

文章编号: 0258-7025(2005)02-0149-04

激光二极管抽运单块高斜度效率环形腔单频 固体激光器

王 欣, 杨苏辉, 孙文峰, 赵长明

(北京理工大学光电工程系, 北京 100081)

摘要 对于单块结构非平面环形腔单频固体激光器, 谐振腔尺寸和输出耦合面偏振膜反射系数的选取是其获得单频、高效率、高功率输出的关键。采用琼斯矩阵的方法讨论了单块激光器获得单频输出的工作原理。通过对谐振腔回路琼斯矩阵特征值的平方及特征值平方差的计算, 提出了在晶体尺寸、磁场及抽运功率一定的情况下, 通过对单块非平面环形腔输出耦合面偏振膜反射系数的设计来提高激光器的单频输出功率及斜度效率的方法。实验采用光纤耦合输出激光二极管(LD)纵向抽运单块激光器, 当抽运功率最高用到 2.83 W 时, 获得了最大 1.20 W 的 1064 nm 单频激光输出, 斜度效率达 47.4%。

关键词 激光技术; 单块激光器; 高斜度效率; 非平面环形腔; 单频

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Laser Diode Pumped High-Slope-Efficiency Monolithic Unidirectional Single Frequency Ring Laser

WANG Xin, YANG Su-hui, SUN Wen-feng, ZHAO Chang-ming

(Department of Photoelectric Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract The crystal size and the reflectivity of S and P polarization components of the output coupling (R_S and R_P) are crucial for the operation of the monolithic single frequency ring laser. The working principle of single frequency operation of the monolithic ring laser was discussed by means of Jones matrix. In order to achieve high single frequency output power and high slope efficiency, R_S and R_P were determined by calculating the square eigenvalues and the differences of square eigenvalues of Jones matrix of the resonator as well as considering the optimum output coupling for given crystal size, magnetic field and pumping power. A fiber coupled diode laser was used as pumping source in experiment. Single frequency output power of 1.20 W with the slope efficiency of 47.4% was obtained when input pumping power was 2.83 W.

Key words laser technique; monolithic ring laser; high slope efficiency; nonplanar ring cavity; single frequency

1 引 言

单块非平面单向行波环形腔固体激光器由 Kane 和 Byer^[1]首先发明, 最初由 Ar 离子激光器抽运, 阈值抽运功率为 0.15 W, 当抽运功率为 2 W 时, 得到最大单频连续输出功率 109 mW, 斜度效率为 5%。经过改进后, 用激光二极管(LD)抽运, 激

光器阈值功率降低到 16.9 mW, 斜度效率达 9.6%, 输出单频线宽为 3 kHz/100 ms。除此之外, 德国汉诺威激光中心的 I. Freitag 等^[2]用 4 个 1 W 的 LD 纵向抽运, 在 3.8 W 的抽运功率下, 得到接近 2 W 的单频激光输出, 斜度效率接近 60%。他们还利用非平面环形腔固体激光器进行了稳频, 调谐, 倍频, 调 Q, 注入锁定等各种实验。

收稿日期: 2004-03-12; 收到修改稿日期: 2004-06-14

基金项目: 军用固体激光技术国防科技重点实验室基金(51438020201)资助项目。

作者简介: 王 欣(1980—), 女, 北京人, 北京理工大学光电工程系硕士研究生, 主要从事新型固体激光技术的研究。

E-mail: wangxinmn@bit.edu.cn

我国近年来也开始研究单块非平面环形腔激光器。中国计量科学院研究得到单块非平面环形腔激光器 400 mW 的单频输出^[3]。本实验室在 2001 年从自行设计的单块非平面环形腔激光器中得到最高连续单频输出 600 mW^[4]并应用其进行了激光相干探测模拟测速及测距实验^[5]。

2 理论分析

单块非平面单向行波环形腔单频固体激光器的结构如图 1 所示,激光晶体置于磁场 H 内, A 点既是抽运光的入射点,又是振荡激光的输出点,晶体内 B, C 和 D 点为光的全反射点。利用光波在非平面腔内不同空间取向的全反射面上的相位延迟,由外加磁场引入的法拉第旋光效应及输出耦合面的偏振反射特性构成光学单向器,保证行波振荡,消除增益空间烧孔,保证单纵模输出。这种激光器的突出优

点是结构紧凑、效率高、稳定性好。

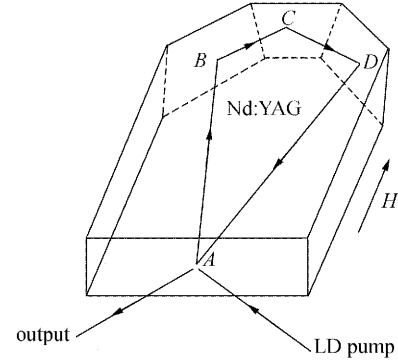


图 1 单块非平面环形腔

Fig. 1 Monolithic non-planar ring cavity

用琼斯矩阵具体分析单块非平面环形腔的工作原理。如图 1 所示的光沿逆时针 (CCW) 在晶体中传播一个周期的琼斯矩阵为

$$\mathbf{J}_{\text{CCW}} = \delta \begin{pmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma \\ \sin\gamma & \cos\gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta_1 & -\sin\beta_1 \\ \sin\beta_1 & \cos\beta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-j\Delta\psi_B/2} & 0 \\ 0 & e^{j\Delta\psi_B/2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta_2 & \sin\beta_2 \\ -\sin\beta_2 & \cos\beta_2 \end{pmatrix} \times \\ \begin{pmatrix} e^{-j\Delta\psi_C/2} & 0 \\ 0 & e^{j\Delta\psi_C/2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta_2 & -\sin\beta_2 \\ \sin\beta_2 & \cos\beta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-j\Delta\psi_D/2} & 0 \\ 0 & e^{j\Delta\psi_D/2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta_1 & -\sin\beta_1 \\ -\sin\beta_1 & \cos\beta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma \\ \sin\gamma & \cos\gamma \end{pmatrix} = \\ \begin{pmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} j_A & j_B \\ j_C & j_D \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中 δ 为全程损耗系数; $\Delta\psi_i$ ($i = B, C, D$) 为全反射引入的该反射面上 S, P 偏振分量的相移差; β_1 为反射面 DAB 与反射面 ABC, CDA 的夹角; β_2 为反射面 BCD 与反射面 ABC, CDA 的夹角; γ 为由外加磁场引入的磁致旋转角; r_s, r_p 分别为 S, P 分量的振幅反射系数。 S, P 方向光能量的反射率分别为 $R_s = r_s^2, R_p = r_p^2$, 其大小实际由所镀输出耦合介质膜决定。

光沿顺时针 (CW) 传播一个周期的琼斯矩阵为

$$\mathbf{J}_{\text{CW}} = \delta \begin{pmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma \\ -\sin\gamma & \cos\gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta_1 & -\sin\beta_1 \\ \sin\beta_1 & \cos\beta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-j\Delta\psi_B/2} & 0 \\ 0 & e^{j\Delta\psi_B/2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta_2 & -\sin\beta_2 \\ \sin\beta_2 & \cos\beta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-j\Delta\psi_C/2} & 0 \\ 0 & e^{j\Delta\psi_C/2} \end{pmatrix} \times \\ \begin{pmatrix} \cos\beta_2 & \sin\beta_2 \\ -\sin\beta_2 & \cos\beta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-j\Delta\psi_D/2} & 0 \\ 0 & e^{j\Delta\psi_D/2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\beta_1 & \sin\beta_1 \\ -\sin\beta_1 & \cos\beta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma \\ -\sin\gamma & \cos\gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_p \end{pmatrix} = \\ \begin{pmatrix} j'_A & j'_B \\ j'_C & j'_D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_p \end{pmatrix}. \quad (2)$$

琼斯矩阵 \mathbf{J} (\mathbf{J}_{CW} 和 \mathbf{J}_{CCW}) 的本征值 λ 和本征向量 E 满足

$$\mathbf{J} \cdot E = \lambda \cdot E, \quad (3)$$

模 $|\lambda|$ 表示不计增益时本征偏振光环绕一周后的振幅与原振幅之比, $1 - |\lambda|^2$ 表示由于 R_s, R_p 不等于 1 造成的光强损耗。本征值可由下式求出

$$\lambda_{\text{CCW}} = \frac{r_s j_A + r_p j_D}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{r_s j_A - r_p j_D}{2}\right)^2 - 4r_s r_p} = \lambda_{1,3}, \\ \lambda_{\text{CW}} = \frac{r_s j'_A + r_p j'_D}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{r_s j'_A - r_p j'_D}{2}\right)^2 - 4r_s r_p} = \lambda_{2,4}, \quad (4)$$

继而可求出本征偏振态。一般情况下 \mathbf{J}_{CCW} 和 \mathbf{J}_{CW} 的本征偏振态和本征值不同, 选取 $R_s \neq R_p$ 则各本征偏振态本

征值模的平方也不同,而各本征偏振态的输出损耗为 $1 - |\lambda|^2$, 当其他条件相同时, 如果各本征值的损耗差大于 A. R. Clobes 等所述的 0.01% ^[6], 则只有损耗最小的可以优先起振而抑制均匀加宽增益介质中其他模式的振荡。环形腔的行波振荡避免增益的空间烧孔, 从而保证单纵模输出。

由以上分析可见, $|\lambda|^2$ 与 R_S, R_P 的取值密切相关。 R_S, R_P 的取值必须保证 $||\lambda_{CCW}|^2 - |\lambda_{CW}|^2| - 0.01\%$ 的值大于零以获得单频; 同时还要使激光器输出耦合系数 $(1 - |\lambda|^2)$ 接近最佳透过率, 得到高输出功率。

3 实验装置和实验结果

实验采用如图 2 所示的结构, 晶体尺寸为 $13 \text{ mm} \times 9.8 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 外加磁场为 0.25 T 。根据琼斯矩阵计算可得, $|\lambda_1|^2 > |\lambda_3|^2 > |\lambda_2|^2 > |\lambda_4|^2$, 所以 $|\lambda_1|$ 对应的偏振态优先起振。为抑制其他偏振态, 应保证 $|\lambda_1|^2 - |\lambda_3|^2 \geq 0.01\%$ 。而且无论对 $|\lambda_1|^2$ 还是 $|\lambda_1|^2 - |\lambda_3|^2$, R_S 都比 R_P 的影响显著^[7], 图 3(a) 为当 $R_S = 0.98$ 时, 各本征值模的平方随 R_P 的变化曲线, 图 3(b) 为当 $R_S = 0.98$ 时, $1 - |\lambda_1|^2, 1 - |\lambda_3|^2$ 及 $|\lambda_1|^2 - |\lambda_3|^2 - 0.01\%$ 随 R_P 的变化曲线; 所以在选择与已知最佳透过率相接近的某点的 R_S, R_P 时, 应该先确定 R_S 的变化范围, 然后在保证尽量满足上述两原则的前提下, 根据所得的变化曲线确定 R_S, R_P 的值, 这样才能得到比较理想的结果。

假设抽运功率为 $2 \sim 3 \text{ W}$, 由最佳透过率公式 $T_{\text{opt}} = \sqrt{G_0 l \alpha} - \alpha$ (其中 G_0 为小信号增益系数, l 为 LD 有效抽运长度, α 为激光束在腔内传播一周的净损耗因子), 经实验计算, G_0 为 8.33 , α 为 1% ; 可得

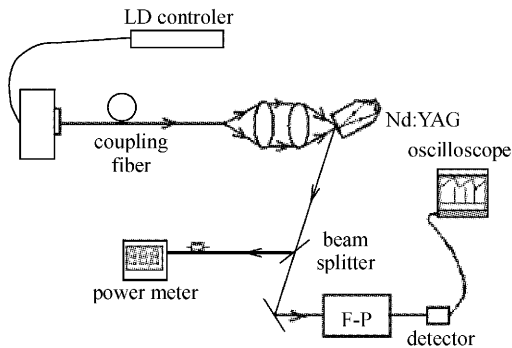


图 2 LD 抽运单块激光器实验装置

Fig. 2 Structure of the LD pumped monolithic ring laser

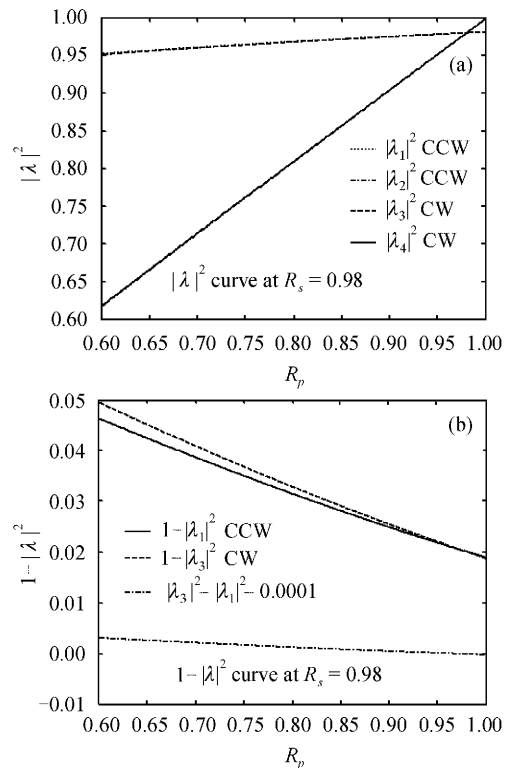


图 3

(a) 当 $R_S = 0.98$ 时, 各本征值模的平方随 R_P 的变化曲线; (b) 当 $R_S = 0.98$ 时, $1 - |\lambda_1|^2, 1 - |\lambda_3|^2$ 及 $|\lambda_1|^2 - |\lambda_3|^2 - 0.01\%$ 随 R_P 的变化曲线

Fig. 3

(a) $|\lambda|^2$ versus R_P at $R_S = 0.98$; (b) $1 - |\lambda_1|^2, 1 - |\lambda_3|^2$ and $|\lambda_1|^2 - |\lambda_3|^2 - 0.01\%$ versus R_P at $R_S = 0.98$

最佳透过率为 $0.03 \sim 0.05$ 。根据以上讨论, 综合考虑获得高效率单频输出的两个条件, 如图 4 所示取值, 可得出一组 R_S, R_P 值。原则上本征模的平方差越大越好, 但此时 R_S, R_P 相差也较大, 而 R_S, R_P 差值过大, 镀膜时难以实现, 所以选择 $R_S = 0.97, R_P = 0.81$ 。但由于镀膜过程控制问题, 实际膜参数为 $R_S = 0.98, R_P = 0.85$, 此时偏振耦合输出系数为 0.028043 , 与理论计算的最佳值存在一定偏差。

采用德国 Unique-Mode 公司制造的 UM4000/100/20 型光纤耦合输出 808 nm 半导体激光器作为抽运源纵向抽运。LD 最大驱动电流 6 A , 最大出纤功率 4 W , 阈值驱动电流在 1.5 A 左右。光纤芯径为 $100 \mu\text{m}$, 光纤数值孔径 0.22 , LD 输出光波谱线宽度约为 2 nm 。激光器抽运阈值为 0.318 W , 半导体激光器最大用到 2.83 W , 此时得到最大功率为 1.20 W 的 1064 nm 连续激光输出, 斜度效率可达 47.4% (如图 5 所示)。用美国 Burleigh 公司的扫描法布里-珀罗 (F-P) 激光频谱分析仪测量激光器输

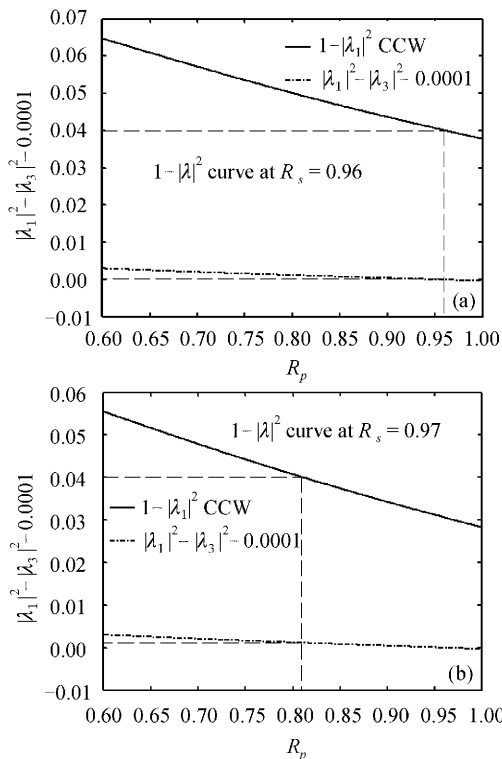


图 4 当 $R_s = 0.96$ (a), 0.97 (b) 时, $1 - |\lambda_1|^2$ 及 $|\lambda_1|^2 - |\lambda_3|^2 - 0.01\%$ 随 R_p 的变化曲线
 Fig. 4 $1 - |\lambda_1|^2$ and $|\lambda_1|^2 - |\lambda_3|^2 - 0.01\%$ versus R_p at $R_s = 0.96$ (a), 0.97 (b), respectively

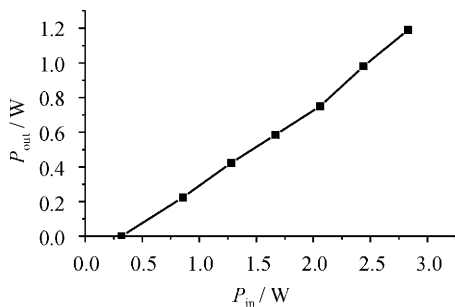


图 5 激光器输入输出曲线
 Fig. 5 Output power versus input power

出频谱。频谱仪的自由光谱区约为 15 GHz, 调节两平面反射镜可使频谱仪的精细度(Finesse)数接近 200, 分辨率为 75 MHz。单块激光器在工作中保持单纵模振荡。当输出功率达到 1.20 W 时仍能保持很好的单模运转, 即单频输出(如图 6 所示)。在实验中, 为真实反映激光功率随时间抖动的情况, 以 40 Hz 的频率对激光功率进行测量, 每次测量 1000 个数(约 250 s), 并将每个测量值都看作有效数据点(可剔除明显由测量系统引入, 偏差很大的少数点)。设测量数据按正态分布, 根据数据处理的莱特准则,

定义激光功率的不稳定度为

$$S'_p = \pm (3\sigma/\bar{P}) \times 100\%, \quad (5)$$

其中 σ 为正态分布的标准差; \bar{P} 为所测 1000 次激光输出功率的平均值。经多次测量, 根据(5)式计算所得的输出功率不稳定度均小于 1%。

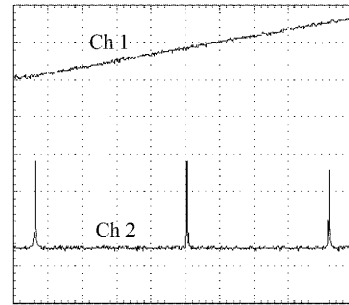


图 6 单块激光器激光频谱图
 Ch1: 频谱仪的锯齿波驱动电压信号; Ch2: 输出激光的频谱信号

Fig. 6 Monolithic laser spectrum

Ch1: driving voltage of the F-P; Ch2: signal of the laser spectrum

4 结 论

研究及实验表明, S 光和 P 光的反射率的取值直接影响单块激光器的单频性能、输出功率和效率。在保证 $|\lambda_{CCW}|^2 - |\lambda_{CW}|^2 - 0.01\% > 0$ 前提下, 使相邻两方向本征模的平方差较大且耦合输出模的透过率 $(1 - |\lambda|^2)$ 接近最佳透过率, 才能获得理想的单频输出。若实验中所取 R_s, R_p 更加接近最佳透过率, 相信会获得更高功率及效率的单频输出。

参 考 文 献

- 1 T. J. Kane, R. L. Byer. Monolithic, unidirectional single-mode Nd:YAG ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 1985, **10**(2):65~67
- 2 I. Freitag, A. Tunnermann, H. Welling. Power scaling of diode-pumped monolithic Nd:YAG lasers to output powers of several watts [J]. *Opt. Commun.*, 1995, **115**:511~515
- 3 Zang Erjun, Cao Hongjun, Zhao Kun *et al.*. Investigation of monolithic quasi-planar ring lasers [C]. *SPIE*, 1998, **3549**:29~34
- 4 Wu Keying. LD pumped unidirectional nonplanar single-frequency ring laser [D]. Beijing: Department of Photoelectric Engineering, Beijing Institute of Technology, 2001. 55
吴克瑛. LD 抽运非平面单向行波环形腔单频固体激光器[D]. 北京理工大学光电工程系, 2001. 55
- 5 Yang Suhui, Wu Keying, Wei Guanghui. Novel single-frequency diode pumped solid-state lasers and their applications in laser ranging and velocimetry [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2001, **18**(7):906~908
- 6 A. R. Clobes, M. J. Brienza. Single-frequency traveling-wave Nd:YAG laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **21**(6):265~267
- 7 Sun Wenfeng, Yang Suhui, Li Lei *et al.*. Study on optimum output coupling of unidirectional non-planar ring laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(Suppl.):471~473
孙文峰, 杨苏辉, 李磊等. 单向非平面环形腔单频激光器输出耦合面偏振膜系的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(增刊):471~473