

文章编号: 1001-3806(2008)03-0237-03

56J 灯抽运高能脉冲 Nd:YAG 固体激光器

刘学胜, 王智勇*, 鄢 歆, 刘 腾, 武 强, 左铁钊
(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100022)

摘要: 为了研制一台灯抽运单级输出高能高重频脉冲 Nd:YAG 固体激光器, 采用理论分析影响激光器高能输出的主要参数, 理论模拟输出功率与输入功率及反射率的关系, 以及通过实验细节提高激光器效率等有效措施, 研制出一台脉宽 0.1ms~10ms 可调, 频率 1Hz~1kHz 可调的灯抽运脉冲 Nd:YAG 激光器。该激光器在总注入电功率 12kW 时, 输出最大单脉冲能量 56J 最大平均功率 500W; 光束参数乘积为 16.5mm·mrad 总体电光转换效率 4.2%; 输出功率稳定性 ±2%。实验结果表明, 采用的理论分析及实验模拟与实验结果基本吻合, 获得了高能激光输出。

关键词: 激光器; 单脉冲能量; 电光效率; 光束参数乘积

中图分类号: TN248.1+3 文献标识码: A

56J high energy lamp-pumped pulsed Nd:YAG solid-state laser

LIU Xue-sheng, WANG Zhi-yong, YAN Xin, LIU Teng, WU Qiang, ZUO Tie-chuan
(College of Laser Engineering Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract In order to explore a 56J high-energy high-frequency lamp-pumped pulsed Nd:YAG solid-state laser, the main factors affecting the laser output were studied and the relation between the output power and input power and reflectivity was simulated. Then some effective measures were adopted to improve the efficiencies of the laser in experiments. As a result, a high energy Nd:YAG laser was obtained whose pulse width tunable between 0.1ms and 10ms, frequency tunable between 1Hz and 1kHz. When the laser inputs 12kW electrical power, its maximum single pulse energy was up to 56J, maximum average power is up to 500W with its beam parameter product 16.5mm·mrad, total electro-optics efficiency 4.2%, the stability of output power ±2%. The experimental results are corresponding to the theoretical ones.

Key words lasers; single pulse energy; electro-optics efficiency; beam parameter product

引 言

波长 1.064μm 的高功率 Nd:YAG 固体激光器因其波长较短、材料吸收率高、体积小、能采用光纤传输等优点, 成为颇具竞争实力的加工光源。代表国际顶尖水平的德国 Trumpf (Hass) 公司研制出高功率 Nd:YAG 脉冲固体激光器, 单级脉冲平均功率为 550W, 光束质量为 25mm·mrad 耦合进 600μm 光纤, 且价钱昂贵。国内报道的华中科技大学实验得到最大平均功率为 348W, 而北京福克斯激光设备有限公司引进法国 Quantel 公司生产制造的 QL 系列 YAG 激光器, 单级最大输出平均功率 400W, 单脉冲能量最

大 45J 但体积相当庞大。作者针对工业加工需要, 通过理论及实验设计研究出一种新型脉冲固体激光器。该激光器最大单脉冲能量 56J 灯抽运 YAG 晶体棒总体电光转换效率为 4.2%, 光束质量为 16.5mm·mrad 可耦合进 400μm 光纤, 大大提高了激光器的应用范围及加工效率。

1 理论分析

设 P_{excit} 为把 Nd^{3+} 激发到激光上能级的电功率, P_{in} 为激光抽运总电功率, 则激光激发效率 η_{excit} 表示为^[1]:

$$\eta_{\text{excit}} = \frac{P_{\text{excit}}}{P_{\text{in}}} \quad (1)$$

对于脉宽大于粒子在上能级寿命 230μs 的脉冲固体激光器, 连续激光器的结论可应用于脉冲激光器, 则该激光器的阈值及输出平均功率可表示为^[2]:

$$P_{\text{th}} = \frac{1}{\eta_{\text{excit}}} \left| \ln \sqrt{R} \right| F J_s \quad (2)$$

$$P_{\text{out}} = \left| \ln \sqrt{R} \right| F J_s \left[\frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{th}}} - 1 \right] \quad (3)$$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (604070090); 北京市科技新星基金资助项目 (954810900)

作者简介: 刘学胜 (1980-), 男, 博士研究生, 现主要从事大功率固体激光器的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zywang@bjut.edu.cn

收稿日期: 2007-03-23 收到修改稿日期: 2007-05-24

式中, P_{th} 为脉冲激光的阈值平均功率; V 为腔内损耗因子; R 为输出镜反射率; F 为工作物质横截面积; J_s 为工作物质饱和强度。

由于激光器最大功率输出时, 输出镜有一最优反射率 $R_{opt}^{[3]}$ 与之相对应, 则 $\frac{dP_{out}}{dR} = 0$ 得到 R_{op} 表达式为:

$$\ln(\sqrt{R_{opt}}) = \ln(V) \left[\left(\frac{P_{in}}{P_{min}} \right)^{1/2} - 1 \right]^2 \quad (4)$$

当前后镜的反射率都为 100% 时, 腔内增益等于损耗, 此时产生激光的最小电功率 P_{min} 表达式为:

$$P_{min} = \frac{1}{\eta_{excit}} F J_s |\ln V| \quad (5)$$

则当 $R = R_{opt}$ 时, 由 (4) 式、(5) 式得到最大输出平均功率表达式:

$$P_{max} = \left(\sqrt{\eta_{excit} P_{in}} - \sqrt{F J_s |\ln V|} \right)^2 \quad (6)$$

而^[4]: $\eta_{excit} \propto \eta_{eo} \eta_c \eta_{ab} \eta_{re}$ (7)

式中, η_{eo} 是电光转换效率; η_c 是聚光腔反射效率; η_{ab} 是工作物质中激活离子的吸收效率; η_{re} 是谐振腔内激光能量的转换效率^[5]: $\eta_c = \eta_{op} \eta_{ge}$ (8)

光学效率^[5]:

$$\eta_{op} = R_c (1 - R_r) (1 - f) (1 - \alpha) \quad (9)$$

式中, R_c 是聚光腔对有用光的反射率; R_r 是为棒和套管的损耗; α 是光学吸收系数, f 是非反射面 (如开孔) / 腔总反射面。

几何传输效率 η_{ge} = 棒截获的光能 / 会聚到棒处总光能, 取决于抽运光在棒处会聚成像的大小和激光棒半径的大小。

由 (7) 式 ~ (9) 式可知: 脉冲激光器平均输出功率随 P_{in} , η_{re} , η_{ab} , η_{eo} , R_c 增大而增大, 随 V , F , J_s 减小而增大。

根据以上分析进行理论模拟, 由经典参数, 设 $\eta_{excit} = 0.07$, $V = 0.95$, $J_s = 1620W/cm^2$, $F = 0.5cm^2$ (直径为 8mm), 模拟高功率固体激光器输入输出功率曲线, 以及反射率与输出功率的模拟曲线。模拟得到在 12kW 时最大输出为 507W, 最佳反射率存在最佳值, 如图 1 和图 2 所示。

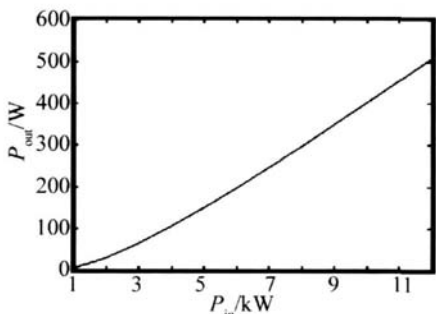


Fig 1 Output power versus electrical input power

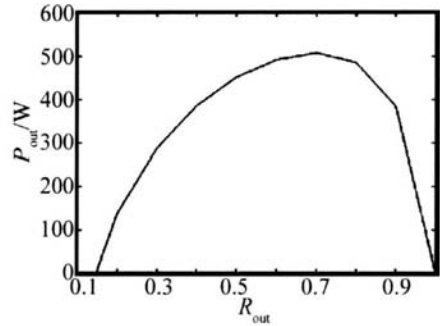


Fig 2 Reflectivity versus output power

2 实验结果与分析

根据上述结论, 激光器的高功率输出与灯的电光效率、晶体吸收率、谐振腔能量转换效率及抽运腔内各种损耗息息相关。主要采用以下有效措施进行优化:

- (1) 抽运源优化。抽运源采用 $\approx 9mm \times 150mm$ 双灯 ($V(Kr):V(Xe) = 9:1$) 抽运, 灯壁采用掺铈石英, 且套灯及工作物质的玻璃管也都掺铈, 吸收 400nm 以下的短波, 并转化为有用的光谱, 减弱热效应并提高输出功率;
- (2) 激光晶体优化。晶体采用 Nd 原子数分数为 0.0 的特优级的 Nd:YAG 激光晶体, 尺寸为 $\approx 8mm \times 160mm$, 晶体表面打毛, 增强吸收, 通常棒直径略大于灯内径, 棒长略大于灯极间距, 降低阈值, 提高效率;
- (3) 反射面优化。采用光线踪迹法设计反射曲面, 经高反射率 (大于 97%) 的双椭圆镀金面反射后, 使双灯在工作物质上均匀成像, 保证在注入电功率时, 工作物质增益均匀, 以提高光束质量和输出功率, 整个聚光腔内采用全镀金, 并各部件紧密配合, 降低腔内损耗;
- (4) 冷却剂优化。冷却水采用杂质和粒子双重过滤, 减少水的吸收;
- (5) 谐振腔优化。激光器采用具有大模体积的对称平行平面腔, 其实验结构见图 3。通过

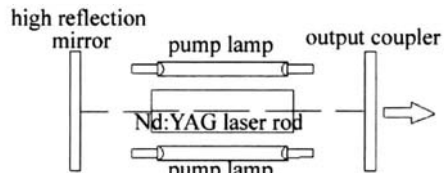


Fig 3 The setup of laser

对光学谐振腔 g_1-g_2 参数及谐振腔的光学长度^[6-7] 进行优化设计, 使激光器在整个工作范围内均稳定工作, 并优化输出镜反射率使激光器最大功率输出。

通过理论计算及实验选取几何腔长为 800mm, 输出镜最佳透过率为 70%, 输出最大平均功率为 500W, 实验所得输出与输入功率的关系如图 4 所示。可见当脉宽为 1ms 时, 随着抽运功率增加到 12kW, 输出功率也一直成近线性增加到 500W, 无明显拐点, 说明该脉冲激光器的热效应^[8]、双折射效应较小, 径向、切向热焦距^[9] 差异相当小, 所以在通过 g_1-g_2 临界点时双

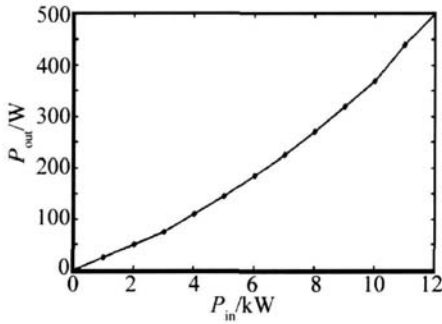


Fig 4 Experimentally measured laser output power versus electrical input power

焦点几乎同时进入谐振腔内, 所以输出功率无明显变化。图 5 是不同脉宽下频率与实验测得单脉冲能量的

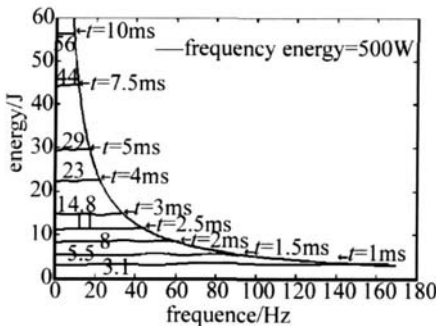


Fig 5 Measured laser single pulse energy versus pulse frequency in different pulse width

关系图。可见, 对 1ms~ 10ms 中的不同脉宽, 当其对应的频率增加到激光器频率与脉宽自锁的极限时, 其输出的最大平均功率均为 500W。脉宽为 1ms 时, 单脉冲能量为 3.1J 当脉宽为 10ms 时, 最大单脉冲能量为 56J

光束质量采用感光像纸成像法测量, 输出日处光斑见图 6a, 近似测量包含 86% 激光能量的光斑直径

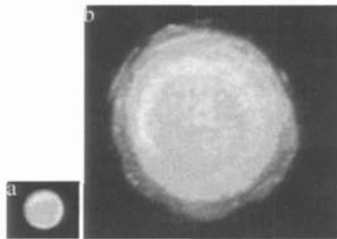


Fig 6 Spots at the position of output mirror and one meter far away

约为 7.8mm, 离此处 1m 远的光斑见图 6b, 同理测得光斑直径约为 19mm, 求得输出激光束的光束参数乘积为 16.5mm · m rad

对于灯抽运固体激光器, 考虑总体电光转换效率, 测量在高光束质量条件下的最高输出功率和注入电功率, 求得激光器得总体电光转换效率为 4%。另外, 激光器在抽运功率为 12kW, 连续工作 12h, 测量输出功率稳定度等于 ±2%, 而且体积小, 很适用于工业需求。

3 结 论

通过激光器输出功率理论分析及实验研究, 研制出一台工业脉冲固体激光器, 其高脉冲能量, 高平均功率在国内均未见报道。该工业级激光器的研制突破了国外脉冲固体激光器对我国的垄断, 又进一步扩大了激光加工领域。

参 考 文 献

- [1] NORMAN H, HORST W. Laser resonators and beam propagation fundamentals advanced concepts and applications [M]. 2th ed Heidelberg Springer-Verlag 2005: 396
- [2] SCHUOC DER D. H and book of the Euro laser Academy—— volume 1 [M]. Cabridge: Chapman & Hall 1998: 139
- [3] SCHUOC DER D. H and book of the Euro laser Academy—— volume 1 [M]. Cabridge: Chapman & Hall 1998: 140
- [4] KOECHNER W. Solid-State laser engineering [M]. 5th ed. Heidelberg Springer-Verlag 2002: 91
- [5] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. 5th ed. Heidelberg Springer-Verlag 2002: 332-337.
- [6] HORST W. Resonators for high power solid state lasers—the fight for beam-quality [J]. SPIE, 1998, 3267: 2-13.
- [7] UPADHYAYA B N, MISRA P, RANGANATHAN K. Beam quality considerations of high power Nd:YAG lasers [J]. Optics & Laser Technology 2002, 34(3): 193-197.
- [8] OU Q F, FENG G Y, LU D P, et al. Simulation and experimental study on thermal effects of Nd:YAG lasers [J]. Laser Technology 2002, 26(1): 15-17 (in Chinese).
- [9] LI Q, WANG ZhM, ZUO T Ch A method measuring thermal lens focal length of all rays polarized in radial and tangential direction of high power Nd:YAG laser [J]. Opt Commun, 2004, 241: 155-158.

(上接第 230 页)

- [8] PLEUMEEKERS L J, KAUER M, DREYER K, et al. Acceleration of gain recovery in semiconductor optical amplifiers by optical injection near transparency wavelength [J]. IEEE Photonics Technology Letters 2002, 14(1): 987-989
- [9] WESTLUND M, ANDREKSON P, SUNNERUD H, et al. High-performance optical-fiber-nonlinearly-based optical waveform monitoring

- [10] BOGON IA, PONZINI F, SCAFFARDI M, et al. New optical sampler based on TOAD and data postprocessing for subpicosecond pulse resolution [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 2004, 10(1): 186-191