期構造の周期を制御することが可能である。

【 0 0 8 4 】

50

本発明の第1の実施形態に係る加工方法は、例えば、液晶ディスプレイの位相差板の製造に用いられる円筒金型の作製に好適に用いることができる。本発明の第1の実施形態に係る加工方法によれば、高アスペクト比であり、直線性が良好であり且つ周期が均一な周期構造を加工対象面に形成することができるので、位相差板製造用の円筒金型の作製に適用することで、位相差板の高性能化に寄与することができる。

【0085】

また、本発明の第1の実施形態に係る加工方法は、液晶ディスプレイのワイヤーグリッド偏光子の製造に用いられる金型の作製やナノインプリント用の金型の作製にも好適に用いることができる。

【0086】

[第2の実施形態]

図11は、加工対象面S1に周期の凹凸構造110が形成された加工対象物100の断面図である。本発明の第2の実施形態に係る加工方法は、凹凸構造110における溝に相当する凹部の幅a、溝以外の部分に相当する凸部の幅b、凹凸構造110に重ねて照射される第1のレーザ光L1のエネルギー密度 F_2 および照射回数(パルス数 N_2)によって、凹凸構造110における凹部に対応する部分に形成される周期構造の周期 d_a と、凹凸構造110における凸部に対応する部分に形成される周期構造の周期 d_b とを異ならせる、というものである。それ以外の事項は、上記した第1の実施形態に係る加工方法と同じであり、重複する説明は省略する。

【0087】

図12Aは、窒化ガリウム基板の表面に形成された凹凸構造110の一例を示す図である。図12Aに示す凹凸構造110において、凹部の幅aは534nmであり、凸部の幅bは406nmである。すなわち、凹凸構造110の周期($= a + b$)は940nmである。

【0088】

図12Bは、図12Aに示す凹凸構造110に重ねてエネルギー密度 F_2 が400mJ/cm²に調整された第1のレーザ光L1によるレーザパルスを20回照射した場合に(パルス数 $N_2 = 20$)、窒化ガリウム基板の表面に形成された周期構造120の一例を示す図である。上記の条件で、第1のレーザ光L1によるレーザパルスを照射することで、凹凸構造110の凹部(溝)に対応する部分に周期 d_a が178nmの周期構造が形成され、凹凸構造110の凸部に対応する部分に周期 d_b が203nmの周期構造が形成された。すなわち、 $d_a = a / 3$ 、 $d_b = b / 2$ である。

【0089】

図12Cは、図12Aに示す凹凸構造110に重ねてエネルギー密度 F_2 が400mJ/cm²に調整された第1のレーザ光L1によるレーザパルスを40回照射した場合に(パルス数 $N_2 = 40$)、窒化ガリウム基板の表面に形成された周期構造120の一例を示す図である。上記の条件で、第1のレーザ光L1によるレーザパルスを照射することで、窒化ガリウム基板の表面に均一な周期の周期構造が形成された。周期構造の周期dは190nmであった。すなわち $d =$ / 5である。

【0090】

図13Aは、窒化ガリウム基板の表面に形成された凹凸構造110の一例を示す図である。図13Aに示す凹凸構造110において、凹部の幅aは462nmであり、凸部の幅bは478nmである。すなわち、凹凸構造110の周期($= a + b$)は940nmである。

【0091】

図13Bは、図13Aに示す凹凸構造110に重ねてエネルギー密度 F_2 が400mJ/cm²に調整された第1のレーザ光L1によるレーザパルスを30回照射した場合に(パルス数 $N_2 = 30$)、窒化ガリウム基板の表面に形成された周期構造120の一例を示す図である。上記の条件で、第1のレーザ光L1によるレーザパルスを照射することで、凹凸構造110の凹部(溝)に対応する部分に周期 d_a が231nmの周期構造が形成さ

10

20

30

40

50

れ、凹凸構造 110 の凸部に対応する部分に周期 d_b が 159 nm の周期構造が形成された。すなわち、 $d_a = a / 2$ 、 $d_b = b / 3$ である。

【0092】

このように、凹凸構造 110 における凹部の幅 a 、凸部の幅 b 、凹凸構造 110 に重ねて照射される第 1 のレーザ光 L_1 のエネルギー密度 F_2 および照射回数 (パルス数 N_2) によって、凹凸構造 110 における凹部に対応する部分に形成される周期構造の周期 d_a と、凹凸構造 110 における凸部に対応する部分に形成される周期構造の周期 d_b とを異ならせることが可能である。なお、凹部の幅 a および凸部の幅 b が異なる凹凸構造 110 は、レーザ加工技術や、フォトリソグラフィ技術およびエッチング技術等の公知の微細加工技術を用いて形成することができる。また、凹部の幅 a および凸部の幅 b が異なる凹凸構造 110 が形成された加工対象物を購入するなどして取得してもよい。

10

【0093】

[第 3 の実施形態]

上記した第 1 の実施形態に係る加工方法は、加工対象面の 1 方向にのみ周期性を有する周期構造 (例えば、Y 方向に伸びる複数の溝が X 方向に周期的に配列された周期構造) を形成するものであった。これに対して、第 3 の実施形態に係る加工方法は、加工対象面の 2 方向に周期性を有する、網目状、ドット状またはマトリクス状の周期構造を形成するものである。

【0094】

図 14 A、14 B、14 C および 14 D は、本発明の第 3 の実施形態に係る加工方法の一例を示す図である。

20

【0095】

本発明の第 3 の実施形態に係る加工方法は、加工対象物 100 に形成しようとする周期構造の第 1 の方向 (例えば X 方向) における周期 d_1 の、加工対象物 100 の材質に応じた倍数に相当する周期 $n \cdot d_1$ (= $n \cdot d_1$) で配列された複数の直線状の溝を含む第 1 の凹凸構造を加工対象面 S_1 に形成する第 1 の工程を含む (図 14 A)。この第 1 の工程は、上記した本発明の第 1 の実施形態に係る加工方法における第 1 の工程と同じである。

【0096】

第 1 の工程において、加工対象面 S_1 に第 1 の凹凸構造を形成する方法としては、第 1 の実施形態に係る加工方法と同様、第 1 のレーザ光 L_1 によるレーザパルスおよび第 2 のレーザ光 L_2 によるレーザパルスを、加工対象面 S_1 上に時間的、空間的に重ねることで、加工対象面 S_1 に干渉縞を形成する方法を用いることができる。第 1 の工程において、第 1 のレーザ光 L_1 および第 2 のレーザ光 L_2 の加工対象面 S_1 における照射位置を順次移動させることにより、加工対象面 S_1 の所定範囲に第 1 の凹凸構造を形成する。なお、第 1 の工程において、加工対象物の加工対象面 S_1 に第 1 の凹凸構造を形成する他の方法として、公知のフォトリソグラフィ技術およびエッチング技術を用いてもよい。また、第 1 の工程は、上記第 1 の凹凸構造を加工対象面 S_1 に形成する場合に限らず、上記の第 1 の凹凸構造を加工対象面 S_1 に有する加工対象物 100 を用意する工程であれば足りる。例えば、表面に上記の第 1 の凹凸構造が形成された加工対象物を購入するなどして取得してもよい。

30

40

【0097】

本発明の第 3 の実施形態に係る加工方法は、第 1 の凹凸構造における複数の溝の伸びる方向に応じた偏光方向 (例えば、第 1 の凹凸構造における溝の伸びる方向と直交する偏光方向) の偏光を有する第 1 のレーザ光 L_1 による超短パルスのレーザパルスを第 1 の凹凸構造に照射して第 1 のレーザ光 L_1 の波長よりも短い周期 d_1 の第 1 の周期構造を加工対象面 S_1 に形成する第 2 の工程を含む (図 14 B)。この第 2 の工程は、上記した本発明の第 1 の実施形態に係る加工方法における第 2 の工程と同じである。

【0098】

第 1 の凹凸構造に重ねて超短パルスレーザを照射することで、第 1 の凹凸構造が微細化され、レーザ光の波長よりも短いナノメートルオーダーの周期 d_1 で配列された複数の溝

50

を含む第1の周期構造が加工対象面S1に形成される。第2の工程において、第1のレーザー光L1の加工対象面S1における照射位置を順次移動させることにより、加工対象面S1の所定範囲に第1の周期構造を形成する。

【0099】

本発明の第3の実施形態に係る加工方法は、第2の工程の後に、加工対象物100に形成しようとする周期構造の上記第1の方向と交差する第2の方向（例えばY方向）における周期 d_2 の、加工対象物100の材質に応じた倍数に相当する周期 d_2 （ $=n \cdot d_2$ ）で配列され且つ第1の凹凸構造における複数の直線状の溝の伸びる方向（例えばY方向）と交差する方向（例えばX方向）に伸びる複数の直線状の溝を含む第2の凹凸構造を加工対象面S1に形成する第3の工程を含む（図14C）。

10

【0100】

加工対象面S1に第2の凹凸構造を形成する方法としては、第1の工程と同様、第1のレーザー光L1によるレーザーパルスおよび第2のレーザー光L2によるレーザーパルスを、加工対象面S1上に時間的、空間的に重ねることで加工対象面S1に干渉縞を形成する方法を用いることができる。第2の凹凸構造における複数の溝の伸びる方向を、第1の凹凸構造における複数の溝の伸びる方向に対して交差する方向とする方法の一例として、以下の方法が挙げられる。すなわち、図14Cに示すように、加工対象面S1に垂直な軸を回転軸とした場合の加工対象面S1の回転角度位置を、第1の工程および第2の工程における回転角度位置とは異なる位置に固定して第1のレーザー光L1および第2のレーザー光L2を加工対象面S1に照射する。すなわち、第3の工程では、加工対象面S1を所定角度（例えば90°）回転させた後、第1の工程における処理と同様の処理を行う。ここで、第1のレーザー光L1および第2のレーザー光L2のエネルギー密度を、先の工程において形成された第1の周期構造が消失しないレベルに調整して第2の凹凸構造を形成する。第3の工程において、第1のレーザー光L1および第2のレーザー光L2の加工対象面S1における照射位置を順次移動させることにより、加工対象面S1の所定範囲に第2の凹凸構造を形成する。なお、第3の工程において、加工対象物の加工対象面S1に第2の凹凸構造を形成する他の方法として、公知のフォトリソグラフィ技術およびエッチング技術を用いてもよい。

20

【0101】

本発明の第3の実施形態に係る加工方法は、加工対象面S1の回転角度位置を第3の工程における回転角度位置を維持したまま、第2の凹凸構造における複数の溝の伸びる方向に応じた偏光方向（例えば、第2の凹凸構造における溝の伸びる方向と直交する偏光方向）の偏光を有する第1のレーザー光L1による超短パルスのレーザーパルスを第2の凹凸構造に照射して第1のレーザー光L1の波長よりも短い周期 d_2 の第2の周期構造を加工対象面S1に形成する第4の工程を含む（図14D）。

30

【0102】

第2の凹凸構造に重ねて超短パルスレーザーを照射することで、第2の凹凸構造が微細化され、レーザー光の波長よりも短いナノメートルオーダーの周期 d_2 で配列された複数の溝を含む第2の周期構造が加工対象面S1に形成される。第4の工程において、第1のレーザー光L1の加工対象面S1における照射位置を順次移動させることにより、加工対象面S1の所定範囲に第2の周期構造を形成する。

40

【0103】

第2の周期構造における溝の伸びる方向は、第1の周期構造における溝の伸びる方向と交差する方向となる。例えば、第3の工程において、加工対象面S1を90°回転させた場合、第1の周期構造における溝の伸びる方向と第2の周期構造における溝の伸びる方向が直交し、加工対象面S1に互いに直交する2方向に周期性を有する網目状、ドット状またはマトリクス状の周期構造が形成される。

【0104】

図15は、上記した本発明の第3の実施形態に係る加工方法を実現する加工装置1Aの構成の一例を示す図である。加工装置1Aは、回転装置82を備えている点において、図

50

4に示す加工装置1と異なり、それ以外の構成は加工装置1と同様である。回転装置82は、制御部60による制御に基づいて、加工対象物100の加工対象面S1を、加工対象面S1と垂直な支持軸81を回転軸として回転させる機能を有する。

【0105】

以下に、加工装置1Aの動作について説明する。以下の説明では、加工対象物の加工対象面におけるX方向およびY方向の2方向に周期性を有する周期構造を形成する場合について例示する。はじめに、導出装置70の動作について説明する。図16は、導出装置70において実施される処理の一例を示すフローチャートである。

【0106】

ステップA21において導出装置70は、加工対象面S1に形成すべき周期構造のX方向における周期 d_1 、Y方向における周期 d_2 および加工対象物100の材質を示す情報の入力を受け付ける。

10

【0107】

ステップA22において導出装置70は、自身が備えるテーブルを参照することで、入力情報によって示される加工対象物100の材質および加工対象面S1に形成すべき周期構造120の周期 d_1 および d_2 に対応する倍率 n 、エネルギー密度 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 およびパルス数 N_2 、 N_4 を抽出する。上記のテーブルにおいて、加工対象物100の材質、加工対象面S1に形成すべき周期構造の周期 d_1 、 d_2 と、倍率 n 、エネルギー密度 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 およびパルス数 N_2 、 N_4 と、が対応付けられている。なお、エネルギー密度 F_1 は、第1の工程において加工対象面S1に照射される第1のレーザ光L1および第2のレーザL2のエネルギー密度である。エネルギー密度 F_2 は、第2の工程において加工対象面S1に照射される第1のレーザ光L1のエネルギー密度である。パルス数 N_2 は、第2の工程において加工対象面S1に照射される第1のレーザ光L1のパルス数である。パルス数 N_4 は、第4の工程において加工対象面S1に照射される第1のレーザ光L1のパルス数である。上記のテーブルは、例えば、実験結果に基づいて作成することが可能である。

20

【0108】

ステップA23において導出装置70は、抽出した倍率 n と、入力された周期 d_1 および周期 d_2 とのそれぞれの積を、倍数 $n \cdot d_1$ および $n \cdot d_2$ として出力する。

【0109】

30

ステップS24において導出装置70は、抽出したエネルギー密度 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 およびパルス数 N_2 、 N_4 を加工条件として出力する。

【0110】

次に、制御部60の動作について説明する。図17Aおよび図17Bは、制御部60において実施される処理の一例を示すフローチャートである。

【0111】

制御部60は、導出装置70によって導出された倍数 $n \cdot d_1$ および $n \cdot d_2$ を、それぞれ、第1の凹凸構造の周期 λ_1 および第2の凹凸構造の周期 λ_2 として扱う。

【0112】

ステップA31において制御部60は、導出装置70によって導出された倍数 $n \cdot d_1$ と、 $\lambda_1 / \sin \theta_1$ とが等しくなる θ_1 を導出する。ここでは、第1のレーザ光L1および第2のレーザ光L2の波長 λ_1 は、既知の固定値であるものとする。

40

【0113】

ステップA32において制御部60は、第1のレーザ光L1の光軸と第2のレーザ光L2の光軸とのなす角が、ステップA31において導出された θ_1 となるように集光部42における反射ミラー401の反射面の向きおよび移動ステージ404および集光レンズ406(図7参照)の移動を制御する。

【0114】

ステップA33において制御部60は、第1のレーザ光L1および第2のレーザ光L2によるレーザパルスが加工対象面S1上に時間的に重なるように遅延時間調整部20にお

50

ける移動ステージ 204 (図 5 参照) の位置決めを行う。すなわち、制御部 60 は、第 1 のレーザ光 L1 の行路の長さ、第 2 のレーザ光 L2 の行路の長さを一致させる。制御部 60 は、撮像・解析装置 52 によって生成される情報に基づいて遅延時間調整部 20 を制御する。

【0115】

ステップ A34 において制御部 60 は、第 1 のレーザ光 L1 および第 2 のレーザ光 L2 のエネルギー密度 F_1 が、導出装置 70 によって導出されたエネルギー密度 F_1 となるようにエネルギー調整部 31、32 を制御する。

【0116】

ステップ A35 において制御部 60 は、レーザ光源 10 を駆動する。これにより、レーザ光源 10 からレーザ光 L0 によるレーザパルスが出力される。本ステップにおいてレーザ光源 10 から出力されるレーザパルスのパルス数 N_1 は 1 である。レーザ光 L0 によるレーザパルスは、ビームスプリッタ 11 によって第 1 のレーザ光 L1 および第 2 のレーザ光 L2 に分割される。第 1 のレーザ光 L1 は、エネルギー調整部 31 および集光部 41 を経由して加工対象面 S1 に対して垂直方向から照射される。一方、第 2 のレーザ光 L2 は、遅延時間調整部 20、エネルギー調整部 32 および集光部 42 を経由して加工対象面 S1 に対して斜め方向から照射される。第 2 のレーザ光 L2 は、第 1 のレーザ光 L1 の光軸と第 2 のレーザ光 L2 の光軸とのなす角が、ステップ A31 において導出された θ_1 となり、加工対象面 S1 における第 1 のレーザ光 L1 の照射位置と同じ位置に照射される。また、第 1 のレーザ光 L1 によるレーザパルスと第 2 のレーザ光 L2 によるレーザパルスが加工対象面 S1 上にほぼ同じタイミングで照射される。

【0117】

互いに異なる方向から照射される第 1 のレーザ光 L1 によるレーザパルスおよび第 2 のレーザ光 L2 によるレーザパルスを、加工対象物 100 の加工対象面 S1 上に時間的、空間的に重ねることで加工対象面 S1 に干渉縞が形成される。加工対象面 S1 に 2 つのレーザによる干渉縞を形成することで、干渉縞の明部と暗部に対応した第 1 の凹凸構造が加工対象面 S1 に形成される。第 1 のレーザ光 L1 の光軸と第 2 のレーザ光 L2 の光軸とのなす角が、ステップ A31 において導出された θ_1 とされることで、第 1 の凹凸構造の周期 λ_1 は、導出装置 70 によって導出された倍数 $n \cdot d_1$ に一致する。

【0118】

ステップ A36 において制御部 60 は、第 1 のレーザ光 L1 および第 2 のレーザ光 L2 によるレーザパルスの加工対象面 S1 における所定範囲に亘る照射が完了したか否かを判定し、完了していないと判定した場合には処理をステップ A36 に移行し、完了したと判定した場合には処理をステップ A37 に移行する。

【0119】

ステップ A37 において制御部 60 は、XY 方向に支持部 80 の支持軸 81 を移動させることで、加工対象面 S1 を XY 方向に移動させ、第 1 のレーザ光 L1 および第 2 のレーザ光 L2 によるレーザパルスの照射位置を移動させ、処理をステップ A35 に戻す。これにより、加工対象面 S1 の新たな位置に第 1 の凹凸構造が形成される。

【0120】

ステップ A38 において制御部 60 は、加工対象物 100 を初期位置に戻し、集光部 42 におけるシャッター 407 を閉状態とし、第 1 のレーザ光 L1 のエネルギー密度 F_2 が導出装置 70 によって導出されたエネルギー密度 F_2 となるようにエネルギー調整部 31 を制御する。

【0121】

ステップ A39 において、制御部 60 は、レーザ光源 10 を駆動してレーザ光源 10 からレーザパルスを出射させる。本ステップにおいてレーザ光源 10 から出力されるレーザパルスのパルス数 N_2 は、導出装置 70 によって導出されたパルス数 N_2 に設定される。レーザ光 L0 によるレーザパルスは、ビームスプリッタ 11 によって第 1 のレーザ光 L1 および第 2 のレーザ光 L2 に分割される。第 1 のレーザ光 L1 は、エネルギー調整部 31

および集光部 4 1 を経由して加工対象面 S 1 に対して垂直方向から照射される。一方、第 2 のレーザ光 L 2 は、シャッター 4 0 7 によって遮断され、加工対象面 S 1 に照射されない。

【 0 1 2 2 】

第 1 の凹凸構造に重ねて第 1 のレーザ光 L 1 を照射することで、第 1 の凹凸構造が微細化され、X 方向に周期性を有する周期 d_1 の第 1 の周期構造が加工対象面 S 1 に形成される。すなわち、加工対象面 S 1 に形成された第 1 の凹凸構造の周期 λ_1 に応じて定まる周期 $d_1 (= \lambda_1 / n)$ の第 1 の周期構造が加工対象面 S 1 に形成される。

【 0 1 2 3 】

ステップ A 4 0 において制御部 6 0 は、第 1 のレーザ光 L 1 によるレーザパルスの加工対象面 S 1 における所定範囲に亘る照射が完了したか否かを判定し、完了していないと判定した場合には処理をステップ A 4 1 に移行し、完了したと判定した場合には処理をステップ A 4 2 に移行する。

10

【 0 1 2 4 】

ステップ A 4 1 において制御部 6 0 は、X Y 方向に支持部 8 0 の支持軸 8 1 を移動させることで、加工対象面 S 1 を X Y 方向に移動させ処理をステップ A 3 9 に戻す。これにより、加工対象面 S 1 の新たな位置に第 1 の周期構造が形成される。

【 0 1 2 5 】

ステップ A 4 2 において制御部 6 0 は、回転装置 8 2 を駆動して、支持軸 8 1 を回転軸として加工対象面 S 1 を一例として 90° 回転させる。なお、加工対象面 S 1 の回転角度は 90° に限らず、適宜設定することが可能である。

20

【 0 1 2 6 】

ステップ A 4 3 において制御部 6 0 は、導出装置 7 0 によって導出された倍数 $n \cdot d_2$ と、 $\lambda_2 / \sin \theta_2$ とが等しくなる d_2 を導出する。ここでは、第 1 のレーザ光 L 1 および第 2 のレーザ光 L 2 の波長 λ_2 は、既知の固定値であるものとする。

【 0 1 2 7 】

ステップ A 4 4 において制御部 6 0 は、第 1 のレーザ光 L 1 の光軸と第 2 のレーザ光 L 2 の光軸とのなす角が、ステップ A 4 1 において導出された d_2 となるように集光部 4 2 における反射ミラー 4 0 1 の反射面の向きおよび移動ステージ 4 0 4 および集光レンズ 4 0 6 (図 7 参照) の移動を制御する。

30

【 0 1 2 8 】

ステップ A 4 5 において制御部 6 0 は、第 1 のレーザ光 L 1 によるレーザパルスおよび第 2 のレーザ光 L 2 によるレーザパルスが加工対象面 S 1 上に時間的に重なるように遅延時間調整部 2 0 における移動ステージ 2 0 4 (図 5 参照) の位置決めを行う。すなわち、制御部 6 0 は、第 1 のレーザ光 L 1 の行路の長さ、第 2 のレーザ光 L 2 の行路の長さを一致させる。制御部 6 0 は、撮像・解析装置 5 2 によって生成される情報に基づいて遅延時間調整部 2 0 を制御する。なお、 $\lambda_1 = \lambda_2$ である場合、ステップ A 4 2 および A 4 3 の処理は省略することが可能である。

【 0 1 2 9 】

ステップ A 4 6 において制御部 6 0 は、第 1 のレーザ光 L 1 および第 2 のレーザ光 L 2 のエネルギー密度 F_3 が導出装置 7 0 によって導出されたエネルギー密度 F_3 となるようにエネルギー調整部 3 1、3 2 を制御する。

40

【 0 1 3 0 】

ステップ A 4 7 において制御部 6 0 は、レーザ光源 1 0 を駆動する。これにより、レーザ光源 1 0 からレーザ光 L 0 によるレーザパルスが出力される。本ステップにおいてレーザ光源 1 0 から出力されるレーザパルスのパルス数 N_3 は 1 である。レーザ光 L 0 によるレーザパルスは、ビームスプリッタ 1 1 によって第 1 のレーザ光 L 1 および第 2 のレーザ光 L 2 に分割される。第 1 のレーザ光 L 1 は、エネルギー調整部 3 1 および集光部 4 1 を経由して加工対象面 S 1 に対して垂直方向から照射される。一方、第 2 のレーザ光 L 2 は、遅延時間調整部 2 0、エネルギー調整部 3 2 および集光部 4 2 を経由して加工対象面 S

50

1 に対して斜め方向から照射される。第 2 のレーザ光 L 2 は、第 1 のレーザ光 L 1 の光軸と第 2 のレーザ光 L 2 の光軸とのなす角が、ステップ A 4 3 において導出された θ_2 となり、加工対象面 S 1 における第 1 のレーザ光 L 1 の照射位置と同じ位置に照射される。また、第 1 のレーザ光 L 1 によるレーザパルスと第 2 のレーザ光 L 2 によるレーザパルスが加工対象面 S 1 上にほぼ同じタイミングで照射される。

【 0 1 3 1 】

互いに異なる方向から照射される第 1 のレーザ光 L 1 および第 2 のレーザ光 L 2 によるレーザパルスを、加工対象物 1 0 0 の加工対象面 S 1 上に時間的、空間的に重ねることで加工対象面 S 1 に干渉縞が形成される。加工対象面 S 1 に 2 つのレーザによる干渉縞を形成することで、干渉縞の明部と暗部に対応した第 2 の凹凸構造が加工対象面 S 1 に形成される。第 1 のレーザ光 L 1 の光軸と第 2 のレーザ光 L 2 の光軸とのなす角が、ステップ A 4 3 において導出された θ_2 とされることで、第 2 の凹凸構造の周期 d_2 は、導出装置 7 0 によって導出された倍数 $n \cdot d_2$ と一致する。ステップ A 4 2 において加工対象面 S 1 が例えば 90° 回転されることにより、第 2 の凹凸構造における溝の伸びる方向は、第 1 の凹凸構造における溝の伸びる方向に対して直交する方向となる。

10

【 0 1 3 2 】

ステップ A 4 8 において制御部 6 0 は、第 1 のレーザ光 L 1 および第 2 のレーザ光 L 2 によるレーザパルスの加工対象面 S 1 における所定範囲に亘る照射が完了したか否かを判定し、完了していないと判定した場合には処理をステップ A 4 9 に移行し、完了したと判定した場合には処理をステップ A 5 0 に移行する。

20

【 0 1 3 3 】

ステップ A 4 9 において制御部 6 0 は、X Y 方向に支持部 8 0 の支持軸 8 1 を移動させることで、加工対象面 S 1 を X Y 方向に移動させ、第 1 のレーザ光 L 1 および第 2 のレーザ光 L 2 によるレーザパルスの照射位置を移動させ、処理をステップ A 4 7 に戻す。これにより、加工対象面 S 1 の新たな位置に第 2 の凹凸構造が形成される。

【 0 1 3 4 】

ステップ A 5 0 において制御部 6 0 は、加工対象物 1 0 0 を初期位置に戻し、集光部 4 2 におけるシャッター 4 0 7 を閉状態とし、第 1 のレーザ光 L 1 のエネルギー密度 F_4 が導出装置 7 0 によって導出されたエネルギー密度 F_4 となるようにエネルギー調整部 3 1 を制御する。

30

【 0 1 3 5 】

ステップ S 5 1 において制御部 6 0 は、レーザ光源 1 0 を駆動してレーザ光源 1 0 からレーザパルスを出射させる。本ステップにおいてレーザ光源 1 0 から出力されるレーザパルスのパルス数 N_4 は、導出装置 7 0 によって導出されたパルス数 N_4 に設定される。レーザ光 L 0 によるレーザパルスは、ビームスプリッタ 1 1 によって第 1 のレーザ光 L 1 および第 2 のレーザ光 L 2 に分割される。第 1 のレーザ光 L 1 は、エネルギー調整部 3 1 および集光部 4 1 を経由して加工対象面 S 1 に対して垂直方向から照射される。一方、第 2 のレーザ光 L 2 は、シャッター 4 0 7 によって遮断され、加工対象面 S 1 に照射されない。

40

【 0 1 3 6 】

第 2 の凹凸構造に重ねて第 1 のレーザ光 L 1 を照射することで、第 2 の凹凸構造が微細化され、Y 方向に周期性を有する周期 d_2 の第 2 の周期構造が加工対象面 S 1 に形成される。すなわち、加工対象面 S 1 に形成された第 2 の凹凸構造の周期 d_2 に応じて定まる周期 d_2 ($= \theta_2 / n$) の第 2 の周期構造が加工対象面 S 1 に形成される。

【 0 1 3 7 】

ステップ A 5 2 において制御部 6 0 は、第 1 のレーザ光 L 1 によるレーザパルスの加工対象面 S 1 における所定範囲に亘る照射が完了したか否かを判定し、完了していないと判定した場合には処理をステップ A 5 3 に移行し、完了したと判定した場合には処理を終了させる。

【 0 1 3 8 】

50

ステップ A 5 3 において制御部 6 0 は、X Y 方向に支持部 8 0 の支持軸 8 1 を移動させることで、加工対象面 S 1 を X Y 方向に移動させ処理をステップ A 5 1 に戻す。これにより、加工対象面 S 1 の新たな位置に第 2 の周期構造が形成される。ステップ A 4 2 において加工対象面 S 1 が 9 0 ° 回転されることにより、第 2 の周期構造における溝の伸びる方向は、第 1 の周期構造における溝の伸びる方向に対して直交する。すなわち、加工対象面 S 1 に第 1 の周期構造と第 2 の周期構造とからなる X 方向および Y 方向に周期性を有する網目状、ドット状またはマトリックス状の周期構造が形成される。

【 0 1 3 9 】

[実施例 2]

以下、実施例により本発明の第 3 の実施形態を詳細に説明するが、本発明は、以下の実施例に限定されない。加工対象物として窒化ガリウム (Ga N) 基板を用いた。レーザ光源として、中心波長 8 0 0 n m 、パルス幅 1 0 0 フェムト秒の直線偏光を出射するチタンサファイアレーザシステムを用いた。

10

【 0 1 4 0 】

第 1 のレーザ光 L 1 および第 2 のレーザ光 L 2 のエネルギー密度 F_1 をそれぞれ、 $400 \text{ mJ} / \text{cm}^2$ に設定した。窒化ガリウム基板の表面に X 方向における周期 d_1 が 250 n m の第 1 の周期構造を形成するべく (1) 式および (2) 式から 2 つのレーザ光の光軸のなす角 θ を 53 ° に設定した。なお、(1) 式における整数 n の値は 4 である。

【 0 1 4 1 】

第 1 のレーザ光 L 1 によるレーザパルスと第 2 のレーザ光 L 2 によるレーザパルスとが時間的、空間的に重なるように各レーザ光を窒化ガリウム基板の表面に照射した。照射したレーザパルスのパルス数 N_1 を 1 とした。これにより、窒化ガリウム基板の表面に干渉縞が形成され、窒化ガリウム基板の干渉縞の明部に対応する部分においてアブレーションが生じ、X 方向に周期的に配列された複数の溝を含む第 1 の凹凸構造が形成された。図 1 8 A は、窒化ガリウム基板の表面に形成された第 1 の凹凸構造の電子顕微鏡画像である。第 1 の凹凸構造の周期 d_1 は、 $1 \mu\text{m}$ 程度であった。

20

【 0 1 4 2 】

続いて、第 1 のレーザ光 L 1 のエネルギー密度 F_2 を $440 \text{ mJ} / \text{cm}^2$ に設定した。その後、第 1 のレーザ光 L 1 によるレーザパルスを窒化ガリウム基板の表面に形成された第 1 の凹凸構造に重ねて照射した。照射したレーザパルスのパルス数 N_2 を 40 とした。これにより、窒化ガリウム基板の表面に形成された第 1 の凹凸構造が微細化され、X 方向に周期性を有する周期 d_1 の第 1 の周期構造が加工対象面 S 1 に形成された。図 1 8 B は、窒化ガリウム基板の表面に形成された第 1 の周期構造の電子顕微鏡画像である。第 1 の周期構造の周期 d_1 は、先に形成された第 1 の凹凸構造の周期 d_1 の $1/4$ 倍に相当する周期 250 n m であった。

30

【 0 1 4 3 】

続いて、窒化ガリウム基板の加工対象面に対して垂直な軸を回転軸として窒化ガリウム基板を 9 0 ° 回転させた。第 1 のレーザ光 L 1 および第 2 のレーザ光 L 2 のエネルギー密度 F_3 をそれぞれ、 $400 \text{ mJ} / \text{cm}^2$ に設定した。窒化ガリウム基板の表面に Y 方向における周期 d_2 が 250 n m の周期構造を形成するべく (1) 式および (2) 式から 2 つのレーザ光の光軸のなす角 θ を 53 ° に設定した。なお、(1) 式における整数 n の値は 4 である。

40

【 0 1 4 4 】

第 1 のレーザ光 L 1 によるレーザパルスと第 2 のレーザ光 L 2 によるレーザパルスとが時間的、空間的に重なるように各レーザ光を第 1 の周期構造が形成された窒化ガリウム基板の表面に照射した。照射したレーザパルスのパルス数 N_3 を 1 とした。これにより、窒化ガリウム基板の表面に干渉縞が形成され、窒化ガリウム基板の干渉縞の明部に対応する部分においてアブレーションが生じ、Y 方向に周期的に配列された複数の溝を含む第 2 の凹凸構造が形成された。図 1 8 C は、窒化ガリウム基板の表面に第 1 の周期構造に重ねて形成された第 2 の凹凸構造の電子顕微鏡画像である。第 2 の凹凸構造の周期 d_2 は、 1μ

50

m程度であった。

【0145】

続いて、第1のレーザ光L1のエネルギー密度 F_4 を 290 mJ/cm^2 に設定した。その後、第1のレーザ光L1によるレーザパルスを窒化ガリウム基板の表面に形成された第2の凹凸構造に重ねて照射した。照射したレーザパルスのパルス数 N_2 を40とした。これにより、窒化ガリウム基板の表面に形成された第2の凹凸構造が微細化され、Y方向に周期性を有する周期 d_2 の第2の周期構造が加工対象面S1に形成された。図18Dは、窒化ガリウム基板の表面に第1の周期構造に重ねて形成された第2の周期構造の電子顕微鏡画像である。第2の周期構造の周期 d_2 は、先に形成された第2の凹凸構造の周期 d_2 の1/4倍に相当する周期 250 nm であった。第2の周期構造を、第1の周期構造に重ねて形成することにより、窒化ガリウム基板の表面には、X方向およびY方向に周期性を有する網目状、ドット状またはマトリックス状の周期構造が形成された。

10

【0146】

図19Aおよび図19Bは、それぞれ、窒化ガリウム基板の表面に形成されたX方向およびY方向に周期性を有する周期構造におけるX方向およびY方向における空間周波数分布を示すグラフである。図19Aおよび図19Bに示すように、本発明の第3の実施形態に係る加工方法によれば、X方向およびY方向の2方向において均一な周期を有するナノメートルオーダーの構造物を加工対象面に形成することができる。

【0147】

図20Aは、加工対象面に円偏光を有するレーザ光によるレーザパルスを照射することによって加工対象面に形成された比較例に係る構造物の電子顕微鏡画像である。図20Bは、図20Aに示す構造物の動径方向における空間周波数分布を示すグラフである。円偏光を有するレーザ光によるレーザパルスを加工対象面に照射した場合には、加工対象面に形成される構造物の配列方向は不規則となり、周期は不均一となる。

20

【0148】

なお、上記の実施例では、加工対象面を 90° 回転させることにより、互いに直交する2方向に周期性を有する周期構造を形成する場合を例示したが、加工対象面の回転角度は 90° に限らず、任意の角度とすることが可能である。

【0149】

図21は、本発明の第3の実施形態に係る加工方法を実現する加工装置の他の構成例を示す図である。加工装置1Bは、光学定盤90および回転装置91を備えている点において、図4に示す加工装置1と異なり、それ以外の構成は加工装置1と同様である。光学定盤90の上には、ビームスプリッタ11、遅延時間調整部20、エネルギー調整部31、32および集光部41、42が載置されている。回転装置91は、制御部60に基づいて、光学定盤90を加工対象面S1に対して垂直な軸を回転軸として回転させる機能を有する。光学定盤90を、加工対象面S1に対して垂直な軸を回転軸として回転させることにより、第1のレーザ光L1および第2のレーザ光L2の光軸が、加工対象面S1に対して回転する。これにより、図15に示す加工装置1Aにおいて、回転装置82によって加工対象面S1を回転させた場合と同様の効果を得ることができる。

30

【0150】

以上のように、本発明の第3の実施形態に係る加工方法および加工装置1A、1Bによれば、加工対象物の加工対象面に直線性が高く且つ規則的に配列されたナノメートルオーダーの周期構造を形成するとともに周期構造の周期を制御することが可能である。また、加工対象面の2方向に周期性を有する周期構造を形成することができるので、周期構造の形状を網目状、ドット状またはマトリックス状とすることができる。

40

【0151】

本発明の第3の実施形態に係る加工方法は、例えば、無反射面の形成に用いることができる。光の波長よりも小さいドット状の構造物を物体表面に形成することにより、原理的に表面反射率をゼロにすることができる。モスアイ構造と呼ばれるこの構造は、近年ナノインプリント技術を用いて実用化されている。本発明の第3の実施形態に係る加工方法に

50

よれば、アスペクト比の高いドット状の周期構造を形成することができるので、高性能な無反射面を形成することができる。

【0152】

また、本発明の第3の実施形態に係る加工方法は、構造色の発現に用いることができる。これは、当該方法によって光の波長よりも小さい周期構造を物体表面に形成することにより、特定波長の光を減少または増幅させることができるためである。当該方法は加工対象物から微細周期構造を直接レーザー光で削り出すため、物体表面に薬剤を使用せずに着色することができる。当該方法によれば、周期が均一であり且つ整列した周期構造を形成することができるので、発色性が高く、視野方向および視野角に制限されない構造色による着色面を大面積に形成できる。

10

【0153】

上記した第1～第3の実施形態に係る加工方法は、既存の微細加工技術に対して例えば以下の利点を有する。本実施形態に係る加工方法は真空中でなくても実施することができる。すなわち大気中または液体中でも実施することができる。また、本実施形態に係る加工方法によれば、加工対象面は平面に限らず球体や円筒が有するような曲面であってもよい。また、本実施形態に係る加工方法は加工対象面の移動またはレーザー光の走査によって加工部位を容易に移動できるので、加工領域の大きさは制限されにくく、大面積の加工物をシームレスに形成することができる。

【0154】

なお、上記した第1～第3の実施形態において、第1のレーザー光L1および第2のレーザー光L2の波長が一定である場合を例示したが、波長変換手段を用いて、第1のレーザー光L1および第2のレーザー光L2の波長を可変とし、周期を有する凹凸構造を形成する場合に、(2)式に基づいてを制御パラメータとしてもよい。波長変換手段として、BBO結晶($\text{-BaB}_2\text{O}_4$)、KDP結晶(KH_2PO_4)等の非線形光学結晶を用いることが可能である。波長変換手段は、例えば、ビームスプリッタ11の前段に配置することが可能であらう。

20

【0155】

また、上記した第1～第3の実施形態において、遅延時間調整部20によって第2のレーザー光L2の行路の長さを調整する場合を例示したが、第1のレーザー光L1の行路の長さを調整可能としてもよい。すなわち、第1のレーザー光L1および第2のレーザー光L2の少なくとも一方について、行路の長さが調整可能であればよい。

30

【符号の説明】

【0156】

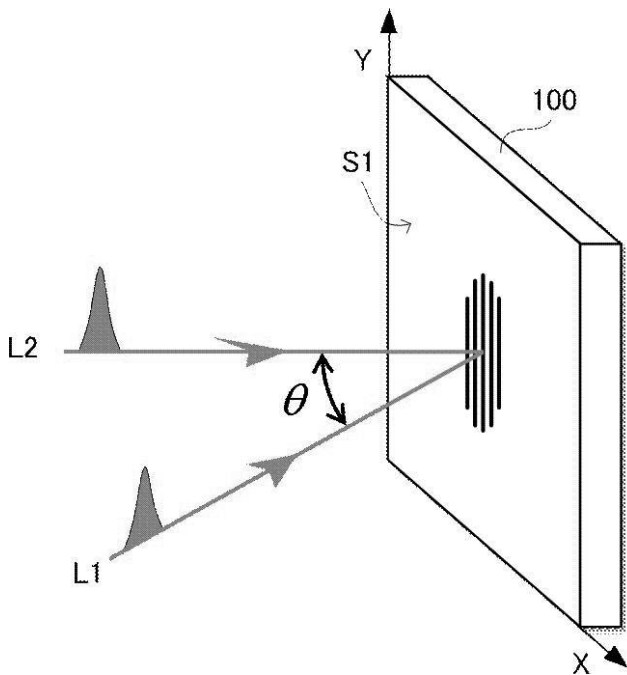
- 1、1A、1B 加工装置
- 10 レーザ光源
- 11 ビームスプリッタ
- 20 遅延時間調整部
- 31、32 エネルギー調整部
- 41、42 集光部
- 50 照明用光源
- 51 顕微装置
- 52 撮像・解析装置
- 60 制御部
- 70 導出装置
- 80 支持部
- 81 支持軸
- 82 回転装置
- 90 光学定盤
- 91 回転装置
- 100 加工対象物

40

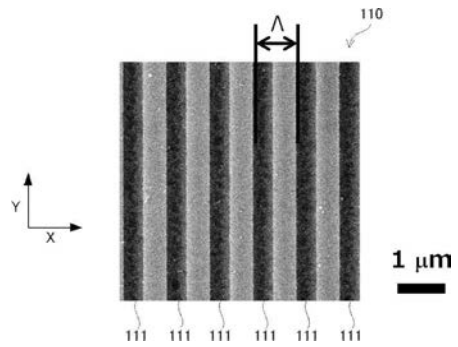
50

- 1 1 0 凹凸構造
- 1 1 1 溝
- 1 2 0 周期構造
- L 1 第 1 のレーザー光
- L 2 第 2 のレーザー光
- S 1 加工対象面

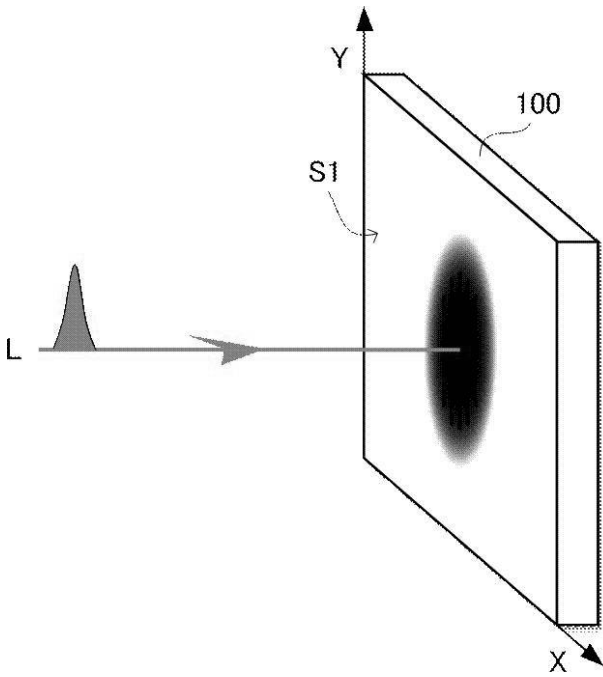
【図 1 A】



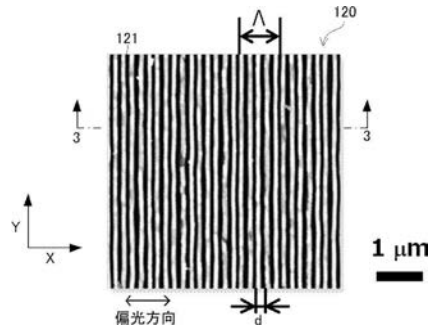
【図 1 B】



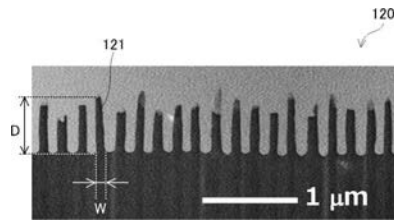
【 図 2 A 】



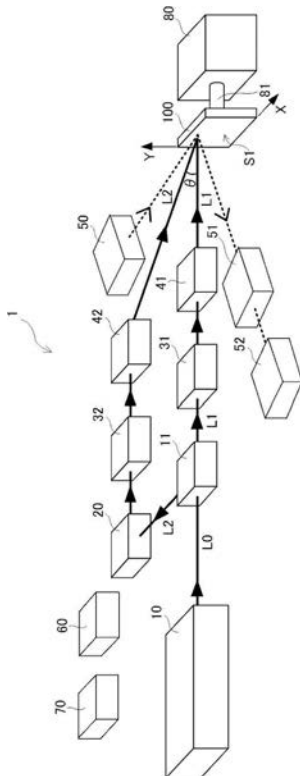
【 図 2 B 】



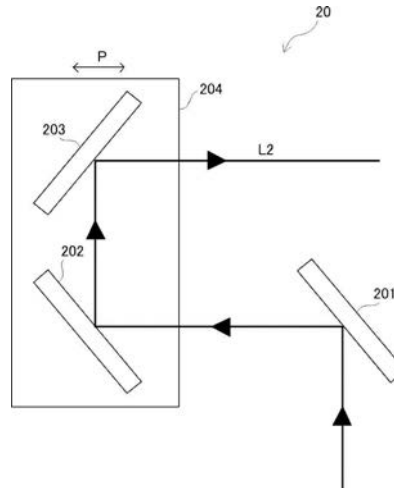
【 図 3 】



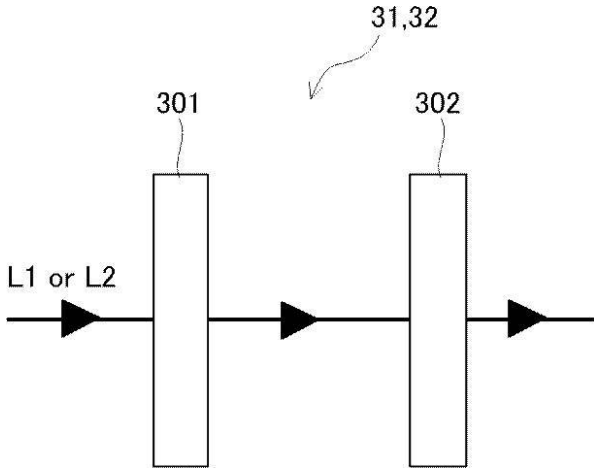
【 図 4 】



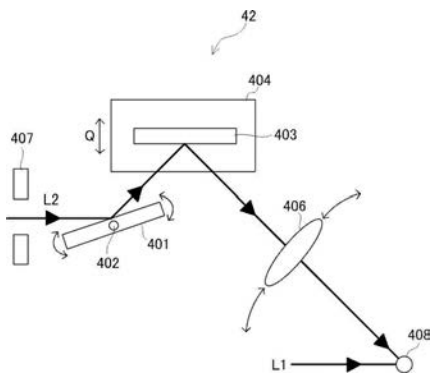
【 図 5 】



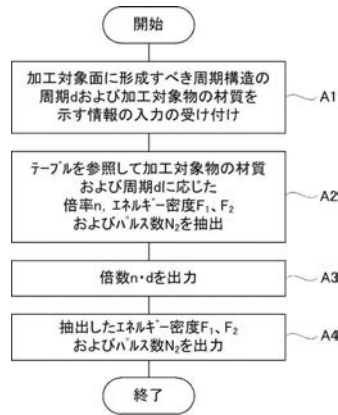
【 図 6 】



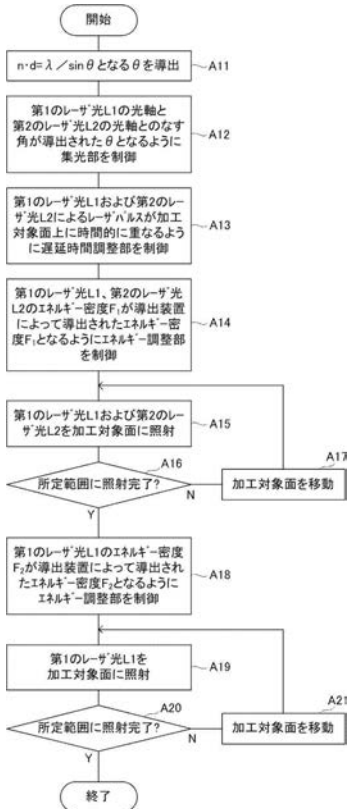
【 図 7 】



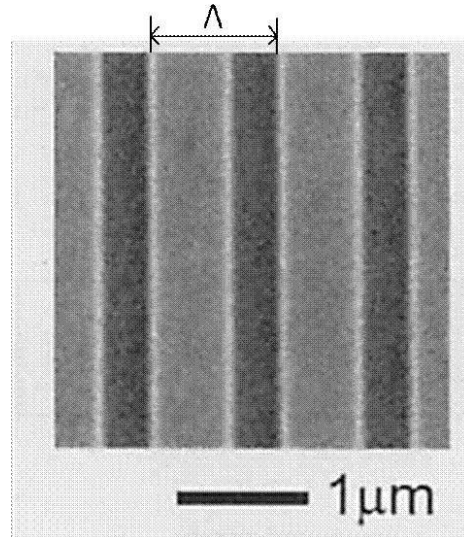
【 図 8 】



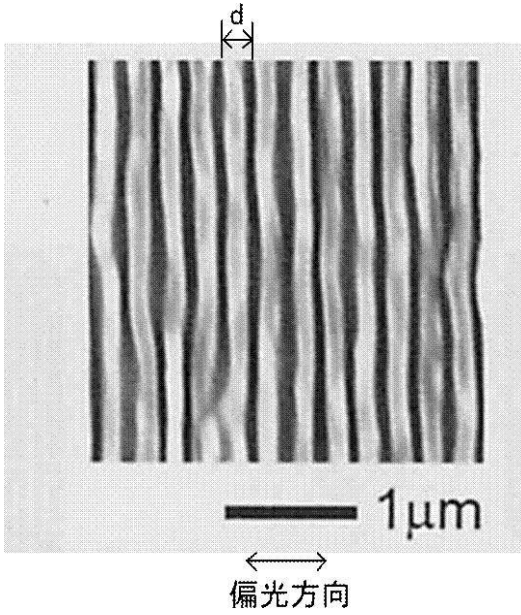
【 図 9 】



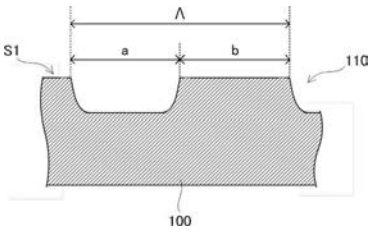
【 図 10 A 】



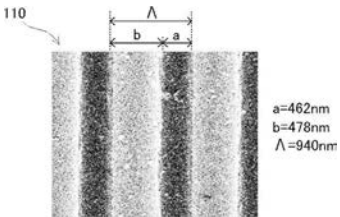
【図 1 0 B】



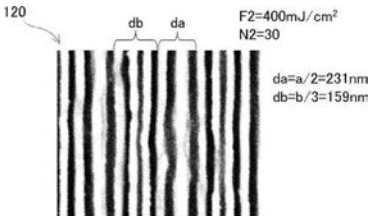
【図 1 1】



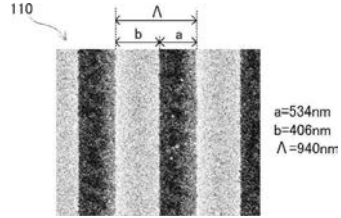
【図 1 3 A】



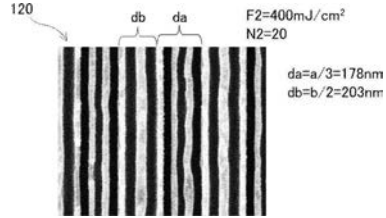
【図 1 3 B】



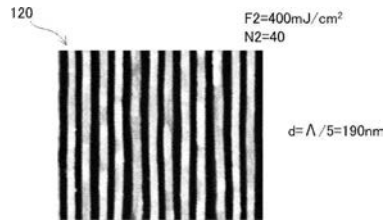
【図 1 2 A】



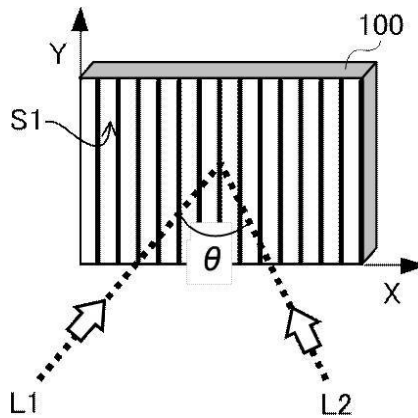
【図 1 2 B】



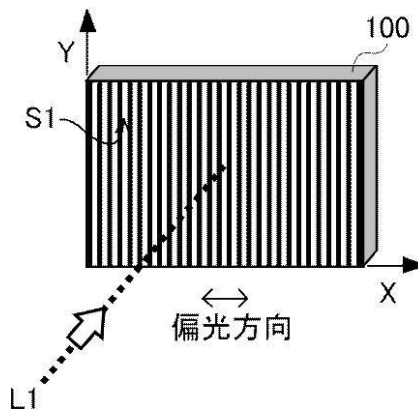
【図 1 2 C】



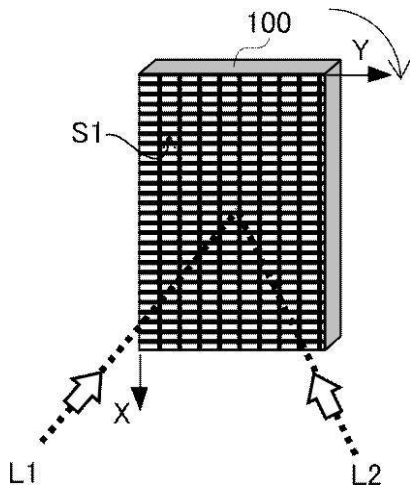
【図 1 4 A】



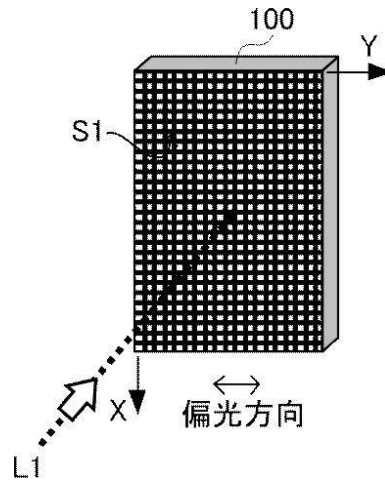
【図 1 4 B】



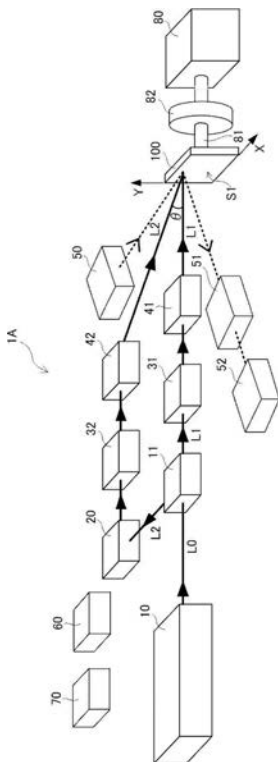
【図14C】



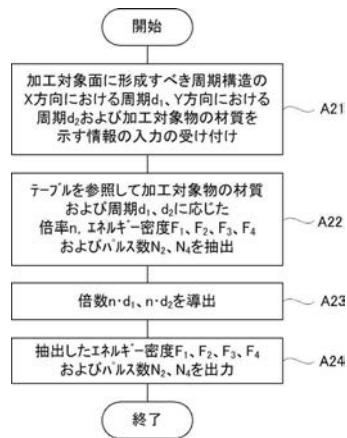
【図14D】



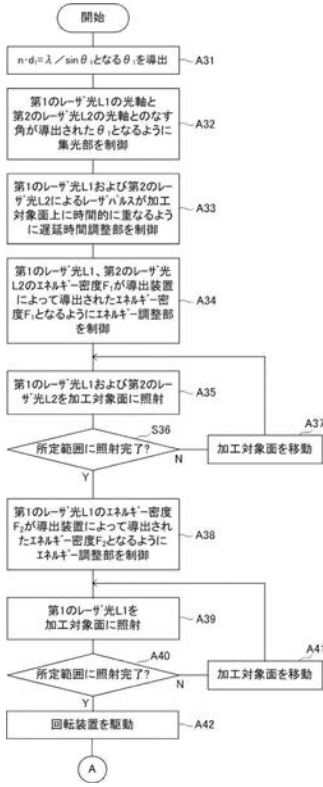
【図15】



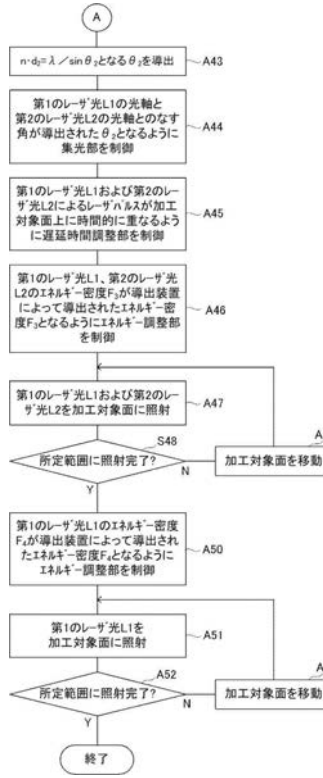
【図16】



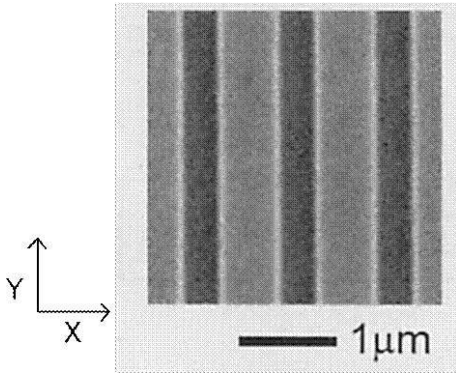
【図17A】



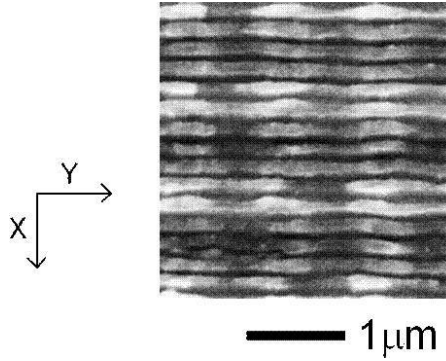
【図17B】



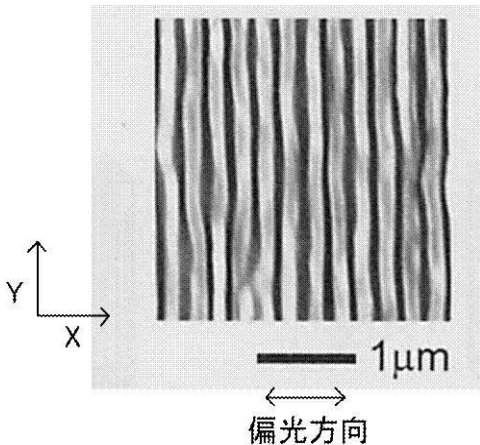
【図18A】



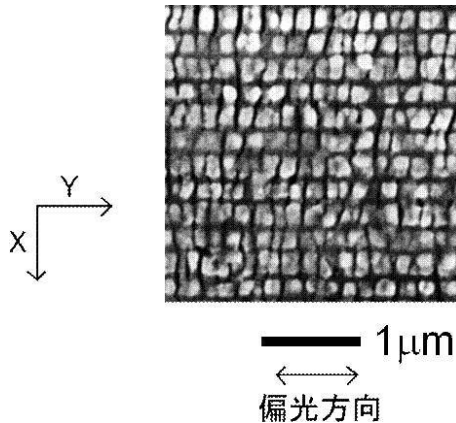
【図18C】



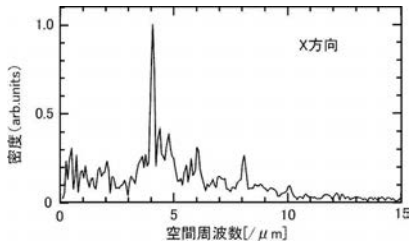
【図18B】



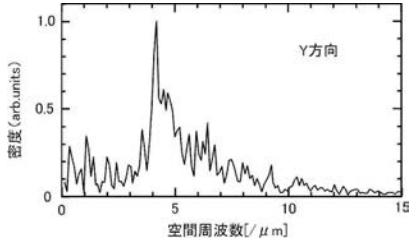
【図18D】



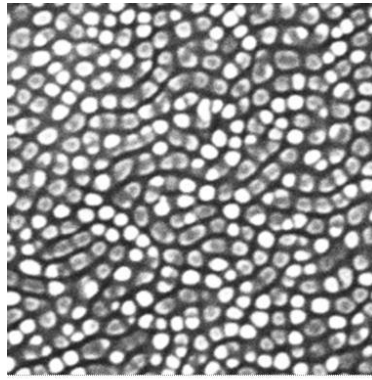
【図 19 A】



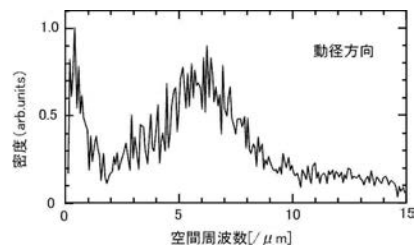
【図 19 B】



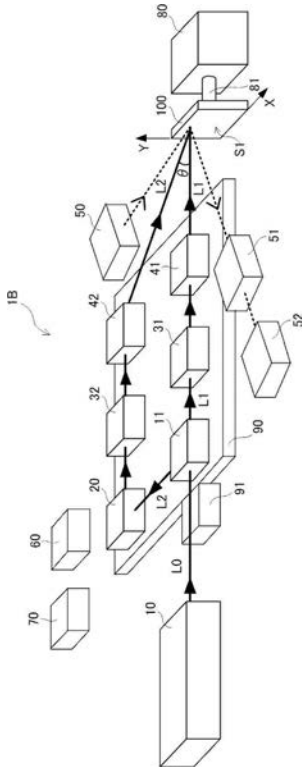
【図 20 A】



【図 20 B】



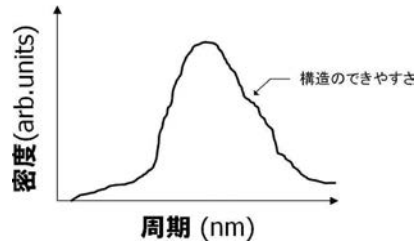
【図 21】

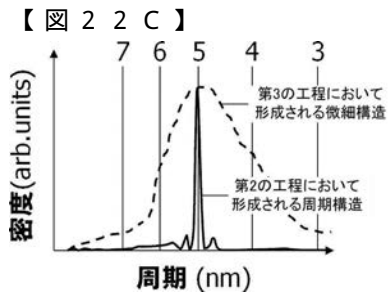


【図 22 A】



【図 22 B】





フロントページの続き

Fターム(参考) 4E168 AB01 AD18 CA06 CA07 DA02 DA27 DA40 DA46 DA47 DA60
EA02 EA20 JA02 JA11