

増幅および注入ロック用小形 D₂O レーザの単一モード発振

正員 高田 昇治[†] 非会員 佐々木浩一[†]
 非会員 高橋 修[†] 非会員 永津 雅章[†]
 正員 築島 隆繁^{††}

Single-Mode Operation of a Compact D₂O Laser for Injection Locking and Oscillator-Amplifier Systems

Noriharu TAKADA[†], Member, Koichi SASAKI[†], Osamu TAKAHASHI[†], Masaaki NAGATSU[†], Nonmembers and Takashige TSUKISHIMA^{††}, Member

[†]名古屋大学工学部電気学科, 名古屋市

School of Engineering, Nagoya University, Nagoya-shi, 464-01 Japan

^{††}愛知工業大学電子工学科, 豊田市

Aichi Institute of Technology, Toyota-shi, 470-03 Japan

あらまし 共振器長 800mm の小形 D₂O レーザにおいて, 単一モード発振が得られる条件を 2 種類の共振器について明らかにした。また, 得られた単一モード出力のスペクトル幅が極めて狭帯域 (約 3MHz) であることを確認し, 本レーザが増幅および注入ロック実験におけるマスタ発振器として十分な性能を有することを示した。

キーワード 小形 D₂O レーザ, 単一モード発振, 狭帯域, 増幅, 注入ロック

1. まえがき

高温・高密度プラズマのイオン温度を測定する方法として, 大出力遠赤外レーザ (波長 385 μ m 光励起形 D₂O レーザ) を用いた協同トムソン散乱法の開発が進められている。既に, 中形のトカマク装置においてイオン温度計測の試みが行われ^{(1)~(3)}, 最近のローザンヌ工科大のグループは, 測定精度約 20% でイオン温度測定に成功したことを報告している。ところが, この測定で用いられたレーザ装置は, 複数の縦モードからなる広帯域発振スペクトルをもつことも報告されている⁽⁴⁾。このことは, 単一モード発振のレーザ光源の場合に比べ, 散乱波スペクトルの広帯域化を引き起こし, ひいてはイオン温度の過大評価の原因となっていることが予想される。筆者らの行った多モード発振レーザを光源にした場合の計算機シミュレーションにおいても, 散乱波スペクトルの広がりが見られており⁽⁵⁾, この問題を克服することが重要な課題であると思われる。筆者らの開発しているイオン温度計測用大出力 D₂O レーザにおいても, 周波数分解 0.66MHz を有するヘテロダイン受信検波システムを用いた発振スペクトル測定の結

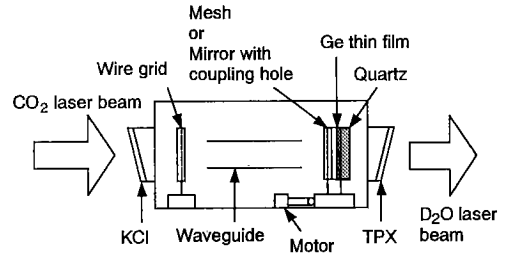


図 1 小形 D₂O レーザの概略図

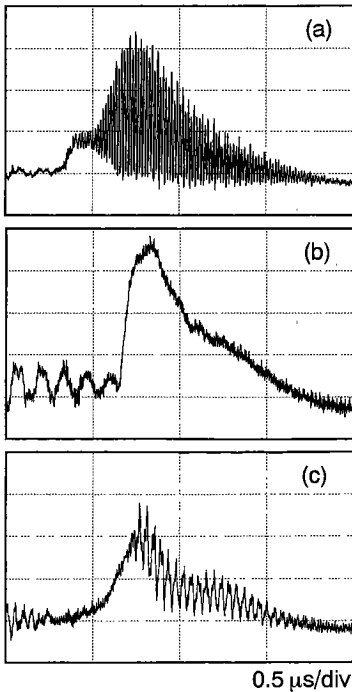
Fig. 1 Schematic drawing of the compact D₂O laser.

果, それぞれが 10MHz 以下のスペクトル幅をもつ 4~5 本の縦モードが同時発振していることが確かめられた⁽⁶⁾。

これは, 主に励起光強度あるいはガス圧に関係した発振利得幅の広帯域化が原因と考えられる。そこで, 大出力 D₂O レーザの狭帯域化を達成する方法として, 小出力ながら単一モードで発振する小形 D₂O レーザを開発し, その出力を大形増幅器で増幅する方法, あるいはその出力により直接大形 D₂O レーザを注入ロックする方法を検討している。過去, Drozdowicz らにより同様な試みは行われたが⁽⁷⁾, この実験で用いられた励起用 CO₂ レーザは多モード発振であり, 実用的な狭帯域発振大出力 D₂O レーザの開発までには至っていない。また, 小形 D₂O レーザについても, 発振スペクトルの詳細な測定を報告した例はない。これらの観点から, 本論文では, 増幅および注入ロック方式においてマスタ発振器となる小形 D₂O レーザの試作を行い, 単一モード発振が得られる条件を各種共振器について明らかにした。更に, 発振スペクトルの高・周波数分解測定を行い, 単一モード発振出力のスペクトル幅が極めて狭帯域であることを確認したので報告する。

2. 小形 D₂O レーザシステム

図 1 に試作した小形 D₂O レーザ装置の概略を示す。レーザ共振器は, 大きさ 200×200×1000mm の角形ステンレス製真空容器内に収納され, 励起用 CO₂ レーザ光の入射窓として KCl 板を, D₂O レーザ光の出力窓として TPX (4-メチルペンテン-1) 板を用いた。ここで, 励起光の窓板からの反射光による CO₂ レーザ自身へのバックトークを避けるため, 窓板は光軸垂直面より約 5 度傾けて使用した。共振器は, 2 枚の平行平面鏡で構成され, 入射窓側にはタングステン製ワイヤグリッド (250 線/インチ) を, 出力窓側には銅メッシュ (150 線/インチ) と Ge 蒸着水晶板を重ねた出力鏡を用いた場合 (共振器 I), および中央に 10mm ϕ の結合孔を有する金蒸着鏡と Ge 蒸着水晶板を重ねた出力鏡を用いた場合



(a) 1.5 Torr, (b) 5 Torr, (c) 8 Torr

図2 小形D₂Oレーザにおける出力波形のD₂Oガス圧依存性(励起強度:190kW/cm²,導波管:有の場合)

Fig. 2 Output waveforms of the compact D₂O laser for various D₂O gas pressures, when the pump intensity was 190kW/cm² and a circular waveguide was incorporated inside the resonator.

(共振器II)の2種類について実験した。なお、ワイヤグリッドのCO₂レーザ光に対する透過率は約75%であり、D₂Oレーザ光に対する反射率はほぼ100%である。共振器IおよびII共に、共振器長は800mmであり、出力鏡を約10μm間隔で真空容器外部より微調整できる構造とした。実験では、共振器内に内径20mm、長さ790mmのバイレックスガラス製の導波管を挿入した場合と挿入しない場合について両者の比較を行った。励起用CO₂レーザは、帰還制御により9R22発振線(波長9.26μm)の線中心において安定に単一縦横モードで発振している。本実験では共振器内に入射される励起光強度が、約190kW/cm²、約380kW/cm²、および約500kW/cm²の3種類について測定を行った。検出器にはショットキーバリアダイオードを用い、ビデオ検波することによって発振波形の測定を行い、発振スペクトルについては、ヘテロダイン受信検波システム⁽⁶⁾により測定した信号を、周波数分解1.3MHzで高速フーリエ変換して求めた。

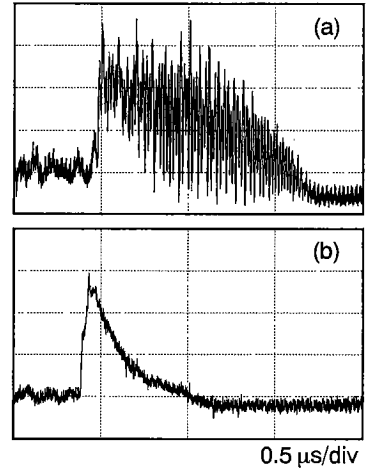


図3 アパーチャの有無による小形D₂Oレーザの出力波形(励起強度:380kW/cm²,導波管:無,D₂Oガス圧:5 Torrの場合)

(a)アパーチャなし,(b)アパーチャあり

Fig. 3 Output waveforms of the compact D₂O laser (a) without and (b) with an aperture, when the pumping intensity was 380kW/cm², a circular waveguide was not incorporated in the cavity and the gas pressure was 5 torr.

3. 実験結果および検討

まず、導波管を挿入した場合の共振器Iについて励起光強度およびD₂Oガス圧依存性を調べた。図2は、励起光強度が約190kW/cm²のとき、ガス圧を1.5 Torr, 5 Torr および 8 Torr と変化させた場合のD₂Oレーザ発振波形を示している。図に示したように、5 Torr 近辺のガス圧においてのみ、ほぼ毎回単一モード発振が得られた。また、導波管を取り除くと、すべてのD₂Oガス圧に対して単一モード発振が得られた。次に、励起光強度を約380kW/cm²および約500kW/cm²にした場合には、導波管の有無、D₂Oガス圧に関係なくすべて多モード発振となった。図3(a)は、励起光強度が380kW/cm²、ガス圧が5 Torrの場合の出力波形の例を示している。これを単一モード化するため、導波管の無い状態で共振器内に口径20mmのアパーチャを挿入したところ、図3(b)に示した単一モード発振を得ることができた。また、これらの実験結果は、共振器IIにおいてもほぼ同様であった。表1には、共振器構造、ガス圧および励起強度が発振特性に及ぼす影響をまとめて示した。一般的に、アパーチャを挿入しないほうが大きな出力パワーが得られ魅力的であるが、表より明らかに、今回行った実験条件に対して“アパーチャのみ”の場合だけがすべて単一モード発振となった。よっ

表1 種々の実験条件における共振器 I, II の出力特性

導波管・アパーチャ		導波管あり			導波管なし			アパーチャのみ (20mmφ)		
ガス圧 (Torr)		1.5	5	8	1.5	5	8	1.5	5	8
励起強度 (kW/cm ²)	190	多	単	多	単	単	単	単	単	単
	380	多	多	多	多	多	多	単	単	単
	500	多	多	多	多	多	多	単	単	単

注：“多”は多モード発振，“単”は単一モード発振

て、単一モード発振が最優先される本研究においては、“アパーチャのみ”の共振器構造を用いることが最善の方法である。

これらの実験で用いた共振器の縦モード間隔は約188MHzである。一方、観測されたビート周波数はいずれも188MHzより低く、また、アパーチャの挿入により単一モード発振が得られたことなどからみて、これらのビートは高次横モードの同時発振によるものと推定できる。同一ガス圧において励起光強度を増加すると、単一モード発振から多モード発振へ変化することから、いわゆる AC シュタルク効果による発振利得幅の広がり方が影響しているものと考えられる。また、同一励起光強度においては、ガス圧の増加と共に D₂O 分子による吸収が大きくなり、AC シュタルク効果が軽減される反面、圧力広がり効果が増大するため単一モード発振から多モード発振に推移したものと考えられる。

次に、単一モード発振時の発振スペクトルの測定を行った。励起光強度が約500kW/cm²、ガス圧が5 Torr、共振器IIに口径20mmのアパーチャを挿入した場合の典型的な発振スペクトルを図4に示した。図中0MHzはラマン共鳴周波数(D₂Oレーザ線の中心周波数より320MHz低い)に相当している。発振スペクトルはそれよりプラス側約65MHzに位置し、半値幅は約3MHz程度と極めて狭帯域であることがわかる。一般に、共振器のない場合には、ラマン共鳴周波数付近において ASE (Amplified Spontaneous Emission) が放射されることが知られている。そこで、今回試作した小形 D₂O レーザの ASE レベルを調べるため、共振器長の同調により発振周波数をラマン共鳴周波数近辺で変化させてスペクトル測定を行ったが、ASE レベルは発振レーザ光レベルに比べ十分に小さいことがわかった。

小形 D₂O レーザを増幅方式のマスタ発振器として用いる際には、その発振周波数を増幅器の最大利得とな

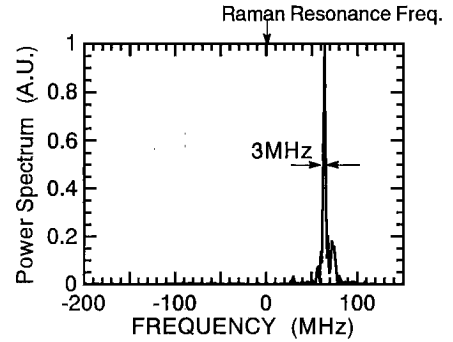


図4 小形 D₂O レーザで得られた単一モード出力のパワースペクトルの一例

Fig. 4 An example of the emission power spectrum of the single-mode output obtained from the present compact D₂O laser.

る周波数に、注入ロック方式に使用するには、大形 D₂O レーザの縦モードの一つに精度良く一致させる必要がある。小形 D₂O レーザに対するこの要求は、共振器長を約10μm単位で微調整することにより達成可能であることを高・周波数分解スペクトル測定により確認した。現実には筆者らは、増幅方式による初期実験において、約40Jの励起光を用いて約50mJの狭帯域出力を得ているが、詳しい内容については別の機会に述べる。

4. むすび

増幅および注入ロック用マスタ発振器として開発した小形 D₂O レーザにおいて単一モード発振が得られる条件を次のとおり明らかにした。まず、励起光強度が約190kW/cm²のとき、導波管を挿入しない場合はすべてのガス圧に対して単一モード発振が得られたが、導波管を挿入した場合にはガス圧が5 Torr 近辺のみで単一モード発振が得られた。励起光強度が約380kW/cm²以上では、共振器内にアパーチャを挿入することにより単一モード発振を達成した。

得られた単一モード出力のスペクトル測定を行い、半値幅約3MHzの極めて狭帯域な出力であることを確認した。

今回開発した小形 D₂O レーザは増幅および注入ロック用マスタ発振器として十分にその役割を果たすものであり、今後の成果が期待される。

なお、本研究の一部は、核融合科学研究所の共同研究費にて行った。

文 献

- (1) Woskoboinkow P., Mulligan W. J., Machuzak J., Cohn

- D. R., Temkin R. J., Sollner T. C. L. G. and Lax B. : "385 μm D_2O Laser. Collective Thomson Scattering Ion Temperature Diagnostic", Proc. 11th European Conf. Controlled Fusion and Plasma Physics, Aachen, E21 (Sept. 1983).
- (2) Behn R., Dicken D., Hackmann J., Salito S. A., Siegrist M. R., Krug P. A., Kjellberg I., Duval B., Joyce B. and Pochelon A. : "Ion Temperature Measurement of Tokamak Plasmas by Collective Thomson Scattering of D_2O Laser Radiation", Phys. Rev. Lett., **62**, 24, pp. 2833-2836 (June 1989).
- (3) Borm M., Dicken H.-D., Hackmann J. and Uhlenbusch J. : "Local Ion Temperature Measurements in the Tokamak UNITOR by Collective Thomson Scattering", Plasma Phys. Control. Fusion, **35**, 3, pp. 391-396 (March 1993).
- (4) Behn R., Dupertuis M. A., Krug P. A., Kjellberg I., Salito S. A. and Siegrist M. R. : "Time-Resolved Linewidth and Lineshape Measurements of a Pulsed Optically-Pumped Far Infrared D_2O Laser", IEEE J. Quantum Electron., **QE-24**, 3, pp. 549-557 (March 1988).
- (5) 永津雅章, 坪内有一, 高田昇治, 佐々木浩一, 築島隆繁 : "大出力・多モード発振 D_2O レーザーを用いた協同トムソン散乱計測によるイオン温度評価の計算機シミュレーション", 核融合研究, **68**, 3, pp. 279-297 (1992-09).
- (6) Nagatsu M., Tsubouchi Y., Takada N., Sasaki K., Tsukishima T., Okada T., Okajima S., Sato K., Sudo S. and Tsunawaki Y. : "Experimental Study of the Spectral Characteristics of a High Power, Pulsed D_2O Laser for Application to Plasma Diagnostics", Jpn. J. Appl. Phys., Part I, **31**, 12A, pp. 3873-3881 (Dec. 1992).
- (7) Drozdowicz Z., Woskoboinikow P., Isobe K., Cohn D. R., Temkin R. J., Button K. J. and Waldman J. : "High Power Optically Pumped Far Infrared Laser Systems", IEEE J. Quantum Electron., **QE-13**, 6, pp. 413-417 (June 1977).
- (平成5年12月15日受付, 6年2月7日再受付)