

高功率脉冲 CO_2 激光器 9.3 μm 波长选支研究

邵春雷 杨贵龙 李殿军 郭 劲

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 为获得中心波长 9.3 μm 激光的高功率输出, 利用高功率脉冲 CO_2 激光器进行选支实验研究。采用腔镜镀膜选支技术, 通过控制对不同波长的透射率或反射率参数, 在稳定腔和非稳腔中都得到了中心波长 9.3 μm 激光的单谱线输出。在相同工作参数下, 稳定腔中心波长 9.3 μm 激光的能量为其原中心波长 10.6 μm 激光的 95%, 非稳腔中心波长 9.3 μm 激光的能量为其原中心波长 10.6 μm 激光的 93%, 两种腔型中心波长 9.3 μm 激光热敏纸光斑颜色与中心波长 10.6 μm 激光的有明显不同。实验表明, 采用腔镜镀膜选支技术在稳定腔和非稳腔中都能获得中心波长 9.3 μm 激光的单谱线输出, 且激光能量与原腔型输出中心波长 10.6 μm 激光的基本相当。激光热敏纸光斑显示出在相同单脉冲能量作用下, 中心波长 9.3 μm 激光对物质的冲蚀作用高于中心波长 10.6 μm 的激光。

关键词 激光技术; 脉冲 CO_2 激光器; 9.3 μm 波长; 镀膜选支; 稳定腔; 非稳腔

中图分类号 TN248.2+2 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0302008

9.3 μm Branch Selection Research of High Power Pulse CO_2 Laser

Shao Chunlei Yang Guilong Li Dianjun Guo Jin

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract For obtaining high power 9.3 μm laser, high power pulse CO_2 laser is used to select band. Band selection is done by resonator mirror filming. By controlling the transmittance or reflectivity of different wavelengths, 9.3 μm laser is got both in stable resonators and unstable resonators. With the same operation parameters, the energy of 9.3 μm laser is 95% of 10.6 μm in stable resonators, while 93% in unstable resonators. Both in two different resonators, the thermosensitive paper colors by 9.3 μm laser are evidently different from those by 10.6 μm laser. Experimental results show that the resonator mirror filming method can lead 9.3 μm laser output both in stable and unstable resonators, and the energy is changing slightly. The thermosensitive paper displays the 9.3 μm laser has stronger impact erosion than the 10.6 μm laser.

Key words laser technique; pulse CO_2 lasers; 9.3 μm wavelength; band selection by filming; stable resonator; unstable resonator

OCIS codes 140.3325; 140.3410; 140.3470; 140.3538; 140.3600

1 引 言

CO_2 激光在 9~11 μm 波段有上百条谱线, 通常输出增益最大的为 10.6 μm 波长激光, 要想得到其他波长激光, 需要采用特定的波长选支技术^[1~4]。随着高功率脉冲 CO_2 激光器的不断发展, 其在激光加工、激光雷达、激光推进、激光大气传输和激光化学等领域的应用日趋增多^[5~8], 对波长选支输出的要求也不断增加。例如, 在研究激光与物质相互作用时, 人们不仅需要输出 10.6 μm 波长激光, 还需要

输出 9.3 μm 波长激光, 以研究在相同输出能量(功率)下不同波长激光对物质的作用效果。近年来为获取高功率中波红外激光, 采用输出 9.3 μm 波长的脉冲 CO_2 激光器为光源照射特种晶体进行倍频, 得到 4.65 μm 波长激光输出, 也是重要的研究方向^[9]。脉冲 CO_2 激光器常用的波长选支技术有注入锁定、法布里-珀罗(F-P)标准具调谐(F-P 耦合腔)以及光栅调谐^[10~13]。其中注入锁定难以得到单一波长输出, 且结构复杂, 不适宜工程应用; F-P 标准具调谐

收稿日期: 2010-09-01; 收到修改稿日期: 2010-11-01

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿项目(072Z32C070)资助课题。

作者简介: 邵春雷(1963), 男, 研究员, 主要从事高功率脉冲气体激光技术方面的研究。E-mail: sclem@sina.com

只适用于激光增益长度很短的情况,不能得到高能激光输出;光栅调谐虽然因具有很好的波长选择能力而被广泛采用,也因受到光栅损伤阈值的限制,无法满足输出数千瓦以上高平均功率脉冲激光的要求。

高功率脉冲 CO_2 激光器的光学谐振腔通常采用稳定腔,这种腔型的光束发散角较大。为改善激光器性能,获得小的光束发散角,人们致力于采用光学非稳腔在保证较高功率输出的同时来提高光束质量^[14,15]。本文针对采用光学稳定腔和非稳腔的高功率脉冲 CO_2 激光器,为实现中心波长 $9.3\text{ }\mu\text{m}$ 激光高功率选支输出开展研究工作。为满足输出高平均功率要求,避免出现光学元件损伤,减少激光能量损耗,保证输出光束质量与指向性的稳定,不能在光学谐振腔中再插入任何光学元件。基于这种需求,结合激光在光学谐振腔中振荡放大竞争输出原理和现有光学镀膜技术,采用腔镜镀膜选支技术,在稳定腔和非稳腔中都实现了中心波长 $9.3\text{ }\mu\text{m}$ 激光的单谱线输出,其脉冲能量与两种腔型原输出中心波长 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 激光的脉冲能量基本相当。通过激光器重复频率满负荷发射实验表明,该技术能够满足高平均功率 $9.3\text{ }\mu\text{m}$ 波长选支输出的要求。

2 腔镜镀膜选支技术原理

CO_2 激光按能级跃迁辐射原则分为 10P, 10R, 9P 和 9R 4 支谱线,相对应的中心波长分别为 10.6 , 10.2 , 9.6 和 $9.3\text{ }\mu\text{m}$,其中增益最强的是中心波长为 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 的谱线。激光器光学谐振腔最少由两个腔镜构成,安放在激光增益介质的两端。各腔镜的镀膜特性通常对 $9\sim 11\text{ }\mu\text{m}$ 波段范围具有相同或相近的反射率(或透射率),众多激光谱线在光学谐振腔中以一种自由竞争的模式振荡放大,由于 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 的增益最高,因此通常输出的是中心波长 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 的激光。如果对其他波段选支发射,其输出功率就会有所减小。

在相应腔镜上镀有不同特性的光学膜层,增大不需要波长的激光辐射在光学谐振腔中的损耗,使选支波长激光在光学谐振腔内产生振荡放大定向输出。按此思路,为实现中心波长 $9.3\text{ }\mu\text{m}$ 的激光输出,需要设计新的腔镜镀膜特性曲线,使对中心波长 $9.3\text{ }\mu\text{m}$ 激光的反射率高于对中心波长 9.6 , 10.2 和 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 激光的反射率,或提高对后 3 条谱线的透射率,以增大它们在光学谐振腔中的损耗,从而抑制它们产生振荡放大,使中心波长 $9.3\text{ }\mu\text{m}$ 激光能够唯

一地在光学谐振腔内振荡放大实现高功率(能量)输出。

3 稳定腔 $9.3\text{ }\mu\text{m}$ 选支输出实验

利用一台高功率脉冲 CO_2 激光器进行选支实验研究,放电截面为 $45\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 。所有实验都采用相同的工作参数,用加拿大产 Gentec-EO 激光能量计在距出光口 300 mm 处测试激光单脉冲能量,用中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的 CO_2 激光谱线分析仪测试激光波长,用热敏纸在距出光口 500 mm 处接收激光光斑。

该激光器光学谐振腔为 平凹 稳定腔,由铜质凹面全反射镜(曲率半径为 18 m)和 ZnSe 平面部分反射镜即输出镜构成,腔长为 2 m 。图 1 为输出镜镀膜特性测试曲线,各中心波长及对应的透射率为: $9.3\text{ }\mu\text{m}$, 78% ; $9.6\text{ }\mu\text{m}$, 76% ; $10.2\text{ }\mu\text{m}$, 72% 和 $10.6\text{ }\mu\text{m}$, 70% 。以单脉冲方式发射激光,激光热敏纸光斑如图 2 所示,激光谱线测试结果为中心波长 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 的单条谱线。

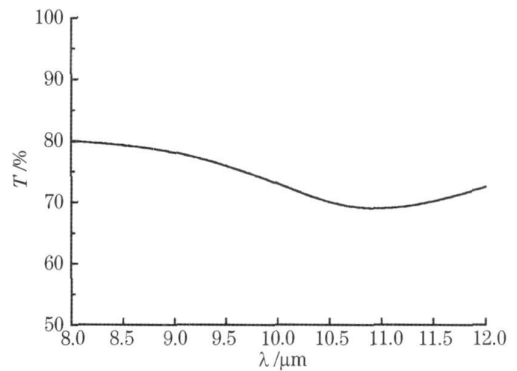


图 1 原输出镜镀膜测试曲线

Fig. 1 Testing curve of original output coupler filming

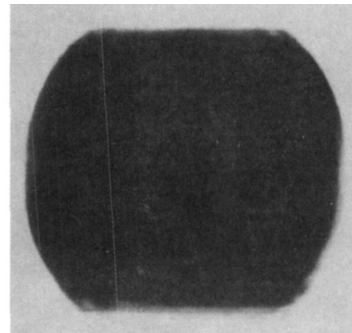


图 2 原输出镜输出中心波长为 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 的激光光斑

Fig. 2 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ laser spot of original output coupler

为得到中心波长 $9.3\text{ }\mu\text{m}$ 的激光,需要对输出镜镀膜特性进行改进设计。对输出镜镀膜不同中心波长下透射率的初步设计要求为: $9.3\text{ }\mu\text{m}$, 60% ;

9.6 m, 80%; 10.2 m, 95% 和 10.6 m, 98%。因现有镀膜技术限制, 无法完全达到设计特性要求, 只能是在保证主要波长即9.3 m的透射率要求基础上, 其他的尽量靠近设计要求。图3是输出镜首次选支镀膜的测试曲线, 各波长及对应透射率为: 9.3 m, 59%; 9.6 m, 68%; 10.2 m, 92% 和 10.6 m, 96%。采用此腔镜进行实验, 激光脉冲能量约为原输出中心波长10.6 m单条谱线能量的97%; 激光谱线测试结果是输出了中心波长为9.6 m, 9.3 m两条谱线。

首次镀膜选支实验成功抑制了中心波长10.6 m, 10.2 m谱线输出, 证明研究方向是正确的。对于此次输出了中心波长9.6 m, 9.3 m两条谱线, 分析其原因为: 由于中心波长9.6 m谱线是仅次于中心波长10.6 m的强线, 且与9.3 m位置很近, 现有镀膜技术无法按设计要求使这两条谱线的透射率相差更大, 使中心波长9.6 m谱线在光学谐振腔中仍能产生很大的增益。为得到中心波长9.3 m的单条谱线输出, 还需抑制中心波长9.6 m谱线的振荡放大, 因此需再提高镀膜对9.6 m的透射率, 进一步增大其在光学谐振腔中的损耗。对输出镜镀膜特性的改进设计 requirements 是: 将图3的透射率曲线左移, 使对中心波长9.6 m激光的透射率达到80%, 并保持对中心波长10.6 m和10.2 m激光的高透射率。图4是输出镜第二次镀膜的测试曲线, 各波长及对应透射率为: 9.3 m, 68%; 9.6 m, 80%; 10.2 m, 97% 和 10.6 m, 98%。采用此腔镜再进行实验, 激光脉冲能量约为原输出中心波长10.6 m单条谱线能量的95%; 激光谱线测试结果得到了中心波长9.3 m单条谱线输出; 激光单脉冲光斑如图5所示, 与图2所示能量相当的中心波长10.6 m单谱线光斑比较, 相同的是能量分布都比

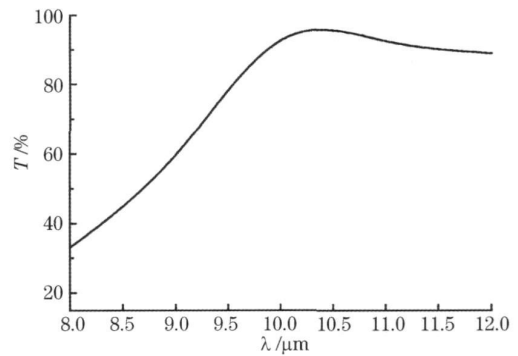


图4 第二次镀膜测试曲线

Fig. 4 Testing curve of the second time filming

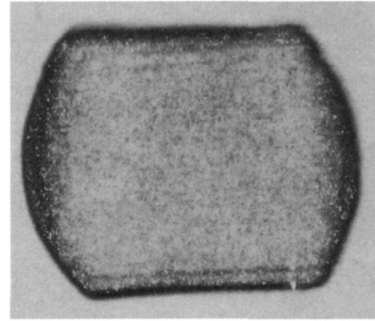


图5 第二次镀膜中心波长9.3 m的输出激光光斑

Fig. 5 9.3 m laser spot of the second time filming

较均匀, 不同的是光斑颜色白黑分明。

对于图5的激光热敏纸光斑, 白颜色并不是热敏纸的本体颜色, 而是被激光照射后将因热效应变为炭黑的部分冲蚀掉的现象。在以往研究中, 只输出中心波长10.6 m的激光光斑, 在单脉冲能量达到图2所示光斑能量1.5倍以上时, 才会出现有明显的变白现象。而此次输出中心波长9.3 m谱线的激光能量还略低于图2所示光斑的能量, 这说明是因激光波长不同而产生了不同的作用效果。由于光具有波粒二象性, 波长为 λ 的光子能量 $p = hc/\lambda$, 其中 h 为普朗克常数, c 为真空中光速。由此可知, 若波长变小, 则光子能量变大。因此, 在相同脉冲能量下不同波长激光对物质的作用效果就会有所不同, 短波长激光因光子能量较高对物质的冲蚀作用更加明显。

4 非稳腔9.3 m选支输出实验

对激光器光学谐振腔进行改造, 采用高功率激光器通常采用的虚焦正分支非稳腔方案, 由一个大铜质凹面反射镜(曲率半径为12 m, 外径为76 mm)和一个小铜质凸面反射镜(曲率半径为8 m, 外径为25 mm)构成光学谐振腔, 腔长为2 m, 激光输出窗

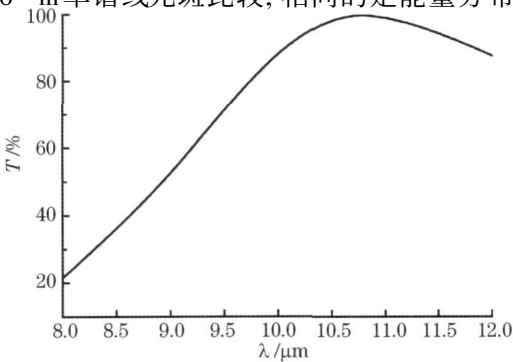


图3 首次镀膜测试曲线

Fig. 3 Testing curve of the first time filming

口采用 ZnSe 全透输出镜(如图 6 所示)。这是一种望远镜型非稳腔,虚共焦点在谐振腔外。激光振荡只在凹、凸面反射镜间进行,在相同的结构参数下,两个反射镜的反射率越高,激光输出的能量越大。激光沿小凸面反射镜边缘输出,在近场形成一个中空的环形光斑。

在通常研究中,凹、凸面反射镜表面镀的是对红外光谱具有高反射率(99%以上)的金膜。采用单脉冲工作方式进行实验,激光脉冲能量约为原稳定腔输出10.6 μm 单条谱线能量的 72%,激光谱线测试结果是中心波长为10.6 μm 的单条谱线,激光输出光斑如图 7 所示。

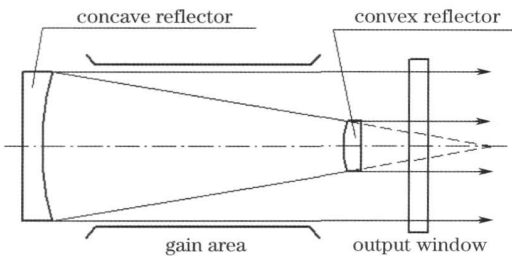


图 6 虚焦正分支非稳腔

Fig. 6 Virtual confocal positive branch unstable resonator

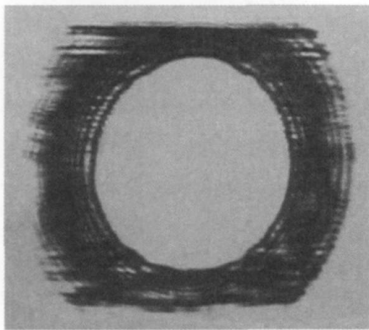


图 7 原非稳腔10.6 μm 激光光斑

Fig. 7 10.6 μm laser spot of original unstable resonator

非稳腔与稳定腔有显著的不同:光束在两腔镜构成的谐振腔中经过有限次的振荡后即逸出腔外。由于存在较大的偏折损耗,使能级反转粒子不能得到充分利用,故其激光能量比稳定腔低很多。延续稳定腔腔镜镀膜选支思路,要在非稳腔中得到中心波长9.3 μm 的单谱线激光较高的能量输出,应对非稳腔两个腔镜中的 1 或 2 个镀特种介质膜,使其对 9.3 μm 中心波长有很高的反射率,而对中心波长 9.6 μm 和10.6 μm 的激光反射率较低,使中心波长 9.3 μm 的激光在振荡竞争中取得绝对优势。

参照图 4 所示稳定腔得到中心波长9.3 μm 单谱线输出的腔镜镀膜特性,对非稳腔两个腔镜中 1

或 2 个镀膜特性要求,应满足光束在 2 个反射镜间振荡往返一次(光束在两腔镜间振荡往返一次的实际反射率为两腔镜反射率的乘积)时对中心波长 9.3 μm 激光的反射率高于对中心波长9.6 μm 激光反射率 12% 以上、高于对中心波长10.6 μm 激光反射率 30% 以上的条件。然而在实施中,现有镀膜技术在铜质反射镜上镀介质膜时,在保证对中心波长 9.3 μm 激光具有高反射率(大于 98%)时只能做到如图 8 所示的反射率曲线。其中对中心波长 9.3 μm 激光的反射率约为 98%,对中心波长 9.6 μm 激光的反射率约为 96.5%,对中心波长 10.6 μm 激光的反射率约为 84.5%。将非稳腔两个腔镜都按图 8 的反射率曲线镀膜后进行实验,得到:只输出了中心波长9.6 μm 的激光,抑制住了中心波长10.6 μm 的激光,没有获得中心波长9.3 μm 的激光。激光脉冲能量约为非稳腔原输出中心波长 10.6 μm 激光单条谱线能量的 89%。

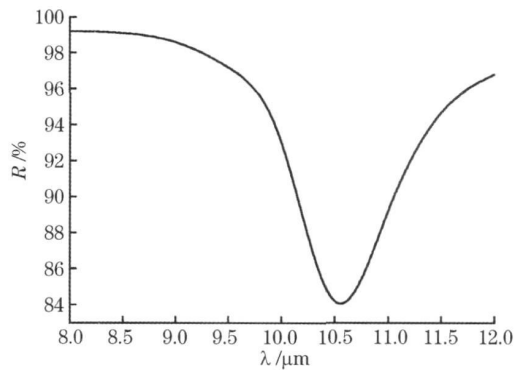


图 8 非稳腔首次镀膜测试曲线

Fig. 8 Testing curve of the first time unstable resonator filming

实验结果与分析吻合,即对中心波长9.3 μm 和 9.6 μm 激光间的反射率差值过小。同样参照稳定

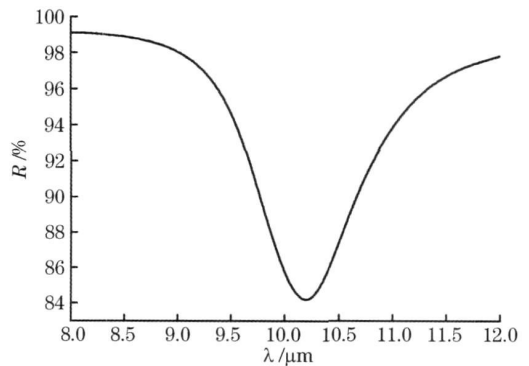


图 9 非稳腔第二次镀膜测试曲线

Fig. 9 Testing curve of the second time unstable resonator filming

腔的研究过程, 将图 8 的反射率曲线左移, 以增大对中心波长9.3 μm和9.6 μm激光间的反射率差值, 如此得到如图 9 所示的镀膜特性曲线。其中对中心波长9.3 μm激光的反射率约为97.5%, 对中心波长9.6 μm激光的反射率约为93%, 对中心波长10.6 μm激光的反射率约为89%。再将非稳腔两个腔镜都按图 9 特性镀膜后进行实验, 却又得到了中心波长10.6 μm激光单谱线输出, 这是由于对中心波长10.6 μm激光反射率的提高造成的。

在参照稳定腔腔镜镀膜选支方案无法得到中心波长9.3 μm激光单谱线输出情况下, 又提出: 结合现有镀膜技术对两个腔镜分别进行不同特性的镀膜, 在保证对中心波长9.3 μm的激光都具有高反射率(大于98%)的条件下, 使一个腔镜对中心波长9.6 μm激光的反射率最小, 且不控制对中心波长10.6 μm激光的反射率大小; 另一个腔镜对中心波长10.6 μm激光的反射率最小, 且不控制对中心波长9.6 μm激光的反射率大小。这样, 激光在两个腔镜间振荡放大竞争输出时, 对中心波长9.6 μm激光反射率最小的腔镜能够抑制中心波长9.6 μm激光

输出, 对中心波长10.6 μm激光的反射率最小的腔镜能够抑制中心波长10.6 μm的激光输出, 从而实现只输出中心波长9.3 μm的激光。

图 10 为两个腔镜分别镀制不同特性薄膜的测试曲线。图 10(a)为对中心波长9.3 μm激光的反射率约为99%, 对中心波长9.6 μm激光的反射率约为20%, 对中心波长10.6 μm激光的反射率约为99%的曲线; 图 10(b)为对中心波长9.3 μm激光的反射率约为99%, 对中心波长9.6 μm激光的反射率约为99%, 对中心波长10.6 μm激光的反射率约为20%的曲线。假如非稳腔两个腔镜中的1或2个按图 10(a)镀膜, 激光输出的中心波长必然是10.6 μm; 若按图 10(b)镀膜, 激光输出的中心波长较大概率是9.6 μm。而将两个腔镜分别镀膜后进行实验, 则实现了非稳腔中心波长9.3 μm的单谱线激光输出。激光脉冲能量约为非稳腔原输出中心波长10.6 μm激光单条谱线能量的93%。图 11 为激光光斑, 与图 7 输出中心波长10.6 μm激光的光斑相比同样是白黑分明, 再次说明了不同波长激光对物质的作用效果不同。

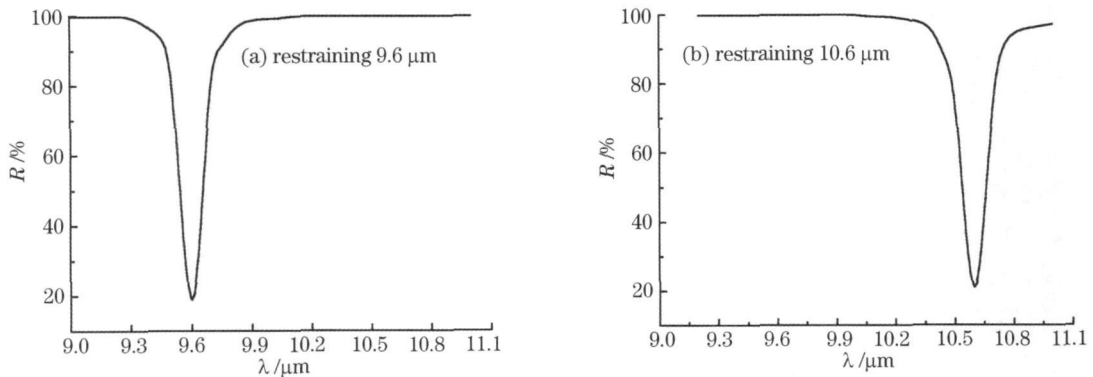


图 10 非稳腔第三次镀膜测试曲线

Fig. 10 Testing curve of the third time unstable resonator filming

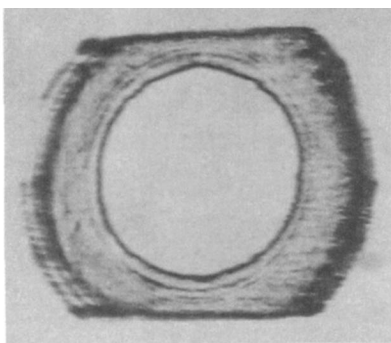


图 11 非稳腔中心波长 9.3 μm 激光光斑

Fig. 11 9.3 μm laser spot of unstable resonator

为进一步确认实验结果, 将非稳腔两个腔镜按图 10 中两种特性曲线互换镀膜后实验结果相同。

另外, 在按最后的方案实施时, 曾担心会输出中心波长 10.2 μm 的激光, 而多次实验结果显示没有出现这种情况, 在稳定腔的选支实验中也是从未输出过中心波长 10.2 μm 的激光, 这似乎表明在相同的参数条件下, 中心波长 10.2 μm 的激光在 4 支谱线中的竞争力是最弱的。

5 重复频率满负荷发射实验

对稳定腔和非稳腔输出中心波长9.3 μm激光的镀膜腔镜分别进行重复频率满负荷发射实验。由于高功率脉冲 CO₂ 激光器不能如连续 CO₂ 激光器那样持续地长时间运转, 因此采用了每发射1 min,

间歇5 min的运行模式进行循环工作,激光器的所有工作参数都与原输出中心波长10.6 μm 激光的最高平均功率时相同,并采用了工作气体自动充排气措施以减缓因气体劣化对输出功率的影响。两种腔型实验激光累积发射时间都为20 min,采用CO₂激光谱线分析仪对发射前后输出波长进行检测,两种腔型输出激光波长都没有发生变化。

6 结 论

高功率脉冲CO₂激光器通常输出中心波长10.6 μm 的激光,若想得到功率大于数千瓦的中心波长9.3 μm 的激光,原有常用的波长选支技术如注入锁定、E-P标准具调谐和光栅调谐都不能满足工程实用要求。采用腔镜镀膜选支技术,利用一台高平均功率脉冲CO₂激光器,分别针对光学稳定腔和非稳腔进行了实验研究,在两种腔型中都得到了中心波长9.3 μm 激光的单谱线输出。在相同工作参数下,稳定腔输出的中心波长9.3 μm 激光能量为其原中心波长10.6 μm 激光的95%,非稳腔输出的中心波长9.3 μm 激光能量为其原中心波长10.6 μm 激光的93%。实验表明采用该技术在两种腔型都能实现中心波长9.3 μm 激光单谱线输出,且激光能量与原腔型输出中心波长10.6 μm 激光的基本相当。研究中发现,在相近的单脉冲能量下,中心波长9.3 μm 激光热敏纸光斑颜色与中心波长10.6 μm 激光的有明显不同,显示出较短波长(9.3 μm)激光光子能量高,对物质的冲蚀作用高于较长波长(10.6 μm)的激光。激光器重复频率满负荷发射实验表明,腔镜镀膜选支技术在稳定腔和非稳腔中都能满足中心波长9.3 μm 激光的高平均功率选支输出要求。

参 考 文 献

- Liao Junmei, Li Yude, Li Zhonghua *et al.*. Multi-frequency transversely excited atmospheric pressure CO₂ laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(10): 1459~ 1461
廖均梅, 李育德, 李忠华 等. 可调谐TEA CO₂激光器多频输出[J]. 强激光与粒子束, 2009, **21**(10): 1459~ 1461
- Wang Yunfei, Wu Jin, Liu Shiming *et al.*. Tunable characteristic of long pulse TE CO₂ laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(2): 226~ 229
王云飞, 吴 谨, 刘世明 等. 长脉冲TE CO₂激光器的调谐特性[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(2): 226~ 229
- Xie Jijiang, Li Dianjun, Zhang Chuansheng *et al.*. Acousto-optically Q-switched CO₂ laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(5): 1008~ 1013
谢冀江, 李殿军, 张传胜 等. 声光调Q CO₂激光器[J]. 光学精密工程, 2009, **17**(5): 1008~ 1013
- Ji Hongxu, Tan Rongqing, Liu Shiming *et al.*. Grating line selectable TEA CO₂ laser with tubulous preionizer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2389~ 2394
吉洪煦, 谭荣清, 刘世明 等. 基于管状预电离的光栅选线TEA CO₂激光器[J]. 中国激光, 2010, **37**(9): 2389~ 2394
- Zheng Yijun, Tan Rongqing, Ke Changjun *et al.*. The study of laser propulsion base on tunable TEA CO₂ laser [J]. *Laser Journal*, 2006, **27**(6): 22~ 23
郑义军, 谭荣清, 柯常军 等. 基于调谐TEA CO₂激光推进的研究[J]. 激光杂志, 2006, **27**(6): 22~ 23
- A. I. Karapuzikov, A. N. Malov, I. V. Sherstov. Tunable TEA CO₂ laser for long-range DIAL lidar [J]. *Infrared Phys. & Technol.*, 2000, **41**(2): 77~ 85
- Lu Yuantian, Wu Jin, Wang Donglei *et al.*. Long-pulse TE CO₂ laser with high energy [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(9): 1437~ 1440
卢远添, 吴 谨, 王东蕾 等. 大能量长脉冲TE CO₂激光器[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(9): 1437~ 1440
- V. Hasson. Review of recent advancements in the development of compact high power CO₂ laser radar system [C]. *SPIE*, 1999, **3707**: 499~ 512
- Li Dianjun, Yang Guilong, Xie Jijiang *et al.*. Experiments of second harmonic generation of 9.3 μm pulsed CO₂ Lasers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(11): 2684~ 2691
李殿军, 杨贵龙, 谢冀江 等. 9.3 μm 脉冲CO₂激光倍频试验[J]. 光学精密工程, 2009, **17**(11): 2684~ 2691
- Tan Rongqing, Wang Chongyi, Wu Jin *et al.*. Investigation on tunable high repetition rate TEA CO₂ laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 739~ 742
谭荣清, 万重怡, 吴 谨 等. 高重复频率可调谐TEA CO₂激光研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(6): 739~ 742
- Xu Defu, Li Yude, Chen Mei. Theoretic model of same space dual-wavelength tunable TEA CO₂ laser [J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(5): 441~ 444
许德富, 李育德, 陈 梅. 具有同空间特性的双频可调谐TEA CO₂激光器研究[J]. 激光与红外, 2008, **38**(5): 441~ 444
- Wang Jing, Sun Zhenghe, Sun Yude *et al.*. Synchronous output for RF excited waveguide CO₂ laser with grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(S1): 79~ 81
王 静, 孙正和, 孙玉德 等. 光栅选支射频波导CO₂激光器同步输出研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(S1): 79~ 81
- Liao Junmei, Li Yude, Zhong Geng *et al.*. Output character of sequence band lines of CO₂ laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(2): 323~ 326
廖均梅, 李育德, 钟 耿 等. TEA CO₂激光器序列带的输出特性[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(2): 323~ 326
- Guo Ruhai, Zhang Laiming, Yang Guilong *et al.*. High power pulsed TEA CO₂ laser with unstable resonator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(S1): 82~ 85
郭汝海, 张来明, 杨贵龙 等. 高功率脉冲非稳腔TEA CO₂激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(S1): 82~ 85
- Yang Feng, Yu Wenfeng, Chen Jiayuan *et al.*. Beam quality of TEA CO₂ lasers with coaxial output unstable resonators [J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(3): 314~ 316
杨 峰, 余文峰, 陈佳元 等. TEA CO₂激光器同轴非稳腔光束质量[J]. 激光技术, 2008, **32**(3): 314~ 316