

四镜环行腔连续稳频钛宝石激光器*

王军民 梁晓燕 李瑞宁 谢常德 彭堃堃

(山西大学光电研究所, 太原 030006)

提要 在四镜环行像散补偿腔中,使用宽带光学单向器迫使单向行波运转,使用复合石英双折射滤光片调谐波长并压窄线宽,使用单片标准具选取单纵模,实现了连续钛宝石激光器单频运转。通过电子伺服系统将输出激光的频率锁定在共焦参考腔上。在 790 nm 波长处,输出 183 mW 时,频率稳定性优于 430 kHz;输出 324 mW 时,频率稳定性优于 610 kHz,稳定时间大于 1 min。

关键词 环行连续钛宝石激光器, 稳频

1 引 言

连续稳频钛宝石激光器在高分辨率激光光谱学、激光雷达和量子光学等领域有着重要的应用,因而受到了广泛的关注。1988 年 Peter A. Schulz 首次实现连续钛宝石激光器单频运转,在自由运转的情况下获得的频率稳定性为 2 MHz^[1]。Wim Vassen 等^[2]和 H. J. Kimble 等^[3]又相继在 1990 年和 1991 年将连续钛宝石激光器的频率稳定性提高到 1 kHz,并应用于高分辨率激光光谱学^[2]和光场压缩态^[4]的研究。目前,国内钛宝石激光器的研究也有较大的进展^[5~7],但尚未见连续稳频钛宝石激光器的报道。

我们设计了消像散的四镜环行谐振腔,以及宽带光学单向器^[8],在腔内还插入了三片复合石英双折射滤光片及单片标准具;采用低温漂的共焦干涉仪作为频率标准(以下简称为参考腔),采用光电微分探测器,对参考腔无调制的情况下直接获取鉴频曲线^[9],经电子伺服系统控制加在腔镜上的 PZT 以补偿腔长,将输出激光的频率锁定在参考腔上。在波长 790 nm 处,当单频输出 183 mW 时,频率稳定性优于 430 kHz(1 min);单频输出 324 mW 时,频率稳定性优于 610 kHz(1 min)。

2 系统设计

2.1 像散补偿

实验中用的钛宝石激光棒尺寸为 $\phi 4 \times 20$ mm,布氏角切割,晶轴垂直于棒的轴线,并在由两个通光端面的法线所决定的平面内;对于 514.5 nm 波长的吸收系数约为 1.0 cm^{-1} ,FOM 值大于 200(由美国 Union Carbide 公司生长并加工)。这样就不可避免地导致腔模的像散,圆截面

* 山西省自然科学基金资助项目。

收稿日期:1993 年 8 月 19 日;收到修改稿日期:1994 年 3 月 31 日

的高斯光束变为椭圆截面,同时使得腔模在子午面和弧矢面内产生一个光程差。当这个光程差足够大时,谐振腔可能处于非稳定状态。采用如图 1 所示的四镜环形腔型,用两个离轴入射的凹面反射镜即可补偿腔内以布氏角插入的元件引起的腔模的像散^[10]。我们在实验中采用的凹面反射镜的曲率半径为 102 mm,钛宝石棒位于两凹面反射镜之间。由文献[10]可求得腔折叠角应为 31° ,此时腔模在子午面和弧矢面内的腰斑基本在钛宝石棒中心重合,半径约为 $20\ \mu\text{m}$;腔模在腔内循环一周后,在子午面和弧矢面的光程差趋于零,以保证激光器在单横模状态下稳定地振荡。

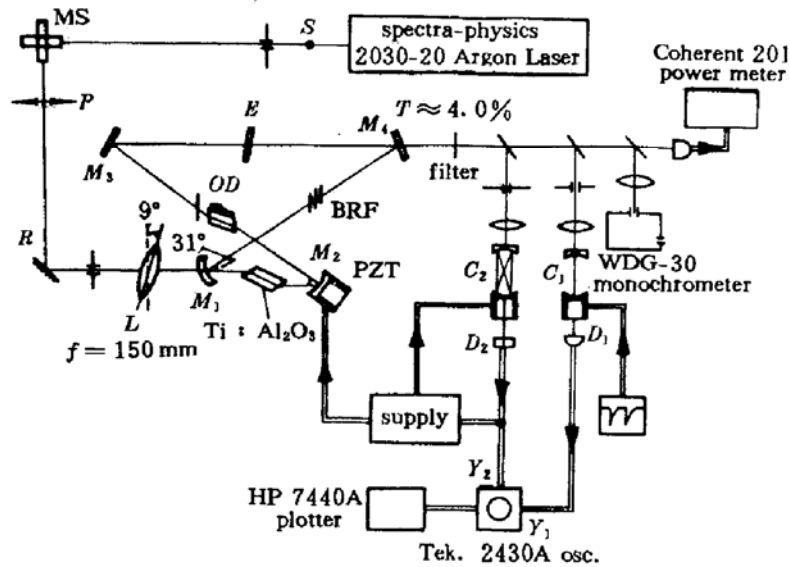


Fig. 1

同样,当泵浦光束正入射到泵浦聚焦透镜上时,泵浦光束也是以近布氏角入射到钛宝石棒上的,因而也存在像散;在钛宝石棒中子午面和弧矢面内各有一个焦点,无法使泵浦光束和腔模在空间上匹配,使得泵浦效率下降,而且容易激发高阶横模。实验中考虑到泵浦光束聚焦后腰斑的大小以及与腔模在空间上的匹配,使用的泵浦聚焦透镜的焦距为 150 mm。为了补偿泵浦光束的像散,可将泵浦聚焦透镜在水平面内倾斜适当的角度^[11](若采用凹面镜反射聚焦方式则可使凹面反射镜以适当的角度离轴入射),可使泵浦光束在子午面和弧矢面内的焦点基本重合,再使之与腔模腰斑重合,一方面可在钛宝石棒内形成合适的增益孔径,使腔模处于单横模状态;另一方面可以提高转换效率。由泵浦光束的 q 参数及高斯光束的矩阵传输规律可以求得倾斜角应为 9° 。

2.2 光学单向器(光二极管)

环形腔连续钛宝石激光系统只有在单向行波运行时,才能完全消除空间烧孔效应,最终实现单频运转。实现单向行波运转的方法有多种,最常用的方法是在环形腔内插入光学单向器(光二极管)。实验中所使用的光学单向器由旋光石英晶片和外加永磁场、布氏角切割的磁旋光晶体 TGG (Faraday 旋转器)组成^[8],旋光石英晶片的厚度为 0.18 mm, TGG 晶体的尺寸为 $\phi 5 \times 5\ \text{mm}$,布氏角切割,其晶轴沿棒的轴线方向;外加永磁铁的磁场强度可以在约 0.01~0.1 T 之间调节。线偏振的腔模正向通过旋光石英晶片和 Faraday 旋转器时,其偏振面先右旋一个角度 θ ,后左旋一个角度 θ ,偏振方向不变;而逆向通过时,两次均右旋角度 θ ,偏振面旋转了 2θ 。环形腔内有多个布氏角,因而对逆向行波造成了较大的损耗,即可以使正向行波稳定运转。同

时,由于旋光石英晶体和磁旋光晶体 TGG 的旋光色散关系具有类似的形式,所以该单向器可保证在很宽的波长范围内所调谐到的波长处单向行波运行^[8]。

2.3 双折射滤光片和标准具

钛宝石晶体荧光光谱的波长带宽达 600 nm,钛宝石激光器宽带自由运转时,输出激光线宽约纳米量级。我们首先使用由厚度比为 1:4:16 的三片石英双折射滤光片(最薄一片的厚度为 0.35 mm)复合而成的双折射滤光片组压窄线宽,并调谐波长。当三片双折射滤光片的晶轴及表面严格平行、厚度也严格成比例时,相互迭加的结果是:主透射峰峰值波长间隔与最薄一片的相等,而透射峰的半宽度比最厚一片的还要窄^[11];那些次透射峰的高度则远低于主透射峰。从而使得输出激光线宽明显变窄,可达到数百兆赫兹的量级^[7],波长选择性能更好。原则上可通过增加双折射滤光片的片数和厚度继续压窄线宽,直至得到单纵模。但要求晶片厚度的误差达到纳米量级,加工起来十分困难。所以通常是先使用双折射滤光片组将激光线宽压窄到几个纵模,然后插入标准具选取单纵模。我们在腔内插入一片厚度为 0.5 mm 未镀膜的熔融石英标准具,在单向行波运转及双折射滤光片组压窄线宽的基础上得到了稳定的单纵模输出。

2.4 稳频系统

对于连续稳频宽带可调谐激光器,均采用共焦干涉仪作为频率标准。实验中,我们使用膨胀系数极低的殷钢管制作共焦干涉仪的腔体,使用曲率半径为 102 mm 的宽带球面反射镜(波长范围为 740~850 nm),其中之一固定在 PZT 上;在对腔体的设计与制作上考虑了热膨胀系数补偿,以减小频率的温度漂移。该参考腔的自由光谱区约为 735 MHz。用作激光器模式监视的监视腔的结构与参考腔相同。

当输出单频激光束入射到参考腔中时,无须在参考腔上加任何调制信号,即可由置于参考腔透射场中的光电微分探测器直接获得频率误差信号^[9]。频率误差信号经电路放大后,反馈到环行腔镜的 PZT 上,以控制腔的长度,将输出激光的频率锁定到参考腔上。

为使环行钛宝石激光器稳定地连续运转在单频状态,我们将整个环行腔体固定在花岗岩平台上,采用防尘罩并充入经缓冲后的净化空气。

3 实验装置

泵浦光源为可见多谱线输出的氩离子激光器(Spectra-Physics 2030-20 型),其输出光束为 S 偏振,经偏振面旋转镜组 MS 变换为 P 偏振,经一个焦距为 150 mm 并在水平面内倾斜约 9° 的双凸透镜 L 聚焦到环行腔内的钛宝石棒中。钛宝石棒被固定在水冷套中,置于两球面反射镜 M_1 和 M_2 之间。 M_3 为平面全反镜, M_4 为 4%(790 nm)的输出耦合镜;四片腔镜所镀膜层的波长范围为 740~850 nm。腔体的总长度约为 1.1 m,腔折叠角约为 31°。腔内 OD 为宽带光学单向器,BRF 为石英双折射滤光片组,E 为 0.5 mm 厚的标准具。实验中使用 WDG-30 型光栅单色仪(北京光学仪器厂生产)测量激光波长,使用 Coherent 201 型连续激光功率计测定输出激光的功率。

4 实验结果

图 2 为模式监视腔 C_1 扫描时,由其透射场中的光电探测器 D_1 得到的信号。由此可知,激光器运转在单横模、单纵模状态。两透射峰的时间间隔为 10.6 ms,对应于 C_1 的自由光谱区为 735

MHz。

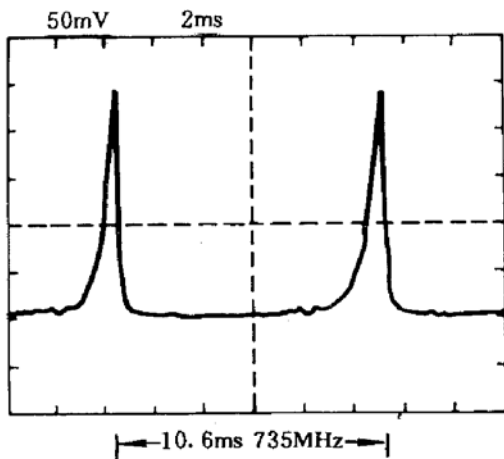


Fig. 2

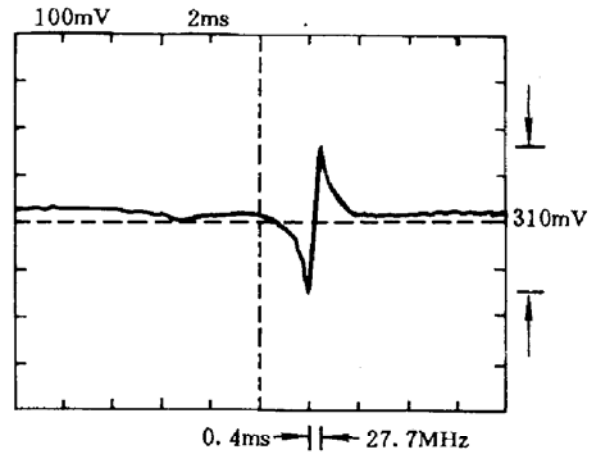


Fig. 3

图3为参考腔 C_2 扫描时,由其透射场中的光电微分探测器 D_2 得到的鉴频曲线,上下摆两峰间的电压幅度为310mV,其时间间隔为0.4ms,由图1可求得0.4ms对应的频率宽度为27.7MHz。

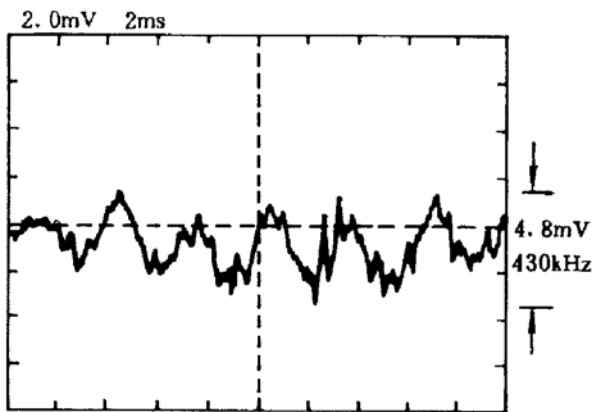


Fig. 4

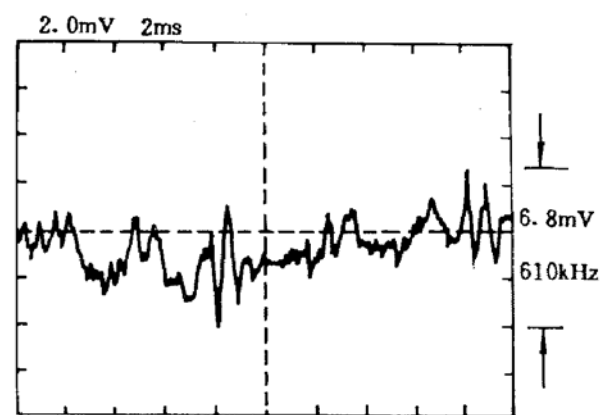


Fig. 5

图4,图5为参考腔 C_2 上加直流偏压,并经过微调直流偏压的幅度调节参考腔腔长,使 C_2 与输出激光共振,经伺服系统闭环锁定时由透射场中的光电微分探测器 D_2 得到的频率起伏信号。图4为泵浦功率约6.0W,790nm输出激光功率183mW时的情形;若近似地认为图3的鉴频曲线中的两峰之间的部分是线性的,频率起伏信号幅度小于4.8mV,则其对应的激光频率漂移小于430kHz;图5为泵浦功率约为7.6W,790nm输出激光功率324mW时的情形,频率起伏信号幅度小于6.8mV,所对应的激光频率漂移小于610kHz。图4,图5均为在监视时间大于1min的情况下分别用Tek. 2430A型数字存储示波器

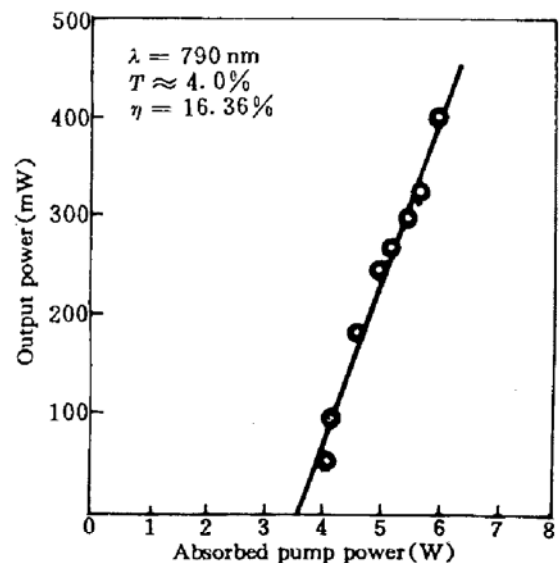


Fig. 6

连续取样得到的信号曲线中频率起伏最大的曲线;测量时示波器的扫描档为2ms/div.,扫描

一屏需 20 ms。

图 6 为在波长 790 nm 处用透射率为 4.0% 的输出耦合镜测得的棒吸收的泵浦功率与单频输出功率的关系,图中实线是由数值点经最小二乘法线性拟合得到的。泵浦阈值功率为 3.55 W;当腔前泵浦功率约 8.0 W 时,790 nm 最大输出约为 400mW,斜坡效率为 16.36%。

致谢 感谢西南技术物理所六室的杨德利先生解决了腔镜的镀膜。

参 考 文 献

- 1 Peter A. Schulz. Single-frequency Ti : Al₂O₃ ring laser. *IEEE J. of Quant. Electr.*, 1988, **QE-24**(6) : 1039
- 2 Wim Vassen, Claus Zimmermann, Reinald Kallenbach *et al.*. A frequency-stabilized titanium sapphire laser for high-resolution spectroscopy. *Opt. Commun.*, 1990, **75**(5/6) : 435
- 3 T. L. Boyd, H. J. Kimble. Frequency stabilization of a CW Ti : sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(11) : 808
- 4 E. S. Polzik, J. Carri, H. J. Kimble. Spectroscopy with squeezed light. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(20) : 3020
- 5 王兴龙, 王长青, 王殿奎 等. 连续运转的掺钛蓝宝石激光器. *量子电子学*, 1993, **10**(1) : 7
- 6 刘玉璞, 张影华, 陆培华. 连续可调谐钛宝石激光器的实验研究. *中国激光*, 1993, **A20**(2) : 85
- 7 王军民, 李瑞宁, 梁晓燕等. 四镜折叠腔波长可调谐连续 Ti : Al₂O₃ 激光器. *激光与红外*, 1993, **23**(4) : 27
- 8 王军民, 梁晓燕, 李瑞宁. 一种可用于环行钛宝石激光器中的宽带光学单向器. *激光与红外*, 1994, **24**(1) : 31
- 9 彭堃堃, 李瑞宁, 黄茂全 等. 稳频环形 Nd : YAG 激光器. *中国激光*, 1989, **16**(8) : 449
- 10 H. W. Kogelnik, Erich P. Ippen, Andrew Dience *et al.*. Astigmatically compensated cavities for CW dye lasers. *IEEE J. of Quant. Electr.*, 1972, **QE-8**(3) : 373
- 11 D. R. Preuss, J. L. Gole. Three-stage birefringent filter tuning smoothly over the visible region; theoretical treatment and experiment design. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(5) : : 702

CW Frequency-stabilized Ring Ti : sapphire Laser with Four Mirrors

Wang Junmin Liang Xiaoyan Li Ruining Xie Changde Peng Kunchi

(*Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006*)

Abstract The single frequency operation of a cw Ti : sapphire laser has been realized with an astigmatism compensated ring cavity of four mirrors. A wideband optical diode was placed inside the cavity to force the travelling wave to travel unidirectionally. An intracavity complexed birefringent filter and an etalon were used to tune wavelength, reduce linewidth and select the single longitudinal mode. Laser frequency was locked to a confocal reference cavity through electronic servo loop. Less than 430 kHz of frequency fluctuation when output was 183 mW and less than 610 kHz of frequency fluctuation when output was 324 mW within one minute were demonstrated at the wavelength of 790nm.

Key words ring cw Ti : sapphire laser, frequency-stabilization