

## 【其他研究】

谐振腔的限模理论与实验<sup>\*</sup>许芹祖<sup>a</sup>, 李刚<sup>b</sup>, 沈洪斌<sup>b</sup>, 刘秉琦<sup>b</sup>

(军械工程学院 a. 信息管理系; b. 光学与电子工程系, 石家庄 050003)

**摘要:**把光波模式数公式分解成3个因子,给出各因子的物理含义,举例分析了每个因子对腔内模式数的贡献,结果表明:对模式的限制应主要从谐振腔的方向(或空间)上进行考虑。并搭建了LD抽运的固体绿光激光器实验平台,通过实验对谐振腔的限模进行了直观的验证。

**关键词:**光学谐振腔;模式限制;模式选择

**中图分类号:** TN248

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-0707(2010)06-0111-02

激光具有“三好一高”的特点,即方向性好、单色性好、相干性好,能量高。这些特性是激光光波场的宏观反映,激光腔内光波场与光学谐振腔的作用是分不开的。按照经典电磁理论,电磁波遵循麦克斯韦(C. Maxwell)方程组,在自由空间中是一系列单色平面波的叠加,在有边界条件限制的空间(例如一封闭腔)内,只能是特定波矢的单色平面驻波,存在于腔内的驻波叫做光波模式。不同的腔有不同的边界条件,满足这些边界条件的麦克斯韦方程组的解就不同,即存在的光波模式不同,因此,腔与光波模式一一对应。本文中从经典《激光原理》著作<sup>[1]</sup>中闭腔的光波模式数公式出发,分解并整理成3个因子的乘积,给出各因子的物理含义,进而进行数据分析,使得理解开放式光学谐振腔限模和选模作用更加顺畅,而后搭建了LD(Laser Diode 激光二极管)抽运的固体绿光激光器,并通过改变谐振腔对激光横模进行了选择。

## 1 光学谐振腔模式数理论分析

作为激光(或谐振腔)的模式,是以腔内具有不同状态(或特征)的光场或光子态加以标志的,应全面地包括纵向和横向2个方面的特征。谐振腔内的纵向光场分布,即具有一定谐振频率的驻波场,叫做激光纵模;谐振腔内的横向光场分布叫做激光横模,直观的可从激光光斑能量分布区分,基横模为高斯分布。

文献[1]中利用驻波条件在波矢空间中求出频率间隔为 $\Delta\nu$ 、体积为 $V$ 的立方体闭腔(如图1所示)中光波模式数

$$n_\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \Delta\nu V \quad (1)$$

式中: $n_\nu$ 为总模式数; $c$ 为光速; $\nu$ 为光波频率。下面从式(1)出发,讨论谐振腔对模式的限制。

设闭腔长 $L=10\text{ cm}$ ,横截面 $S=1\text{ cm}^2$ ,则闭腔体积 $V=$

$SL$ ,工作物质的谱线宽度 $\Delta\nu = 10^{10}\text{ Hz}$ ,光波波长 $1\ \mu\text{m}$ ,则由式(1)求得腔内的模式数 $n_\nu = 8 \times 10^9$ ,可见闭腔内模式数是非常多的。这也是产生激光的光学谐振腔一般不用闭腔的原因。

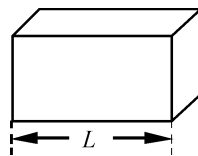


图1 立方体闭腔

对开放式谐振腔,光场不再分布在 $4\pi$ 立体角范围内,如图2所示,(a)为闭腔,(b)为开腔。分布在 $2\Omega$ 立体角内模式数为

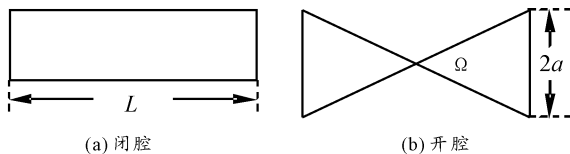


图2 闭腔和开腔

$$n = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \Delta\nu V \frac{2\Omega}{4\pi} \quad (2)$$

比较式(1)和式(2),最多差2个量级,如上例参数设置, $n \approx 10^7$ ,为清楚式(2)右边的物理意义,可改写成3个因子的乘积

$$n = 2 \cdot \frac{S\Omega}{\lambda^2} \cdot \frac{\Delta\nu}{\frac{c}{2L}} \quad (3)$$

式(3)中3个因子的物理含义如下:第1个因子“2”表示光场可能的独立偏振态;第2因子中 $\frac{\lambda^2}{S} = \frac{\lambda^2}{4a^2} = \theta_d^2 \approx \Omega_d$ ,式中: $S=4a^2$ 为光束截面积; $\theta_d$ 为极限衍射角; $\Omega_d$ 为一个

\* 收稿日期:2010-03-26

作者简介:许芹祖(1962—),男,副教授,主要从事光电检测方面的研究。

模式的极限衍射立体角。所以第 2 个因子写成  $\Omega/\Omega_d$ , 表示按空间对量(方向上)可区分的模式数,即在立体角  $\Omega$  内所容纳的方向不同的模式数。对于第 3 个因子,因为谐振腔纵模频率间隔为  $c/2L$  [2], 所以  $\frac{\Delta\nu}{c/2L}$  表示在谱线宽  $\Delta\nu$  内可区分的模式数。按上例给定谐振腔的数据可估计各个因子对模式数的贡献。显然,第 1 个因子是 2,第 2 个因子是  $\frac{S\Omega}{\lambda^2} \approx 10^6$ ,第 3 个因子是  $\frac{\Delta\nu}{c/2L} \approx 7$ 。可见,光场独立偏振态对模式数的贡献是 2;光波谱线加宽对模式数的贡献在 10 以内;而谐振腔某一大小的立体角包含了绝大部分模式,以致前面 2 个因素可以忽略,因此对模式的限制和选择应着重考虑对谐振腔的方向或空间上去考虑,这也是开腔比闭腔限模能力更强的主要原因,激光器大多采用开腔。

对于衍射损耗,由于腔镜总有一定的孔径,光波往返振荡时,必然产生衍射损耗,又会进一步将模式数减少。例如,对一镜面尺寸为  $2a$ , 镜面间距  $L$  的谐振腔,波长为  $\lambda$  的光波被镜面反射后,因衍射效应造成的能量损耗为 [1]

$$\frac{1}{N} = \frac{\lambda L}{a^2} \quad (4)$$

式中:  $N$  为非涅尔数。如果要求光波在腔内至少往返  $m$  次,则光传播方向与腔轴的最大夹角应满足  $a/2mL > \lambda/2a$ , 即  $N > m$ , 所以腔内的非涅尔数即为光波在腔内的最大往返次数。高阶横模束散角大,衍射损耗大,在腔内往返次数少,被抑制掉。以上分析了光学谐振腔从方向或空间上限模的 2 个主要物理原因。

## 2 光学谐振腔限模的实验验证

下面单从改变谐振腔角度考虑进行限模。对于纵模的限制:纵模频率间隔为  $c/2L$ ,可以减小腔长,增加纵模间隔,使得增益线宽内存在少数纵模;对于横模选择,改变谐振腔反射镜倾角,增加衍射损耗,限制高阶横模。笔者搭建了 LD 抽运 Nd:YAG/KTP 腔内倍频连续绿光激光器实验平台 [2], 利用 LD 端面抽运使得谐振腔调节更加方便,加 KTP 晶体倍频是把 Nd:YAG 产生的  $1.06 \mu\text{m}$  的不可见光变成  $0.53 \mu\text{m}$  的可见绿光,便于学生观察,实验中谐振腔为

稳定平凹腔,微量改变腔镜倾角,会增大腔内损耗,可对激光的横模进行选择。图 3 为改变平面镜倾角时所观察到的倍频光横模光斑照片。两镜面平行时,输出图 3(a)所示的基横模  $\text{TEM}_{00}$ ,通过测量计算,光斑椭圆度达到 0.96,光斑质量较高,这时限制了高阶模。当微量改变平面镜的角度时,横模呈现出高阶模,图 3(b)为  $\text{TEM}_{30}$  模。

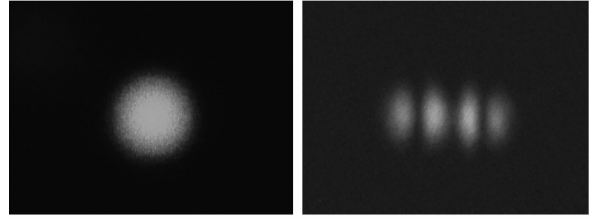
(a)  $\text{TEM}_{00}$ (b)  $\text{TEM}_{30}$ 

图 3 绿光激光器的横模照片

## 3 结束语

从经典《激光原理》著作中闭腔的光波模式数公式出发,分解成 3 个因子,给出各因子的物理含义,进而进行数据分析,深化了光学谐振腔限模原理的理解,搭建了 LD 抽运的固体绿光激光器,通过实验对谐振腔的限模进行了直观的验证,增强了谐振腔限模、选模的感性认识。对谐振腔限模、腔与模的关系的深刻理解必定为整个激光课程的学习打下良好基础。

## 参考文献:

- [1] 周炳琨,高以智,陈倜嵘,等. 激光原理[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
- [2] 沈洪斌,刘秉琦,李刚,等. LD 抽运 Nd:YAG/KTP 腔内倍频连续绿光激光器实验研究[J]. 物理实验, 2008,28(8):1-4.

(责任编辑 周江川)

(上接第 105 页)

## 参考文献:

- [1] 米本和也. CCD/CMOS 图像传感器基础与应用[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [2] CHENZk. Edge determination algorithm of game road for intelligent automobile based on plane array CCD[J]. 重庆邮电大学学报:自然科学版,2009,21(2):138-141.
- [3] 李宏. CCD 生物显微摄像系统自组装及其应用[J]. 重庆工商大学学报:自然科学版,2008,25(1):74

-77.

- [4] 赵栋,程远增,辛兵. 基于 CCD 的小口径炮膛质量检测系统[J]. 兵工自动化,2008,27(90):79-80.
- [5] 谷东兵. CCD 驱动信号的几种产生方法[J]. 传感器技术,1992(6):50-52.
- [6] 喻川,邹建. 基于 CPLD 的可调积分时间线阵 CCD 驱动的设计[J]. 四川兵工学报,2008,29(3):94-96.
- [7] 黄正瑾,徐坚. CPLD 系统设计技术入门与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
- [8] 王钊,卓兴旺. 基于 VerilogHDL 的数字系统应用设计[M]. 北京:国防工业出版社,2007.

(责任编辑 刘 舸)