

高功率固体激光和相关单元技术研究的新进展

吕百达

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064)

摘要: 对高功率固体激光和相关单元技术研究的新进展, 如高功率二极管泵浦固体激光器, 用于惯性约束聚变和惯性聚变能的二极管泵浦固体激光驱动器, TW 和 PW 级高亮度源, 以及板条固体激光放大器等研究的新进展作了评述和分析。

关键词: 高功率固体激光器 二极管泵浦固体激光器 惯性约束聚变和惯性约束聚变能 高亮度源 板条激光放大器

Some recent advances in high-power solid-state lasers and related technologies

L Baida

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

Abstract: In this paper, some recent advances in high-power solid-state lasers and related technologies, such as the high power diode-pumped solid-state laser (DPL), DPL drivers for inertial confinement fusion and inertial fusion energy, terawatt and petawatt ultrahigh brightness laser sources, as well as slab laser amplifiers etc. have been reviewed and analyzed.

Key words: high-power solid-state laser diode-pumped solid-state laser (DPL) inertial confinement fusion (ICF) and inertial fusion energy (IFE) ultrahigh brightness laser source slab laser amplifier

引 言

近年来, 因工业材料加工和惯性约束聚变 (ICF) 等应用研究的推动, 高功率固体激光和相关单元技术研究的进展非常迅速。结合作者最近参加国际会议和在国外访问工作的见闻和体会, 对高功率二极管泵浦固体激光器 (DPL)、用于 ICF 和惯性聚变能 (IFE) 的 DPL 驱动器、TW (10^{12} W) 和 PW (10^{15} W) 级高亮度源以及高功率固体激光相关单元技术的新进展作一评述, 并对发展前景作了分析。

一、高 功 率 DPL

用激光二极管取代闪光灯已成为固体激光发展的必然趋势。DPL 的调 Q、锁模、放大和非线性频率转换技术等为近年来固体激光技术研究的一个热点。在泵浦源 (高功率二极管阵列、层迭组件) 解决之后, 国际上高功率 DPL 研究不断向更高目标推进。例如, 德国柏林激光和医学技术研究公司 (LMTB)^[1], 用 DILAS 公司生产的微通道冷却二极管层迭组件侧泵浦 $f5\text{mm} \times 80\text{mm}$ Nd: YAG 棒, 在平行平面腔中用 5 个二极管阵列 (最大输出功率 300W 阵列) 平行泵浦时, 得到最大 CW 输出功率 440W, 用 $f6.3\text{mm} \times 177\text{mm}$ Nd: YAG 棒, 12 个二极管阵列泵浦, 得到 CW 输出功率 1kW, 见图 1。进一步, 用两个这样的组件在一个平行平面腔中串接, 已获得近 2kW 输出。实验得到高功率 DPL 的基本激光性能参数见表 1。

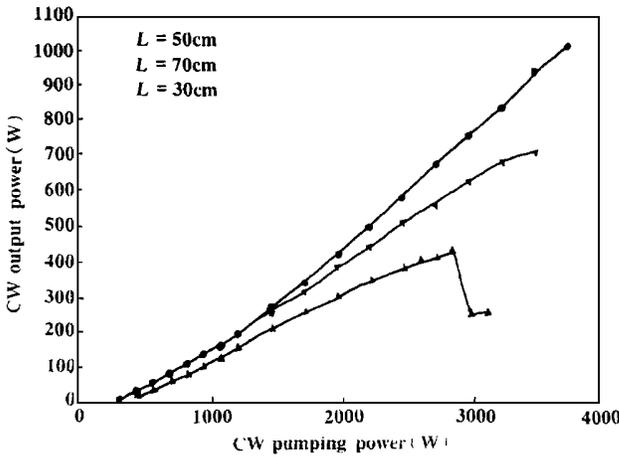


Fig. 1 Output power vs optical pumping power for a f 6.3mm x 177mm Nd:YAG rod DPL system. L- Resonator length

表1 两个二极管泵浦 Nd:YAG 棒状激光系统的实验结果

	LM TB	ILT
棒半径(mm)	3.2	2.5
光-光转换斜率效率	32	32
光-光转换效率	30	28
总电-光转换效率	13.5	11.2
径向屈光度(m^{-1}/kW)	2.5	4.3
热透镜系数(mm/kW)	0.057	0.069
微分热透镜系数(mm/kW)	0.29	0.31
光束参数乘积/最大输出功率 ($mm \cdot mrad/kW$)	21	20

注: LM TB- 柏林激光和医学技术公司 ILT- 亚琛激光技术研究所

向更高输出功率和高光束质量发展, 可使用板条介质, 典型例为图 2 所示被 Koechner 称为“代表当今工艺水平”的二极管泵浦板条激光系统^[2]。几何尺寸为 7mm x 20mm x 200mm 的 Nd:YAG 板条被 14 个二极管阵列双侧泵浦。每个二极管阵列由 16 个峰值功率 50W, 占空

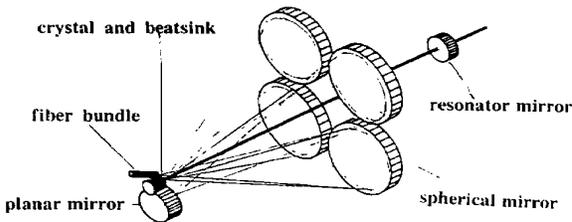


Fig. 3 Schematic view of the Yb:YAG thin-disk laser with eight pump beam passes

由此可推知, 与闪光灯泵浦高功率固体激光器比较, 高功率 DPL 的总效率提高 2~ 2.5 倍, 热负荷约低 30%。这样, 泵浦功率可提高, 因而能从激活介质中提取更多能量。现在, 利用多棒串接或光纤耦合并接系统, 将 DPL 输出功率定标到 5kW 已无技术上的困难。

使用二极管阵列泵浦棒状固体激光介质的优点是器件结构简单、稳定, 不需要使用复杂的技术, 便于工业材料加工等实际应用。其主要缺点是光束质量较差。为

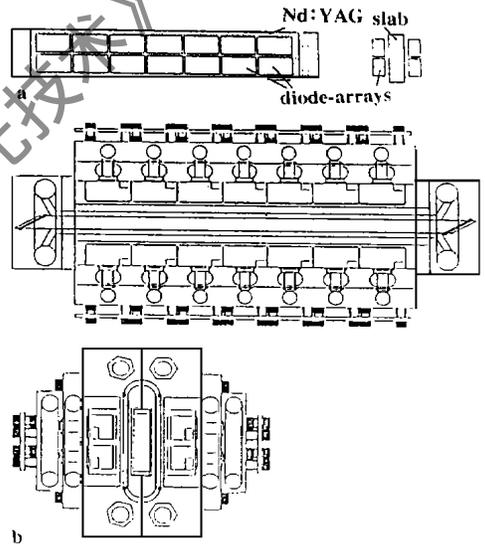


Fig. 2 A state-of-the-art diode pumped Nd:YAG slab laser
a- arrangement of the diode arrays b- cross section of the pump head

比 30% 的条 (bar) 组成。重复频率 2kHz, 脉宽 150μs, 预期得到平均输出功率 1.5kW, 光束质量 3 倍衍射极限。

除使用板条介质外, 薄片也是一种选择。在薄片激光器中, 波前畸变几乎与输出功率无关, 因而即使在高输出功率情况下, 也能得到高光束质量。JENOPTIK 激光和光学系统公司与斯

图加特大学的激光科学家合作,研制出图 3 所示高功率 Yb: YAG 薄片^[3],图中使用了多镜多次反射成像泵浦技术以提高效率。实验得到 64% 的光-光转换效率和 255W 的输出功率。在输出功率 70W 时,得到近衍射极限($M^2 = 1.24$)的高光束质量和 38% 的转换效率。

二、用于 ICF 和 IFE 的 DPL 驱动器

1996 年 10 月,在巴黎召开的第二届国际 ICF 固体激光器年会上,劳伦兹·利弗莫尔国家

实验室(LLNL)的激光科学家 Krupke 系统地报道了美国用于 ICF 和 IFE 研究的 DPL 驱动器的概念设计和发展计划(图 4)^[4]。与闪光灯泵浦钕玻璃的国家点火装置(NIF)并驾

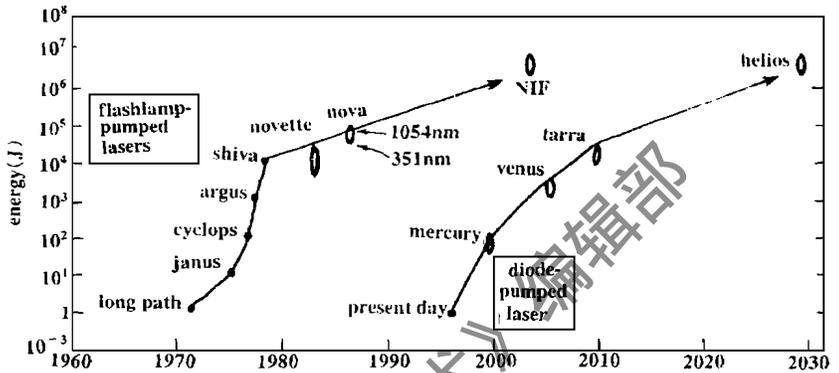


Fig. 4 Multiple-decade-long development cycles of the ICF laser architectures in USA

表 2 用于 IFE 的 DPL 驱动器模块

定标特性	演示系统			
	Mercury	Venus	Terra	Helios
系统名称	亚束元	2 束元	束组 (beamlines)	345 束线
模块水平				
Yb: S-FAP 板条尺寸 (cm × cm)	3 × 5	10 × 16.6	10 × 16.6	10 × 16.6
被泵浦束元数	1	2	15	345
总泵浦二极管阵列峰值功率	900kW	7.5MW	60MW	20GW
总泵浦二极管阵列平均功率	4.5kW	90kW	670kW	230kW
系统输出能量 (1.047μm)	100J	2kJ	13kJ	4.6MJ
系统输出平均功率 (1.047μm)	1kW	20kW	150kW	51MW

齐驱, IFE 电厂的 DPL 驱动器发展分为四个阶段,称为 Mercury, Venus, Terra 和 Helios。Mercury 系统用 22 张泵浦横截面为 3cm × 5cm Yb: S-FAP 片作工作介

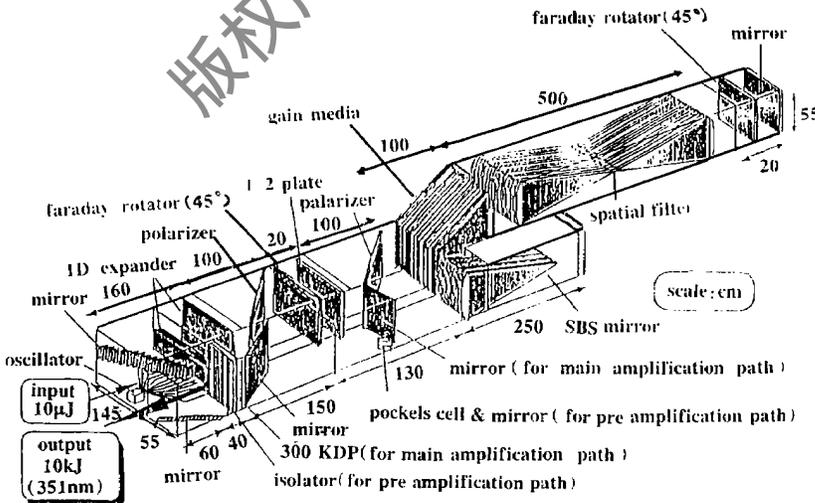


Fig. 5 A blue 10kJ module at ILE

质, InGaAs 二极管阵列泵浦,使用带普克尔开关的多程阵列组合放大技术,重复频率 10Hz,演示 IFE 驱动器的全功能(与 NIF 的单束元系统类似),输出基频光 (1.047μm) 100J, 1kW, 设转换效率为 80%, 则可得到 0.349μm

的三倍频输出约 80J, 0.8kW。从 Venus 系统开始, 进入全尺寸(板条泵浦横截面 10cm × 16.6cm)实验。预期在 2030 年左右完成的 Helios 系统实质上已是一个完整的 IFE 驱动器, 标称输出 4.6MJ, 51MW 基频光(三倍频光 3.7MJ, 41MW), 工作频率 1Hz, 供 1GW_eIFE 电厂使用, 见表 2。

1997 年在 Prag 举行的国际激光物理学会议上日本大阪大学激光工程研究所(ILE)的 Nakai 教授提出了用于 IFE 的 DPL 驱动器 KOYO 新设计方案。KOYO 由 32 束组成, 1.5cm × 30cm × 55cm 的钽玻璃(HAP₄)片被 1.3kW/cm² AlGaAs 二极管阵列泵浦, 输出三倍频(0.35μm)光能量 4MJ, 总效率 12%, 重复频率 12Hz。驱动器模块设计示意图于图 5。它由 15 束组成, 每束将 15μJ 注入能量放大为 700J 蓝光, 总输出能量为 10kJ。还使用受激布里渊散射(SBS)和 45° 法拉第旋转器补偿热聚焦和双折射效应。

为实现放大系统最佳化, 已设计了图 6 所示二极管泵浦锯齿形光路板条放大系统, 八程放大演示系统由 Nd:YAG 板条、法拉第旋转器、偏振片、高反射镜 M₁~M₅, 90° 石英旋转器和 λ/4 波片等组成, 该系统与 LLNL 的设计方案有相似之处, 但更为简单, 其中间成果可获得工业应用。

三、TW 和 PW 级高亮度源

啁啾脉冲放大(CPA)技术的发明, 使得从高储能激光介质中有效提取能量, 在 ps(10⁻¹²s)和 fs(10⁻¹⁵s)超短脉冲中得到 TW 和 PW 级输出功率, 10¹⁸W/cm²~10²¹W/cm² 聚焦功率密度成为可能。10²¹W/cm² 功率密度相当于 10¹²V/cm 电场强度, 是束缚原子内库能场强的 100 倍, 因此, TW 和 PW 级高亮度源在 X 光激光产生、强场物理和快点火等方面有十分诱人的应用, 成为国际上高功率固体激光技术一个重要研究方向。英国卢瑟福实验室用钛宝石 CPA 前端和 XULCAN 钽玻璃混合系统, 得到了 10¹⁸~10¹⁹W/cm² 输出功率密度, 升级后输出功率将从 35TW 提高到 200TW 以上^[6]。类似的高亮度源在美国 LLNL、法国里梅尔实验室、Ecole Polytechnique 大学 LULI 实验室和日本大阪大学 ILE 等均已建立, 并在升级。

TW 和 PW 级超短脉冲激光系统大体上由四部分组成, 即: (1) 超短脉冲振荡器。通常在商品化的钛宝石振荡器中利用克尔

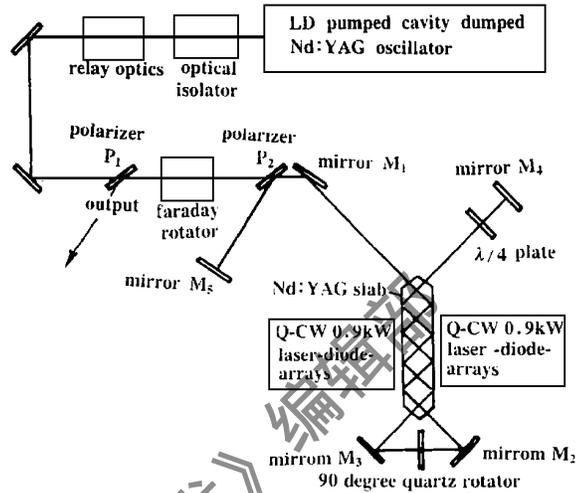


Fig. 6 Schematic setup of the laser-diode pumped eight pass slab amplifier

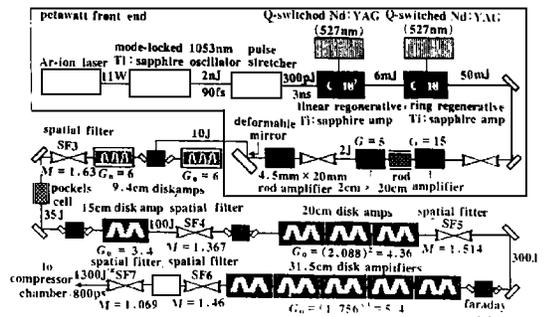


Fig. 7 Schematic illustration of the petawatt laser system at LLNL

效应锁模产生一个纳焦耳量级、脉宽为 f_s 的高对比度 (10^6) 的变换极限脉冲; (2) 展宽器。利用光纤或光栅构成的展宽器, 将脉冲展宽 10^4 倍以上; (3) 放大器。将展宽的脉冲通过放大链使能量/功率放大 $10^{10} \sim 10^{11}$ 倍; (4) 压缩器。用大口径光栅对构成的压缩器将脉宽压缩 10^4 倍, 最后得到一个有极高对比度、接近衍射极限的 TW~PW 量级脉冲。大尺寸、高效率、高破坏阈值衍射光栅对的制备和脉冲压缩是该系统中最具挑战性的技术。

图 7 为 LLNL 研制的有代表性的 PW 系统^[7]。该系统的前端由氙离子泵锁模钛宝石振荡器、脉冲展宽器、钛宝石激光前置放大器和钽玻璃棒状放大器组成, 前端输出脉冲注入 NOVA 的一条片状激光放大链 (beamline) 中。放大后的激光经 74cm 直径光栅对 (图中未画出) 压缩后, 得到 > 600J, 脉宽约 $440f_s$ 的输出激光。换置 94cm 直径光栅对后, 预期可得到 1kJ 输出, 聚焦功率密度超过 10^{21}W/cm^2 。

四、高功率固体激光相关技术

1. 钽玻璃板条固体激光放大系统

俄美联合研制的菲涅耳菱体板条激光四程放大系统为图 8 所示^[8,9]。该系统工作介质为磷酸盐钽玻璃, 利用锯齿形光路和板条几何构型补偿热效应, 其目的是试图用该系统代替 ICF 驱动器中的 16 个 $f_5\text{cm}$ 棒状放大器。

LLNL 还研制了用于材料试验的大口径、高增益三程钽玻璃板条激光放大系统^[10]。用 LHG-5 磷酸盐钽玻璃为工作介质, 其几何尺寸为 $31\text{cm} \times 8\text{cm} \times 1.1\text{cm}$ 。实验得到放大系统增益分布不均匀性 $\pm 3\%$, 最大应力退偏 $\leq 2.5\%$ 。

2. 使用 SBS 和退偏补偿的高功率、高光束质量主振荡器-功率放大系统

德国 LMTB 和柏林技术大学的研究表明^[11], 在高功率 Nd:YAG 主振荡器功率放大系统 (MOPA) 中, 仅使用 SBS 技术不能自动补偿介质的热致退偏效应。实验装置见图 9, 用 $f_6.3\text{mm} \times 102\text{mm}$ Nd:YAG 棒作激活介质, CS_2 作 SBS 介质, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q, 在放大器间置 90° 石英旋转器 QR 和像传递望远镜 L_4, L_3 , 实验得到平均功率 215W 的调 Q 输出, 光束参数乘积小于 $1\text{mm} \cdot \text{mrad}$ 。

3. 衍射光学和高功率激光的光束匀滑化技术

衍射光学元件 (DOE) 设计和加工工艺的进展不断开辟新的应用领域, 并成为在高功率激光技术中一个有吸引力的光束匀滑化方案。例如, 已进行了用衍射光学微透镜阵列实现工业准分子和 CO_2 激光束匀滑的实验研究。

在 ICF 领域, 罗切斯特大学用模拟退火法设计并用光蚀刻法 (optical lithography) 加工出

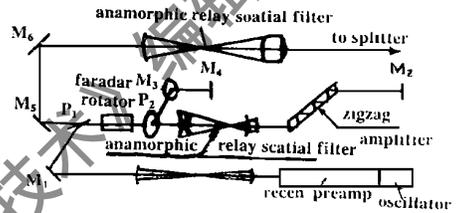


Fig. 8 The four-pass fresnel rhomb zig-zag amplifier
M₁~ M₆- mirrors P₁, P₂- polarizers

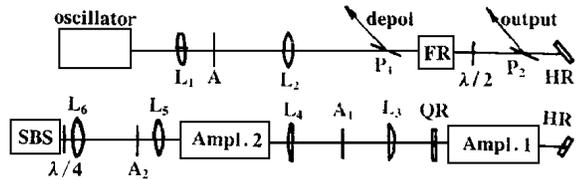


Fig. 9 Experimental setup of the MOPA system
L₁~ L₆- lens P₁, P₂- thin-film polarizers FR- 45° Faraday rotator M₂, M₄- retardation plates HR- high reflective mirrors Ampl. 1, Ampl. 2- Nd:YAG amplifiers QR- 90° quartz rotator A, A₁, A₂- apertures SBS- SBS cell

了大尺寸的连续分布位相板(DPP),并在 OMEGA 装置上成功地作了试验^[12]。LLNL 用改进的 G-S 算法设计,在熔石英上用蚀刻工艺和湿法蚀刻(lithographic processes and wet etching)相结合的技术加工出大尺寸相息板(KPP),在 NOVA 和单束元上作了试验,因量化和加工误差引入的效率损失对单束元上 KPP 约 2%,对 NOVA 上 KPP 约 3%~4%^[13]。

此外,用常规光学元件作光束整形器的研究亦在进行。例如,亚琛激光技术研究所(ILT)研制出用于二极管阵列和 DPL 整形的阶梯反射镜^[14]。

五、小 结

当前高功率固体激光发展的显著特点是二极管泵浦和多种现代光学和先进激光技术的应用。高功率固体激光研究的进展必将推动工业材料加工、激光医学和 ICF 等相关的应用研究,发展前景光明。

参 考 文 献

- 1 Weber H. Diode pumped solid-state lasers in the kW-range. Prag: Conf. on Laser Physics, 1997
- 2 Koehner W. Solid-state Laser Engineering, 4th ed. Springer-Verlag, 1996: 444~445
- 3 Hollemann G, Koch R, Hergenhan G. Laser und Optoelektronik, 1997; 29(4): 76~83
- 4 Krupke W F. SPIE, 1997; 3047: 73~77
- 5 Nakai S, Izawa Y, Nakatsuka M. Development of diode pumped solid-state laser and its application to laser fusion and industry. Prag: Conf. on Laser Physics, 1997
- 6 Danson C N, Angood S, Barzanti L J. SPIE, 1997; 3047: 505~515
- 7 Pennington D M, Perry M D, Stuart B C. SPIE, 1997; 3047: 490~500
- 8 Bikmatov R G, Charikov A V, Chemyak V M. SPIE, 1995; 2633: 574~582
- 9 Bikmatov R G, Chemyak V M, Hunt J T. SPIE, 1997; 3047: 171~177
- 10 Shoup M J, Kelly J H, Smith D L. Appl Opt, 1997; 36(24): 5827~5838
- 11 Seidel S, Kugler N. J O S A (B), 1997; 14(7): 1885~1888
- 12 Kessler T J, Lin Y, Iwan L S. SPIE, 1997; 3047: 272~281
- 13 Rushford M C, Dixit S N, Thomas I M. SPIE, 1997; 3047: 282~291
- 14 Du K, Liao Y, Loosen P. Opt Commun, 1997; 140(1): 53~56

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。

收稿日期:1998-02-12

• 简 讯 •

固体激光技术发展应用研讨会在蓉召开

由原国防科工委光电专业组委托西南技术物理所主持的固体激光技术发展应用研讨会,5月25~26日在成都召开。全国从事固体激光技术研究和应用的大专院校、科研院所及国防科技单位40余名代表参加了会议。会上宣读论文27篇,内容主要集中在二极管泵浦固体激光器,大功率、高光束质量固体激光器,光参量振荡器和可调谐钛宝石激光器等方面。还讨论了新型固体激光材料,固体激光的位相共轭和功率合成,固体激光雷达和人眼安全激光器等。与会代表对固体激光器的发展应用动向在学术、技术和信息三方面进行了交流,并对军用固体激光发展的短、中、长期目标进行了探讨。特别是有关专家对我国军用固体激光技术今后的发展和需求提出了建议,希望研究部门扩展思路,结合国情,加速开拓固体激光在军事领域和军民两用领域的新应用。

(本刊通讯员)