

场转动环形非稳腔的空间平均效应研究

杨美霞, 岳 通, 钟 鸣, 任 钢
(西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘 要:将光束绕光轴旋转的思想应用于改善固体激光谐振腔失调, 增益不均匀, 泵浦热效应等问题。设计了束转动环形非稳固体激光腔。采用快速傅里叶变换的方法, 对束转动环形非稳腔的空间平均效应进行了数值模拟, 发现对于固体激光器不同的泵浦方式, 光束旋转产生的空间平均效应不同, 其效果与光束旋转特点、泵浦方式、腔的放大率、束转动角度等有关。本文对几种不同形式的增益不均匀进行计算, 对于增益介质横截面一维方向不均匀和角向不均匀的情况, 束转动 90° 环形非稳腔能有效补偿空间不均匀。得到的结论为束转动 90° 环形非稳腔的优化设计和应用提供理论依据。

关键词:激光; UR90; 环形非稳腔; 增益均匀补偿

中图分类号: O436 **文献标识码:** A

Inhomogeneous compensation for unstable ring resonator with beam rotation

YANG Mei-xia, YUE Tong, ZHONG Ming, REN Gang
(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: The idea of rotating the beam around the optical axis is applied in the solid laser resonator to improve mismatching, uneven gain, pump thermal effects and other issues. An unstable ring resonator with beam rotation has been designed. Using fast Fourier transform method, the mode of unstable ring resonator with beam rotation is simulated. It is shown that the compensation effect to uneven factors is different for different pump styles. The average effect of beam rotation is related to the characteristics of the beam rotation, pumping, cavity magnification, beam rotation angle and so on. In this paper, the average effect of beam rotation is compared for several different pumping styles. As to compensating the inhomogeneous gain, it is found that the beam rotation is favorable when the cross-section is uneven at one-dimensional and angular orientation. The conclusion lays the theoretical foundation for designing and application of unstable ring resonator with 90° beam rotation.

Key words: laser; UR90; ring resonator; inhomogeneous gain compensation

1 引 言

激光介质、泵浦源、非线性晶体在激光产生过程中都要产生热量, 这种不可避免的热效应问题, 使得激光器输出光束的光束质量和输出功率受到一定的限制, 甚至给激光的稳定性也提出了难题^[1-2]。在激光器的实际运转过程中, 存在泵浦非均匀, 影响了激光晶体的增益分布, 增益介质轴截面上的径向和角向都会形成增益变化, 影响输出光的均匀性, 使输

出激光的光束质量变差。如何降低由于热效应、泵浦源不均匀、失调等因素对输出激光光束质量的影响是光学谐振腔设计中需要考虑的重要因素。从谐振腔的角度出发, 就是降低其不均匀性, 减小失调灵敏度。束转动 90° 环形非稳腔 (UR90) 的提出是基

作者简介: 杨美霞 (1978 -), 女, 博士, 主要从事强激光技术方面的研究。E-mail: yangmx0430@163.com

收稿日期: 2010-07-12; 修订日期: 2010-11-07

于这一点,利用光场在腔内的旋转,UR90 能够对非均匀激光介质进行空间平均,具有消除因增益介质不均匀导致的光学畸变,提高输出光束质量,减小系统失调灵敏度等优点^[3-5]。文献中提到的 UR90 往往是应用于气体或化学激光器。实际上,UR90 腔也可以应用于固体激光器,克服固体增益介质热畸变和热应力,腔镜热变形,失调,增益不均匀等。然而,UR90 腔形的特点以及优势如何能在固体激光器设计中得到合理利用,这不仅与光束旋转特点有关,还与激光器的泵浦方式有关,为了能够合理应用 UR90 腔,有必要对 UR90 腔随参数、系统失调程度,系统泵浦方式等多种因素的变化关系进行研究。

2 计算模型 UR90 腔

图 1 为束转动 90° 环形非稳腔应用于片状陶瓷激光器的设计。

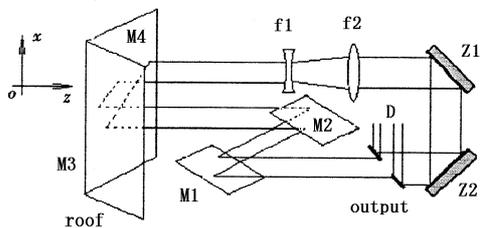


图 1 UR90 腔形图

Fig.1 model of UR90

图 1 中 M3M4 代表一个屋脊镜。凹透镜 f_1 和凸透镜 f_2 构成扩束系统。 Z_1Z_2 是两片端面垂直的 Nd:YAG 陶瓷片,它们共同构成与屋脊镜 M3M4 相对的另一个屋脊镜。陶瓷片向着腔内的表面镀波长为 1064 nm 激光的 45° 增透膜,后表面镀波长为 1064 nm 激光的 23° 内高反膜。D 代表输出耦合椭圆孔光阑,圆孔的半径和增益介质的尺寸决定了系统的放大率。M1M2 代表两个平面反射镜,他们共同实现对光束的空间平移。UR90 腔核心特点是光束旋转、扩束、耦合输出。UR90 腔的光束旋转由两个相对的屋脊镜 M3M4 和 Z_1Z_2 实现,两个屋脊镜的棱位于两个平行的竖直平面内,成空间 45°。图 1 是俯视图,观察面为 $x-z$ 平面, y 轴方向为垂直纸面向外。屋脊镜 Z_1Z_2 的棱位于 $x-y$ 平面,与 y 轴平行,屋脊镜 M3M4 的棱也位于 $x-y$ 平面内,与 y 轴成 45°。在腔内放置望远镜系统对光束进行扩束,同时决定腔的放大率。

3 束转动 90° 环形非稳腔的空间平均效应计算

束转动 90° 环形非稳腔可以起到空间平均的效

果,这一点在高能气体激光器中已得到应用。UR90 腔不仅具有常规非稳腔的优点:如模体积大,耦合输出可以控制,横模分辨率高等,而且,光束在腔内环形的过程中,旋转和扩束交替进行,所以光束每次环形一周到达增益介质时,将扫过增益介质的不同区域。空间平均轨迹如图 2 所示。

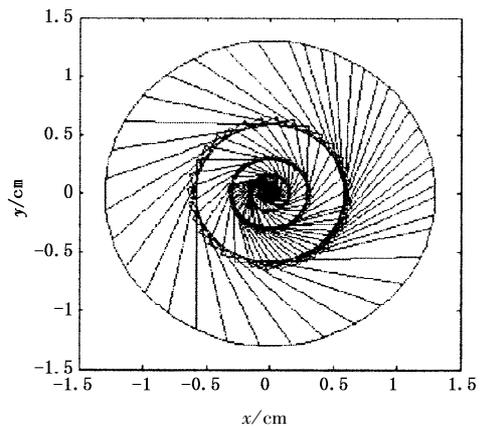


图 2 空间平均轨迹图

Fig.2 beam at the surface of gain medium

光束的旋转使增益分布引起的不均匀得到补偿,减小了腔的失调灵敏度,减小畸变对模场的扰动。然而针对增益不均匀特性的不同情况,UR90 腔的补偿效果有差别。这里采用几种不同的模型对上述情况进行研究,得到的结论有助于 UR90 腔得到更好的应用,对该腔与泵浦技术相结合的设计提供理论依据。

3.1 两组二极管线阵侧泵

首先计算图 3 所示的不均匀情况,对应的泵浦方式为两组二极管线阵侧泵。由于片状增益介质的厚度很薄,可将薄片轴向的泵浦光吸收看成是均匀的,因此只需考虑薄片轴向上某一截面内的泵浦光吸收分布情况就可知道整个泵浦光的分布情况,假设增益分布与泵浦光吸收分布呈线性关系。根据高斯光束传播,以及介质对泵浦光的吸收,计算一组二极管线阵泵浦情况下介质内的泵浦光分布,再将其分布按照一定角度旋转后再叠加,得到多组二极管线阵泵浦的泵浦光分布情况^[6],定性得到介质内的增益分布。角度的旋转通过坐标轴变换来实现。图 3(a) 表示两组二极管线阵泵浦光在增益介质中的分布,显示出不均匀特性。将不均匀特性带入激光谐振腔模式计算^[7],得到常规环形非稳腔和 UR90 腔的输出激光光强分布,如图 3(b)、图 3(c) 所示,计算中采用放大率为 1.3。

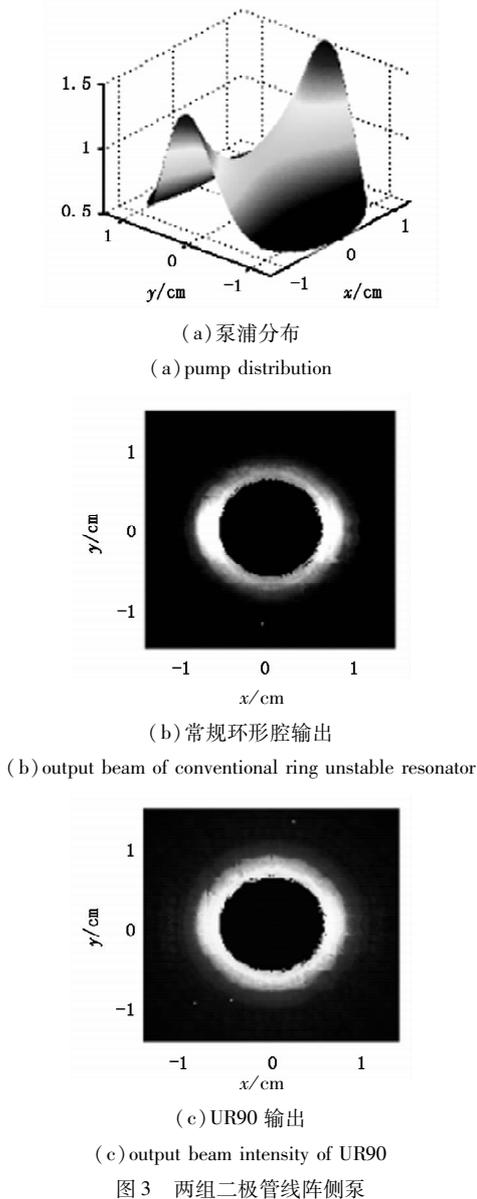


Fig. 3 side pumped by two sets of LDA

图3(b)为常规环形腔的计算结果,可以看到由于增益不均匀的积累,输出光束呈现强弱分布不均匀,对应泵浦光分布较强的位置输出光强度较强,光强分布不均匀影响了光束质量。图3(c)是采用UR90腔的计算结果。可以看出,光强分布比较均匀。所以对于这种增益不均匀分布,采用UR90腔可以起到空间平均化的作用。

3.2 五组二极管阵列侧面泵浦

图4(a)为五组二极管阵列侧泵圆片介质模型计算得到介质中泵浦光分布。计算方法与前面叙述的相同。将不均匀分布代入常规环形腔和UR90腔,计算得到光场分布分别如图4(b)、图4(c)所示。可以看到两者并无大的差别,说明光场不旋转时,并没有形成不均匀增益的积累,这是因为光场在

腔内每环形一周,经过圆孔光阑输出镜时边缘反射输出,中心透射放大,所以只有中心透射部分才会在下一次环形时经过增益介质,而该增益分布的特征是中心部分角向分布基本均匀。经过边缘角向不均匀区域的光场是前一次环形过程中经过中心均匀部分的光场,所以不会形成不均匀增益的积累。若采用平平腔,势必会形成不均匀效应的积累。所以这种不均匀分布只需采用放大率合适的非稳腔即可避免不均匀积累。

如果增益介质对泵浦光的吸收较强,则增益分布的中心角向均匀部分面积会缩小,甚至消失,此时采用常规腔会形成不均匀积累,那么,这种情况下UR90腔的光束旋转特点就会起到改善光束质量的作用。

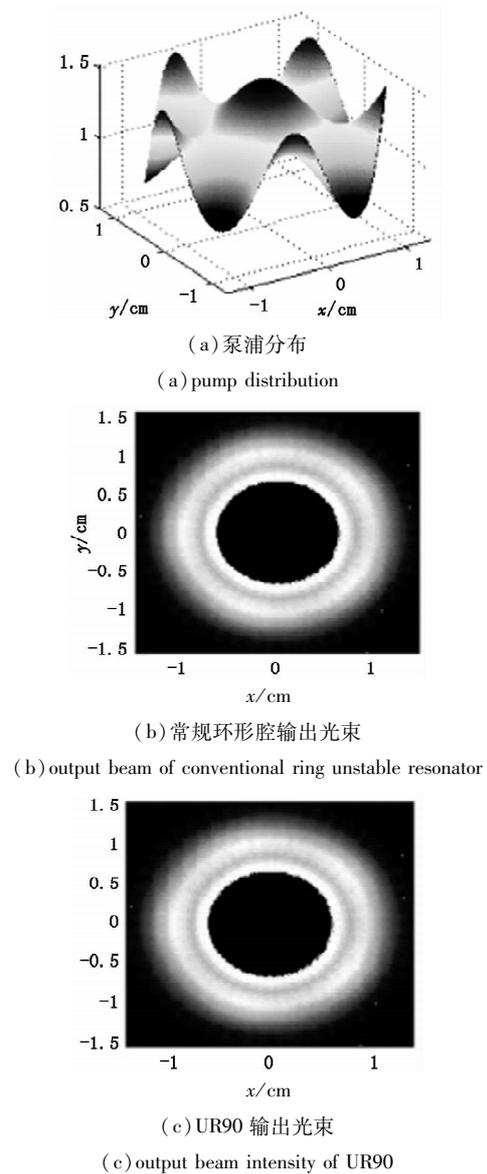


Fig. 4 side pumped by five sets of LDA

3.3 闪光灯端面泵浦片状增益介质的平均化效果

图5为灯端泵的情况,图5(b)、图5(c)分别为常规腔与UR90腔的输出光束。泵浦光在增益介质中的分布如图5(a)所示,泵浦分布的计算中将闪光灯离散成N个点光源,按照球面波传播模型得到增益介质表面光强分布,由于薄片增益介质厚度可以忽略,认为轴向泵浦光分布不变。由计算结果图5(b)、图5(c)比较可知,UR90腔的输出光束均匀性优于常规环形腔的输出光束。在这种泵浦方式下,场转动可以改善光强分布的均匀性。

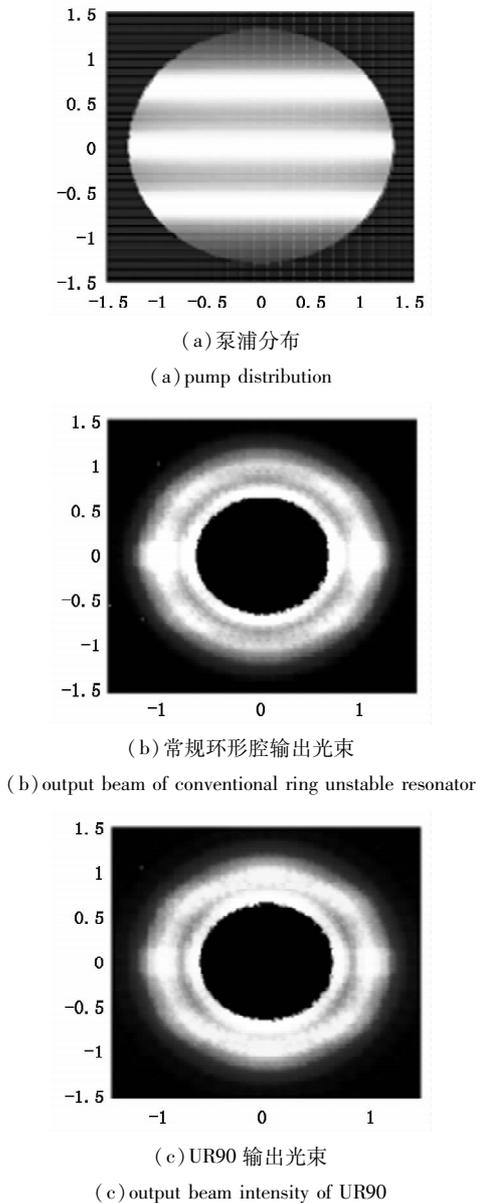
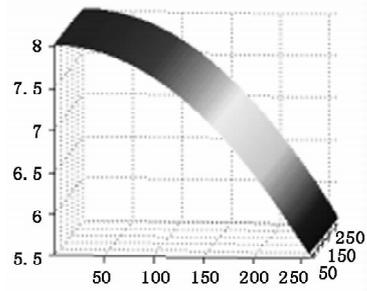


图5 灯端面泵浦片状增益介质
Fig.5 end-pump by flash lamp

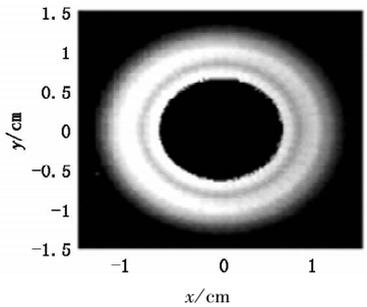
3.4 抛物线型增益分布的平均化效果

UR90腔已被广泛的应用于气体激光器,气体激光器中的流动增益介质因为气体分子浓度的变化

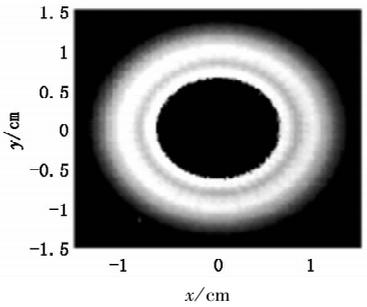
梯度而形成一维不均匀增益,沿着气体流动的方向呈抛物线形分布。对于这种一维增益分布不均匀,无论放大率大小,都可以采用UR90腔,均能起到很好地平均化效果。如图6(b)为常规腔输出光束,光强沿增益减小的方向呈衰减趋势,图6(c)为采用UR90腔的计算结果,可以看出,UR90改善了光束质量,使光强分布变得均匀。



(a) 泵浦分布
(a) pump distribution



(b) 常规环形腔输出光束
(b) output beam of conventional ring unstable resonator



(c) UR90 输出光束
(c) output beam intensity of UR90

图6 抛物线型增益分布

Fig.6 parabolic gain distribution

另外,对于常见的其他泵浦方式,例如二极管阵列端面泵浦、增益介质的不均匀性相对不明显,而且分布为中心对称,轴对称,径向近似,所以采用UR90腔的光束旋转特性并不会有利于增益分布的平均化。另外,四灯侧泵的泵浦方式,角向分布的不均匀性是90°旋转对称的,这时采用UR90腔也不会有利于增益均匀化。可选取合适的场转动角度 θ ,这个

角度的选取和控制通过调节两个屋脊镜的棱所成空间角度来实现, θ 等于两条棱空间角度的二倍。

4 总 结

自1986年提出以来,人们分别在UR90腔的理论和应用方面做了许多工作,取得好的结果。但就其对增益分布不均匀,热效应等现象的补偿效果,却并没有详细讨论,这对于UR90腔应用于固体激光器,改善光束质量是非常有必要的。本文利用UR90腔模式的快速傅里叶变换方法,从增益不均匀角度出发,计算了几种不同泵浦方式下,UR90腔的空间平均效应。首先,UR90腔的光束旋转特性能够对不均匀增益均匀化,得到比常规腔更加均匀的输出光束。UR90腔往往只适用于一维不均匀的情况,例如文中提到的抛物形增益分布,双二极管阵列端泵等情况。同时,按照空间效应的分析结果,除了克服增益分布不均匀外,UR90的空间平均效应还可以抗系统倾斜失调、象散失调的作用,可以改善由热效应、腔镜热变形而变差的激光光束质量。

参考文献:

- [1] Yi Xuebin, Chen Hongming, Zhong Ming, et al. Experimental study of the thermal lens effect of Nd:glass laser in heat capacity operation [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(1):44-47. (in Chinese)
衣学斌,陈鸿鸣,钟鸣,等. 钕玻璃激光器热容方式运行的热负透镜效应实验研究[J]. *激光与红外*, 2007, 37(1):44-47.
- [2] Wang Mingzhe, Li Mingzhong, Tan Jichun, et al. Research on thermal effect in high power diode end-pumped Nd:YLF disk laser amplifier[J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(4):322-325. (in Chinese)
王明哲,李明中,谭吉春,等. 高功率LD阵列端泵Nd:YLF片状放大器热效应研究[J]. *激光与红外*, 2007, 37(4):322-325.
- [3] Jin Yuqi, Zhao Tong, Xu Wengang, et al. Investigation of UR90 with aperture output beam for a chemical oxygen Iodine laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 11(5):513-516. (in Chinese)
金玉奇,赵彤,徐文刚,等. 氧碘化学激光器束转动90°环形非稳腔空心光束输出研究[J]. *强激光与粒子束*, 1999, 11(5):513-516.
- [4] Jin Yuqi, Sang Fengting, Yang Bailing, et al. Investigation of UR90 outputting annular beam for a chemical oxygen Iodine laser [J]. *Proc. SPIE*, 2001, 4184:70-74.
- [5] Alan H Paxton, William P Latham Jr. Unstable resonators with 90° beam rotation [J]. *Applied Optics*, 1986, 25(17):2939-2946.
- [6] Yao Jian quan, Xu De gang. All solid state laser and non-linear optical frequency conversion technology [M]. Beijing: Science Press, 2007:179-181. (in Chinese)
姚建铨,徐德刚. 全固态激光与非线性光学频率变换技术[M]. 北京:科学出版社,2007:179-181.
- [7] Yang Meixia, Zhong Ming, Xia Huijun, et al. Design and numerical simulation for unstable ring resonator with 90° beam rotation employed in ceramic YAG disk laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, 37(10):2472-2476. (in Chinese)
杨美霞,钟鸣,夏惠军,等. 片状陶瓷激光器的束转动90°环形非稳腔设计与数值模拟[J]. *中国激光*, 2010, 37(10):2472-2476.