

定向棱镜谐振腔的特性研究

程 勇 王晓兵 孙 斌

毛少卿

(武汉军械士官学校光电研究室 武汉 430064) (华中理工大学激光技术国家重点实验室 武汉 430074)

提要 采用定向棱镜谐振腔在固体激光器上获得了腔镜允许失调角为 $\pm 20^\circ$ 的高抗失调稳定性和远场发散角小于 1.6 mrad, 光场模式为低阶模的高光束质量的激光输出, 并对谐振腔的特性进行了理论分析。

关键词 定向棱镜谐振腔, 抗失调稳定性, 光束质量

1 引 言

平行平面腔和球面腔在其腔镜失调后, 腔模和模体积都会发生变化, 激光输出能量急剧下降。其腔镜失调角允差范围限制在分、秒数量级, 这给激光器的使用带来诸多不便, 也严重影响了激光器在恶劣环境下的应用效果。长期以来人们通过各种途径, 例如, 从腔型设计和强化腔镜机械结构等方面力图解决谐振腔因腔镜失调造成激光输出不稳定性问题。经研究发现, 棱镜可以改善激光谐振腔的稳定性, 如美国在机载激光器上采用波罗棱镜腔^[1,2], 前苏联采用直角棱镜与平面反射镜及我国浙江大学采用角隅棱镜与平面反射镜组成的折叠式谐振腔^[3]。上述棱镜谐振腔都使稳定性得到一定程度改善, 但腔镜失调造成的不稳定性始终没有得到根本解决。我们研制的“免调试固体激光器”^[4]采用定向棱镜谐振腔, 较好地解决了现有激光器稳定性和光束质量差的难题。几种棱镜结构谐振腔的稳定性见表 1。本文对定向谐振腔的工作特性进行了研究。

表 1 几种棱镜谐振腔失调灵敏度的比较

Table 1 The comparison of sensitivity of some type of prism cavities

Type of cavity	Laser energy decline/%	Permission of maladjustment angle
Plano-plano cavity	10	20"
Porro cavity	30	8°45' (Rotate around prism axis)
		11' [Rotate around the ortho-axis of prism axis and optical axis]
Prism folded cavity	10	6'
Directional prism cavity	10	22° (Apex on axis)
		20° (Apex out of axis)

2 实 验

2.1 实验装置

定向棱镜谐振腔(下称新型腔)用定向棱镜作为谐振腔的全反镜,与直接镀在激光棒一端的部分反射镜构成免调试谐振腔,腔内振荡光线在定向棱镜中的行迹如图 1 所示。实验装置如图 2 所示。

图 2 中 M_1 是尺寸为 $\phi 8 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 的全反镜, M_2 为输出镜,在激光棒一端直接镀膜($T_0 = 50\%$) 形成,采用 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 晶体作为被动 Q 开关, $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$ 尺寸为 $\phi 6 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$, 腔长 $L = 40 \sim 100 \text{ cm}$, 工作电压为 700 V , 抽运能量 $E_p = 24.5 \text{ J}$, 采用三维调节架模拟失调量,用数字式能量/功率计监测激光输出大小,用感光相纸或 KTP 倍频后观察输出模式。

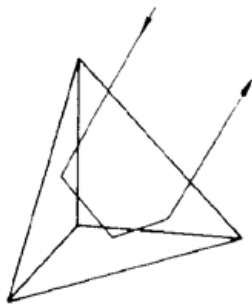


图 1 光线在定向棱镜中的行迹

Fig. 1 The track of light beam in directional prism

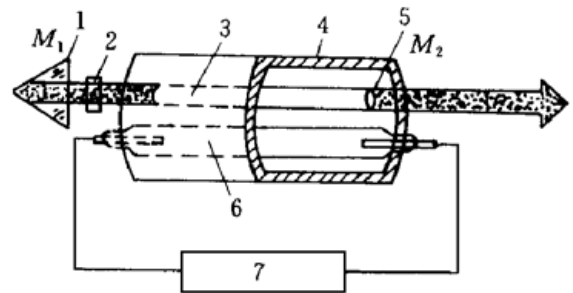


图 2 免调试固体激光器实验装置

1: M_1 定向棱镜; 2: Q 开关; 3: 激光棒; 4: 聚光腔;
5: M_2 输出镜; 6: 抽运灯; 7: 电源

Fig. 2 A novel cavity solid-state laser experiment device
1: M_1 directional prism reflector; 2: Q -switch; 3: laser rod; 4: focus light cavity; 5: M_2 output mirror; 6: pump lamp; 7: power supply

2.2 实验结果

2.2.1 稳定性测量

定向棱镜角顶位于激光棒的轴线上时,在 $\pm 22^\circ$ 范围内任意转动定向棱镜,发现激光输出能量稳定,能量变化范围不超过 2% ,如图 3 所示。当定向棱镜角顶离开光轴 $D/4$ 时(D 为棒径),实际测得激光输出能量在 $\pm 20^\circ$ 范围内变化不超过 5% 。

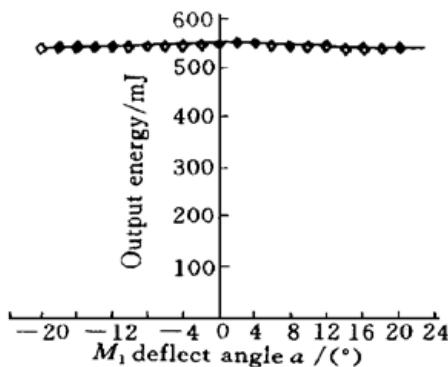


图 3 定向棱镜 M_1 的转角与激光输出能量的关系

Fig. 3 Relationship of M_1 prism deflective angle with laser output energy

2.2.2 光束质量的测量

按照国际标准化组织(ISO)规定的测量光束束斑方法及装置应满足的条件采用移动狭缝法^[5],测量了新型腔激光器输出的近场和远场分布。新型腔具有类似高斯反射镜非稳腔的近场分布,远场能量是一个中心光强更为集中的类似贝塞尔函数分布^[4],这有利于压缩发散角。其近场与远场光斑如图 4 所示。

从光斑图可见,定向棱镜腔的激光输出光束中能量分布的均匀性非常好。

与此同时,又采用了 ISO 中提出的将激光束通过

聚焦透镜的 $F-\theta$ 法分别测量了定向棱镜腔和平-平腔这两种腔型输出激光的发散角及其随腔长变化的规律。测量中使用同一台激光系统, 仅在谐振腔中改变全反镜分别构成定向棱镜-平面镜腔和平-平腔。聚焦透镜的焦距 $f = 120 \text{ cm}$, 设棱镜腔输出的束散角为 θ_1 , 平-平腔输出的束散角为 θ_2 , 腔长为 L , 测量结果如图 5 所示。比较两种腔型的激光器所输出激光的远场发散角在腔长变化 $L = 100 \sim 40 \text{ cm}$, 对应的光束发散角变化 $\theta_1 = 1.25 \sim 1.66 \text{ mrad}$, 而 $\theta_2 = 1.5 \sim 2.25 \text{ mrad}$ 。由此可见, 在相同腔长时棱镜腔的光束发散角 θ_1 均小于平-平腔的束散角。



图 4 激光静态输出光斑

(a) 近场光斑; (b) 1 m 透镜聚焦后的远场光斑

Fig. 4 Static output laser beam speckle

(a) static near field speckle;

(b) static far field speckle at 1 m lens focus

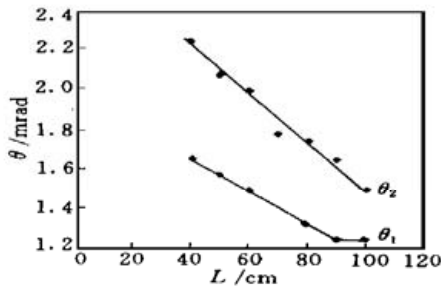


图 5 静态输出光束发散角 θ 与腔长 L 的关系

Fig. 5 Static output beam divergence angle θ vs cavity lengths L

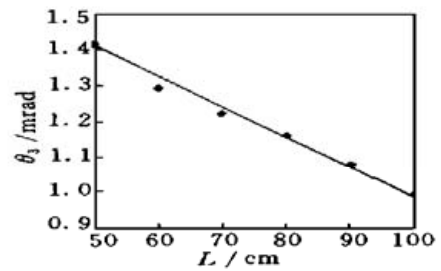


图 6 动态输出光束发散角 θ_3 与腔长 L 的关系

Fig. 6 Dynamic beam divergence angles θ_3 vs cavity lengths L



图 7 动态输出光束远场光斑

Fig. 7 Dynamic output laser beam far field speckle

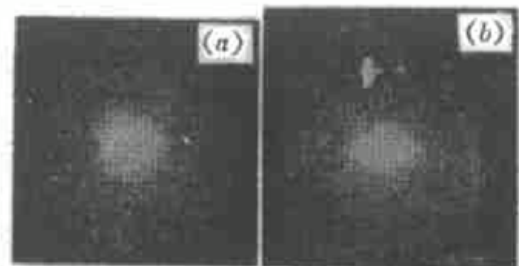


图 8 新型腔与平-平腔动态输出远场模式比较

(a) 新型腔输出模式; (b) 平-平腔输出模式

Fig. 8 Comparison of dynamic far-field output mode between novel cavity and plano-plano cavity

(a) Novel cavity output field; (b) plano-plano cavity output field

进一步观察棱镜腔在不同腔长情况下, 插入 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体被动调 Q 器件后的动态输出发散角 θ_3 变化情况, 测量结果如图 6 所示。由图可见, 在相同腔长 L 变化的范围内, 棱镜腔动态输出束散角的变化 $\theta_3 = 1.0 \sim 1.42 \text{ mrad}$ 。与对应的静态发散角 θ_1 比较, $\theta_3 < \theta_1$ 。这是由于采用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的被动调 Q 特性和 $F-\theta$ 法感光相纸光斑测量的结果。其发散角随腔长变化

的规律与理论预期结果相符。棱镜腔动态输出的远场光斑如图 7 所示。

进一步对两种腔型的动态输出作光场分布均匀程度的比较试验,在相同条件下,新型腔动态输出远场模式与平-平腔动态输出远场模式比较如图 8 所示。经过 KTP 倍频后的远场摄像图形可见,新型腔的调 Q 输出远场光强分布比一般平-平腔的光场分布要均匀得多。

3 特性及其分析

试验结果表明新型腔具有如下独特功能与特性:

1) 稳定性高和抗失调能力强

从谐振腔的稳定性来看,由于定向棱镜腔内为平行光场,棱镜偏转不引起腔内振荡光线方向的改变,所以新型腔允许失调角高达 $\pm 20^\circ$ 。这种结果是现有其他结构的激光腔从未达到的,它克服了激光腔容易失调而导致激光器失效的缺陷。新型谐振腔具有高度抗失调能力和机械稳定性;同时,实现激光器安装不经调试即可稳定输出激光的免调试功能。

2) 改善光束质量、压缩发散角

提高光束质量的实质是“滤去”高阶模。ISO 国际标准采用 M^2 因子来判别光束质量的高低。在高阶高斯模的 M^2 因子表达式中, M^2 因子的数值与模序数 (m, n , 或 p, l) 有关^[6,7], 模序数越高, M^2 因子越大, 对应的光束质量越差。模序数与输出光斑近场强度分布相对应, 光场分布均匀性好的光束, 其模序数就低。可是输出光斑近场强度又直接与增益分布相关, 如果增益分布均匀, 必能改善光束质量。

定向棱镜与一般腔镜不同, 它是一种全内平行反射, 具有相位共轭镜效果。定向棱镜腔内的振荡光线绕平行于光轴对称位置(上、下或左、右)交换穿行, 能克服工作物质内部折射率、密度、应力等不均匀分布, 使得在振荡过程中得到的增益趋于均匀, 光场分布均匀, 激光模式的序数低。而在普通腔中, 激光棒的不均匀性会导致模式变化, 增加光束的发散度和光场畸变。同时, 因为定向棱镜腔有良好的角向选模能力^[8], 因而新型激光器出现了压缩光束发散角的现象, 从棱镜腔和平-平腔的光束发散角测量比较中明显地看出这种现象, 证实了棱镜腔有压缩发散角的功能。从棱镜腔输出光束中能量分布均匀和束散角减小这两方面的结果可见, 它明显地改善了激光光束的质量。

3) 适合在高功率激光器中使用

对于平-平腔激光器, 热透镜效应和应力双折射效应严重地影响光束质量, 并易产生激光损伤。而新型腔内平行光场有如上所述的相位共轭效果, 对腔内的不均匀性有光学补偿作用, 因此在高平均功率载荷条件下波前畸变很小, 光场分布均匀, 低阶模振荡, 适于在大能量高重复频率条件下运行。由于发散角得到压缩, 远场能量比较集中, 有利于在激光大气传输、激光检测和激光加工等方面的应用。

参 考 文 献

- 1 Zhang Chengshuan. Hand book of foreign military laser instruments. Ordnance Industry Press, 1989. 9 (in Chinese)
- 2 Eric J. Woodbury. Laser Using Porro Prism End Reflectors. U. S. P 3464026, 1969
- 3 Fan Qikang, Lu Zukang, Wu Bizhen *et al.*. Laser output with stabilized, alignment and linear polarization. CN87, 2, 19562, U (in chinese)

- 4 Cheng Yong, Mao Shaoqing. Avoidance adjust solid state laser. *Laser Technology* (激光技术), 1999, **23** (2): 68~ 70 (in Chinese)
- 5 International Organization for Standardization: Test method for width, divergence and characteristic factor of laser beam, ISO/TC 172/SC 9/WG 1
- 6 Lü Baida, Zhang Bin, Cai Bangwei. M^2 -factor concept and laser beam quality control. *Laser Technology* (激光技术), 1992, **16**(5): 278~ 283 (in Chinese)
- 7 Chen Peifeng, Qiu Junlin. Light beam propagation features defined by propagation factor M^2 . *Laser Technology* (激光技术), 1996, **20**(1): 46~ 49 (in Chinese)
- 8 J. A. Giordmaine, W. Kaiser. Mode-selecting prism reflectors for optical masers. *J. Appl. Phys.*, 1964, **35**(12): 3446~ 3451

Study of Directional Prism Cavity Character

Cheng Yong Wang Xiaobing Sun Bing

(Optoelectric Facility, Wuhan Ordnance Noncommissioned Officers School, Wuhan 430064)

Mao Shaoqing

(The State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of
Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract A solid-stated laser with the direction prism end reflector was developed. The end reflection maladjustment angle of $\pm 20^\circ$ is promised. The beam divergence angle is of 1.6 mrad. The laser field belong to lower order mode. Then, this laser has high stability, high beam quality and anti-maladjustment function. The theoretical analyse of the resonator characteristics is described.

Key words directional prism cavity, anti-maladjustment, beam quality