

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4498309号
(P4498309)

(45) 発行日 平成22年7月7日 (2010.7.7)

(24) 登録日 平成22年4月23日 (2010.4.23)

(51) Int. Cl.	F I	
B 2 3 K 26/36 (2006.01)	B 2 3 K 26/36	
B 2 3 K 26/00 (2006.01)	B 2 3 K 26/00	E
G O 2 B 5/18 (2006.01)	B 2 3 K 26/00	G
G O 2 B 1/11 (2006.01)	G O 2 B 5/18	
B 2 3 K 101/40 (2006.01)	G O 2 B 1/10	A
請求項の数 12 (全 17 頁) 最終頁に続く		

(21) 出願番号	特願2006-137088 (P2006-137088)	(73) 特許権者	000001007
(22) 出願日	平成18年5月16日 (2006.5.16)		キヤノン株式会社
(65) 公開番号	特開2006-346748 (P2006-346748A)		東京都大田区下丸子3丁目30番2号
(43) 公開日	平成18年12月28日 (2006.12.28)	(74) 代理人	100105289
審査請求日	平成18年12月14日 (2006.12.14)		弁理士 長尾 達也
(31) 優先権主張番号	特願2005-144937 (P2005-144937)	(72) 発明者	岩瀬 秀夫
(32) 優先日	平成17年5月18日 (2005.5.18)		東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キ
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		ヤノン株式会社内
		審査官	松本 公一
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 レーザー干渉による加工方法及び該加工方法で加工された回折格子、反射防止構造

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

レーザーの干渉を用いて被加工物を加工する加工方法であって、

前記被加工物の表面で前記レーザーの干渉のピッチよりも前記レーザーの干渉の周期方向に伝播する表面波の波長が長くなるように、前記レーザーを調整して、前記被加工物を加工することを特徴とするレーザー干渉による加工方法。

【請求項 2】

前記レーザーの調整は、前記レーザーの干渉させる光の偏光方向、前記レーザーの波長及び／又は前記レーザーの交差角度を制御することを特徴とする請求項 1 に記載のレーザー干渉による加工方法。

【請求項 3】

前記周期方向に伝播する表面波の伝播方向を、前記レーザーの干渉させる光の偏光方向を調整することで、変化させることを特徴とする請求項 1 に記載のレーザー干渉による加工方法。

【請求項 4】

前記表面波の中で最も波長の短い表面波が前記レーザーの干渉の周期方向に対して直角に伝播することを特徴とする請求項 3 に記載のレーザー干渉による加工方法。

【請求項 5】

前記レーザーの干渉のピッチを d とし、前記被加工物の表面で前記レーザーの干渉の周期方向に伝播する表面波の波数を k_{SEW} とするとき、以下の条件式を満たすことを特

徴とする請求項 1 に記載のレーザー干渉による加工方法。

$$d < 2 \pi / k \sin \theta$$

【請求項 6】

前記レーザーの干渉させる光の偏光方向は、P 偏光であることを特徴とする請求項 2 又は請求項 3 に記載のレーザー干渉による加工方法。

【請求項 7】

前記レーザー干渉による加工方法であって、前記レーザーは、パルス幅が 1 fs 以上 1 ps 以下のパルスレーザーであることを特徴とする請求項 1 ～ 6 のいずれか 1 項に記載のレーザー干渉による加工方法。

【請求項 8】

前記パルスレーザーによって、前記被加工物をアブレーション加工することを特徴とする請求項 1 ～ 7 のいずれか 1 項に記載のレーザー干渉による加工方法。

【請求項 9】

前記パルスレーザーによって、前記被加工物の表面の改質をすることを特徴とする請求項 1 ～ 7 のいずれか 1 項に記載のレーザー干渉による加工方法。

【請求項 10】

前記被加工物は金属又は半導体であることを特徴とする請求項 1 ～ 9 のいずれか 1 項に記載のレーザー干渉による加工方法。

【請求項 11】

請求項 1 ～ 10 に記載のレーザー干渉による加工方法で加工された回折格子。

【請求項 12】

請求項 1 ～ 10 に記載のレーザー干渉による加工方法で加工された反射防止構造。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、アブレーション加工、物質表面の改質、あるいはレジストの露光等レーザー干渉による加工方法及び該加工方法で加工された回折格子、反射防止構造に関し、特にパルス幅が 1 fs 以上 1 ps 以下のパルスレーザーを用いた干渉露光による加工方法に関する。

【背景技術】

【0002】

MEMS 及びナノテクノロジー技術が次世代技術として叫ばれる中、それら微細な構造物の製造方法として、レーザー干渉加工法が注目を集めている。

干渉加工は、電子及びイオンビームによる描画とことなり、数 μm から数 10 cm もオーダーの領域を一括に加工することが可能であり、また、フォトリソグラフィーや LIGA プロセスのようにマスクを用いる必要もない。

さらに、近年、パルスレーザーによるサブミクロン構造の加工方法として、フェムト秒レーザーを用いた加工方法が提案されている。

フェムト秒レーザーは、パルス幅が 1 ps (10^{-12} 秒) 以下のレーザーであり、部材に照射した場合の熱拡散距離が非常に短く、熱によるダメージが少ない。

【0003】

また、フェムト秒レーザーを使用すると、通常その波長の光を吸収しないガラスやプラスチックなどの物質を、サブミクロンのオーダーで加工することができる。

フェムト秒レーザーをこれらの透明物質に照射すると、局所的に多光子吸収と呼ばれる光子の吸収を起こすことができる。

多光子吸収は、物質に強い電磁場を照射することによって生じる量子現象であり、照射したレーザーのフルエンスが十分に強い領域のみで光子を吸収させることができる。

【0004】

このようなフェムト秒レーザーを用いた加工方法の従来例として、例えば特許文献 1 では、フェムト秒レーザーを用いたレーザー干渉によるホログラムの製造方法が提案されて

10

20

30

40

50

いる。

この方法では、フェムト秒レーザーの基本波（波長 800 nm）を干渉させてガラスの表面に照射し、アブレーションによってミクロンからサブミクロンピッチのホログラムが作製される。

また、非特許文献 1 には、3 倍波（波長 290 nm）の干渉によって、ガラス表面へのピッチ 290 nm のグレーティングの製作に関する報告がされている。

【特許文献 1】特開 2001-236002 号公報

【非特許文献 1】J. Nanosci. Nanotech. 2002, Vol. 2 No. 3/4, 321-323

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、上記従来例におけるフェムト秒レーザーを用いたレーザー干渉による加工方法においては、つぎのような問題を有している。

すなわち、被加工物質の表面を伝播する電磁波（以下、表面波と記す。）、つまりは被加工物の表面でレーザーの干渉の周期方向に伝播する表面波によって、加工が乱れるといった問題を有している。

上記表面波は、物質表面の不均一性により散乱された光が、物質の表面に沿って伝播する現象であり、周期性を持った“リップル”と総称される加工の乱れを生じさせる原因となる。

このような表面波乃至はリップル現象は、フェムト秒レーザーによる加工のみに見られる現象ではなく、露光、アブレーション、光エッチング、光照射による物性の改質など、干渉性をもつ光を照射するあらゆるプロセスで発生する。

また、金属、半導体、ガラス、プラスチック、及びその他の誘電体など、あらゆる物質の表面に発生する。

しかし、従来のパルス幅の長い、あるいは連続光のレーザーでは熱の影響が大きく、生成されたリップル形状が熱溶解によって平坦化されることが多い。

前述したように、熱拡散距離が非常に短く熱影響の小さいフェムト秒レーザーによる加工では、このリップルによる加工の乱れが熱による平坦化作用を受けることなく顕著に表れる。

また、金属の場合、表面波はその電導電子を介したプラズマ波として伝播するため、誘電体と比較して、リップルの発生が顕著である。

【0006】

以下に、このようなリップルの発生について、更に説明する。

図 4 に、レーザー照射ガスエッチングにおいて発生したリップルの SEM 像を示す（Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 31 (1992) pp. 4433-4436 参照）。

図 4 (a) は図 5 (a) に示すような方向に電場の振幅をもつ直線偏光、すなわち P 偏光入射によるリップルである。

図 4 (b) は図 5 (b) に示すような方向に電場振幅をもつ直線偏光、すなわち S 偏光入射によるリップルである。

レーザーの波数を k_0 、表面波の波数を k_{SEW} 、入射角を θ とすると、P 偏光入射及び S 偏光入射におけるリップルのピッチ d_r は、それぞれ、つぎの式 (1) 及び式 (2) で表される。

具体的には $k_0 = 2.37 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ (波長 266 nm)

、 $\theta = 13.5^\circ$ 、 $k_{SEW} = 2.55 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ である。よって、 d_r (P 偏光) = 345 nm、 d_r (S 偏光) = 265 nm となる。

10

20

30

40

$$d_r = \frac{2\pi}{k_{SEW} - k_0 \sin \theta} \quad (\text{P 偏光}) \dots\dots\dots \text{式 (1)}$$

$$d_r = \frac{2\pi}{k_{SEW}} \quad (\text{S 偏光}) \dots\dots\dots \text{式 (2)}$$

10

【0007】

このようなリップルは、図4で見られるように、一方向に一つの周期性のみを有しているとは限らない。

図6に、ダイヤモンドをフェムト秒レーザーによってアブレーション加工した際に発生するリップルのSEM像を示す (Applied Physics Letters, Volume 82, No. 11. (2003) p. 1703 参照)。

この例の場合、ピッチ及び周期方向が異なるリップルが三種類確認できる。

【0008】

図7は、フェムト秒レーザーを垂直にニッケル部材の表面に直角に照射し、ニッケル表面をアブレーション加工した場合に発生するリップルである。

20

ダイヤモンドの場合と同様に、3種類のリップルが確認できる。これらのリップルは、3つの異なる波長を持つ表面波が、偏光方向に対して直角若しくは平行に伝播するために発生する。

レーザーの入射角度は $\theta = 0^\circ$ であるため、(1)式及び(2)式より、表面波の波数 (k_{SEW}) は測定したリップルのピッチ (d_r) より、つぎの式(3)で求められる。

$$d_r = \frac{2\pi}{k_{SEW}} \dots\dots\dots (3)$$

30

【0009】

表1に、図7で発生した偏光方向に対するリップルの周期方向(すなわち、表面波の伝播方向)と、リップルのピッチ (d_r) 及び上記式(3)から求めた表面波の波数 (k_{SEW})、等をまとめて示す。

表1において、ニッケルのリップルを、その波数が小さいものから、リップル1、リップル2、リップル3として表している。

【0010】

【表 1】

	リップル 1	リップル 2	リップル 3
リップルの周期方向 (表面波の伝播方向)	偏光方向と 直角	偏光方向と 平行	偏光方向と 直角
リップル周期	1940nm	730nm	120~430nm
表面波の波数	3.24×10^{-3} (1/nm)	8.60×10^{-3} (1/nm)	$14.6 \sim 52.3$ $\times 10^{-3}$ (1/nm)

【0011】

上記 3 種類のリップルは、レーザーの偏光方向と密接に関係している。

図 1 2 は、干渉させたフェムト秒レーザーをニッケルの表面に照射し、アブレーションによって干渉と同ピッチのグレーティングを製作しようとした場合のニッケル表面の SEM 像である。

使用したフェムト秒レーザーの波長は 800 nm、干渉角は 90°、干渉のピッチは 560 nm である。

レーザーの偏向方向は、干渉する 2 本のレーザーを含む面に垂直である（以下、S 偏向干渉と呼ぶ。）。

図 1 3 は、S 偏向状態を表す模式図である。S 偏向状態は、干渉角に関わらず、常に 2 本のビームの偏向方向が一致する。

したがって、図 1 4 で示されるように、S 偏向状態は、干渉のピーク 16（腹）とボトム 17（節）の差、すなわち干渉のコントラストが最も得られる状態であり、干渉を用いたプロセスで一般的に用いられる偏向状態である。

図 1 2 から明らかなように、加工されたニッケルの表面には多数のリップルが発生しており、それらリップルに阻害されて目標とするピッチ 560 nm のグレーティングは加工できていない。

このようなリップル（表面波）による加工の乱れ及び破壊を解消する方法として、円偏光若しくは楕円偏光をした光を用いることが考えられる。

これらの円偏光若しくは楕円偏光による偏光状態を使用することで、発生するリップルの周期方向を偏光方向の回転に伴って回転させ、見かけ上は、リップルを消すようにすることは可能である。

しかしながら、この方法によるリップルの除去方法は、リップルが回転することによりそのピッチが見えなくなっているにすぎず、直線偏光で加工した場合よりも加工される領域が著しく大きくなってしまうこととなる。

したがって、実質上、サブミクロンサイズの加工には用いることはできない。

また、この円偏光若しくは楕円偏光を用いた加工は、干渉や位相マスクを用いた結像光学系など、偏光方向が強く影響している光学系には使用することができない。

【0012】

本発明は、上記課題に鑑み、アブレーション加工、物質表面の改質、あるいはレジストの露光等レーザー干渉による加工、特にパルス幅が1 fs以上1 ps以下のパルスレーザーを用いたレーザー干渉による加工において、

表面波による乱れを抑制することが可能となる加工方法及び該加工方法で加工された回折格子、反射防止構造を提供することを目的とするものである。

【課題を解決するための手段】

【0013】

本発明は、上記課題を解決するため、つぎのように構成した加工方法及び該加工方法で加工された回折格子、反射防止構造を提供するものである。

すなわち、本発明の加工方法は、レーザーの干渉を用いて被加工物を加工する加工方法であって、

前記被加工物の表面で前記レーザーの干渉のピッチよりも前記レーザーの干渉の周期方向に伝播する表面波の波長が長くなるように、前記レーザーを調整して、前記被加工物を加工することを特徴としている。

また、本発明の回折格子は、上記に記載のレーザー干渉による加工方法で加工されたことを特徴としている。

また、本発明の反射防止構造は、上記に記載のレーザー干渉による加工方法で加工されたことを特徴としている。

【発明の効果】

【0014】

本発明によれば、レーザー干渉による加工、特にパルス幅が1 fs以上1 ps以下のパルスレーザーを用いたレーザー干渉による加工において、表面波による乱れを抑制することが可能となる加工を実現することができる。

例えばアブレーション加工、物質表面の改質、あるいはレジストの露光等のレーザー干渉による加工を実現することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0015】

本発明は、上記した構成により、表面波による乱れを抑制することが可能となる加工を実現することができるが、それは本発明者が鋭意検討した結果によるつぎのような知見に基づくものである。

前述したようにリップルによる加工の乱れ（破壊）は、干渉光を部材に照射した場合にも発生する。

しかし、本発明者はこれらを詳細に検討することにより、つぎのような現象を見出した。レーザーの干渉のピッチ（ d ）が、干渉の周期方向に伝播する表面波の波長、すなわち $2\pi/k_{SEW}$ よりも小さければ、干渉のピッチを跨いだリップルは発生し難く、リップルの発生による加工の乱れ（破壊）を抑制することができる。この現象は、表面波の波長がレーザーの干渉のピッチよりも長いために、表面波の位相が決まり難く、表面波の発生が抑制されたものと考えられる。干渉の周期方向と干渉の周期との関係は図14に示す。

【0016】

これらの現象の詳細を説明する前に、まず、本実施の形態で用いられる干渉加工装置について説明する。

図1に、本実施の形態で用いられるフェムト秒レーザーによる干渉加工装置の構成を示す。

図1において、1はフェムト秒レーザー発振器、2は倍波ユニット、3、4、7、8はミラー、5はビームスピリッターである。

また、6は光路長調整器、9、10はレンズ、11、12は波長板、13は分光器、14は顕微鏡、15はCCDである。

発振器1はチタン・サファイア結晶の再生増幅システムからなり、ここでは発振レーザーの波長は800 nm、パルス幅は100 fs、パルスの繰り返し周波数は1 kHzのパルスレーザーを用い、グレーティングを加工した。

ここではパルス幅 100 fs のものを用いたが、パルス幅は 1 fs (10^{-15} 秒) 以上、 1 ps (10^{-12} 秒) 以下のレーザーであればよい。

1 fs (10^{-15} 秒) 以上であれば、加工に必要なエネルギーが得られ、パルス幅が 1 ps 以下であれば、一般に熱拡散の大きな金属でも、熱の拡散距離は 10 nm 程度であり、光の波長より小さい構造を加工できる。

【0017】

発振器 1 を出たレーザーは倍波結晶ユニット 2 を通過し、2 倍波 (400 nm) 及び 3 倍波 (266 nm) に変調される。

加工するグレーティングのピッチに応じて、ミラー 3 をスライドさせることにより、基本波、2 倍波、3 倍波の中から、レーザーの波長を選択することができる。

倍波ユニットを通過した後、レーザー光は非偏光ビームスプリッター 5 により分割される。分割されたレーザーの一方は光路長調整器 6 を通り、他方のレーザーと点 D (干渉点) で重なり合う。

100 fs のパルス幅は大気中で $30\text{ }\mu\text{m}$ のパルス幅に相当するため、フェムト秒レーザーを干渉させるためには、 $30\text{ }\mu\text{m}$ 以内で光路長 A B C D 及び A E F D を一致させる必要がある。

本実施の形態の装置では、光路調整器の位置を矢印方向に移動させ、線分 A B 及び線分 C D の長さを変化させることにより、光路長を一致させるように構成されている。

【0018】

光路長が一致したか否かは、波長 800 nm を選択した場合、エアーブレイクダウンによる 3 倍波 ($\lambda\text{ }266\text{ nm}$) の発光強度の変化により確認できる。

また、2 倍波 ($\lambda\text{ }400\text{ nm}$) 若しくは 3 倍波 ($\lambda\text{ }266\text{ nm}$) を選択した場合は、点 D に厚さ 1 mm のシリカガラスを置き、非線形効果による吸収率の変化を測定することにより、光路長が一致したか否かの確認が行える。

光路 A B C D 及び A E F C には $\lambda/2$ 波長板 1 1、1 2 が挿入されており、波長板を光軸を中心として所望の角度に回転させることで加工の際に、両レーザーの偏光方向を自由に変えることができる。

顕微鏡 1 4 と C C D 1 5 は、被加工物の表面を観察する為の観察系である。図が煩雑になることを避けるため、ここではエネルギーを調整するためのフィルター及びパルス数を調整するためのシャッターは描かれていない。

図 1 では、点 A においてレーザーは 90° の角度で交わっているが、ミラーの位置を移動させることにより、レーザーの交差角度 (θ) を任意に制御することができる。

レーザーの交差角 θ 、レーザーの波長 λ と干渉のピッチ d の関係は、つぎの式 (4) で表される。

$$d = \frac{\lambda}{2\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \dots\dots\dots (4)$$

【0019】

ここで、光路長を一致させて干渉が起きることを確認し、波長板 1 1、1 2 により偏光方向を調整した後、点 D に被加工物を置き、適当なエネルギーのパルスを適当な数だけ照射することによって、グレーティングの加工を行う。

【0020】

つぎに、上記干渉加工装置による加工での表面波の発生の抑制について説明する。

図 2 及び図 3 に、表面波が抑制される様子を描いた模式図を示す。

表面波は部材に照射されたレーザーにより励起され、入射レーザーの強度が大きいほど、その振幅が大きい。

したがって、干渉光を部材に照射した場合は、干渉光の腹で表面波は最大となり、節に近づくにつれてその振幅は小さくなる。

図2は、干渉のピッチが、表面波の波長よりも長い場合の表面波の振幅強度分布を表している。干渉光の各腹で励起された表面波は、減衰しながら干渉の節に近づき、別の干渉の腹で励起された表面波と重なり合う。

しかし、図2の条件の場合、隣り合う干渉の腹から伝播する表面波は、節で他の表面波と重なり合う前に、1つ以上のピークを持つ。その表面波のピークによって、加工パターン及び改質パターンが乱されてしまう。

【0021】

図3は、表面波の波長が干渉のピッチよりも長い場合の表面波の振幅強度分布を表している。図2の場合と同様に、干渉の腹で励起された表面波は、干渉の節で重なり合う。

しかし、図3のように表面波の波長が干渉のピッチよりも長い場合、隣り合った干渉の腹で励起された表面波は、一波長進む前に別の表面波と重なり合い、互いに打ち消しあう。したがって、表面波の波長が干渉のピッチよりも長い場合には、干渉の周期方向には表面波が伝播することなく、表面波の影響を抑制した加工を行うことができる。

【0022】

以上のことから、本発明においては、レーザーの干渉の周期方向に伝播する表面波の波長を、レーザーの干渉のピッチよりも長く設定して被加工物を加工することで、表面波による乱れを抑制するようにしたものである。

具体的には、干渉の周期方向に伝播する表面波の波数 k_{SEW} と干渉のピッチ d が、つぎの式(5)の条件を満たすようにすることで、上記した本発明の表面波による乱れを抑制することが可能となる加工が実現される。

$$d < \frac{2\pi}{k_{SEW}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

【実施例】

【0023】

以下に、本発明の実施例について説明する。

本実施例においては、上記した図1の干渉加工装置を用い、アブレーションによって、干渉レーザーのピーク強度が、被加工物のアブレーション閾値よりも大きくなるようにレーザーのパワーを調整し、干渉レーザーを被加工物に照射した。そして干渉ピッチと同ピッチのグレーティングを、被加工物に直接作製した。

図8と図9に、本実施例においてアブレーションにより製作されたニッケル(Ni)の干渉加工痕のSEM像を示す。

図8は、本実施例に用いられる図1の干渉加工装置での点Aにおけるレーザーの交差角度 θ を 30° とした場合のニッケル(Ni)の干渉加工痕のSEM像である。

図8(a)はS偏光入射によるグレーティングのSEM像であり、図8(b)はP偏光入射によるグレーティングのSEM像である。

また、図9は、本実施例に用いられる図1の干渉加工装置での点Aにおけるレーザーの交差角度 θ を 90° とした場合のNiの干渉加工痕のSEM像である。図9(a)はS偏光入射によるグレーティングのSEM像であり、図9(b)はP偏光入射によるグレーティングのSEM像である。

【0024】

図8(a)と図9(a)のグレーティングを加工する際、加工に用いたレーザーの偏光方向は、干渉の周期方向と直交するように調整した。

すなわち、図8(a)と図9(a)の場合には、図10(a)に示すように、レーザー干渉にS偏光を用いた。

これに対して、図8(b)と図9(b)の場合には、レーザーの偏光方向は、干渉の周期方向と平行となるように調整した。すなわち、ここでは図10(b)に示すように、レーザー干渉にP偏光を用いた。

表 2 に、図 8 と図 9 で示した加工における干渉ピッチ、レーザーの偏光方向及び表面波の波長（ λ_{SEW} ）、等をまとめて示す。

【 0 0 2 5 】

【表 2】

	図 8 (a)	図 8 (b)	図 9 (a)	図 9 (b)
干渉ピッチ (ビーム交差角)	1545 nm ($\theta = 30^\circ$)	1545 nm ($\theta = 30^\circ$)	565 nm ($\theta = 90^\circ$)	565 nm ($\theta = 90^\circ$)
ビームの偏光方向	干渉周期方向と 直角 (S偏光)	干渉周期方向と 平行 (P偏光)	干渉周期方向と 直角 (S偏光)	干渉周期方向と 平行 (P偏光)
表面波の伝播方向				
表面波 1 (偏光方向に伝播) $k_{SEW} = 3.24 \times 10^{-3}$ (1/nm) $\lambda_{SEW} = 1940$ (nm)	干渉周期方向と 平行	干渉周期方向と 直角	干渉周期方向と 平行	干渉周期方向と 直角
表面波 2 (偏光方向と直角に伝播) $k_{SEW} = 8.60 \times 10^{-3}$ (1/nm) $\lambda_{SEW} = 730$ (nm)	干渉周期方向と 直角	干渉周期方向と 平行	干渉周期方向と 直角	干渉周期方向と 平行
表面波 3 (偏光方向に伝播) $k_{SEW} = 14.6 \sim 52.3 \times 10^{-3}$ (1/nm) $\lambda_{SEW} = 120 \sim 430$ (nm)	干渉周期方向と 平行	干渉周期方向と 直角	干渉周期方向と 平行	干渉周期方向と 直角

【 0 0 2 6 】

ここで、表 2 における表面波の波長は、表 1 にまとめた表面波の波数（ k_{SEW} ）を用いることにより、つぎの式（6）から求められる。

$$\lambda_{SEW} = \frac{2\pi}{k_{SEW}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

【 0 0 2 7 】

図 8 と図 9 から明らかなように、図 9 (b) 以外の、図 8 (a)、図 8 (b)、図 9 (a) における全てのグレーティングは、リップルの発生により激しく損傷を受けている。これら図 8 (a)、図 8 (b)、図 9 (a) のグレーティング破壊は、以下のように理解できる。

まず、図8(a)と図9(a)では、干渉の周期方向と偏光方向とは平行であり、干渉の周期方向と平行に表面波3が伝播している。

表面波3の波長は120~430nmであり、図8(a)の干渉ピッチ(1545nm)と図9(a)の干渉ピッチ(565nm)よりも周期が短い。

その為、表面波は抑制されることなく伝播し、グレーティングが破壊されてしまったと理解できる。

実際に、図8(a)及び図9(a)では、表面波3によるリップルらしきものが確認できる。

また、図8(b)では、干渉の周期方向と平行に表面波2が発生している。表面波2の波長は730nmであり、干渉ピッチ(1545nm)よりも短い。

その結果、図8(a)及び図9(a)と同様に、リップルによるグレーティングの破壊が起きたと考えられる。

図9(a)では、表面波2のリップルの発生がはっきり確認できる。

【0028】

一方、図9(b)では、リップルに破壊されることなく、グレーティングが形成されている。図9(b)の場合、図8(b)と同様に表面波2の伝播方向が干渉の周期方向と平行に伝播していると考えられる。

しかし、表面波の波長(730nm)が干渉の周期(565nm)よりも長いため、隣接する干渉の腹で励起された表面波は互いに打ち消しあい、その結果、リップルにより破壊されずにグレーティングが形成されたと考えられる。

また、図9(b)の条件では、干渉の周期方向と直交して、表面波1及び表面波3が伝播している筈である。しかし、これら干渉の周期方向と直交して伝播する表面波は、グレーティングの形状には殆ど影響を及ぼさない。

この実施例から明らかなように、干渉でアブレーション加工を行う場合、表面波の波長がそれに平行する干渉の周期よりも長ければ、隣接する干渉の腹により励起された表面波は互いに打ち消し合い、表面波による加工の破壊を防ぐことができる。

【0029】

図11は、図9(b)と同じ偏光条件及びレーザー交差角で、2倍波(波長400nm)により加工を行った場合のグレーティングである。

ニッケルの場合、2倍波(波長400nm)を使用すると、干渉の周期及び表面波の周期は、共に基本波(800nm)の場合の半分になる。

したがって、干渉の周期は290nmとなり、図9(b)と同様に、本発明の条件を満たしている。

図11では、基本波(波長800nm)を使用した図9(b)のときと同様に、リップルによるグレーティングの破壊は見られない。

以上に述べた過程を経て作成した図9(b)に示したグレーティング(ピッチ565nm)に対して垂直に波長400nmの光を入射させたところ、45°の方向に1次回折光が確認された。

これは該グレーティングが反射型回折格子として機能していることを示している。

また、図11に示したグレーティング構造(ピッチ290nm)を型としてポリオレフィン樹脂に加熱転写させた。転写された樹脂表面には幅80nm、高さ130nmの断面がピッチ290nmで並んだ周期構造が得られた。

該転写成形品の表面反射率を調べたところ、波長600~800nmの垂直入射光に対して反射率1.2%以下であった。

一般に表面研磨したポリオレフィンの表面反射は4.2%(波長780nm)である。該転写成形品はピッチ290nmの2倍以上の波長に対して十分な反射防止効果を有している。

以上述べたような加工法を応用し、たとえば波長266nmの3倍高調波を利用すれば133nmまでのピッチを有するグレーティングを製作することも可能である。

それを用いて、可視光全域において反射防止効果を有する微細構造である反射防止構造を

10

20

30

40

50

透明部材の表面に形成することも可能である。

【0030】

このように、本発明は、使用するレーザーの波長を800nmに限定したものではなく、あらゆる波長に対して有効である。

また、上記式(4)から明らかなように、干渉のピッチはレーザーの交差角(θ)と波長(λ)の両方に依存している。

そのためレーザーの交差角と波長をそれぞれ適当に選ぶことにより、本発明を満たした所望ピッチのグレーティングを加工する条件を見出すことができる。

例えば、波長 $\lambda = 400\text{nm}$ のレーザーを入射した場合、波長が300nmの表面波が発生する物質があるとする。この物質の表面にピッチ500nmのグレーティングを加工する場合、 $\lambda = 400\text{nm}$ のレーザーを用いると本発明の条件を満たさない。しかし、表面波の波長は、一般的に入射レーザーの波長に比例するので、波長 $\lambda = 800\text{nm}$ のレーザー干渉を用いれば発生する表面波の波長は600nmとなり、グレーティングのピッチ500nmよりも大きくなり、本発明の条件を満たすことができる。

また、本実施例では、被加工物としてニッケル(Ni)を用いているが、他の物質を被加工物とした場合でも、その表面に発生する表面波に対して、本発明を適応することができる。被加工物の表面に発生する表面波の波長は、本発明での上記説明と同様に、被加工物の表面と直角に適切なパワーのレーザーを入射することにより容易に測定することができる。

【0031】

また、レーザー研究 2000年12月 p. 824及び精密工学会誌Vol. 69、No. 4 2003には、金属及び半導体においては表面波の発生メカニズムは同じであることが述べられている。

そして、干渉の周期方向に伝播する表面波の波長は物質によってあまり差がなく、波長と同程度であることが述べられている。

したがって、金属及び半導体の形成面においては、本実施例と同様にp偏光の干渉レーザーを照射することにより、表面波の発生を抑え、サブミクロンのグレーティングをアブレーション加工することができる。

また、本実施例では、加工法としてアブレーション加工を取り上げたが、本発明によるリップルの抑制効果はこのような加工法に限定されたものではない。

例えば、干渉を用いたFiber Bragg Grating (FBG)のようなレーザーによる物質表面の改質にも適用することができる。

これは、ファイバーの上に設置された回折格子を通過したレーザー光を干渉させ、ファイバーに照射する。一般的に、ガラス及びある種の透明プラスチックは、強い強度の光が照射されると内部構造が変わり、屈折率が変化する。

この性質を利用して、干渉光を照射することにより、ファイバー内部に周期的な屈折率変化を作るものである。

このようなレーザーによる物質表面の改質においても、本発明によるリップルの抑制効果は有効である。

また、レジスト膜に干渉させたレーザーを照射することにより、周期的にレジスト膜表面を露光し改質する、干渉を用いたレジストの露光、等にも適用することができる。

【図面の簡単な説明】

【0032】

【図1】本発明で用いられるレーザー干渉装置の構成を示す模式図。

【図2】本発明の原理を示す概念図。

【図3】本発明の原理を示す概念図。

【図4】レーザー照射ガスエッチングでGaAsをエッチングした際に発生するリップルのSEM像であり、(a)はP偏光入射によるリップルのSEM像、(b)はS偏光入射によるリップルのSEM像を示す図。

【図5】図4(a)、(b)における偏光状態によるリップルの発生の違いを説明するた

めの図であり、(a)はP偏光入射、(b)はS偏光入射を示す図。

【図6】フェムト秒レーザーでダイヤモンドをアブレーション加工した際に発生するリップルのSEM像を示す図。

【図7】フェムト秒レーザーでNiをアブレーション加工した際に発生するリップルのSEM像を示す図。

【図8】本発明の実施例におけるレーザーの交差角 θ を 30° とした場合のNiの干渉加工痕のSEM像であり、(a)はS偏光入射によるリップルのSEM像、(b)はP偏光入射によるグレーティングのSEM像を示す図。

【図9】本発明の実施例におけるレーザーの交差角 θ を 90° とした場合のNiの干渉加工痕のSEM像であり、(a)はS偏光入射によるリップルのSEM像、(b)はP偏光入射によるグレーティングのSEM像を示す図。

10

【図10】図8(a)、(b)及び図9(a)、(b)における偏光状態によるリップルの発生の違いを説明するための図であり、(a)はS偏光入射、(b)はP偏光入射を示す図。

【図11】本発明の実施例におけるNiの干渉加工痕のSEM像を示す図。

【図12】干渉させたフェムト秒レーザーをニッケルの表面に照射し、アブレーションによって干渉と同ピッチのグレーティングを製作しようとした場合のニッケル表面のSEM像を示す図。

【図13】干渉を用いたプロセスで一般的に用いられる偏向状態であるS偏向状態を示す模式図。

20

【図14】S偏向状態では、干渉角に関わらず常に2本のビームの偏向方向が一致するため、干渉のコントラストが最も得られる偏向状態であることを説明する図。

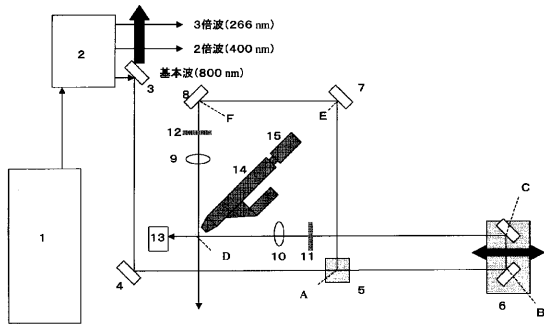
【符号の説明】

【0033】

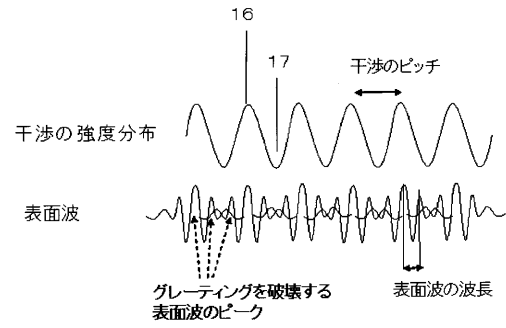
- 1：フェムト秒レーザー発振器
- 2：倍波結晶ユニット
- 3、4、7、8：ミラー
- 5：ビームスピリッター
- 6：光路長調整器
- 9、10：レンズ
- 11、12：波長板
- 13：分光器
- 14：顕微鏡
- 15：CCD
- 16：干渉の腹
- 17：干渉の節

30

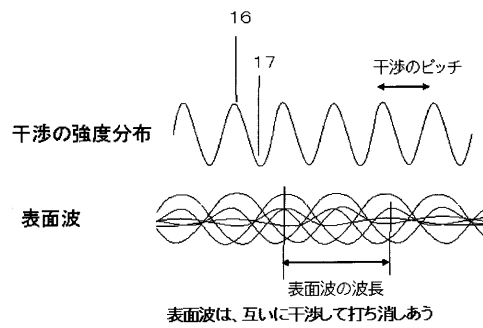
【図 1】



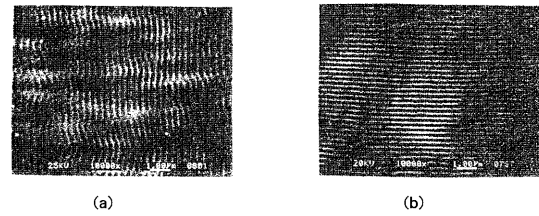
【図 2】



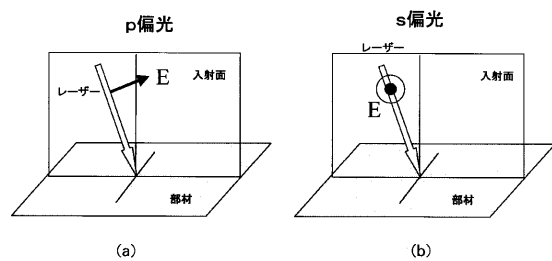
【図 3】



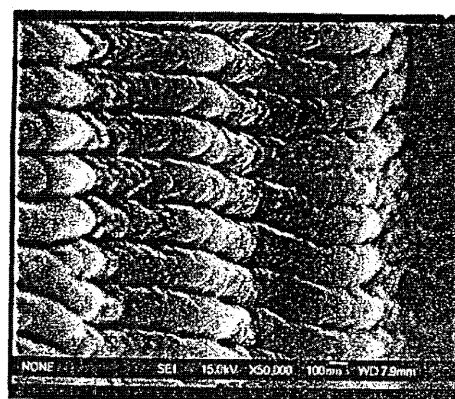
【図 4】



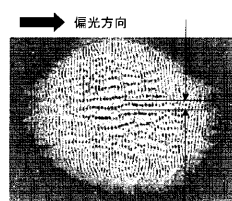
【図 5】



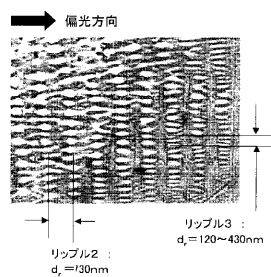
【図 6】



【図 7】



(a)

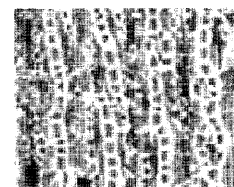


(b)

【図 8】

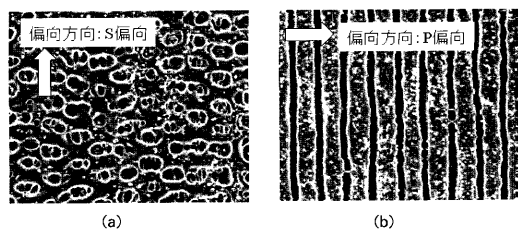


(a)

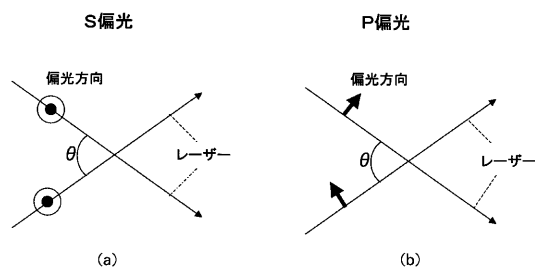


(b)

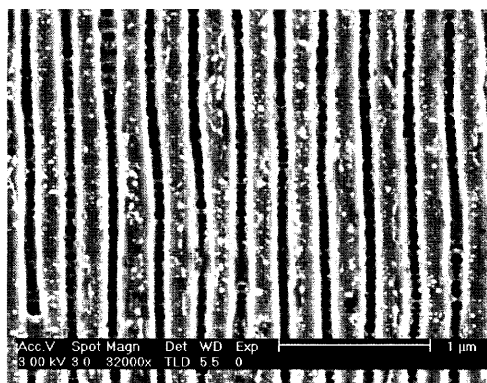
【図 9】



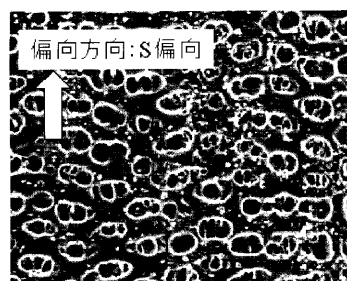
【図 10】



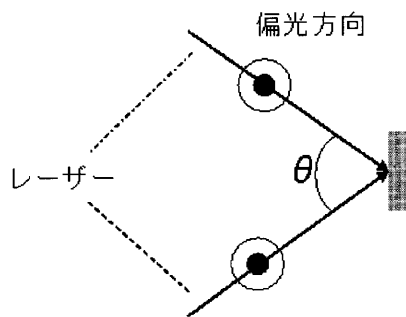
【図 11】



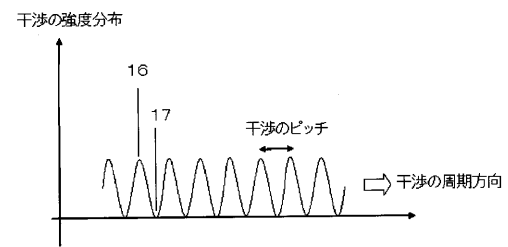
【図 12】



【図 1 3】



【図 1 4】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
B 2 3 K 101:40

(56)参考文献 特開昭61-063389 (JP, A)
特開昭62-220919 (JP, A)
特開平11-170073 (JP, A)
特開2000-252610 (JP, A)
特開2004-038017 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
B 2 3 K 26/00- 26/42
G 0 2 B 1/11
G 0 2 B 5/18