

文章编号 1004-924X(2011)02-0429-08

高功率 TEA CO₂ 激光器的双波长免调切换结构

邵春雷¹, 宋晓峰^{1,2}, 张来明¹, 谢冀江¹, 郭 劲¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 为在一台激光器上切换输出 10.6/9.3 μm 两种波长高能激光, 采用输出镜镀膜选支方法获得了 9.3 μm 单谱线输出, 其脉冲能量与原 10.6 μm 波长基本相当。设计出双波长密闭免调切换输出结构, 利用有限元分析软件 MSC. Patran/Nastran 对该结构的切换移动平台组件进行了静力学、热应力及热力耦合分析, 并基于 Matlab 软件, 运用最小二乘法对分析得到的位移变形量拟合输出镜镜面绕坐标轴的偏转角度。分析计算得到结构的最大应力为 101 MPa, 镜面的最大变形量为 6.95 μm, 镜面绕 3 个坐标轴的倾斜角度分别为 0.07°, 2.92°, 0.009°。对研制出的实物装置进行发射试验, 检测到两波长切换发射的指向性相对误差为 8.7%。结果表明, 该结构能够满足免调切换输出两种波长激光的性能参数要求。

关键词: 高功率 TEA CO₂ 激光器; 双波长切换结构; 有限元分析; 最小二乘法

中图分类号: TN248.22 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20111902.0429

High power TEA CO₂ laser with two wavelength free shift output structure

SHAO Chun-lei¹, SONG Xiao-feng^{1,2}, ZHANG Lai-ming¹, XIE Ji-jiang¹, GUO Jin¹

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences Changchun 130033, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To realize 10.6/9.3 μm two-wavelength high energy laser switching output on one laser, a coating on output mirror was taken to obtain a 9.3 μm singlet output whose pulse energy was roughly equal to 10.6 μm. A two-wavelength window switching device with free shift out structures was designed. The statics analysis, thermal stress analysis and the thermal stress coupling analysis were used in the switching shift flat to get the displacement deformation by MSC. Patran/Nastran software, then the least square method was taken to get the output mirror deflection angle around the axis by Matlab software. The results indicate that the maximum stress of structure is 101 MPa, the maximum deformation of mirror is 6.95 μm, and the mirror deflection angles around the axis are 0.07°, 2.92° and 0.009°, respectively. A emission experiment for the physical device was performed, which shows that the directional relative error of two wavelength shift emission is 8.7%. The results mean that the struc-

收稿日期: 2010-10-08; 修订日期: 2010-10-30.

基金项目: 中科院知识创新工程领域前沿项目资助

ture can satisfy the requirements of the free shift output of two wavelength lasers for capabilities and parameters.

Key words: high power TEA CO₂ laser; two wavelength shift structure; finite element analysis; least square method

1 引言

TEA CO₂ 激光器采用脉冲重复频率工作模式, 不仅可同时兼有高平均功率、高重复频率和高峰值功率, 还能进行高功率选支发射, 在工业、国防和科研等领域具有重要的应用价值^[1-5]。随着高功率 TEA CO₂ 激光器技术的不断发展, 对其功能要求也不断增加。例如, 在激光与物质相互作用的研究中, 不仅需要输出中心波长 10.6 μm 的激光, 还需要输出中心波长 9.3 μm 的激光, 以研究在相同的输出能量(功率)下不同波长激光对物质的作用效果。CO₂ 激光在 9~11 μm 有上百条谱线, 通常输出增益最大的 10.6 μm 波长激光, 要得到其它波长激光输出, 需要采用特定的波长选支方法。TEA CO₂ 激光器常用的波长选支方法有注入锁定、法布里-泊罗标准具调谐(F-P 耦合腔)以及光栅调谐^[6-9]。其中, 注入锁定难以得到单一波长输出, 且结构复杂, 不适宜工程应用; 法布里-泊罗标准具调谐只适用于激光增益长度较短的情况, 无法获得高能激光输出; 光栅调谐虽然具有很好的波长选择能力而被广泛采用, 但因受到损伤阈值的限制, 也无法满足输出数千瓦以上高平均功率激光的要求。

本文针对以上常用选支方法的不足, 开展了相关的研究工作。以高功率 TEA CO₂ 激光器通常采用的平凹光学稳定腔为基础, 结合激光在光学谐振腔中振荡放大竞争输出原理, 采用输出窗口镀膜选支技术, 获得了与原 10.6 μm 波长脉冲能量基本相当的 9.3 μm 单谱线激光输出。以此为基础设计了双波长密闭免调切换输出结构, 采用有限元软件 MSC/Patran, Nastran 对该结构进行了静力学、热应力及热力耦合分析, 并应用 Matlab 软件对有限元分析中的镜面位移变形结果进行了拟合, 得到了镜面变形曲线。分析计算结果满足设计要求, 研制出的切换结构装置经试

验验证达到了性能参数要求。

2 输出窗口镀膜选支实验

2.1 镀膜选支技术原理

平凹光学稳定腔通常由一个铜质凹球面全反射镜和一个 ZnSe 平面部分反射镜即输出窗口构成, 输出窗口镀膜选支技术是基于激光在光学谐振腔中振荡放大竞争输出原理而提出的。CO₂ 激光按能级跃迁原则分为 10P, 10R, 9P, 9R 4 支谱线, 分别对应中心波长 10.6 μm, 10.2 μm, 9.6 μm, 9.3 μm^[10], 其中增益最强的是 10.6 μm, 其次是 9.6 μm。在通常的研究中, 输出窗口的镀膜特性是对 9~11 μm 波段具有相近的反射率或透过率, 众多激光谱线在光学谐振腔中是以一种自由竞争的模式振荡放大, 由于 10.6 μm 的增益最高, 因此通常输出的是中心波长为 10.6 μm 的激光^[11-13]。

镀膜选支技术是在输出窗口上镀与原窗口有不同特性的光学膜层, 使所需要波长的激光能在光学谐振腔内产生振荡放大定向输出。按此思路, 设计新的输出窗口镀膜特性曲线, 使对 9.3 μm 的反射率高于对 9.6 μm, 10.2 μm, 10.6 μm 的反射率, 并尽量提高对这 3 条谱线的透过率, 以增大它们在光学谐振腔中的损耗, 从而抑制它们产生振荡放大。然后结合 CO₂ 分子激光上能级间能快速转移, 即能级反转粒子数 赢家通吃 的机理, 将使所需要的中心波长 9.3 μm 激光能够唯一地在光学谐振腔内振荡放大实现高功率输出。

2.2 镀膜选支实验结果

按上面的研究思路并结合现有镀膜加工能力, 设计输出窗口镀膜特性曲线, 利用一台高功率 TEA CO₂ 激光器进行多次对比试验, 在输出窗口镀膜特性中各波长透过率为: 9.3 μm, 69%; 9.6 μm, 81%; 10.2 μm, 99%; 10.6 μm, 98% 时, 得到了 9.3 μm 单条谱线输出, 激光脉冲能量为原输

出 10.6 μm 单条谱线能量的 96%。

3 切换结构设计

3.1 功能要求

采用输出窗口镀膜选支技术获得了 9.3 μm 单条谱线的高能量输出, 若要在同一台激光器上实现 10.6/9.3 μm 两种波长激光切换输出要求, 就需要安装两个不同镀膜的输出窗口, 它们共用一个凹面全反射镜, 需要输出哪种波长激光时, 就将该窗口移动到与凹面全反射镜对应的位置构成光学谐振腔。为使切换发射具有工程实用性, 就不应在切换后还需对窗口进行对准调整, 即两个窗口在切换到位后还应保持基本相同的空间位置精度。由于激光输出窗口同时也是密闭工作腔的一个密封元件, 因此, 需要设计一个两窗口密闭免调切换结构装置, 将其安装在激光器光学谐振腔前端支架上。

3.2 性能参数要求

(1) 结构所受应力小于材料的许用应力(结构装置材料采用殷钢。考核强度时选用材料的屈服极限作参考, 其屈服极限为 302 MPa, 由一般取材料安全系数为 1.2, 可得许用应力为 251.7 MPa;

输出镜材料为 ZnSe, 其断裂模数为 55.2 MPa);

(2) 输出镜的位移变形量控制在 8 μm 内;

(3) 在光学谐振腔内部工作气体温度是 10 °C, 外部环境温度为 30 °C 时, 镜面绕 X, Y 轴(垂直于光轴 Z 轴截面内的坐标轴)的倾斜角度均不得大于 5°;

(4) 10.6/9.3 μm 双波长切换输出时光束指向性误差不大于 10°。

3.3 结构设计

设计出的两窗口密闭免调切换装置如图 1 所示。两窗口都以激光振荡基准平面的腔内侧平面作为定位基准, 安装在切换移动平台的同一平面上, 这保证了两窗口之间具有误差很小的空间位置精度; 切换移动平台与可调导轨座之间采用燕尾导轨结构来保证移动位置精度要求; 可调导轨座安装在光学谐振腔前端支架上, 它即是切换装置的安装基座, 也是实现光学谐振腔前后腔镜初始对准调整的功能部件; 在切换移动平台与可调导轨座相对的平面上安装有跑道形密封圈, 该密封圈随切换移动平台运动, 在两个窗口切换过程中, 始终将切换移动平台上的 2 个窗口通孔与可调导轨座上的通光孔包容在里面, 从而实现切换移动中的密封功能。

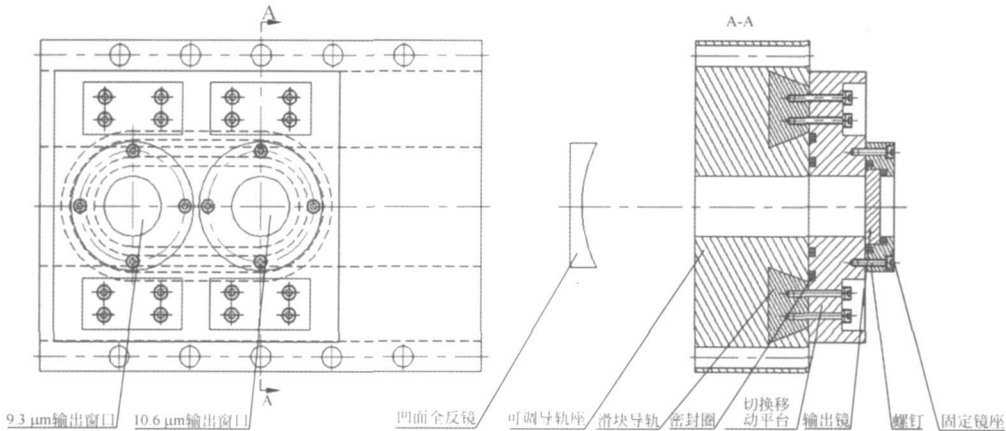


图 1 两波长窗口密闭免调切换装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram two-wavelength window device with hermetic closure and free shift

可见, 在很高的设计和加工精度保证下, 由于是对可调导轨座进行光学谐振腔的初始对准调整, 切换装置是整体位置变动, 在将任一个窗口与凹面全反射镜对准后, 另一个窗口切换到与凹面全反射镜对应位置时, 其位置误差变化很小。由于窗口是平面镜, 因此两个窗口之间移动的行程

精度要求不高, 只要将激光增益截面完全包容在内即可。

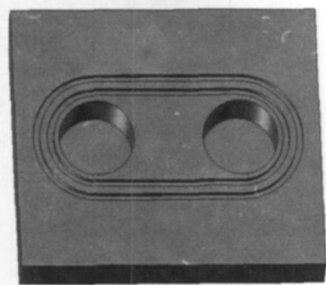
4 切换移动平台组件的有限元分析

本文针对切换结构中的关键功能部件 切换

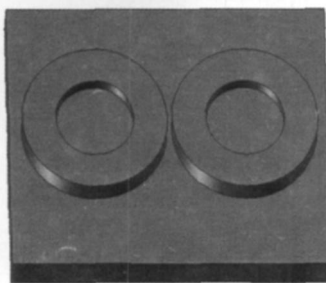
移动平台组件(包括切换移动平台、输出镜和固定镜座)进行分析。采用 MSC 公司生产的有限元分析软件 MSC. Patran/ Nastran, 实现了几何模型的静力学、热应力及热力耦合分析。通过确定材料属性、加载载荷、确定支撑、施加约束及划分大小适合的有限分析单元网格, 进而由求解器计算模型中的应力、应变和位移, 以达到预期的分析结果。

4.1 建立有限元简化模型

建立有限元模型时, 在不影响分析结果准确性的前提下, 对分析结果无关紧要的一些细节部分常常使模型相当复杂, 在实体建模时应将这一步略去。在某些情况下, 由于一些很小的局部而破坏了整个结构的对称性, 有时可略去这些局部(或将它们作对称处理)以保持结构对称, 缩小分析的规模和时间。该组件的有限元简化模型如图 2 所示。



(a) 内表面
(a) Inner surface



(b) 外表面
(b) Exterior surface

图 2 有限元简化模型

Fig. 2 Simplified finite element model

4.2 有限元模型前处理

4.2.1 设置材料的物理特性

该装置中, 输出镜材料为 ZnSe, 其它结构零

件均采用殷钢, 因殷钢的热膨胀系数极小, 适合在温度变化较大的环境中使用。两种材料的一些物理特性见表 1。

表 1 两种材料物理特性

Tab. 1 Physical properties of two materials

材料	弹性模量 E/GPa	泊松比	密度 $/(t \cdot m^{-3})$	热膨胀系数 $/(10^{-6})$	热导率 $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
ZnSe	67	0.28	5.27	5.75	18
殷钢	140	0.25	8.89	1.0	10

4.2.2 添加约束

如果位置约束不当, 会对有限元分析的结果产生较大的误差。结合图 1 及图 2 可以看出, 应对切换移动平台上的 16 个螺孔(固定导轨滑块用)位置进行约束, 约束时均采用固定几何体的方式进行(即 3 个平移自由度和 3 个转动自由度都被限制住), 约束符号用 dis 表示。

4.2.3 施加载荷

该组件受到的载荷共有三个, 一个是 O 形密封圈对切换移动平台的接触应力 F ; 另一个是腔内工作气压对镜面的压强 P_1 , 为 0.07 MPa, 腔外大气对镜面的压强 P_2 为 0.1 MPa; 第三个是光学谐振腔内部工作气体温度, 为 10、环境温度 30 的温度载荷 T 。其中 O 形橡胶圈的最大接触应力计算公式如下^[14]:

$$S_{\max} = E \left[\frac{16}{6} \left(1.25^{\frac{3}{2}} + 50^6 \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

$$= \frac{x^*}{d}. \quad (2)$$

其中: S_{\max} 为 O 形橡胶圈的最大接触应力, E 为 7.84 MPa, 是橡胶的弹性模量; 为 O 形圈的压缩比; d 为 5.3 mm, 为 O 形圈的直径; x^* 为 O 形圈的最大预压缩率(为 d 的 8%)。

由此公式计算出 O 形圈的最大接触应力为 $S_{\max} = 0.33 \text{ MPa}$ 。该组件施加的温度载荷如图 3 所示, 施加的约束(白色)及压力载荷(灰色, 接触应力载荷在腔内方向)如图 4 所示。

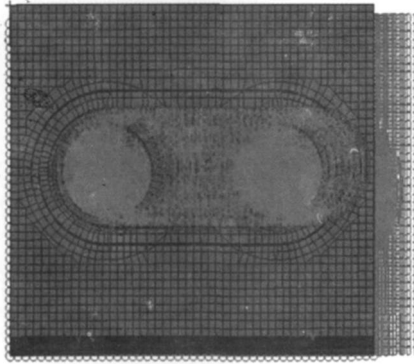


图 3 温度载荷示意图

Fig. 3 Temperature loading

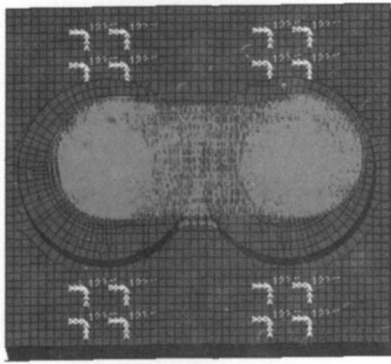


图 4 约束及压力载荷示意图

Fig. 4 Displacement and pressure loadings

4.3 载荷工况

根据载荷组合作用的几种形式, 分析计算时主要考虑如下几种工况:

- (1) 工况 1(静力学分析): 约束 dis+ 接触应力 F + 腔内压强 P_1 + 环境压强 P_2 ;
- (2) 工况 2(热应力分析): 约束 dis+ 温度载荷 T ;
- (3) 工况 3(热力耦合分析): 约束 dis+ 接触应力 F + 腔内压强 P_1 + 环境压强 P_2 + 温度载荷 T 。

4.4 有限元分析结果

采用手动划分网格的方式, 该有限元模型的节点数为 34643 个, 单元数为 30210 个。对每个工况都进行分析后, 得到结构件的最大应力值、输出镜的最大应力值和最大变形量如表 2 所示。

表 2 3 种工况下的分析结果

Tab.2 Analysis results of three loadcases

	结构件最大应力	输出镜最大应力	输出镜最大变形量
	/MPa	/MPa	/m
工况 1	8.87	0.46	0.89
工况 2	99.4	15.3	6.71
工况 3	101	15.3	6.95

从表 2 的结果数据可以看出, 最大应力、最大变形均发生在工况 3(热力耦合分析) 情况下, 结构件最大应力为 101 MPa, 小于殷钢的许用应力 251.7 MPa; 输出镜最大应力为 15.3 MPa, 小于 ZnSe 断裂模数 55.2 MPa, 最大变形 6.95 m, 也控制在 8 m 范围之内, 均满足性能参数(1)、(2) 项的要求。在工况 3 下该组件的应力图如图 5 所示, 输出镜的应力图如图 6 所示, 变形图如图 7 所

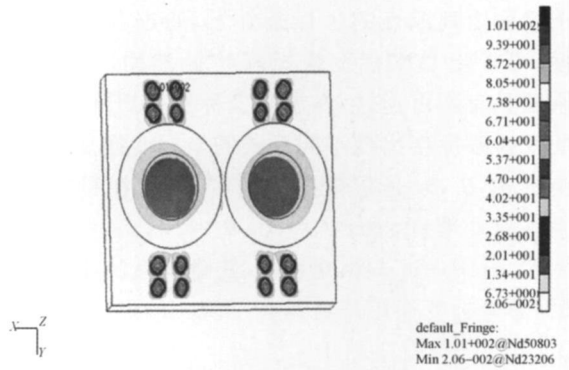


图 5 工况 3 下组件的应力分布图

Fig. 5 Module stress distribution in loadcase 3

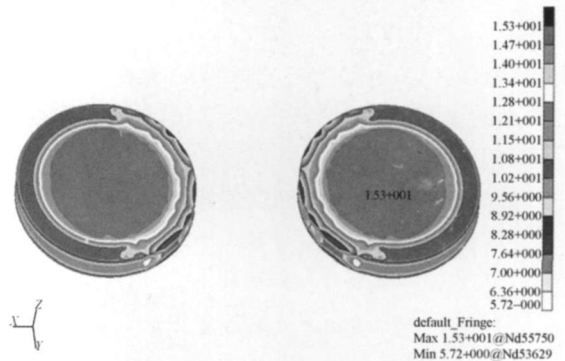


图 6 工况 3 下输出镜应力分布图

Fig. 6 Module stress distribution of output mirror in loadcase 3

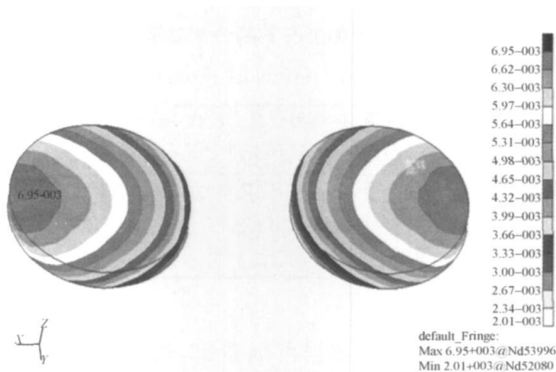


图 7 工况 3 下输出镜变形图

Fig. 7 Deformation of output mirror in loadcase 3

4.5 镜面倾斜角度分析

对于有限元分析的输出镜变形数据, 利用最小二乘法原理进行拟合以得到镜面绕 x, y, z (光轴) 3 个坐标轴的倾斜角度。设镜面相对于各自理想位置沿 x, y, z 轴的平移量分别为 e, f, g , 绕 x, y, z 轴的偏转量分别为 α, β, γ 。在载荷作用下镜面上离散点的坐标条件下, 通过齐次坐标变换, 可求出总坐标变换矩阵^[15]。然而, 由于矩阵乘法具有不可逆性, 在求总坐标变换矩阵时, 不同的变换顺序会出现不同形式的坐标变换矩阵。但由于 α, β, γ 是很微小的角度, 一般在秒数量级上进行处理, 令 $\cos \alpha = \cos \beta = \cos \gamma = 1, \sin \alpha = \alpha, \sin \beta = \beta, \sin \gamma = \gamma$, 并略去高阶小量。这时, 总坐标变换矩阵就具有了统一的形式, 即

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} = T^* \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma & \beta & e \\ \gamma & 1 & -\alpha & f \\ -\beta & \alpha & 1 & g \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式(3)中 (x_i, y_i, z_i) ($i = 1, 2, \dots, n$) 为变形前镜面上的点的坐标, (x_i, y_i, z_i) ($i = 1, 2, \dots, n$) 为变形后镜面上的点的坐标。

由统一形式的总坐标变换矩阵得:

$$\begin{cases} x_i = x_i - \gamma y_i + \beta z_i + e \\ y_i = \gamma x_i + y_i - \alpha z_i + f \\ z_i = -\beta x_i + \alpha y_i + z_i + g \end{cases}, \quad (4)$$

令

$$Q = \sum_{i=1}^n [(x_i - x_i + \gamma y_i - \beta z_i - e)^2 + (y_i - \gamma x_i + \alpha z_i - f)^2 + (z_i - \alpha y_i - \beta x_i - g)^2] \quad (5)$$

当 $Q = \min$ 时, 则平移量和偏转量的求解问题变成极值问题的求解。

利用 Matlab 软件使用全局坐标变换, 计算刚体位移 $e, f, g, \alpha, \beta, \gamma$, 对公式(5)中的 6 个自变量分别求一阶导数, 令求导结果 = 0, 得到一个 6 阶方程组, 对此方程组进行求解, 得到 $\alpha = 0.07, \beta = 2.92, \gamma = 0.009$, 均满足性能参数(3)项的要求。

5 研究结果

有限元分析结果表明设计的切换结构能够满足性能参数要求, 据此加工出的实物装置如图 8 所示。该装置安装在一台高功率 TEA CO₂ 激光器上, 经检测其切换移动时的密闭性能基本等同于橡胶静密封的水平。在设计工作参数与温度条件下进行两波长切换发射指向性试验, 采用美国 SPIRICON 公司产 Pyrocam III 型光束质量分析仪, 在距出光口 20 m 处对两波长激光输出光斑位置相对变化进行检测。经测算指向性误差为 8.7, 满足性能参数(4)项的要求。

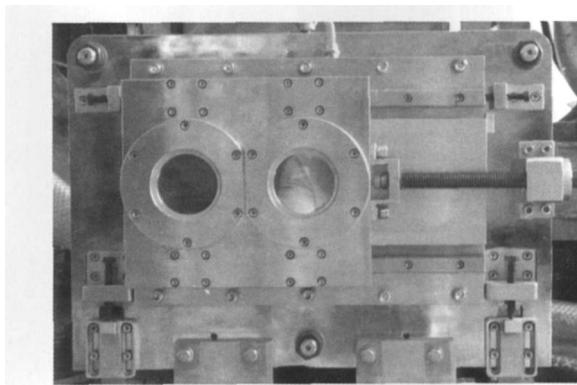


图 8 双波长密闭免调切换装置

Fig. 8 Two-wavelength window device with hermetic closure and free shift

6 结论

由于 TEA CO₂ 激光器常用的波长选支方法无法输出高能激光, 本文基于激光在光学谐振腔中振荡放大竞争输出原理, 采用输出窗口镀膜选支技术, 得到了与原 10.6 μm 激光能量相当的 9.3 μm 单谱线输出。以此为基础设计了双波长密闭免调切换结构, 利用 MSC. Patran/Nastran

软件对该结构的关键功能部件 切换移动平台组件进行了有限元分析,得到了静力学分析结果。在谐振腔内部温度为 10 ,外部环境温度为 30 的情况下进行了热分析、热应力分析和热力耦合分析,得到了切换结构的最大应力以及输出镜的最大变形量。分析结果表明,在热力耦合分析中各项数据最大,结构的最大应力为 101 MPa,输出镜的最大变形量为 6.95 μm。对有限元分析

得到的镜面变形数据基于最小二乘法原理利用 Matlab 软件进行拟合,得到镜面绕空间 3 个坐标轴的倾斜角度分别是 0.07°, 2.92°, 0.009°。在设计参数和环境温度条件下,对研制出的密闭免调切换装置实物进行双波长切换发射试验,检测到两波长指向性相对误差为 8.7%。研究表明,两窗口密闭免调切换结构能够满足双波长切换发射的性能参数要求。

参考文献:

- [1] 王云飞,吴谨,刘世明,等.长脉冲 TE CO₂ 激光器的调谐特性[J].红外与激光工程,2008,37(2):226-229.
WANG Y F, WU J, LIU SH M, et al.. Tunable characteristic of long pulse TE CO₂ laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 226-229. (in Chinese)
- [2] 谢冀江,李殿军,张传胜,等.声光调 Q CO₂ 激光器[J].光学精密工程,2009,17(5):1008-1013.
XIE J J, LI D J, ZHANG CH SH, et al.. Acousto-optically Q-switched CO₂ laser[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(5): 1008-1013. (in Chinese)
- [3] 陈家璧,余重秀,张元芳,等.激光原理及应用[M].北京:电子工业出版社,2004.
CHEN J B, YU CH X, ZH Y F, et al.. *The Principles and Applications of Laser* [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2004. (In Chinese)
- [4] 卢远添,吴谨,王东蕾,等.大能量长脉冲 TE CO₂ 激光器[J].强激光与粒子束,2008,20(9):1437-1440.
LU Y T, WU J, WANG D L, et al.. Long-pulse TE CO₂ laser with high energy[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(9): 1437-1440. (In Chinese)
- [5] HASSON V. Review of recent advancements in the development of compact high power CO₂ laser radar system[J]. *SPIE*, 1999, 3707: 499-512.
- [6] 程永强.光栅选线 TEA CO₂ 激光快速调谐技术研究[D].北京:中国科学院,2006.
CHENG Y Q. *Investigation on rapidly tunable technology of grating line selection TEA CO₂ laser* [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2006. (In Chinese)
- [7] 廖均梅,李育德,李忠华,等.可调谐 TEA CO₂ 激光器多频输出[J].强激光与粒子束,2009,21(10):1459-1461.

- LIAO J M, LI Y D, LI ZH H, et al.. Multi-frequency transversely excited atmospheric pressure CO₂ laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(10): 1459-1461. (in Chinese)
- [8] 许德富,李育德,陈梅.具有同空间特性的双频可调谐 TEA CO₂ 激光器研究[J].激光与红外,2008,38(5):441-444.
XU D F, LI Y D, CHEN M. Theoretic model of same space dual-wavelength tunable TEA CO₂ laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 38(5): 441-444. (in Chinese)
- [9] HARRIS M R, WILLET S D V. Transversely excited CO₂ laser with long pulse duration discharge[J]. *Optics Communications*, 1991, 83(3/4): 227-230.
- [10] 郑义军,谭荣清,柯常军,等.基于调谐 TEA CO₂ 激光推进的研究[J].激光杂志,2006,27(6):22-23.
ZHENG Y J, TAN R Q, KE CH J, et al.. The study of laser propulsion base on tunable TEA CO₂ laser[J]. *Laser Journal*, 2006, 27(6): 22-23. (in Chinese)
- [11] 李适民,黄维玲.激光器件原理与设计[M].北京:国防工业出版社,2005.
LI SH M, HUANG W L. *The Principles and Design of Laser Devices* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (In Chinese)
- [12] 俞宽新,江铁良,赵启大.激光原理与激光技术[M].北京:北京工业大学出版社,1998.
YU K X, JIANG T L, ZHAO Q D. *Laser Principles and Laser Techniques* [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 1998. (in Chinese)
- [13] 廖均梅,李育德,钟耿,等.TEA CO₂ 激光器序列带的输出特性[J].强激光与粒子束,2008,20(2):323-325.
LIAO J M, LI Y D, ZHONG G, et al.. Output character of sequence band lines of TEA CO₂ laser

[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(2): 323-325. (in Chinese)

- [14] ITZHAK G. Stresses and deformation of compressed elastomeric O-ring seals[C]. *14th International Conference on Fluid Sealing*, 1994: 83-95.

[15] 李贤辉. 光机集成有限元分析光学面形后处理研究与实现[D]. 长春: 中国科学院, 2004.

LI X H. *Study on the integrated optomechanical analysis optical surface post-process system*[D]. Changchun: Chinese Academy of Sciences, 2004. (In Chinese)

作者简介:



邵春雷(1963-), 男, 黑龙江牡丹江人, 研究员, 硕士生导师, 主要从事高功率脉冲气体激光器技术的研究。E-mail: sclem@sina.com



宋晓峰(1986-), 女, 辽宁庄河人, 硕士研究生, 主要从事高功率 TEA CO₂ 激光器双波长切换输出技术的研究。E-mail: songxiaofeng163@yahoo.cn



张来明(1979-), 男, 山东青州人, 副研究员, 博士, 2007年于中科院研究生院获博士学位, 现任激光与物质相互作用国家重点实验室秘书, 主要从事大功率 CO₂ 激光器的研发, 放电引发非链式 DF 激光器的研究。E-mail: lightcoming@163.com



谢冀江(1959-), 男, 吉林长春人, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事激光工程应用方面的研究。E-mail: laserxjj@163.com



郭劲(1964-), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 现任中科院长春光学精密机械与物理研究所光电对抗部主任, 主要从事光电系统总体技术的研究。E-mail: guojin@ciomp.ac.cn