

1E08 超小型衛星用LSPスラスタへの応用を目的とした W級LDによるLSP生成の検証

○塚平珠貴，本目大和，松井信（静岡大学）

Verification of LSP Generation by W-class LD for Application to LSP Thrusters for Microsatellites
Tamaki Tsukadaira, Yamato Homme, and Makoto Matsui (Shizuoka University)

Key Words : LSP, Absorption Coefficient, Generation Threshold,...

Abstract

Laser propulsion is a space transportation system that obtains thrust by using a laser beam emitted from the ground or satellites as an energy source. Laser propulsion using laser sustained plasma (LSP) is expected to increase specific impulse higher than that of conventional chemical propulsion because of its high temperature without oxidizer. LD is small and lightweight, and is expected to be applied to on-board LSP thrusters that are equipped with the laser body on a spacecraft. On-board LSP thrusters require the laser power source to be generated by the power generation of the spacecraft itself, and the laser output depends on the power generation capacity of the spacecraft. In this study, the purpose is to experimentally verify the generation of LSPs using a LD of several watts with an objective lens. As a result, LSP could not be generated due to the poor beam quality of the LD. In addition, since there is a limit to what can be achieved by simply improving the focusing ability, we consider an approach to lower the LSP generation threshold by utilizing atomic beam absorption.

1. 序論

レーザー推進とは，人工衛星に搭載されたレーザーや地上に設置されるレーザー基地などから照射されるレーザービームをエネルギー源として推力を発生させる宇宙輸送システムである¹⁾。レーザー推進の推進原理に関しては様々な形が提案されているが，その一種としてレーザー維持プラズマ（LSP：Laser sustained Plasma）を熱源として推力を発生させる方法がある。この推進法は熱源のプラズマを間接的に維持できるので，連続運転時の電極損耗がなく，熱源に高温のLSPを用いているので同じ電熱加速式スラスタであるアークジェットよりも高い比推力が期待できる。

レーザー推進の概念は 1970 年代に Kantrowitz によって提唱された²⁾。レーザー推進法は，レーザーの発振方式によって分類することができ，パルス状のレーザー光を用いる RP（Repetitively Pulsed）方式と，連続発振のレーザー光を用いるCW（Continuous Wave）方式が存在する。

LSPの先行研究においては，CO₂ レーザーが LSP生成のレーザー光源として主に用いられてきたが，近年の半導体技術の著しい向上によりkW 級の高出力半導体レーザー（LD: Laser Diode）が台頭し始め，LDを励起光としたファイバーレーザーやディスクレーザーの高出力化も進み，中でもLDはエネルギ

ー変換効率がそれらのレーザーの中で最も高く約 50 %程度でありLDによる研究が進められている。また，LDは小型・軽量であり，宇宙機にレーザー本体を搭載するオンボード型のLSPスラスタへの応用が期待される。オンボード型LSPスラスタはそのレーザー電源を宇宙機本体の発電から賄う必要があり，レーザー出力は宇宙機の発電能力に依存する。本研究ではその規格的制約から発電能力が数W程度の超小型衛星に注目し，超小型衛星用LSPスラスタへの応用に向けて，数W級低出力LDによるLSPの生成を目指す。先行研究では充填圧力1 MPaのキセノンランプに1 kWクラスのダイオードレーザーを用いてレーザービームを集光しLSPを生成することに成功し，LSP生成閾値は1 MPa の圧力で焦点ビーム面積0.59 mm×1.47 mmに対して526±4 W，すなわち，LSP生成強度閾値は $1.08 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ であることが確認された³⁾。この研究より，同じ圧力条件において，集光性能の良い対物レンズを利用してスポット径を約10 μm まで小さくすることで，200 mW級のレーザーダイオードを利用しても，生成閾値に到達可能であると考えられる。

そこで本研究では，対物レンズを利用して数 W 級のレーザーダイオードによるLSPの生成を実験的に検証することを目的とする。

2. レーザー維持プラズマ (LSP)

LSPは初期プラズマ源に含まれる電子がレーザー光を吸収して生成されるプラズマである。LSPの生成には、生成と定常維持の過程がある。LSPは火種となる初期プラズマ源にレーザー光を吸収させることで生成する。本研究ではアーク放電を用いて初期プラズマ源を生成した。

LSPの生成に必要なビーム強度をLSP生成閾値といい、ビーム出力を集光スポット面積で割った値として与えられる。

3. 吸収係数

LSPにおいてレーザーエネルギーの吸収課程は主に逆制動放射吸収と原子線吸収に起因する。逆制動放射過程とは、電子が重粒子と衝突し電磁波を放出することによりエネルギーを損失する制動放射の逆過程であり、自由電子-重粒子の衝突が重要な要素となる。一度プラズマが何らかの方法で生成されると、プラズマ中の電子はレーザービームを逆制動放射により吸収する。その結果、電離反応が進み雪崩的に電子数密度を増す。一方、原子線吸収では、束縛電子が上準位へ遷移するのに十分な単一の光子、もしくは複数の光子を同時に吸収することで、レーザー光を吸収する過程である。レーザーを維持するためには、上述したようにレーザー吸収過程を勘案することが不可欠である。

3. 2 吸収の式

レーザービームの吸収は先述したように、主に逆制動放射または原子線吸収に因るものである。レーザービームの吸収は、Beer-Lambertの法則によって記述される。

$$dI = -kdx \quad (1)$$

上式を吸収経路長 x で積分すると、

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp(-kx) \quad (2)$$

が得られる。ここで、 $I_0(\nu)$ と k はそれぞれ、入射するレーザー強度および吸収係数である。ここで、複数の過程における吸収によりそれぞれ独立な吸収係数が与えられた場合、トータルの吸収係数は単に和で与えられるため、今回の場合は以下のように表すことができる。

$$k = k_{IB} + k_{AA} \quad (3)$$

ここで、 k_{IB} , k_{AA} はそれぞれ逆制動放射と原子線吸収の吸収係数である。

3. 2 逆制動放射吸収

逆制動放射吸収は、自由電子群の運動エネルギーによって電磁波の波長が決定される自由-自由遷移や自由-束縛遷移に関連しており、連続スペクトルが放射される制動放射の逆課程として考えられる。

3. 3 原子線吸収

原子は、核外電子の配置によって決まるエネルギー準位を持ち、その原子固有のスペクトルを持つ。二つのエネルギー準位の間では、そのエネルギー差 $\Delta E_{ij} = h\nu_{ij}$ の関係を満たす共鳴振動数 ν_{ij} の光を吸収することで上準位へと遷移する。この現象はLSPの発光分光で確認できる線スペクトルの逆過程であり、原子線吸収または共鳴吸収と呼ぶ。

LSPの発光分光で確認できる多くの線スペクトルのように、第一励起準位から第二励起準位への励起などでは、励起に必要とされるエネルギーは低く、イオン化エネルギー程高くはない。そのためLSPにおいても、レーザーの発振波長とプラズマの吸収スペクトルの波長を揃えることで、原子線吸収における吸収エネルギーの増加が期待できる。

4. 実験装置

図1にLSP生成実験系の概略図を示す。初期プラズマの生成には、先行研究と同様の充填圧力1 MPaのキセノンランプを使用し、キセノンランプ内に固定されたアーク放電用電極間にレーザービームを集光させる。本研究において、集光にはレンズの収差の影響を小さくするために対物レンズを使用する。

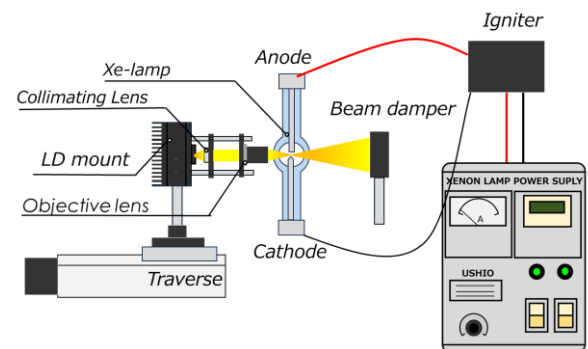


図1 LSP生成実験系の概略図

4. 1 対物レンズ

本研究では集光レンズに、球面収差を無視できることにより単レンズに比べ集光性能の高い対物レンズを使用する。表1表1に使用した対物レンズ(Thorlabs, LMH-5X-1064)の諸元を示す。

表 1 Objective lens specifications.

	LMH-5X-1064
NA	0.13
EP	9.9 mm
λ	1064 nm

4. 2 レーザー

本研究では複数の半導体レーザーを使用した．使用したレーザーの出力と型番を表2に示す．

表 2 Objective lens specifications.

	型番	出力
200 mW-LD	L980H1(Thorlabs)	200 mW
3 W-LD	型番なし(Civil Laser)	3 W

5. 実験結果および考察

5. 1 200 mW-LD

200mW-LDを用いたLSP生成実験の結果，LSPは生成しなかった．ビームプロファイラを用いて集光点における実際の強度分布を調べた結果を図2に示す．

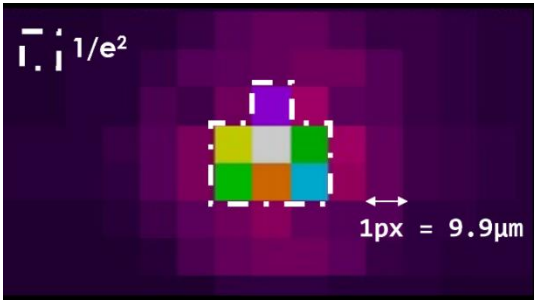


図2 200mW-LDの焦点における強度分布

集光点においてピークに対し強度 $1/e^2$ 倍まで範囲の面積が $686\mu\text{m}^2$ であった．このことから集光点におけるビーム強度は $2.84 \times 10^5\text{W}/\text{cm}^2$ であり，生成閾値に対して0.26倍の強度であり，ビーム強度が生成閾値に達しなかった．

5, 2 3W-LD

ビームプロファイラを用いて集光点における実際の強度分布を調べた結果を図3に示す．

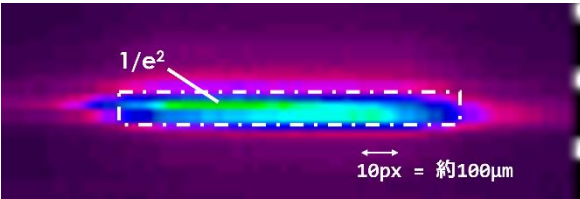


図3 200mW-LDの焦点における強度分布

集光点におけるビーム強度はこのLDのスペック上の最大出力3Wに対して $3 \times 10^3\text{W}/\text{cm}^2$ であり，生成閾値に対して0.03倍の強度であり，ビーム強度が生成閾値に達しなかった．

いずれの実験結果も集光面積が理論値よりも大きく，LSP生成閾値に到達しなかった．この原因として集光面積の計算においてガウシアンビームを仮定したのに対し，実際の半導体レーザーはビーム品質が悪く，集光性能が低下したことが原因と考えられる．単純な集光性の向上だけでは限界があるため，原子線吸収を利用することでLSP生成閾値を下げるアプローチについて考察する．

そこで単原子分子のうち入手性の良いアルゴンについて実験環境と同様の温度，圧力環境における逆制動放射吸収と原子線吸収の吸収係数を比較した．結果を図4に示す．

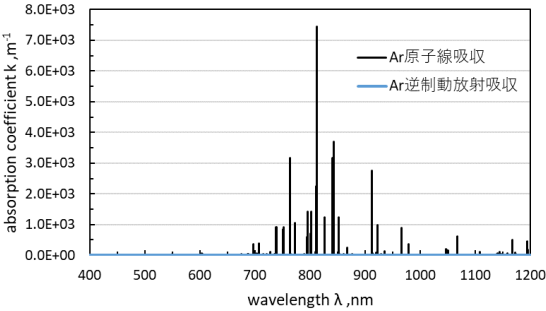


図4 アルゴンの逆制動放射吸収係数と原子線吸収係数の比較(0.8MPa,13000K)

アルゴンの原子線のうち811nm付近の吸収係数が逆制動放射吸収に比べて非常に大きく，この原子線を利用することにより，LSP生成閾値の低下が期待できる．

そこで，アルゴンの811nm帯の原子線吸収を利用した場合のLSP生成閾値を推定した．図にキセノンの1064nmの逆制動放射吸収係数とアルゴンの811nmの原子線吸収係数の比較を図5に示す．

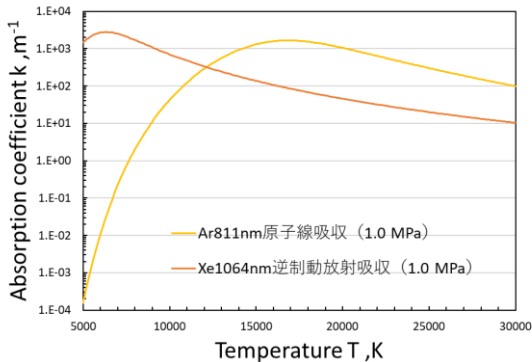


図5 キセノンの1064nmの逆制動放射吸収係数とアルゴンの811nmの原子線吸収係数の比較

提示された吸収係数の比較データからは温度が12000Kを超える領域において、アルゴンの811nmにおける原子線吸収係数が、キセノンの1064nmにおける逆制動放射吸収係数よりも約10倍大きいことが確認できる。この事実は、アルゴンの811nmにおける原子線吸収を選択的に利用することにより、キセノンの逆制動放射吸収を利用する従来の手法と比較して、レーザーエネルギーの吸収効率を高め、結果としてLSP（レーザー持続プラズマ）生成に必要な閾値を低減できる可能性を示唆している。この仮説に基づき、本研究では、アルゴンの811nm帯における原子線吸収を利用した場合のLSP生成閾値を推定した。推定には、同研究室の高野らによる既報のアルゴンLSP生成閾値に関する実験データ⁴⁾を用いた。高野らは異なる圧力条件（0.60～2.00 MPa）において4 kW半導体レーザーを異なるF値（F 2.0, F 1.5, F 1.2）のレンズで集光しLSPを生成したときのLSP生成に必要な最小レーザーパワーを取得した。本研究では、これらの実験で同時に測定されたチャンパー内圧力およびLSP温度のデータから、まず半導体レーザーの波長帯である1064nm帯における吸収係数を算出した。次に、この吸収係数と測定された最小レーザーパワーの関係をプロットし、得られた近似曲線に対して、別途計算したアルゴン811nm帯の原子線吸収係数を代入することで、原子線吸収を主として利用した場合のLSP生成閾値を予測した。その結果を図6に示す。

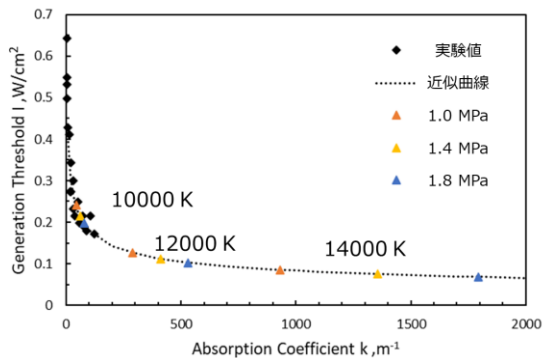


図6 吸収係数とLSP生成閾値の関係

計算結果として、先行研究の結果のプロットを累乗近似して得られた式は次のように表される。

$$I = 852916 k^{-0.337}$$

(4)

この時の R^2 値は $R^2 = 0.946$ である。
この近似式を用いて811nm帯の原子線吸収を狙ったときのLSP生成閾値を求めた結果 $P = 1.0 \sim 1.4 \text{ MPa}$, $T = 14000 \text{ K}$ においてLSP生成閾値は

$I = 8.5 \times 10^4 \sim 6.8 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ であった。これは現状目標にしているキセノン1 MPaにおけるLSP生成閾値に対して約0.63倍に相当する。この結果から、アルゴンの811nm帯の原子線吸収を利用することにより、より低いレーザー強度でもLSPの生成が可能となることが期待される。

6. まとめ
本研究では、超小型衛星用 LSP スラスタへの応用を目的とし、W 級半導体レーザーを用いた LSP 生成の検証を実施した。
先行研究からキセノン 1 MPa における LSP 生成閾値を算出し、球面収差を無視可能であり、単レンズに比べ集光性能の高い対物レンズを用いて集光することで LSP 生成閾値に到達することを試みた。しかし、実験の結果 LSP 生成には至らなかった。
この原因として半導体レーザーのビーム品質が悪く、理論計算通りの集光性能が得られず結果としてレーザー強度が LSP 生成閾値に達しなかったためと考察される。一方で、吸収メカニズムの比較検討から、アルゴンの 811nm における原子線吸収係数は、キセノンの 1064nm における逆制動放射吸収係数よりも 12000K 以上の温度域で約 10 倍大きいことが確認された。この知見と先行研究データに基づき、アルゴン 811nm 帯の原子線吸収を利用した場合の LSP 生成閾値を推定したところ、現状目標にしているキセノン 1MPa の場合と比較して約 0.63 倍まで低減できる可能性が示された。

これらの結果は、今後の LSP 生成において、ビーム品質の改善と原子線吸収の積極的な利用が重要な課題であることを示唆している。

文 献

1) M. A. Birkan, “Laser propulsion - Research status and needs,” J. Propul. Power, vol. 8, no. 2, pp. 354 – 360, Mar. 1992. doi : 10.2514/3.23485.

2) A. Kantrowitz, “Propulsion to Orbit by Ground-Base Lasers,” Astronautics and Aerospace Engineering, vol. 10, no. 5, pp. 74–76, 1972.

3) K. Nishimoto “Generation of Laser Sustained Plasma using 1 kW Class Diode Laser”, Shizuoka University Master Thesis(2017).

4) S. Takano, Y. Homme, and M. Matsui, “Effects of the F-number on the generation condition of a diode-laser-sustained plasma,” Optics Letter, vol. 48, no. 21/1 November 2023.