

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2022年11月10日(10.11.2022)

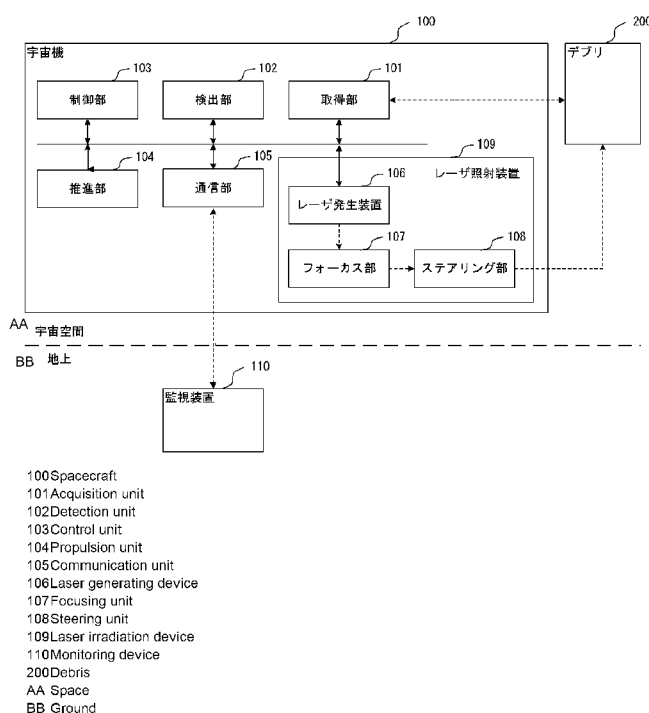


(10) 国際公開番号
WO 2022/234669 A1

- (51) 国際特許分類:
B64G 1/66 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2021/017563
- (22) 国際出願日: 2021年5月7日(07.05.2021)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (71) 出願人: スカパー J S A T 株式会社(SKY PERFECT JSAT CORPORATION) [JP/JP]; 〒1070052 東京都港区赤坂一丁目8番1号 Tokyo (JP). 国立研究開発法人理化学研究所(RIKEN) [JP/JP]; 〒3510198 埼玉県和光市広沢2番1号 Saitama (JP).
- (72) 発明者: 福島 忠徳(FUKUSHIMA, Tadanori); 〒1070052 東京都港区赤坂一丁目8番1号 スカパー J S A T 株式会社内 Tokyo (JP). 足立 数馬(ADACHI, Kazuma); 〒1070052 東京都港区赤坂一丁目8番1号 スカパー J S A T 株式会社内 Tokyo (JP). 和田 智之(WADA, Satoshi); 〒3510198 埼玉県和光市広沢2番1号 国立研究開発法人理化学研究所内 Saitama (JP). 戎崎 俊一(EBISUZAKI, Toshikazu); 〒3510198 埼玉県和光市広沢2番1号 国立研究開発法人理化学研究所内 Saitama (JP). 小川 貴代(OGAWA, Takayo); 〒3510198 埼玉県和光市広沢2番1号 国立研究開発法人理化学研究所内 Saitama (JP). 津野 克彦(TSUNO, Katsuhiko); 〒3510198

(54) Title: THRUST GENERATING DEVICE AND SPACECRAFT

(54) 発明の名称: 推力発生装置、宇宙機



(57) Abstract: A thrust generating device according to the present invention is for generating thrust in an object by irradiating the object with a laser, the thrust generating device comprising: a laser generating device that generates first laser light of a first wavelength and second laser light of a second wavelength different from the first wavelength; and an irradiation device that irradiates the object with the first laser light and the second laser light at the same time. The second wavelength may be a wavelength for which the object has a higher absorptivity than the first wavelength, and the

WO 2022/234669 A1

埼玉県和光市広沢2番1号 国立研究開発
法人理化学研究所内 Saitama (JP).

- (74) 代理人: 弁理士法人秀和特許事務所 (IP
FIRM SHUWA); 〒1030004 東京都中央区東
日本橋三丁目4番10号 アクロポリス
21ビル8階 Tokyo (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保
護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ,
BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,
CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ,
EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN,
HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH,
KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,
MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ,
NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,
QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保
護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS,
MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM,
ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ,
TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ,
DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT,
LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS,
SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM,
GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

一 国際調査報告 (条約第21条(3))

intensity of the second laser light may be weaker than the intensity of the first laser light. Also, the second laser light may be generated by wavelength conversion of the first laser light.

(57) 要約: 本発明の推力発生装置は、対象物にレーザを照射して前記対象物に対する推力を発生させるための推力発生装置であって、第1波長の第1レーザ光および前記第1波長とは異なる第2波長の第2レーザ光を発生させるレーザ発生装置と、前記第1レーザ光および前記第2レーザ光を同時に前記対象物に照射する照射装置と、を備える。第2波長は、第1波長よりも前記対象物での吸収率が高い波長であるとよく、第2レーザ光の強度は第1レーザ光の強度よりも弱くてよい。また、第2レーザ光は、第1レーザ光を波長変換することにより生成してもよい。

明 細 書

発明の名称： 推力発生装置、宇宙機

技術分野

[0001] 本発明は、対象物にレーザを照射してアブレーションを起こすことにより対象物に対する推力を発生させる推力発生装置、および当該推力発生装置を有する宇宙機に関する。

背景技術

[0002] 近年、宇宙空間におけるデブリ（宇宙ゴミ）の増加が問題となっている。デブリとは、不要になった人工衛星や故障した人工衛星、または衝突等によって放出された人工衛星の一部等である。デブリは、運用中の人工衛星と衝突を引き起こす危険性があり、数cm程度のデブリが人工衛星に衝突した場合でも人工衛星にとって壊滅的な被害が生じる。また、デブリが増加して人工衛星と衝突することによりデブリが爆発的に増加する問題（ケスラーシンドローム）が懸念されている。デブリの増加を防止するためには、デブリを大気圏再突入によって焼却除去するか、他の人工衛星と衝突しない軌道（墓場軌道）に移動させる必要がある。

[0003] 本件出願人らは、デブリにレーザを照射し、レーザ照射によって生じる推力によってデブリの軌道または姿勢を制御する技術を提案している（特許文献1）。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：国際公開第2020/152744号公報

非特許文献

[0005] 非特許文献1：K. Sugioka, S. Wada, A. Tsunemi, T. Sakai, H. Takai, H. Moriwaki, A. Nakamura, H. Tashiro, K. Toyoda: "Micropatterning of Quartz Substrates by Multi-wavelength Vacuum-Ultraviolet Laser Ablation" Jpn. J. Appl. Phys., 32, 6185-6189 (1993).

非特許文献2：K. Sugioka, S. Wada, Y. Ohnuma, A. Nakamura, H. Tashiro, K. Toyoda: “Multiwavelength irradiation effect in fused quartz ablation using vacuum-ultraviolet Raman laser” Appl. Surf. Sci., 96-98, 347-351 (1996).

非特許文献3：J. Zhang, K. Sugioka, S. Wada, H. Tashiro, K. Toyoda, K. Midorikawa: “Precise microfabrication of wide band gap semiconductors (SiC and GaN) by VUV-UV multiwavelength laser ablation” Appl. Surf. Sci., 127-129, 793-799 (1998).

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0006] デブリの制御を容易にするためには、強い推力を発生させることが望まれる。特許文献1ではデブリに対して推力強化部材を取り付けて、この推力強化部材にレーザ照射することでより強力な推力を発生させることを提案している。しかしながら、デブリに推力強化部材を取り付けることにはコストがかかる。また、既存の物体に対してはこの方策は適用できない。
- [0007] そこで、本発明は、従来よりも簡便な手法によって強力な推力を発生させるための技術を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

- [0008] 本発明の一態様は、対象物にレーザを照射して前記対象物に対する推力を発生させるための推力発生装置であって、第1波長の第1レーザ光および前記第1波長とは異なる第2波長の第2レーザ光を発生させるレーザ装置と、前記第1レーザ光および前記第2レーザ光を同時に前記対象物に照射する照射装置と、を備える、推力発生装置である。
- [0009] 本態様によれば、第1レーザ光と第2レーザ光の一方によって対象物の表面を励起し、他方のレーザ光の吸収率を向上させて、単一のレーザ光を用いる場合よりも効率的なアブレーションを発生可能であり、したがってより強力な推力が得られる。
- [0010] 例えば、第1レーザ光は第2レーザ光よりも強度が強く、また、第2レー

ザ光（第2波長）の方が第1レーザ光（第1波長）よりも対象物での吸収率が高い、ことが好ましい。強度が弱い吸収率が高い第2レーザ光による照射によって対象物の表面を励起することで、元々は吸収率が低い第1レーザ光の吸収率が高くなり、したがって第1レーザ光のみを用いる場合よりも効率的にアブレーションを発生させることが可能となる。

[0011] 本態様に係るレーザ装置は、第1レーザ光を発生させるレーザ光源と、前記レーザ光源から発生された前記第1レーザ光の一部を前記第2レーザ光に変換する波長変換器と、を含んで構成されてもよい。なお、別の例に係るレーザ装置は、第1レーザ光を発生させる第1レーザ光源と、第2レーザ光を発生させる第2レーザ光源を含んで構成されてもよい。

[0012] レーザ光源は特に限定されないが、例えば1 μ m帯で発振する固体レーザまたはファイバーレーザを採用可能である。波長変換器は、第1レーザ光の波長（第1波長）をより短い波長に変換するものであっても、より長い波長に変換するものであってもよい。例えば、波長変換器は、第1レーザ光の高調波を発生させる非線形光学結晶を含んで、第1波長より短い第2波長の第2レーザ光を生成してもよい。ここで、第2レーザ光は、第1レーザ光の任意の高調波（第2高調波、第3高調波、第4高調波など）であってよい。また、波長変換器は、光パラメトリック発振器を含んで、第1波長よりも長い第2波長の第2レーザ光を生成してもよい。なお、第2レーザ光の強度は強い必要がないので、波長変換器における波長変換効率は低くてもよい。したがって、波長変換器の調整に精度が要求されず装置を簡易に構成できるという利点もある。波長変換効率が低いことを除外する訳ではないが、波長変換効率は10%以下（1/10以下）であってよく、さらには0.1%（1/1000）以下であってもよい。このような装置は製造が容易であり、たとえば、宇宙空間での利用にも適したものである。

[0013] 本発明の他の態様は、宇宙空間において、対象物にレーザを照射して前記対象物の軌道または姿勢を変える宇宙機であって、上記の推力発生装置を備え、前記照射装置は、前記レーザ発生装置から発生するレーザが前記対象物

で収束するように照射する、ことを特徴とする宇宙機である。

発明の効果

[0014] 本発明によれば、従来よりも簡便な手法によって強力な推力を発生させることが可能である。

図面の簡単な説明

[0015] [図1]図1は、本実施形態に係るデブリ制御の一例を示す図である。

[図2]図2は、本実施形態に係るレーザ照射の一例を示す図である。

[図3]図3は、本実施形態に係るレーザ照射システムの一例を示す図である。

[図4]図4は、本実施形態に係るフォーカス部およびステアリング部の一例を示す図である。

[図5]図5A～図5Cは、本実施形態に係るレーザ発生装置の構成例を示す図である。

[図6]図6は、物質ごとの吸収率の波長依存特性を示す図である。

[図7]図7は、本実施形態に係るレーザ発生装置の別の構成例を示す図である。

発明を実施するための形態

[0016] (実施形態)

<概要>

本実施形態に係る推力発生装置は、対象物にレーザを照射してアブレーションを発生させることにより、対象物に対する推力を発生させる装置である。本実施形態では、推力発生装置は、宇宙機（人工衛星）に搭載されて、宇宙空間に存在する対象物の軌道または姿勢を制御するために用いられる。対象物の軌道または姿勢を制御することで、例えば、不要な対象物を除去できる。

[0017] 本実施形態における対象物とは、宇宙空間に存在するデブリ（宇宙ゴミ、スペースデブリ）を含む人工物や、人工物以外の物体（例えば、隕石等）である。デブリとは、制御不能になった人工衛星や、運用終了に伴い不要となった人工衛星、衝突等によって放出された人工衛星の一部を含むものである。

。本実施形態では、デブリを対象物とする例について説明する。

[0018] 軌道または姿勢の制御とは、宇宙空間に存在する対象物（デブリ）の軌道や姿勢を変えることを示す。軌道を変えるとは、例えば、デブリの高度を上げたり下げたりすることである。これにより、デブリを大気圏に再突入させて焼却除去したり、他の衛星と衝突しない軌道（墓場軌道）に移動させたり、デブリと他の物体との衝突を回避するために当該人工衛星を一時的に移動したりする。また、姿勢を変えるとは、例えば、デブリの回転を抑制することである。これにより、物理的にアクセスする際の衝突リスクを軽減する。

[0019] なお、本実施形態では、宇宙機として人工衛星を用いる例について説明するが、無人宇宙機に限定されず、宇宙機として有人宇宙機を用いてもよい。また、人工衛星（親機）等に搭載される機器（子機）を宇宙機としてもよい。また、推力発生装置の利用用途および対象物の種類は上記で例示したものに限られず、例えば地上環境で任意の物体に対して用いられてもよい。

[0020] <デブリ除去方法>

図1は、本実施形態に係るデブリ除去の一例を示す図である。図1には、地球11と、地球11を覆う大気圏12と、地球周回軌道である軌道13が示されている。また、宇宙機100は、対象物にレーザを照射する人工衛星である。デブリ200は、軌道13を速度 v で移動する物体であって、例えば、運用期間の満了等により不要となった人工衛星等とする。宇宙機100は、デブリ200に対してレーザを照射することにより、デブリ200に速度変化 Δv を発生させる。デブリ200は、当該反力により、例えば、高度を下げ大気圏に再突入して焼却除去される。なお、デブリ除去方法は上記に限定されず、例えば、デブリ200の高度を上げて（または下げて）他の人工衛星が存在しない軌道（墓場軌道）へ移動させてもよい。

[0021] 図2は、レーザ照射によって生じる推力を示す図である。レーザ21は、宇宙機100によって照射されたレーザである。レーザ21がデブリ200に照射されると、デブリ200の表面の物質が蒸発し、プラズマ化して噴き出す（プラズマアブレーション）。この時に物質が噴き出す力（矢印22）

の反作用をデブリ200が推力として受けることにより速度変化 Δv （矢印23）が生じる。

[0022] <構成>

図3は、本実施形態に係るレーザ照射システムの構成を示す図である。レーザ照射システムは、宇宙機100、監視装置110等を含む。

[0023] <<宇宙機100>>

宇宙機100は、レーザ照射機能を有する人工衛星である。宇宙機100は、取得部101、検出部102、制御部103、推進部104、通信部105、レーザ照射装置109等を有する。レーザ照射装置109は、レーザ発生装置106、フォーカス部107、ステアリング部108を有している。レーザ照射装置109は、レーザ発生装置106によって出力されたレーザを、フォーカス部107、ステアリング部108を介して、デブリ200に照射し、アブレーションの発生によりデブリ200に対する推力を発生させる。レーザ照射装置109は推力発生装置に相当する。

[0024] 取得部101は、不図示の撮像部を用いて画像を取得する機能部である。また、取得部101は、後述のレーザ発生装置106より出力された探索用のレーザの反射光を取得する。取得部101は、種々のセンサであると捉えることもできる。

[0025] 検出部102は、取得部101によって取得された画像または反射光に基づいて、デブリ200の検出情報を取得する機能部である。検出情報は、宇宙機100とデブリ200との距離、デブリ200の位置、大きさ、形状、撮像画像、回転状態（姿勢）等である。例えば、検出部102は、L i d a r (L i g h t D e t e c t i o n a n d R a n g i n g) を用いて宇宙機100とデブリ200との距離を取得する。

[0026] 制御部103（照射制御手段）は、宇宙機100とデブリ200との距離に基づいて、レーザ発生装置106から出射したレーザがデブリ200で収束するようにフォーカス部107を制御する。例えば、フォーカス部107が光学系である場合、当該光学系の焦点距離を調整する。また、制御部10

3は、検出部102によって取得された検出情報に基づいて、デブリ200に対するレーザの照射位置や、レーザの出力値を決定する機能部である。例えば、制御部103は、検出部102によって検出されたデブリ200の位置や姿勢、およびレーザ照射に適した領域に基づいてレーザの照射位置を決定する。レーザ照射に適した領域とは、レーザ照射を行うことで危険が生じる可能性のある箇所（例えば、燃料タンク等）を除く領域である。また、制御部103は、地上における安全なエリア等を考慮してレーザを照射する位置やタイミングを決定してもよい。安全なエリアとは、デブリ200が大気圏に再突入した際に燃え尽きずに残ってしまった破片などを落下させるためのエリアである。例えば、安全なエリアは、船舶および航空機等の航路や陸地から数十～数百海里以上離れている海上である。制御部103は、後述する監視装置110から通信部105を介してレーザ照射に適した領域や安全なエリアに関する情報を取得するとよい。

[0027] 推進部104は、レーザ照射に必要な姿勢を調整するためにスラストまたはホイール等の推力発生装置（アクチュエータ）を用いて、宇宙機100の姿勢または軌道の制御を行う機能部である。姿勢制御方法は特に限定されず、既存の方式である3軸安定方式、バイアスモーメント方式、ゼロモーメント方式等を採用することができる。

[0028] 通信部105は、地上の監視装置110と通信を行うための機能部である。通信部105を介して、宇宙機100は、デブリ200の大まかな位置（粗軌道位置）や、上記のレーザ照射に適した領域や安全なエリアに関する情報等を取得する。

[0029] レーザ発生装置106は、レーザを出力する装置である。本実施形態では、レーザ発生装置106は、複数の異なるレーザ光を同時に照射することで、対象物でのアブレーションをより効率的に発生させる。レーザ発生装置106およびアブレーションについてのより詳細な説明は後ほど行う。

[0030] フォーカス部107は、レーザ発生装置106によって出射されたレーザを収束させるための部材である。フォーカス部107を介することで、宇宙

機100は、遠隔地点からでもデブリ200へレーザを出射することができる。本実施形態では、フォーカス部107は、一般的な望遠鏡を用いるが、レーザを収束させるための部材であれば望遠鏡に限定されない。また、本実施形態では、遠隔地点として、デブリ200から20m~1000m程度離れた位置を想定しているが、宇宙機100とデブリ200との距離は特に限定されない。

[0031] ステアリング部108は、フォーカス部107によって出力されたレーザの照射方向を変えるための部材である。例えば、ステアリング部108として、可動式のミラーを用いることができる。ステアリング部108を用いることで、宇宙機100は遠隔地点からでも容易にレーザの照射方向をデブリ200に向けることができる。また、宇宙機100とデブリ200とが同じ軌道上に存在しない場合でも、遠隔からでも容易にレーザの照射方向をデブリ200に向けることができるため、宇宙機100がデブリ200と衝突する危険性を軽減している。

[0032] 本実施形態において、レーザ発生装置106、フォーカス部107、ステアリング部108が、総体として、対象物に対する推力を発生させるための「推力発生装置」に相当する。また、フォーカス部107とステアリング部108が、レーザ発生装置106から出力されるレーザ光を対象物に照射するための「照射装置」に相当する。

[0033] 図4は、本実施形態に係るフォーカス部107およびステアリング部108の構成の一例を示す図である。レーザ発生装置106から出力されたレーザは、フォーカス部107を介することで徐々に収束する。そして、レーザは、ステアリング部108によって反射されることで、照射方向が変更される。

[0034] なお、レーザをターゲットに向ける方法は上記に限定されない。例えば、ステアリング部108を用いずに、宇宙機100自体の姿勢制御によって、レーザが出射する方向を変えてもよい。また、フォーカス部107の向きを変更することで、レーザが出射する方向を変えてもよい。なお、本実施形態

では、フォーカス部107およびステアリング部108は、宇宙機100の一部として設けられる例を示すが、宇宙機100とは別体として設けられてもよい。

[0035] <<監視装置110>>

監視装置110は、デブリ200の大まかな位置を検出したり、検出したデブリ200の情報を宇宙機100に送信したりする装置である。また、監視装置110は、上記のレーザ照射に適した領域や安全なエリアに関する情報等を宇宙機100に送信してもよい。

[0036] <<デブリ200>>

デブリ200は、本実施形態では、制御不能になった人工衛星や、運用終了に伴い不要となった人工衛星等の大型のものから、衝突等によって放出された人工衛星等の一部（例えば、ネジ等の部品）など小さなものを含んでもよい。なお、デブリ200の対象は上記に限定されず、宇宙空間に存在する物体（例えば、隕石など）を含む。また、デブリ200のサイズも特に限定されない。一般に、宇宙空間に存在する物体において、10cm以上の大きさであれば地上から検出することが可能とされているが、本実施形態に係る宇宙機100は、宇宙空間上でデブリ200を検出するため10cm以下の物体でも検出を行うことができる。

[0037] <レーザ装置の詳細とアブレーション強化の説明>

図5Aは、レーザ発生装置106の一つの具体例を示すブロック図である。レーザ発生装置106は、レーザ光源601と波長変換器602と波長変換器603を含んで構成される。レーザ光源601は、例えば、波長1064nmのレーザを発振するNd:YAG結晶を用いたファイバーレーザまたは固体レーザである。1μm帯のレーザを発振させるためには、Nd:YAGの代わりにYb:YAG結晶を用いて波長1030nmのレーザ光を発振してもよい。本実施形態では、CW（連続波）レーザを発振するが、パルスレーザを発振してもよい。波長変換器602は、レーザ光源601から発生したレーザ光の一部を第2高調波に変換するための非線形光学結晶を有する

。当該非線形光学結晶は、基本波の2つの光子を周波数が2倍（波長が半分）の1つの光子に変換する。同様に、波長変換器603は、波長変換器から出力される第2高調波を第4高調波に変換するための非線形光学結晶を有する。当該非線形光学結晶は、第2高調波の2つの光子を周波数が2倍（波長が半分）の1つの光子に変換する。したがって、レーザ発生装置106からは、基本波（1064 nm）、第2高調波（532 nm）、第4高調波（266 nm）が出力される。

[0038] ここで、上記のように異なる波長のレーザを同時に対象物に照射することでアブレーションを強化できることは非特許文献1～3で報告されている。簡単に原理を説明すると、吸収率が低い波長のレーザ光と吸収率が高い波長のレーザ光を同時に対象物に照射すると、吸収率が高い波長のレーザ光の吸収により対象物の表面が励起され、本来は吸収率が低いレーザ光によってもアブレーションがより強力に生じるようになる。

[0039] 図6は、材料ごとの吸収率の波長依存特性を示すグラフである。ここでは、対象物の材料が、人工衛星の素材として一般的に使われるアルミニウムであるものとする。1 μm帯のレーザ光はNd:YAGあるいはYb:YAGによって容易に発生させることができるが、アルミニウムでの吸収率が低く、アブレーションの強度が弱い。しかしながら、第4高調波（266 nm）は吸収率が高いので、少なくとも、基本波と第4高調波を同時にアルミニウムの対象物に照射することにより、第4高調波の吸収によって表面が励起されて、基本波がより吸収されやすくなりアブレーションが発生しやすくなる。

[0040] ここで、第4高調波の強度は、それほど強い必要はなく、基本波に対して、10%以下であってもよく、1%以下、あるいは0.1%以下であってもよい。したがって、波長変換器602、603には高い変換効率は要求されない。高い波長変換効率を達成しようとする、波長変換器602、603における非線形光学結晶の角度や温度などを厳密に制御する必要が生じ、そのためには装置のコストが上昇してしまう。しかしながら、本実施形態では

低い波長変換効率でも効果が得られるので、装置の作成が容易であり低コストで実現できるという利点がある。

[0041] 本実施形態において、第2高調波を除去して基本波と第4高調波だけを照射してもよいが、第2高調波もアブレーションに寄与するため第2高調波も同時に照射すればよい。さらに、第2高調波除去のための構成が不要となるので装置構成が簡単となる。

[0042] ここではアルミニウムを対象物としたため第4高調波を利用しているが、対象物の材料に合わせて好適な高調波を利用すればよい。例えば、対象物が銅であれば波長600nm以下で吸収率が高くなるので、基本波(1064nm)と第2高調波(532nm)を同時に照射すればアブレーション強化の効果が得られる。基本波と第2高調波を利用する場合には、レーザ発生装置106は、図5Bに示すように、レーザ光源601と波長変換器602を含んでいればよい。また、金属は一般的に300nm付近以下で吸収率が高くなるので、第4高調波(266nm)や第5高調波(213nm)、あるいはより高い高調波を用いれば金属一般に対して、1 μ m帯のレーザ発振器を用いて強力なアブレーションを発生させることができる。

[0043] 対象物は、金属材料に限られず任意の材料であってよく、材料の一例として、ガラス、ポリマー、CFRP(炭素繊維強化ポリマー複合材料)が挙げられる。材料によっては、1 μ mよりも長い波長で吸収を有する場合もある。このような材料を対象とする場合には、レーザ発生装置106は、図5Cに示すように、光パラメトリック発振器(OPO:Optical Parametric Oscillator)604によって、レーザ光源601から出力されるレーザ光の一部の波長を変換すればよい。

[0044] 上記の説明において、レーザ発生装置106は1つの光源と波長変換器によって複数の波長のレーザ光を発生させているが、レーザ発生装置106は複数の光源を有していてもよい。例えば、図7に示すように、レーザ発生装置106は、Nd:YAGレーザ光源901と半導体レーザ光源902とを有し、ミラー903, 904によって2つのレーザ光を結合して照射しても

よい。半導体レーザは小型であり光源を増やしても装置構成上の不利益は生じない。また、半導体レーザは可視光から赤外までの広い範囲の波長のレーザ光を発振できるので、対象物の材料に応じて適切な材料の半導体レーザを採用すればよい。例えば、対象物がアルミニウムの場合、800 nm帯に吸収があるので、半導体レーザ光源902として赤外半導体レーザを採用すれば、アルミニウムを対象として強力なアブレーションを発生させることができる。

[0045] 上記の説明では、レーザ照射装置（推力発生装置）109が宇宙機に搭載されて、宇宙空間にあるデブリ200にレーザを照射して、アブレーションによる推力によってデブリ200の位置や姿勢を変える用途を説明した。しかしながら、レーザ照射装置（推力発生装置）は宇宙空間での利用に限定されず、地上や大気圏で利用されても構わない。

[0046] （実証データ）

異なる波長のレーザを同時に対象物に照射することでアブレーションが実際に強化されることを示す検証実験を行った。ここでは、対象物として銅を用いている。銅は、図6に示すように、600 nm以下の波長で吸収率が高い。そこで、検証実験では、図5Bに示す構成のレーザ発生装置を用いて、1064 nmと532 nmのレーザ光を同時に対象物に照射して、発生する力積を測定した。また、比較実験として、1064 nmのレーザ光と532 nmのレーザ光を個別に対象物に照射した場合、および、これらのレーザを対象物の異なる場所に照射した場合に、発生する力積を測定した。これらの実験では、いずれも、1064 nmおよび532 nmのレーザ光の平均パルスエネルギーは、それぞれ188 mJおよび89 mJとしている。

[0047] 実験結果は、次のように得られた。なお、同一条件での平均推力の再現性は0.01と見積もれている。

[表1]

	レーザー光の照射条件	平均発生力積 (μNs)
本手法	2波長のレーザー光を同一場所に照射	4.99
比較例1	2波長のレーザー光を別の場所に照射	4.73
比較例2-1	1064nmのレーザー光を照射	2.43
比較例2-2	532nmのレーザー光を照射	2.28

[0048] この結果から分かるように、2波長のレーザー光を同一の場所に照射して得られる力積は $4.99\mu\text{Ns}$ であり、各波長のレーザー光を照射して得られる力積の和よりも大きい。一方、2波長のレーザー光を別の場所に照射して得られる力積は $4.73\mu\text{Ns}$ であり、各波長のレーザー光を照射して得られる力積の和とほぼ等しい。同一の場所に照射した場合は、別の場所に照射した場合と比較して、得られる推力が $0.26\mu\text{Ns}$ (5.6%)増加しており、この増加分が本手法による優位な相乗効果であると認められる。

[0049] (その他)

上記の実施形態および変形例の構成は、本発明の技術的思想を逸脱しない範囲内で、適宜組み合わせることができる。また、本発明は、その技術的思想を逸脱しない範囲で適宜変更を加えて実現しても構わない。

符号の説明

[0050] 100 : 宇宙機 101 : 取得部 102 : 検出部
103 : 制御部 104 : 推進部 105 : 通信部
106 : レーザ発生装置 107 : フォーカス部 108 : ステアリング部
109 : レーザ照射装置 110 : 監視装置 200 : デブリ

請求の範囲

- [請求項1] 対象物にレーザを照射して前記対象物に対する推力を発生させるための推力発生装置であって、
- 第1波長の第1レーザ光および前記第1波長とは異なる第2波長の第2レーザ光を発生させるレーザ発生装置と、
- 前記第1レーザ光および前記第2レーザ光を同時に前記対象物に照射する照射装置と、
- を備える、推力発生装置。
- [請求項2] 前記レーザ発生装置は、
- 前記第1レーザ光を発生させるレーザ光源と、
- 前記レーザ光源から発生された前記第1レーザ光の一部を前記第2レーザ光に変換する波長変換器と、
- を含む、請求項1に記載の推力発生装置。
- [請求項3] 前記第2波長は、前記第1波長よりも短い波長であり、
- 前記波長変換器は、前記第1レーザ光の高調波を発生させる非線形光学結晶を含む、
- 請求項2に記載の推力発生装置。
- [請求項4] 前記波長変換器における波長変換の変換効率が10%以下である、
- 請求項3に記載の推力発生装置。
- [請求項5] 前記第2波長は、前記第1波長の $1/2$ または $1/4$ の波長である、
- 請求項2から4のいずれか1項に記載の推力発生装置。
- [請求項6] 前記第2波長は、前記第1波長よりも長い波長であり、
- 前記波長変換器は、光パラメトリック発振器を含む、
- 請求項2に記載の推力発生装置。
- [請求項7] 前記レーザ光源は、 $1\mu\text{m}$ 帯で発振する固体レーザまたはファイバーレーザである、
- 請求項2から6のいずれか1項に記載の推力発生装置。

[請求項8] 前記第2波長は、前記第1波長よりも前記対象物での吸収率が高い

、

請求項1から7のいずれか1項に記載の推力発生装置。

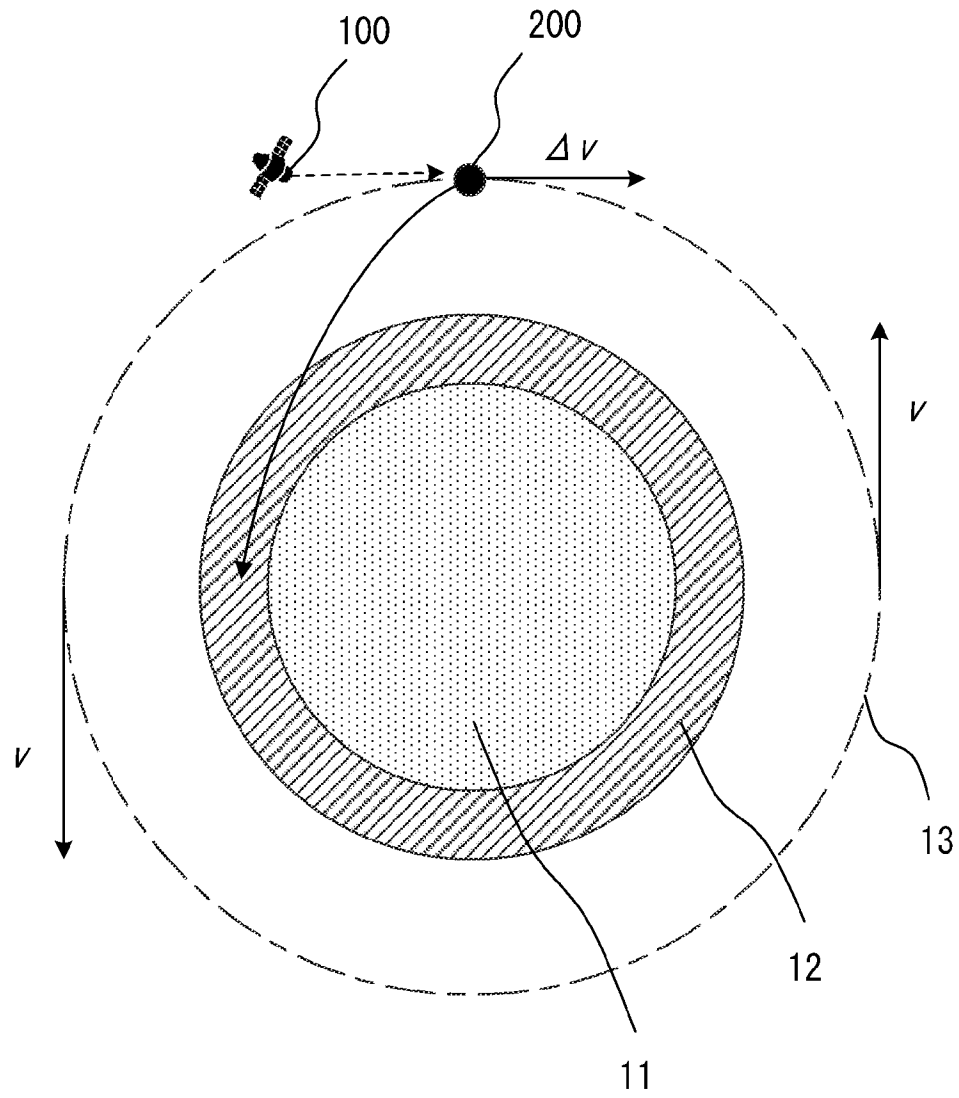
[請求項9] 宇宙空間において、対象物にレーザを照射して前記対象物の軌道または姿勢を変える宇宙機であって、

請求項1から8のいずれか1項に記載の推力発生装置を備え、

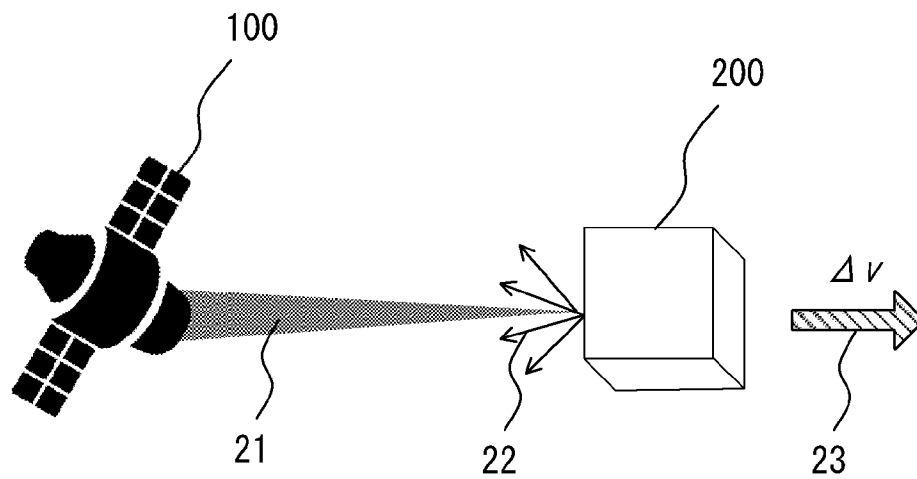
前記照射装置は、前記レーザ発生装置から発生するレーザが前記対象物で収束するように照射する、

宇宙機。

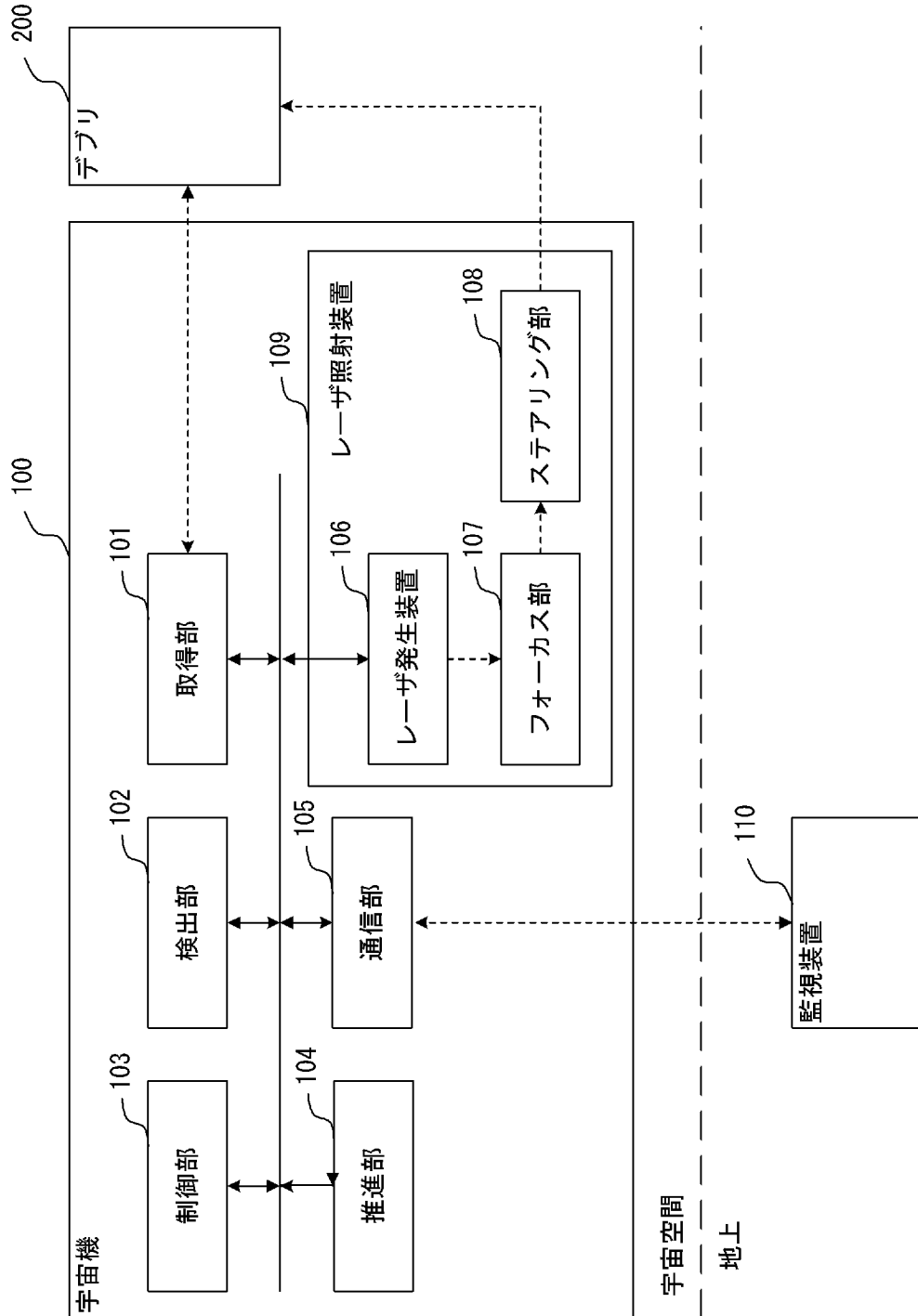
[図1]



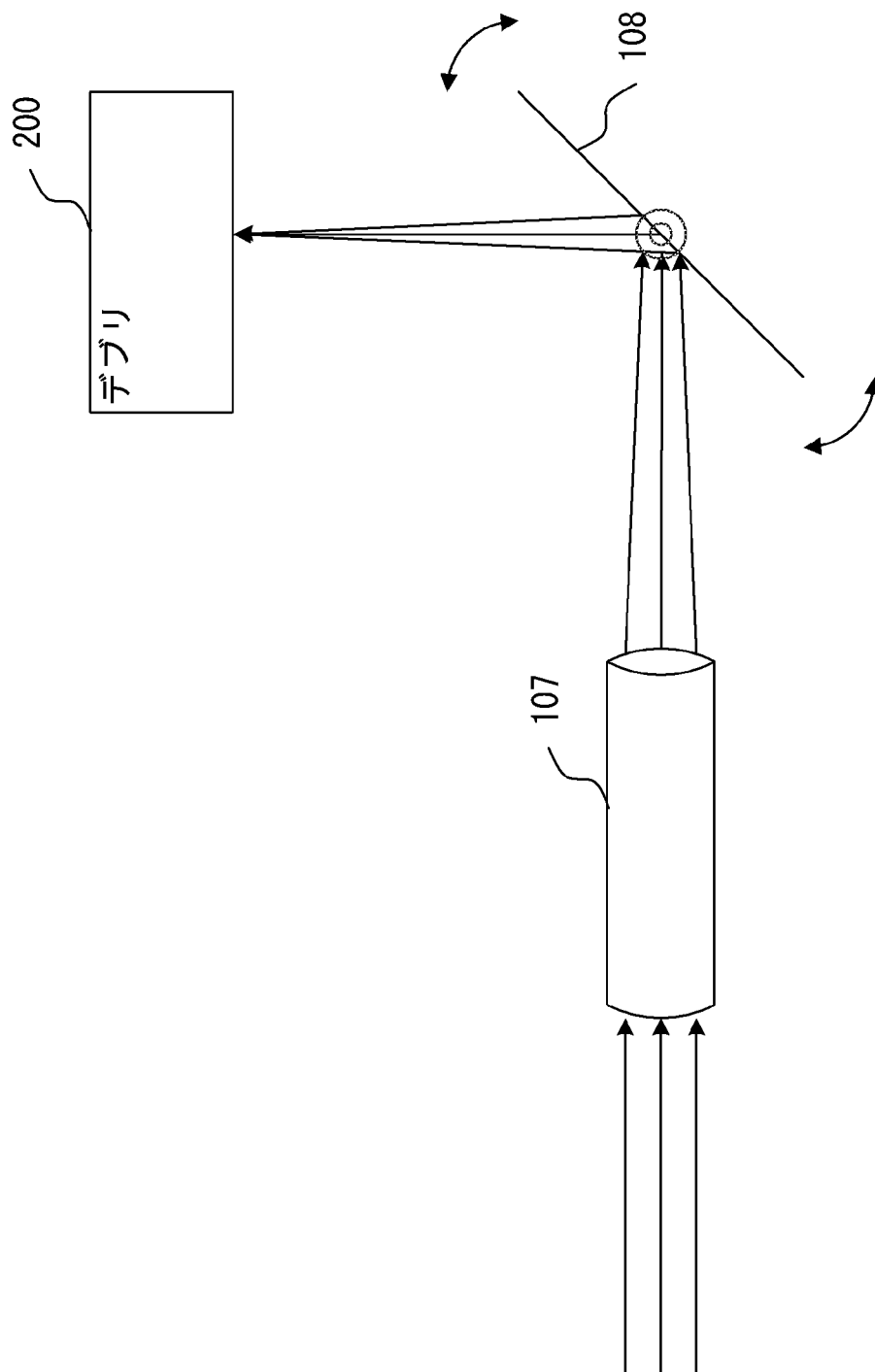
[図2]



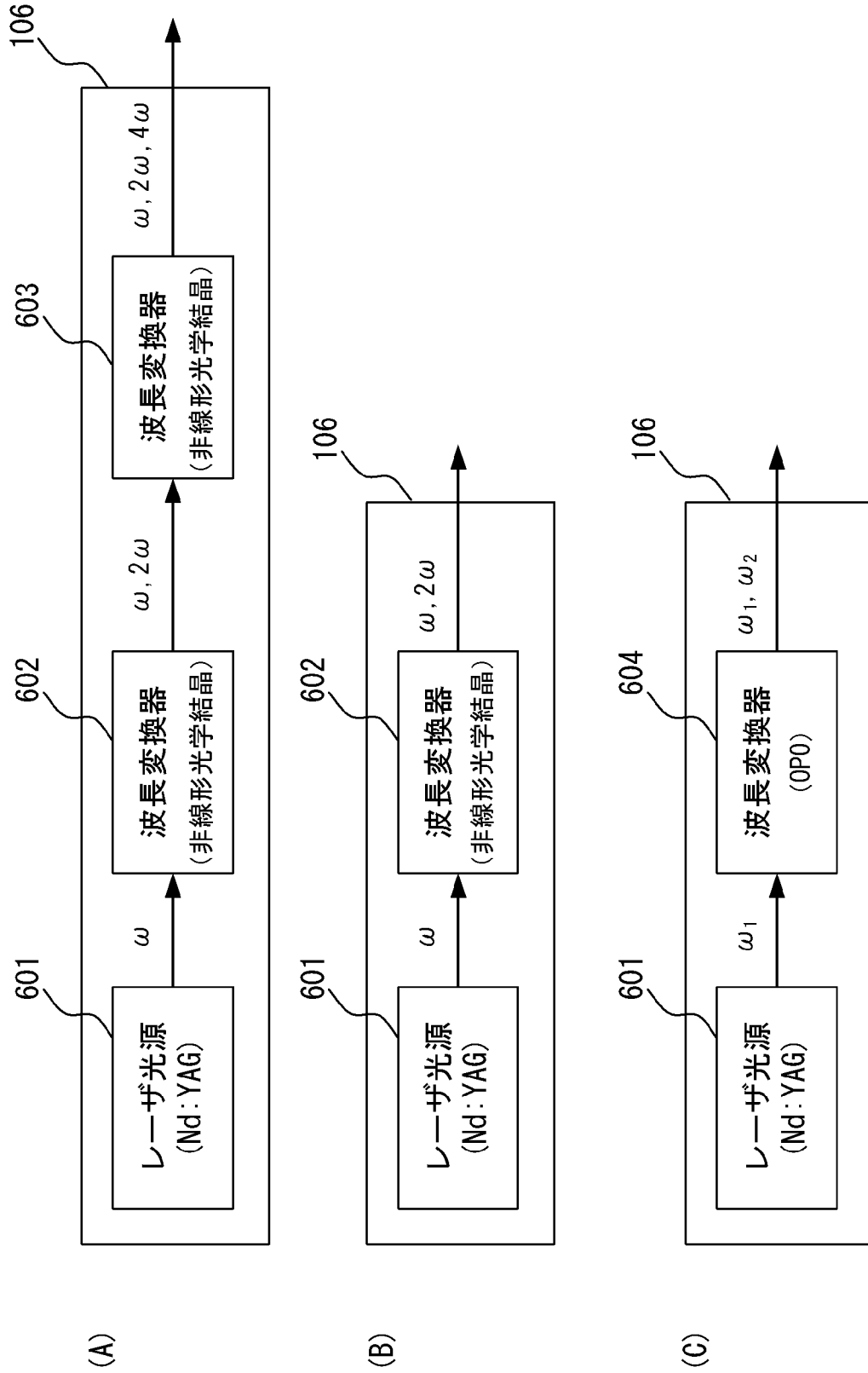
[図3]



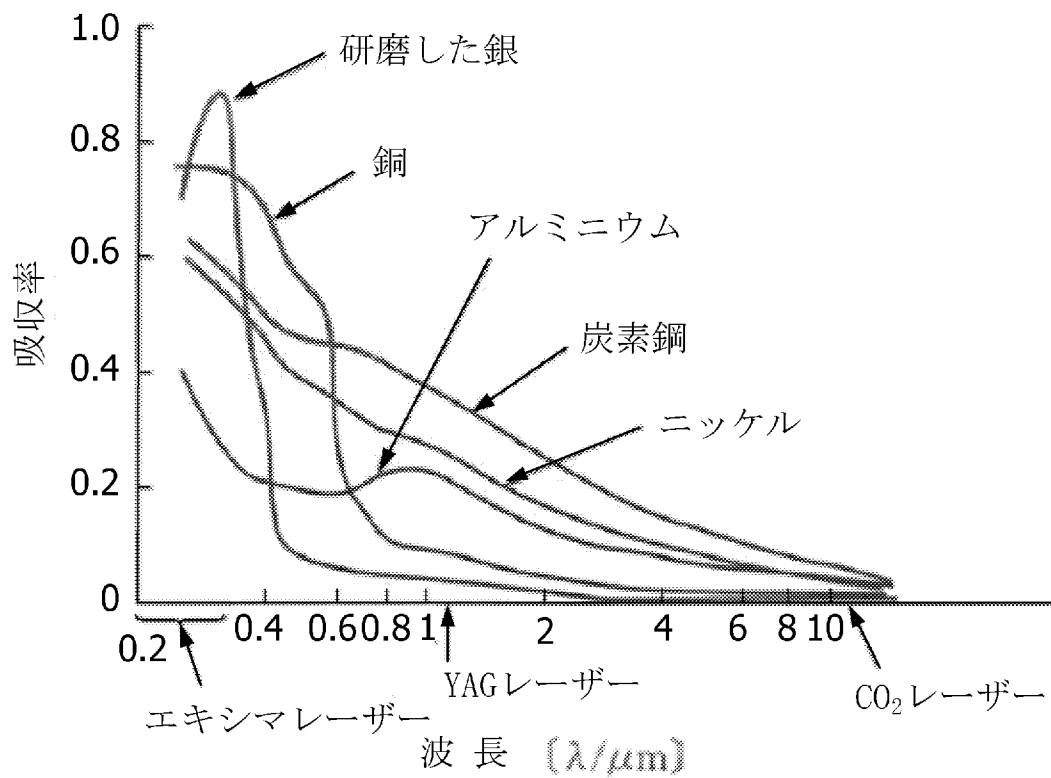
[図4]



[図5]



[図6]

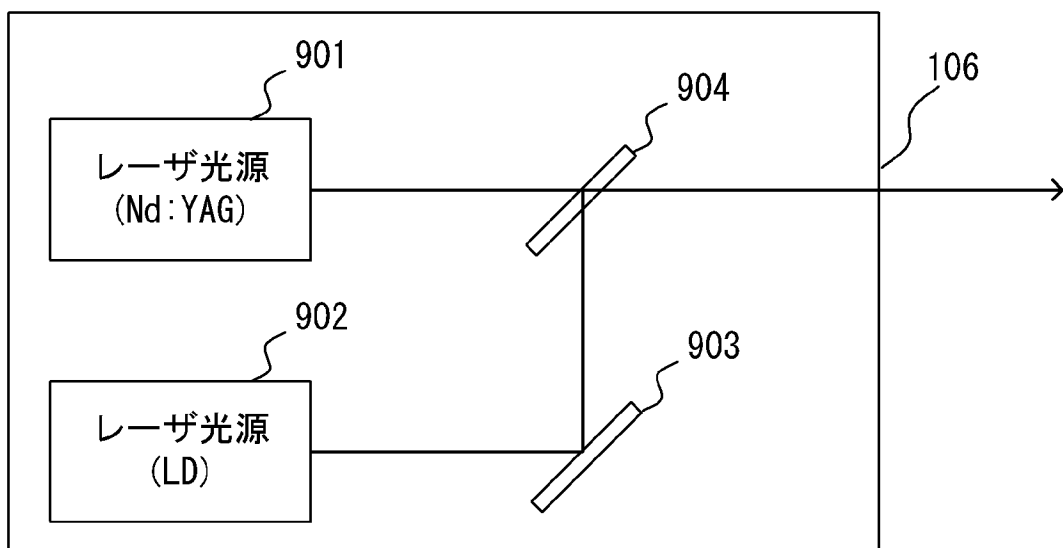


鏡面研磨された各種材料に対するレーザー波長と
室温での吸収率との関係

Webサイト「Optipedia」より引用

(<https://optipedia.info/laser/handbook/laser-handbook-8th-section/34-2/>)

[図7]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2021/017563

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B64G 1/66(2006.01)i

FI: B64G1/66

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

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

B64G1/66

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

Published examined utility model applications of Japan	1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan	1971-2021
Registered utility model specifications of Japan	1996-2021
Published registered utility model applications of Japan	1994-2021

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	WO 2020/152744 A1 (SKY PERFECT JSAT CORP) 30 July 2020 (2020-07-30) paragraphs [0019]-[0080], fig. 1-12	1-9
Y	SUGIOKA, Koji et al. Micropatterning of Quartz Substrates by Multi-Wavelength Vacuum-Ultraviolet Laser Ablation. Japanese Journal of Applied Physics. vol. 32, The Japan Society of Applied Physics., 1993, pp. 6185-6189, [retrieval date 15 July 2021], pp. 6185-6189	1-9
Y	SUGIOKA, K. et al. Multiwavelength irradiation effect in fused quartz ablation using vacuum-ultraviolet Raman laser. Applied Surface Science., 1996, pp. 347-351, [retrieval date 15 July 2021], pp. 347-351	1-9

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
 “E” earlier application or patent but published on or after the international filing date
 “L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
 “O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
 “P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
 “X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
 “Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
 “&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
15 July 2021 (15.07.2021)

Date of mailing of the international search report
27 July 2021 (27.07.2021)

Name and mailing address of the ISA/
 Japan Patent Office
 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
 Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

 Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2021/017563

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JHANG, J. et al. Precise microfabrication of wide band gap semiconductors (SiC and GaN) by VUV-UV multiwavelength laser ablation. Applied Surface Science., 1998, pp. 793-799, [retrieval date 15 July 2021], pp. 793-799	1-9
A	US 2011/0302906 A1 (SINKO, John Elihu) 15 December 2011 (2011-12-15)	1-9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2021/017563

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
WO 2020/152744 A1	30 Jul. 2020	(Family: none)	
US 2011/0302906 A1	15 Dec. 2011	(Family: none)	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） B64G 1/66(2006.01)i FI: B64G1/66		
B. 調査を行った分野		
調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC）） B64G1/00		
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの		
日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2021年 日本国実用新案登録公報 1996-2021年 日本国登録実用新案公報 1994-2021年		
国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）		
C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	WO 2020/152744 A1 (スカパー J S A T株式会社) 30.07.2020 (2020-07-30) 段落[0019]-[0080]及び図1-12	1-9
Y	SUGIOKA, Koji ほか著, "Micropatterning of Quartz Substrates by Multi-Wavelength Vacuum-Ultraviolet Laser Ablation", Japanese Journal of Applied Physics, 32巻, The Japan Society of Applied Physics, 1993, p.6185-6189, [検索日 2021.07.15] p.6185-6189	1-9
Y	SUGIOKA, K. ほか著, Multiwavelength irradiation effect in fused quartz ablation using vacuum-ultraviolet Raman laser, Applied Surface Science, 1996, p.347-351, [検索日 2021.07.15] p.347-351	1-9
Y	JHANG, J. ほか著, Precise microfabrication of wide band gap semiconductors (SiC and GaN) by VUV-UV multiwavelength laser ablation, Applied Surface Science, 1998, p.793-799, [検索日 2021.07.15] p.793-799	1-9
A	US 2011/0302906 A1 (SINKO, John Elihu) 15.12.2011 (2011-12-15)	1-9
<input type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input checked="" type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。		
* 引用文献のカテゴリー "A" 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの "E" 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの "L" 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） "O" 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 "P" 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献 "T" 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの "X" 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの "Y" 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの "&" 同一パテントファミリー文献		
国際調査を完了した日	国際調査報告の発送日	
15.07.2021	27.07.2021	
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	権限のある職員（特許庁審査官） 久慈 純平 3D 1139 電話番号 03-3581-1101 内線 3341	

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2021/017563

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
WO 2020/152744 A1	30.07.2020	(ファミリーなし)	
US 2011/0302906 A1	15.12.2011	(ファミリーなし)	