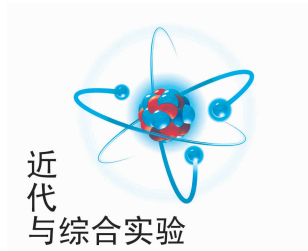


文章编号:1005-4642(2023)01-0010-07



光学驻波腔实验系统的设计与实现

李林帆,王 菁,李雨阳,周宇奇,牛宇钊,周海涛

(山西大学 物理电子工程学院,山西 太原 030006)

摘 要:以实现腔单模运转为目的,设计了腔长连续可调的光学驻波腔实验系统. 为帮助学生更好地理解纵模共振机制和横模模式匹配方法,掌握驻波腔调节的过程,系统采用开放式设计. 通过测量驻波由共焦腔变为近共心腔条件下的腔透射谱,探究分析了驻波腔自由光谱区、腔模线宽和精细度等参量随腔长的变化规律,并分析了腔镜的透射损耗对实验结果的影响.

关键词:光学驻波腔;法布里-珀罗干涉;本征模;模式匹配

中图分类号:O436.1

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2023.01.002

基于法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)干涉原理^[1]的光学驻波腔,可以使注入腔内的相干激光往复传播而发生共振增强. 目前,光学驻波腔已被广泛应用于现代光学的诸多领域,例如在激光光学中应用于激光器的设计^[2-4]、激光模式分析和稳频^[5-6],在量子通讯中应用于激光倍频、参量下转换等非经典光场的制备^[7-9]和光学精密测量^[10],在腔量子电动力学中应用于光与物质的强耦合作用^[11-13],等等.

根据谐振腔理论可知,腔内光场的本征模由麦克斯韦方程组和腔的边界条件决定. 因此,不同结构和类型的谐振腔,其本征模式也各不相同. 按共振频率区分称为纵模,按传播方向及光强分布区分称为横模. 驻波腔的调节涵盖了光的干涉、腰斑变换和模式匹配等物理知识,是综合程度高、动手能力强、具有较强应用和拓展性的实验,因此,掌握驻波腔的工作原理及调节技术非常重要. 而现有的绝大多数涉及谐振腔的仪器,例如激光器、模清洁器等都是封闭式设计,还没有针对大学本科生或相关技术人员系统学习和训练的开放式驻波腔实验设备. 因而开发适合高年级本科生或低年级研究生学习和训练的光学谐振腔调节系统尤为必要.

本文以对称驻波腔为研究对象,结合 F-P 干

涉仪及模式匹配等理论,以实现驻波腔单模运转为目的,设计了腔长连续可调的开放式光学驻波腔实验系统. 利用该系统不但可以使学生掌握驻波腔调节的全部过程,而且通过调节腔长,学生还可以观察分析腔透射谱随腔长的变化,加深对光学谐振腔工作原理及腔调节技术的认识和理解,为进一步开展有关光学谐振腔的科学研究及应用实践打下坚实的基础.

1 理论基础

2 个平行放置的反射镜可组成结构简单的驻波腔,根据反射镜的曲率不同,可分为平面腔、平凹腔和凹面腔. 如果 2 个球面凹面镜的焦点重合,为共焦腔;如果 2 个球面凹面镜的球心重合,为共心腔;如果 2 个球面凹面镜的曲率半径相同,为对称驻波腔. 球面的曲率半径和间距(腔长)是驻波腔的重要参量,能够决定腔内光场的本征模^[14]. 本文以 2 个球面凹面反射镜组成的驻波腔为研究对象,分析驻波腔的工作原理及特点.

1.1 驻波腔纵模共振原理

当光射向驻波腔时,无论是共焦腔还是共心腔,其腔透射和反射都遵从 F-P 干涉原理,即多光束干涉叠加的结果. 以平面平行腔为例分析驻波腔干涉特点,如图 1 所示.

收稿日期:2022-08-03;**修改日期:**2022-09-09

基金项目:山西省自然科学基金项目(No. 20210302123437);山西省高校科技创新项目(No. J2019037)

作者简介:李林帆(1998—),女,山西吕梁人,山西大学物理电子工程学院 2020 级硕士研究生,研究方向为腔量子电动力学. E-mail:781101224@qq.com

通信作者:周海涛(1980—),男,山西阳泉人,山西大学物理电子工程学院教授,博士,研究方向为光与原子相互作用与腔量子电动力学. E-mail:zht007@sxu.edu.cn

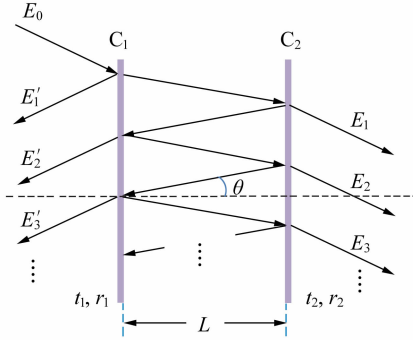


图 1 F-P 腔干涉示意图

频率为 ν_0 、振幅为 E_0 的相干光入射至由平面镜 C_1 和 C_2 组成的平面平行腔中(腔长为 L)，射入腔内的光经过一系列反射后(忽略腔镜的吸收损耗)，利用多光束干涉原理^[5]，可推导出腔的归一化透射和反射函数，分别为

$$S_T = \frac{I_T}{I_0} = \frac{(1-r)^2}{(1-r)^2 + 4r\sin^2(\delta/2)}, \quad (1)$$

$$S_R = \frac{I_R}{I_0} = \frac{4r\sin^2(\delta/2)}{(1-r)^2 + 4r\sin^2(\delta/2)}, \quad (2)$$

其中, I_0 , I_T 和 I_R 分别为入射光强、腔透射光强和反射光强; r 为腔镜总的反射率; δ 为相邻 2 个分振幅之间的相位差。当光波波面垂直于腔光轴时(或在傍轴条件下, 即 $\theta \approx 0$)，有

$$\delta = \frac{4\pi\nu_0 L}{c}. \quad (3)$$

根据光的干涉原理可知, 光在驻波腔内干涉相长的条件是腔长满足入射光半波长的整数倍, 即 $L = q\lambda_0/2$, 其中 $\lambda_0 = c/\nu_0$ 为入射光的波长, q 为腔的纵模序数(光在腔内沿腔轴向形成的驻波节数)。根据式(1)和式(2), 计算 $r = 0.98$ 时, 腔的归一化透射强度和反射强度随相位差的变化, 如图 2 所示。可以发现: 当 $\delta \neq 2q\pi$ 时, 没有谐振产生, 入射腔的光能量几乎全部被反射; 当 $\delta = 2q\pi$ 时, 入射驻波腔的能量全部被透射。

图 2 中, 腔的相邻 2 个透(反)射峰(纵模)之间的频率间隔称为光学腔的自由光谱区(Free spectral range, FSR), 其大小为

$$\Delta_{\text{FSR}} = \nu_q - \nu_{q-1} = \frac{c}{2L}, \quad (4)$$

其中, $\nu_q = \frac{qc}{2L}$ 为驻波腔的谐振频率。若将图 2 中的横坐标转换为频率, 则式(1)中的 δ 可用 $\Delta/\Delta_{\text{FSR}}$ 替代, $\Delta = \nu_0 - \nu_q$ 代表入射光频率相对驻波腔谐振

频率的失谐。单个透射腔模的峰值强度降到极大值的一半时, 两边的频率间隔称为腔模线宽, 用 $\Delta\nu_c$ 表示。若只考虑腔镜的透射损耗, $\Delta\nu_c$ 表示为

$$\Delta\nu_c = \frac{tc}{4\pi L}, \quad (5)$$

其中, t 为腔镜总的透射率。而腔的自由光谱区与腔模线宽的比值称为腔精细度 F , 用于度量驻波腔的损耗大小及腔分辨本领的量, 表示为

$$F = \frac{\Delta_{\text{FSR}}}{\Delta\nu_c} = \frac{2\pi}{t}. \quad (6)$$

由式(4)~式(6)可知, 当 L 一定时, 腔镜的透射率决定腔的线宽及精细度。图 3 所示为腔的线宽和精细度随腔总反射率的变化趋势($L = 50 \text{ mm}$)，可以看出: 反射率越大, 腔的线宽越窄, 其精细度越高, 即光分辨本领越大, 反映腔的品质因数越高。另外, 高精度的驻波腔在压窄激光线宽的同时也起到滤噪的作用, 因此也被称为模清洁剂。

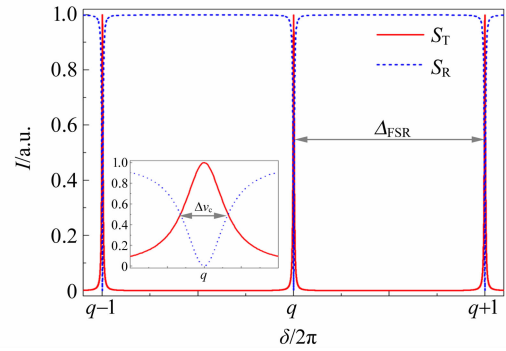


图 2 归一化腔透射强度和反射强度随相位差的变化

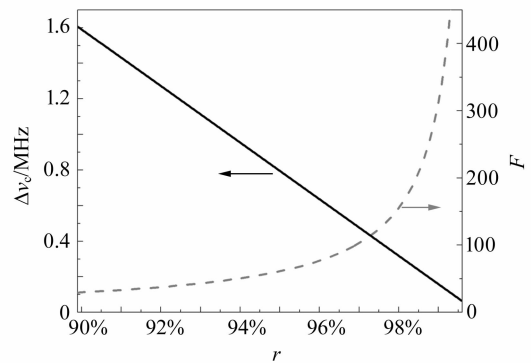


图 3 腔的线宽与精细度随腔总反射率的变化

1.2 驻波腔横模模式匹配

垂直于腔轴横截面内的稳定光场分布被称为谐振腔的横模, 用 TEM_{mn} 表示, 其中 TEM 表示纵向电场(z 轴)为 0 的横向电磁波, 且 $m, n \geq 0$ 称

为横模序数,分别表示光场在腔横截面上沿 x 轴和 y 轴的节线数. 光场满足稳定场分布的条件为在腔内往返传播 1 次时能实现自再现,所以腔的本征横模也称为自再现模. 根据菲涅耳-基尔霍夫衍射积分理论^[14]可知,不同形状的球面镜会导致不同的高阶横模模式. 例如,方形球面镜产生厄密特-高斯模,圆形球面镜产生拉盖尔-高斯模. 但无论哪种球面镜,其基模($m=n=0$)均呈现圆形的高斯函数分布,也称作基模高斯光,用 TEM_{00} 表示. 下面重点讨论驻波腔下,基模高斯光束的模式匹配.

如图 4 所示,假设驻波腔腔镜的光轴沿 z 轴方向,由于高斯光束在空间呈双曲线型传播,必然存在 1 个光斑极小值点,称为高斯光束的腰斑位置,其半径(径向方向上由轴心到电场下降到总电场的 $1/e$ 处的间隔)称为腰斑半径,用 w_0 表示,而其沿轴向传输至任意一点 z 处的半径(有效束宽)用 w_z 表示. 在自由空间下,二者满足

$$w_z^2 = w_0^2 \left[1 + \left(\frac{z\lambda_0}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

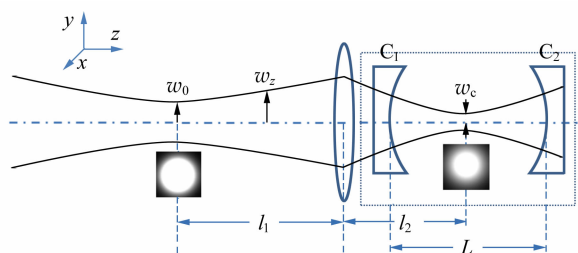


图 4 模式匹配光路示意图

当 $z=0$ 时, $w_z = w_0$. 对于由 2 块平凹腔镜 C_1 和 C_2 组成的驻波腔(见图 4),其本征腰斑半径用 w_c 表示. 在满足腔的稳定性条件下, w_c 的大小为

$$w_c = \left(\frac{\lambda_0}{\pi} \right)^{1/2} \left[\frac{L(\rho_1 - L)(\rho_2 - L)(\rho_1 + \rho_2 - L)}{(\rho_1 + \rho_2 - 2L)^2} \right]^{1/4}, \quad (8)$$

其中, ρ_1 和 ρ_2 分别表示 C_1 和 C_2 的曲率半径. 当 $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ 时,构成对称驻波腔,而腰斑刚好处于腔中心. 当腔长 $L = \rho$ 时,驻波腔为对称共焦腔;当 $L = 2\rho$ 时,则为对称共心腔. 实验上通常利用焦距为 f 的凸透镜(或透镜组),在有限距离内把自由空间下高斯光束的腰斑 w_0 刚好变换至与驻波腔的本征腰斑 w_c 相同. 根据高斯光束在自由空间的传播规律及薄透镜在傍轴条件下的变换矩

阵,可推得 w_0 , w_c 和 f 三者之间的距离关系为

$$w_c^2 = \frac{f^2 w_0^2}{(f - l_1)^2 + (\pi w_0^2 / \lambda_0)^2}, \quad (9)$$

$$l_2 = f + \frac{(l_1 - f)f^2}{(l_1 - f)^2 + (\pi w_0^2 / \lambda_0)^2}, \quad (10)$$

其中, l_1 和 l_2 分别为透镜距 w_0 和 w_c 的距离. 利用式(8)模拟对称驻波腔条件下 w_c 随 L 的变化趋势,如图 5 所示. 实验中参量设置为: $\rho = 50$ mm, $f = 150$ mm, $\lambda_0 = 852.3$ nm. 在腔镜曲率半径固定的条件下,当 $L = \rho$ 时,腔本征腰斑 w_c 最大,且其大小随腔长变化不敏感;而当 L 逐渐接近 2ρ (近共心)时, w_c 逐渐变小且随腔长变化非常敏感. 利用式(9)~式(10),模拟匹配透镜(f 不变)距 w_0 和 w_c 的距离随 L 的变化趋势,如图 6 所示. 在共焦腔附近时,随 L 增大,透镜位置变化不明显;当接近近共心腔时,随着 L 增大, l_1 显著增加, l_2 呈减小趋势,但 $l = l_1 + l_2$ 有增大趋势.

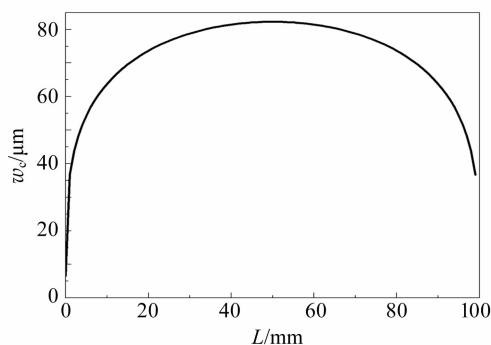


图 5 对称驻波腔时 w_c 随 L 的变化趋势

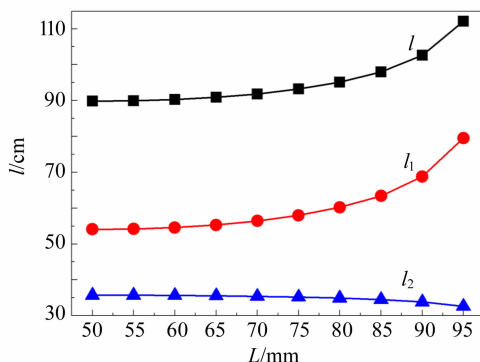


图 6 l_1 , l_2 和 l 随 L 的变化趋势

2 实验过程及结果分析

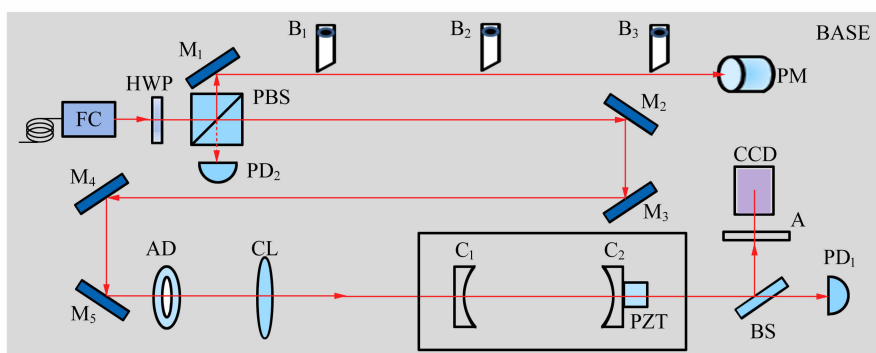
基于 F-P 腔干涉理论及腰斑模式匹配方法,设计并制作了腔长可调的驻波腔实验系统. 系统

的设计在保证其工作稳定性基础上,以锻炼学生的动手能力为目标.下面从系统设计、操作步骤和结果分析 3 个方面进行介绍.

2.1 系统设计

系统的光路部分采用开放式集成化设计,所有光学器件固定于带有等间距螺孔的铝板底座上.实验装置示意图如图 7 所示.实验采用中心波长为 852 nm 的光栅反馈半导体激光器(最大输出功率为 50 mW,自由运转线宽为 500 kHz,图中未展示激光器),激光器输出的光经光纤整形

后,通过光纤耦合头 FC 输出,然后经半波片 HWP 后被偏振分光棱镜 PBS 分成 2 束:反射的光用于测量入射光的腰斑大小及位置;透射的光经 4 个平面反射镜 $M_2 \sim M_5$ 后入射到驻波腔中.在反射镜 M_5 和驻波腔之间放置可调光阑 AD 和匹配透镜 CL.经驻波腔透射的光被反射率为 10% 的分束镜 BS 分成 2 束:透射光被光电探测器 PD_1 探测,测量腔透射信号;反射光经衰减片 A 后进入 CCD 摄像头,用于监视腔透射信号的光斑模式.



FC. 光纤耦合头 $M_1 \sim M_5$. 45° 平面反射镜 $B_1 \sim B_5$. 刀片挡光器 PM. 功率计探头 HWP. 半波片 PBS. 偏振分光棱镜 AD. 可调光阑 CL. 平凸透镜 ($f=150$ mm) $C_1 \sim C_2$. 平面腔镜 ($\rho_1 = \rho_2 = 50$ mm) PZT. 压电陶瓷 BS. 分束棱镜 $PD_1 \sim PD_2$. 光电探测器 A. 衰减片 CCD. 监视摄像头 BASE. 平台底座

图 7 驻波腔实验系统示意图

驻波腔由 2 个曲率半径相同的平凹腔镜 C_1 和 C_2 组成, C_1 作为输入镜, C_2 作为输出镜并固定在压电陶瓷 PZT 上, PZT 用于扫描和锁定驻波腔的共振频率. 为了实现腔长连续可调, 将 C_1 和 C_2 通过 3 根钢质圆轴相连, 并固定于铝制腔底座上, 如图 8 所示. 这样既可以保证腔整体的稳定性, 又可以在改变腔长时, 保证腔本征腰斑与 CL 的距离满足匹配条件. 为了避免空气扰动对腔的影响, 驻波腔整体罩于有机玻璃外壳中.

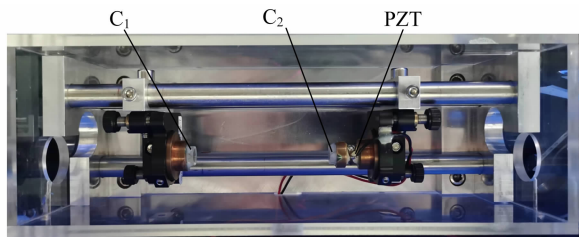


图 8 驻波腔实物图

2.2 操作步骤

为实现不同腔长下驻波腔的单横模运转, 驻

波腔系统的实验过程流程如图 9 所示.

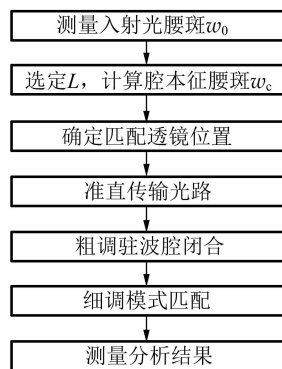


图 9 实验过程流程图

系统的操作步骤为:

1) 测量入射光的腰斑 w_0 , 经 FC 输出的入射激光可看作圆形基模高斯光束, 实验中可利用“刀片法”测量其腰斑 w_0 的大小和位置: 以 M_1 的位置为原点, 在其反射光线的末端, 利用功率计 PM 测量无任何遮挡时反射光的总功率 P_0 ; 然后利用刀片挡光器 $B_1 \sim B_5$ 等间隔测量 3 点处的束宽和

距 M_1 的距离;再利用式(7)计算求解. 实验中为了减小激光功率不稳定及人为因素,可以采用多次测量求平均值的方法减小误差.

2)选定 L , 计算驻波腔本征腰斑 w_c . 以 $L=50\text{ mm}$ 为例,由式(9)可知,腔本征腰斑 w_c 大小取决于腔镜的曲率半径、腔长及入射光波长. 本实验系统中,入射光波长 $\lambda_0=852.3\text{ nm}$,驻波腔为对称驻波腔,且 $\rho_1=\rho_2=\rho=50\text{ mm}$,因此 w_c 仅与腔长 L 有关,且其位置刚好处于驻波腔中心.

3)确定匹配透镜位置. 根据实验系统的空间大小及腔镜参量,匹配透镜 CL 的焦距设置为 $f=150\text{ mm}$. 利用式(10),结合步骤 1)和 2)计算测得的数据,可以确定透镜分别距离 w_0 和 w_c 的距离 l_1 和 l_2 .

4)准直传输光路. 整个系统的光路要求“横平竖直”,这主要由 4 个平面反射镜 $M_2\sim M_5$ 来实现. 根据步骤 3)确定 CL 的位置. CL 为平凸透镜,且安装在一维平移台上,使 CL 可以沿光的传播方向做微小平移. 实验中利用光阑 AD 辅助调节 CL 的光轴与入射光重合.

5)粗调驻波腔闭合. 将穿过 CL 的准直光束作为参考光,将驻波腔底座固定在合适位置,使其满足:a. C_1 和 C_2 沿圆轨在腔底座上滑动时,入射光始终照射在腔镜的中心;b. 腔长 L 由共焦连续变化至近共心时,腔本征腰斑中心与 CL 之间的距离 l_2 刚好满足模式匹配条件. 首次安装驻波腔腔镜时,可按照“先输出镜,后输入镜”的顺序放置,并且借助 AD 调节 C_1 和 C_2 ,使其反射的光斑中心恰好处于 AD 的中心,使得 C_1 和 C_2 的光轴与入射光基本重合.

6)细调模式匹配. 利用信号发生器输出频率约几十 Hz 的三角波信号,通过带增益放大的高压放大器(型号为 YG2013A-500V)放大后加载至 C_2 的 PZT 上,用于扫描腔长. 此时用示波器监测 PD_1 探测的信号,会看到很多腔透射峰输出,说明模式还没完全匹配,需进一步细调:a. 微调 C_1 和 C_2 ,使腔透射峰中只有 1 个主峰的强度明显增加,而其他小峰被显著抑制,直至消失;若微调腔镜至最佳状态后依然还有小模,则可以沿光轴前后微调 CL 的位置,使小模继续减小至消失,这时腔达到单模运转状态. b. 调节高压放大器偏压和增益输出在 $(300\pm 25)\text{ V}$,保证 PZT 在三角波扫描 1 个上升沿(下降沿)范围内,腔透射

谱覆盖 2 个自由光谱区.

7)测量分析结果. 分别利用光电探测器 PD_1 和 PD_2 测量腔的透射信号和反射信号,并记录数据. 利用 Origin 软件对数据进行处理:分析腔的自由光谱区、腔的线宽及精细度等实验参量,并与理论值进行比较. 若将高压放大器的增益降为 0,并调节直流偏压至腔长刚好处于单模共振位置时,通过 CCD 可观察到腔透射信号呈现的光斑样式是理想的圆形 TEM_{00} 模.

改变腔长 L 的大小,重复步骤 2)~7),完成腔的调节和数据测量.

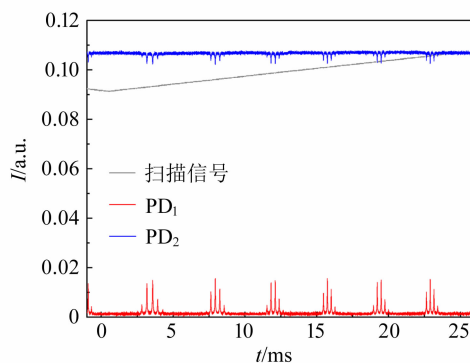
2.3 测量结果及分析

通过步骤 1)测得入射光经 FC 输出的腰斑为 $w_0\approx 248.3\text{ }\mu\text{m}$,距 M_1 的距离为 $z_0=24.7\text{ cm}$. 利用式(9)和式(10),计算 5 个腔长下的本征腰斑 w_c ,以及 CL 分别距 w_0 和 w_c 的距离 l_1 和 l_2 ,如表 1 所示.

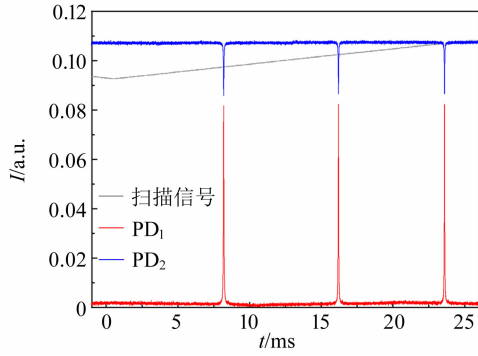
表 1 不同腔长对应的测量结果

L/mm	$w_c/\mu\text{m}$	l_1/cm	l_2/cm
50	82.3	54.1	35.7
60	81.5	54.6	35.6
70	78.8	56.4	35.4
80	73.6	60.2	34.9
90	63.8	66.8	33.8

根据表 1 数据,首先选择共焦腔($L=50\text{ mm}$)进行调节,并测量不同状态下的腔透射谱,如图 10 所示. 固定光频率 ν_0 不变,通过改变腔长 L 来改变相位差. 图 10 中的灰色曲线为三角波扫描信号,红色曲线为 PD_1 探测的腔透射信号,蓝色曲线为 PD_2 探测的腔反射信号.



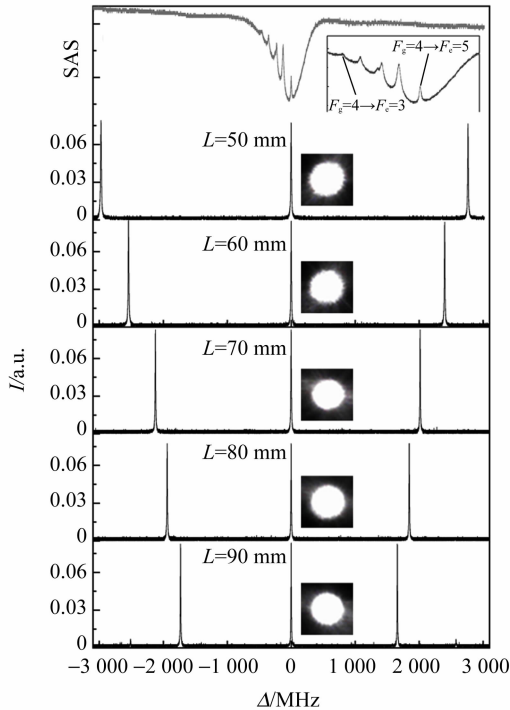
(a)粗调腔闭合



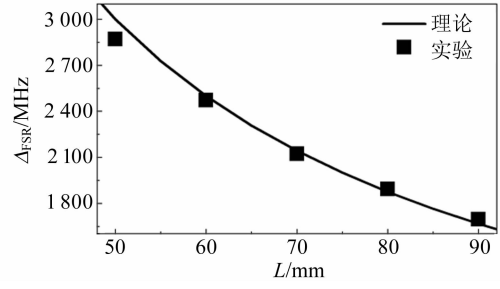
(b) 细调模式匹配

图 10 实验测量驻波共焦腔不同状态下的透射谱和反射谱

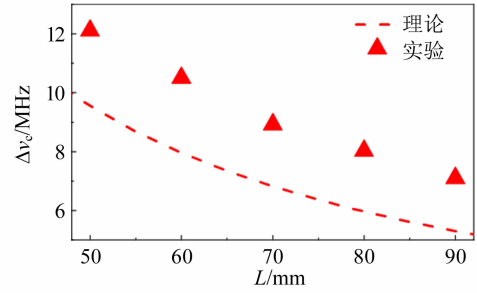
根据步骤 5) 粗调腔闭合后, 腔已有共振峰输出, 如图 10(a) 所示, 但此时腔模还未完全匹配, 所以激发出很多杂模; 在此基础上, 通过步骤 6) 细调模式匹配, 最终可实现腔的单模运转, 如图 10(b) 所示. 从图 10(b) 中蓝色曲线看到, 当在单模共振时腔反射峰没达到 0, 这是由于腔镜参量不满足阻抗匹配所致, 即在共振条件下, 入射光能量并没有完全耦合至驻波腔中. 根据表 1 数据, 调节并比较了不同腔长下, 腔透射谱的变化, 如图 11(a) 所示.



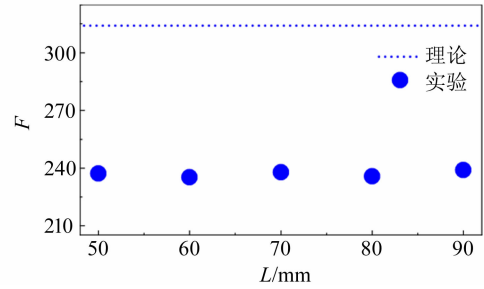
(a) 不同腔长下的腔透射谱



(b) 自由光谱区随腔长的变化



(c) 腔模线宽随腔长的变化



(d) 腔精细度随腔长的变化

图 11 实验测量

与图 10 不同的是, 在每改变 1 次腔长时, 通过固定腔长 L 和扫描入射光频率 ν_0 来改变相位差. 由于入射光中心频率刚好激发碱金属 ^{133}Cs 原子的 D_2 线跃迁, 因此利用饱和吸收光谱 (Saturated absorption spectroscopy, SAS) 技术来鉴别不同腔长下透射谱的变化^[15-16], 详细说明可参阅文献[15]. 图 11(a) 中的灰色曲线显示的是 Cs 原子基态 $F_g=4$ 对应的饱和吸收光谱, 共有 6 个饱和吸收峰. 假定原子能级跃迁 $F_g=4 \rightarrow F_e=5$ 为共振中心, 其跃迁频率为 ν_{45} , 定义入射光的频率失谐为 $\Delta = \nu_0 - \nu_{45}$, 则根据饱和吸收光谱之间的频率间隔, 可以将透射光谱的横坐标转化为频率.

从图 11(a) 可以看出, 当 L 由共焦腔变换至近共心腔时, 驻波腔均实现了单横模运转, 且 Δ_{FSR}

随 L 增加而减小. 图 11(b) 中黑色方块表示 Δ_{FSR} 的实验测量值, 与式(4)的理论值基本吻合. 腔模线宽 $\Delta\nu_c$ 和精细度 F 随 L 的变化趋势与理论一致, 只是 $\Delta\nu_c$ 的实验值整体高于理论值, 见图 11(c); 而腔精细度 F 基本保持在 237 左右, 低于理论值 314, 见图 11(d). 误差主要来自腔镜的透射损耗: C_1 和 C_2 的透射率出厂标定为 $t_1 = t_2 = 1.0\% \pm 0.2\%$, $\lambda = 800 \sim 900 \text{ nm}$, 理论计算是按腔总的透射率 $t = 2.0\%$ 计算, 若只考虑透射损耗, 则根据式(6)可推算出该腔镜的实测透射率为 $t_1 = t_2 \approx 1.4\%$, $\lambda = 852 \text{ nm}$. 当高压放大器增益降为 0, 且调节 PZT 偏压和激光器频率 ν_0 至腔共振增强处时, 通过 CCD 监测到腔透射信号的光斑为明显的 TEM_{00} 模, 如图 11(a) 插图所示, 证实了该驻波腔由共焦腔变换至近共心腔过程中, 均实现了单横模运转. 另外在不同腔长下, 通过连续调谐激光器频率在 30 GHz 范围内无跳模, 驻波腔均能保持稳定的单横模运转输出.

3 结束语

以增强学生实践动手能力及科学创新能力为出发点, 设计了适合物理学类及光电信息类专业学生学习和实验训练的开放式光学驻波腔实验系统. 在利用该系统搭建光路、调节驻波腔的实验过程中, 学生可以深刻认识 F-P 腔的物理原理、光学谐振腔模式匹配的基本理论. 通过对驻波腔由共焦腔变换至近共心腔的单模调节及腔透射信号的测量分析, 学生还可以进一步熟练掌握光学谐振腔的工作特点. 该系统具有驻波腔模块可以重复拆解安装的优点, 能够充分锻炼学生搭建和调节光路的能力. 若结合电光调制器及 PID 控制器, 该系统还可拓展为谐振腔锁频及高阶横模光场制备等光学实验项目, 为学生从事有关光学谐振腔方面的科学研究及应用创新提供实践支撑.

参考文献:

- [1] 郭振华. F-P 多光束干涉仪的发明者: 法布里和珀罗[J]. 物理, 2004, 33(4): 293-297.
- [2] 高英豪, 李渊骥, 冯晋霞, 等. 低噪声连续单频 532 nm/1.06 μm 双波长激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 27-33.
- [3] 丁曼曼, 刘琦瑶, 赵永光, 等. 基于腔内选模的全固

态涡旋激光器及手性控制[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 120006.

- [4] 丁爱玲, 王洪福. 激光器光学谐振腔高斯光束的仿真研究[J]. 机械工程与自动化, 2009, 153(2): 53-55.
- [5] 赵健, 翟雨欣, 职佳文, 等. 基于法布里-珀罗腔的激光模式分析[J]. 物理实验, 2022, 42(1): 10-14.
- [6] 石柱, 郭永瑞, 徐敏志, 等. 无源光学谐振腔的设计加工及其在稳频激光器中的应用[J]. 量子光学学报, 2018, 24(2): 237-242.
- [7] Zhang Y, Liu J H, Wu J Z, et al. Single-frequency tunable 447.3 nm laser by frequency doubling of tapered amplified diode laser at cesium D_1 line [J]. Optics Express, 2016, 24(17): 19769-19775.
- [8] 翟泽辉, 郝温静, 刘建丽, 等. 用于光学薛定谔猫态制备的滤波设计与滤波腔腔长测量[J]. 物理学报, 2020, 69(18): 184204.
- [9] 周瑶瑶, 田剑锋, 闫智辉, 等. 两腔级联纠缠增强的理论分析[J]. 物理学报, 2019, 68(6): 064205.
- [10] 焦东东, 高静, 邓雪, 等. 窄线宽激光在光学谐振腔腔长精密测量中的应用[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 011207.
- [11] Yang P F, Xia X W, He H, et al. Realization of nonlinear optical nonreciprocity on a few-photon level based on atoms strongly coupled to an asymmetric cavity [J]. Physical Review Letters, 2019, 123(23): 233604.
- [12] Zhou H T, Xie S Y, Li X, et al. Manipulation of optical nonreciprocity in hot atom-cavity system [J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2021, 54(21): 195001.
- [13] Zhou H T, Che S N, Zuo P C, et al. Observation of intracavity electromagnetically induced transparency in Cs vapor coupled with a standing-wave cavity [J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(8): 081401.
- [14] 周炳琨. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 85-90.
- [15] 孙文博, 张慧云, 郑盟锟, 等. Rb 原子饱和吸收光谱实验教学系统[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(8): 154-161.
- [16] 杜志静, 张玉驰, 王晓勇, 等. 不同波长的激光器通过法布里珀罗腔相对于铯原子谱线的锁定[J]. 光学学报, 2006, 26(3): 452-457.

(下转 27 页)

Design of four-vernier spectrometer and its application in experimental teaching

FAN Daihe^{a,b}, WEI Yun^{a,b}, CHANG Xianghui^{a,b}, LIU Qijun^{a,b}, JIA Xinyan^{a,b}

(a. School of Physical Science and Technology; b. National Demonstration Center for Experimental Physics Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: In order to enrich the teaching content of college physics experiment course based on the spectrometer, a four-vernier spectrometer was designed and manufactured. With the help of division of the dials whose position could be fixed, one pair of verniers was used to accurately measure the rotation angle of the collimator, and the other pair of verniers was used to measure the rotation angle of the telescope. Taking the accurate measurement of the refractive index of the prism as an example, the methods and steps of the four-vernier spectrometer were given in detail. The refractive index of green spectral lines of low-pressure mercury lamp in ZF1 heavy flint glass was measured, that was $n = 1.6544 \pm 0.0007$, and the experimental result was in agreement with the theoretical values.

Key words: spectrometer; four-vernier; refractive index; deflection angle

[责任编辑:郭伟]

(上接 16 页)

Design and implementation of optical standing-wave cavity experimental system

LI Linfan, WANG Jing, LI Yuyang, ZHOU Yuqi, NIU Yufan, ZHOU Haitao

(School of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: An experimental system of standing-wave (SW) cavity with continuously adjustable cavity length was designed, which could realize the single-mode operation of standing-wave cavity. In order to help students easily understand the physical mechanism of longitudinal-mode resonance and the experimental method of transverse-mode mode-matching, the system was designed in an open manner. The length of SW cavity was designed to a continuous adjustment. By measuring the cavity transmission spectrum under the condition that the SW cavity changed from a confocal cavity to a near confocal cavity, the variation rules of parameters such as the free spectral region of the cavity, the linewidth of the cavity mode and the fineness with the cavity length were explored and analyzed, as well as the influence of the transmission loss of the cavity mirror on the experimental results.

Key words: standing-wave cavity; Fabry-Perot interference; eigenmode; mode matching

[责任编辑:任德香]