

高功率二极管泵浦固体激光谐振腔的进展和分析*

吕百达 邵怀宗

林菊平 代 明

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064)

(西南技术物理研究所, 成都, 610041)

摘要: 对近年来用于高功率二极管泵浦固体激光器的新型光腔, 如棒成像非稳腔, 近共心非稳腔, 折迭腔以及 SBS 相位共轭 MOPA 系统等进行了深入的分析, 并对实现高功率输出和高光束质量的相关技术作了讨论。

关键词: 二极管泵浦固体激光器 棒成像非稳腔 主振荡器-功率放大器 受激布里渊散射

Recent advances and analysis of optical resonators used for high power diode-pumped solid-state lasers

Lü Baida, Shao Huaizong

(Institute of Laser Physics & Chemistry, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Lin Juping, Dai Ming

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, 610041)

Abstract: In this paper, some novel resonators used for high-power diode-pumped solid-state lasers in recent years, such as the rod imaging unstable resonator, near concentric unstable resonator and folded resonators, as well as the SBS phase conjugated MOPA system have been analyzed in depth, and the relevant techniques for achieving both high output power and good beam quality have been discussed.

Key words: diode-pumped solid-state laser (DPL) rod imaging unstable resonator (RIUR) master oscillator and power amplifier (MOPA) stimulated Brillouin scattering (SBS)

一、引 言

二极管泵浦固体激光器(DPL)因具有热效应小、效率高、器件结构紧凑、能获得高功率和高光束质量输出等优点,而成为固体激光器一个富有生命力的发展方向,倍受青睐。高功率DPL在工业材料加工、战术军用和惯性约束聚变等方面展示出广阔的应用前景,近年来研究工作进展迅速。发展高功率DPL技术涉及高功率固体激光材料、高功率二极管激光阵列、泵浦与冷却技术、高功率激光谐振腔以及振荡放大和改善光束质量技术等诸多材料科学、器件物

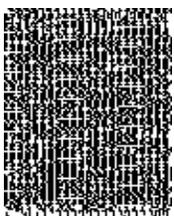
* 本文主要内容在第四届全国激光技术青年学术会议上报告。

参 考 文 献

- 1 Hall D R, Baker H J. L F World, 1989; (10): 77~ 80
- 2 Hill C A, Hall D R. Appl Opt, 1985; 124(9): 1283~ 1290
- 3 He D, Hall D R. J A P, 1984; 56(3): 856~ 857

* * *

作者简介: 王新兵, 男, 1967年1月出生。现在从事扩散冷却CO₂激光器的研究工作。



理和工程技术问题。本文重点对高功率二极管泵浦固体激光器用光腔研究的新进展和有关技术问题作一评述,并结合我们自己工作的体会进行分析讨论。

二、棒成像非稳腔和近共心非稳腔

在美国 Fibertek, Inc. 的高平均功率(0.5~2.5kW)、高光束质量(光束参数乘积 $\leq 2.6\text{mm}\cdot\text{mrad}$) DPL 研究项目中,采用了图 1, 2 所示的棒成像非稳腔(RIUR)和近共心非稳腔(NCUR)^[1]。激光介质用二根 $\varnothing 8.5\text{mm} \times 40\text{mm}$ 的 Nd:YAG 棒在腔内串接,流动液体冷却。每根棒用 40mm 长的高功率二极管阵列进行双侧泵浦。对图 1 的棒成像非稳腔,曲率半径 $\rho = 30\text{cm}$ 的凹面全反射镜 M 位于距二棒中点 30cm 处以满足棒成像条件。输出镜为六阶超高斯反射率镜(VRM),中心反射率 85%,膜斑半径 3mm。在二棒间放置的 90° 石英偏振旋转器起校正热致应力双折射和双热透镜效应作用。在放大率一定条件下,设计为负支的棒成像非稳腔比正支共焦非稳腔对腔镜失调要不灵敏得多。当输入电功率 3.3kW,占空比 15%时,得到平均输出功率 $P_{\text{out}} = 335\text{W}$,总效率为 10%,斜效率为 19%,光束参数乘积 $3.8\text{mm}\cdot\text{mrad}$,对应 M^2 因子(衍射极限倍率因子)为 11。

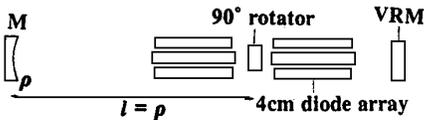


Fig. 1 Rod imaging unstable resonator

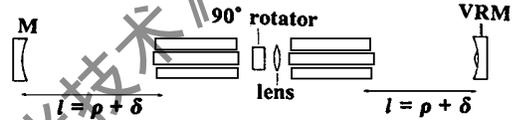


Fig. 2 Near concentric unstable resonator

附表 二极管泵浦和闪光灯泵浦的固体激光器性能比较

二极管泵浦		闪光灯泵浦	
稳定共振腔			
棒长	8cm	14cm	
输出功率	540W	550W	
光束质量	60mm·mrad ($M^2 = 176$)	75mm·mrad ($M^2 = 221$)	
棒热透镜	3.0(屈光度)	4.6(屈光度)	
输入功率	3.3kW	12kW	
总效率	16.4%	4.6%	
非稳腔			
	NCUR	RIUR	
输出功率	光束质量		
185W	1.3mm·mrad ($M^2 = 3.8$)		
215W	2.1mm·mrad ($M^2 = 6$)		
335W	3.8mm·mrad ($M^2 = 11$)		

为进一步提高光束质量和对热透镜效应的不敏感性,使用了图 2 位于 $g_1g_2 = -1$ 点之外的近共心非稳腔为更有效地补偿热致应力双折射和双热透镜效应,除了在二棒间放置 90° 旋转器外,亦可等效地用一个透镜组或将二棒端面磨成球面来代替,并可用矩阵方法作计算设计^[2]。两个腔镜曲率半径 ρ 均为 10cm,VRM 为六阶超高斯反射率镜,膜斑半径 3.5mm。偏置量 $\delta = l - \rho$ (l 为棒与同侧腔镜间距离)决定光腔放大率与棒热焦距关系,实验中应调节 δ 使输出光束亮度达最大。当平均输出功率 P_{out} 为 185W 时,得到光束参数乘积 $1.3\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ($M^2 = 3.8$), P_{out} 为 215W 时,光束参数乘积 $2.1\text{mm}\cdot\text{mrad}$ ($M^2 = 6$)。实验发现光束质量随输出功率变化比预期的要大,这是因为除棒热透镜效应外,还有热畸变相伴出现。主要的畸变是球差,由棒中非抛物线径向温度引起。附表给出了闪光灯泵浦和激光二极管泵浦 Nd:YAG 激光器,以及使用稳定腔和非稳腔的实验结果,以供参考。由表可知,二极管泵浦比闪光灯泵浦效率提高 3~4 倍。并且,与稳定腔相比较,采用补偿热致应力双折射和双热透镜效应的棒成像和近共心非稳腔,有效地提高了高功率 DPL 的光束质量。

三、折迭腔

除用棒状激光介质外,高功率 DPL 还广泛使用板条状激光介质,包括布儒斯特角端面和直端面板条介质,并采用折迭腔型以得到很好的模匹配,提高提取效率。

1. 紧凑折迭腔

用二极管阵列单侧泵浦 $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 20\text{mm}$ Nd: YAG 或 Nd: YLF 板条介质的紧凑折迭腔 (TFR)^[3] 见图 3, 它由两个曲

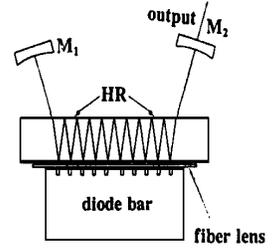


Fig. 3 Tightly folded resonator

率半径为 30cm 的全反射镜和输出耦合镜 M_1, M_2 构成,总腔长约 14cm ,板条介质起折迭光路作用,在泵浦面上镀有对二极管波长增透和对激光振荡波长全反的二向色膜,另一面也镀有这种二色膜。用光纤透镜,将二极管激光准直后耦合到板条中。仔细调节镜 M_1 和 M_2 使激光在板条中来回反射时,在泵浦面上的反射点与二极管泵浦点重合,可实现最佳模匹配,不需置限模光阑就能获得 TEM_{00} 模输出。

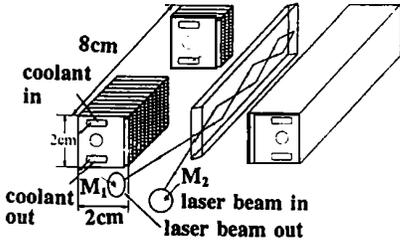


Fig. 4 Folded resonator configuration with the diode pumping and three diamond optical path

紧凑折迭腔的泵浦方式综合了端面泵浦和侧面泵浦 DPL 的优点,泵浦光利用率高,热能够在大的表面散逸,是高光束质量、高效率 DPL 可选用的一种腔型。

2. 千瓦级 DPL 用折迭腔

美国劳伦兹·利弗莫尔国家实验室 (LLNL) 千瓦级 DPL 装置示意于图 4^[4]。图中两个球面镜曲率半径均为 75cm ,激光在 $4\text{mm} \times 16\text{mm} \times 90\text{mm}$ 的 Nd: YAG 直端面板条中以锯齿形光路往返传输,形成棱形光路。板条介质一端镀上对 $1.06\mu\text{m}$ 全反膜,起折迭反射镜的作用,板条另一端距球面镜 20cm 。折迭腔使激光在板条介质中有大的填充因子。用微通道冷却高功率激光二极管阵列双侧泵浦,二极管阵列外观几何尺寸 $20\text{cm} \times 20\text{cm} \times 80\text{cm}$ 。LLNL 利用该装置在 1992 年已实现平均输出功率大于 1kW 激光输出,占空比 35% ,光-光转换效率 $23\% \sim 28\%$ 。若采用非稳腔,可得到近衍射极限输出光束质量。

3. 象传递 Z 型腔

法国 Commissariat a l' Energie Atomique 在二极管泵浦 Nd: YAG 内腔倍频装置中使用了图 5 所示象传递 Z 型腔^[5]。腔长 0.5m ,四个腔镜 M_1, M_2, M_{200} 和 M_{100} 为对 $1.064\mu\text{m}$ 高反的平面镜 (M_1, M_2),曲率半径 200mm (M_{200}) 和 100mm (M_{100}) 的凹面镜。 M_1^* 和 M_2^* 镜对 $0.532\mu\text{m}$ 高反。 $\phi 6\text{mm} \times 130\text{mm}$ 的 Nd: YAG 棒通过 M_{200} 和 M_{100} 成象在 $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 6\text{mm}$ 的 KTP 倍频晶体上,光腔允许倍频光沿相反方向通过 KTP 后出射。用 35 个 20W 的 CW 二极管阵列包分为五组对称侧泵浦,声光调 Q, 频率 27kHz 。实验得到高达 106W 的多模倍频光输出,光-光转换效率 15% ,电-光转换效率 5.4% 。

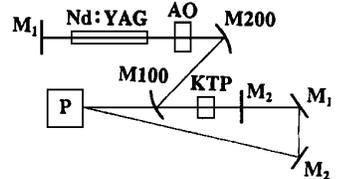


Fig. 5 Z-shaped resonator device; P—intracavity diode pumped frequency-doubled Nd: YAG laser. AO—acousto-optical device; P—power meter

四、新型虚点源多程泵浦平凹腔

日本电信大学激光科学研究所采用了图 6 所示新型虚点源多程泵浦平凹腔,激光介质为

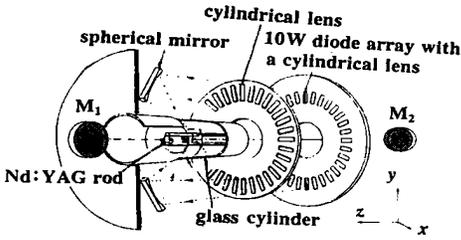


Fig. 6 Experimental setup of the virtual-point-source diode-array-pumped Nd:YAG laser

传递直至泵浦光大部分被吸收。光腔由曲率半径 5m 的全反射凹面镜 M_1 和反射率 77.5% 的平面输出镜 M_2 构成, M_1 和 M_2 与 YAG 棒距离分别为 0.33m 和 0.77m, 腔内插有一布氏板起偏振作用。图 7 给出了经多次反射后的泵浦光的类高斯剖面 ((a) 计算值) 和输出激光等光强线 ((b) 测量值)。此外, 一些新型的正在发展的光腔, 如利用衍射光学元件构成的梯度相位镜 (GPM) 腔^[7], 在 DPL 中也有良好的应用前景。

五、带受激布里渊散射相位共轭器的多程振荡-放大系统

理论分析和实验结果指出^[8], DPL 技术中仍面临在向高功率发展时如何保持高光束质量的技术难题, 美国 LLNL 研制成功的带受激布里渊散射 (SBS) 相位共轭器的多程振荡-放大 (MOPA) 系统 (图 8) 给了我们有益的启示。该装置集成了象传递、SBS 相位共轭、板条激光放大技术、高效率均匀面泵浦漫反射聚光腔和多程 MOPA 等多项关键技术, 设计方案有很大的灵活性。既可用于 Nd:YAG, 又可用于钕玻璃激光系统; 既可用于闪光灯泵浦, 又可用于二极管阵列泵浦。其工作原理为: 主振荡器重复频率工作, 产生一个所要求的脉宽、衍射极限的单频激光, 并为相位共轭放大提供一个参考波面。输出激光经前置放大和扩束, 被象传递到再生放大环中。在放大环中的偏振片和 90° 偏振旋转器起被动偏振开关作用。输入光束通过环一次, 偏振方向旋转, 然后, 第二次通过放大环。在第二次通过环后, 偏振方向再次旋转, 光束被偏转到 SBS 相位共轭振荡-放大器中。在高功率激光相位共轭中, 需解决 SBS 波前反演和时间波形保真度、SBS 介质光路击穿等一系列问题, 为此采用了 SBS 振荡-放大构型和象传递原理, 用 CCl_4 作 SBS 介质。由相位共轭器

$\varnothing 3\text{mm} \times 104\text{mm}$ Nd:YAG 棒, 得到 CW 线偏振 26.5W 的基模激光输出^[6]。该构型的主要特点是在泵浦腔设计上使用了虚点源多程泵浦和象传递原理, 以产生一个合适的类高斯或均匀分布的泵浦剖面。其基本原理是: 利用柱透镜准直和球面镜聚焦光学系统, 将二极管阵列发出的环状光束聚焦在光轴 z 上, 成象为虚点源, 以球面波形式扩展后被镀银的玻璃柱面反射, 再聚焦到棒上。虚点源象以相同方式沿棒

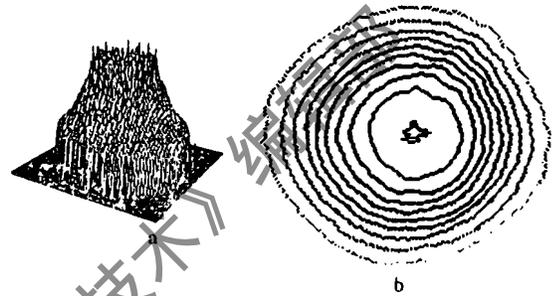


Fig. 7 a—Calculated pumping profiles for the total passes
b—Measured contour plot of the output beam from the virtual-point-source DPL

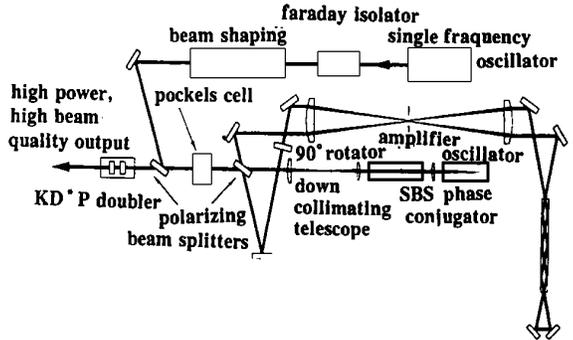


Fig. 8 Master oscillator and power amplifier geometry with SBS phase conjugation

器重复频率工作, 产生一个所要求的脉宽、衍射极限的单频激光, 并为相位共轭放大提供一个参考波面。输出激光经前置放大和扩束, 被象传递到再生放大环中。在放大环中的偏振片和 90° 偏振旋转器起被动偏振开关作用。输入光束通过环一次, 偏振方向旋转, 然后, 第二次通过放大环。在第二次通过环后, 偏振方向再次旋转, 光束被偏转到 SBS 相位共轭振荡-放大器中。在高功率激光相位共轭中, 需解决 SBS 波前反演和时间波形保真度、SBS 介质光路击穿等一系列问题, 为此采用了 SBS 振荡-放大构型和象传递原理, 用 CCl_4 作 SBS 介质。由相位共轭器

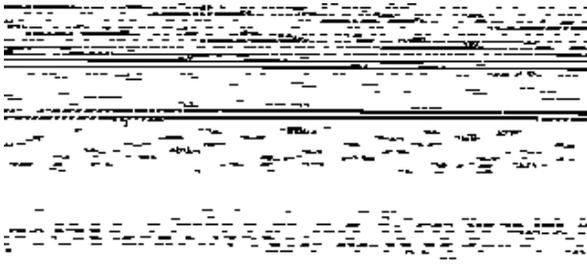


Fig. 9 A comparison of the far-field profiles for 3Hz and 75W operation a—without SBS phase conjugation b—with SBS phase conjugation c—overlays horizontal divergences of both cases

系统中可得到 400mJ~30J 单脉冲能量、脉宽 5~600ns 激光输出, 钕玻璃系统工作频率 6Hz, 输出功率大于 150W, Nd:YAG 系统工作频率可达 2.3kHz。在这两种情况下, 都得到近衍射极限的输出光束质量, 并有极好的瞄准稳定性。图 9 给出了使用 SBS 和不用 SBS 相位共轭器的远场光束分布。由图 9 可见 SBS 对改善输出光束质量所起的重要作用。LLNL 近期工作表明, 若用二极管阵列代替氙灯泵浦, 钕玻璃 MOPA 系统的重复频率能提高约 2 倍, 可望得到 500W 的平均输出功率。该系统在激光材料加工、X 光激光产生实验和激光雷达等多方面有良好的应用前景。

六、小结

由本文分析可知, 高功率二极管泵浦固体激光器用谐振腔与闪光灯泵浦光腔相比较有若干共同点, 例如采用非稳腔、象传递原理和 VRM 镜提高光束质量, 用 SBS 非线性相位共轭补偿波前畸变, 以及用 90° 偏振旋转器校正应力双折射和双热透镜等。但高功率 DPL 因泵浦方式的改变, 热效应比闪光灯泵浦大为减小, 在光腔几何参数选择、最佳模匹配、冷却和泵浦光耦合方式上都有所不同。有必要针对高功率 DPL 特点, 对其光腔结构进行深入研究。特别是, 在往更高功率水平发展时, 如何采用结构紧凑的新型光腔或 MOPA 系统以提高提取效率和保持良好光束质量, 以及腔内外的光束相干合成技术等是值得重视的研究问题。

该项工作得到国家高技术强辐射重点实验室基金(No. H96-1)的支持。作者之一(吕百达)在 1996 年 11 月访德期间, 曾就本文有关问题与柏林技术大学 H. Weber 教授进行十分有益的讨论, 谨此致谢!

参 考 文 献

- 1 Burnham R, Witt G *et al.* SPIE, 1994; 2206: 489~498
- 2 Lu Q, Kugler N, Weber H *et al.* Opt & Quant Electron, 1996; 28(1): 57~69
- 3 Bear T M, Head D F, Gooding P *et al.* IEEE J Q E, 1992; 28(4): 1131~1138
- 4 Albrecht G, Beach R J. Engery & Technology Review, 1992; 6: 7~14
- 5 Garrec B J Le, Raze G J. Opt Lett, 1996; 21(24): 1990~1992
- 6 Uehara N, Nakahara K, Ueda K. Opt Lett, 1995; 20(16): 1707~1709
- 7 Chen D, Wang Z, Ames J *et al.* Opt Lett, 1995; 20(7): 663~665
- 8 翟群, 吕百达, 杨成龙. 二极管侧泵浦板条固体激光器的热效应研究(即将发表)
- 9 Dane C D, Zapata L E, Neuman W A *et al.* IEEE J Q E, 1995; 31(1): 148~163

* * *

作者简介: 吕百达, 男, 1943 年出生。教授, 博士生导师。主要从事新型和高功率固体激光器件与技术, 光腔物理与光束传输变换的研究工作。