レーザーオリジナル

TEA CO₂レーザー発振の単一モード化

—ファブリーペローエタロン内挿型フォックスミスモード選択器を用いた発振特性—

綱 脇 恵 章*・氏 家 貴 生*・草 場 光 博*
 山 中 正 宣**・和 田 一 洋***

(1995年5月15日 受理)

TEA CO₂ Laser Oscillation by Using a Fox-Smith Mode Selector
 with a Fabry-Perot Etalon

Yoshiaki TSUNAWAKI*, Takao UJIKE*, Mitsuhiro KUSABA*,
 Masanobu YAMANAKA** and Kazuhiro WADA***

(Received May 15, 1995)

For achieving tunable and single longitudinal mode oscillation, a Fox-Smith type mode selector with a Fabry-Perot etalon was incorporated in a TEA CO₂ laser. The etalon was inserted in the optical path taken out from the main cavity of the CO₂ laser for protecting the etalon from damage on the surface. According to the longitudinal mode resulting from the etalon and the Fox-Smith optical path, the single mode oscillation of purities of more than 99 % and 95 % was performed with the probabilities of 55 % and 100 %, respectively. The tunability of a laser frequency was obtained with the purity of more than 75 % over the whole gain region of the TEA CO₂ laser by controlling the tilting angle of the etalon or the optical path length of the Fox-Smith system.

Key Words: TEA CO₂ laser, Single mode oscillation, Fox-Smith mode selector, Fabry-Perot etalon

1. はじめに

TEA CO₂レーザーは、約1気圧のガス圧で動作させると、その利得幅が約3 GHz¹⁾と広い

ため、多縦モード発振することはよく知られている。このような特性を持つTEA CO₂レーザーを分光学的に応用するには、多くの場合発振線は単一モードである必要がある。従来より単一

* 大阪産業大学工学部電気電子工学科 (〒574 大東市中垣内3-1-1)

** 大阪大学レーザー核融合研究センター (〒565 吹田市山田丘2-6)

*** 京都大学工学部エネルギー応用工学教室 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

* Department of Electrical Engineering & Electronics, Osaka Sangyo University (3-1-1 Naka-gaito, Daito, Osaka 574)

** Institute of Laser Engineering, Osaka University (2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565)

*** Department of Energy Science and Engineering, Faculty of Engineering Kyoto University (Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-01)

Fig. 1 Schematic diagram of a TEA CO₂ laser using a Fox-Smith mode selector with a Fabry-Perot etalon.

モード発振線を得るには、レーザー共振器内に(1)外部より周波数安定なcwCO₂レーザー出力光を注入する^{2,3)}、(2)低利得CO₂レーザー部を挿入する⁴⁾、(3)低損失吸収ガスセルを挿入する³⁾、(4)ファブリーペローエタロンを挿入する^{1,5,6)}などの方法があった。前三者の場合は、TEA CO₂レーザーの発振周波数は発振線の中心周波数に固定されるが、(4)の方法では、エタロンの傾角を変えることにより、利得幅内で発振周波数を可変にすることができる。例えば、核融合プラズマ診断用光励起遠赤外レーザーの励起用光源としてTEA CO₂レーザーを用いる場合⁶⁻⁸⁾、それは周波数可変で出力は単一モードである必要があり、多くの場合(4)の方法が用いられてきた。しかしこの場合、表面に多層膜コートしたエタロンをエネルギーの高い共振器内で使用することから損傷を受け易いため、安定な単一モード発振出力を得るには、かなりの技術を要するという難点があった⁶⁾。また最近では、(1)の注入ロック方式においてレーザーが短時間内に発振へと立ち上がっていく過程で、共振器内に挿入された音響光学素子で周波数シフトさせることにより、単一モードで且つ周波数可変の発振線を得る試みもなされている⁹⁾。

本研究では、レーザー装置として構造が簡単な(4)の方法を採用し、その欠点をとり除くために、TEA CO₂レーザーにフォックススミス光学系を組むことにより、ファブリーペローエ

タロンを共振器外に取り出した光路に挿入するモード選択器を考案し、TEA CO₂レーザーの周波数可変単一モード発振を試みた。

2. 実験装置

開発した単一モード発振TEA CO₂レーザーの光学系をFig. 1に示す。発振器はLumonics K-921sで、共振器長1.45 m(自由スペクトル領域: 103 MHz)の共振器は発振線を選択するための150本/mm回折格子と反射率70%のGe出力鏡から成り、膨張係数 $3 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ のスーパーインバー4本で固定されている。CO₂レーザー部には、ZnSeブルースター窓が取り付けられており、その間隔は約70 cmである。共振器内の回折格子とブルースター窓との間に回折格子から15 cmの位置に厚さ1 mmのZnSeビームスプリッターを置いてレーザー光の一部を取り出し、それをビームスプリッターから42 cmの位置に置かれた鏡で折り返して再び共振器内に注入する、いわゆるフォックススミス光学系を組み(自由スペクトル領域: 263 MHz)、外部に取り出した光路の中に直径2.5 cm、表面反射率60%のZnSeエタロンを挿入した。エタロンの厚さは、その自由スペクトル領域がTEA CO₂レーザーの利得幅(約3 GHz)とほぼ等しくなるよう、屈折率が約2.4であることから2 cmとした。またエタロンは、温度 $40 \pm 0.05^{\circ}\text{C}$ の温水を循環したジャケット内に保持し、エタロンの屈折率の温度変動を小さくするようにした。なお、

Fig. 2 Pulse shape of TEA CO₂ laser oscillation (upper) and its Fourier transform spectrum (lower). (a) Without a mode selector, (b) with a Fox-Smith mode selector and (c) with a Fox-Smith mode selector and a Fabry-Perot etalon.

このモード選択器の光学系はスーパーインバーの台上に組まれた。

ビームスプリッターに表面平行度の良いものを用いると、多重干渉効果により、取り出されるレーザーエネルギーはビームスプリッターの設置角度や温度に大きく依存して変化し、安定した単一モード発振が得にくい。他方、平行度の良くないウェッジ角が $6'$ 以上のものを用いると、レーザー共振器内の光軸のずれが大きくなり過ぎる。従って本研究では、多重干渉効果を軽減でき且つフレネルの反射率と比較的良好一致をするビームスプリッターとして、レーザーの回折広がり角とほぼ同程度のウェッジ角 $3'$ を持つビームスプリッターを用いた。しかしこの場合、横モードを伴って発振することが多く、共振器内に絞りを置いてこれを抑制した。本研究でのTEA CO₂レーザー発振線は全て10P(20)で、その出力エネルギー測定には、ジュールメーター(gentec ED-500)を、また出力波形測定にはフォンドラッグ検出器(浜松ホトニクス B749)とディジタイジングシグナルアナライザー(Tektronix DSA602A)を用いた。

3. 実験結果と考察

Fig. 2に(a)モード選択器を使用しない通常の共振器、(b)エタロンを含まないフォックススミスモード選択器を用いた共振器、(c)エタロン入りのフォックススミスモード選択器を用いた共振器それぞれからの、TEA CO₂レーザー発振パルス波形およびそのフーリエ変換スペクトルを示す。

よく知られているように、(a)の場合は等周波数間隔の縦モードと横モードで同時発振するのが見られる。この光学系にビームスプリッターと折り返し鏡を付加した(b)だけでも、ある程度の縦モード選択性が期待できる。しかし、そのモード間隔がレーザーの利得幅に比べ十分に広く取れないことから、発振縦モード数は減少するものの十分な単一モード発振を達成することが出来ない。従って、(c)のようにフォックススミスモード選択器内にさらにエタロンを

Fig. 3 Two mode simultaneous oscillation of a TEA CO₂ laser.

設置することにより、単一モード発振を達成することが出来た。さらにフォックススミスモード選択器自身の隣り合う2つの縦モードがレーザー共振器の2つの縦モードに平均して一致するような状態で、エタロンの透過率がそれら周波数領域の中心付近で最大になるようその傾角を調整することにより、Fig. 3に示すような2モードで安定した発振出力を得ることも出来た。

以上のように本装置では、フォックススミス光学系の光路長とエタロンの傾角とが互いに関連しあってTEA CO₂レーザーの発振特性が決まる。ここでフーリエ変換スペクトルでの基本波モードが全モードに占める割合をスペクトル純度と定義するならば、例えばエタロンの透過率が最大になるようにその傾角を固定し、フォックススミス光学系の可動鏡を差動マイクロメーターで移動することにより、95%以上のスペクトル純度を持つ単一モード発振線がフォックススミス光学系の縦モード間隔に対応する距離毎に観測された。さらに、その発振線

Fig. 4 Single mode purity of a TEA CO₂ laser depending on the tilting angle of the Fabry-Perot etalon of the Fox-Smith mode selector.

の両脇に約2 μm 離れた位置で、約90 %の純度の少し低い発振線が得られた。これはエタロンの透過率が最大となる両脇での2本のレーザー共振器の縦モードに起因するものと考えられる。また約20 μm の鏡の全移動範囲でスペクトル純度は75 %以上であった。

一方、フォックススミス光学系の鏡は固定し、エタロンの傾角だけを変化させたときの発振線の単一モードのスペクトル純度をFig. 4に示す。フォックススミス光学系の縦モードとレーザー共振器のそれと一致するところではスペクトル純度は平均95 %以上と大きく、それらがほぼ一致するところでは~90 %と少し小さくなり、一致しないところでは~80 %とさらに小さくなった。

このように、フォックススミス光学系の鏡の移動、あるいはエタロンの傾角を変えることにより、レーザー利得幅内で少なくとも75 %以上のスペクトル純度で単一モード発振させることができた。さらに両者を調整することにより約1000ショットの発振実験で常時95 %以上の、あるいは確率55 %でもって99 %以上のスペクトル純度の単一モード発振が可能となった。エタロンの温度変動をさらに小さくするように改善することによって、さらに高スペクトル純度単一モード発振の確率は高くなるものと考えられる。

4. まとめ

出来る限り簡便な方法でもって周波数可変単一モード発振TEA CO₂レーザーを実現するために、フォックススミス光学系にファブリーペローエタロンを挿入したモード選択器をレーザー共振器に付加し、その特性を調べた。その結果、利得幅全域内では75 %以上のスペクトル純度で周波数可変単一モード発振が可能となった。フォックススミス光学系の光路長およびファブリーペローエタロンの傾角で決まる縦モードを整合することにより、常時95 %以上のスペクトル純度で単一モード発振が得られた。従って、光路長と傾角を同時に調整することによって、レーザー共振器の縦モード間隔で連続的に周波数を変化させながら、利得幅全域にわたって高スペクトル純度の単一モード発振線を得ることが可能となろう。あるいは同様の効果は、フォックススミス光学系にかわってマイケルソン光学系を適用することによっても期待できよう。現在55 %の確率でスペクトル純度99 %以上の単一モード発振が達成されているが、エタロンの温度変動を1/100 $^{\circ}\text{C}$ 以下に小さくすることによって単一モード発振の確率はさらに高くなると考えられる。

謝辞

本研究は大阪大学レーザー核融合研究センターの共同研究課題として行われた。また本研究を推進するに当たり、測定に御協力いただいた大阪産業大学学生谷岡彦史君および付志洪君に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) N. Lee and R. L. Aggarwal: Appl. Opt. 16 (1977) 2600.
- 2) J. L. Bruneau: Opt. Commun. 41 (1982) 443.
- 3) P. W. Smith: Proc. IEEE 60 (1972) 422.
- 4) R. Behn, I. Kjellberg, P. D. Morgan, T. Okada and R. Siegrist: J. Appl. Phys. 54 (1983) 2995.
- 5) J. P. Nicholson and K. S. Lipton: Appl. Phys. Lett. 31 (1977) 430.

- 6) Y. Ichikawa, Y. Tsunawaki, M. Yamanaka, S. Okajima, L.-D. Wu, T. Iwasaki, M. Takai, A. Mitsuishi, T. Yamanaka and C. Yamanaka: Infrared Phys. 27 (1987) 317.
- 7) P. Woskoboinikow, H. C. Praddaude, W. J. Mulligan, D. R. Cohn and B. Lax: J. Appl. Phys. 50 (1979) 1125.
- 8) M. Nagatsu, Y. Tsubouchi, N. Takada, K. Sasaki, T. Tsukishima, T. Okada, S. Okajima, K. Sato, S. Sudo and Y. Tsunawaki: Jpn. J. Appl. Phys. 31 (1992) 3873.
- 9) 篠塚琢也, 須田 亮, 岡本貴之, 長坂啓吾, 田代英夫: レーザー学会学術講演会第15回年次大会講演予稿集 (1995. 1) p. 29.

レーザーワード

TEA CO₂レーザー(TEA CO₂ laser)

通常のCO₂レーザーでは、そのガス圧力は10～数10 torrと比較的低く、レーザー管に沿って置いた陽極と陰極の間で放電励起してレーザー出力を得る。高出力を得るレーザーのガス圧力は高くなり、電極間隙を小さくするためにレーザー管軸と垂直方向に電極を置いて放電させる。このようにTEA CO₂レーザーでは約1気圧のガス圧力で動作させ、Transversely Excited Atmospheric Pressure の頭文字をとってそのように称する。

(網脇 恵章)

Fox-Smith モード選択器(Fox-Smith mode selector)

多モードで発振するレーザーを単一モードで発振させるための装置をモード選択器という。Fox-Smith モード選択器の場合、レーザー共振器中にビームスプリッターを入れてレーザーの一部を取り出し、共振器外に置いた鏡で折り返し再度そのビームスプリッターを通してレーザー共振器内に戻す。このときのレーザー共振器鏡の一つとその外部鏡とで構成されたFabry-Perot共振器をFox-Smithモード選択器という。この場合このモード選択器の縦モードの一つとレーザー共振器のそれと周波数が一致したときレーザーは単一縦モード発振をする。

(網脇 恵章)

スパークギャップスイッチ(spark gap switch)

アーク放電を利用した高電圧高速大電力スイッチ。急峻な励起パルスが必要とする色素レーザー、窒素レーザー、TEA(Transversely Excited Atmospheric Pressure)CO₂レーザー、エキシマーレーザーなどの駆動回路に広く用いられるほか、高電圧パルス発生用のマルクスバンク回路にも用いられている。構造的には一般には半球上の電極を2個対向させたものが多いが、平板型や片側のみ半球上のものも実用されている。また加圧型もあり、nsオーダーの高速大電流動作が可能である。第3電極のトリガー電極を設けているのが殆んどであり、外部から容易にコントロールできる。

(十文字政憲)

コヒーレント後方錯乱(coherent backscattering)

レーザー光を一定方向から多重錯乱媒質に照射したときに、照射方向とちょうど逆方向の錯乱光強度にピークが現れる現象。これに類似した現象は以前から、例えば満月が欠けた月よりも予想外に明るく輝くことなどにより知らされていた。現在この強調後方散乱現象は、コヒーレント光の干渉効果および光の弱局在の側面から研究されている。

二光束干渉によってこの現象を説明する。媒質内の同じ光路を逆方向にたどる光波どうしは遠方場に干渉縞をつくるが、さまざまな光路による干渉縞が方向・周期ともにランダムに重なり合う結果、常に同位相で重なる逆方向付近のみが明るくなる。これが後方散乱ピークである。このピークは体積散乱のみならず、多重散乱を起こす粗面からの反射光にもみられる。

(岡本 卓)