

文章编号: 1001-2486(2010)06-0100-07

HYLTE 与 TRIP 喷管在大功率氟化氘激光器中的应用对比分析*

袁圣付, 刘文广, 华卫红, 闫宝珠, 刘泽金
(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 简述了燃烧驱动大功率连续波 DF 化学激光器的发展现状。比较了 HYLTE 与 TRIP 两种喷管的结构参数, 总结了两种喷管的性能差异。采用数值模拟手段, 参考相关试验数据, 计算了典型增益分布对应的共焦非稳腔输出光束模式。从大功率 DF 激光器研制存在的光斑均匀性和腔镜负载两个难题的角度, 结合喷管制造工艺要求, 认为 HYLTE 喷管较 TRIP 喷管更适用于大功率 DF 激光器。

关键词: HYLTE 喷管; TRIP 喷管; 大功率 DF 激光器

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

Analysis and Comparative Study of Employing HYLTE and TRIP Nozzles in High Power DF Laser

YUAN Sheng-fu, LIU Wen-guang, HUA Wei-hong, YAN Bao-zhu, LIU Ze-jin

(College of Opto-electric Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Developing status of combustion driving high power continuous wave Deuterium Fluoride(DF) chemical laser has been briefly presented. Structure parameters of HYLTE (Hypersonic, Low Temperature) nozzle and TRIP nozzle have been comparatively analyzed. Performance difference between the two kinds of nozzles has been summarized. Based on some correlational reported test data, output transverse modes of confocal unstable resonator corresponding to typical gain coefficient distribution along the flow field have been simulated by using numerical method. Considering technical maturity and reliability, we conclude that employing HYLTE nozzle is more appropriate than TRIP nozzle in research and development of high power DF laser concerning the two hard problems: uniformity of beam spot and load of mirrors.

Key words: HYLTE nozzle; TRIP nozzle; high power DF laser

燃烧驱动连续波氟化氘(DF)激光器是 20 世纪七八十年代激光武器化研究的首选激光器,“先进中红外化学激光器”(MIRACL)实现了兆瓦级的 DF 波段激光输出,是公开报道的连续波输出功率最高的激光器之一,在强激光应用探索过程中发挥了重要作用^[1-2]。尽管各类高能激光器风起云涌^[3],但 MIRACL 激光器当前仍然是最重要的试验研究平台之一,相关机构不断对其进行维护性运转和升级改造^[4-6]。究其因由,从物理上来讲,因为通过气体/液体快速流动排除介质废热是单孔径(非合成)输出兆瓦级、战略型大功率激光器的唯一选择^[7]。

由于 DF 激光处在中红外 3~5 μm 波段,大气透过率高、大气传输性能好^[8],部分目标的相关材料对该波段吸收系数大,且多根谱线同时输出、不易防护等诸多原因,在经历 NAEL、MIRACL、THEL 等项目沉浮之后^[9-11],近期国内外部分研究人员仍对 DF 激光器及其核心部件——增益发生器进行各种研究^[12-14],主要采用 HYLTE(Hypersonic, Low Temperature, 高超音速、低温喷管)和 TRIP 两种喷管对应的增益发生器,但对两种喷管应用的对比研究较少。本文用 MIRACL 作为参考研究对象,即以兆瓦级大功率 DF 激光器为例,主要对 HYLTE 和 TRIP 两种喷管的增益特性、光斑均匀性及腔镜负载等问题进行了对比分析。

* 收稿日期: 2010-09-13

基金项目: 国家高技术发展计划资助项目

作者简介: 袁圣付(1975-),男,副教授,博士。

1 两种喷管器件的典型结构、运转和性能参数对比

TRIP 喷管最早是为了增强光腔内副燃料和含 F(氟) 原子主氧化剂气流的混合而提出的^[15]。HYLTE 喷管最早是针对天基激光器中的 HYWN 喷管存在的问题而提出的^[16], 其典型结构特点是具有很大的基区^[17-19]。而在地基应用的情况下, 为了提高恢复压力, 对早期 HYLTE 喷管的结构参数进行了针对性修改, 主要表现在基区尺寸变小^[20]。本文主要讨论结构参数修改后的 HYLTE 喷管, 两种喷管的典型结构如图 1 所示^[20-21]。

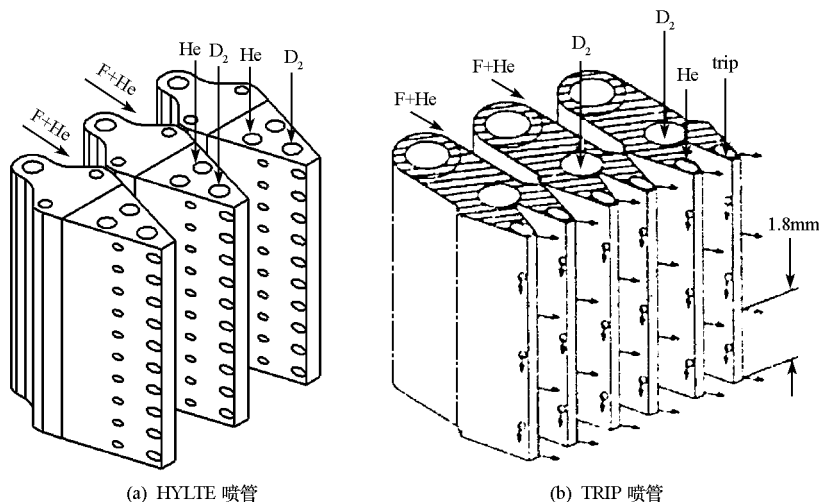


图 1 HYLTE 喷管和 TRIP 喷管的典型结构

Fig. 1 Typical structure of HYLTE and TRIP nozzle bank

由表 1 可知, TRIP 喷管叶片很小, 这导致其尺寸精度要求高, 加工难度很大, 器件价格昂贵。尽管近年来薄片扩散焊接工艺得到了应用, 但风险很大, 能否成熟应用有待检验^[13]。相对来讲, HYLTE 喷管叶片尺寸大, 加工容易, 价格低廉, 适合大批量制造^[17-20]。从制造工艺角度来看, HYLTE 喷管较 TRIP 喷管更适用于大功率 DF 激光器。

从增强混合的角度来讲, HYLTE 喷管与 TRIP 的机理相同。两种喷管都是通过扰流来扭曲和拉伸反应界面, 并产生流向旋涡来加快混合的^[25-30], 但 HYLTE 喷管在本质上与 3SLOT^[31] 相同, 副 He 扰流用来隔离、缓冲与稀释主、副反应气流, 只是副燃料和副稀释剂喷管由平面喷管改为轴对称喷管而已; TRIP 喷管在本质上与 2SLOT 相同, 副 He 扰流用来拉伸和扭曲全接触的主、副气流反应界面。此外, 从几何尺寸上来讲, TRIP 喷管周期间距较小, 反应气流横向扩散距离较小。这两点使得 TRIP 喷管具有更快的反应气流混合速度, 激发态分子的生成速率在与弛豫去激活过程竞争中占更大优势^[32]。

因此, 从性能上来看, TRIP 喷管适合高腔压运转, 被动恢复压力是 HYLTE 喷管对应值的好几倍。喷管出口质量流面密度较大, 是 HYLTE 喷管对应值的几倍, 喷管出口功率流面密度提高约 2.0 倍; 但过快混合和反应放热同时也带来了激活区长度大大缩短的问题^[32]。从 MIRACL 激光器非稳腔出口光斑尺寸^[33] 推断得知, 典型的 TRIP 喷管激射区长度约 3cm, 而计算模拟结果表明: 典型的 HYLTE 喷管激活区长度约 6cm。且增益峰值只有 TRIP 喷管的 1/2 左右。

2 增益分布对光斑均匀性和腔镜负载的影响评估

为了对比和评估两种喷管激活区长度以及增益沿流场方向的分布对光斑均匀性的影响, 采用数值模拟手段, 利用 Fox-Li 迭代算法^[34], 针对正支共焦非稳腔参数, 设定增益区高度为 $H = 12\text{cm}$, 对主镜曲率 $R_1 = 9\text{m}$ 、次镜曲率 $R_2 = -3\text{m}$ 、腔长 $L = 3\text{m}$ 、放大率 M 约 3 的激光器输出模式进行了计算。

表1 HYLTE和TRIP喷管器件的典型结构、运转和性能参数^[20,22-24]

Tab. 1 Typical structure parameters, run parameters and performance parameters of HYLTE and TRIP nozzle bank

主要对比参数		HYLTE	TRIP	
结构参数	喷管周期间距	~ 1.5mm	3~ 4mm	
	喷管喉道高度	氧化剂	~ 0.2mm	~ 0.1mm
		副燃料	~ Φ 0.5mm	~ 0.1mm
	喷管面积比	副稀释剂	~ Φ 0.3mm	
		氧化剂	~ 50	15~ 25
	扰流角度	副燃料	10~ 15	10~ 20
		副稀释剂	10~ 15	1.0
	基区尺寸/占NEP百分比	~ 40°	~ 45°	
	常用燃料体系	~ 5mm/ 30%	~ 1.0mm/ 30% ~ 40%	
			(C ₂ H ₄ + NF ₃ + He ^P) + (D ₂ + He ^S)	
运转参数	总压	氧化剂	~ 6atm	~ 17.2atm (> 10atm)
		副燃料	~ 3atm	
		副稀释剂	~ 2atm	
	总温	氧化剂	~ 1900K	1700~ 2200K
		副燃料	300K	300K
		副稀释剂	300K	300K
配比参数	主稀释比	~ 15	9~ 21	
	副稀释比	~ 7		
	反应比	~ 8	3~ 6	
	总稀释比	~ 30	28~ 50	
性能参数	质量流面密度	~ 0.7g/cm ²	~ 2.5g/cm ²	
	光腔静压	5~ 10torr	20~ 30torr	
	被动恢复压力	40~ 50torr	200~ 300torr	
	增益区长度	6~ 7cm	3~ 4cm	
	功率流面密度	~ 100W/cm ²	~ 200W/cm ²	

注: 运转参数与结构参数密切相关, 性能参数随着运转参数的变化而变化。MIRACL激光器可以通过调节运转参数在13%~100%范围内变化输出功率^[1]。

由于级联跃迁和V-V碰撞的影响, DF激光器各个振动-转动谱线的增益峰值大小和位置存在差别, 数值模拟和增益系数测量的结果^[20-21]都表明: 采用TRIP喷管的DF各个谱线的平均增益系数峰值(5~10)%/cm, HYLTE喷管的DF各个谱线的平均增益系数峰值(3~5)%/cm, 增益沿流场方向的分布是非常不均匀的, 先增加后减小, 呈近抛物线形分布。

为了简化模型, 实际计算采用的两种喷管对应谱线沿流场方向的平均增益标记为Gain^{1#}和Gain^{2#}, 激活

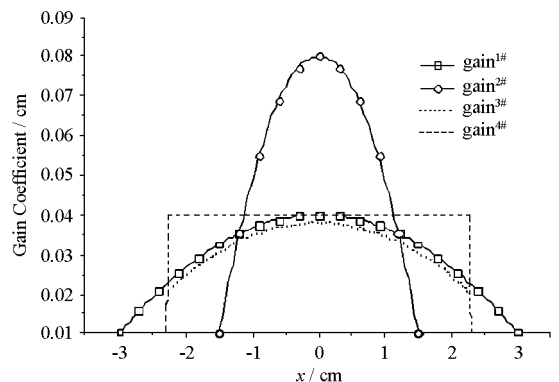


图2 沿流场方向的四种不同平均增益分布
Fig. 2 Four different average gain coefficient distributions along the flow field

区长度分别设定为 6 cm 和 3 cm, 沿流场方向按抛物线形分布, 激射区最小增益系数为 1%/cm, HYLTE 和 TRIP 喷管的最大增益系数分别为 4%/cm 和 8%/cm。为了分析增益分布均匀性对光强分布的影响, 还计算了 $\text{Gain}^{3\#}$ 和 $\text{Gain}^{4\#}$ 两种增益情况, 分别对应于激射区长度缩短为 4.5 cm, 增益大小在 (2.5~4)%/cm 范围的 HYLTE 喷管增益截断和系数为 4%/cm 均匀增益, 四种增益分布如图 2 所示。

计算得到刮刀镜输出光束的典型归一化光强分布如图 3 所示(光轴上的点对应强度为 1.0)。对于相位分布, 除了边缘衍射外, 上述计算得到的光束相位分布基本接近平面波。表 2 给出了对应不同激射区长度和增益分布情况下的腔镜功率密度。

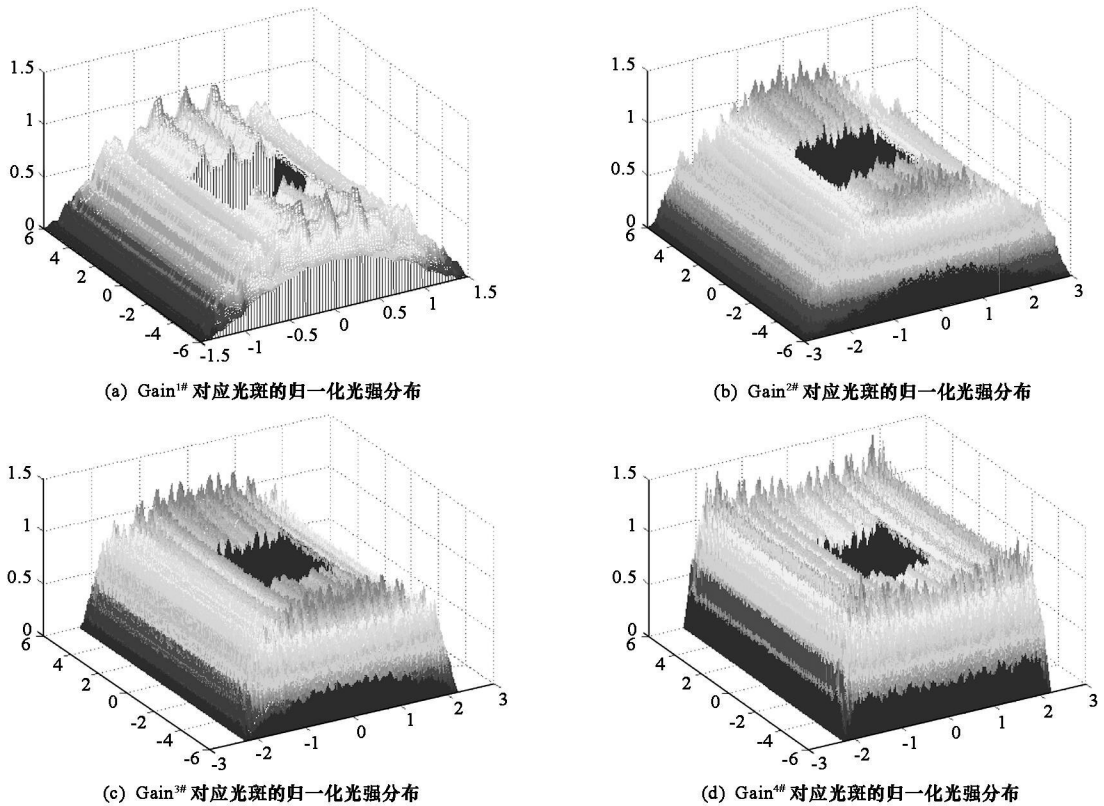


图 3 四种增益分布对应输出光斑的归一化光强分布

Fig. 3 Normalized intensity distribution of output spot correspond to four different gain coefficient distributions

表 2 对应不同激射区长度和增益分布情况下的腔镜功率密度分布

Tab. 2 Power Intensity on resonator mirror correspond to different lasing length and gain coefficient distribution

设定功率	喷管类型	增益分布	激射区长度/cm	光斑尺寸/cm × cm	F 数	平均功率密度/(kW/cm ²)	峰值功率密度/(kW/cm ²)
~ 1MW	TRIP	$\text{Gain}^{1\#}$	~ 3	12 × 3	0.459	~ 27.8	~ 60.6
	HYLTE	$\text{Gain}^{2\#}$	~ 6	12 × 6	0.633	~ 13.9	~ 21.9
	HYLTE	$\text{Gain}^{3\#}$	~ 4.5	12 × 4.5	0.725	~ 18.5	~ 25.6
	--	$\text{Gain}^{4\#}$	~ 4.5	12 × 4.5	0.909	~ 18.5	~ 20.4

由图 3 可知: 光强沿流场方向上的分布与增益沿流场方向上的分布有对应关系, 沿高度 H 方向的上、下强, 沿流场 L 方向的前、后弱, 这与实验中观察到的现象是一致的。在激射区选取大于 1%/cm 增益的全部激活区来提取激光的情况下, HYLTE 比 TRIP 喷管对应光斑的均匀性明显要好, 对应的 F 数(平均功率密度/峰值功率密度)分别为 0.633 和 0.459。在不提取 HYLTE 喷管激活区内增益较小的区域时, 即激射区长度缩短为 4.5 cm 的情况下, 光斑的均匀性明显改善, 其 F 数为 0.725; 在选取增益系数为 4%/cm、完全均匀的情况下, 对应的 F 数为 0.909; 由此可知: 改善沿流场方向增益分布的均匀性, 可以显著改善光斑光强分布的均匀性。由表 2 可知: 增加沿流场方向的激射区长度, 可以有效降低激光器腔镜

的负载;改善沿流场方向的增益分布均匀性,可以明显降低光斑的峰值功率密度。

在不同应用环境中,激光器的性能指标要求和技术途径选择有显著差别。在地基情况下,光束质量比大功率激光器的能量、重量和尺寸更重要,在激光器长时间出光运转过程中,光强的非均匀分布会使镜面产生非均匀变形,从而带来附加相位,对远场光强分布产生巨大影响^[35-36]。因此,提高光斑均匀性、降低腔镜负载,对长时间运转的大功率激光器光束质量维持是至关重要的。增益分布均匀的长激活区已经成为大功率 DF/HF 激光器研制中极力追求的增益发生器性能指标。从提高光斑均匀性角度来看,HYLTE 喷管较 TRIP 喷管更适用于大功率 DF 激光器。

3 增益区高度对光斑均匀性和腔镜负载的影响评估

在激光器的实际运转过程中,过高腔镜负载是不能接受的^[37],在长时间出光运转的情况下尤为如此。由上述计算结果可以看出:长激活区喷管在本质上是通过增大光斑来实现腔镜负载降低的。

增大光斑的另一途径是增加增益介质的高度尺寸 H 。如把高度方向尺寸改成 MIRACL 的相近数值 24cm,则光斑平均功率密度将下降一倍左右,但是否会导致光斑均匀性变差,甚至引起峰值功率密度增加?为了探明这个问题,在保持激活区长度 L 不变的情况下,计算了增益介质高宽比 H/L 逐渐加大情况下的输出模式。为了简化计算,取激射区长度为 2cm,增益系数最大值为 5%/cm,最小值为 1%/cm,沿流场方向的非均匀增益系数按抛物线形分布。

图 4 给出的 $H/L = 1, 2, 3, 4, 5$ 情况下非稳腔对应光斑的光强分布,表 3 给出了图 5 中所示的 4 个独立区域内统计得到的光场强度相对平均值(区域 4 平均值为 1.0),其余 4 个区域可以对称得到,因为增益分布的对称性使得光斑沿流场 L 方向上成对称分布。

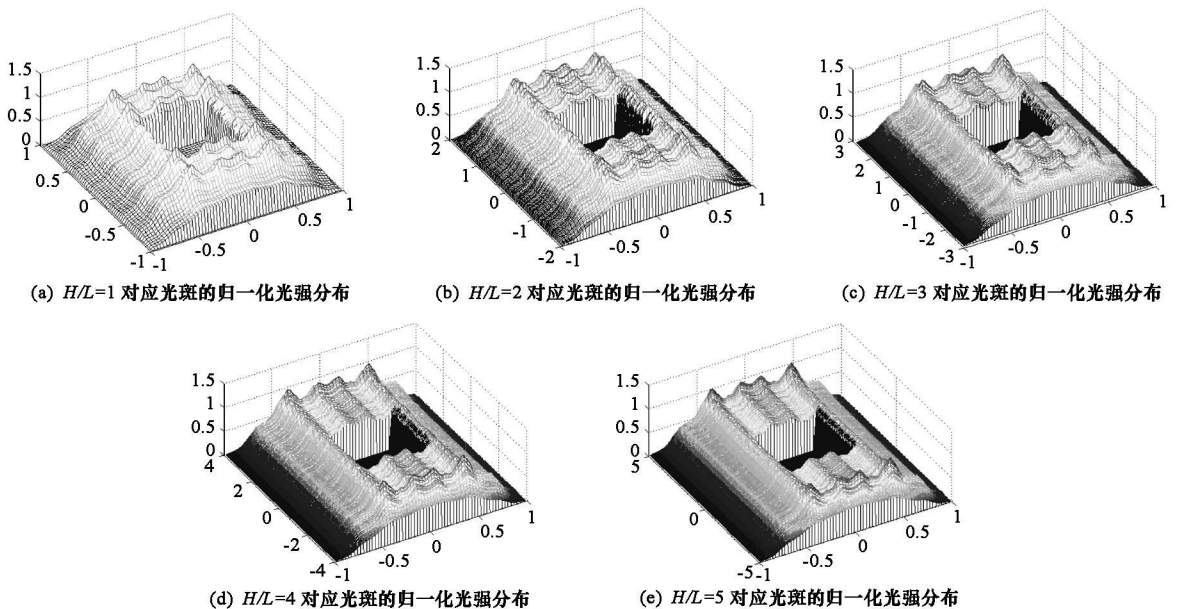


图 4 非均匀增益抛物线形分布情况下,不同 H/L 对应光斑的归一化光强分布

Fig. 4 Normalized intensity distribution of output spot correspond to different H/L values under the condition of non-uniform, parabolic gain coefficient

计算结果表明:光斑在流场方向上的宽度相对于高度来讲变窄,光斑在高度和流场方向上的光强峰值相对比值并不随着 H/L 的比值而显著变化。沿高度 H 方向上,光强分布规律不变,大小基本相同,在流场方向上,非均匀光强分布与非均匀增益系数分布成对应关系。由表 3 可知:两个方向上的光强分布均匀性变化不大,整个光斑的均匀性随 H/L 变化不大,主要原因是不同 H/L 比值对应的增益沿流场方向上的分布相同。该光束经过缩束—扩束柱面镜整形形成 $H/L \approx 1$ 用于传输或发射时,得到的正方形光斑均匀性不会改变,也就是说, H/L 增大对发射光束的光斑均匀性影响不大。在均匀增益的情况下,计算结果表明:光斑随着 H/L 的比值变化表现出与非均匀增益类似规律。因此,增加增益介质的高度

尺寸可以有效降低腔镜负载,且不会对光斑均匀性产生显著影响。

表3 光斑中4个独立区域的光强分布相对平均值

Tab. 3 Relative average intensity four independent regions on the spot

H/L	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4
1	1.05	1.79	1.05	1
2	0.96	1.63	0.96	1
3	0.96	1.64	0.96	1
4	0.97	1.64	0.97	1
5	0.97	1.66	0.97	1

1	2	3
8	空间	4
7	6	5

图5 光斑分布区域划分图

Fig. 5 Division of spot region

但是,喷管高度尺寸的增加受喷管叶片强度、副气流供气均匀性以及非稳腔准直稳定性等因素限制,由于HYLTE喷管的叶片宽度较大,叶片强度和副燃料供气通道面积较TRIP喷管大,因此可以加工出高度尺寸更大的增益发生器,即便在采取把喷管组件的长度变为高度^[38]进而加大增益区高度的情况下,HYLTE喷管对应的增益发生器结构复杂性也较TRIP喷管的大大简化,且高度尺寸可以做得更大,从而在相同的输出功率情况下,可以使得激光器腔镜的负载得到有效降低,在短时间出光的情况下,可以不需要类似MIRACL采用水冷镜^[1],只要采用非常低吸收(VLA)、无冷却硅镜^[1]即可。从降低腔镜负载角度来讲,HYLTE喷管较TRIP喷管更适用于大功率DF激光器。

4 结论

HYLTE喷管较TRIP喷管结构简单、几何尺寸较大,制造容易;增益区较长且相对均匀,对应的光斑均匀性较好,腔镜负载较小,在长时间出光过程中变形较小,因此,HYLTE喷管较TRIP喷管更适用于大功率DF激光器。此外,在大功率DF激光器的研制中,还可以通过减小HYLTE喷管扰流角度、增加副燃料总温以及增益区错位组合等手段来进一步拉长激活区长度,提高增益分布的均匀性,这对降低腔镜负载、提高光斑均匀性,进而解决腔镜非均匀变形问题至关重要,也应该是HYLTE喷管下一步改进研究的重点。

致谢:作者感谢与杜少军研究员开展的有益讨论。

参考文献:

- [1] Albertine J R. Recent High Energy Laser System Tests Using the MIRACL/SLBD[C]//SPIE 1993, 1871: 229- 239.
- [2] Domhelm M A. Missile Destroyed in First SDI Test At High-energy Laser Facility[J]. Aviation Week & Space technology, 1985(9): 17- 19.
- [3] Horkovich J A. Directed Energy Weapons: Promise & Reality[R]. AIAA 2006- 3753, 2006.
- [4] High Energy Laser Systems Test Facility (HELSTF) Enhanced Laser and Range Operations Environmental Assessment[R]. 16 June 2005.
- [5] Albertine J R, Siahatgar S, Bennett H E. High-power Beam Control: Results to Date and Relevance to Power Beaming[C]//SPIE 1997, 2988: 257 - 263.
- [6] Weich W J. Project SKYLITE: A Design Exploration[R]. ADA187906, Sept. 1987.
- [7] 谈洪,朱宗厚. 气动激光技术[M]. 北京:国防工业出版社,1977: 9- 12.
- [8] 梅遂生,王戎瑞. 光电子技术[M]. 北京:国防工业出版社,2008: 153- 155.
- [9] Ferreira D M, Marcell F C. Navy High Energy Laser Weapon System[J]. Naval Engineers Journal, 1993(5): 105- 117.
- [10] Wilson G, Graves B R, Patterson S P, et al. Deuterium Fluoride Laser Technology and Demonstrators[C]//SPIE 2004, 5414: 41- 51.
- [11] Shwartz J, Wilson G T, Avidor J. Tactical High Energy Laser[C]//SPIE 2002, 4632: 10- 20.
- [12] 李兰. 连续波DF/HF化学激光器增益发生器结构与运转模式数值模拟研究[D]. 长沙:国防科技大学,2010.
- [13] Hook D L, Engler T J. High Energy DF Chemical Laser Gain Generator and Related Method for Its Fabrication[P]. US Patent, 006813304B2, Nov. 2, 2004.
- [14] Hook D L, Shwartz J, Sollee J L, et al. Mobile Tactical High Energy Laser Weapon System and Method for Generating a High Energy Laser Beam [P]. US Patent, 006785315B1, Aug. 31, 2004.
- [15] Witte A B, Broadwell J E, Hook D L. Chemical Laser with Mixing Enhancement Device for Power Improvement[P]. US Patent 4048586, Sept.

- 13, 1977.
- [16] Smith W. Simple Model of the Transverse Injection Chemical Laser[R]. AIAA- 85- 1599, 1985.
- [17] Duncan W A, Patterson S P, Graves B R. Gain Generator Optimization for Hydrogen Fluorine Overtone and Fundamental Chemical Laser[C]// SPIE 1993, 1871: 123- 134.
- [18] Duncan W A, Patterson S P, Graves B R. Overtone Research, Advanced Chemical Laser Module Design[C]//SPIE 1994, 2119: 46- 57.
- [19] Patterson S P, Graves B R, Betts J, et al. HF Fundamental and Overtone Testing Using the HYLTE Water Cooled Module[R]. AIAA99- 3472, 1999.
- [20] 袁圣付. 连续波 DF/HF 化学激光器新型增益发生器的理论设计[D]. 长沙: 国防科技大学, 2002.
- [21] Voignier F, Merat F, Brunet H. Mixing Diagnostic in a CW DF Chemical Laser Operating at High Cavity Pressure[C]//SPIE 1990, 1397: 297- 301.
- [22] Wilson L E, Hook D L. Deuterium Fluoride CW Chemical Lasers[R]. AIAA- 76- 344, 1996.
- [23] Wilson L E. Deuterium Fluoride CW Chemical Lasers[C]//SPIE 1976, Ultra High Power Lasers, 76: 51- 57.
- [24] MTHEL Fact Sheet[EB], Sept. 2004, US Army MTHEL Product Office, PDF File Available.
- [25] Driscoll R J, Tregay G W. Flow-field Experiments on a DF Chemical Laser[J]. AIAA Journal, 1983, 21(2): 241- 246.
- [26] Driscoll R J. Effect of Reactant Surface Stretching on Chemical Laser Performance[J]. AIAA Journal 1984, 22(1): 65- 74.
- [27] Driscoll R J. Mixing Enhancement in Chemical Lasers, Part I : Experiments[J]. AIAA Journal. 1985, 24(7): 1120- 1126.
- [28] Driscoll R J. Mixing Enhancement in Chemical Lasers, Part II : Theory[J]. AIAA Journal 1987, 25(7): 965- 971.
- [29] Cenker Jr. A A. Laser Doppler Velocimeter Measurements on Supersonic Mixing Nozzle that Employ Gas-trips[J]. AIAA Journal, 1982. 20(3): 383- 389.
- [30] Cenker Jr. A A, Driscoll R J. Laser-induced Fluorescence Visualization on Supersonic Mixing Nozzles that Employ Gas-trips[J]. AIAA Journal, 1982, 20(6): 812- 819.
- [31] Konkin S V, Fedorov I A. Experimental Investigation of a Supersonic CW Chemical HF Laser with a Three-jet Nozzle Array[C]//SPIE 1998, 3574: 612- 617.
- [32] 费德罗夫. 连续波氟化氢和氟化氙化学激光器[M]. 袁圣付, 马建光, 华卫红, 等译. 长沙: 国防科技大学出版社, 2010.
- [33] Graves B R, Duncan W A, Patterson S P, et al. Optical System Design, Modeling, and Analysis of Selected Line HF and DF Lasers[C]//SPIE 1994, 2119: 68- 79.
- [34] Seigman A E. Lasers[M]. University Science Books, Mill Valley, California, 1986.
- [35] 刘文广, 饶鹏, 华卫红. 非均匀激光辐照下硅镜热变形对光束传输特性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(10): 1615- 1619.
- [36] 杜少军, 陆启生, 舒柏宏, 等. 激光辐照下非稳腔变形对激光模式的影响[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(1): 53- 57.
- [37] Bashkin A S. Design Features and Problems in Development of Autonomous Mobile CW DF Laser Systems of Various Power[C]//SPIE 2005, 6053: 1- 7.
- [38] Bashkin A S, Beznodnev V N, Polinovsky D V. Possibilities of Formation of High Directional Laser Beam in Large-scale Chemical CW DF lasers [C]//SPIE 2006, 6053: 1- 10.