

文章编号: 1001-3806(2003)02-0140-03

## 半导体泵浦双向固体环型激光器的单纵模实现<sup>\*</sup>

张志利 孙利群 田 芊

(清华大学精密仪器系精密测试技术及仪器国家重点实验室,北京,100084)

**摘要:** 综述了使用半导体泵浦的固体环型激光器的优点——可以使激光陀螺实现全固体化、提高光束质量并减小陀螺的锁区,但是由于半导体泵浦的固体环型激光器工作于多纵模状态,对陀螺的精度有很大影响。介绍了可以实现固体环型激光器单纵模的方法,即色散法、F-P 干涉法、复合腔法等,并对国内外最近出现的实现单纵模的方法进行了总结和比较。得出 F-P 干涉法是最直接有效的方法,其它方法可以进一步在固体环型激光器中验证。

**关键词:** 半导体泵浦固体激光;激光陀螺;选模;单纵模

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

## Realization of single-longitudinal mode Bi-directional laser diode-pumped solid-state ring laser

Zhang Zhili, Sun Liqun, Tian Qian

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing, 100084)

**Abstract:** In the paper, the merits of laser diode-pumped solid-state ring laser are introduced. The gyroscope can be made in solid-state, the quality of the beam can be improved and the dead lock can be reduced. But because of the multi-longitudinal mode the precision of the gyroscope is decreased. Methods of longitudinal mode selection are discussed. Meantime these methods are compared, dispersion, F-P etalon, composite cavity etc. The conclusion is that F-P etalon is the most effective method to realize the single-longitudinal mode and others will be validated in the experiments.

**Key words:** LD pumped solid-state laser (DPSSL); laser gyroscope; mode selection; single-longitudinal mode

### 引 言

半导体泵浦的固体激光器综合了半导体激光和固体激光器的优点<sup>[1,2]</sup>。半导体激光器体积小、重量轻、直接注入电信号实现高量子效率,可以调整成分和控制温度得到与固体激光材料泵浦相匹配的波长。但是半导体激光器的光束质量较差,横模特性也不理想,很难直接用于对光束质量要求高的环境中。对比而言,固体激光器输出功率大,光束发散角也小几个数量级,由于固体激光器中的泵浦材料的多样性也丰富了相干光源的谱线。但是由于采用灯(闪光灯或弧光灯)泵浦,效率和可靠性较低。而半导体泵浦的固体激光器实现了对二者的取长补短。它不仅可以实现结构紧凑和高效率,同时也实现了

热扰动小和稳定度高的特点。

因此,如果能够把 DPSSL 应用于陀螺导航系统中,代替传统的气体激光器和光纤耦合系统,实现全固体激光陀螺,则具有以下几个优点:(1) 半导体激光器工艺很成熟,性能稳定,电光效率高,固体激光器往往采用 LD 作泵浦源,驱动电路比气体激光陀螺简单,转化效率高;(2) 由于增益介质是固体,可以做成全固体陀螺仪,同时对腔的工艺性要求不高,保证了产品宜长期贮存,宜小型化,温度效应弱;(3) 气体激光陀螺为小增益介质,增益充满腔内,很难加入其它光学元件,所以多工作于连续波状态;(4) 由光学元件引起的背向散射,造成陀螺仪产生锁区,因而气体激光陀螺对反射镜的镀膜要求很高,而固体激光陀螺腔内很容易加入光学元件,采用锁模技术,可以工作于脉冲模式。经过合理的谐振腔设计,腔中反向传播的两路光脉冲将不会在构成谐振腔的光学器件中相遇,因此,这两路光之间就失去了耦合媒介,从而根本上消除了“闭锁”赖以产生的根源;同时,固体激光激光波长可以得到长波长,因此使得对

\* 清华大学基础研究基金项目。

作者简介:张志利,男,1978 年出生。研究生。主要从事固体环型激光器的研究工作。

收稿日期:2002-06-06;收到修改稿日期:2002-08-19

反射镜的镀膜工艺的要求有所降低,这也就降低了研制和生产成本。

但是,由于谐振型激光陀螺是以频率为基本参数进行检测的,而固体激光器的谐振条件决定着激光激射波长的精细结构或纵模模谱。虽然不同振荡波长间存在着损耗的差别,但它们的增益差较小,所以在它周围还有一些能满足驻波条件的波长光也可能在有源介质的增益带宽内获得足够的增益而起振。因而有可能出现一系列波长的振荡,每一个波长构成一个振荡模式,并构成一个纵模谱,这对于激光陀螺的精度影响是巨大的。故设计实现单纵模的固体环型激光器刻不容缓。

但是,与直腔型激光器的单纵模的选择相比,环行激光器的选纵模有其特殊性。首先,环行腔的纵模选择只能在谐振腔内加入选模器件,而不能在腔外实现选模。其次,选纵模的器件的尺寸不能太大,也不能太复杂,否则在狭小的环行腔内将放不下选模器件。因此,环行腔激光器的纵模选择与直腔型选纵模有一定的相似性,同时也有很大的限制。

还有几个方面必须要考虑,就是双向出光的环行激光器与单向出光的激光器也有很大的不同。首先,单向出光的激光器在谐振腔内形成行波,因此,只要选择合适的腔长就能避免空间烧孔作用,从而实现单纵模的激光输出;而双向出光的激光器由于两个方向的激光都存在,空间烧孔作用将不可避免,故输出的激光理论上应该为多纵模。其次,双向出光的激光器的选模应该是在一定的范围内的选纵模,由于双向激光器要应用于陀螺导航系统中,所以在旋转时,两个方向的激光的频率有一定的差值,如果选择非常窄的带宽的选模器件,就会把双向激光限制为单向激光。

综上所述,双向固体环行激光器的纵模的选择与直腔型激光器和单向的环行激光器均存在着很大的不同,必须要综合考虑才能实现在一定范围内的双向单纵模激光的输出。

### 1 纵模选择方法比较

由于激光是在谐振腔中振荡产生的,所以,激光器纵模选择的一般的出发点有两种。

(1)在谐振腔中加入光学原件,比如色散棱镜、F-P 标准器等。这些方法的原理就是通过光学的方法使激光的一部分纵模通过,而其它的纵模由于损耗或折射等,不能在激光的谐振腔中形成足够的振荡,从而形成单纵模激光。

(2)激光形成后,在谐振腔的后端加入选纵模的装置,比如,环型腔等,从而使激光达到单纵模的目的。但是由于固体环型激光器的装置为双向出光的干涉系统,这种方法就不能应用在该试验装置中,故不作介绍。

下面就对固态激光器的选纵模方式作一个简单的介绍和比较。

#### 1.1 色散法(或双折射法)粗选纵模<sup>[3]</sup>

如果激光工作物质具有许多条不同波长的激光谱线,例如,He-Ne 激光器,可以发射 632.8nm, 1150nm,3390nm 3 条谱线,那么,在纵模选择之前,必须将 3 条谱线进行粗选,将不需要的谱线抑制掉<sup>[3]</sup>。

通常是利用腔镜反射膜的光谱特性或在腔内插入棱镜或色散元件,将工作物质发出的不同波长的光束进行空间分离,然后设法只使较窄的波长区域的光束在腔内形成振荡,其它波长则不具有反馈能力而被抑制掉。基本原理如图 1。



图 1 色散法粗选纵模原理图

这种选模方法的优点是方式简单、成本低,而缺点是精度低。

#### 1.2 F-P 干涉型<sup>[4-9]</sup>

F-P 干涉仪是 Fabry 和 Perot 于 1899 年设计的干涉仪<sup>[10]</sup>,采用平行平板产生的多光束干涉条纹,光的照射在正入射附近。这种干涉仪用来高精度的测量波长和研究谱线的细微结构。F-P 干涉仪实际上是由朝里的表面各镀有高反射率的部分透射膜的玻璃或者石英板组成,它的两个反射面保持精确平行。如果两个反射面固定不动,则称为标准具。

在激光器的谐振腔中,插入一个 F-P 标准具(F-P etalon, 以下简称为 FPE),对于它,事先选择好其厚度  $d$  和反射率  $r$ ,使峰值频率间隔  $\Delta \nu_m$  与激光器线宽相当。由于 F-P 干涉仪对于不同的波长的光束有不同的透过率,可以用下式表示:

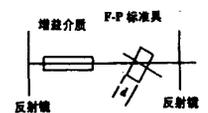


图 2 利用 F-P 标准具选择纵模

$$T = \frac{1}{1 + F \sin^2(\delta/2)} = \frac{1}{1 + F \sin^2(2\pi d/\lambda)} \quad (1)$$

式中,  $F = \frac{4R}{(1-R)^2}$  为标准具的精细度;  $R$  为标准具对光的反射率;  $d$  为标准具的厚度;  $\delta$  为标准具中参与多光束干涉效应的相邻两出射光线的相位差,即  $\delta = (2\pi/\lambda)2nd \cos \theta$ ,式中,  $n$  为标准具介质

的折射率; 为光束进入标准具后的折射角, 一般很小,  $\cos \theta \approx 1$ 。  $T(\lambda)$  是波长  $\lambda$  及  $R$  的函数。对于标准具,  $R$  越大, 则透射曲线越窄, 选择性就越好。相邻两透过率的极大值的间隔为  $\Delta \lambda_m = c/2nd \cos \theta$ , 通常称为标准具的自由光谱区。

由于标准具的厚度  $d$  比谐振腔的长度  $L$  小得多, 因此, 它的自由光谱区比谐振腔的纵模间隔大得多。这样, 在谐振腔中插入标准具并选择适当的厚度和反射率, 使

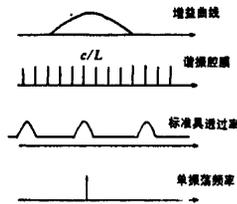


图3 使用单标准具选纵模原理示意图

其增益宽度  $\Delta \nu_m$  与激光工作物质的增益宽度相当, 如图3所示, 处于中心频率的纵模与标准具最大透过率处相一致, 故该模损耗最小, 可以起振, 而其它纵模则由于附加损耗太大不能形成激光振荡。调节标准具的倾斜角就可以改变  $\theta$ , 即使标准具最大透过率处与不同的纵模的频率重合, 就能获得不同频率的单纵模激光的输出。

优点: 标准具平行平板间的厚度可以做得很薄, 因而对增益线宽很宽的激光工作物质, 如 Nd:YAG、红宝石等激光器, 均能获得单纵模振荡, 而且由于腔长没有缩短, 输出功率仍然可以很大。

缺点: 对于固体激光器来说, 由于线宽很宽, 只用一个标准具可能会难以实现单纵模振荡。原因是  $F$  受工艺因素的限制不可能有很大的数值; 当激光器腔长较长时, 纵模间隔较小, 如果标准具的光谱区很大, 它的带宽就比较宽, 因而就难以保证单纵模输出, 所以不得不再插入第2个标准具。

### 1.3 复合腔选纵模<sup>[1,10~12]</sup>

如果用1个反射干涉仪系统取代谐振腔中的1个反射镜, 其组合反射率是光波长的函数。图4所示的是干涉复合腔的原理图。其特点是组合反射率  $R$  随频率作周期性变化, 在某些频率处,  $R$  具有极大值。

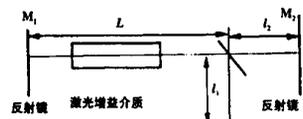


图4 迈克尔逊干涉仪式的复合腔选择纵模原理

分析表明, 极大值之间的频率间隔是可以通过调整复合腔长来改变的。

图4是1个迈克尔逊干涉仪式的复合腔, 它是由1个迈克尔逊干涉仪取代谐振腔的1个反射镜构成的。该腔可以看成是由两个子腔组合而成, 全反

射镜  $M$  和  $M_1$  组成1个子腔, 腔长  $L + l_1$ , 谐振频率  $\nu_{1i} = cq_i/[2(L + l_1)]$ , 设干涉仪中的介质  $n = 1$ 。另一个子腔由全反射镜  $M$  和  $M_2$  组成, 其腔长为  $L + l_2$ , 谐振频率为  $\nu_{1j} = cq_j/[2(L + l_2)]$ 。因此, 激光器的谐振频率必须同时满足上面两个条件, 即  $cq_i/[2(L + l_1)] = cq_j/[2(L + l_2)]$ , 而且第1个子腔的光束经过第  $N$  个频率间隔后的频率正好和第2个子腔的光束经过  $N + 1$  个频率间隔后的频率再次相等。由此可以得到复合腔的频率间隔:

$$\Delta \nu = c/2(l_1 - l_2) \quad (2)$$

由上式可以看出, 适当选择  $l_1$  和  $l_2$  可以使复合腔的频率间隔足够大, 即两相邻纵模的间隔足够大, 与增益线宽相比拟时, 即可实现单纵模运转。

优点: 应用比较成熟的技术, 使技术难度大大的降低, 同时由于干涉仪的理论研究比较的充分, 使研究的难度也降低了。

缺点: 使谐振腔中的元器件增加, 使结构复杂, 同时使激光的强度受到一定的影响, 对激光的横模也有一定的影响。

## 2 结 论

由于固体双向环型激光器的固有特性, 使得现有的某些方法(比如, 腔外选纵模法)不能应用。因此, 在选择纵模时, 可以选择的方式有一定的局限性。同时, 考虑到使用色散法不能达到要求, 使用复合腔的复杂, 所以, 使用 F-P 标准具是比较简洁的办法。

### 参 考 文 献

- [1] 蓝信钜. 激光技术. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] 万顺平, 毛献辉, 孙利群 *et al.* 应用光学, 2002, 23(2): 22 ~ 25.
- [3] 焦明星, 张书练, 梁晋文. 中国激光, 2001, 28(2): 100 ~ 102.
- [4] Cabaret L, Camus P, Leroux R *et al.* Opt Lett, 2001, 26(13): 983 ~ 985.
- [5] Zhang J, Chang H, Jia X J *et al.* Opt Lett, 2001, 26(10): 695 ~ 697.
- [6] Bourderionnet J, Brignon A, Hujnard J P. Opt Lett, 2001, 26(24): 1958 ~ 1960.
- [7] Chen Sh H, Chen T L, Chen Y M. IEEE J Q E, 1992, 28(11): 2556 ~ 2559.
- [8] 陈本永, 朱若谷, 吴昭同. 激光技术, 2000, 24(6): 379 ~ 384.
- [9] 王 伟, 李大义, 陈建国 *et al.* 激光技术, 2000, 24(2): 102 ~ 106.
- [10] Born M, Wolf E. Principles of optics. 6th edn, Oxford: Pergamon Press, 1986.
- [11] Lee Ch Ch, Chi S. Opt Lett, 2000, 25(24): 1774 ~ 1776.
- [12] 易亨瑜, 李育德, 陈 梅. 激光杂志, 2001(6): 33 ~ 35.