

高功率二极管泵浦固体激光器研究的新进展

吕百达

(四川大学激光物理与化学研究所, 成都, 610064)

摘要: 本文对高功率二极管泵浦固体激光器和相关技术研究的新进展作了报道和分析。

关键词: 二极管泵浦固体激光器 激光二极管 惯性约束聚变 主振荡器 功率放大器

Recent advances in high-power diode-pumped solid-state lasers

L Baida

(Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University)

Abstract: In this paper the recent developments in high-power diode-pumped solid-state lasers and related technologies are reported and analyzed.

Key words: diode pumped solid-state laser (DPL) laser diode(LD) inertial confinement fusion (ICF) master oscillator and power amplifier (MOPA)

一、引言

二极管泵浦固体激光器(DPL)的显著优点是通过用与固体激光工作物质主吸收峰波长相匹配的激光二极管(LD)代替传统闪光灯的宽带泵浦,以减小激光介质的热效应和提高激励效率。DPL综合了LD重量轻、体积小和固体激光高储能,可定标到高功率等优点,使得在一个结构紧凑的、全固体化的激光器件上实现高功率、高效率、高光束质量和高稳定工作成为可能。例如,美国劳伦兹·利弗莫尔国家实验室(LLNL)1992年研制成功的平均输出功率1kW的DPL激光头尺寸15cm×15cm×10cm,仅有一个葡萄柚大小,这对战术军用当然是十分诱人的,并已在工业材料加工中显示出优势。高功率DPL另一潜在应用是惯性约束聚变(ICF)固体激光驱动器。近年来国际上的研究工作已从概念设计、聚变能电厂成本估算到开始进行小型原理性实验。此外,为使高功率DPL向实用化方向发展,高功率LD阵列、适于LD泵浦的固体激光材料,以及其它与高功率DPL相关的单元器体与技术研究也有了新的进展。下面,拟对近年来国际上高功率DPL和相关技术研究的进展作一评述和分析。

参 考 文 献

- 1 Bafile U, Mazzinghi P. SPIE, 1988; 1021: 120
- 2 Powell H T, Erlandson A C, Jancaitis K S *et al.* SPIE, 1990; 1277: 103~ 120
- 3 克希奈尔 W. 固体激光工程. 北京: 科学出版社, 1983

* * *

作者简介: 冯国英, 女, 1970 年出生。硕士, 博士研究生。主要研究方向为新型和高功率固体激光器, 光束传输变换和光学设计等。

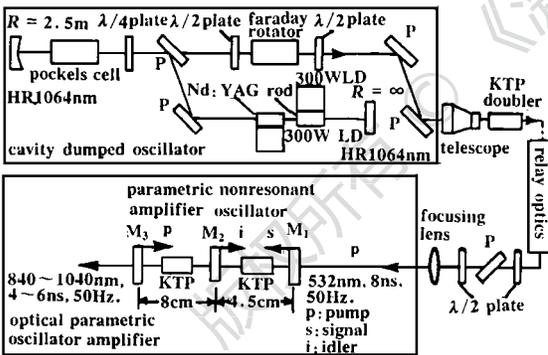


二、高功率 DPL 的单元器件与技术

为使 DPL 向高功率发展,高功率 LD 泵浦源是首当其冲必须解决的问题。LLNL 的著名激光科学家 Krupke 在 1995 年 7 月日本千叶举行的太平洋地区 CLEO 大会上,作了一篇题为“高平均功率二极管阵列,二极管泵浦固体激光器及其应用”的特邀报告^[1],介绍了美国商品化 LD 器件已达到的水平,并指出:(1)采用微通道冷却是使 LD 向高功率发展的关键技术之一,由 LLNL 研制成功的微通道冷却二极管阵列,在 $1\text{kW}/\text{cm}^2$ 热负荷下,温升 $\leq 30^\circ\text{C}$ 。(2)为使高功率 LD 走向市场,重要的是应大幅度地降低价格。目前,美国 LD 成本约为(峰值功率)1 美元/瓦(市场价格为(峰值功率)几十美元/瓦),对聚变能电厂驱动器应用,要求 LD 价格小于(峰值功率)0.1 美元/瓦。在高功率 LD 研制中,迎头赶上的是日本。鉴于 LD 在发展高功率激光中的重要性,日本决心实现高功率 LD 的国产化。我们今年七月访问日本大阪大学激光工程研究所(ILE)时获知,1995 年初滨松公司已研制成功高功率、高效率量子阱 AlGaAs 二极管阵列,功率密度为 $2.5\text{kW}/\text{cm}^2$,电-光转换效率 50%。

针对高功率 DPL 的不同应用,选择和研制性能更好的固体激光工作物质是高功率 DPL 研究工作的另一关键。对高平均功率工作的 DPL,当前 Nd:YAG 仍是首选的工作物质,常采用板条状几何构型和侧泵浦工作方式。日本大阪大学 ILE 的激光科学家对用于 ICF 的 LD 泵浦固体激光工作物质作了详细分析^[2],认为从荧光寿命、受激发射截面、线宽和热冲击参数等考虑,Nd:YAG 和 HOYA 的 LHG8 磷酸盐钽玻璃都不一定是合适的介质。比较之下,HAP4 玻璃、Nd:Y:CaF₂ 晶体、Tm, Ho:YAG 晶体和 Nd:SiO₂ 玻璃是高能量、重复频率工作的 ICF 激光驱动器有吸引力的候选者。LLNL 则致力于开发新的激光材料。例如 Yb:S-FAP(Yb: Sr₅(PO₄)₃F) 晶体,其工作波长 $1.047\mu\text{m}$,适于 InGaAsLD 泵浦,有长的荧光寿命(1.26ms),合适的受激发射截面($7.3 \times 10^{-20}\text{cm}^2$),还有很好的热学、光学和机械性能。并且,能生长出大尺寸、高光学质量的晶体,可比 Nd:YAG 定标到更高功率,是一种适于高功率 DPL 多种应用的有发展前途的工作物质。

此外,在高功率 DPL 的非线性频率转



换、参量振荡和放大技术、高功率 DPL 的热效应和补偿措施、DPL 的最佳化设计等方面的研究工作也很活跃。例如,日本 Srinivasan 等人在图 1 所示参量振荡和放大装置中^[3],用 KTP 晶体作非线性介质,实现了从 750nm 到 1040nm 的调谐,在 920nm 得到 0.45mJ 输出,效率 27% (图 2)。泵浦源是 LD 泵浦的 Nd:YAG 激光,输出能量 2mJ,脉宽 8ns,工作频率

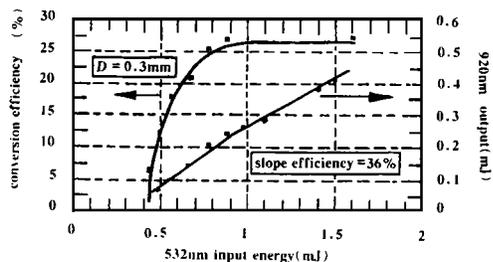


Fig. 2 Performance curves of the OPOA system

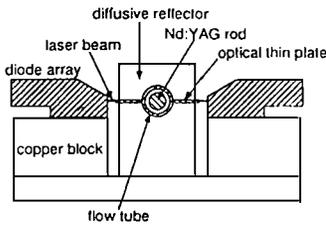


Fig. 3 The cross section of the diode-side pumping configuration of a Nd:YAG laser

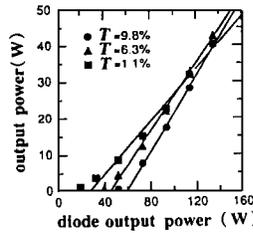


Fig. 4 The multi-transverse-modes laser output power as a function of total output power of six diode arrays

50Hz。Kojima 等人用图3所示 LD 泵浦 Nd:YAG 棒构型和陶瓷漫反射聚光腔^[4], 在 225mm 长的对称球面腔(二球面反射镜曲率半径均为 250mm)中, 得到高达 52.2% 的光-光转换效率, 输出功率大于 40W

机和舰载激光武器上展示良好应用前景, 1992 年 LLNL 研制成功的高功率 DPL 的技术指标为: 输出功率 1kW, 工作频率 2.5kHz, 脉宽 150μs, 光束质量优于 5 倍衍射极限。该器件经工程化研究并进一步改善光束质量(例如, 用变反射率镜光腔、非线性相位共轭技术等)后, 可满足激光致盲和机载千瓦级激光武器的技术要求。向万瓦和更高输出水平发展难于用单根板条来实现。使用多板条串接、主振荡器-功率放大器(MOPA)系统或多台 DPL 并束, 都是可供选择 and 值得进一步研究的技术方案。

四、用于 ICF 的高功率 DPL

按照对聚变能电厂高功率固体激光驱动器的概念设计^[2], 其主要技术指标为: 输出功率 10MJ, 波长 $\leq 0.5\mu\text{m}$, 重复频率 10Hz, 总效率 10%。此外, 还应有满足聚变物理要求的光束质量。显然, 这些技术指标用现有的闪光灯泵浦钕玻璃固体激光驱动器是不可能实现的, 而 DPL 则是最有希望用于聚变能电厂的新一代驱动器的一个候选者。图 5 为 LLNL 的设计方案^[5]。近期用 Yb:S-FAP DPL 小型 MOPA 系统所作的实验结果见图 6, 实验得到的增益和输出与理论计算一致。为验证 DPL 的概念设计,

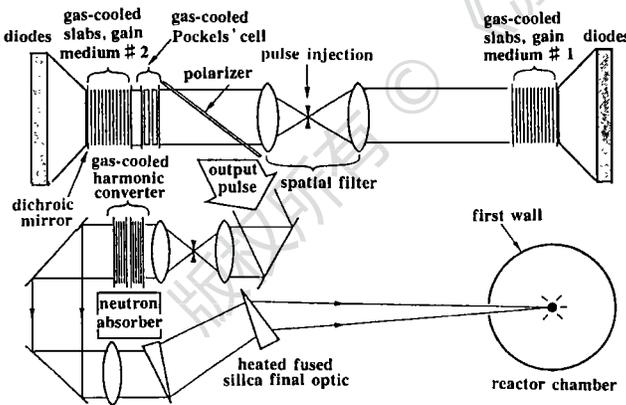


Fig. 5 Schematic representation of diode pumped solid state laser driver for inertial fusion energy

日本 ILE 设计了图 7 所示的 MOPA 系统^[6]。它由 LD 泵浦的 Nd:YAG 主振荡器、再生放大器和功率放大级(包括倍频)等部分组成。实验得到再生放大器增益 71dB, 输出能量 8mJ, 工作频率 50Hz, 提取效率 48%, 脉宽 910ns。功率放大级是 5 个 8mm × 10mm × 14mm 的 Nd:YAG 片状介质, 每片用两个 300W 准连续 LD 阵列双向泵浦, 氦气冷却。据 ILE 的 M. Yamanaka 教授介绍, 经 5 个 Nd:YAG 片状放大器双程放大后, 实验得到输出激光能量 65mJ, 平均功率大于 3W, 光-光转换效率 15%。

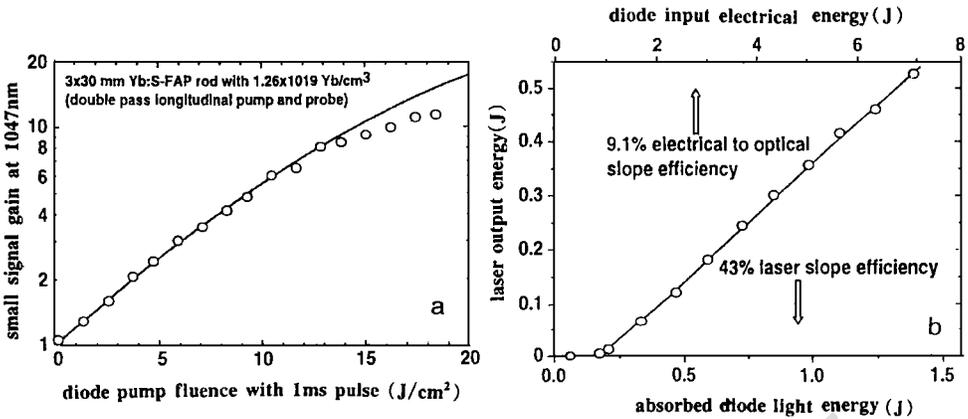


Fig. 6 Amplifier gain (a) and long-pulse oscillator efficiency (b) for a diode-pumped Yb:S-FAP laser

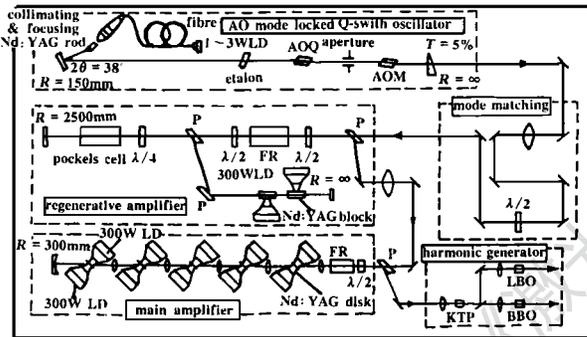


Fig. 7 The LD-pumped Nd:YAG MOPA at ILE, Osaka University

比较图 5 和图 7 知,二者在工作原理上是相同的,但使用不同的激光介质。图 5 借助于 LLNL 在 Nova 装置和 Nova 升级的全尺寸样机 (Beam let) 上已获得的技术和 LD 泵浦在新一代驱动器上要解决的问题而设计的,而图 7 则着重在小型 MOPA 上校核概念设计参数,其构型有利于直接驱动的光束调整。

由上述可知,近年来国际上高功率 DPL 研究方兴未艾。除单元技术有长足进展外,还针对应用目的,开展了理论模拟和小型实验研究,并正开拓研究成果的应用,如工业材料加工和军用等。有理由认为,高功率 DPL 的发展前景是光明的。

参 考 文 献

- 1 Krupke W F. CLEO/Pacific Rim' 95 Technical digest. IEEE, Piscataway N J. 1995: 163
- 2 Naito K, Yamanaka M, Nakatsuka M *et al.* Japan J A P, 1992; 31: 259
- 3 Srinivasan N, Kiriyaama H, Kimura T *et al.* Opt Lett, 1995; 20: 1265
- 4 Kojima T, Yasui K. CLEO/Pacific Rim' 95 Technical digest. IEEE, Piscataway NJ. 1995: PD. 2
- 5 Stepher A, Marshall D, Emanuel A *et al.* CLEO/Pacific Rim' 95 Technical digest. IEEE, Piscataway NJ. 1995: PD1. 11
- 6 Ohni M, Akatsuka M, Kiriyaama *et al.* 信学报, 1994; LQE94 15: 85



作者简介: 吕百达,男,1943 年出生。教授,博士生导师。主要研究方向为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。

收稿日期: 1995-10-09