

高效率连续波单频环形钛宝石激光器

邵中兴 许凤明 叶子青 周天恩 朱文煜

(中国科学院长春光机所, 长春 130022)

提要 报道了氩离子激光泵浦的高效率连续波单频环形钛宝石激光器的设计和运转特性。5.0 W 泵浦获得了大于 0.5 W 的稳定单频输出。单频转换效率为 10%。讨论了考虑热效应后最佳泵浦条件及光学选频器件、光学单向器、双折射滤光片等特性。测量了激光输出的调谐范围、线宽及功率稳定性等。

关键词 高效率, 单频, 钛宝石激光器

1987年 P. A. Schulz 等人首先报道了连续波单频环形腔钛宝石激光器的运转成功^[1]。目前世界上规模最大、水平最高的激光器厂商之一的 Coherent 公司于 1989 年在它的 CR699 型系列环形染料激光器基础上推出了 CR899 型系列染料/钛宝石两用激光器^[2]。与染料激光器相比, 钛宝石激光器调谐范围更宽, 特别是工作的稳定性和可靠性远比前者好, 因为它没有液体染料流动带来的抖动而扰动激光频率, 且其转换效率不低于染料激光。目前, Coherent 公司的钛宝石激光器单频效率指标为 10%。用 20 W 氩离子激光泵浦, 单频输出功率为 2 W。另一方面, 国内已有成功的连续波宽带钛宝石激光实验工作报告^[3,4], 特别是文献[3]报道了稳频环形钛宝石激光的成功实验。但其单频转换效率还较低, 而且由于使用间隔固定的标准具控制线宽, 不可能连续扫描频率。

为实现利用国内条件研制单频环形腔钛宝石激光器这种高技术激光器, 我们采用中国科学院长春光机所研制的氩离子激光器(功率相对较低, 小于 8 W)泵浦中国科学院上海光机所生长的钛宝石晶体, 研制成功了高效率连续波单频环形钛宝石激光器样机。

样机光路设计如图 1 所示。考虑到与 801 型系列环形染料激光器商品(中国科学院长春光机所研制)通用的可能性, 环形谐振腔长设计得与 801 型相同, 约 1.5 m。镀有减反膜的泵浦光聚焦透镜 L 的焦距为 100 mm。曲面反射镜 M_1, M_2, M_3 的曲率半径分别为 100 mm, 100 mm 和 124.6 mm。 M_2, M_3 间设有较细束腰便于需要时置入倍频晶体。在 720~980 nm 范围内它们的反射率 > 99.5%, 其中 M_1 于 460~520 nm 范围内的透过率 > 90%。平面输出镜 M_4 的透过率约 5%。720~980 nm 宽的波长范围分三段膜层复盖, 即 720~802 nm, 760~880 nm, 860~980 nm。光束折叠角约为 18°。布氏角切制的钛宝石晶体体积为 $5 \times 3 \times 12 \text{ mm}^3$ (通光长度为 12 mm)。测得其吸收氩离子激光约 90%。钛宝石晶体被置于一个带有水冷的可转动的铜制小平台上。

采用近代激光器机械结构模式, 所有光学元件的调节机构都被紧固在一根 $\phi 60 \text{ mm}$ 殷钢

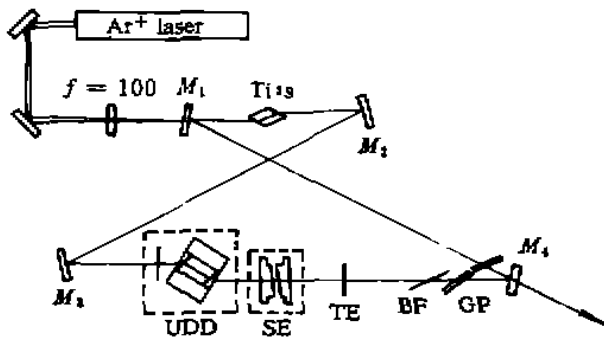


图 1 连续波单频环形钛宝石激光器光路图

Ti:S; 钛宝石激光晶体; UDD; 光学单向器; SE; 空气隙扫描标准具; BR; 双折射滤光片; TE; 薄片标准具; GP; Brewster 板

Fig. 1 The layout for the prototype of the CW singlefrequency ring Ti:sapphire laser

Ti:S; Ti:sapphire rod; UDD; unidirection device; SE; air-spaced scanning etalon; BF; birefringent filter; TE; thin etalon; GP; galvanometer plate

棒上,殷钢棒一端被刚性固定,而另一端被弹性固定在机壳底板上。

为了寻找最佳泵浦耦合条件,我们实验观察了钛宝石的热透镜效应。在 4.6 W 泵浦条件下,当宝石前表面恰好位于泵浦光束腰处,光功率密度约为 0.9 MW/cm^2 ,测得热透镜效应引起的泵浦光束发散角比无宝石时约大 1 倍。平移宝石到离泵浦束腰 4~5 mm 处热透镜效应基本消失。计算表明这时泵浦光功率密度已下降至束腰处的 $1/20 \sim 1/40$ 。实验确定本工作条件下宝石最佳位置应距泵浦束腰后 3 mm 附近。

测得组成光学单向器的晶体石英旋光片和 Farady 旋光器分别旋转水平偏振的钛宝石激光(800 nm 附近)偏振面约 1.85° 和 1.25° 。实际上这两个旋转角应当被做得相同。BF 是厚度 0.333 mm 光轴倾斜于表面 5° 的晶体石英片磨制的双折射滤光片,计算表明它的调谐波长范围可覆盖

700~1000 nm。虽然增加倾斜角可以增大覆盖范围,但它的调谐分辨率就比较差了^[5]。“级次重叠”(即对应同一调谐角,使位相差等于 2π 整数倍的数个不同波长可能同时振荡出光)的“跨度”大于 200 nm。如调谐角为 55.15° 对应 700 和 933 nm 两个整周期波长。但考虑到目前的腔镜膜层覆盖只有 100 nm,这样的滤光片还是胜任的。如欲增加滤光片的选频(压窄线宽)能力,可用一组厚度成比例的光轴倾角相同的滤光片平行放置使用。空气隙扫描标准具(SE)的自由光谱范围 60 GHz,标准具的工作表面镀有 30% 的宽带反射膜(720~1000 nm)。因为光路的折叠角较大,所以本样机 Brewster 板(GP)由两块夹角等于环形腔折叠角的石英板分别呈布氏角置于光路折叠处,由同一振子驱动。在扫描电子学控制下 SE 与 GP 同步动作,单次扫描范围为 30 GHz。TE 是厚 0.1 mm 的熔石英片。

使用镀有 760~880 nm 波段膜的腔镜,空腔运转时,测得的输入-输出关系如图 2 中标志(□)曲线所示。阈值泵浦功率 1.45 W。用 6.64 W 泵浦时,得到宽带输出 1.1 W(800 nm 附近,CR210 型激光功率计测量),转换效率达 16.6%。若考虑到透镜 L 和反射镜 M₁ 损耗掉的泵浦光,实验测得二者损耗之和约为 10%,则效率可达 18% 以上。

插入 UDD 后,环形腔中的双向行波振荡变成单向行波振荡。测得其插入损耗小于 15%。4.55 W 泵浦时的 0.7 W 双向行波变成 0.06 W 的单向行波输出。若 UDD 中的石英旋光片与 Farady 旋光角度匹配得再好一些时,插入损耗还应更小一些(比染料激光器中的 UDD 插入损耗可小于 10%)。再插入 SE,TE 和 BF 便可获得稳定的单频运转。TE 和 BF 的损耗小到可忽略不计。结果用 5.0 W 泵浦,得到了大于 0.5 W 的单频输出。单频效率大于 10%。增加泵浦至氩离子激光器的最大输出功率 7 W,得到了 0.85 W 的单频输出,效率达 12%。单频激光输入-输出曲线如图 2 中(○)中标志所示。图 3 是单频激光照片(扫描干涉仪的精细常数约为 100,自由光谱范围为 1.5 GHz)。

我们还测量了本样机的调谐范围、单频线宽及稳定性等。使用 Fizeau 式(测量精度为

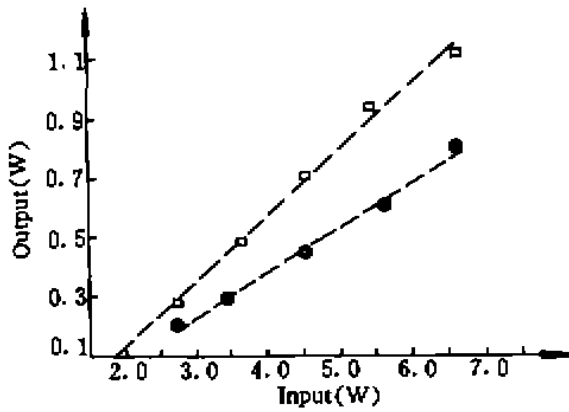


图 2 钛宝石激光输入-输出曲线。输出镜的透过率为 5%。□:宽带(空腔);○:单频

Fig. 2 The input-output chart of the Ti:sapphire laser. The mark (○) denotes the data of single frequency output, and (□) denotes the data of broadband (empty cavity) output

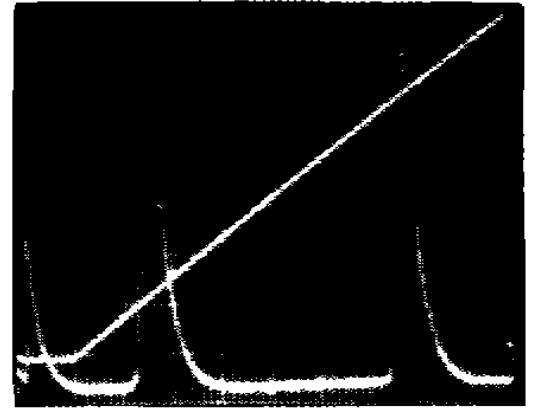


图 3 单频钛宝石激光波形照片。扫描干涉仪参数:自由光谱范围 1.5 GHz;精细常数:约 100

Fig. 3 The photograph shown is the lineshape of the single frequency laser. The parameters of the scanning interferometer used to analyze the lineshape are; free spectral range = 1.5 GHz, fineness ~ 100

0.001 nm,中国科学院长春光机所研制)激光波长计测量单频输出的调谐范围,结果为 740~930 nm,见图 4。观察示波器上经过上述扫描干涉仪分析出的单频激光波形的抖动范围与干涉仪自由光谱范围之比,得到本样机的单频线宽小于 20 MHz。测量单频输出功率稳定度结果为(测量时间 2 h,每隔 20 min 同时测一组泵浦和激光输出功率):

$$S = (P_{max} - P_{min}) / (2P_{mean}) = (0.3 \text{ W} - 0.28 \text{ W}) / (2 \times 0.29 \text{ W}) = \pm 3.4\%$$

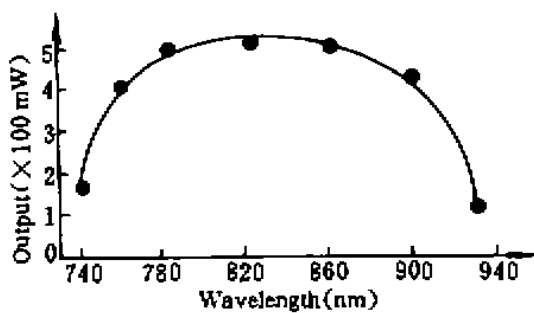


图 4 单频钛宝石激光调谐曲线

Fig. 4 The tuning curve of the single frequency Ti:sapphire laser

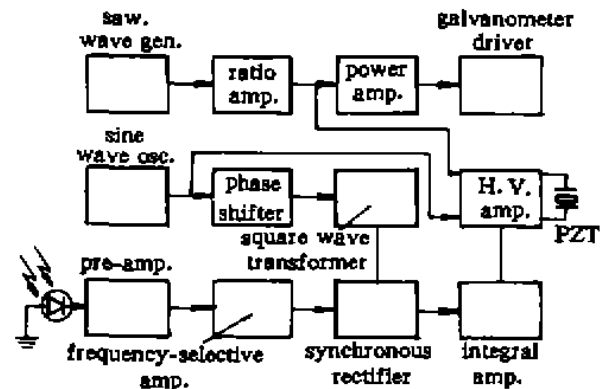


图 5 控制电子学原理框图

Fig. 5 The framework shows the electronics for scanning the frequency of a continuous wave single frequency laser

考虑到样机的实用价值,我们加入了频率控制电子学系统实现了 30 GHz 频率自动扫描。电子学控制线路框图见图 5。加 1 kHz 正弦波信号调制扫描标准具的透过峰,由此调制激光频率和功率。调制后的光信号输入到控制电子学,检波后,由该信号的位相和幅度可判断出标准具的透过峰与相邻激光腔模的偏差,通过偏差信号锁定透过峰到激光频率上。分两路同时加锯

齿波扫描信号到 SE 和 GP 上, 仔细调整每路锯齿波的斜率, 使 GP 的转动与 SE 扫描同步, 配合频率锁定环路的作用, 就可实现激光频率的平稳扫描。

本样机的谐振腔设计已经考虑到腔内倍频扩展波长的功能, 使其既可工作在蓝绿也可工作在近红外波段。另外, 调谐和选频元件的设计、机械结构设计及控制电子学的设计均考虑到了增加计算机控制自动频率扫描 10000 GHz 功能, 以期于不久的将来进一步完善本样机。

参 考 文 献

- 1 P. A. Schulz. Single-frequency Ti:Al₂O₃ ring laser. *IEEE Quant. Electr.*, 1988, QE-24(6): 1039
- 2 Coherent laser products, the 899 ring laser, the complete cw tunable laser system, 1990
- 3 王军民, 梁晓燕, 李瑞宁 等. 四镜环形腔连续稳频钛宝石激光器. *中国激光*, 1994, A21(10): 773
- 4 孙晓泉, 谢建平, 张运生 等. 钛宝石环形激光器的实验研究. *中国激光*, 1995, A22(1): 13
- 5 Zhongxing Shao. Precise and versatile formula for birefringent filters. *Appl. Opt.*, 1996, 35, to be published

High Efficiency CW Single Frequency Ring

Ti:Sapphire Laser

Shao Zhongxing Xu Fengming Ye Ziqing Zhou Tianen Zhu Wenyu

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract We report a high efficiency cw single frequency ring Ti:sapphire laser pumped by an argon ion laser. By 5.0 W pumping, more than 0.5 W stable single frequency output is attained. The conversion efficiency is over 10%. The characteristics of the intracavity frequency-control elements, the optical unidirectional device, the birefringent filter, and the etalons, are analyzed. The optimum pumping is discussed by considering the thermal effect produced by the Ti:sapphire. Also, the tuning range, the linewidth, and the output stability of the laser are measured.

Key words high efficiency, single frequency, Ti:sapphire laser