(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7590708号
(P7590708)

(45)発行日　令和6年11月27日(2024.11.27)

(24)登録日　令和6年11月19日(2024.11.19)

(51)国際特許分類

		FI		
Ｂ２３Ｋ　26/352 (2014.01)		Ｂ２３Ｋ	26/352	
Ｂ２３Ｋ　26/00　(2014.01)		Ｂ２３Ｋ	26/00	Ｈ
Ｂ２３Ｋ　26/359 (2014.01)		Ｂ２３Ｋ	26/359	
Ｂ２３Ｋ　26/364 (2014.01)		Ｂ２３Ｋ	26/364	
Ｂ２３Ｋ　26/382 (2014.01)		Ｂ２３Ｋ	26/382	

請求項の数　11　（全19頁）

(21)出願番号　特願2020-195528(P2020-195528)
(22)出願日　令和2年11月25日(2020.11.25)
(65)公開番号　特開2021-91007(P2021-91007A)
(43)公開日　令和3年6月17日(2021.6.17)
審査請求日　令和5年11月21日(2023.11.21)
(31)優先権主張番号　特願2019-215176(P2019-215176)
(32)優先日　令和1年11月28日(2019.11.28)
(33)優先権主張国・地域又は機関
日本国(JP)
（出願人による申告）令和元年度、文部科学省、光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Ｑ－ＬＥＡＰ）事業「光量子科学によるものづくりＣＰＳ化拠点」、「先端ビームによる微細構造物形成過程解明のためのオペランド計測」委託研究、産業技術力強化法第１７条の適用を受ける特許出願

(73)特許権者　301032942
国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目９番１号
(73)特許権者　304036743
国立大学法人宇都宮大学
栃木県宇都宮市峰町３５０番地
(73)特許権者　504137912
国立大学法人 東京大学
東京都文京区本郷七丁目３番１号
(74)代理人　110000338
弁理士法人 ＨＡＲＡＫＥＮＺＯ ＷＯＲＬＤ ＰＡＴＥＮＴ ＆ ＴＲＡＤＥＭＡＲＫ
(72)発明者　石野 雅彦

最終頁に続く

(54)【発明の名称】　表面造形方法及び表面造形装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

ターゲットの表面を構成する材料の内殻吸収端に対応する波長に応じて、前記表面に照射するＸ線レーザの波長である照射波長を１ｎｍ以上２００ｎｍ以下の範囲から選択する波長選択工程と、

前記表面に施す表面造形の態様に応じて、前記Ｘ線レーザのエネルギー密度である照射エネルギー密度を選択する照射密度選択工程と、

前記照射波長及び前記照射エネルギー密度を有し、且つ、パルス幅が1×10^{-18}秒以上1×10^{-10}秒以下の範囲に含まれるＸ線レーザを前記表面に照射する照射工程と、を含む、

ことを特徴とする表面造形方法。

【請求項２】

前記表面造形の態様が細孔の形成である場合、

前記波長選択工程は、前記内殻吸収端に対応する波長より短い波長を前記照射波長として選択し、

前記照射密度選択工程は、予め定められた加工閾値を上回るエネルギー密度を前記照射エネルギー密度として選択する、

ことを特徴とする請求項１に記載の表面造形方法。

【請求項３】

前記表面造形の態様がホログラフィックな模様の形成である場合、

スリットを通過することによって、前記Ｘ線レーザから回折Ｘ線レーザを得る回折工程を更に含み、
前記波長選択工程は、前記内殻吸収端に対応する波長より短い波長を前記照射波長として選択し、
前記照射密度選択工程は、予め定められた加工閾値の９０％を上回るエネルギー密度を前記照射エネルギー密度として選択し、
前記照射工程は、前記照射波長及び前記照射エネルギー密度を有し、且つ、パルス幅が１×１０$^{-18}$秒以上１×１０$^{-10}$秒以下の範囲に含まれる前記回折Ｘ線レーザを前記表面に照射する、
ことを特徴とする請求項１に記載の表面造形方法。

【請求項４】
前記表面造形の態様が格子模様の形成である場合、
前記波長選択工程は、前記内殻吸収端に対応する波長より短い波長を前記照射波長として選択し、
前記照射密度選択工程は、予め定められた加工閾値を下回るエネルギー密度を前記照射エネルギー密度として選択し、
前記照射工程は、前記照射波長及び前記照射エネルギー密度を有し、且つ、パルス幅が１×１０$^{-18}$秒以上１×１０$^{-10}$秒以下の範囲に含まれる前記Ｘ線レーザを、複数ショット前記表面に照射する、
ことを特徴とする請求項１に記載の表面造形方法。

【請求項５】
前記材料は、シリコン又は窒化シリコンである、
ことを特徴とする請求項１～４の何れか１項に記載の表面造形方法。

【請求項６】
ターゲットの表面にＸ線レーザを照射する表面造形装置であって、
前記表面を構成する材料の内殻吸収端に対応する波長に応じて、前記Ｘ線レーザの波長である照射波長を１ｎｍ以上２００ｎｍ以下の範囲から選択する波長選択部と、
前記表面に施す表面造形の態様に応じて、前記Ｘ線レーザのエネルギー密度である照射エネルギー密度を選択する照射密度選択部と、
前記照射波長及び前記照射エネルギー密度を有し、且つ、パルス幅が１×１０$^{-18}$秒以上１×１０$^{-10}$秒以下の範囲に含まれるＸ線レーザを前記表面に照射する照射機構と、を備えている、
ことを特徴とする表面造形装置。

【請求項７】
前記表面造形の態様が細孔の形成である場合、
前記波長選択部は、前記内殻吸収端に対応する波長より短い波長を前記照射波長として選択し、
前記照射密度選択部は、予め定められた加工閾値を上回るエネルギー密度を前記照射エネルギー密度として選択する、
ことを特徴とする請求項６に記載の表面造形装置。

【請求項８】
前記表面造形の態様がホログラフィックな模様の形成である場合、
前記Ｘ線レーザを通過させることによって回折Ｘ線レーザを得るスリットを更に備え、
前記波長選択部は、前記内殻吸収端に対応する波長より短い波長を前記照射波長として選択し、
前記照射密度選択部は、予め定められた加工閾値の９０％を上回るエネルギー密度を前記照射エネルギー密度として選択し、
前記照射機構は、前記照射波長及び前記照射エネルギー密度を有し、且つ、パルス幅が１×１０$^{-18}$秒以上１×１０$^{-10}$秒以下の範囲に含まれる前記回折Ｘ線レーザを前記表面に照射する、

ことを特徴とする請求項６に記載の表面造形装置。
【請求項９】
前記表面造形の態様が格子模様の形成である場合、
前記波長選択部は、前記内殻吸収端に対応する波長より短い波長を前記照射波長として選択し、
前記照射密度選択部は、予め定められた加工閾値を下回るエネルギー密度を前記照射エネルギー密度として選択し、
前記照射機構は、前記照射波長及び前記照射エネルギー密度を有し、且つ、パルス幅が１×１０^{-１８}秒以上１×１０^{-１０}秒以下の範囲に含まれる前記Ｘ線レーザを、複数ショット前記表面に照射する、
ことを特徴とする請求項６に記載の表面造形装置。
【請求項１０】
前記Ｘ線レーザを生成するＸ線レーザ光源と、
前記Ｘ線レーザ光源を制御する光源制御部と、
Ｘ線フィルタと、を更に備え、
前記光源制御部は、前記Ｘ線レーザの波長が前記照射波長となるように前記Ｘ線レーザ光源を制御し、
前記Ｘ線フィルタは、前記Ｘ線レーザのエネルギー密度が前記照射エネルギー密度に近づくように、前記Ｘ線レーザの強度を低下させる、
ことを特徴とする請求項６～９の何れか１項に記載の表面造形装置。
【請求項１１】
前記Ｘ線レーザ光源は、前記Ｘ線レーザの波長を、少なくとも１ｎｍ以上２００ｎｍ以下の範囲において変化させることができる波長可変レーザ光源であり、
前記Ｘ線フィルタは、前記表面における照射スポットにおけるエネルギー密度を、少なくとも１０ｍＪ／ｃｍ^{2}以上の範囲において変化させる、
ことを特徴とする請求項１０に記載の表面造形装置。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、表面造形方法及び表面造形装置に関する。
【背景技術】
【０００２】
現在、解像度１０ｎｍ以下の表面造形技術は、いわゆる低強度・低温造形プロセスを用いたリソグラフィによって実現されている。
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【０００３】
しかしながら、リソグラフィプロセスでは、パターンの造形にあたって露光から現像までに多数の工程が含まれているため、さらなる量産化や低価格化を実現するためには、より単純なプロセスを用いた直接的な精密加工技術（換言すれば表面造形方法）が必要とされている。
【課題を解決するための手段】
【０００４】
上記の課題を解決するために、本発明の第１の態様に係る表面造形方法は、ターゲットの表面を構成する材料の内殻吸収端に対応する波長に応じて、前記表面に照射するＸ線レーザの波長である照射波長を１ｎｍ以上２００ｎｍ以下の範囲から選択する波長選択工程と、前記表面に施す表面造形の態様に応じて、前記Ｘ線レーザのエネルギー密度である照射エネルギー密度を選択する照射密度選択工程と、前記照射波長及び前記照射エネルギー密度を有し、且つ、パルス幅が１×１０^{-１８}秒以上１×１０^{-１０}秒以下の範囲に含まれるＸ線レーザを前記表面に照射する照射工程と、を含む。

【０００５】
上記の構成によれば、照射波長が１ｎｍ以上２００ｎｍ以下の範囲の何れかであり、且つ、パルス幅が１×１０$^{-18}$秒以上１×１０$^{-10}$秒以下の範囲の何れかであり、且つ、照射エネルギー密度が適宜選択されたＸ線レーザをターゲットの表面に照射することによって、前記表面に表面造形を施すことができる。本表面造形方法は、従来のリソグラフィプロセスのように複数のプロセスを必要しないので、リソグラフィプロセスと比較して、より単純であり、且つ、より直接的な表面造形方法である。
【０００６】
本発明の第２の態様に係る表面造形方法は、上述した第１の態様に係る表面造形方法の構成に加えて、前記表面造形の態様が細孔の形成である場合、前記波長選択工程は、前記内殻吸収端に対応する波長より短い波長を前記照射波長として選択し、前記照射密度選択工程は、予め定められた加工閾値を上回るエネルギー密度を前記照射エネルギー密度として選択する、構成が採用されている。
【０００７】
上記の構成によれば、ターゲットの表面のうちＸ線レーザを照射した照射領域の外縁近傍にリム部の生成が抑制された細孔を形成することができる。なお、本願明細書において、リム部とは、細孔の縁の外側近傍に環状に生じ得る盛りあがった部分のこと、すなわち熱影響を受けた意図しない構造を有する部分のことを指す。なお、熱影響を受けた意図しない構造を有する部分のことをＨＡＺ（Heat Affected Zone）と呼ぶこともある。
【０００８】
本発明の第３の態様に係る表面造形方法は、上述した第１の態様に係る表面造形方法の構成に加えて、前記表面造形の態様がホログラフィックな模様の形成である場合、スリット等の回折光学素子を通過することによって、前記Ｘ線レーザから回折Ｘ線レーザを得る回折工程を更に含み、前記波長選択工程は、前記内殻吸収端に対応する波長より短い波長を前記照射波長として選択し、前記照射密度選択工程は、予め定められた加工閾値の９０％を上回るエネルギー密度を前記照射エネルギー密度として選択し、前記照射工程は、前記照射波長及び前記照射エネルギー密度を有し、且つ、パルス幅が１×１０$^{-18}$秒以上１×１０$^{-10}$秒以下の範囲に含まれる前記回折Ｘ線レーザを前記表面に照射する、構成が採用されている。
【０００９】
上記の構成によれば、ターゲットの表面のうちＸ線レーザを照射した照射領域にホログラフィックな模様を形成することができる。
【００１０】
本発明の第４の態様に係る表面造形方法は、上述した第１の態様に係る表面造形方法の構成に加えて、前記表面造形の態様が格子模様の形成である場合、前記波長選択工程は、前記内殻吸収端に対応する波長より短い波長を前記照射波長として選択し、前記照射密度選択工程は、予め定められた加工閾値を下回るエネルギー密度を前記照射エネルギー密度として選択し、前記照射工程は、前記照射波長及び前記照射エネルギー密度を有し、且つ、パルス幅が１×１０$^{-18}$秒以上１×１０$^{-10}$秒以下の範囲に含まれる前記Ｘ線レーザを、複数ショット前記表面に照射する、構成が採用されている。
【００１１】
上記の構成によれば、ターゲットの表面のうちＸ線レーザを照射した照射領域に格子模様を形成することができる。
【００１２】
本発明の第５の態様に係る表面造形方法は、上述した第１の態様～第４の態様の何れか一態様の構成に加えて、前記材料は、シリコン又は窒化シリコンである、構成が採用されている。
【００１３】
このように、ターゲットの材料としてはシリコン又は窒化シリコンが好適である。
【００１４】

上記の課題を解決するために、本発明の第６の態様に係る表面造形装置は、ターゲットの表面にＸ線レーザを照射する表面造形装置であって、前記表面を構成する材料の内殻吸収端に対応する波長に応じて、前記Ｘ線レーザの波長である照射波長を１ｎｍ以上２００ｎｍ以下の範囲から選択する波長選択部と、前記表面に施す表面造形の態様に応じて、前記Ｘ線レーザのエネルギー密度である照射エネルギー密度を選択する照射密度選択部と、前記照射波長及び前記照射エネルギー密度を有し、且つ、パルス幅が１×１０^{-１８}秒以上１×１０^{-１０}秒以下の範囲に含まれるＸ線レーザを前記表面に照射する照射機構と、を備えている。

【００１５】

上記の構成によれば、本発明の第１の態様に係る表面造形方法と同じ効果を奏する。

【００１６】

本発明の第７の態様に係る表面造形装置は、上述した第６の態様に係る表面造形装置の構成に加えて、前記表面造形の態様が細孔の形成である場合、前記波長選択部は、前記内殻吸収端に対応する波長より短い波長を前記照射波長として選択し、前記照射密度選択部は、予め定められた加工閾値を上回るエネルギー密度を前記照射エネルギー密度として選択する、構成が採用されている。

【００１７】

上記の構成によれば、本発明の第２の態様に係る表面造形方法と同じ効果を奏する。

【００１８】

本発明の第８の態様に係る表面造形装置は、上述した第６の態様に係る表面造形装置の構成に加えて、前記表面造形の態様がホログラフィックな模様の形成である場合、前記Ｘ線レーザを通過させることによって回折Ｘ線レーザを得るスリットを更に備え、前記波長選択部は、前記内殻吸収端に対応する波長より短い波長を前記照射波長として選択し、前記照射密度選択部は、予め定められた加工閾値の９０％を上回るエネルギー密度を前記照射エネルギー密度として選択し、前記照射機構は、前記照射波長及び前記照射エネルギー密度を有し、且つ、パルス幅が１×１０^{-１８}秒以上１×１０^{-１０}秒以下の範囲に含まれる前記回折Ｘ線レーザを前記表面に照射する、構成が採用されている。

【００１９】

上記の構成によれば、本発明の第３の態様に係る表面造形方法と同じ効果を奏する。

【００２０】

本発明の第９の態様に係る表面造形装置は、上述した第６の態様に係る表面造形装置の構成に加えて、前記表面造形の態様が格子模様の形成である場合、前記波長選択部は、前記内殻吸収端に対応する波長より短い波長を前記照射波長として選択し、前記照射密度選択部は、予め定められた加工閾値を下回るエネルギー密度を前記照射エネルギー密度として選択し、前記照射機構は、前記照射波長及び前記照射エネルギー密度を有し、且つ、パルス幅が１×１０^{-１８}秒以上１×１０^{-１０}秒以下の範囲に含まれる前記Ｘ線レーザを、複数ショット前記表面に照射する、構成が採用されている。

【００２１】

上記の構成によれば、本発明の第４の態様に係る表面造形方法と同じ効果を奏する。

【００２２】

本発明の第１０の態様に係る表面造形装置は、上述した第６の態様～第９の態様の何れか一態様に係る表面造形装置の構成に加えて、前記Ｘ線レーザを生成するＸ線レーザ光源と、前記Ｘ線レーザ光源を制御する光源制御部と、Ｘ線フィルタと、を更に備え、前記光源制御部は、前記Ｘ線レーザの波長が前記照射波長となるように前記Ｘ線レーザ光源を制御し、前記Ｘ線フィルタは、前記Ｘ線レーザのエネルギー密度が前記照射エネルギー密度に近づくように、前記Ｘ線レーザの強度を低下させる、構成が採用されている。

【００２３】

本発明の範疇には、このようにＸ線レーザ光源を含んだ表面造形装置も含まれる。

【００２４】

本発明の第１１の態様に係る表面造形装置は、上述した第６の態様～第１０の態様の何

れか一態様に係る表面造形装置の構成に加えて、前記Ｘ線レーザ光源は、前記Ｘ線レーザの波長を、少なくとも１ｎｍ以上２００ｎｍ以下の範囲において変化させることができる波長可変レーザ光源であり、前記Ｘ線フィルタは、前記表面における照射スポットにおけるエネルギー密度を、少なくとも１０ｍＪ／ｃｍ^{2}以上の範囲において変化させる、構成が採用されている。

【００２５】

上記の構成によれば、様々な材料により表面が構成されたターゲットに対して表面造形を施すことができる。

【発明の効果】

【００２６】

本発明の一態様によれば、リソグラフィプロセスと比較して、より単純であり、且つ、より直接的な表面造形方法及び表面造形装置を提供すること。

【図面の簡単な説明】

【００２７】

【図１】本発明の一実施形態に係る表面造形装置の模式図である。

【図２】（ａ）は、全開の状態を示す４象限スリットの正面図である。（ｂ）は、下側に位置する障立が閉じた状態の４象限スリットの正面図である。

【図３】図１に示した表面造形装置が備えている制御部の機能ブロック図である。

【図４】Ｘ線レーザを表面に照射されたターゲットの模式図である。

【図５】本発明の一変形例である表面造形方法のフローチャートである。

【図６】（ａ）～（ｆ）は、それぞれ、シリコン、窒化シリコン、炭化シリコン、サファイヤ、炭素、及びＰＭＭＡの吸収係数の波長依存性を示すグラフである。

【図７】（ａ）～（ｇ）は、それぞれ、白金、金、アルミニウム、銅、鉄、ニッケル、及びジルコニウムの吸収係数の波長依存性を示すグラフである。

【図８】（ａ）は、本発明の第１の実施例により得られたシリコン製のターゲットの斜視図である。（ｂ）は、（ａ）に示したシリコン製のターゲットの断面図である。（ｃ）及び（ｄ）は、それぞれ、本発明の第１の比較例及び第２の比較例により得られたシリコン製のターゲットの斜視図である。

【図９】熱的加工及び非熱的加工における加工閾値の波長依存性を示すグラフである。

【図１０】（ａ）及び（ｂ）は、本発明の第２の実施例により得られたシリコン製のターゲットの平面図及び斜視図である。（ｃ）及び（ｄ）は、本発明の第３の実施例により得られたシリコン製のターゲットの平面図及び斜視図である。（ｅ）及び（ｆ）は、本発明の第４の実施例により得られたシリコン製のターゲットの平面図及び斜視図である。

【図１１】本発明の第５の実施例により得られた窒化シリコン製のターゲットの平面図である。

【発明を実施するための形態】

【００２８】

〔表面造形装置〕

本発明の一実施形態に係る表面造形装置１０について、図１～図４を参照して説明する。図１は、表面造形装置１０の模式図である。図２の（ａ）は、全開の状態を示す４象限スリット１２の正面図である。図２の（ｂ）は、下側に位置する障立１２３が閉じた状態の４象限スリットの正面図である。図３は、表面造形装置１０が備えているＸ線レーザ光源１１が生成したＸ線レーザＬを表面に照射されたターゲットＴの模式図である。図４は、表面造形装置１０が備えている制御部１８の機能ブロック図である。

【００２９】

図１に示すように、表面造形装置１０は、Ｘ線レーザ光源１１と、４象限スリット１２と、ガスエネルギーモニター１３と、Ｋ－Ｂミラー１４と、Ｘ線フィルタ１５と、パソコンＰＣと、を備えている。４象限スリット１２、ガスエネルギーモニター１３、Ｋ－Ｂミラー１４、及びＸ線フィルタ１５は、照射機構１０Ａを構成する。照射機構１０Ａは、図３に示す波長選択部１６１が選択する照射波長、及び、照射密度選択部１６２が選択する

照射エネルギー密度を有し、且つ、パルス幅が１×１０$^{-18}$秒以上１×１０$^{-10}$秒以下の範囲に含まれるＸ線レーザＬをターゲットＴの表面に照射する。波長選択部１６１及び照射密度選択部１６２を含む制御部１６については、図３を参照して後述する。

【００３０】

表面造形装置１０は、ターゲットＴの表面に対して微細な表面造形を施すことができる。表面造形の態様としては、細孔の形成、ホログラフィックな模様の形成、及び、格子模様の形成が挙げられる。

【００３１】

本実施形態においては、Ｘ線レーザＬを照射されるターゲットＴとして、（１００）配向のｐ型シリコンの単結晶を採用している。ただし、ターゲットＴを構成する材料は、シリコンに限定されるものではない。ターゲットを構成する他の材料としては、例えば、窒化シリコン、炭化シリコン、サファイヤ、炭素、ポリメチルメタクリレート（polymethylmetha crylate、ＰＭＭＡ）、白金、金、アルミニウム、銅、鉄、ニッケル、及びジルコニウムが挙げられる。炭素の態様は、限定されるものではなく、グラファイトであってもよいし、グラフェンであってもよいし、カーボンナノファイバであってもよいし、ダイヤモンドであってもよい。ＰＭＭＡは、リソグラフィプロセスに用いられるレジスト材料の一例である。ターゲットＴを構成する材料は、ＰＭＭＡ以外のレジスト材料であってもよい。なお、ターゲットＴを構成する材料としては、シリコン又は窒化シリコンが好ましい。

【００３２】

＜Ｘ線レーザ光源＞

Ｘ線レーザ光源１１は、波長が１ｎｍ以上２００ｎｍ以下の範囲に含まれ、且つ、パルス幅が１×１０$^{-18}$秒以上１×１０$^{-10}$秒以下の範囲に含まれるＸ線レーザＬを生成する軟Ｘ線レーザ光源である。

【００３３】

Ｘ線レーザ光源１１は、Ｘ線レーザＬの波長を少なくとも１ｎｍ以上２００ｎｍ以下の範囲において変化させることができる波長可変レーザ光源であることが好ましい。

【００３４】

本実施形態においては、Ｘ線レーザ光源１１として、Ｘ線自由電子レーザ(X-ray Free Electron Laser :XFEL)の一例であるＳＡＣＬＡ(SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser)を採用している。表面造形装置１０は、Ｘ線レーザ光源１１が生成したＸ線レーザＬを集光し、ターゲットＴの表面に照射する。本実施形態において、Ｘ線レーザＬのパルス幅として、７０×１０$^{-15}$秒（７０フェムト秒）を採用した。なお、Ｘ線レーザＬのパルス幅は、パルスの半値幅を用いて定義している。また、本実施形態において、Ｘ線レーザ光源１１は、Ｘ線レーザＬの偏光方向が水平面と平行になるように構成されている。ただし、Ｘ線レーザＬの偏光方向は、水平面と平行な方向に限定されるものではない。

【００３５】

ただし、本発明の一態様において、Ｘ線レーザ光源１１は、ＳＡＣＬＡに限定されるものではなく、波長が１ｎｍ以上２００ｎｍ以下の範囲に含まれ、且つ、パルス幅が１×１０$^{-18}$秒以上１×１０$^{-10}$秒以下の範囲に含まれるＸ線レーザＬを生成するレーザ光源のなかから適宜選択することができる。例えば、Ｘ線レーザ光源１１は、プラズマを用いたＸ線レーザ光源であってもよいし、高次高調波を用いて上述した波長のＸ線レーザを生成するＸ線レーザ光源であってもよい。

【００３６】

＜４象限スリット＞

４象限スリット１２は、Ｘ線レーザ光源１１と、後述するガスエネルギーモニター１３との間に配置されている。４象限スリット１２は、互いに独立に動く４つの障立１２１，１２２，１２３，１２４を備えている。４象限スリット１２は、スリットの一例である。なお、図２の（ａ）及び（ｂ）に示した４象限スリット１２は、Ｘ線レーザ光源１１の側から正面視した状態を示している。障立１２１，１２２，１２３，１２４の各々は、それ

ぞれ、上側、右側、下側、左側の障立である。なお、４象限スリット１２の配置位置は、後述するＫ－Ｂミラー１４の上流側（Ｘ線レーザ光源１１側）であればよいので、後述するガスエネルギーモニター１３と、後述するK-Bミラーとの間でも構わない。

【００３７】

障立１２１及び１２３は、近接する側の長辺同士が離間するように配置されている。図１に示した状態において、障立１２１及び１２３の各々が、独立して上下方向に動くことによって、障立１２１及び１２３の近接する側の長辺同士の間隔（上下方向におけるスリットの間隔）と、上下方向におけるスリットの位置とを適宜変更することができる。同様に、障立１２２及び１２４は、近接する側の長辺同士が離間するように配置されている。図１に示した状態において、障立１２２及び１２４の各々が、独立して左右方向に動くことによって、障立１２２及び１２４の近接する側の長辺同士の間隔（左右方向におけるスリットの間隔）と、左右方向におけるスリットの位置とを適宜変更することができる。例えば、図２の（ａ）には、障立１２１，１２２，１２３，１２４が全開である状態の４象限スリット１２を図示している。また、図２の（ｂ）には、障立１２３が閉じた状態の４象限スリット１２を図示している。障立１２３を閉じることによって、Ｘ線レーザＬは、下半分が遮られる。その結果、４象限スリット１２を通過することによって、Ｘ線レーザＬは、障立１２３の長辺のうち障立１２１側の長辺において回折される。以下において、この回折されたＸ線レーザ光のことを回折Ｘ線レーザと称する。

【００３８】

なお、本実施形態において、４象限スリット１２は、後述するパソコンＰＣにより障立１２１，１２２，１２３，１２４の各々の位置を制御されている。ただし、４象限スリット１２は、手動により制御されるように構成されていてもよい。

【００３９】

＜ガスエネルギーモニター＞

ガスエネルギーモニター１３は、Ｘ線レーザＬの１ショットごとのエネルギーを検出する。ガスエネルギーモニター１３が検出したＸ線レーザＬのエネルギーは、パソコンＰＣに供給される。

【００４０】

＜Ｋ－Ｂミラー＞

Ｋ－Ｂ(Kirkpatrick-Baez)ミラー１４は、Ｘ線レーザ光源１１が生成したＸ線レーザＬをターゲットＴの表面に集光する。

【００４１】

＜Ｘ線フィルタ＞

Ｘ線フィルタ１５は、Ｘ線レーザＬの強度を低下させる。本実施形態では、ジルコニウム製の板状部材と、シリコン製の板状部材とのうち少なくとも何れか一方を用いてＸ線フィルタ１５を構成している。Ｘ線フィルタ１５は、様々な膜厚をもつジルコニウム製の板状部材及びシリコン製の板状部材の各々の数を適宜調整することによって、Ｘ線レーザＬの透過率を変化させることができる。その結果、Ｘ線フィルタ１５は、Ｘ線レーザＬの強度を所望の強度に調整することができるので、ターゲットＴの表面における照射スポットにおけるエネルギー密度を所望のエネルギー密度に調整することができる。なお、Ｘ線フィルタ１５は、照射スポットにおけるエネルギー密度を少なくとも１０ｍＪ／ｃｍ^{2}以上の範囲において変化させることができるように、上記板状部材の膜厚及び数の組み合わせが構成されていることが好ましい。

【００４２】

上述したように、本実施形態では、Ｘ線レーザＬを照射されるターゲットＴとして、（１００）配向のｐ型シリコンの単結晶を用いている。ｐ型シリコンの単結晶は、その主面がＸ線レーザＬの光軸と直交するように、該光軸上に配置されている。また、上述したＫ－Ｂミラー１４によって、Ｘ線レーザＬは、ターゲットＴの主面上に集光されている。

【００４３】

＜パソコン＞

パソコンＰＣは、表面造形装置１０を制御する制御部１６を備えている。図１に示すように、制御部１６は、Ｘ線レーザ光源１１及び４象限スリット１２の各々を制御する。また、制御部１６は、ガスエネルギーモニター１３が検出したＸ線レーザＬのエネルギーを取得し、表示部に表示させる。制御部１６が備えている具体的な各機能ブロックついては、図３を参照して次に説明する。

【００４４】

図３に示すように、制御部１６は、波長選択部１６１と、照射密度選択部１６２と、スリット制御部１６３と、光源制御部１６４とを備えている。

【００４５】

（波長選択部）

波長選択部１６１は、ターゲットＴの表面を構成する材料（本実施形態ではシリコン）の内殻吸収端に対応する波長に応じて、Ｘ線レーザＬの波長である照射波長を１ｎｍ以上２００ｎｍ以下の範囲から選択する。

【００４６】

本実施形態では、波長選択部１６１が照射波長を選択するために用いる内殻吸収端としてシリコンのＬ殻吸収端を採用し、照射波長として１０．３ｎｍを採用している。

【００４７】

（照射密度選択部）

照射密度選択部１６２は、ターゲットＴの表面に施す表面造形の態様に応じて、前記Ｘ線レーザのエネルギー密度である照射エネルギー密度を選択する。なお、表面造形の態様の具体例については、後述する。

【００４８】

照射密度選択部１６２は、照射エネルギー密度を選択する場合に、予め定められた加工閾値を参照し、表面造形の態様に応じて、この加工閾値を上回るように又は下回るように、照射エネルギー密度を選択する。この加工閾値は、Ｘ線レーザＬのエネルギー密度を変化させながら、ターゲットＴの表面にＸ線レーザＬを照射することによって、実験的に定めることができる。

【００４９】

（スリット制御部）

スリット制御部１６３は、４象限スリット１２が備えている障立１２１，１２２，１２３，１２４の各々の位置を制御することによって、上下方向におけるスリットの間隔及び位置と、左右方向におけるスリットの間隔及び位置を調整する。例えば、スリット制御部１６３は、図２の（ａ）及び（ｂ）に示すように４象限スリット１２の状態を制御する。

【００５０】

（光源制御部）

光源制御部１６４は、Ｘ線レーザＬの波長が前記照射波長となるように、Ｘ線レーザ光源１１を制御する。

【００５１】

＜Ｘ線レーザとターゲットとの相互作用＞

上述したように構成された表面造形装置１０は、ターゲットＴの表面に集光した状態のＸ線レーザＬを照射することができる。図４には、Ｘ線レーザＬを表面に照射されたターゲットＴを模式的に示している。

【００５２】

Ｘ線レーザＬをターゲットＴに照射することによってターゲットＴをレーザ加工する場合、図４に示すように、第１次相互作用領域$Ｒ_{1}$と、第２次相互作用領域$Ｒ_{2}$とが発生する。第１次相互作用領域$Ｒ_{1}$は、Ｘ線レーザＬがターゲットＴの表面に照射された照射スポットに対応する領域であり、Ｘ線レーザＬとターゲットＴを構成する材料とが直接相互作用する領域である。一方、第２次相互作用領域$Ｒ_{2}$は、Ｘ線レーザＬを直接照射される領域ではないもの、第１次相互作用領域$Ｒ_{1}$において生じた熱の影響を受ける可能性がある領域である。

【００５３】
従来、レーザ加工のために用いるレーザ光としては、波長が赤外域に属する赤外レーザが広く用いられていた。連続発振された赤外レーザ、あるいは、パルス幅が比較的長い赤外レーザ（例えばパルス幅がナノ秒オーダー）を用いた場合、第１次相互作用領域R_1において生じた熱の影響を受けることにより、第２次相互作用領域R_2では、変質や、開口外縁部の盛り上がり（以下においてリム部と称する）や、ひび割れなどといった、ユーザが意図しない構造が発生していた。その結果、加工精度が悪化していた。
【００５４】
それに対して、フェムト秒オーダーのパルス幅をもつ赤外レーザを用いた場合、上述した意図しない構造の発生が抑制されることが知られている。しかし、より微細な表面造形を行うためには、Ｘ線レーザＬの照射波長をより短くする必要があった。本発明の一態様は、このような技術思想に基づきなされている。
【００５５】
（細孔の形成）
例えば、表面造形の態様が細孔の形成である場合、波長選択部１６１は、内殻吸収端に対応する波長より短い波長を前記照射波長として選択し、照射密度選択部１６２は、予め定められた加工閾値を上回るエネルギー密度を前記照射エネルギー密度として選択する。照射機構１０Ａは、前記照射波長及び前記照射エネルギー密度を有し、且つ、パルス幅が１×１０^{-１８}秒以上１×１０^{-１０}秒以下の範囲に含まれるＸ線レーザＬをターゲットＴの表面に照射する。
【００５６】
本実施形態では、上述したように、波長選択部１６１が照射波長を選択するために用いる内殻吸収端としてシリコンのＬ殻吸収端を採用し、照射波長として１０．３ｎｍを採用している。
【００５７】
その結果、ターゲットＴの表面のうちＸ線レーザＬを照射した照射領域の外縁近傍には、図８の（ａ）及び（ｂ）に示すような、リム部の生成が抑制された細孔が形成される。
【００５８】
なお、シリコンにおける加工閾値は、照射波長が１０．３ｎｍである場合、１０６ｍＪ／ｃｍ^{2}であり、照射波長が１３．５ｎｍである場合、４１８ｍＪ／ｃｍ^{2}である。この加工閾値は、実験的に定めることができ、シリコン以外の他の材料に対しても定めることができる。例えば、窒化シリコンにおいては、照射波長が１０．３ｎｍである場合、加工閾値は２００ｍＪ／ｃｍ^{2}であり、照射波長が１３．５ｎｍである場合、加工閾値は４００ｍＪ／ｃｍ^{2}である。また、フッ化リチウムにおいては、照射波長が１０．３ｎｍおよび１３．５ｎｍである場合、加工閾値は多少の揺らぎを有するものの、１０ｍＪ／ｃｍ^{2}以上２０ｍＪ／ｃｍ^{2}以下の範囲内に含まれる。
【００５９】
なお、本実施形態においては、表面造形の態様がホログラフィックな模様を形成する場合、及び、格子模様を形成する場合においても、波長選択部１６１が照射波長を選択するために用いる内殻吸収端としてシリコンのＬ殻吸収端を採用し、照射波長として１０．３ｎｍを採用し、加工閾値として１０６ｍＪ／ｃｍ^{2}を採用している。したがって、加工閾値の９０％は、９５．４ｍＪ／ｃｍ^{2}である。
【００６０】
（ホログラフィックな模様の形成）
また、例えば、表面造形の態様がホログラフィックな模様の形成である場合、スリット制御部１６３は、図２の（ｂ）に示すように、４象限スリット１２の障立１２３を閉じるように４象限スリット１２を制御する。その結果、Ｘ線レーザＬが４象限スリット１２を通過することによって、回折Ｘ線レーザが得られる。
【００６１】
そのうえで、波長選択部１６１は、内殻吸収端に対応する波長より短い波長を前記照射

波長として選択し、照射密度選択部１６２は、予め定められた加工閾値の９０％を上回るエネルギー密度を前記照射エネルギー密度として選択する。照射機構１０Ａは、前記照射波長及び前記照射エネルギー密度を有し、且つ、パルス幅が１×１０^{-１８}秒以上１×１０^{-１０}秒以下の範囲に含まれる回折Ｘ線レーザをターゲットＴの表面に照射する。

【００６２】

その結果、ターゲットＴの表面のうちＸ線レーザＬを照射した照射領域には、図１０に示すようなホログラフィックな模様が形成される。

【００６３】

（格子模様の形成）

また、例えば、表面造形の態様が格子模様の形成である場合、波長選択部１６１は、内殻吸収端に対応する波長より短い波長を前記照射波長として選択し、照射密度選択部１６２は、予め定められた加工閾値を下回るエネルギー密度を前記照射エネルギー密度として選択する。照射機構１０Ａは、前記照射波長及び前記照射エネルギー密度を有し、且つ、パルス幅が１×１０^{-１８}秒以上１×１０^{-１０}秒以下の範囲に含まれるＸ線レーザＬを、複数ショットターゲットＴの表面に照射する。本実施形態において、表面に照射するＸ線レーザＬのショット数は、１００ショットである。

【００６４】

その結果、ターゲットＴの表面のうちＸ線レーザＬを照射した照射領域には、図１１に示すような格子模様が形成される。なお、Ｘ線レーザＬの偏光方向は、図１１における上下方向と平行になるように定められている。一方、図１１を参照すれば、ターゲットＴの表面に形成された格子模様の行及び列は、上述したＸ線レーザＬの偏光方向から傾いていることが分かる。

【００６５】

〔変形例〕

本発明の変形例である表面造形方法Ｍ１０について、図５を参照して説明する。図５は、表面造形方法Ｍ１０のフローチャートである。

【００６６】

表面造形方法Ｍ１０は、図１に示した表面造形装置１０を方法として表現したものである。したがって、表面造形方法Ｍ１０は、表面造形装置１０と対応している。したがって、本変形例においては、表面造形方法Ｍ１０と表面造形装置１０との対応関係を主に示し、各工程の詳細な説明は、省略する。なお、表面造形装置１０の場合と同様に、ターゲットＴを構成する材料は、シリコン又は窒化シリコンであることが好ましい。

【００６７】

表面造形方法Ｍ１０は、図５に示すように、波長選択工程Ｓ１１と、照射密度選択工程Ｓ１２と、スリット制御工程Ｓ１３と、照射工程Ｓ１４とを含んでいる。

【００６８】

＜波長選択工程＞

波長選択工程Ｓ１１は、制御部１６の波長選択部１６１に対応する。すなわち、波長選択工程Ｓ１１は、ターゲットＴの表面を構成する材料の内殻吸収端に対応する波長に応じて、前記表面に照射するＸ線レーザの波長である照射波長を１ｎｍ以上２００ｎｍ以下の範囲から選択する。

【００６９】

表面造形の態様が、細孔の形成である場合、ホログラフィックな模様の形成である場合、及び、格子模様の形成である場合、波長選択工程Ｓ１１は、内殻吸収端に対応する波長より短い波長を照射波長として選択する。

【００７０】

＜照射密度選択工程＞

照射密度選択工程Ｓ１２は、制御部１６の照射密度選択部１６２に対応する。すなわち、照射密度選択工程Ｓ１２は、ターゲットＴの表面に施す表面造形の態様に応じて、前記Ｘ線レーザのエネルギー密度である照射エネルギー密度を選択する。

【００７１】
表面造形の態様が細孔の形成である場合、照射密度選択工程Ｓ１２は、予め定められた加工閾値を上回るエネルギー密度を前記照射エネルギー密度として選択する。また、表面造形の態様がホログラフィックな模様の形成である場合、照射密度選択工程Ｓ１２は、予め定められた加工閾値の９０％を上回るエネルギー密度を前記照射エネルギー密度として選択する。また、表面造形の態様が格子模様の形成である場合、照射密度選択工程Ｓ１２は、予め定められた加工閾値を下回るエネルギー密度を前記照射エネルギー密度として選択する。
【００７２】
＜スリット制御工程＞
スリット制御工程Ｓ１３は、スリット制御部１６３に対応する。すなわち、スリット制御工程Ｓ１３は、図１に示した４象限スリット１２が備えている障立１２１，１２２，１２３，１２４の各々の位置を制御することによって、上下方向におけるスリットの間隔及び位置と、左右方向におけるスリットの間隔及び位置を調整する。
【００７３】
表面造形の態様がホログラフィックな模様の形成である場合、スリット制御工程Ｓ１３は、図２の（ｂ）に示すように、４象限スリット１２の障立１２３を閉じるように４象限スリット１２を制御する。その結果、Ｘ線レーザＬが４象限スリット１２を通過することによって、回折Ｘ線レーザが得られる。
【００７４】
一方、表面造形の態様が、細孔の形成及び格子模様の形成である場合、スリット制御工程Ｓ１３は、図２の（ａ）に示すように、全開になるように４象限スリット１２を制御する。
【００７５】
＜照射工程＞
照射工程Ｓ１４は、図１に示した照射機構１０Ａに対応する。
【００７６】
すなわち、表面造形の態様が細孔である場合、照射工程Ｓ１４は、波長選択工程Ｓ１１が選択した照射波長及び照射密度選択工程Ｓ１２が選択した照射エネルギー密度を有し、且つ、パルス幅が1×10^{-18}秒以上1×10^{-10}秒以下の範囲に含まれるＸ線レーザＬを、ターゲットＴの表面に照射する。
【００７７】
また、表面造形の態様がホログラフィックな模様の形成である場合、照射工程Ｓ１４は、波長選択工程Ｓ１１が選択した照射波長及び照射密度選択工程Ｓ１２が選択した照射エネルギー密度を有し、且つ、パルス幅が1×10^{-18}秒以上1×10^{-10}秒以下の範囲に含まれる回折Ｘ線レーザをターゲットＴの表面に照射する。
【００７８】
また、表面造形の態様が格子模様の形成である場合、照射工程Ｓ１４は、波長選択工程Ｓ１１が選択した照射波長及び照射密度選択工程Ｓ１２が選択した照射エネルギー密度を有し、且つ、パルス幅が1×10^{-18}秒以上1×10^{-10}秒以下の範囲に含まれるＸ線レーザＬを、複数ショット前記表面に照射する。
【００７９】
〔ターゲットを構成する材料及びその内殻吸収端〕
【００８０】
ターゲットＴを構成する材料及び各材料の内殻吸収端について、図６及び図７を参照して説明する。本項目は、表面造形装置１０及び表面造形方法Ｍ１０の両方に共通する。
【００８１】
表面造形装置１０の説明において上述したように、ターゲットＴを構成する材料としては、例えば、シリコン、窒化シリコン、炭化シリコン、サファイヤ、炭素、ポリメチルメタクリレート（polymethylmetha crylate、ＰＭＭＡ）、白金、金、アルミニウム、銅

、鉄、ニッケル、及びジルコニウムが挙げられる。

【００８２】

図６の（ａ）～（ｆ）の各々は、それぞれ、シリコン、窒化シリコン、炭化シリコン、サファイヤ、炭素、及びＰＭＭＡの吸収係数の波長依存性を示すグラフである。図７の（ａ）～（ｂ）の各々は、それぞれ、白金、金、アルミニウム、銅、鉄、ニッケル、及びジルコニウムの吸収係数の波長依存性を示すグラフである。また、図６及び図７には、各材料における内殻吸収端に対応する波長の位置を矢印にて示している。

【００８３】

上述したように、表面造形装置１０及び表面造形方法Ｍ１０においては、波長選択部１６１及び波長選択工程Ｓ１１が照射波長を選択するために用いる内殻吸収端として、各材料のＫ殻、Ｌ殻、Ｍ殻、Ｎ殻、Ｏ殻の各内殻吸収端のうち予め定められた内殻吸収端を採用している。図６及び図７では、波長選択部１６１及び波長選択工程Ｓ１１が照射波長を選択するために用いる内殻吸収端を、一点鎖線で囲っている。すなわち、本発明の一態様においては、（１）材料がシリコン、窒化シリコン、及び炭化シリコンである場合、シリコンのＬ殻吸収端を内殻吸収端として採用し、（２）材料がサファイヤである場合、アルミニウムのＬ殻吸収端を内殻吸収端として採用し、（３）材料が炭素及びＰＭＭＡである場合、炭素のＫ殻吸収端を内殻吸収端として採用し、（４）材料が白金及び金である場合、それぞれの材料のＮ殻吸収端及びＯ殻吸収端を内殻吸収端として採用し、（５）材料がアルミニウム及び銅である場合、それぞれの材料のＬ殻吸収端を内殻吸収端として採用し、（６）材料が鉄、ニッケル、及びジルコニウムである場合、それぞれの材料のＭ殻吸収端を内殻吸収端として採用する。材料が炭化シリコンである場合、シリコンのＬ殻吸収端の代わりに炭素のＫ殻吸収端を内殻吸収端として採用できる。

【００８４】

〔第１の実施例及び比較例〕

表面造形装置１０及び表面造形方法Ｍ１０の第１の実施例及び比較例について、図８を参照して説明する。図８の（ａ）は、第１の実施例により得られたシリコン製のターゲットＴの斜視図である。（ｂ）は、（ａ）に示したシリコン製のターゲットＴの断面図である。（ｃ）及び（ｄ）は、それぞれ、本発明の第１の比較例及び第２の比較例により得られたシリコン製のターゲットの斜視図である。なお、図８の（ｂ）においては、図８の（ａ）に示したターゲットＴの中心を原点としている。図９は、熱的加工及び非熱的加工における加工閾値の波長依存性を示すグラフである。

【００８５】

第１の実施例では、ターゲットＴとして（１００）配向のｐ型シリコンの単結晶を採用し、照射波長として、Ｌ殻吸収端に対応する波長より短い波長である１０．３ｎｍを採用し、照射エネルギー密度として、予め定められた加工閾値を上回る１０７ｍＪ／ｃｍ^{2}を採用し、Ｘ線レーザＬのパルス幅として７０×１０$^{-15}$秒を採用した。なお、後述する第１の比較例、第２の比較例、第２～第５の実施例の各々においても、Ｘ線レーザＬのパルス幅は、共通して７０×１０$^{-15}$秒である。

【００８６】

第１の比較例では、ターゲットＴとして（１００）配向のｐ型シリコンの単結晶を採用し、照射波長として、Ｌ殻吸収端に対応する波長より長い波長である１３．５ｎｍを採用し、照射エネルギー密度として、予め定められた加工閾値を下回る２９４ｍＪ／ｃｍ^{2}を採用した。

【００８７】

第２の比較例では、ターゲットＴとして（１００）配向のｐ型シリコンの単結晶を採用し、照射波長として、Ｌ殻吸収端に対応する波長より長い波長である１３．５ｎｍを採用し、照射エネルギー密度として、予め定められた加工閾値を上回る４６０ｍＪ／ｃｍ^{2}を採用した。

【００８８】

図８の（ａ）及び（ｂ）を参照すれば、第１の実施例を施されたターゲットＴには、Ｘ

線レーザＬを照射した照射領域の外縁近傍にリム部が生成されていない細孔が形成されたことが分かった。

【００８９】

図８の（ｃ）を参照すれば、第１の比較例を施されたターゲットＴには、Ｘ線レーザＬを照射した照射領域が一度溶融した痕跡が認められるものの、細孔は形成されていないことが分かった。

【００９０】

図８の（ｄ）を参照すれば、第２の比較例を施されたターゲットＴには、Ｘ線レーザＬを照射した照射領域の外縁近傍にリム部が生成されている細孔が形成されたことが分かった。

【００９１】

また、第１の実施例及び第２の比較例の各々により得られたターゲットＴの加工形状を、Ｘ線の吸収による原子と電子との振る舞いを組み込んだ分子動力学計算コードによる理論モデル計算と比較した。図９には、シリコンにおける熱的加工及び非熱的加工における加工閾値の波長依存性と、第１の実施例及び第２の比較例の各々とを図示した。

【００９２】

図９を参照すれば、第１の実施例によりターゲットＴに施されたレーザ加工が非熱的加工の領域に含まれており、第２の比較例によりターゲットＴに施されたレーザ加工が熱的加工の領域に含まれていることが分かった。この結果は、第１の実施例が施されたターゲットＴにはリム部が生成されていない細孔が形成され、第２の比較例が施されたターゲットＴには、リム部が生成されている細孔が形成されたことと整合している。

【００９３】

〔第２～第４の実施例〕

表面造形装置１０及び表面造形方法Ｍ１０の第２～第４の実施例について、図１０を参照して説明する。図１０の（ａ）及び（ｂ）は、第２の実施例により得られたシリコン製のターゲットの平面図及び斜視図である。図１０の（ｃ）及び（ｄ）は、第３の実施例により得られたシリコン製のターゲットの平面図及び斜視図である。図１０の（ｅ）及び（ｆ）は、第４の実施例により得られたシリコン製のターゲットの平面図及び斜視図である。

【００９４】

第２の実施例では、ターゲットＴとして（１００）配向のｐ型シリコンの単結晶を採用し、図２の（ｂ）に示すように４象限スリット１２の障立１２３を閉じることによってＸ線レーザＬを回折Ｘ線レーザに変換し、照射波長として、Ｌ殻吸収端に対応する波長より短い波長である１０．３ｎｍを採用し、照射エネルギー密度として、予め定められた加工閾値の９０％を上回る９８．５ｍＪ／ｃｍ^{2}を採用した。なお、予め定められた加工閾値の９０％は、９５．４ｍＪ／ｃｍ^{2}である。

【００９５】

第３の実施例及び第４の実施例の各々では、第２の実施例と同様の条件を採用したうえで、それぞれ、照射エネルギー密度として、予め定められた加工閾値の９０％を上回る１８３ｍＪ／ｃｍ^{2}及び２１８ｍＪ／ｃｍ^{2}を採用した。

【００９６】

図１０を参照すれば、第２～第４の実施例の各々が実施されたターゲットＴには、ホログラフィックな模様が形成されることが分かった。

【００９７】

〔第５の実施例〕

表面造形装置１０及び表面造形方法Ｍ１０の第５の実施例について、図１１を参照して説明する。図１１は、第５の実施例により得られた窒化シリコン製のターゲットの平面図である。

【００９８】

第５の実施例では、ターゲットＴとして多結晶の窒化シリコン晶膜（厚さ５０ｎｍ）を採用し照射波長として、Ｌ殻吸収端に対応する波長より短い波長である１０．３ｎｍを採

用し、照射エネルギー密度として、予め定められた加工閾値を下回る１６２ｍＪ／ｃｍ^{2}を採用し、ターゲットＴの表面に照射するＸ線レーザＬのショット数を１００ショットとした。なお、Ｘ線レーザＬの偏光方向は、図１１における上下方向と平行になるように定められている。

【００９９】

図１１を参照すれば、第５の実施例が施されたターゲットＴには、格子模様が形成されることが分かった。また、図１１を参照すれば、ターゲットＴの表面に形成された格子模様の行及び列は、上述したＸ線レーザＬの偏光方向から傾いていることが分かった。

【０１００】

〔付記事項〕

本発明は上述した各実施形態に限定されるものではなく、請求項に示した範囲で種々の変更が可能であり、異なる実施形態にそれぞれ開示された技術的手段を適宜組み合わせて得られる実施形態についても本発明の技術的範囲に含まれる。

【符号の説明】

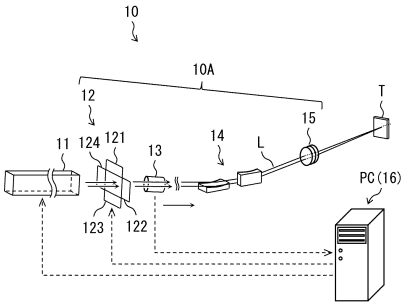
【０１０１】

１０　表面造形装置
１０Ａ　照射機構
１１　Ｘ線レーザ光源
１２　４象限スリット（スリット）
１５　Ｘ線フィルタ
１６　制御部
１６１　波長選択部
１６２　照射密度選択部
１６３　スリット制御部
１６４　光源制御部
Ｔ　ターゲット
ＰＣ　パソコン
Ｍ１０　表面造形方法
Ｓ１１　波長選択工程
Ｓ１２　照射密度選択工程
Ｓ１３　スリット制御工程
Ｓ１４　照射工程

【図面】

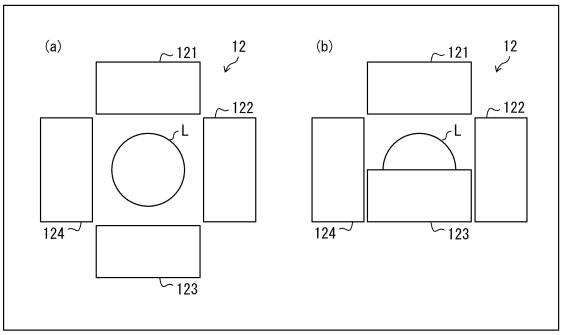
【図１】

図 1



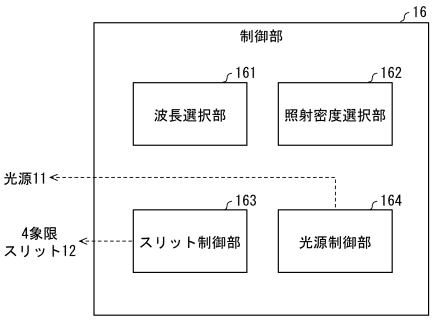
【図２】

図 2



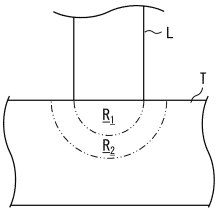
【図３】

図 3



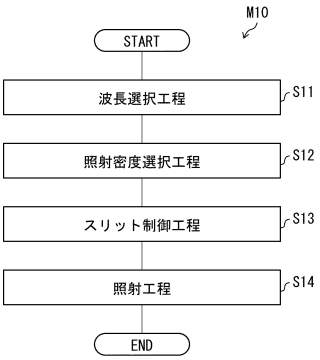
【図４】

図 4



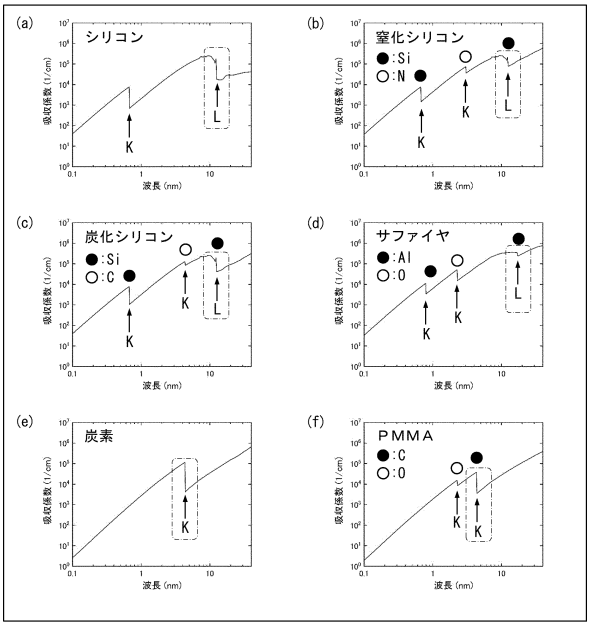
【図５】

図 5



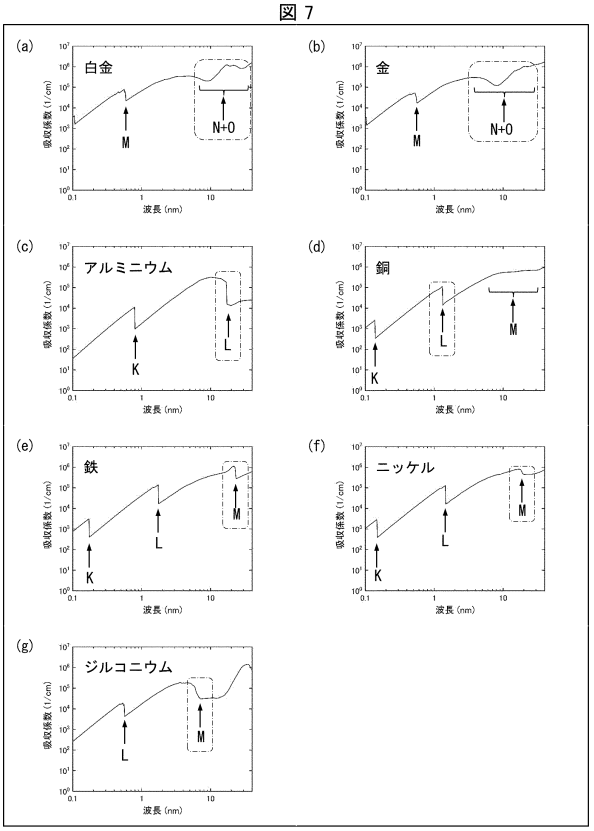
【図６】

図 6



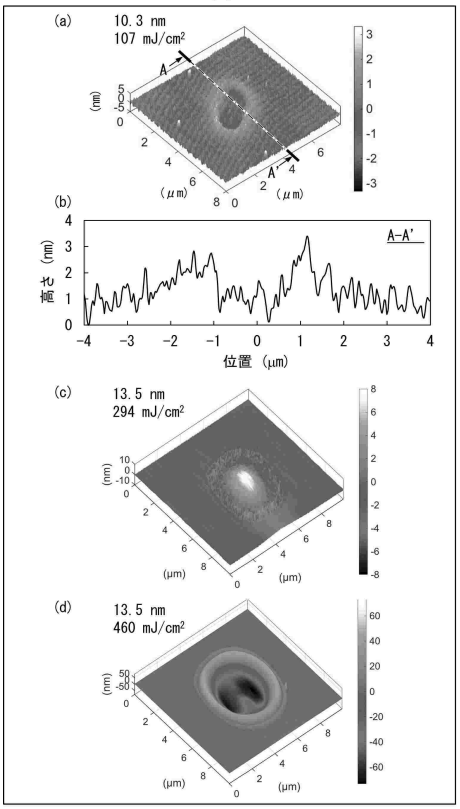
【図７】

図 7



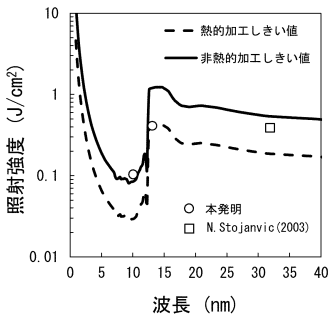
【図８】

図 8



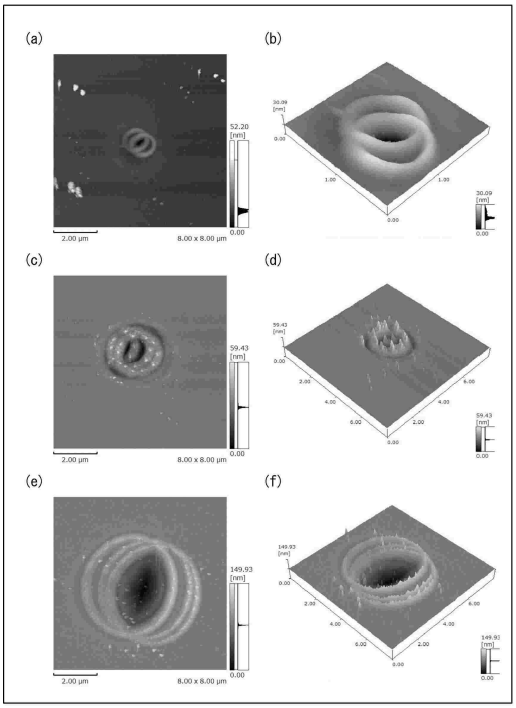
【図９】

図 9



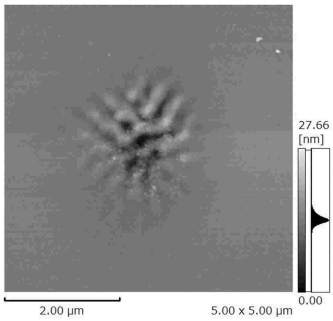
【図１０】

図 10



【図１１】

図 11



フロントページの続き

千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目９番１号 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構内
(72)発明者 ヂン タンフン
千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目９番１号 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構内
(72)発明者 錦野 将元
千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目９番１号 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構内
(72)発明者 鷲尾 方一
東京都新宿区戸塚町１丁目１０４番地 学校法人早稲田大学内
(72)発明者 東口 武史
栃木県宇都宮市陽東７－１－２ 国立大学法人宇都宮大学内
(72)発明者 坂上 和之
東京都文京区本郷七丁目３番１号 国立大学法人東京大学内

審査官 山内 隆平
(56)参考文献 特開２０１６－２１５２６９（ＪＰ，Ａ）
独国特許出願公開第１０２０１４２２６９１７（ＤＥ，Ａ１）
(58)調査した分野 (Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｂ２３Ｋ ２６／３５２
Ｂ２３Ｋ ２６／００
Ｂ２３Ｋ ２６／３５９
Ｂ２３Ｋ ２６／３６４
Ｂ２３Ｋ ２６／３８２