

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0016-06

激光二极管端面抽运钕玻璃薄片放大器的热效应

王明哲^{1,2} 罗亦鸣¹ 李明中¹ 丁磊¹ 邓青华¹ 唐军¹ 景峰¹

(¹ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; ² 国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 激光二极管(LD)端面抽运的中等口径片状放大器可实现重复频率工作, 兼顾大能量输出和优良光束质量, 成为惯性聚变能(IFE)及战术武器等领域的研究热点。钕玻璃介质具有制造工艺成熟、储能较高、受激发射截面适中等优点, 是美、日等国 IFE 领域的重要研究对象。但钕玻璃热导率较低, 重复频率应用时热致波前畸变、热致断裂等热效应明显。使用光线追迹和有限元方法, 结合高功率端面抽运重复频率钕玻璃放大器的工作特点, 对钕玻璃增益介质的温度场和应力场进行了模拟分析, 详细讨论了不同抽运功率、冷却参数、工作频率所带来的影响。同时分析了可能引发介质炸裂的机理, 探讨了抽运极限问题, 结果将对端面抽运重复频率钕玻璃激光放大器的设计具有参考意义。

关键词 激光器; 热效应; 有限元分析; 钕玻璃; 激光二极管端面抽运

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s1.0016

Research on Thermal Effect in Laser Diode-End-Pumped Nd:Glass Laser Amplifier

Wang Mingzhe^{1,2} Luo Yimin¹ Li Mingzhong¹ Ding Lei¹
Deng Qinghua¹ Tang Jun¹ Jing Feng¹

(¹ Research Centre of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)
(² College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract As laser diode-end-pumped laser amplifier of moderate aperture can realize repeated-rate high energy output and good beam quality, it is paid more attention as inertial fusion energy (IFE) driver and directional energy weapon (DEW). Nd:glass as laser medium has many advantages, such as easy to manufacture, high storage energy, moderate emission cross section. However, its thermal conductivity is low and thermal effect is serious. Therefore, through analysis for the performance features of laser diode-end-pumped Nd:glass laser amplifier, a ray tracing and finite element thermal model is established, and 3D and transient distributions of temperature and thermal stress in Nd:glass are simulated. The impacts of pump power, cooling parameter and repeat rate are mentioned, the mechanism of thermal fracture is also analyzed. The results are helpful of designing laser diode-end-pumped repeated-rate Nd:glass laser amplifier.

Key words lasers; thermal effect; finite element analysis; Nd:glass; LD end-pumped

1 引言

近年来,随着高功率激光二极管(LD)及其阵列技术的发展,激光二极管抽运的固体激光器(DPSSL)技术发展迅速。高功率 LD 阵列端面抽运的中等口径(直径数十毫米)片状放大器,激光传输方向温度梯度较小,因此热效应相对较小,可实现重复频率工作,兼顾大能量输出和优良光束质量,还具

有向更大规模装置扩展的潜力,因而成为惯性聚变能(IFE)及战术武器等领域的研究热点^[1~4]。钕玻璃作为激光器的增益介质已有数十年历史,较高的储能使其成为众多大能量激光装置的工作介质^[5,6],虽然其热导率低并且易于断裂,但是采用 LD 取代闪光灯作为抽运源后,已具备重复频率连续运转的可行性。受激发射截面是激光介质的一个

作者简介: 王明哲(1983—),男,博士研究生,主要从事激光二极管抽运固体激光器技术方面的研究。

E-mail: wmingzhe@gmail.com

导师简介: 景峰(1968—),男,研究员,主要从事高功率固体激光相关技术方面的研究。

E-mail: jingfeng@my-public.sc.cnifo.net

重要参数,数值过大则自发辐射放大(ASE)难以抑制,数值过小又会导致饱和通量过大进而造成激光损伤,钕玻璃是仅有的几种受激发射截面适中的介质^[8]。此外,钕玻璃制备工艺成熟,可制成大尺寸高光学质量的产品,是其他固体激光介质无法做到的。基于这几方面考虑,尽管热效应低的掺 Yb 激光介质是目前研究热点^[9,10],钕玻璃仍是美、日等国 IFE 领域重要的候选路线^[7,8]。

重复频率工作模式下热致波前畸变、热致断裂等热效应是限制激光器输出能量和光束质量的瓶颈^[11]。分析抽运功率、重复频率、冷却参数等因素对激光放大器热效应的影响,讨论钕玻璃介质的抽运极限概念,对 LD 抽运钕玻璃激光放大器的设计及性能提高具有指导作用。

2 物理模型

钕玻璃放大器抽运耦合结构如图 1 所示,球面排布的 LD 阵列发出的抽运光通过空心导管缩束^[12],再经过窗口玻璃和冷却水层对 Nd:glass 介质进行抽运。LD 阵列最高抽运功率可达 32 kW,耦合效率 90% 以上,出口光斑尺寸为 10 mm×10 mm,且通过实验证明空间均匀性和可传输性较好(图 2)。时间上,LD 阵列脉冲方式工作,脉冲宽度根据钕玻璃的储能时间设定为 350 μs。增益介质为 N31 型磷酸盐钕玻璃,介质直径 40 mm,厚度 5 mm,10 mm×10 mm 的抽运光辐照在介质中心处。钕玻璃靠近抽运光一侧镀双色膜,对抽运光增透,对 1053 nm 的激光高反射,通过光路中偏振的控制,可实现对注入激光的多通放大。

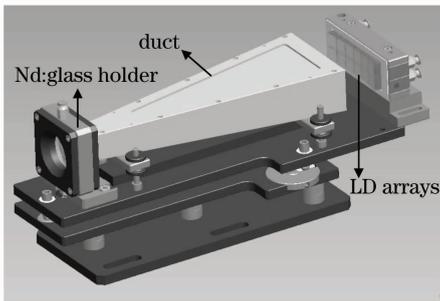


图 1 放大器耦合系统示意图

Fig. 1 Coupling system

一定抽运功率下,激光介质内三维瞬态的导热方程为

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + q_v,$$

边界条件

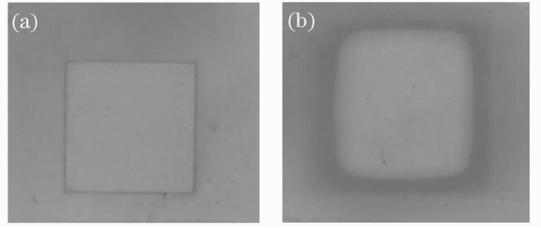


图 2 抽运光场图。(a) 出口处; (b) 传输 5 mm 后

Fig. 2 Distribution of pump field. (a) in exit;

(b) after 5 mm transport

$$-k \frac{\partial \theta}{\partial n} = h(\theta - \theta_c),$$

初始条件

$$\theta|_{t=0} = \theta_0.$$

式中 k, ρ, c 分别为介质的导热系数、密度、比热容, n 表示介质的法线方向, h 为介质表面与周围冷却流体的对流换热系数。 θ_c 表示流体温度, θ_0 表示初始时刻温度。 q_v 为材料的内热源强度,与抽运功率的大小和能量空间分布有关,而且在重复脉冲工作状态下还与时间有关,在两个抽运脉冲间隔期间 q_v 为 0。目前大多数文献的热分析工作对 q_v 的取值采取了较简单的近似(均匀分布或高斯分布)。本文结合耦合系统的设计,采用光线追迹的方法,模拟出抽运脉冲到达时刻 q_v 的非均匀空间分布,计算时认为 q_v 与抽运功率呈线性关系,有效抽运功率的 45% 转换为生热量, q_v 沿抽运光传输方向呈 e 指数衰减。

表 1 N31 磷酸盐钕玻璃热物性参数^[13]

Table 1 Material parameters for Nd phosphate glass

Thermal conductivity k / [W/(m·°C)] ^[14]	0.58
Specific heat C [J/(kg·°C)]	750
Density ρ / (kg/m ³)	2830
Thermal expansion coefficient (a/c axis)	1.27/1.3
α / 10 ⁻⁵ / °C	
Young's modulus E_Y / (10 ¹⁰ Pa)	5.1
Poisson ratio ν	0.258

使用有限元分析软件 ANSYS 对钕玻璃介质进行了热分析。模拟所用的热物性参数如表 1 所示,三维柱体模型尺寸为直径 40 mm,厚度 5 mm,网格划分单元尺寸取 1 mm(更细的网格划分对结果影响不大),选取抽运光传输方向为 Z 方向,且抽运光入射面为 $z=0$ 平面。传热方程中的边界条件采用面载荷方式加载,认为除水冷面外其余各面同空气接触(自然对流换热),对流换热系数 h 取 6.5 W/(m²·°C)^[15],采用水冷的 $z=0$ 平面强迫对流换热系数 h 代表了该结构激光放大器的冷却能力,而 h 的测量较难做到,为此根据经验模拟时 h 分别取为 4000 W/(m²·°C)和

8000 W/(m²·°C),其中 4000 W/(m²·°C)的取值是保守估计,通过调节水流速度和改善流体结构认为 h 取值 8000 W/(m²·°C)是可以实现的。初始温度 θ_0 与环境温度 θ_e 都取 20 °C。内热源 q_v 项以体载荷方式加载,整个分析为多载荷步瞬态分析。

3 结果分析

3.1 三维瞬态温度分布

首先模拟了抽运脉宽 350 μ s,工作频率 1 Hz,

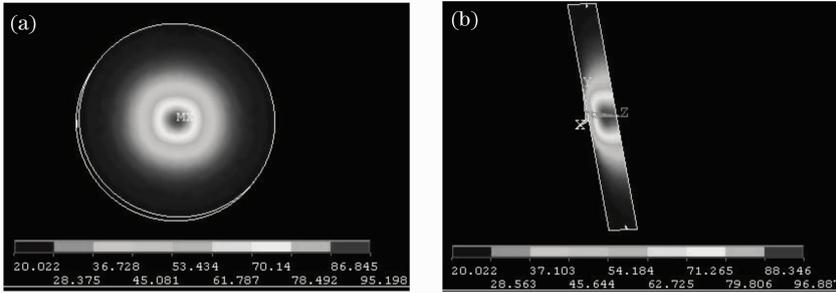


图 3 1 Hz, 32 kW 抽运,300 s 时的介质温度分布。(a) $z=0.005$ 端面; (b) $x=0$ 截面

Fig. 3 Temperature distribution in 32 kW and 1 Hz pump. (a) $z=0.005$ plane, (b) $x=0$ plane

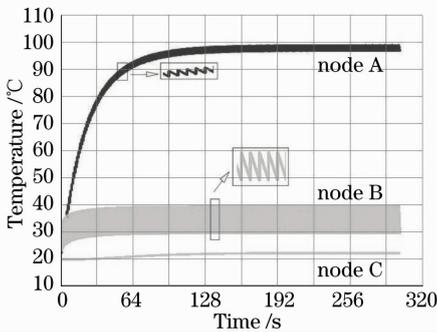


图 4 32 kW, 1 Hz 抽运时节点温度随时间的变化

Fig. 4 Temperature history in 32 kW and 1 Hz pump

图 4 给出了 3 个不同节点的温度随时间变化曲线:节点 A 坐标(0,0,0.003),位于介质内部中心,是介质中温度较高节点;节点 B 坐标(0,0,0),是介质抽运端面的中心;节点 C 坐标(0.009,0.01,0.005),是

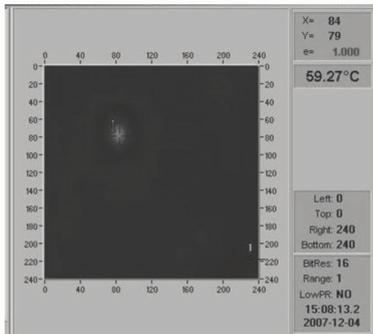


图 5 17 kW, 1 Hz 稳态时热像仪图像

Fig. 5 Image of thermal camera in 17 kW and 1 Hz pump

出口光斑 10 mm×10 mm,32 kW 抽运功率下介质三维、随时间变化的温度分布。图 3 是 300 s 时介质的温度分布,由于水冷却的原因,介质抽运面($z=0$ 平面)的温度要低于透射面($z=0.005$ 平面,坐标单位为 m,下同),介质最高温度出现在距抽运面较近的介质中心处。经过一段时间后,介质的温度呈周期性分布,即抽运脉冲到来时温度升高,抽运脉冲经过后温度降低,单个周期内生热和散热达到平衡。从图 4 可知达到平衡时间大约为 120 s。

抽运光透射端面上光斑外一点。可看出介质内部中心温度平衡后达到较高值,约 96.9 °C;而入射端面由于冷却水的原因在单个抽运周期内变化幅度较大,约 10 °C;抽运光斑外节点在该抽运结构下温升很低,这与介质尺寸远大于抽运光斑尺寸有关。

降低抽运功率至 17 kW,使用 Vigo 公司 V-20 热像仪进行了温度分布测量,稳态后的介质透射面温度分布如图 5 所示,温度相对分布与模拟结果基本吻合,介质中心最高温度 59.27 °C。

3.2 不同抽运功率的影响

改变抽运功率,模拟出不同抽运功率下的介质三维温度分布,作出最高温度随抽运功率的变化曲线(图 6),其中抽运功率根据 LD 电源的输出特性,取值从 14 kW 到 32 kW,取样间隔 3 kW,模拟结果的抽运

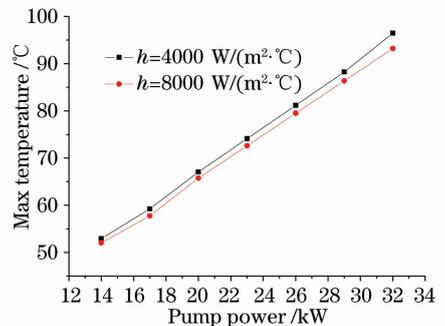


图 6 抽运功率-最高温度曲线

Fig. 6 Relationship between pump power and max temperature

时间为 120 s(认为此时基本达到周期变化的稳态)。

从图 6 可以看出, h 取 $4000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 和 $8000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 时相同抽运功率下介质最高温度相差 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 且变化规律基本相同, 呈线性关系, 抽运功率每增加 3 kW , 最高温度约增加 $7 \text{ }^\circ\text{C}$, 17 kW 抽运功率的模拟值与图 5 所示的热像仪所拍图像基本吻合。 h 值增加一倍而温度变化较小, 说明单纯提高表面换热能力对降低介质热效应影响不大, 这是由于介质本身热导率较低以及圆片相对较厚所导致的, 通过增加介质热导率以及薄片的构型将能最大程度发挥端面冷却效果。由于较大温度梯度的存在, 介质的热应力、热应变不能忽略。利用 ANSYS 中的热-结构耦合模块, 对介质温度不均匀分布所产生的热应力进行了计算。图 7 给出了 h 取 $4000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 时介质中第一主应力随抽运功率变化的曲线, 抽运功率每增加 3 kW , 最大主应力增加约 2.5 MPa 。

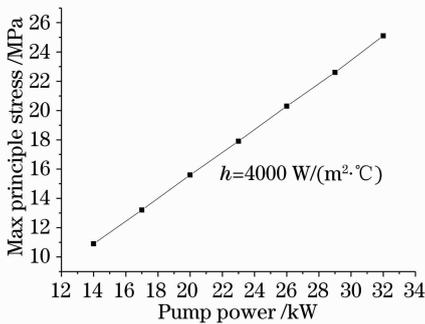


图 7 抽运功率-第一主应力曲线

Fig. 7 Relationship between pump power and 1st principle stress

3.3 重复频率等因素的影响

可重复频率运行一定时间是 IFE 等领域对驱动器的基本需求之一^[1~3]。为此, 模拟了相同脉宽不同重复频率运行的介质温度和热应力、应变分布, 抽运功率取 LD 阵列的最高输出值 32 kW 。图 8 是 2 Hz 频率下 3 个典型节点的温度在 150 s 内随时间的变化曲线, 介质最高温度(节点 A)在 120 s 后达到 $170 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上, 这时考虑到介质热物性参数随温度的改变, 诸如比热升高, 实际温度可能低于模拟值。同样利用热-结构耦合分析模块模拟出此时的热致第一主应力约 57 MPa , 介质的热效应比较严重, 热透镜效应将影响到光束质量, 热致端面变形导致衍射损耗增大, 也将影响多程放大的能量提取。改变工作频率为 5 Hz , 模拟结果表明介质最高温度在 60 s 后将达到 $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上, 第一主应力高达 136 MPa ,

此时介质是极易断裂的(详见 3.4 节)。同时对理想情况下 10 Hz 工作频率 60 s 后的热致形变进行了模拟, 中心凸起高达 $76 \text{ } \mu\text{m}$, 对光束的会聚作用将非常明显。但由于抽运区域相对介质尺寸较小, 只是中心小区域内有凸起, 并不能等同于简单的透镜模型, 该条件下放大器肯定是无法安全工作的。低频率时介质热致变形对光束质量的具体影响将是下一步工作的研究重点。

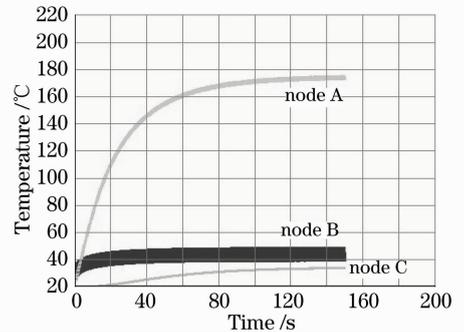


图 8 32 kW , 2 Hz 抽运下节点温度随时间的变化

Fig. 8 Temperature history in 32 kW and 2 Hz pump

同时, 对 17 kW 无强迫冷却的情况做了模拟, 以确定端面水冷的重要性。不同节点温度随时间变化如图 9 所示, 与图 8 不同的是, 节点 B(抽运面中心处)取代节点 A(介质内部中心)成为介质最高温度处, 300 s 后介质最高温度达到 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上, 且此时介质温度仍有上升趋势, 即此条件下放大器无法稳定安全运转。因此虽然前文指出端面换热系数 h 取值 $4000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 或 $8000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 时对介质的温度影响不大, 但是 h 值较低后介质无法安全运转, 数千量级 h 值的放大器冷却设计十分重要。

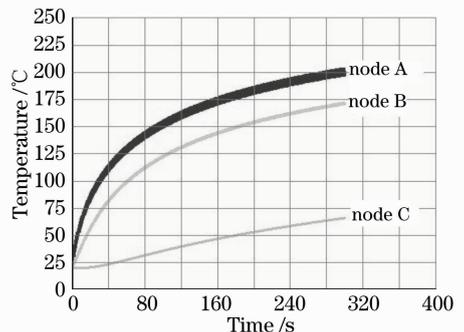


图 9 17 kW , 1 Hz 抽运下无水冷却时节点温度随时间的变化

Fig. 9 Temperature history in 17 kW and 1 Hz pump and without water cooling

3.4 热应力与介质断裂

在实际的放大器装配中, 出于密封水需要, 有橡胶垫圈的使用, 因此对于介质的机械夹持应力是较难估计的一个参数, 采用常规模型由温度场得

出的应力场的绝对值可能与实际有出入,但是该值的相对分布以及随抽运功率及重复频率的变化规律是较为可信的。

在大部分文献中,认为介质存在一个断裂应力值 σ_f ,若超过此应力值介质将产生断裂,例如 Nd:YAG 断裂应力 σ_f 为 130 MPa^[13],Nd:YLF 断裂应力 σ_f 为 40 MPa^[16]。根据断裂力学的原理, σ_f 应该表述为^[17]

$$\sigma_f = Y \cdot K_c \cdot (a)^{-1/2}$$

其中 Y 是材料的几何因子,与材料的具体几何结构有关; K_c 是材料的断裂韧性,对于给定材料可以认为是常数; a 是材料的表面最大裂纹深度,是不确定参数,可能随着放大器的运转逐渐增大。因此说同一种材料的断裂应力并不是常数,而和几何结构以及表面最大裂纹尺寸有关。由于任意两块介质表面最大裂纹都可能不相同,甚至同一块介质不同时刻 a 的值都不相同,采用统计学的概念来阐述介质的断裂是较为合理的。基于此,特定结构的激光器并不存在简单的抽运极限功率值,只能说在某一抽运功率下介质断裂可能较大。根据文献^[17]对不同尺寸钕玻璃介质断裂的统计描述,认为 75 MPa 应力下介质断裂可能性为 10%,则由 3.2 节中的线性关系推出 1 Hz,90 kW 抽运功率下介质断裂可能将达到 10%,此时介质最高温升 240 °C 左右,除热致断裂外其他热效应将较为严重。改变重复频率的模拟表明 32 kW,2 Hz 抽运的介质断裂可能性介于 1% 和 10% 之间;32 kW,5 Hz 抽运的介质断裂可能性在 50% 以上,是极其危险的。

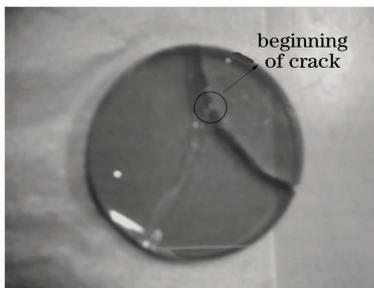


图 10 17 kW, 1 Hz 抽运时无水冷情况下实验后的介质裂痕

Fig. 10 Fracture of glass in 17 kW and 1 Hz pump without water cooling

在抽运功率 17 kW,1 Hz,介质无水冷的条件下,60 余秒后介质发生断裂(图 10),图中圆圈处为介质首先断裂的位置,位于抽运光斑边缘处。随着抽运能量的不断注入,裂纹逐渐增大,最后贯穿整个钕玻璃片,最终裂纹形状与初始裂纹形状有关。结

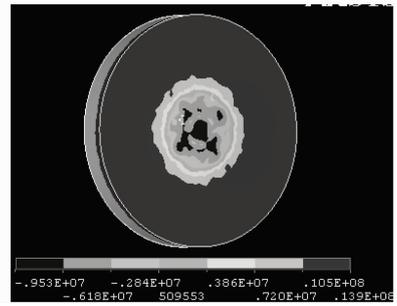


图 11 17 kW, 1 Hz 抽运时无水冷条件下第一主应力三维分布云图

Fig. 11 1st principle stress distribution in 17 kW and 1 Hz pump without water cooling

合图 11 所示的该条件下 60 s 后第一主应力模拟分布,可认为抽运光斑边缘处某点初始表面裂纹较大,因此所需断裂应力较小,而在抽运光斑边缘的热应力相对较大(约 14 MPa),裂纹尺寸和热应力的共同作用造成了介质特定形态的断裂。模拟应力值 14 MPa 低于前文所讨论的 10% 断裂可能的 75 MPa,一方面是因为胶圈夹持导致的应力模拟值与实际情况还有所差异,另一方面是因为玻璃断裂处固有裂纹尺寸较大导致的断裂应力值较小。

4 结 论

通过不同参数下钕玻璃介质的有限元分析以及断裂实验的观察,得出以下几点结论:1)端面冷却下介质最高温度位于内部中心处,一定时间后温度呈周期性变化,且随抽运功率增加最高温度呈线性变化,32 kW 抽运功率 1 Hz 时 120 s 后达到稳态,最高温升 97 °C 左右,该参数下介质是可以正常工作的;2)用统计学模型研究介质断裂较为合理,32 kW 抽运功率下重复频率增大到 2 Hz 后介质断裂可能性低于 10%,重复频率增大到 5 Hz 时断裂可能性达 50% 以上;3)数千量级的强迫对流换热系数来冷却介质十分必要,但是达到一定值后再增加表面换热能力将对降低热效应影响不大,通过提高介质热导率以及采用更薄的介质将能提升端面冷却的效果。

参 考 文 献

- 1 Yu Haiwu, Xu Meijian, Duan Wentao *et al.*. Research progress of laser drivers for inertial fusion energy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(9): 55~62
於海武,徐美健,段文涛等. 惯性聚变能源激光驱动器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(9): 55~62
- 2 B. Le Garrec, O. Casagrande. Solid state laser design for inertial confinement fusion: Trends toward power production [C]. *J. Phys. IV France*, 2006, **133**: 829~831
- 3 J. Caird, A. Bayramian, P. Armstrong *et al.*. Diode-pumped

- solid-state laser (DPSSL) driver development for inertial fusion energy[R]. High Average Power Laser Program Workshop, 2007, <http://aries.ucsd.edu/HAPL/MEETINGS/0710-HAPL/Presentation/02.CairdNIF.ppt>
- 4 C. Bibeau, A. Bayramian, P. Armstrong *et al.*. The mercury laser system—An average power, gas cooler, Yb:S-FAP based system with frequency conversion and wavefront correction[C]. *J. Phys.* [V France, 2006, **133**: 797~803
 - 5 B. M. van Wouterghem, J. R. Murray, J. H. Campbell *et al.*. Performance of a prototype for a large-aperture multipass Nd: glass laser for inertial confinement fusion[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(21): 4932~4953
 - 6 M. J. Morman, J. E. Andrew, T. H. Bett *et al.*. Multipass reconfiguration of the HELEN Nd: glass laser at the atomic weapon establishment[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(18): 3497~3505
 - 7 T. Kawashima, T. Ikegawa, J. Kawanaka *et al.*. The HALNA project: diode-pumped solid-state laser for inertial fusion energy [C]. *J. Phys.* [V France, 2006, **133**: 615~620
 - 8 K. Schaffers. Advanced Materials for Fusion Lasers[R]. 3rd International Workshop HEC-DPSSL, Livermore, 2006
 - 9 Yu Haiwu, Duan Wentao, Xu Meijian *et al.*. Review of ytterbium-doped laser materials [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(4): 30~41
於海武,段文涛,徐美健等. Yb 激光材料综述[J]. 激光与光电子学进展, 2007, **44**(4): 30~41
 - 10 Yu Haiwu, Xu Meijian, Duan Wentao *et al.*. Investigation on pumping dynamics and pulsed energy storage performance of Yb ions[J]. *Acta Physics Sinica*, 2007, **56**(7): 4158~4168
於海武,徐美健,段文涛等. Yb 离子抽运动力学及脉冲储能特性研究[J]. 物理学报, 2007, **56**(7): 4158~4168
 - 11 L. Yan, C. H. Lee. Thermal effects in end-pumped Nd: phosphate glasses[J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **75**(3): 1286~1292
 - 12 Duan Wentao, Xu Meijian, Jiang Xinying *et al.*. Design and simulation of end-pumped coupling system for large aperture laser diode arrays[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(suppl.): 52~56
段文涛,徐美健,蒋新颖等. 大口径激光二极管阵列端面抽运耦合系统设计模拟[J]. 中国激光, 2008, **35**(增刊): 52~56
 - 13 Koehner W.. Solid-State Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. 40~47
克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文,江泽文,程国祥译. 北京:科学出版社,2002. 40~47
 - 14 Ou Qunfei. Analysis of Thermal Effects in High Power Diode Pumped Solid-State Lasers[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005. 25
欧群飞. 高功率二极管抽运固体激光器的热效应分析[D]. 成都:四川大学 2005. 25
 - 15 M. Pollnau, P. J. Hardman, M. A. Kern *et al.*. Upconversion-induced heat generation and thermal lensing in Nd:YLF and Nd:YAG[J]. *Phys. Rev. B*, 1998, **58**(24): 16076~16092
 - 16 X. Y. Peng, L. Xu, A. Asundi. High-power efficient continuous-wave TEM₀₀ intracavity frequency-doubled diode-pumped Nd:YLF laser[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(5): 800~807
 - 17 J. E. Marion. Fracture of solid state laser slabs[J]. *J. Appl. Phys.*, 1986, **60**(1): 69~77