

文章编号: 1001-3806(2002)05-0338-03

高分辨率的可调谐激光器研究

何忠蛟 马养武

(浙江大学光电信息工程系, 杭州, 310027)

摘要: 基于菲涅耳-基尔霍夫衍射积分方程的求解结果和维持基模振荡的观点, 提出一个能直观表达出光栅腔可调谐激光器的最小可分辨波长间隔与光腔参数、光栅参数之间关系的表达式, 并由实验结果所证实。

关键词: 光栅腔; 可调谐激光器; 分辨率

中图分类号: TN242 **文献标识码:** A

Tunable laser with high distinguishability

He Zhongjiao, Ma Yangwu

(Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310027)

Abstract: Based on the solution about Fresnel-Kirchoff diffraction integral equation and the viewpoint about maintaining the fundamental mode oscillating, an expression which can directly describe relation about the least distinguishable wavelength interval of the tunable laser and the grating resonator parameters, the grating parameters is put forward, and the expression is conformed with experimental results.

Key words: grating resonator; tunable laser; distinguishability

引 言

众多的具有系列分立谱线输出的激光器, 象 CO_2 , CO , 分子远红外, 染料以及半导体等可调谐激光器^[1~4], 通常多采用光栅腔的构型来实现输出波长的调谐。即激光谐振腔的一块腔镜由衍射光栅所代替而构成光栅腔。由于衍射光栅的色散特性, 使光栅腔依次对不同波长具有不同的 Q 值, 激光振荡发生在具有最大 Q 值的对应波长上, 特别是对于那些具有密集分立谱线输出的可调谐激光器, 要求光栅腔本身具有尽可能高的波长分辨率。因此, 光栅腔的分辨率是表征光栅腔性能的最为主要的特性之一。通常认为光栅腔的最小可分辨波长间隔 λ_{\min} 表示成^[5]:

$$\lambda_{\min} = \lambda / D \quad (1)$$

式中, D 是光栅角色散, θ 是光束发散角。然而, 光栅腔的最小可分辨波长间隔 λ_{\min} 不仅与光栅的角色散和腔内光束发散角有关, 而且与光栅腔的两个内在特性——模结构和衍射损耗有着更为重要的密切关系。

基于菲涅耳-基尔霍夫衍射积分方程^[6,7]的求解表明: 光栅腔的场分布和衍射损耗等价于具有相同几何参数的平-凹腔, 并且光栅腔的调谐过程相当于平-凹腔的失调过程^[8]。据此, 再根据维持基模振荡的观点^[9], 导出一个简洁的能直观表达出光栅腔的最小可分辨波长间隔 λ_{\min} 与光腔参数、光栅参数之间关系的表达式。

下面将介绍实验装置和实验过程。腔长为 1m 的可调谐 CO_2 激光器装置, 完成一个单程扫描可获得 100 多条清晰可分辨的功率谱线。实验结果表明所导出的表达式的实用性和准确性, 并为光栅腔设计提供了依据。

1 光栅腔的波长分辨率公式

图 1 所示为通常的可调谐激光器的光栅腔构型。通过分别求解 x 和 y 方向(图 1 所示为 x 方向)的菲涅耳-

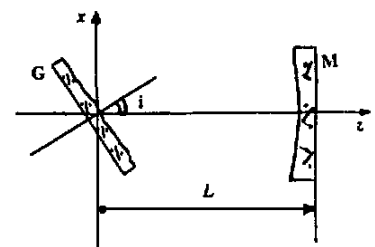


Fig. 1 Grating resonator

基尔霍夫衍射积分方程, 表明: 对于满足

作者简介: 何忠蛟, 男, 1974 年 5 月出生。硕士研究生。现从事激光技术和波导光子方面的研究工作。

收稿日期: 2001-11-27; 收到修改稿日期: 2002-02-26

Littrow^[10,11]光栅方程: $\lambda = 2d \sin i$ (2)

式中, d 是光栅常数; i 是入射角; λ 是光波长。在图 1 所示的光栅腔内的场分布和衍射损耗特性完全等同于具有相同结构参量的普通激光谐振腔,而对于波长偏离 λ_0 的光场,衍射积分方程的解表明光栅腔内的场分布形式相同于失调球面镜内的场分布形式,据此,光栅腔的波长可分辨问题,实质上可归结为失调腔的场分布和衍射损耗的研究。

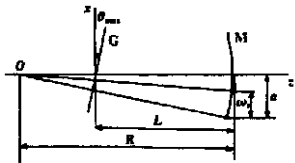


Fig. 2 Maladjusted plane-concave resonator (plane mirror decline)

就失调谐振腔的校准容限问题, Bloom 等人曾提出^[9]: 当一块反射镜相对于原腔轴发生偏斜时,基模的衍射损耗迅速增大,但只要基模光斑保持在反射镜范围内,此基模仍维持振荡,即所谓“维持基模振荡观点”,图 2 所示为平面镜失调时的平-凹腔(对应于由平面光栅和球面反射镜构成的光栅腔)。设球面反射镜的半径为 a , 准直时球面镜上的基模光斑半径为 s_0 , 当倾角 α 不大时,可认为在倾斜过程中 s_0 的大小不变,但光斑发生移动,由维持基模振荡观点,应有如下关系: $s_{\max} = (a - s_0) / R$ (3)

式中, s_{\max} 表示平面镜所允许的最大倾角; R 是球面镜曲率半径。对光栅方程 (2) 微分,得:

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{2d \cos i}{\lambda} di \quad (4)$$

式中, θ 是光栅闪耀角; d 是光栅常数; $\lambda = \lambda_0$ 。
(4) 式表征了衍射光栅本身的角色散特性,结合 (3) 式与 (4) 式,即考虑整个光栅腔的选择特性,并认为:

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{2d [(a - s_0) / R] \cos i}{\lambda} di \quad (5)$$

式中, a 为放电管半径(谐振腔的反射镜尺寸,通常由工作介质,和放电管、激光棒的横向尺寸所限定),

$$s_0 \text{ 为: } s_0 = \left(\frac{L}{R} \right)^{1/2} \left[\frac{1}{g(1-g)} \right]^{1/4} \quad (6)$$

$g = 1 - L/R$ 。(5) 式是提出的光栅腔可调谐激光器波长分辨率表达式。光栅腔的最小可分辨波长间隔

不仅与光栅本身的角色散参量有关,而且与光栅腔的几何结构参量有更为密切的依赖关系。

2 实验结果与分析

2.1 实验装置

图 3 所示为光栅腔可调谐 CO₂ 激光器装置。图中:A 为光栅转台;B 为放电管;C 为探测器;G 为光栅;M 为平面镜;F 为 ZnSe 片;D 为 x-y 记录仪;R 为全反射镜;O 为转轴中心。平面光栅 G 与反射

镜 R 组成光栅谐振腔,腔长为 1m,放电管 B 采用硬质玻璃,两端由 ZnSe 布儒斯特窗片密封,两电极放电长度为 62cm,放电管内径为 $\varnothing 6\text{mm}$,光栅采用 $d = 120$ 条/mm 基底原刻光栅。

光栅腔的输出耦合采用“一级振荡,零级输出”^[11]的方式。光栅的零级衍射方向与入射光方向成镜面反射关系,

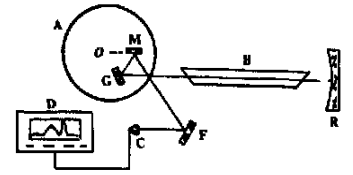


Fig. 3 Experiment setup for tunable CO₂ laser

因此,在光栅调谐过程中输出光束的方向也随之变化。为使能在调谐过程中输出光束始终不变,实验采用了“联合光学耦合输出”装置,即如图 3 中所示,光栅 G 与平面镜 M 组成一个二面角,基于几何光学中的两面角反射原理,在此两面角绕基轴线(即两个面的交线)旋转时,输出光线方向保持不变,此两面角固定于光栅转台上,转台由可逆电机驱动。在 9 ~ 11 μm 的波长区域的选支过程中,光栅的转角为 8°,输出光束经 ZnSe 片衰减反射后,由红外探测器所检测,并转变为电信号,输入“x-y”函数记录仪,自动给出功率谱图。

2.2 实验结果和分析

可调谐 CO₂ 激光器通常输出的波长区域是 9 ~ 11 μm ,此实验装置,光栅一次单程转动扫描,可选出此波长区域中 100 多条功率谱线,它们是:00⁰1 ~ 10⁰0 振-转跃迁的 R 支 25 条线,P 支 26 条线;00⁰1 ~ 02⁰0 振-转跃迁的 R 支 25 条线,P 支 25 条线;01¹1 ~ 10⁰0 振-转跃迁的 P 支 9 条线。其中强线的功率大于 5W,这些谱线中(除 01¹1 ~ 11¹0 跃迁之外)最密集的是 00⁰1 ~ 02⁰0 跃迁的 R 支线,其中 R(46)与 R(48)的间隔仅为 0.84 cm^{-1} ,因此,要分辨这些谱线,就要求激光器的最小可分辨波长间隔应小于 0.84 cm^{-1} (即 $< 7 \times 10^{-6} \text{mm}$)。

为验证以上导出的分辨率公式,对同一装置,进行了两组对比实验。

(1) 第 1 组对比实验:调换光栅腔的球面反射镜的曲率半径,其它条件不变。

根据引言中提到的分辨率公式: $\lambda_{\min} = \lambda / D(a - R)$ (a = 3mm),对曲率半径 $R = 3\text{m}$, $R = 5\text{m}$, $R = 7.5\text{m}$, $R = 10\text{m}$ 进行计算,结果列于表 1。表 1 表明:即使 $R = 3\text{m}$,光栅腔的 R 支各线也是能够分辨的。可与实验结果不相符。

Table 1 The calculation results by $\Delta\lambda = \lambda^2 / D (a = 3\text{mm})$

the curvature radius of complete reflective mirror R/m	3	5	7.5	10
the least distinguishable wavelength interval $\Delta\lambda/\text{mm}$	8.6×10^{-7}	5.3×10^{-7}	4.05×10^{-7}	3.14×10^{-7}

根据所提出的分辨率公式 $\Delta\lambda = 2d[(a - \lambda_s) / R] \times \cos \theta$ ($a = 3\text{mm}$), 对曲率半径 $R = 3\text{m}$, $R = 5\text{m}$, $R = 7.5\text{m}$, $R = 10\text{m}$ 进行计算, 结果列于表 2。

Table 2 The calculation results by $\Delta\lambda = 2d[(a - \lambda_s) / R] \cos \theta$ ($a = 3\text{mm}$)

the curvature radius of complete reflective mirror R/m	3	5	7.5	10
the least distinguishable wavelength interval $\Delta\lambda/(\text{mm})$	7.05×10^{-6}	3.13×10^{-6}	1.66×10^{-6}	0.98×10^{-6}

表 2 表明: 要能分辨 $00^0_1 \sim 02^0_0$ 的 $R(46)$ 与 $R(48)$ 谱线, 光栅腔的全反射镜曲率半径必须大于 3m。

图 4 给出对同一装置, 球面反射镜曲率半径分别为 $R = 3\text{m}$, $R = 5\text{m}$, $R = 7.5\text{m}$ 的功率谱图。

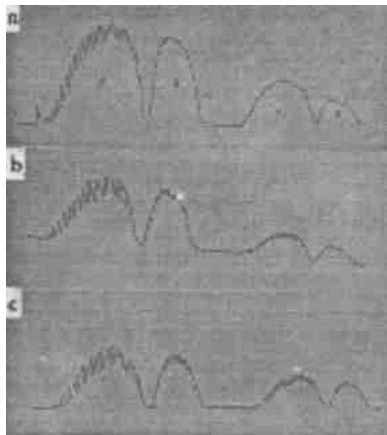


Fig. 4 The power pedigree of the variable curvature radius (the discharge tube diameter $2a = 6\text{mm}$)
a - $R = 3\text{m}$ b - $R = 5\text{m}$
c - $R = 7.5\text{m}$

由这 3 组谱线图可以看到, 随着曲率半径 R 的增加, 各支线的两相邻谱线的凹陷加深, 各支线的线宽明显变窄。对于谱线分布最密集的 $00^0_1 \sim 02^0_0$ 跃迁的 R 支谱线, 在 $R = 3\text{m}$ 时, 各线是无法区别的; 当 R 增加为 5m 时, 可分辨出各线的波峰; 而当 R 增加到 7.5m 时, 各线的波峰已相当明显。

这表明公式 $\Delta\lambda = 2d[(a - \lambda_s) / R] \cos \theta$ 的计算结果与实验结果是相当一致地符合。

(2) 第 2 组对比实验: 调换不同内径的放电管,

其它条件不变。

根据 $\Delta\lambda = 2d[(a - \lambda_s) / R] \cos \theta$ ($R = 5\text{m}$), 对放电管内径 $a = 3\text{mm}$, $a = 2.75\text{mm}$, $a = 2.5\text{mm}$ 进行计算, 结果列于表 3。

Table 3 The calculation results by $\Delta\lambda = 2d[(a - \lambda_s) / R] \cos \theta$ ($R = 5\text{m}$)

the radius of discharge tube a/mm	3	2.75	2.5
the distinguishability of the resonator $\Delta\lambda/\text{mm}$	3.17×10^{-6}	2.46×10^{-6}	1.81×10^{-6}

由表 3 可知, 放电管半径 a 减小, 分辨率提高。图 5 给出对同一装置, 采用放电管半径分别为 $a = 2.75\text{mm}$, $a = 2.5\text{mm}$ 的功率谱图。

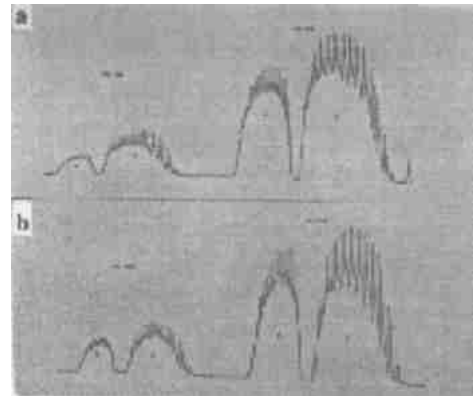


Fig. 5 The power pedigree of the variable discharge tube radius (the curvature radius $R = 5\text{m}$)
a - $a = 2.75\text{mm}$ b - $a = 2.5\text{mm}$, $R = 5\text{m}$

由这两组谱线图可以看到, 随着放电管半径 a 减小, 各支线的两相邻谱线间凹陷加深, 各条线的线宽明显变窄。

这表明公式 $\Delta\lambda = 2d[(a - \lambda_s) / R] \cos \theta$ 的计算结果与实验结果是相当吻合的。

由上述两组对比实验可知: 光栅腔的分辨率与光栅腔结构参数之间有着相当明显的依赖关系。故要真实地描述光栅腔的分辨率, 必须要涉及光栅腔的内在关系, 而通常的分辨率公式是无法表达的。

3 结 论

上述结果表明: (1) 由球面镜-平面光栅组成的光栅腔的波长分辨率, 除与光栅参数 (刻线数和闪耀角) 有关以外, 还与光腔参数有强烈的依赖关系。它们之间可由如下关系式表示: $\Delta\lambda = 2d[(a - \lambda_s) / R] \cos \theta$ 。(2) 增大光栅的几何因子 g 或减少光腔菲

(下转第 343 页)

极其精确,误差仅 0.01%。当达到采样时间为 20s 或采样点为 8000 个时,停止采样。经过数据整理和分析,得出转盘的平均转速。利用该结果与 LDA 测量结果进行比较,得出测量转速的百分比误差,其值为 0.3635%,证明 LDA 系统的设置是准确的。

实验中通过利用 LDA 测量流体管道的横截面的速度分布,得出流体的平均速度并与流量计得出的速度进行比较。实验结果如图 4。流道横截面是一个 500mm × 40mm 的矩形截面。

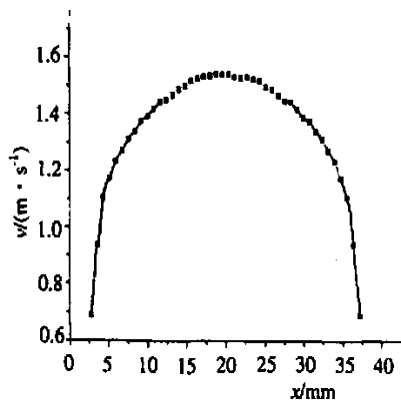


Fig. 4 The velocity contribution of the cross section profile

LDA 测出的平均速度为 1.39m/s, 涡轮流量计测出的速度为 1.40m/s。激光测速技术的误差来源主要有:(1)由于示踪粒子有一定的跟随性误差,故造成测量值偏小;(2)计数率和采样时间长短对结果有一定的影响,如果测量中有足够的采样数据,结果会更加精确;(3)介质的折射率受很多因素的影响,如溶液浓度分布、波长大小等,本实验中采用的是平均值,因此,会给结果带来一些影响;(4)根据高斯定

律,形成探测体的激光束是否相交在光腰处对结果也会产生一定的影响。

另外,考虑到涡轮流量计的误差($\pm 0.5\%$),因此,二者的数据相互吻合得很好。结果表明,LDA 参数的修正是成功的。

3 结 论

对三光束 LDA 测量流体模型中存在的由于介质折射率的不同而引起的入射光聚焦变形提出了一种解决方法:即公式修正法。该方法从几何光学的角度推导出参数修正公式,解决了测量结果因为介质折射率的不同而存在的偏差。经过严格的标定之后,通过实验对比证明了该方法的可行性。对 LDA 在不同介质中测量参数的修正公式可以应用在不同的介质中,有一定的通用性。

本实验的进行得到动力机械与工程教育部重点实验室的支持,特在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 杨国光主编. 近代光学测试技术. 杭州:浙江大学出版社,1997.
- [2] 孙渝生编著. 激光多普勒测量技术及其应用. 上海:上海科学技术文献出版社,1995.
- [3] McAndrew D, Coppen S, Rogers C B. International Journal of Multiphase Flow, 2001, 27(9): 1517.
- [4] Mathiesen V, Solberg T, Hjertager B H. International Journal of Multiphase Flow, 2000, 26(3): 387.
- [5] 沈熊,董鹏,陈巧宁 *et al.* 流体力学实验与测量,1998,12(4): 53.
- [6] Drain L E 著,王仕康,沈熊,周作元译. 激光多普勒技术. 北京:清华大学出版社,1985.

参 考 文 献

- [1] Hansch T W. Appl Opt, 1972, 11: 895 ~ 898.
- [2] Ionin A A. SPIE, 1998, 3228: 9 ~ 17.
- [3] Osgood R M, Sackett P B, Javan A. J Chem Phys, 1974, 60: 1464 ~ 1479.
- [4] Chodzko R A, Mirels H, Roehrs F S *et al.* IEEE J Q E, 1973, QE9: 523 ~ 529.
- [5] 赫光生,雷仕堤. 激光器设计基础. 1 版,上海:上海科学技术出版社,1979.
- [6] Hardy A, Treves D. Appl Opt, 1975, 14: 589 ~ 592.
- [7] Consortini A, Pasqualetti F. Appl Opt, 1973, 20: 793 ~ 803.
- [8] Sanderson R L, Streifer W. Appl Opt, 1969, 8: 2241 ~ 2248.
- [9] Maitland A, Dunn M H, 朱如曾译. Laser physics. 1 版,北京:国际工业出版社,1975.
- [10] Barn M, 杨露荪译. Principles of optics. 2 版,北京:科学出版社,1978.
- [11] 马养武,陈钰清. 激光器件. 1 版,杭州:浙江大学出版社,1994.

(上接第 340 页)

涅耳数 N , 都将提高光栅腔的波长选择能力,但同时也增大了光栅腔的衍射损耗,从而也会减少激光器的输出功率和选支数目。因此,光栅谐振腔的各参数的合理选取原则应是:既要考虑腔的分辨本领,又要顾及到腔的损耗和功率。可由所给出的表达式(5)式为依据,再根据由 TEM₀₀ 模所限定的 a 与 s 之间的关系,从中选取出一个合理的值。这里的所谓“合理”,应随各种不同的应用场合而异,当要求有较高的波长分辨率时,势必要减小输出功率;而要求某些波段上有强线时,即可放宽分辨率要求。总之,(5)式指出了这些参数之间的关系,为这种“合理”的选取,提供了可靠的依据。