

聚变能激光驱动装置的激光材料选择

严雄伟 郑建刚 蒋新颖 王振国 张永亮 李明中

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 基于美国 LIFE 激光驱动装置的放大器构型, 使用 Nd 玻璃, Yb:YAG, Yb:S-FAP, Yb:CaF₂ 四种材料的参数进行抽运储能过程的模拟计算, 分析了介质口径、抽运强度、抽运脉宽及介质温度等参数对装置性能的影响, 得到了各材料的优化设计参数, 对上述材料应用于聚变能半导体抽运固体激光器(DPSSL)系统主放大器的可行性进行了判断, 并提出了理想材料的参数要求, 为寻找合适的激光材料提供依据。

关键词 激光器; 优化设计; 模拟计算; 激光材料

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0702008

Selection of Laser Material in Laser Driver Required for Inertial Fusion Energy

Yan Xiongwei Zheng Jianguang Jiang Xinying Wang Zhenguo
Zhang Yongliang Li Mingzhong

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Based on optical architecture of LIFE laser driver in USA, Nd: glass, Yb:YAG, Yb:S-FAP, Yb:CaF₂ are chosen as the laser material candidates. And with their material properties, the pump and energy storage process of the main-amplifier is simulated. According to the results, the influence of media aperture, pump intensity, pump pulse width and media temperature on the performance of laser driver are analyzed, and optimal design parameters of the main-amplifier with each laser materials are acquired. After judging the feasibility of application of those materials to a laser driver required for inertial fusion energy, the qualification of an ideal material is presented, supplying basis for searching the suitable laser materials.

Key words lasers; optimal design; simulation; laser materials

OCIS codes 140.3280; 140.3380; 140.3480; 140.3580

1 引 言

惯性聚变能(IFE)是利用惯性约束聚变(ICF)获得的聚变能。IFE被认为能长期满足社会对安全可靠、环境友好及可持续能源的需求,具有以下优点:1) 可持续、无碳排放,2) 供应可靠,3) 无需再处理、没有高放射性废料。

随着在美国国家点火装置(NIF)上一系列瞄准聚变点火的实验的开展^[1,2],建立激光聚变能电站以获得惯性聚变能的计划也被提上了日程。聚变能电站的应用环境对其驱动部件——激光驱动装置提出了高效重复频率的性能要求。针对这样的要求,美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室的科学家提出了名

为 Laser Inertial Fusion Energy(LIFE)的聚变能源概念设计^[3~5],其中就包括了重复频率高效的激光驱动装置。LIFE的激光驱动器曾经有三种分别基于 Nd 玻璃, Yb:S-FAP, 低温 Yb:YAG 陶瓷的概念设计。最终利弗莫尔实验室提出了一份包含具体参数的设计报告^[6]。报告中 LIFE 激光驱动器共分 384 路激光,采用峰值功率 633 TW 的激光二极管(LD)抽运高速 He 气流冷却的 Nd 玻璃片状放大器,三倍频输出获得 2.2 MJ 的激光。欧洲多国的科学家提出了 High Power laser Energy Research Facility(HiPER)聚变能源概念设计,其激光驱动装置有 4 种备选方案^[7]:德国 IOQ 实验室 Yb:CaF₂ 气冷设计方案,英国

收稿日期: 2012-03-05; 收到修改稿日期: 2012-03-27

作者简介: 严雄伟(1984—),男,硕士,助理研究员,主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: yxw130@163.com

STFC 实验室 Yb:YAG 气冷设计方案及法国 LULI 实验室 Yb:YAG 有源镜设计方案,法国 CEA 实验室光纤设计方案。日本科学家提出的 Generation of ENergetic Beam Ultimate(GENBU)装置驱动器设计采用了低温 Yb:YAG 陶瓷有源镜构型^[8]。上述各国的概念设计多为仅包含介质选择和放大构型的整体计划,只有美国 LIFE 项目发表了较为详细的设计报告,其设计核心在于保证稳定运行的同时尽可能提升插头效率,以满足聚变能的商业化应用前景。

IFE 对激光驱动器提出的输出指标要求为:运行频率 10 Hz 以上、插头效率至少在 10%~15%、脉冲宽度数纳秒,兆焦耳级脉冲能量^[9]。除了光纤设计方案,上述的设计都使用了 LD 阵列作为抽运源以满足对系统高插头效率的需要,对重复频率的需求采用了不同的冷却构型来实现。为了减小系统的复杂度,提升系统的可靠性,对激光总路数必须有一定限制,所以几种设计的单路激光输出能量均达到千焦耳以上。

在这些设计中,相当大一部分的主放大器构型

不约而同地采用了比较成熟的 NIF 式四程放大结构,因为该构型在目前看来是这些设计中最具有可实施性的构型,不同之处在于主放大器使用的激光介质材料。本文在 LIFE 设计的双头四程放大构型基础上,分别对有潜力成为聚变能激光驱动装置激光材料的各种介质进行了模拟计算,得到单路激光放大器采用各种介质时的优化设计,比较其效率、储能、增益、成本等因素,分析了各种材料的优缺点,提出了理想的激光介质的参数要求。

2 模拟计算条件参数与优化判据

LIFE 系统的主放大器构型如图 1 所示。放大器头采用偏振耦合后的准直 LD 阵列从 2 个方向端面抽运多片方形片状激光介质(见图 2)。考虑到抽运光的传输性,增益介质的总厚度被限制在 20 cm,同时通过设计掺杂浓度使抽运光的吸收效率大于 99%。在计算中以增益介质的厚度、抽运光的吸收效率这 2 个参数为限制条件,改变介质口径 D 、抽运强度 P 、抽运脉宽 T_p 、介质温度 T 等参数进行放大器的模拟计算。

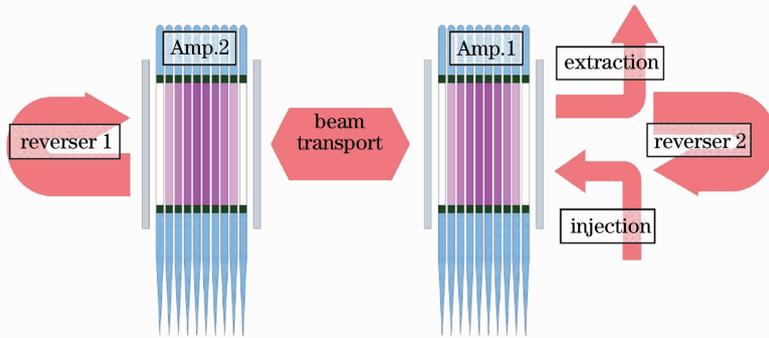


图 1 LIFE 系统的主放大器构型示意图

Fig.1 Main amplifier sketch of LIFE system

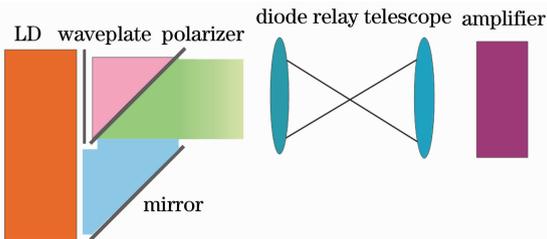


图 2 LIFE 放大器头偏振耦合抽运结构示意图

Fig.2 Schematic of pump delivery method showing polarization combination in LIFE

本文使用蒙特卡洛光线追迹和求解速率方程的方法,编写了程序对放大器的抽运过程进行模拟,

通过在抽运时间和介质空间上划分网格的方法进行分步计算,评估影响介质储能的各个物理过程,包括抽运光吸收、自发辐射(SE)、放大的自发辐射(ASE)等,计算流程如图 3 所示,具体细节见参考文献^[10]。同时将计算得到的单放大器头储能 E_{st} 、抽运光到储能的转换效率 η 、 gL 值(g 为小信号增益系数, L 为介质单程最长路程)、单程小信号增益 G 等结果参数作为优化设计判据,进行条件参数的优化选择。计算中各材料的相关参数如表 1 所示。根据 4 种激光材料的截面和寿命等参数特性的不同,计算时选取的参数范围各不相同,具体值见表 2。

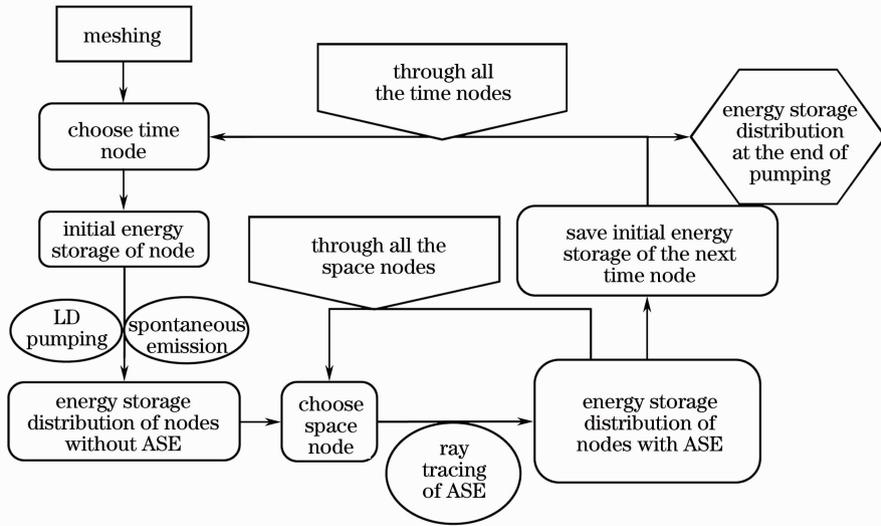


图 3 抽运过程计算流程图

Fig. 3 Flow chart of pumping calculation

表 1 激光材料参数

Table 1 Property of laser materials

Property	Nd glass (APG-1) ^[11,12]	Yb:YAG ^[13,14]		Yb:S-FAP ^[15,16]	Yb:CaF ₂ ^[17]
Temperature /K	300	175	300	300	150
Level structure	Four-level	Quasi-three-level	Quasi-three-level	Quasi-three-level	Quasi-three-level
τ_U /ms	0.33	0.95	0.95	1.14	2.4
$\sigma_a / (10^{-20} \text{ cm}^2)$	1.5	0.85	0.76	8.6	0.9
λ_a /nm	872	941	941	900	980
$\sigma_e / (10^{-20} \text{ cm}^2)$	4.3	4.9	2.3	7.3	0.4
λ_e /nm	1053	1030	1030	1047	1032

表 2 模拟计算参数范围

Table 2 Parameter range of simulation

Laser material	Nd glass	Yb:YAG	Yb:S-FAP	Yb:CaF ₂
Temperature /K	300	100~300	100~300	100~200
Size /cm	10~50	10~50	20~50	10~40
Pump intensity / (kW·cm ⁻²)	20~50	5~30	5~30	5~20
Pump pulse width /ms	0.1~0.5	0.3~1.0	0.3~1.0	0.5~2.0

3 优化选择判据随条件参数的变化规律

由于各种材料计算结果的变化规律基本相似,本节以 Yb:YAG 材料为例进行说明,得到的优化选择判据随递增的单个条件参数的变化规律见表 3。

表 3 优化选择判据随单个条件参数的变化规律

Table 3 Variation of optimized selection criterion with single condition parameter

Condition parameter (increase)	Energy storage of single amplifier head E_{st}	Conversion efficiency η	gL value	Small signal gain G	Figure
Size(D)	Increase	Decrease	Increase	Decrease	Fig. 4
Pumping Intensity(P)	Increase	First increase and then decrease	Increase	Increase	Fig. 5
Pump pulse width (T_p)	Increase	Decrease	Increase	Increase	Fig. 6
Temperature (T)	First increased and then decreased	First increase and then decrease	Decrease	Decrease	Fig. 7

当抽运强度为 10 kW/cm^2 , 抽运脉宽为 0.5 ms , 介质温度为 200 K 时, 图 4 为优化选择判据随介质口径的变化规律。由图 4 可知, 随增益介质口径变大, 介质内 ASE 光线的传输距离变长, 介质内的 gL 值增加, ASE 效应增强, 抽运光到储能的转

换效率降低, 储能密度随之减小, 但单放大器头储能随着抽运总能量(抽运强度 \times 抽运区面积)增加而增加。由于介质的通光方向长度不变, 介质内储能密度减小, 所以单程小信号增益会减小。

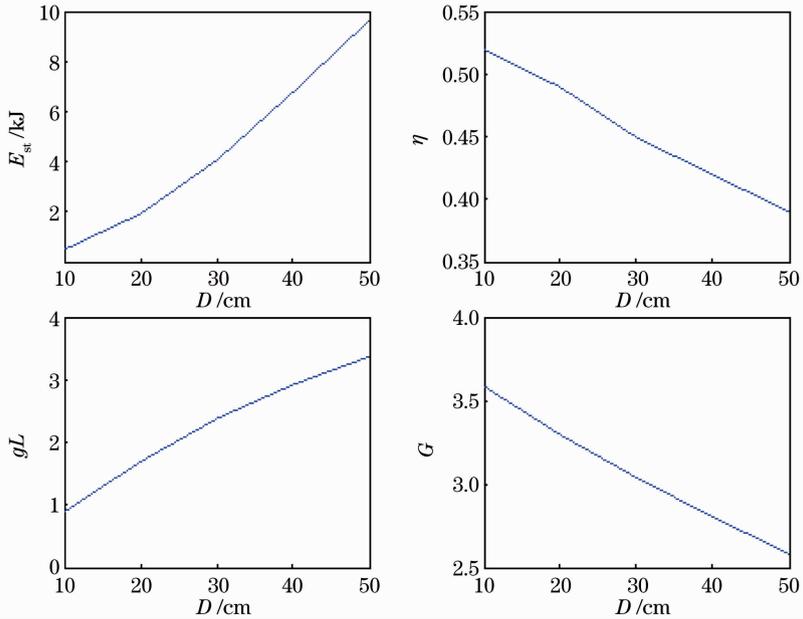


图 4 优化选择判据随介质口径 D 的变化规律(抽运强度 10 kW/cm^2 , 抽运脉宽 0.5 ms , 介质温度 200 K)

Fig. 4 Variation of optimized selection criterion with size D (pumping intensity of 10 kW/cm^2 , pumping pulse width of 0.5 ms , temperature of 200 K)

图 5 为优化选择判据随抽运强度的变化规律。由图 5 可知, 随着抽运强度的增加, 介质内储能密度

增加, 所以单放大器头储能, gL 值和单程小信号增益都递增。但 $\text{Yb}:\text{YAG}$ 能级结构为准三能级, 要获

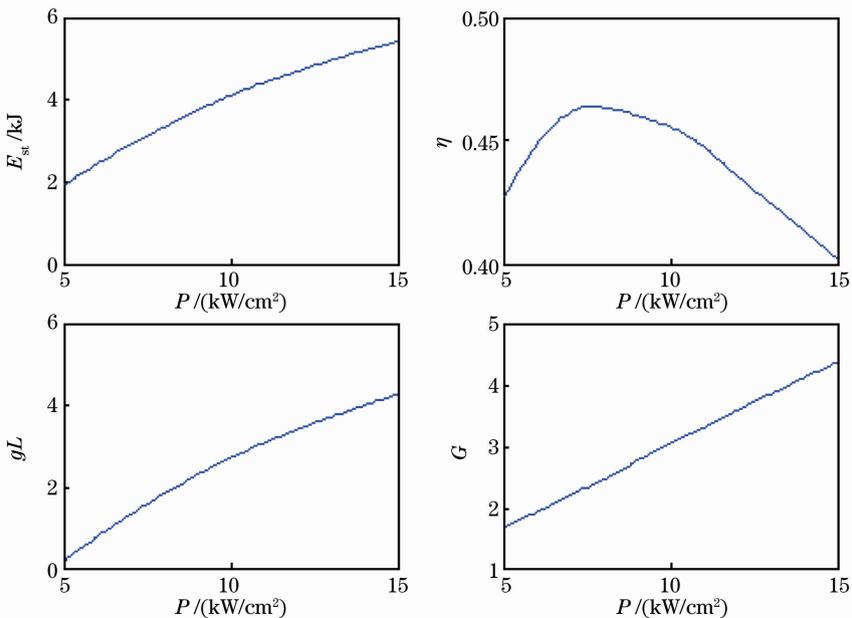


图 5 优化选择判据随抽运强度 P 的变化规律(介质口径 30 cm , 抽运脉宽 0.5 ms , 介质温度 200 K)

Fig. 5 Variation of optimized selection criterion with pumping intensity P (size of 30 cm , pumping pulse width of 0.5 ms , temperature of 200 K)

得粒子数反转需要漂白一定数量的下能级粒子, 抽运强度较低时粒子反转数较少, 转换效率较低, 抽运强度较高时 ASE 较强, 也会降低转换效率, 所以转换效率曲线先增大后减小。

由图 6 可知, 随着抽运脉宽的增加, 抽运能量递增, 介质内储能密度增加, 所以单放大器头储能, gL 值和单程小信号增益都递增。但由于自发辐射的影响, 转换效率会随之递减。

图 6 为优化选择判据随抽运脉宽的变化规律。

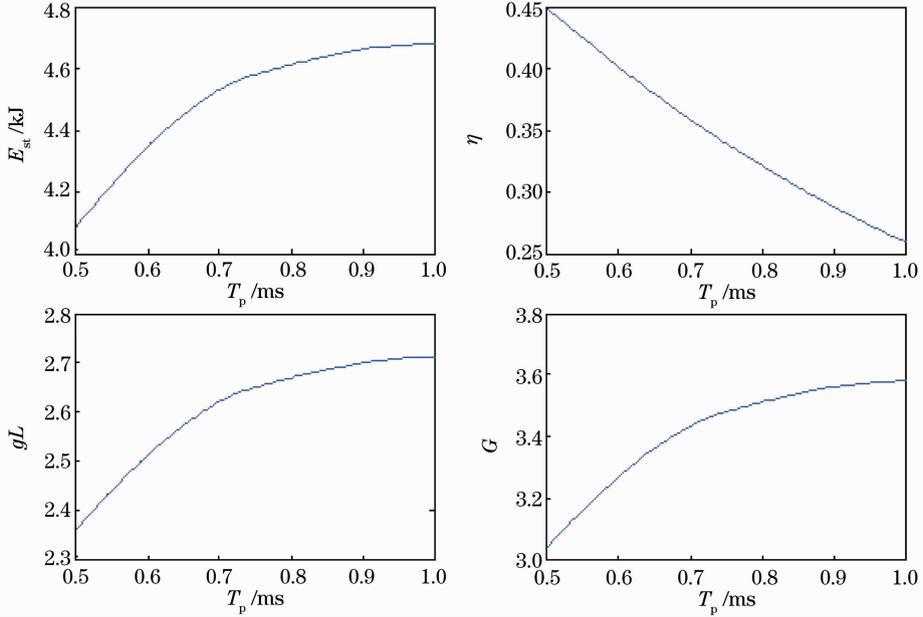


图 6 优化选择判据随抽运脉宽 T_p 的变化规律(介质口径 30 cm, 抽运强度 10 kW/cm^2 , 介质温度 200 K)
 Fig. 6 Variation of optimized selection criterion with pumping pulse width T_p (size of 30 cm, pumping intensity of 10 kW/cm^2 , temperature of 200 K)

图 7 为优化选择判据随介质温度的变化规律。由图 7 可知, 温度较低时, Yb:YAG 晶体的发射截

面显著增大, 增益过高, ASE 十分严重, 大量的抽运能量转化为 ASE 被消耗, 上能级储存的能量很少。

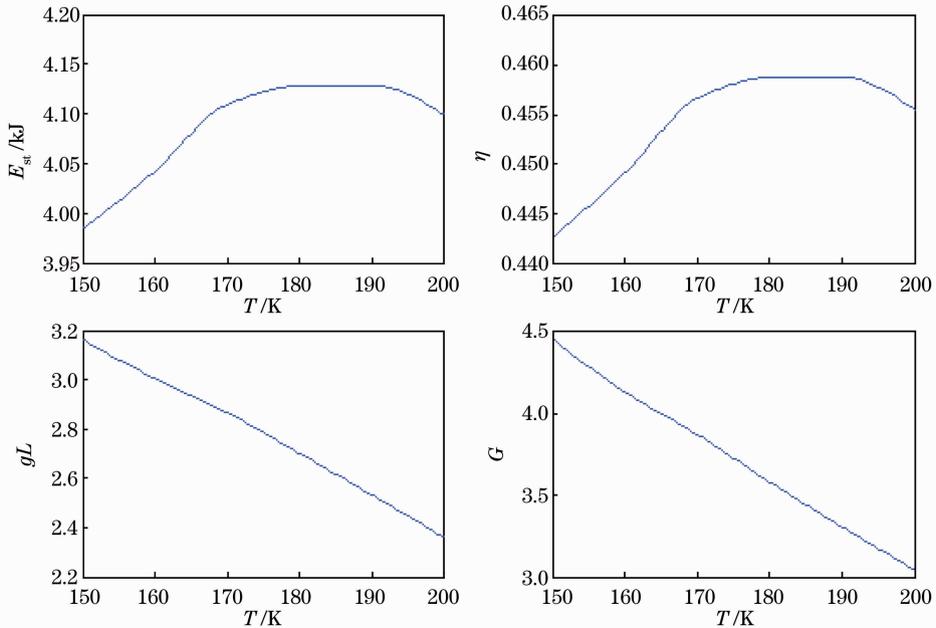


图 7 优化选择判据随介质温度 T 的变化规律(介质口径 30 cm, 抽运强度 10 kW/cm^2 , 抽运脉宽 0.5 ms)
 Fig. 7 Variation of optimized selection criterion with temperature T (size of 30 cm, pumping intensity of 10 kW/cm^2 , pumping pulse width of 0.5 ms)

但是,低温条件下,激光下能级的热布居可以近似忽略,Yb 离子趋于标准的四能级系统,需要漂白的粒子数很少。温度较高时,Yb:YAG 晶体的发射截面较小,增益较小,ASE 较弱,抽运能量可以有效地储存在上能级。但此时激光下能级的热布居较大,造成能级堵塞,大量的抽运被用于漂白下能级的热布居。所以随着温度的升高,单放大器头储能和转换效率都先增大后减小, gL 值和单程小信号增益递减。

4 优化结果及分析

对计算结果中多种参数组合进行优化选择,采用的具体条件如下:

- 1) 对应于约 2 MJ 脉冲总能量输出的要求,为减小系统的复杂度,希望总激光路数小于 500 路,要求单路输出在 4 kJ 以上,考虑储能到 $1\omega \sim 3\omega$ 光的转换效率约 50%,则单路双头储能在 8 kJ 以上,单放大器头储能 E_{st} 大于 4 kJ。
- 2) 对应于总插头效率大于 10%的要求,抽运光到储能的转换效率 η 要大于 50%。
- 3) 为保证增益在通光面方向的均匀性优于 1.05,要求介质内 $gL < 3.5$ 。
- 4) 由于放大器的双头四程放大结构,为保证储能的提取效率,要求单放大器头的单程小信号增益 G 大于 5。
- 5) 考虑到光学元件的损伤问题,输出 1ω 激光通量在 $20 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 以下较为合适,则单放大器头的

储能通量应小于 $10 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

6) 在满足上述 5 个条件的情况下,选取转换效率最高的参数组合;若无法同时满足上述 5 个条件,可适当降低单个条件的要求。

对 4 种材料最终优化得到的条件参数与优化选择判据参数如表 4 所示,其中 * 表示不满足优化选择判据项目。由表 4 可见,对于 Nd 玻璃与 Yb:YAG 材料,可以得到满足所有优化选择判据的条件参数设计,是适合作为聚变能级 DPSSL 系统主放大器激光材料的介质。但 Nd 玻璃的上能级寿命较短,需要的抽运强度较大,LD 总功率是四种材料中最大的,在建设装置时需要大量用于购买 LD 的经费。而 Yb:YAG 的能级结构为准三能级,最优化温度为 200 K。虽然是低温运行,但也无法完全转变为四能级系统,其储能的一部分必须用于漂白下激光能级的热布居粒子,所以转换效率要低于 Nd 玻璃。同时,低温运行会带来额外的功率负担和系统复杂度。Yb:S-FAP 的发射截面是四种材料中最大的,在大口径介质中其 ASE 效应最强,导致介质内的总储能被限制,无法达到优化选择判据 1。Yb:CaF₂ 的上能级寿命最长,抽运光和激光波长最近,量子亏损最小,发射截面最小,所以其转换效率最高,可达 62% 以上,所需 LD 最少,仅为 Nd 玻璃的 1/5。但是因其发射截面太小,所以单程小信号增益与优化选择判据 4 相差甚远,在双头四程构型下完全无法达到储能的有效提取,且储能通量较大,给系统的安全运行带来较大风险。

表 4 优化选择结果

Table 4 Optimization selection results

Lasers material	Nd glass	Yb:YAG	Yb:S-FAP	Yb:CaF ₂
Temperature /K	300	200	300	150
Size /cm	24	24	26	22
Pumping intensity /($\text{kW} \cdot \text{cm}^{-2}$)	40	22.5	15	10
Pump pulse width /ms	0.164	0.3	0.3	0.8
Stored energy E_{st} /kJ	4.532	4.124	3.100 *	4.820
Conversion efficiency η	0.600	0.530	0.509	0.623
gL value	2.962	2.972	3.382	0.319
Small signal gain G	5.730	5.765	6.294	1.23 *
Energy storage flux /($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$)	7.87	7.16	4.59	9.96
LD total power of single head /kW	23040	12960	10140	4840

根据计算和分析,可以得到理想的聚变能 DPSSL 系统主放大器激光材料的要求:

- 1) 上能级寿命长,以减小抽运源的需求。
- 2) 能级结构为四能级,抽运光和激光波长接近,以消除下激光能级热布居和减小量子亏损,提升

转换效率。

3) 发射截面适中,在减小 ASE 与保证单程小信号增益中取得平衡,以满足储能和提取两方面的需要。

5 结 论

基于 LIFE 装置的构型, 选择了 Nd 玻璃, Yb:YAG, Yb:S-FAP, Yb:CaF₂ 四种材料进行抽运储能过程的模拟计算, 分析了介质口径 D 、抽运强度 P 、抽运脉宽 T_p 、介质温度 T 等参数对装置性能的影响, 得到了各材料的优化设计参数。

计算结果表明, 从抽运储能方面进行考虑, Nd 玻璃与 Yb:YAG 材料可被用于 LIFE 装置构型下的主放大器激光材料, Yb:S-FAP, Yb:CaF₂ 分别由于储能和增益原因不适用于该构型。

根据计算结果, 从寿命、能级结构、发射和吸收截面等方面提出了理想的聚变能 DPSSL 系统主放大器激光材料的要求, 为寻找合适的激光材料提供了依据。

参 考 文 献

- 1 C. A. Haynam, P. J. Wegner, J. M. Auerbach *et al.*. National ignition facility laser performance status[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(16): 3276~3303
- 2 E. I. Moses. Ignition on the national ignition facility: a path towards inertial fusion energy[J]. *Nuc. Fus.*, 2009, **49**(10): 104022
- 3 A. M. Dunne. Timely delivery of laser inertial fusion energy (LIFE)[J]. *Fus. Sci. Tech.*, 2011, **60**(1): 19~27
- 4 J. F. Latkowski, R. P. Abbott, S. Aceves *et al.*. Chamber design for the laser inertial fusion energy (LIFE) engine[J]. *Fus. Sci. Tech.*, 2011, **60**(1): 54~60
- 5 T. Anklam, A. Simon, W. Meier *et al.*. LIFE: the case for early commercialization of fusion energy[J]. *Fus. Sci. Tech.*, 2011, **60**(1): 66~71
- 6 A. Bayramian, S. Aceves, T. Anklam *et al.*. Compact, efficient

- laser systems required for laser inertial fusion energy[J]. *Fus. Sci. Tech.*, 2011, **60**(1): 28~48
- 7 J. C. Chanteloup, D. Albach, A. Lucianetti *et al.*. Multi kJ level laser concepts for HiPER facility[C]. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2010, **244**(1): 012010
- 8 J. Kawanaka, N. Miyanaga, T. Kawashima *et al.*. New concept for laser fusion energy driver by using cryogenically-cooled Yb:YAG ceramic[C]. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2008, **112**(3): 032058
- 9 E. I. Moses. The national ignition facility and the promise of inertial fusion energy[J]. *Fus. Sci. Tech.*, 2011, **60**(1): 11~18
- 10 Yan Xiongwei, Yu Haiwu, Cao Dingxiang *et al.*. Research on ASE effect in pulsed energy-storage rep-rated Yb:YAG disk laser amplifier[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2009, **58**(6): 4230~4238
严雄伟, 於海武, 曹丁象等. 脉冲储能型重复频率 Yb:YAG 片状激光放大器 ASE 效应研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(6): 4230~4238
- 11 Data sheet for APG-1 laser glass, (Schott North America, Inc., 2011). http://www.schott.com/advanced_optics/english/download/catalogs.html
- 12 J. H. Campbell, J. S. Hayden, A. Marker *et al.*. High-power solid-state lasers: a laser glass perspective[J]. *Int. J. Appl. Glass Sci.*, 2011, **2**(1): 3~29
- 13 J. Dong, M. Bass, Y. Mao *et al.*. Dependence of the Yb³⁺ emission cross section and lifetime on temperature and concentration in yttrium aluminum garnet[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(9): 1975~1979
- 14 T. Y. Fan, D. J. Ripin, R. L. Aggarwal *et al.*. Cryogenic Yb³⁺-doped solid-state lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 448~459
- 15 L. D. DeLoach, S. A. Payne, L. K. Smith *et al.*. Laser and spectroscopic properties of Sr₅(PO₄)₃F:Yb[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**(2): 269~276
- 16 A. J. Bayramian. Development of Trivalent Ytterbium Doped Fluorapatites for Diode-Pumped Laser Applications [D]. California: University of California at Davis, 2000
- 17 M. Siebold, S. Bock, U. Schramm *et al.*. Yb:CaF₂-a new old laser crystal[J]. *Appl. Phys. B*, 2009, **97**(2): 327~338

栏目编辑: 宋梅梅