

全反射棱镜式环形激光器的温度效应

赵东洋^{1,2} 石顺祥¹ 李家立¹

(1 西安电子科技大学, 西安 710071)

(2 华中光电技术研究所, 武汉 430074)

摘要 根据矩阵光学理论,研究了全反射棱镜式环形激光器(TRPRL)光路的温度效应.从理论上给出了描述光路中光学元件在介质折射率变化时的 3×3 变换矩阵,建立了折射率变化时谐振腔内光路的偏转模型,由此讨论了温度变化导致 TRPRL 光路的偏转规律,并研究了降低 TRPRL 温度效应对其性能影响的方法.所得结论对 TRPRL 的设计和运用有重要指导意义.

关键词 环形激光器;全反射棱镜;光路偏转;温度效应

中图分类号 TN965 **文献标识码** A

0 引言

全反射棱镜式环形激光器(TRPRL)是一种利用全反射棱镜(TRP)作为反射镜的环形激光器^[1~3],这种激光器在激光陀螺、激光计量等领域内有着重要的应用^[4].通常,TRP 的材料采用光学玻璃.由于 TRP 材料的折射率随温度变化,将引起 TRPRL 光路发生偏转,从而使激光器的增益降低,衍射损耗、衍射非互易性增加,出现多模振荡等,严重地影响 TRPRL 的工作.因此,研究 TRPRL 光路因温度变化产生偏转的规律具有重要意义.

本文首先根据矩阵光学理论^[5,6],给出了描述光学元件在介质折射率变化时的变换矩阵,由此建立了 TRPRL 光路因介质折射率变化发生偏转的模型,讨论了 TRPRL 光路因温度变化发生偏转的规律,并研究了降低 TRPRL 温度效应对其工作性能影响的方法.

1 TRPRL 的结构

本文研究的 TRPRL 谐振腔的结构如图 1.图中,A、B、C、D 为 TRP.为了方便说明,对四个 TRP 的光路通光表面编号(序号 1~20),并且它们的连线是谐振腔的光轴(图中未画毛细管).全反射棱镜 A 的序号 4、5 和全反射棱镜 D 的序号 16、17 处是曲率半径为 R 的凸球面,TRP 的其它通光面均为平面,采用这种设计是为了保证谐振腔是稳定腔工作.光线在序号 3、8、13、18 处发生全反射,入射角为 45° .为了得到偏振光振荡,使光线以布儒斯特角入射 TRP. TRPRL 的增益介质是 He-Ne 气体,工作波长为 $0.6328 \mu\text{m}$.

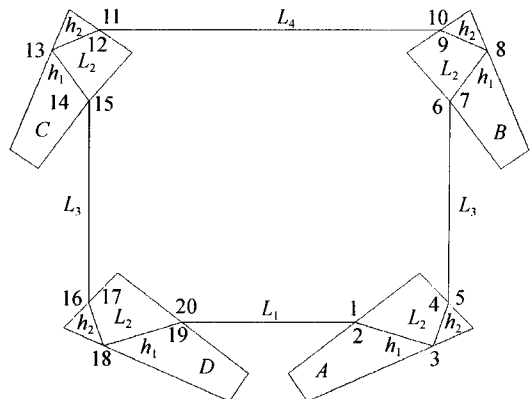


图 1 TRPRL 谐振腔的结构

Fig. 1 Sketch map of frame of the TRPRL resonator

TRP 石英玻璃的折射率随温度变化,其函数关系^[7]为

$$n = n_0 + K(\lambda)T \quad (1)$$

式中, n_0 是决定于材料的常量, T 是绝对温度,对于 $0.6328 \mu\text{m}$ 波长的光,系数 $K(\lambda) = 1.01 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

由式(1)可见,温度变化将导致介质折射率发生变化,因此,TRPRL 光路会发生偏转.为了讨论温度效应,先一般地讨论介质折射率变化对 TRPRL 光路的影响.下面首先利用矩阵光学理论,研究光路中介质折射率变化引起光学元件传输特性的变化规律.

2 介质折射率变化时谐振腔内光学元件的变换矩阵

在分析中,将介质折射率变化前谐振腔的光轴(光路)称为初始光轴,并分别在两个正交参考面,即子午面和弧矢面上,推导介质折射率变化时光学元件的变换矩阵.

由于实际上温度变化引起光学元件介质折射率的变化很小,所以可将变化后光路的光线相对初始光轴视为傍轴光线.若令初始光轴为 z 轴,则在任

意一个参考面上,系统的任一傍轴光线都可以由两个坐标参量表征:一个是光线离开 z 轴的距离 r ,另一个是光线与 z 轴的夹角 α ,记为 (r, α) . 为分析方便,符号选取规则定为:①沿着 z 轴方向,当傍轴光线落在 z 轴左侧时, r 为正,反之为负;②相对于 z 轴逆时针方向取向的傍轴光线, α 为正,反之为负;③当曲率半径为 R 的球面凹向与 z 轴方向相反时, R 为正,反之为负.

现在,以子午面内光线从折射率为 n 的介质球面射向空气为例,推导介质球面两侧折射率变化时的变换矩阵.

如图 2,设光线 EA 为介质 n 中的 z 轴方向,光线

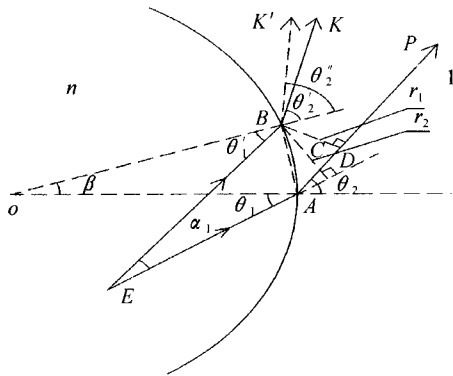


图 2 介质球面上的折射

Fig. 2 Refraction on the spherical surface of medium

AP 为空气中的 z 轴方向,介质球面的曲率半径为 R ,球心为 O . 若 EA 与 OA 的夹角为 θ_1 , AP 与 OA 的夹角为 θ_2 ,则由初始光轴的定义应有

$$n \sin \theta_1 = \sin \theta_2 \quad (2)$$

设在介质 n 中坐标参量为 (r_1, α_1) 的傍轴光线 EB ,通过介质球面后,其折射光线为 BK ,坐标参量为 (r_2, α_2) ,光线 EB 在介质球面上的入射角为 θ_1' ,折射角为 θ_2' . 根据图中的几何关系,并且利用 $\angle ABD \approx \theta_1$ 、 $\angle ABC \approx \theta_2$,认为 α_1 和 α_2 很小,可得

$$r_2 = \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} r_1 \quad (3)$$

再利用折射定律和近似关系 $\theta_1 \approx \theta_1'$, $\theta_2 \approx \theta_2'$,可得

$$\alpha_2 = \frac{n \cos \theta_1}{\cos \theta_2} \alpha_1 + \left(\frac{1}{R \cos \theta_1} - \frac{n}{R \cos \theta_2} \right) r_1 \quad (4)$$

若将式(3)、(4)组合在一起写成如下矩阵形式

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ \alpha_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} & 0 \\ \frac{1}{R \cos \theta_1} - \frac{n}{R \cos \theta_2} & \frac{n \cos \theta_1}{\cos \theta_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ \alpha_1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

并定义

$$T_{2 \times 2} = \begin{pmatrix} \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} & 0 \\ \frac{1}{R \cos \theta_1} - \frac{n}{R \cos \theta_2} & \frac{n \cos \theta_1}{\cos \theta_2} \end{pmatrix} \quad (6)$$

则矩阵 $T_{2 \times 2}$ 即为介质球面子午面内的折射矩阵.

今若介质球面两侧折射率发生变化,即图 2 中左边介质折射率变为 $n + \Delta n$,右边介质折射率变为 $1 + \Delta n_A$,则傍轴光线 EB 经介质球面折射后的光线变为 BK' ,其坐标参量为 (r_2', α_2') ,光线 EB 在介质球面上的折射角变为 θ_2'' . 仍然采用上面的方法进行推导,并扩展为 3×3 阶的光学变换矩阵^[5]形式,可得

$$\begin{pmatrix} r_2' \\ \alpha_2' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} & 0 & 0 \\ \frac{1}{R \cos \theta_1} - \frac{n}{R \cos \theta_2} & \frac{n \cos \theta_1}{\cos \theta_2} & \frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_2} \Delta n - \frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2} \Delta n_A \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ \alpha_1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

令

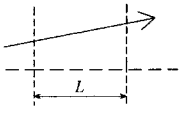
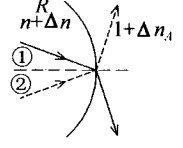
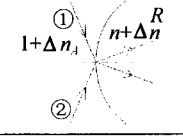
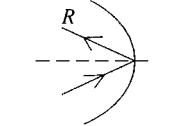
$$T_{3 \times 3} = \begin{pmatrix} \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} & 0 & 0 \\ \frac{1}{R \cos \theta_1} - \frac{n}{R \cos \theta_2} & \frac{n \cos \theta_1}{\cos \theta_2} & \frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_2} \Delta n - \frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_2} \Delta n_A \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

则矩阵 $T_{3 \times 3}$ 为折射率变化后介质球面的折射矩阵.

对于图 1 的 TRPRL 中所使用的光学元件,在折射率变化时子午面和弧矢面内的变换矩阵分别进行了计算,所得变换矩阵的具体形式列于表 1. 在该表中,编号 1 为光线在均匀介质中传播 L 距离时的变换矩阵;编号 2、编号 3 为光线①、光线②以布儒斯特角分别入射凹球面和凸球面时的折射

矩阵,其中,折射矩阵中的“±”选取规则是:当以光线①方向入射时,取“+”,当以光线②方向入射时,取“-”;编号 4 为光线以 45° 角入射凹球面时的反射矩阵. 由该表可以看出,光路中光学元件介质折射率变化时,其子午面内光线的变换矩阵发生了变化,而弧矢面内光线的变换矩阵不变.

表 1 介质折射率变化时的光线变换矩阵

编号	图形	子午面	弧矢面
1		$\begin{pmatrix} 1 & L & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & L & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
2		$\begin{pmatrix} \frac{1}{n} & 0 & 0 \\ -\frac{(n^2-1)\sqrt{n^2+1}}{nR} & n^2 \pm (n\Delta n_A - \Delta n) & \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -\frac{(n^2-1)}{R\sqrt{n^2+1}} & n & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
3		$\begin{pmatrix} n & 0 & 0 \\ \frac{(n^2-1)\sqrt{n^2+1}}{n^2 R} & \frac{1}{n^2} \pm \left[\frac{\Delta n}{n^2} - \frac{\Delta n_A}{n} \right] & \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{(n^2-1)}{nR\sqrt{n^2+1}} & \frac{1}{n} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
4		$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ -\frac{2\sqrt{2}}{R} & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{R} & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

3 折射率变化时谐振腔内光路的偏转模型

利用光学元件的光线变换矩阵概念,根据 TRPRL 谐振腔中光线传播的自洽特性,建立光路偏转模型.

当傍轴光线按 1, 2, ..., m 的顺序传过 TRPRL 谐振腔光路中 m 个介质折射率变化的光学元件时,其总的光线变换矩阵 T 等于各个元件的变换矩阵 T_j (j=1, 2, ..., m) 按与穿过顺序相反的次序相乘,即 T = T_mT_{m-1}...T₁.

令谐振腔光路中光学元件介质折射率变化前谐振腔的光轴为 z 轴(初始光轴),方向沿逆(顺)时针方向.由于折射率变化,一傍轴光线以初始坐标 (r₀, α₀) 从腔内任意位置出发,沿逆(顺)时针方向运转一周后,若能返回出发点,且其坐标 (r, α) 满足 r = r₀, α = α₀,则该傍轴光线在腔内的运行轨迹,即为 TRPRL 中光学元件的介质折射率变化后的新光轴.将该傍轴光线所经过光学元件的变换矩阵 T_{3×3} 按相反次序相乘,可以得到介质折射率变化后谐振腔总的光线变换矩阵 T. 显然, (r₀, α₀, 1)^T 即为总光线变换矩阵 T 的特征值为 1 的特征向量(行

向量右上角的“T”表示对该向量取转置运算).

由上面的推导可以看出,当谐振腔光路中光学元件的介质折射率变化时,谐振腔的光路将发生改变.因此,谐振腔的光轴相对于 z 轴的位置发生偏转.在上述出发点位置处,新光轴相对于 z 轴的位置坐标为 (r₀, α₀).

4 温度变化导致 TRPRL 光路的偏转

根据表 1 给出的光学元件的变换矩阵,利用式 (1) 及折射率变化时谐振腔的光路偏转模型,讨论温度变化对 TRPRL 光路的偏转影响.为使结论更加明确,将结合 TRPRL 的某一结构参量进行.

按图 1 的 TRPRL,沿谐振腔光轴的几何参量如表 2.若介质折射率没有变化,沿逆时针方向的光轴为 TRPRL 的 z 轴方向,则可计算出温度升高 10℃ 时,光路中各 TRP 不同编号处新光轴相对于初始光轴的位置坐标,计算结果如表 3.

根据表 3 给出的计算数据,可以绘出温度升高

表 2 TRPRL 谐振腔的几何参量表 单位:mm

光学腔长	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄	h ₁	h ₂	R
282.5	55.0	11.8	50.0	59.0	7.1	4.7	1000

表 3 温度升高 10℃ 时,各 TRP 不同编号处新光轴相对于初始光轴位置坐标

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
r/μm	0.4	0.6	0.2	0	0	10.1	14.7	15.1	-15.3	-10.5
α/10 ⁻⁴	0	-0.5	-0.5	0.5	2	2	0.5	0.5	-0.5	0
编号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
r/μm	-10.5	-15.3	-15.1	14.7	10.1	0	0	-0.2	0.6	0.4
α/10 ⁻⁴	0	0.5	0.5	-0.5	-2	-2	-0.5	-0.5	0.5	0

后 TRPRL 的光路,如图 3.图中,实线为初始光轴,虚线为新光轴.由图 3 及表 3 可见,温度升高后,序

号 4、5 和序号 16、17 处的光路不发生变化;序号 1 与序号 20 之间、序号 10 与序号 11 之间的光路向上

平移,但前者平移量很小;其它位置的光路均发生较大偏转.

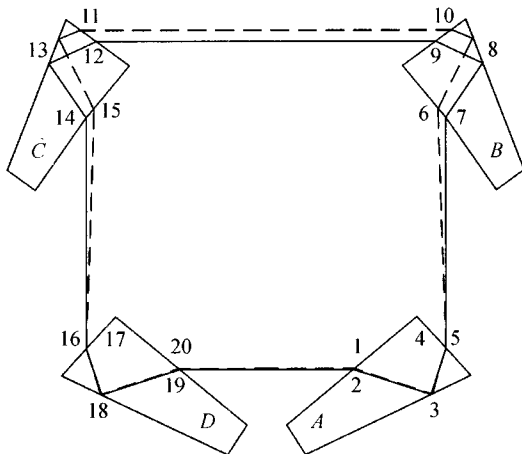


图3 外界温度升高时,TRPRL光路的偏转
Fig. 3 Sketch map of deflection of path in the TRPRL when the outside temperature increasing

根据上面的计算结果可以看出,由于温度变化,将引起 TRPRL 光路发生偏转,严重地影响了 TRPRL 的工作性能. 因此,为使 TRPRL 在温度变化时仍能稳定工作,应将增益介质充入光路变化较小处(序号 1 与序号 20 之间)的毛细管内;应合理设计 TRPRL 的结构,保证在温度变化范围内激光工作模式的特性不受影响.

由上面的计算结果还可以看出,由于序号 1~5、序号 16~20、序号 1 和序号 20 之间的毛细管内光路变化很小,所以根据实际应用的需要,可在这些位置安装各种光学元件.

5 结论

本文推导了介质折射率变化时光学元件的 3×3 阶变换矩阵,根据矩阵光学理论,建立了 TRPRL 内介质折射率改变时光路的偏转模型. 研究了 TRPRL 光路随温度的变化规律,并由此得到如下结论:① TRPRL 光路中光学元件的介质折射率因温度变化时,谐振腔内子午光线光路发生偏转,

弧矢光线光路偏转可以忽略;②设计 TRPRL 时,应在光路变化较小的序号 1 与序号 20 之间的毛细管内充入增益介质;其结构应保证在温度变化范围内激光工作模式的特性不受影响;③序号 4、5 和序号 16、17 处光路不发生变化;④在 TRPRL 的实际应用中,可在光路变化较小的序号 1~5、序号 16~20、序号 1 和序号 20 之间的毛细管内安装光学元件.

参考文献

- 1 赵东洋,石顺祥,蒋军彪,等. 全反射棱镜式环形激光器耦合输出的理论分析. 光子学报,2005,34(5):652~655
Zhao D Y, Shi S X, Jiang J B, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(5):652~655
- 2 姚合宝,韩宗虎,陈林峰,等. 抖动偏频激光陀螺速率阈值特性研究. 光子学报,2001,30(9):1085~1086
Yao H B, Han Z H, Chen L F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(9):1085~1086
- 3 赵东洋,石顺祥,李家立. 一种控制环形激光器光学腔长的新方法. 光子学报,2006,35(10):1445~1448
Zhao D Y, Shi S X, Li J L. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(10):1445~1448
- 4 马有年,袁晓东. 激光陀螺(LG)的稳频装置. 中国惯性技术学报,1994,2(4):50~52
Ma Y N, Yuan X D. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 1994, 2(4):50~52
- 5 卢亚雄,吕百达. 矩阵光学. 大连:大连理工大学出版社,1989. 82~94,306~316
Lu Y X, Lü B D. Dalian: Dalian University of Technology, 1989. 82~94,306~316
- 6 周炳琨,高以智,陈倜嵘,等. 激光原理. 北京:国防工业出版社,2000. 32~35
Zhou B K, Gao Y Z, Chen T R, et al. Beijing: National Defence Industry Press, 2000. 32~35
- 7 北京玻璃研究所技术情报组译. 红外光学材料手册. 天津:国外红外与激光技术编辑组出版,1973. 164
Translated by Technological Information Group of Beijing Glass institute, Tianjun: published by the editorial Group of foreign infrared and laser technology, 1973. 164

Temperature effect of Ring Laser with Total Reflection Prisms

Zhao Dongyang^{1,2}, Shi Shunxiang¹, Li Jiali¹

¹ Xidian Univ., Xi'an 710071

² Huazhong Institute of Electro-Optics, Wuhan 430074

Received date: 2005-07-22

Abstract Based on the theory of matrix optics, temperature effect of Ring Laser with the Total Reflection Prisms (TRPRL) is studied. A 3×3 transformation matrix of optic system with the variation of refractive index is investigated theoretically. A deflection model of ray in resonator for the variation of refractive index is established. The regular pattern of deflection in the TRPRL caused by temperature shift is discussed. The method of reducing the influence of temperature effect is studied. These conclusions have important purposes in design and application of the TRPRL.

Keywords Ring laser; Total reflection prisms; Deflection of ray; Temperature effect



Zhao Dongyang was born in 1979. He studied for master in Xi'dian Electronics University in 2002~2005, and majored in physical electronics. He mainly engaged in the research of laser gyro. And now he is working in Huazhong Institute of Electro-Optics.