

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0471-03

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

孙文峰, 杨苏辉, 李磊, 赵长明

(北京理工大学信息技术学院, 北京 100081)

摘要 研究了单块非平面环形腔输出耦合面偏振膜反射系数对器件实现单频振荡及输出功率的影响。在给定晶体尺寸, 磁场及抽运功率的情况下, 通过计算, 合理选择 S 偏振光和 P 偏振光的反射率, 在保证激光单频输出的前提下, 使器件的耦合输出膜的透过率接近最佳值。

关键词 激光技术; 单块非平面环形腔; 选偏膜反射系数; 单频; 最佳透过率

中图分类号 O484.4¹ 文献标识码 A

Study on Optimum Output Coupling of Unidirectional Non-Planar Ring Laser

SUN Wen-feng, YANG Su-hui, LI Lei, ZHAO Chang-ming

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

Abstract The influences for S and P polarization of the output surface of unidirectional non-planar ring laser on single frequency operation and output power are studied. For given crystal size, magnetic field and pumping power, the optimum output coupling of S and P polarization have been calculated.

Key words laser technique; unidirectional non-planar ring resonator; reflectivity of polarization film; single frequency; optimum output coupling

1 引言

单块非平面单向行波环型腔固体激光器由 Kane 和 Byer 首先发明^[1], 其器件结构如图 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。利用光在非平面腔内不同反射面的相位延迟, 由外加磁场引入的法拉第旋光效应和输

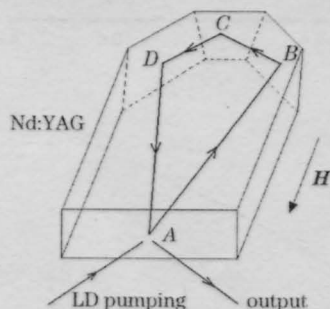


图 1 单块非平面环形腔

Fig.1 Unidirectional non-planar ring cavity

出耦合面的反射特性构成的光学单向器消除增益空间烧孔, 实现单频输出。这种激光器结构简单, 稳定性好, 且能够输出较高功率的单频激光。在相干探测激光雷达、引力波测量、精密测距等领域有着广泛的应用^[2]。这类激光器能否实现高效率的单频激光输出, 关键在于晶体结构参数的合理选择及精密加工和输出面偏振膜系的设计。本文讨论选偏膜对器件实现单频振荡和器件输出功率的影响, 使输出耦合面在保证单频振荡的前提下, 其输出透过率接近最佳值。

2 谐振腔偏振态分析

用琼斯矩阵具体分析单块非平面环形腔的工作原理^[3]。图 2 是单块非平面环形腔内的坐标变换图。设 S, P 分量的振幅反射系数分别为 r_s, r_p , 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。光沿逆时针传播的琼斯矩阵为

作者简介: 孙文峰(1976-), 男, 北京理工大学光电工程系博士生, 主要从事 LD 抽运新型固体激光技术及其应用的研究。

E-mail: sunwf@bit.edu.cn

$$J_{CCW} = \delta \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-i\Delta\psi_a/2} & 0 \\ 0 & e^{i\Delta\psi_a/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-i\Delta\psi_c/2} & 0 \\ 0 & e^{i\Delta\psi_c/2} \end{bmatrix} \times \\ \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-i\Delta\psi_b/2} & 0 \\ 0 & e^{i\Delta\psi_b/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \times \\ \begin{bmatrix} e^{-i\Delta\psi_d/2} & 0 \\ 0 & e^{i\Delta\psi_d/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

δ 为全程损耗系数, γ 为磁致旋转角, $\Delta\psi_i$ 为全反射引入的反射面上 S, P 偏振分量的相移差, 由对称关系 $\Delta\psi_B = \Delta\psi_D$, 反射面 DAB 与反射面 ABC, CDA 的夹角都为 α , 反射面 BCD 与反射面 ABC, CDA 的夹角都为 β . 光沿顺时针传播还用图 2 的 $S-P$ 坐标分析, 可以得到顺时针琼斯矩阵 J_{CW} . 琼斯矩阵 $J(J_{CW}$ 和 $J_{CCW})$ 的本征值 λ 和本征向量 E 满足

$$J \cdot E = \lambda \cdot E \quad (2)$$

本征向量光传播一周后偏振态还原, 可以在腔内振荡. 本征值为复数, 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的比. 对于 2×2 阶矩阵存在两个本征值和本征向量.

3 数值计算

计算所采用的磁场为 0.25 T. Nd:YAG 晶体的 Verdet 常数为 $V_e = 103^\circ/T \cdot m$, 在图中 AE 为 10.65 mm, CE 为 1.48 mm, 由法拉第磁致旋转角度 $\gamma = V_e \cdot AE \cdot B$ 得旋转角为 0.27° . 各本征偏振态的输出损耗等于 1 减本征值模的平方. 损耗最小的本征模优先起振

而抑制均匀展宽增益介质中其他模式的振荡. 根据以上参量可以计算得到各本征值模平方随 R_s, R_p 变化的曲线, 图 3, 4 是计算结果. 图 3 中 (a), (c) 分别为 $R_s = 0.835, 0.935$ 时 $|\lambda|^2$ 随 R_p 的变化曲线图, 虚线代表逆时针方向传播本征值模的平方 ($|\lambda_1|^2, |\lambda_2|^2$) 曲线, 实线代表顺时针方向传播本征值模的

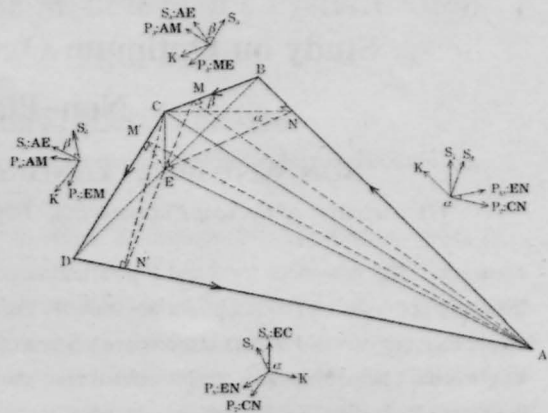


图 2 单向非平面环形腔内的坐标变换
Fig.2 Coordinate transformation of unidirectional non-planar ring cavity

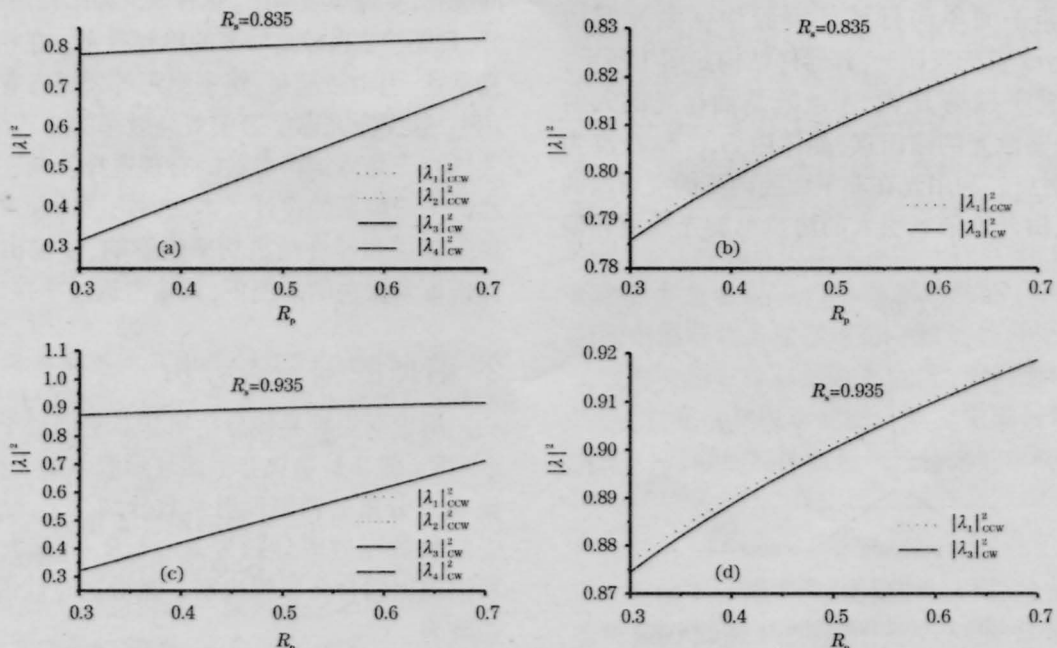


图 3 $R_s = 0.835, 0.935$ 时 $|\lambda|^2$ 随 R_p 的变化曲线
Fig.3 $|\lambda|^2$ versus R_p at $R_s = 0.835, 0.935$, respectively

平方 ($|\lambda_3|^2, |\lambda_4|^2$) 曲线, 由于相邻两条曲线差别非常细微, 图(b), (d) 分别是图(a), (c) 中曲线 $|\lambda_1|^2, |\lambda_3|^2$ 的放大图。由于 $|\lambda_1|^2 > |\lambda_3|^2 > |\lambda_2|^2 > |\lambda_4|^2$, 所以 $|\lambda_1|^2$ 对应的偏振态优先起振, 能够抑制其他偏振, 故应对 $|\lambda_1|^2, |\lambda_3|^2$ 进行分析才有意义。由图可知 $\frac{\Delta|\lambda|^2}{\Delta R_p} < \frac{\Delta|\lambda|^2}{\Delta R_s}$, 故就对 $|\lambda|^2$ 的影响而言, R_s 的变化较 R_p 的变化影响显著。这对于根据已知输出损耗确定 R_s, R_p 的取值方向有着重要的意义。

A. R. Clobes 所述的 0.01% 即一个方向的输出损耗与之相邻反方向的输出损耗差大于 0.01%, 则在均匀展宽增益介质中, 损耗大的本征模不能振荡^[4]。在图 4 中, 曲线分别为 $R_s=0.787, 0.987$ 时 $||\lambda_{ccw}|^2 - |\lambda_{cw}|^2| - 0.01\%$ 随 R_p 变化曲线图, 即 $(|\lambda_1|^2 - |\lambda_3|^2) - 0.01\%$ 。由图可知 R_p 在 0.3~0.7 范围内均能满足 A. R. Clobes 所述损耗差大于 0.01% 的关系, 因为

$$\frac{\Delta ||\lambda_{ccw}|^2 - |\lambda_{cw}|^2|}{\Delta R_p} < \frac{\Delta ||\lambda_{ccw}|^2 - |\lambda_{cw}|^2|}{\Delta R_s}$$

所以就对本征偏振模与紧邻反向本征偏振模的平方差影响而言, R_s 的变化较 R_p 的变化影响显著, 可根据 R_s, R_p 的增减性及影响显著性选取满足 A. R. Clobes 所述 0.01% 关系的 R_s, R_p 的取值范围。

在选择 R_s, R_p 参数时应该尽量使激光器输出耦合系数 (1 减本征模的平方) 接近最佳透过率, 并且要使输出本征偏振态与其他本征偏振态模值相差较大 ($||\lambda_{ccw}|^2 - |\lambda_{cw}|^2|$)。这就是合理设计偏振输出膜的两条原则, 据此能够得到大的输出功率, 提高效率。根据前述可知, 无论就偏振态本征模的平方

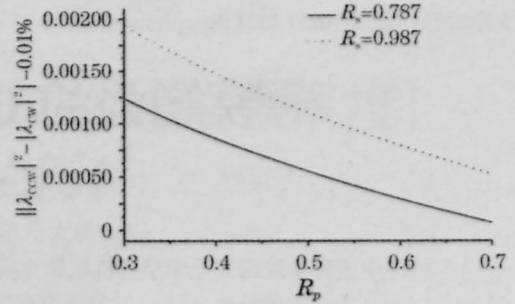


图 4 $R_s=0.787, 0.987$ 时 $||\lambda_{ccw}|^2 - |\lambda_{cw}|^2| - 0.01\%$ 随 R_p 变化曲线

Fig.4 $||\lambda_{ccw}|^2 - |\lambda_{cw}|^2| - 0.01\%$ versus R_p at $R_s=0.787, 0.987$ respectively

还是偏振本征模的平方差而言, R_s 比 R_p 的影响显著, 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, 根据所得到的变化曲线增减性确定 R_s, R_p 的取值。由最佳透过率公式

$$T_{opt} = \sqrt{G_0 l \alpha} - \alpha \quad (3)$$

l 为有效抽运长度, G_0 为增益系数, α 为激光束在腔内传播一周的净损耗因子, 此处为 0.04。以抽运功率 3 W 为例, 其最佳透过率为 0.0896。令输出损耗与最佳透过率相等, 根据前述的原则和方法可以得到最佳透过率 0.0896 对应 $R_s=0.96, R_p=0.776$, 而 $R_s=0.96, R_p=0.776$ 所对应的 $||\lambda_1|^2 - |\lambda_3|^2| - 0.01\% = 0.000279$; 与此类似可以得到与透过率 0.0896 对应的其他 R_s, R_p 系列值, 如下表所示。原则上本征模的平方差越大越好, 此时 R_s, R_p 相差也较大, 但镀膜时 R_s, R_p 相差不能太大, 所以选择 $R_s=0.97, R_p=0.657$ 比较合适。

R_p	0.776	0.657	0.557	0.47
R_s	0.96	0.97	0.98	0.99
$ \lambda_1 ^2 - \lambda_3 ^2 - 0.01\%$	0.000279	0.000593	0.000904	0.001221
$1 - \lambda ^2$	0.0896	0.0896	0.0896	0.0896

4 结 论

以上研究表明, S 偏振光和 P 偏振光的反射率影响 $1 - |\lambda|^2$ 和 $||\lambda_{ccw}|^2 - |\lambda_{cw}|^2|$ 。应当在保证 $||\lambda_{ccw}|^2 - |\lambda_{cw}|^2| - 0.01\% > 0$ 前提下, 使耦合输出膜的透过率 ($1 - |\lambda|^2$) 接近最佳透过率, 并使相邻两方向本征模的平方差较大, 这对于单块非平面环型腔激光器的设计具有指导意义。

参 考 文 献

1 T. J. Kane, W. J. Kozlovsky, R. L. Byer. Monolithic, unidirectional

single-mode Nd:YAG ring laser[J], *Opt. Lett.*, 1985, 2(4):65-67
 2 I. Freitag, A. Tünnermann, H. Welling. Power scaling of diode-pumped monolithic Nd:YAG laser to output powers of several watts[J]. *Opt. Commun.*, 1995, 15:511-515
 3 Wu Keying. Laser diode pumped non-planar unidirectional single-frequency ring laser [D]. Beijing Institute of Technology, 2001. 28-32
 吴克英. LD 泵浦非平面单向行波环形腔单频固体激光器 [D]. 北京: 北京理工大学光电工程系, 2001. 28-32
 4 A. R. Clobes, M. J. Brienza. Single-frequency traveling-wave Nd:YAG laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, 21(6):265-267