

文章编号 1004-924X(2018)02-0293-07

基于透射式非稳腔的单纵模 TEA CO₂ 激光器

吴世松^{1,2,3}, 张合勇^{1,2}, 王挺峰^{1,2,3*}, 潘其坤^{1,2}, 郭 劲^{1,2,3}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了获得 TEA CO₂ 激光器高质量的单纵模输出,对种子注入锁定的 TEA CO₂ 激光器进行了研究。首先,本文提出了一种透射耦合输出的虚共焦非稳谐振腔方案,利用 Glad 软件的 Prony 法对腔模的演化进行了仿真分析,并实验记录了近场与远场的光斑光强分布。仿真结果与实验结果吻合,验证了此腔型方案的合理性。其次,在此腔型的基础上进行了腔外种子注入锁定实验,实验结果显示:自由振荡时存在频率为 195 MHz 的拍信号,当种子注入锁定成功后,输出激光拍频消失,波形变光滑,峰值功率降低 48.6%,脉冲产生时间缩短 20 ns。实验结果与已有成果吻合,验证了此种透射式非稳腔的 TEA CO₂ 激光器具有输出高质量单纵模的能力。

关键词:TEA CO₂ 激光器;非稳谐振腔;注入锁定;单纵模

中图分类号:TN248.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182602.0293

Single longitudinal mode TEA CO₂ laser based on transmissive unstable resonator

WU Shi-song^{1,2,3}, ZHANG He-yong^{1,2}, WANG Ting-feng^{1,2,3*}, PAN Qi-kun^{1,2}, GUO Jin^{1,2,3}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. State Key Laboratory of Laser Interaction with Mater, Changchun 130033, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: wtfeng@sina.com

Abstract: In order to obtain a high-quality single-longitudinal-mode output from a TEA CO₂ laser, a study on a TEA CO₂ laser with seed injection locking is carried out. A virtual confocal resonator with transmission coupling is proposed. The evolution of the cavity mode is simulated by Prony's method of the Glad software. The near-field and far-field intensity distributions are recorded experimentally. The results demonstrate that the simulation results are in good agreement with the experimental results, which verifies the rationality of the cavity scheme. On the basis of this resonator, the experiment of seed injection locking is carried out. The experimental results show that there is a beat signal with a frequency of 195 MHz when the oscillation of unstable resonator is free. When the seed injection is successfully locked, the output laser beat disappears, the waveform becomes smooth, the peak

收稿日期:2017-06-21;修订日期:2017-08-10.

基金项目:中国科学院前沿科学重点研究计划资助项目(No. QYZDB-SSW-SLH014);激光与物质相互作用国家重点实验室自主基金资助项目(No. SKLLIM1510)

power is reduced by 48.6%, and the pulse generation time is shortened by 20 ns. The experimental results agree well with the existing results, which verifies that the TEA CO₂ laser with such a transmissive unstable resonator has the ability to output a high-quality single longitudinal mode.

Key words: TEA CO₂ lasers; unstable resonator; injection-locked; single longitudinal mode

1 引言

单纵模 TEA CO₂ 脉冲激光器由于其峰值功率高、大气传输性能优良等特点,在远距离激光外差探测研究领域倍受重视^[1-3]。远距离外差探测必须具备频率稳定的单模(横模、纵模)输出光源,为实现这一要求,合理设计非稳腔使其具有良好的横模鉴别能力,并采用种子注入锁定的方式实现腔模的模式匹配以输出单纵模激光。

传统的 TEA CO₂ 激光器非稳腔^[4-5]一般采用衍射耦合的输出方式,近场输出光斑为环形,虽然有理论提出了环形光斑光束质量的评价方法^[6],但是环形光斑的实际使用价值较实心光斑仍有差距,一定程度上限制了其使用范围。在非稳腔腔型的研究中先后出现了变反射率镜非稳腔^[7-8](VRM)、相统一耦合输出非稳腔^[9-10](Phase-Unifying Output Coupler, PUOC),虽然上述腔型在激光的光束质量方面优于传统非稳腔,但是其腔镜设计制造的工艺复杂、成本高。在注入锁定研究方面,J. Lachambre^[11]、徐乐华^[12]、詹玉书^[13]、丁长林^[14]等人先后进行了 TEA CO₂ 激光器注入锁定方面的理论与实验研究,其激光器谐振腔都采用传统非稳谐振腔。

本文提出了一种透射耦合输出的正支虚共焦凹凸非稳谐振腔,利用 Gald 软件 Prony 法仿真分析了腔模的演化过程,实验记录了腔型输出光斑的光强分布,验证了透射耦合输出的虚共焦非稳腔具有单横模输出能力。通过种子注入锁定的方法实现了 TEA CO₂ 激光器的单纵模输出。

2 非稳腔结构及其模式仿真

2.1 非稳腔结构

TEA CO₂ 激光器的非稳腔采用虚共焦凹凸非稳腔方案,其结构如图 1 所示。

光学谐振腔由后凹面反射镜与前凸面部分反射镜组成,后反射镜为镀金全反镜,前腔镜的凸面

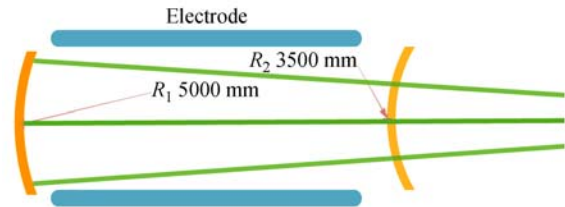


图 1 正支虚共焦非稳腔

Fig. 1 Schematic of positive-branch confocal unstable resonator

反射率为 70%,凹面镀增透膜。激光器谐振腔的参数如表 1 所示。

表 1 非稳腔光学参数

Tab. 1 Optical parameters of unstable resonator

Parameter	Value/cm
Curvature of rear mirror R_1	500
Curvature of output mirror R_2	348
Length of cavity L	77
Length of gain region l	50
Diameter a	2.54

增益区的大小决定了后反射镜的有效直径,电极增益区大小为 $1.87 \text{ cm} \times 1.00 \text{ cm}$,故后反射镜 y 方向的有效尺寸为 $2a_{y2} = 1.87 \text{ cm}$ 、 x 方向的有效尺寸为 $2a_{x2} = 1 \text{ cm}$,由关系式 $2a_{y1} = 2a_{y2}/M = 1.3015$ 、 $2a_{x1} = 2a_{x2}/M = 0.696$,放大率 $M = f_2/f_1 = 1.4368$ ($R_i = 2f_i$),等效菲涅耳数为:

$$N_{xyq} = \frac{a_{y1}^2}{\lambda L} \left[\frac{g_1}{g_2} (g_1 \cdot g_2 - 1) \right]^{1/2} = 5.4846, \quad (1)$$

$$N_{xq} = \frac{a_{x1}^2}{\lambda L} \left[\frac{g_1}{g_2} (g_1 \cdot g_2 - 1) \right]^{1/2} = 1.5684. \quad (2)$$

其中: a_{y1} 为前腔镜 y 方向的有效利用半径, a_{x1} 为前腔镜 x 方向的有效利用半径, λ 为激光波长, $g_i = 1 - \frac{L}{R_i}$, $i = 1, 2$ 。

等效菲涅耳数在非稳腔的讨论中是至关重要的一个参数,对于圆形球面镜的非稳腔,不同阶模的损耗主要由等效菲涅耳数决定。通过周期性增

加等效菲涅尔数的取值(0.5,1,1.5…),谐振腔会选择不同的最低阶横模,对于等效菲涅尔数较小的情况,只有半整数(0.5,1.5,2.5)的等效菲涅耳数对应于最低阶横模^[15]。此谐振腔的菲涅尔数接近半整数,以最大程度输出低阶横模,只有在横模结构单一的情况下,采用种子注入锁定方式,才有可能获得稳定分布的单纵模激光输出。因此,合理的等效菲涅尔数是实现高功率 TEA CO₂ 激光单纵模输出所必须考虑的因素。

2.2 非稳腔模式仿真

经典的谐振腔模式分析已经给出了部分典型谐振腔的解析解,但复杂腔型的解析解难以计算,必须采用数值方法求解,比如 Fox-Li 迭代法^[16], Prony 法^[17] 以及快速傅里叶变换法(FFT)^[18]。本文通过使用激光与物理光学设计软件 GLAD 中内置的 Prony 法分析了此非稳腔的模式分布。Glad 软件应用 Frantz-Nodvik 动力学理论^[19],其模型如下式:

$$g(x, y) = g_0 \exp \left[- \left(\frac{x - x_{dec}}{x_{rad}} \right)^{2n_x} - \left(\frac{y - y_{dec}}{y_{rad}} \right)^{2n_y} \right], \quad (3)$$

$$t(x, y) = \frac{e_s}{I(x, y)} \ln \left\{ 1 + \exp \left\{ g(x, y) z \left[\frac{I(x, y)}{e_s} - 1 \right] \right\} \right\}, \quad (4)$$

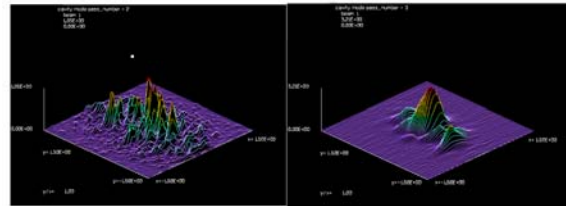
其中: $g(x, y)$ 是小信号增益, $t(x, y)$ 是传输增益, $I(x, y)$ 是点 (x, y) 处的光强, g_0 是小信号增益参量, e_s 是饱和参量, n_x, n_y 是超高斯指数, x_{rad}, y_{rad} 是超高斯半径, x_{dec}, y_{dec} 是光束中心坐标, z 是增益传输距离。实验研究表明:在脉冲激光器增益区横截面上增益系数呈现中央高、边缘低的超高斯分布^[20]。这里对比分析了几组低阶超高斯指数对应的模式分布,结果如表 2 所示。

表 2 小信号增益参数

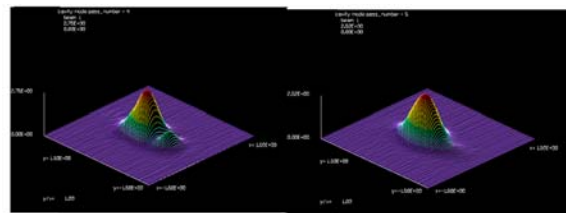
Tab. 2 Small signal gain parameters

Parameter	Value
g_0	0.1
e_s	1 000
n_x, n_y	1~4
x_{rad}/cm	0.5
y_{rad}/cm	1
x_{dec}, y_{dec}	0

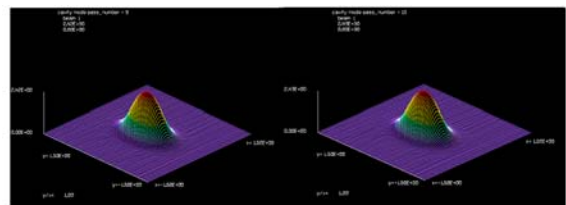
当小信号增益取高斯分布,即 $n_x = 1, n_y = 1$ 时,仿真了虚共焦非稳腔横模的演化过程,仿真结果如图 2 所示。图 2 中横模模式的演变过程由噪声起振,光强分布杂乱无章,经过 3 次渡越后光强分布显现初始形态,表面粗糙,周围起伏不定,经过 5 次渡越后光强分布变得光滑均匀并逐渐收敛至本征态。



(a) 渡越 2 次 (a) 2 round-trips
(b) 渡越 3 次 (b) 3 round-trips



(c) 渡越 4 次 (c) 4 round-trips
(d) 渡越 5 次 (d) 5 round-trips

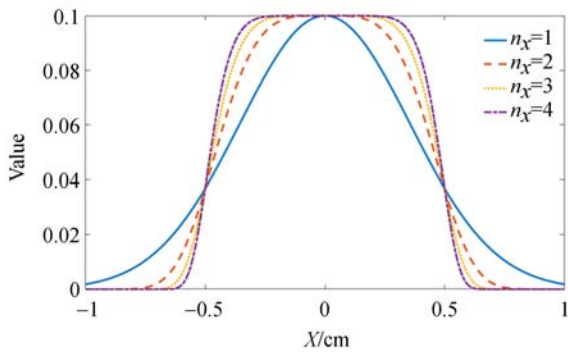


(e) 渡越 9 次 (e) 9 round-trips
(f) 渡越 13 次 (f) 13 round-trips

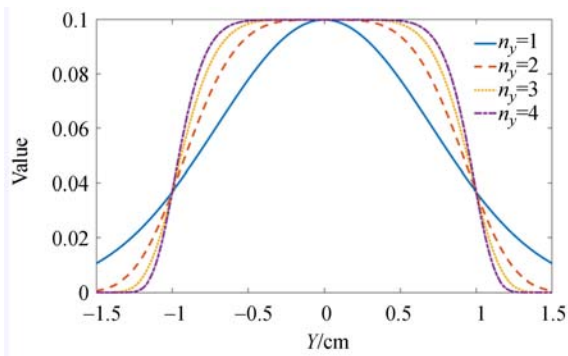
图 2 横模的形成过程

Fig. 2 Formation process of converged transverse mode

超高斯指数对小信号增益区分布的影响如图 3 所示。针对图 3 中 4 种超高斯分布的增益区,仿真了虚共焦非稳谐振腔在噪声起振条件下的横模分布,仿真结果如图 4 所示。图 4 给出了 4 种不同超高斯系数对应的横模分布。从图 4 可以看出,横模分布与增益分布相近,随着超高斯系数的增加,光强的平顶分布越明显。



(a) x 方向
(a) x direction



(b) y 方向
(b) y direction

图 3 增益区超高斯分布

Fig. 3 Super-Gaussian distribution of gain region

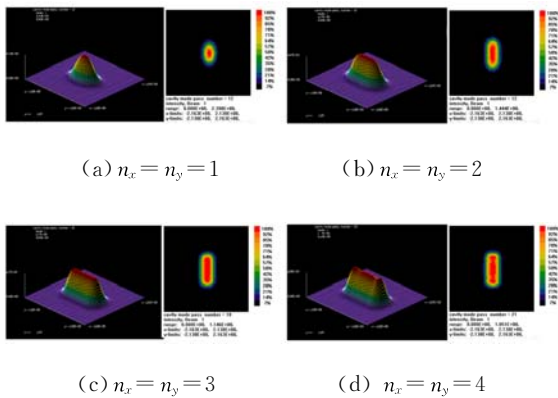


图 4 横模分布

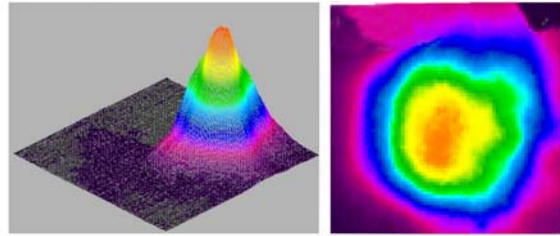
Fig. 4 Transverse mode distribution

3 实验

3.1 光斑形状及能量

在 TEA CO₂ 激光器的放电电压为 20 kV、工作气体压强为 84 kPa、放电频率为 1 Hz、工作温

度为 24 °C 的条件下,分别用光束质量分析仪、热敏纸对近场光斑形状进行记录分析,结果如图 5 所示。



(a) 光束质量分析仪 3D 光强分布
(b) 光束质量分析仪 2D 光强分布

(a) 3D intensity distribution using beam quality analyzer
(b) 2D intensity distribution using beam quality analyzer



(c) 热敏纸感应光强分布

(c) Intensity distribution using thermal paper

图 5 近场光斑光强分布

Fig. 5 Near-field special intensity distribution

图 5 为距离出口 1.75 m 处的近场光斑分布情况,图 5(c)为热敏纸对脉冲积累个数为 5 时的光强分布图。对比图 5 与图 3,实际输出光斑的光强分布中心在竖直方向比水平方向上稍长一些,这与仿真结果中低阶超高斯指数情况更吻合。

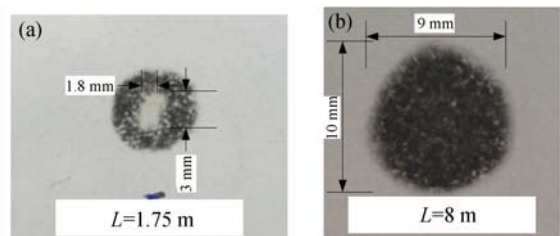


图 6 近场光斑与远场光斑的对比

Fig. 6 Near-field intensity distribution vs. far-field intensity distribution

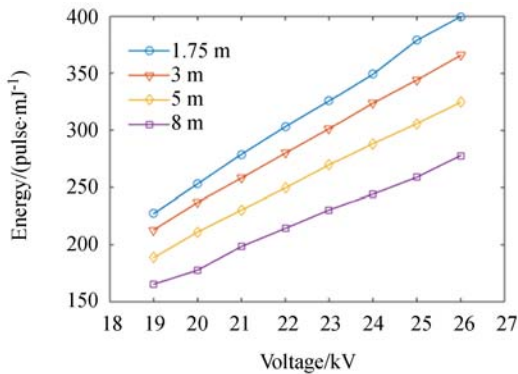
图 6 为 TEA CO₂ 激光器在放电电压为 20 kV、工作气体压强为 84 kPa、放电频率为 1 Hz、工作温度为 24 °C 的条件下,在距离出光口

1.75 m 与 8 m 处的光强分布。以两次测量的光斑大小及距离来估计其远场发散角(半角),得到:

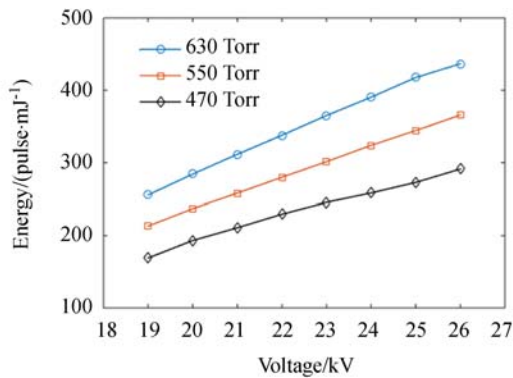
$$\theta_x = \frac{\Delta d}{2\Delta L} = \frac{9-1.8}{2 \cdot (8-1.75)} = 0.576 \text{ mrad},$$

$$\theta_y = \frac{\Delta d}{2\Delta L} = \frac{10-3}{2 \cdot (8-1.75)} = 0.56 \text{ mrad}.$$

由于大气吸收与发散角的存在,激光束在 8 m 处的光斑能量密度下降,热敏纸对处于热变阈值之下的光强部分不响应,由此导致远场光斑的测量值较实际值偏小,故实际的远场发散角较测量估计值偏大。



(a) $p=73.3 \text{ kPa}$



(b) $d=3 \text{ m}$

图 7 不同因素对单脉冲能量的影响

Fig. 7 Influences of different experimental parameters on single pulse energy

图 7(a)给出了 73.3 kPa 气压下,在距离出光口 1.75,3,5,8 m 处,不同放电电压时单脉冲能量的变化图。从图中可以看出,在同一距离条件下,单脉冲能量与放电电压近似呈线性递增关系。图 7(b)给出了在距离出光口 3 m 处,气压值为 62.7,73.3,84 kPa 时,不同放电电压下单脉冲能量的变化图。在同一气压条件下,单脉冲能量与

放电电压近似呈线性递增关系。

3.2 种子注入锁定实验

注入锁定实验光路如图 8 所示。采用单纵模波导 CW CO₂ 激光器作为种子源从腔外注入,以

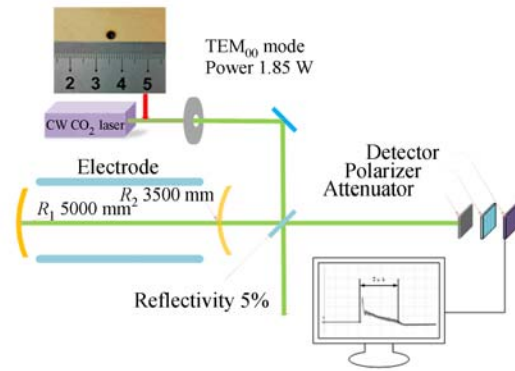
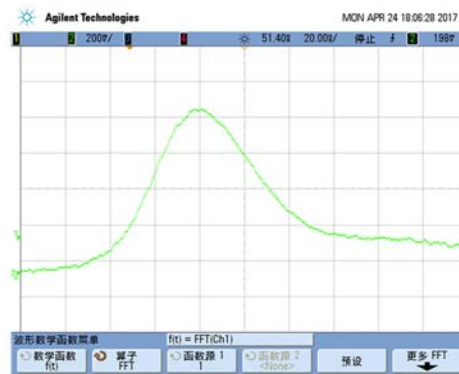


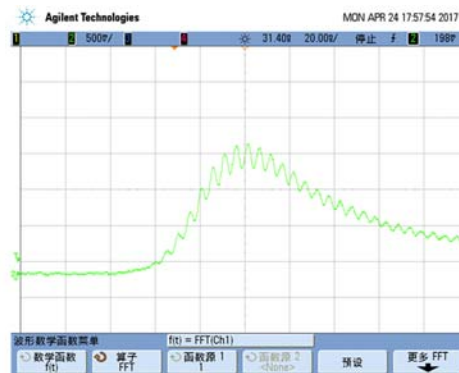
图 8 单纵模 TEA CO₂ 激光器实验结构图

Fig. 8 Schematic of experimental setup for SLM TEA CO₂ laser



(a) 注入锁定

(a) Injection-locked

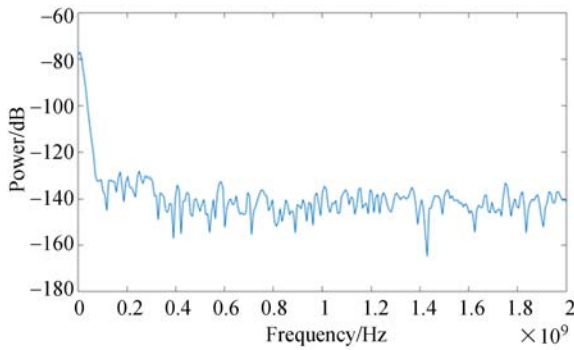


(b) 未注入锁定

(b) Unlocked

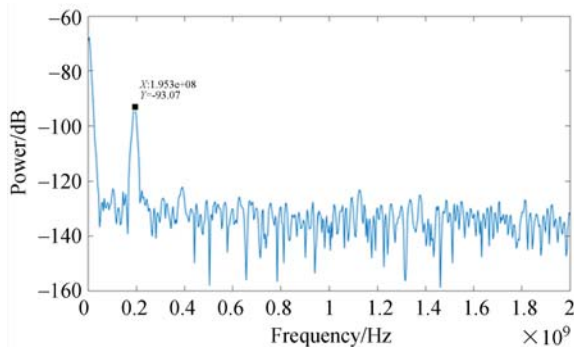
图 9 时域脉冲波形

Fig. 9 Temporal pulse shape of unstable resonator output



(a) 注入锁定

(a) Injection-locked



(b) 未注入锁定

(b) Unlocked

图 10 时域脉冲波形频谱

Fig. 10 Spectrogram of temporal pulse shape

一片反射率为 5%，一面镀有增透膜的分束片作为注入耦合镜。种子源线宽小于 2 MHz。当种子源稳定输出 TEM₀₀ 模时，输出功率为 1.85 W，经过光阑、反射镜、耦合镜后注入腔体的功率约为 30 mW。TEA CO₂ 单脉冲经注入耦合镜、衰减片、偏振片后进入窄带高灵敏探测器，示波器

参考文献：

- [1] ENG R S, CUNNINGHAM J F, WANG Y L, *et al.*. Single-mode frequency-agile 9-11 μm CO₂ laser local oscillator[J]. *SPIE*, 1997, 2987: 43-53.
- [2] GHOSHROY S, DIMERCURIO J, ENG R S, *et al.*. Status report of an airborne CO₂ transceiver for remote sensing employing direct and coherent detection[J]. *SPIE*, 1996, 2748: 189-200.
- [3] KONKOLA P, CRANDALL C, GEORGES T, *et al.*. Pushing the envelope: HI-CLASS range and range-rate[C]. *Proceedings of 2001 Advanced*

实时监视输出脉冲波形，如图 9 所示。用传统的周期图法对脉冲波形进行频谱分析，结果如图 10 所示。

图 9(a)为种子激光注入锁定成功时的时域脉冲波形，示波器电压值为 900 mV，脉冲波形光滑；图 9(b)为激光器自由运转时的时域脉冲波形，示波器电压值为 1 750 mV，脉冲波形中有明显的纵模拍信号且拍信号的振幅在脉冲的最顶端时最大。对比图 9(a)和 9(b)，发现注入锁定后脉冲能量降低了 48.6%，脉冲形成时间提前了 20 ns。图 10(a)为种子注入锁定成功时对应的时域波形频谱，图 10(b)为自由运转时对应的时域波形频谱；在自由运转时，纵模间拍信号频率与理论上纵模间隔($\Delta\nu = c/2nL = 195$ MHz)对应。种子注入后拍信号消失，证明注入锁定成功。

4 结 论

本文提出了一种透射耦合输出的正支虚共焦凹凸非稳腔结构，利用 Glad 软件的 Prony 法仿真了自由振荡时横模模式的演化过程，并实验记录了近场光斑的实际光强分布。仿真与实验结果分析表明：放电区小信号增益分布影响激光横模分布，实际小信号分布与低阶超高斯指数的仿真结果更吻合；采用腔外种子注入锁定的方式实现了 TEA CO₂ 脉冲激光器的单纵模输出，种子注入锁定成功后，输出脉冲波形相比自由运转时，脉冲峰值功率减低了 48.6%，脉冲产生时间(以放电时刻为起点)缩短 20 ns，纵模间拍消失，脉冲波形光滑。基于透射式非稳腔的注入锁定 TEA CO₂ 脉冲激光器具有输出单纵模的能力。

Maui Optical and Space Control Conference, The Maui Economic Development Board, 2006.

- [4] 谭改娟, 谢冀江, 潘其坤, 等. 非链式脉冲 DF 激光器非稳腔设计与实验研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0102004.
- TAN G J, XIE J J, PAN Q K, *et al.*. Design and experimental investigation on unstable resonator for non-chain pulsed DF laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(1): 0102004. (in Chinese)
- [5] 杨贵龙, 邵春雷, 郭汝海, 等. 高功率 TEA CO₂ 激光器非稳腔实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(10): 2478-2482.

- YANG G L, SHAO CH L, GUO R H, *et al.*. Experimental study of unstable resonator for high-power TEA CO₂ laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(10): 2478-2482. (in Chinese)
- [6] 郭汝海, 张合勇, 王挺峰. TEA CO₂ 非稳腔激光器远场光束质量的评价[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(2): 407-413.
- GUO R H, ZHANG H Y, WANG T F. Evaluation of far field optical quality of TEA CO₂ laser with unstable resonator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 407-413. (in Chinese)
- [7] MCKEE T J, FENDRYKOWSKI S. Long-pulse excimer laser with a variable reflectivity mirror resonator[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(3): 275-277.
- [8] LING D X, CHEN J R, LI J CH. Gaussian-reflectivity mirror resonator for a high-power transverse-flow CO₂ laser[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(13): 3158-3162.
- [9] YASUI K, TANAKA M, YAGI S. Unstable resonator with phase-unifying coupler for high-power lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 1988, 52(7): 530-531.
- [10] AGHAMKAR P, ANDRE B, DE TOMASI F, *et al.*. High power XeF laser with a phase-unifying unstable cavity[J]. *SPIE*, 2003, 4829: 675-677.
- [11] LACHAMBRE J L, LAVIGNE P, OTIS G, *et al.*. Injection locking and mode selection in TEA-CO₂ laser oscillators[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1977, 12(12): 756-764.
- [12] 徐华乐, 伊景荣, 蔡英时. 混合型 TEA CO₂ 激光器工作特性的研究[J]. *光学学报*, 1986, 6(6): 501-505.
- XU H L, YI J R, CAI Y SH. Study of the performance of a hybrid TEA CO₂ laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 1986, 6(6): 501-505. (in Chinese)
- [13] 詹玉书, 过巴吉, 文建国, 等. 小型 TEA CO₂ 激光器的复合腔注入锁定技术[J]. *光学学报*, 1997, 17(1): 32-36.
- ZHAN Y SH, GUO S J, WEN J G, *et al.*. Composite cavity injection locking for small sized TEA CO₂ lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, 17(1): 32-36. (in Chinese)
- [14] 丁长林, 万重怡. 脉冲 CO₂ 激光器注入锁定特性的数值模拟[J]. *光学学报*, 2006, 26(11): 1705-1709.
- DING CH L, WAN CH Y. Numerical simulation of injection locking of pulsed CO₂ lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(11): 1705-1709. (in Chinese)
- [15] BIGIO I J, SLATKINE M. Injection-locking unstable resonator excimer lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1983, 19(9): 1426-1436.
- [16] BOYD G D, KOGELNIK H. Generalized confocal resonator theory[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1962, 41(4): 1347-1369.
- [17] SIEGMAN A E, MILLER H Y. Unstable optical resonator loss calculations using the Prony method[J]. *Applied Optics*, 1970, 9(12): 2729-2736.
- [18] 阮鹏, 潘其坤, 谢冀江, 等. 非链式 DF 激光器非稳腔数值仿真与实验[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(2): 0205004.
- RUAN P, PAN Q K, XIE J J, *et al.*. Numerical simulation and experiments on unstable resonator for non-chain DF laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0205004. (in Chinese)
- [19] FRANTZ L M, NODVIK J S. Theory of pulse propagation in a laser amplifier[J]. *Journal of Applied Physics*, 1963, 34(8): 2346-2349.
- [20] 潘其坤, 谢京江, 谢冀江, 等. 非链式脉冲 DF 激光器增益分布特性[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 360-364.
- PAN Q K, XIE J J, XIE J J, *et al.*. Investigation on gain distribution characteristic of non-chain pulsed DF laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 360-364. (in Chinese)

作者简介:



吴世松(1992—),男,山东临沂人,博士研究生,2015年于长春理工大学获得学士学位,主要从事远程脉冲相干探测方面的研究。E-mail: wss768625265@126.com

导师简介:



王挺峰(1977—),男,山东文登人,研究员,博士生导师,2005年于长春光机所获得博士学位,主要从事激光应用与光电系统总体设计方面的研究。E-mail: wtfeng@sina.com