

一种新的横模选择概念与方法*

马养武

周建英

(浙江大学光仪系, 杭州) (中山大学激光与光谱学研究所, 广州)

摘要: 提出并研究了利用腔中空波导管选择横模的新概念和方法。基于这种方法的复合腔激光器实现了在不施行压缩振荡模体积情况下获得单横模高功率密度输出。理论分析与实验结果表明了这种新技术的诱人的应用前景。

A new concept and new means of selecting traverse mode

Ma Yangwu

(Department of Optical Engineering, Zhejiang University)

Zhou Jianying

(Institute of Laser and Spectroscopy, Zhongshan University)

Abstract: A new concept and a new means of selecting traverse mode with a hollow waveguide tube in cavity are advanced and investigated. without compressing oscillating mode volume, the laser with the compound cavity can achieve the high power density output with single traverse mode. Therefore, the broad application prospects of the new technique are shown by theoretical analysis and experiment results.

一、引 言

在大多数的激光应用场合, 要求激光器具有良好的方向性, 即所输出的激光束应具有尽可能小的发散角。研究表明^[1], 对于接近于理想情况的工作物质, 导致大的激光束发散度的主要原因是激光谐振腔的多模振荡。虽然, 多横模振荡的激光器具有更大的激活模体积, 而能获得更大的输出功率, 但由于高阶模场分布所具有的多个 π 相位跃变的特点, 就使得输出激光束的远场分布分裂为多个具有一定夹角的主瓣, 这不仅使远场分布的中心强度减弱, 而且也使激光束的发散角大大增加。

为了压缩激光束的发散度, 最根本的方法是压缩激光振荡模式^[2], 即通过横模选择, 实现单横模振荡和单横模输出, 从而获得良好的方向性。对于各种激光器, 通常采用的横模选择方法是在谐振腔内插入附加的选模元件(通常有: 孔径光栏、F-P标准具、临界角反射

* 国家自然科学基金资助项目。

器、放电管或工作介质本身等),即通过控制选模元件的孔径尺寸,抑制高阶模振荡。由此,长期来,人们所形成的传统的横模选择概念就归纳为:要获得单横模输出,必须抑制高阶模振荡,即单模输出对应着单模振荡。这种选模方法虽然简单易行,但根本的缺点是以抛弃高阶模能量为代价,由于振荡模体积的压缩,势必使得单模输出功率远小于多模运转的输出功率。

本文提出了一种完全区别于传统的横模选择新概念和方法,即在激光腔内附加中空介质波导管,而组成独特构型的波导/自由空间复合腔(见图1)。由于复合腔所具有的足够大的多模振荡自由空间增益区和中空介质波导管的良好选模作用,而实现了在不施行压缩振荡模体积情况下获得单横模高功率密度的激光输出。新选模方法的核心是:多模振荡单模输出,它是基于波导模与自由空间模之间极佳的展开和重新耦合原理,把参与在自由空间增益区振荡和放大的各阶自由空间模耦合成最低阶波导模输出,因而激光器具有单横模输出的优良的方向性,而且具有比同等条件下的普通单横模激光器高得多的功率密度。论文以复合腔CO₂激光器为研究实例,分析了这种选模方法的可行性和应用前景。

二、选模原理

一支适当管径和长度的中空介质波导管置于腔内,而构成如图1所示的波导/自由空间复合腔构型。其组成主要包括匹配全反射镜M₁(曲率半径R₁)、大口径放电管D(或其他大口径增益介质)、中空介质波导管W和平面输出镜M₂(曲率半径∞)等部分。放电管D内充

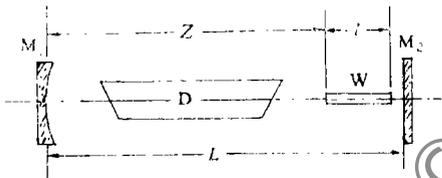


图1 波导/自由空间复合腔CO₂激光器示意图

有工作气体,是激光器的增益区,由于它的口径足够大,而使在其中参与振荡的高阶模也具有很小的衍射损耗和包络有大的激活模体积,所以,放电管D也相当于自由空间增益区。中空介质波导管是作为控模元件置于腔内的,本身不具有增益放大作用,复合腔与普通的波导腔的根本不同在于:普通的波导腔中,波导管既是一个控模元件,同时又是增益介质工作区,

而对于复合腔,其增益介质区和控模波导管是作为二种不同元件置于腔内,中空波导管的控模作用限制了激光器以低阶波导模的输出形式,但波导管本身不是增益区,因而复合腔中的整个激活模体积就不受波导管尺寸的限制。

由自洽原理,满足图1所示复合腔自洽条件的振荡模必须是能以低损耗传输于波导管的低阶波导本征模,同时又必须是具有在自由空间增益区中的拉盖尔-高斯分布,以使能被反射腔镜高效耦合。分析这种复合腔的模场分布和传输特性的一种特殊方法是基于波导腔模理论,即以中空介质波导管所形成的波导模为基础,来拓展复合腔模的形成和振荡过程。

按波导谐振腔理论^[3],能形成复合腔内稳定自洽振荡的最主要的条件是:复合腔内波导管W所形成的波导本征模的场分布形式,以及波导模与自由空间增益区D中的振荡模之间的耦合。对于适当选取管径a的圆柱中空介质波导管,管中所形成的最低阶波导本征模EH₁₁具有场分布形式:

$$E_{11} = J_0 \left(\frac{u_{11}}{a} \gamma \right) \quad (\gamma \leq a) \quad (1)$$

式中, u_{11} 是零阶贝塞尔函数的第一个根, γ 是传输系数, EH_{11} 模在由波导管口向反射镜的传输过程中, 首先在波导管口处展开成多阶自由空间模的线性组合:

$$E_{11}^2 = \sum_{p=0}^{\infty} |A_p(w_0)|^2 \quad (2)$$

式中, $A_p(w_0)$ 是第 p 阶拉盖尔-高斯光束的振幅。Abrams^[4] 计算了 EH_{11} 模包含在前六阶拉盖尔-高斯光束中的能量份额, 在把 EH_{11} 模的能量份额的极大值取在级数展开式 (2) 的第一项 $A_0(w_0)$ 上时, 前六项拉盖尔-高斯光束的迭加包含了 EH_{11} 模总能量的 99% 以上, 并且, 总能量的 98% 都辐射到腰斑半径 $w_0 = 0.6435a$ 的 TEM_{00} 模中。这种计算表明了波导模与自由空间模之间极好的耦合关系。Abrams 的设定方法, 对于波导腔激光器是合理的和最方便的, 因为波导激光器的激活增益区就是波导管本身, 波导模在波导管口与反射镜之间的自由空间中展开的模体积的大小, 对激光器的输出功率不会有任何影响, 所以只要波导腔的构型能实现 EH_{11} 模与拉盖尔-高斯模之间的良好的耦合状态, 就能使激光器有最好的输出功率和光束质量。

而对于我们所提出的复合腔, 其增益放大区是置于波导管口与腔镜间的自由空间中, 波导管在腔中仅是作为一种控模元件, 因此, 波导管所形成的波导模在这自由空间增益区中所展开的自由空间模的总的模体积的大小, 以及它们重新耦合回波导模的汇聚程度, 就将决定着复合腔激光器的总的增益和输出功率。这是复合腔研究的主体。

我们关于复合腔的理论数值分析表明^[5], 关系到复合腔中振荡模体积大小和与波导模的耦合程度的最重要的参量是 w_0/a 。参量 w_0/a 值的选取, 应能以获得在自由空间增益区中具有尽可能大的模体积为原则。所以, 对于复合腔, 上述的 Abrams 的波导管中只允许存在最低阶波导模的假定和 $w_0/a = 0.6435$ 的取值, 并不是最适宜的。为了使波导模具有大的在自由空间的展开模体积, 在选取参量 w_0/a 值时, 应使波导模能量份额的最大值落在级数展开式 (2) 的后几项上, 而不是第一项 $A_0(w_0)$ 上, 这样, 由于在高阶模上的能量份额的增大和级数展开式 (2) 项的后移, 就会使展开模体积迅速增大。

根据 EH_{11} 模的拉盖尔-高斯光束展开式 (2) 和拉盖尔-高斯光束振幅 $A_p(w_0)$ 的形式^[4]:

$$A_p(w_0) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{w_0} \int_0^a J_0\left(\frac{u_{11}}{a}\gamma\right) L_p\left(\frac{2\gamma^2}{w_0^2}\right) e^{-\gamma^2/w_0^2} 2\pi\gamma d\gamma \quad (3)$$

式中, $L_p\left(\frac{2\gamma^2}{w_0^2}\right)$ 为第 p 阶拉盖尔多项式, w_0 为拉盖尔-高斯光束腰斑半径, 可由下式

$$\frac{\partial \sum |A_p(w_0)|}{\partial w_0} = 0 \quad (4)$$

来确定 w_0/a 比值, 以及 w_0/a 取值对 EH_{11} 模能量在各阶拉盖尔-高斯模上的份额比的影响。数值计算表明^[6], 在份额比的极大值取在第一项 $A_0(w_0)$ 上时, 即 $\partial A_0(w_0)/\partial w_0 = 0$, w_0/a 值等于 0.6435, 这时, EH_{11} 模能量的 98% 将耦合到 TEM_{00} 模中, 2% 的能量耦合到其他高阶模中, 而当份额比极大值向级数项后移时, w_0/a 的取值就得减小, 而 EH_{11} 模耦合到高阶模上的能量就随之增大。可以算出, 当 $w_0/a = 0.55$ 时, EH_{11} 模耦合到 TEM_{00} 模的能量比为 95%; 当 $w_0/a = 0.534$ 时, EH_{11} 模能量的 93% 将耦合到 TEM_{00} 模中, 当 $w_0/a = 0.49$ 时, EH_{11} 模辐射到 TEM_{00} 模上的能量份额比为 89%。计算表明了自由空间增益区中的

模体积增大趋势。

根据新选模概念所构成的复合腔的特点是显而易见的。由波导管所限定的波导模，在波导管口展开为多阶自由空间模的线性组合，这些模在向自由空间增益区传输过程中，都得到放大，并形成大的多模激活模体积，因此，反馈回波导管口，并重新耦合成的波导模的能量必定大于单个高斯基模振荡时所能获得的能量。复合腔腔模自洽振荡过程中呈现的波导模与自由空间模之间的展开、放大、耦合过程，构成了多模振荡单模输出的选模新概念和新方法。

三、实验研究结果

1. 复合腔参量的选取

作为控模元件的中空波导管管径 a 的选取是基于使最低阶波导模在波导管中的传输损耗足够小的考虑。通常应使腔非涅尔数 N 取在：

$$N = \frac{a}{L\lambda} = 0.5 \sim 1 \quad (5)$$

之间，式中， L 是复合腔腔长； λ 是波长。波导管长 l 的选取是考虑到所能形成波导模的能力，实验研究表明， l/a 比值取成20时，是合宜的。

基于上述的分析，实验选择了 $w_0/a = 0.6435$ 和 $w_0/a = 0.58$ 二种取值，以作比较。

全反镜 M_1 的曲率半径 R_1 和波导管口到 M_1 的间距 Z 的选取是基于所选定的 w_0 值。在腔镜匹配反射条件下，波导腔理论曾给出三个低反射耦合损耗区^[4]，对于复合腔，一个显然的选择是：

$$f = Z, R_1 = 2f \quad (6)$$

式中， f 是共焦参量， $f = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ 。

作为自由空间增益区的大口径放电管管径 D_T 的选取，应考虑到所能容纳的最大振荡模体积和工作介质的扩散冷却效应以及反转粒子数密度的横向分布状态，研究表明^[7]，有关系：

$$D_T = c^2 D_i$$

时，是合理的选取。这里， D_T 是振荡光束直径。

2. 实验结果

复合腔 CO_2 激光器实验装置如图1所示。放电管管径 $D_T = 28\text{mm}$ ，管长 $L_i = 900\text{mm}$ ，气体混合比是 $\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} : \text{Xe} = 1 : 1 : 5 : 0.3$ ，总气压为30 Torr，工作电流35 mA，波导管管径选定 $a = 3.5\text{mm}$ ，管长 l 分别取10 mm，100 mm，200 mm，400 mm，以作比较。输出镜 M_2 为平面镜，到波导口间距为10 mm。

在第一组 $w_0/a = 0.6435$ 的实验中，共焦参量 $f = 1.5\text{m}$ ，据低损耗条件， $Z = f$ ， $R_1 = 2f$ ，取定间距 $Z = f = 1.5\text{m}$ ， M_1 的曲率半径 $R_1 = 3\text{m}$ 。

在腔中放置管长 $l = 10\text{mm}$ 的波导管，如所预期的那样，由于波导管控模能力的不足，而构成了小菲涅尔数腔，实验观察到具有十分类似于共焦非稳腔输出的圆对称环形基模花样（见图2）。这种运转形式的腔的衍射损耗相当大，因此，激光器的输出功率很小，实验测得平均功率密度为 $10\text{W}/\text{cm}^2$ 。

当置换成 $l = 100\text{mm}$ 的波导管时，激光器获得稳定的单横模输出，光斑亮度明显提高。

测得平均输出率密度为 $60\text{W}/\text{cm}^2$ 。图3给出输出光束的远场光强分布和光斑形状,具有准 TEM_{00} 模分布形状。

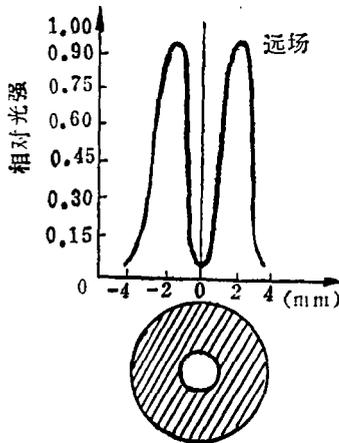


图2 小菲涅尔腔输出光强分布与光斑

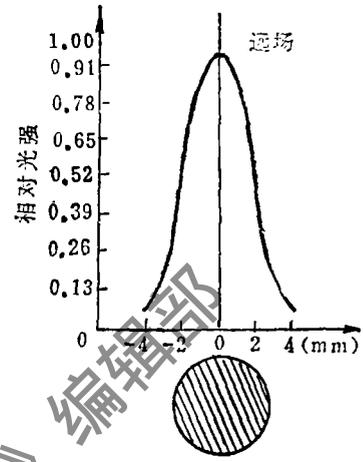


图3 复合腔输出光束的远场分布与光斑

换用更长的波导管,激光器具有同样稳定单模输出。实验观察到,随着管长的增加,输出功率有所下降,这可能与管长增加导致波导模传输损耗的增大有关。实验还有意地放置一根 $\phi 7\text{mm} \times 1200\text{mm}$ 的长波导管,相应的总腔长 $Z = 3100\text{mm}$,在 R_1 仍为 3m 的情况下,如果普通平凹腔,已属非稳区,而复合腔仍能稳定单横模输出,这更证实了我们上述的关于复合腔的运转机理。

在第二组 $w_0/a = 0.53$ 取值的实验中,仍放置 $\phi 7\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的波导管,相应地, $f = 1.02\text{m}$, $Z = f = 1.02\text{m}$, $R_1 = 2\text{m}$,其他条件均保持不变,实验观察到激光器的输出功率较第一组时有显著提高,测得功率密度为 $75\text{W}/\text{cm}^2$,并仍具有类同图3所示的准 TEM_{00} 模的远场光强分布,实验还测量了在镜 M_1 与大放电管口之间的光斑尺寸,结果表明,第二组 w_0/a 取值下的光斑尺寸明显地大于第一组 w_0/a 取值时的光斑尺寸。

四、结 论

理论分析和实验结果表明,由腔内中空波导管选横模的方法是一种获得单横模高功率运转的新途径。其核心是多模振荡单模输出,即把在传统方法中作为损耗、予以撇弃的高阶模能量耦合进单模中输出,而实现在不施加压缩振荡模体积情况,获得单横模运转,使得激光器不仅具有良好的方向性,而且具有多模运转时的功率输出。

有关这种选模机理和波导/自由空间复合腔的研究,尚属初步。事实上,对复合腔场模分布和传输特性的分析,可用更为普遍和有效的方法,例如,采用矩阵计算的数字技术^[5,8],即由迭代计算求得复合腔的任意几何排列的最低阶振荡模与其损耗。这正是我们正在进行的工作。总之,初步的研究结果展示出了这种选模方法的潜力和应用前景。

参 考 文 献

- [1] Heppner J, Appl Opt, 1978; 17; 1488

制作无狭缝二步彩虹全息图的一种新方法

宋立权 洪 晶

(哈尔滨工业大学物理系, 哈尔滨)

摘要: 本文提出了制作无真实狭缝二步彩虹全息图的一种新方法, 移动母片形成多个狭缝的二步彩虹全息。合理地设计了实验光路, 给出了母片移动位移量的范围及有关实验结果。

New technique for two-step rainbow holograph using no actual slit

Song liquan, Hong Jing

(Department of Physics, Haerbin Institute of Technology)

Abstract: A new two-step rainbow holograph technology with no actual slit is proposed. Arranging the experimental optical system properly and translating the master plate, we can synthesize the multisplit and obtain the rainbow holograph. The translation range of the master plate and the experimental results are presented.

一、引 言

A. Beaugerard^[1]等人提出的不用狭缝的三维漫射物体的一步彩虹全息术, 是通过均匀移动成象透镜得到合成狭缝。国承山^[2]从理论分析和实验证明了该合成狭缝是定位在成象透镜所在平面。由于拍摄过程中, 去掉了真实狭缝, 该技术大幅度提高了激光能量的利用率, 是一种有实际应用价值的一步彩虹全息术。

- [2] Chesler R. IEEE J Q E, 1972; QE-8; 493
 [3] Marcatili E A J, Schmeltzer R A. Bell Syst Tech J, 1964; 43; 1783
 [4] Abrams R L. IEEE J Q E, 1972; QE-8; 838
 [5] 马养武. 波导自由空间组合腔激光器研究. 中国激光, 待发表
 [6] Gerlach R, Wel D, Amer N M. IEEE J Q E, 1984; QE-20; 948
 [7] 马养武, 韩用焕. 中国激光, 1988; 15 (4) : 221
 [8] Degnan J J. IEEE J Q E, 1973, QE-9; 901

*

*

*

作者简介: 马养武, 男, 1946年7月出生。副教授。现从事激光技术与器件的研究工作。
 周建英, 请参见本刊1990年, 第14卷, 第3期, 第22页。

收稿日期: 1991年6月19日。 收到修改稿日期: 1991年10月11日。