

宇宙用半導体レーザ励起 YAG レーザ

Spaceborne Diode-Pumped Nd:YAG Laser for Asteroid Sample Return Mission

中山 通雄
NAKAYAMA Michio

近年の地球環境問題に伴い、グローバルな観測ができる人工衛星搭載の LIDAR (Light Detecting And Ranging) が注目されている。当社では、様々な観測に使用できる LIDAR 及び各コンポーネントの開発を推進している。宇宙環境で使用するため、通常に比べ高信頼性、軽量化、耐環境性が要求され、LIDAR のキー部品であるレーザ開発が最大の課題となっている。

今回、文部科学省宇宙科学研究所の小惑星探査器 (MUSES-C) に搭載される LIDAR 用に、宇宙用としては国内初となる半導体レーザ励起 YAG レーザ^(注1)の開発に成功した。また、適用範囲拡大のため、レーザの高出力化を進めており、環境観測に適用可能な出力 15 W を達成した。

With the recent trend toward global environmental protection, the LIDAR (Light detecting and ranging) onboard satellite is attracting considerable attention because it can be applied to global observation. We are developing the LIDAR system and its components for various observation applications. Spaceborne components are required to have higher reliability, lighter weight, and greater durability.

We have developed a spaceborne diode-pumped Nd:YAG laser for MUSES-C, which is the asteroid investigation program being conducted by the Institute of Space and Astronautical Science, Japan. This is the first successful accomplishment of LIDAR for space use. The output power reaches 15 W, which is also sufficiently high to cover other environmental observation fields.

1 まえがき

地球環境の変化は、人類が直面している最大の問題といっても過言ではない。しかし、地球環境のシステムはまだまだ解明されておらず、地球規模のグローバルな観測が求められている。LIDAR は、レーザの単色性や可干渉性などの特長を応用した計測システムで、高度、風向きや風速、大気微量分子の計測などが可能である。また、レーザは指向性があるため任意の範囲を測定できる。この特長から、LIDAR を人工衛星に搭載することで、地球全体を細かく、かつグローバルに観測することが可能となる。

人工衛星に搭載される場合、打上げ時の耐振性や宇宙での耐環境性が必要条件である。特に、光学機器であるレーザは温度や振動の影響を受けやすく、LIDAR に使用される宇宙用レーザでは国内での実績がない。現在、文部科学省宇宙科学研究所は、小惑星探査計画 (MUSES-C) を 2002 年打上げで進めている。当社では、探査機に搭載される LIDAR の開発を担当している⁽¹⁾。このなかで、国内初となる宇宙用半導体レーザ励起 YAG レーザを開発した。

更に、当社では適用範囲を拡大するため、宇宙用半導体レーザ励起 YAG レーザの高出力化も進めている。これまでに、環境観測用 LIDAR に適用可能な出力 15 W を達成した。

(注1) Nd(ネオジウム)を含むイットリウム-アルミニウム-ガーネット結晶を用いたレーザ。

ここでは、MUSES-C に搭載される宇宙用半導体レーザ励起 YAG レーザと、高出力化への現状について述べる。

2 LIDAR の原理

MUSES-C 搭載 LIDAR の基本構成を図 1 に示す。この LIDAR は、高度計として使用されるもので、主に、レーザ送信器、受信光学系、制御回路部から構成される。レーザ送

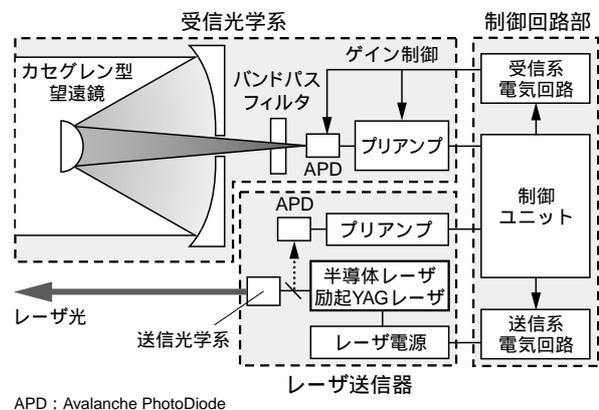


図1 . MUSES-C 搭載の LIDAR の基本構成 LIDAR は、半導体レーザ励起 YAG レーザを含むレーザ送信器、受信光学系、制御回路部から構成される。

Basic configuration of LIDAR for MUSES-C program

信器は、パルス幅20 ns以下のレーザ光をターゲット(小惑星)に向け出射する。受信光学系は、小惑星からの反射光を集光し検出する。制御回路部は、検出した送受信光の時間差から距離を算出する。LIDARの仕様を表1示す。測定レンジは50 m ~ 50 kmである。MUSES-Cでは軽量化が最大の課題で、LIDARでは質量3.56 kgを目指している。

表1. LIDARの要求仕様
Required specifications of LIDAR

項目	要求仕様	
測距性能	レンジ	50 m ~ 50 km
	分解能	± 1 m (50 m測定時) ± 10 m (50 km測定時)
	繰返し	1 Hz
質量	3.56 kg	
消費電力	17 W	
大きさ	240 mm x 228 mm x 250 mm	

3 宇宙用半導体レーザ励起 YAG レーザの開発

3.1 要求仕様

LIDAR用レーザに要求される仕様を表2に示す。ここで、パルスエネルギー及びビーム広がり角は、測定レンジ50 kmから要求される値である。また、パルス幅は測定分解能から要求される値である。

表2. LIDAR用レーザの要求仕様とプロトモデルの性能
Required specifications of laser for LIDAR and performance of prototype model

項目	要求仕様	プロトモデル
パルスエネルギー (mJ)	12	14
繰返し数 (Hz)	1	1
パルス幅 (ns)	< 20	10
ビーム広がり角 (mrad)	0.5	1.6 ^(注)
ビーム径 (mm)		直径1
発振モード		TEM ₀₀ モード

(注) 広がり角は、送信光学系のビームエキスパンダで調整される。

3.2 レーザの設計

宇宙用機器では信頼性が最重要課題である。そこで、レーザには、高信頼性の観点から宇宙用途で実績があり、すべて固体素子で構成される半導体レーザ励起YAGレーザを採用した。この半導体レーザ励起YAGレーザは、小型で高効率といった特長も持っている⁽²⁾。

MUSES-C用に開発した半導体レーザ励起YAGレーザのプロトモデルを図2に示す。打上げ時の振動や、宇宙での温度変化で生ずる光軸ずれの影響を低減するため、共振

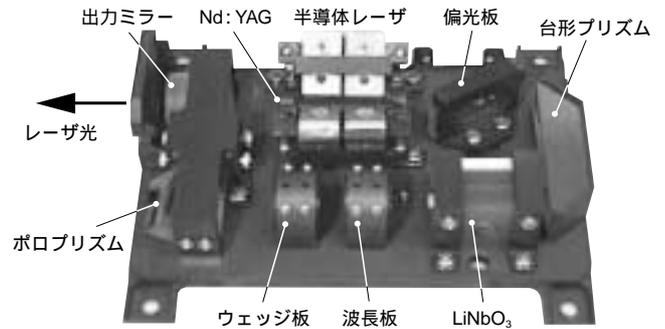


図2. 開発した半導体レーザ励起YAGレーザ プリズムの使用、光学部品接着固定、Mg合金使用などで高信頼性、耐環境性、軽量化を実現した。

Newly developed prototype model of diode-pumped Nd:YAG laser

器ミラーに2種類のプリズムを用いた。プリズムは、角度がずれても反射光の光軸が補償されるため、通常の平面ミラーと比べて角度許容度が約10倍向上する。レーザ媒質は、温度安定性に優れたネオジウムイオン(Nd³⁺)ドープのYAG結晶を選択した。また、宇宙での放射線(γ線)の影響を低減するため、クロムイオン(Cr³⁺)もドープした⁽³⁾⁽⁴⁾。

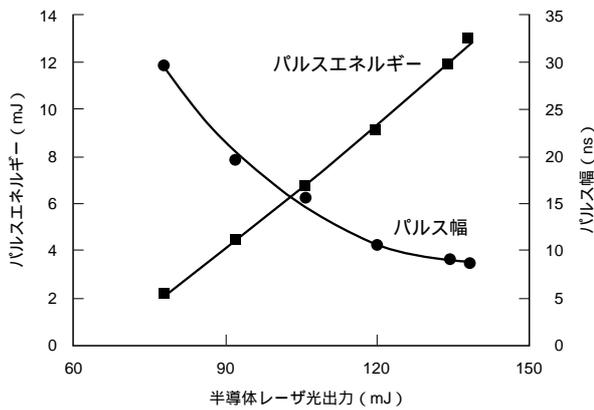
レーザ媒質の励起には、米国SDL社製の半導体レーザを用いた。半導体レーザは、効率向上のため電流制御でパルス動作される。この半導体レーザの光を集光レンズなしで直接YAGロッド側面の2方向から入射し、YAGを励起することで耐振性の向上を図った。半導体レーザやYAGから発生した熱は、すべて金物を介してLIDARの筐体(きょうたい)へ伝導排熱される。半導体レーザの発振波長は動作温度で大きく変化し、その割合は約0.3 nm/°Cである。YAGの吸収効率を高め出力安定性を確保するため、筐体は±5°Cの範囲で温度制御される。

パルス幅20 nsを達成するため、Qスイッチ動作を実施した。これは、共振器のQ値(損失)を変えてレーザのON/OFFを行うものである。YAGにエネルギーを蓄積した後ONすることで、レーザ発振が急激に立ち上がり、短いパルス幅が得られる⁽⁵⁾。Q値を変える方法には、非線形光学結晶ニオブ酸リチウム(LiNbO₃)を用いた、電気・光学効果の方式を採用した。LiNbO₃に電圧を印加して偏光方向を回転し、ON/OFFを行う。

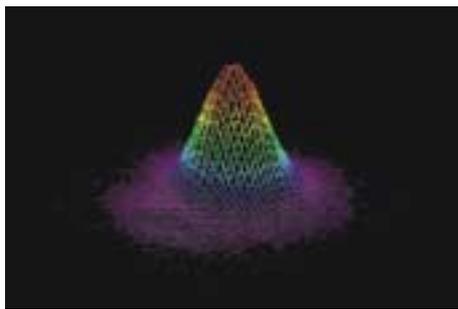
レーザの軽量化を図るため、筐体などの金物にはすべてマグネシウム(Mg)合金を用いた。また、ほとんどの光学部品をシリコン(Si)系接着剤で接着固定した。この結果、製作したプロトモデルは、配線材を除く質量297 gを実現した。

3.3 光学性能

プロトモデルの光学性能を表2に、入出力特性とレーザ光のビーム形状を図3に示す。出力エネルギー、パルス幅とも十分仕様を満たす値が得られた。ビームの断面はガウシアン(正規分布)形状をしており、ビーム径と広がり角から、発



(a) 入出力特性



(b) ビーム形状

図3 . プロトモデルのレーザー特性 要求仕様を満たすパルスエネルギー, パルス幅が得られている。
Performance of prototype model

振モードは回折限界のTEM₀₀(Transverse Electric and Magnetic wave)モードと言える。なお, ビーム広がり角については, ビーム径を約3倍に拡大して調整する。

3.4 耐環境性

MUSES-Cでは, 表3に示すような耐環境性が要求される。そこで, 各種環境試験を行い, 耐環境性を実証した。

耐振性では, 各部品の位置や角度ずれが問題である。そのため, 半導体レーザー及びレーザーの振動試験を2回以上行い, 加振前後の入出力特性に変化がないことを確認した。

温度変化では, 前述の筐体熱歪(ひずみ)による光軸ずれや半導体レーザーの波長変化のほかに, LiNbO₃の пироエレクトリック効果の影響が問題である。 пироエレクトリック効果が起こると, 結晶表面が帯電し, LiNbO₃は電圧印加状態

表3 . MUSES-Cの耐環境性仕様
Environmental specifications of MUSES-C program

項目	要求仕様	
振動(実効値)	271 m/s ² (27.6 G)	
温度	動作時	+ 25 ± 5 °C
	非動作時	- 40 °C ~ + 50 °C
放射線(γ線)	100 Gy	

となり, Qスイッチに悪影響を及ぼす。 пироエレクトリック効果は, 結晶中の欠陥や不純物濃度が影響していると言われており, 回避にはスクリーニングが有効である⁽⁶⁾。そこで, 真空中でLiNbO₃に - 40 ~ +70 °Cの温度変化を与え, 透過光の直線偏光性に影響のないものを選定した。更に, レーザでの熱真空試験を温度範囲 - 40 ~ +50 °Cで実施し, 試験前後の入出力特性に変化がないことも確認した。

宇宙での放射線でもっとも悪影響を及ぼすのはγ線である。このγ線の影響については, ほとんど公表されていない。そのため, 要求仕様の吸収線量100 Gyのγ線照射試験を部品単体及び組立後のレーザーで行った。その結果, 半導体レーザー及びレーザーは入出力特性に変化はなく, また光学部品も発振波長1,064 nmでの透過率に変化が見られなかった。このことから, γ線に対しても問題ないことが実証された。

3.5 寿命

寿命は, 保存寿命と動作寿命に大別される。MUSES-Cでは, 探査機が小惑星へ接近するまでに約1年8か月掛かるため, 保存寿命も重要である。宇宙での保存寿命は, 主に耐熱真空性と耐放射線性で決まる。この両者とも, 前述のとおり環境試験で性能を実証しており問題ない。動作寿命は, 主に, 能動部品である半導体レーザーの寿命で決まる。パルス動作の半導体レーザーの寿命は, 一般に10⁹ ~ 10¹⁰ショットと言われている⁽⁷⁾。MUSES-Cの運用計画では, レーザの動作期間は数か月である。これは, 10⁷ショットに相当し, 寿命に比べ十分小さい値である。また, よりいっそうの信頼性向上を図るため, フライトモデル用半導体レーザーはスクリーニングして選定した。3セット分の半導体レーザーを用意し, 200時間の単体動作でもっとも出力低下の小さいものを選定した。この方法は, 米国航空宇宙局(NASA)のClementain計画で行われたものと同じ方法である⁽⁶⁾。更に, 実際の半導体レーザーの寿命を実証するため, フライトモデルと同じロットの半導体レーザーを用いて寿命試験を行った。その結果, 平均寿命10⁹ショット以上, 運用期間10⁷ショットの信頼度0.99が得られ, 十分な寿命があることを実証した。

4 高出力化

LIDARを人工衛星に搭載し, 環境観測などを行う場合, 大気による減衰があるため, レーザには数W ~ 数十Wの出力が求められる。この要求に対応するため, 出力10Wレベルの半導体レーザー励起YAGレーザーの開発を進めている。

高出力化での最大の問題は排熱である。宇宙では, 信頼性の観点から固体間熱伝導によるパッシブな排熱方式が望ましい。そこで, 排熱性, 高信頼性, 高効率を考慮し, 図4に示すYAGロッドへの3方向励起, 3方向排熱構造を採用した。励起光がロッド内を往復して効率向上が図れるとともに, 構造が簡便で高信頼性が期待できる。半導体レーザーや

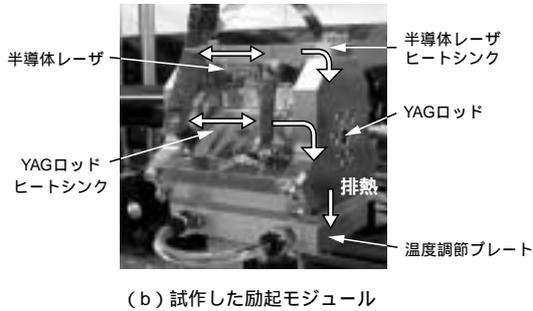
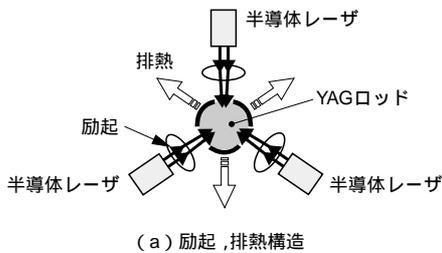


図4 .高出力の半導体レーザー励起モジュール 排熱性,高信頼性,高効率化を考慮し3方向励起,3方向排熱の構造を採用している。
Diode pumping module for high power

YAG ロッドで発生した熱は,ヒートシンクを介してすべて温度調節プレートへ伝導排熱される。軌道上では,更にヒートパイプで放熱板へ排熱することを想定している。

図4の励起モジュールを用いて,繰返し数100 HzでQスイッチ発振した場合の入出力特性を図5に示す。最大で,パルスエネルギー150 mJ(平均出力15 W)が得られた。そのときのパルス幅は18 ns,電気 光変換効率は9%である。これは環境観測などのLIDARに十分適用できる性能である。また,この励起モジュールが真空中で正常に動作するこ

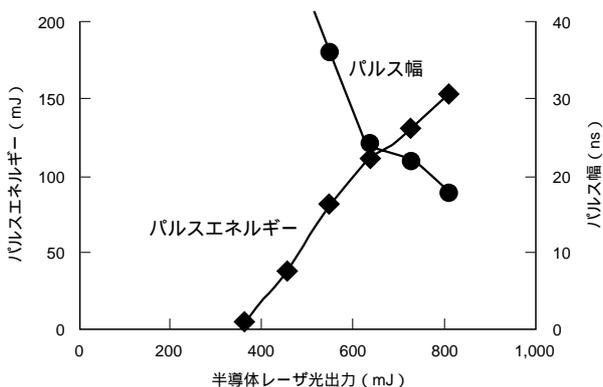


図5 .繰返し数100 Hzの入出力特性 出力15 W(パルスエネルギー150 mJ × 繰返し100 Hz)を達成した。
Pulse energy vs. pumping energy at 100 Hz

とも確認し,宇宙での排熱性に問題ないことを実証した。今回の試作機は,10 Wレベルではあるが,同じ励起モジュールを多数用いることで容易に高出力化が可能であり,高出力の宇宙用レーザー実現にめどが立ったと言える。

5 あとがき

宇宙用としては国内初となる,半導体レーザー励起YAGレーザーを開発した。このレーザーは文部科学省宇宙科学研究所小惑星探査計画に使用される。開発したレーザーは,要求性能を達成するとともに,宇宙用として高信頼性,耐環境性,軽量化を実現した。開発は,フライトモデルの製作フェーズに入り,レーザー開発は計画どおり完了した。

また,適用範囲を拡大するため,レーザーの高出力化を図り,出力15 Wの半導体レーザー励起YAGレーザーを開発した。真空中動作など実用性も確認し,人工衛星搭載用LIDARへの適用が期待できる。今後,更に実用性を向上させ,環境観測などへの適用を進めていきたい。

謝 辞

小惑星探査用半導体レーザー励起YAGレーザーの開発に際し,文部科学省宇宙科学研究所の斎藤宏文教授並びに水野貴秀助教授にご指導をいただき,深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) 斎藤宏文,ほか .MUSES-C 航法・姿勢センサ開発について .電子情報通信学会技術研究報告 ,sane98-31 ~ 41 .98 ,215 ,1998 ,p.59 - 66 .
- (2) 湯浅広土,ほか .レーザーダイオード励起Nd:YAGレーザー .東芝レビュー .55 ,4 ,2000 ,p.21 - 24 .
- (3) Ashurov, M. Kh. et al. Effect of chromium ions on the formation of color centers in crystals with the garnet structure. Sov. Phys. Dokl. 30, 6, 1985 .
- (4) Afzal, R. S. Mars Observer Laser Altimeter: laser transmitter. Appl. Opt. 33, 15, 1994, p.3184 - 3188.
- (5) 多田邦雄,ほか .光エレクトロニクスの基礎 .東京,丸善,1988 ,598p .
- (6) Kushina, M. E. et al. "Clementine: Diode-pumped laser qualification". Proc. SPIE Vol. 2379, solid state Lasers and Nonlinear Crystals. 1995-04, SPIE. 1995, p.137 - 140.
- (7) Haden, J. et al. "Advances in High Average Power Long Life Laser Diode Pump Array Architectures". Proc. SPIE Vol.2382, Laser Diodes and Applications. 1995-04, SPIE. 1995, p.2 - 21.



中山 通雄 NAKAYAMA Michio

生産技術センター 光応用システム技術センター研究主務。
固体レーザー発振器及び関連技術の研究・開発に従事。応用物理学会,レーザー学会会員。
Quality Control System Technology Center