

低温液冷块状 Yb:YAG 激光放大器

严雄伟¹, 蒋新颖¹, 王振国¹, 郑建刚^{1,2*}, 李敏¹, 肖凯博¹

¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

²IFSA 协同创新中心, 四川 绵阳 621900

摘要 针对高功率激光的应用需求, 提出一种新构型的低温激光放大器方案, 采用低温液体侧面冷却三角形沟槽设计的块状 Yb:YAG 晶体, 抑制了介质内寄生振荡, 改善了热管理效果, 实现了放大器高效储能与提取, 获得了能量为 9.4 J、脉冲宽度为 10 ns、重复频率为 5 Hz、远场 3.3 倍衍射极限的激光输出, 为后续更大能量的 Yb:YAG 激光放大器设计提供了有益的参考。

关键词 激光光学; 激光放大器; 低温液冷; Yb:YAG; 侧面冷却块状放大器; 二极管抽运激光器

中图分类号 TN242

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0901008

Cryogenic Liquid-Cooled Yb:YAG Bulk Amplifier

Yan Xiongwei¹, Jiang Xingying¹, Wang Zhenguo¹, Zheng Jianguang^{1,2*}, Li Min¹, Xiao Kaibo¹

¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics,

Mianyang, Sichuan 621900, China;

²Collaborative Innovation Center of IFSA (CICIFSA), Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract An innovative laser amplifier architecture based on cryogenically cooled Yb:YAG bulk is developed for high-power laser application. The Yb:YAG bulk with triangular-section channels on the side is cooled using a cryogenic liquid to suppress parasitic oscillation in the medium and improve heat management. This architecture realizes high-efficiency energy storage and extraction of the amplifier, and a laser output with energy of 9.4 J, pulse width of 10 ns, repetition frequency of 5 Hz, diffraction limit far field of 3.3 is obtained, when high energy storage and extraction efficiency of the amplifier are realized. It provides a useful reference for the subsequent design of Yb:YAG laser amplifier with large energy.

Key words laser optics; laser amplifier; cryogenic liquid-cooled; Yb:YAG; side-cooled bulk amplifier; diode pumped laser

OCIS codes 140.3280; 140.3320; 140.3480

1 引言

Yb:YAG 激光材料具有量子亏损小、上能级寿命长、热力学性能优异等优点^[1-2], 被广泛应用于工业、军事等高功率激光领域。但常温下 Yb:YAG 晶体为准三能级结构, 对信号光自吸收严重, 且发射截面较小, 不利于激光放大输出, 工作所需抽运强度和提取激光通量较高, 因此对抽运源和介质损伤阈值提出了很高的要求, 从而限制了激光器功率水平的提升。

在低温工作条件下, Yb:YAG 的各项物理参数

随温度降低而改变, 这表明其在更高功率应用方面具有巨大潜力: 下激光能级的热布居减小^[3], 实现粒子反转所需的抽运强度减小; 抽运光吸收截面增大^[4], 有利于抽运吸收; 激光发射截面增大^[5], 饱和通量降低, 有利于能量提取; 热导率显著增加, 热膨胀系数与热光系数大幅减小^[6], 热效应带来的光学畸变减小, 热管理的难度降低。这些都使 Yb:YAG 成为非常适合低温工作的激光增益介质。

低温 Yb:YAG 激光器通常使用液氮作为冷源, 在将 Yb:YAG 介质温度降低至工作温度点的同时带走介质内部的所产生的热量。液氮气化温度为

收稿日期: 2019-04-09; 修回日期: 2019-05-08; 录用日期: 2019-05-14

基金项目: 中物院高能激光科学与技术重点实验室基金 (HEL2019-05-2)

* E-mail: zjg8861@gmail.com

77 K,该温度下增益介质内自发辐射放大(ASE)和寄生振荡十分严重,严重消耗了放大器的储能,所以Yb:YAG放大器的最佳工作温度并不是液氮气化温度。为控制合适的增益介质温度,工作时激光材料并不直接与液氮接触,多是通过热沉传导换热^[7-9]或使用液氮冷却的氦气等气体进行对流冷却^[10-11],传导换热和气体对流换热的热交换通量较低,介质内部热量并不能实现高效导出,热管理效果有待改善。同时,由于激光器产热量巨大,长时间工作需要持续提供大量液氮,需要匹配大储量的附属液氮罐,这使得系统复杂度和使用成本均显著提升。

使用低温机组循环控温的低温冷却液对Yb:YAG介质进行冷却是一种低成本、高效率的新型冷却方案。基于这一思路,本文设计出一种低温Yb:YAG激光放大器,采用低温液体侧面冷却三角形沟槽设计的块状增益介质的方案,仿真分析了该方案的热管理与寄生振荡抑制效果,以及放大器的

储能与放大特性,并开展了多程放大实验验证,为进一步设计大能量Yb:YAG激光放大器提供参考。

2 低温 Yb:YAG 激光放大器方案

图1为低温Yb:YAG激光放大器的结构示意图,块状增益介质安装在真空室内部,低温液体高速流过增益介质的4个侧面进行对流换热,抽运光穿过真空室窗口对增益介质进行抽运,激光穿过真空室窗口和增益介质进行放大。

增益介质为30 mm×30 mm×30 mm方型块状Yb:YAG,掺杂浓度(原子数分数)为1%,详细结构如图2所示;2个端面镀宽角度增透膜用于940 nm激光二极管(LD)面阵双面抽运和1030 nm激光直接穿过介质通光放大。将晶体侧面加工为三角形棱角沟槽:一是可以增大与冷却流体的换热面积,利于热管理;二是棱角结构可以多次反射并泄漏ASE光线(图3),从而更好地抑制寄生振荡。

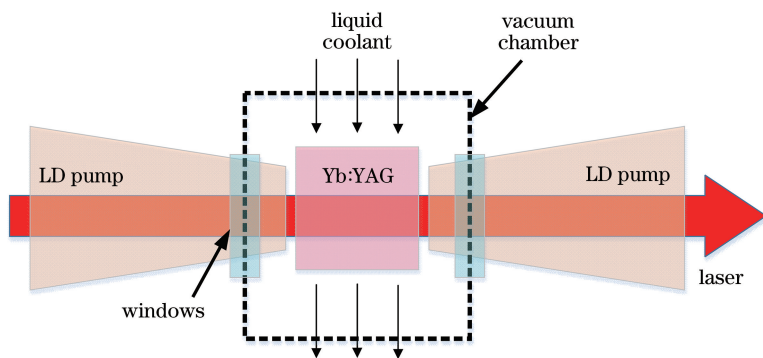


图1 侧面冷却块状Yb:YAG激光放大器示意图

Fig. 1 Schematic of side-cooled bulk Yb:YAG laser amplifier

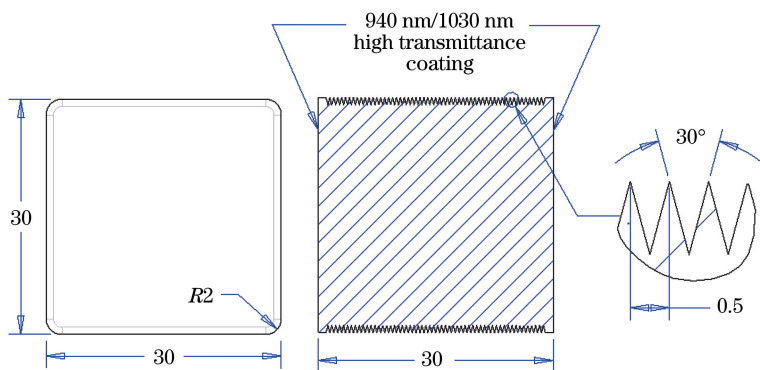


图2 Yb:YAG激光晶体结构图

Fig. 2 Structure of Yb:YAG laser crystal

冷却流体选取了液态温区在-135~61℃(138~334 K)范围内的美国3M公司生产的电子氟化液,该材料的液态温度范围较宽、流动性好、热容较大,适合作为低温下的传热媒介,同时还具

有无毒性、不可燃、不会破坏臭氧层等优点,不会在使用时影响人员与设备安全。在冷却管道中循环使用,既有利于放大器温度的精确控制,又降低了使用成本。

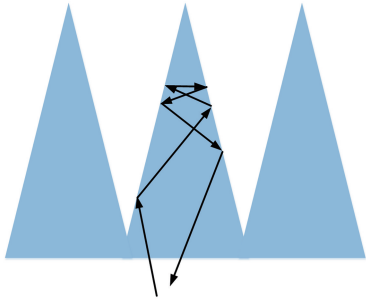


图3 ASE光线在棱角中传播和反射的情况

Fig. 3 Propagation and reflection of ASE beams in triangular-section channel

3 放大器仿真分析

3.1 三角形沟槽抑制寄生振荡仿真

文献[12-13]已对利用光线在棱角内的多次反射泄漏实现 ASE 和寄生振荡抑制的方法进行了详细的理论分析,计算了具有不同入射角度的光线在不同折射率介质棱角中的剩余反射,并实验验证了棱角区域对介质中 ASE 效应具有良好的抑制效果,其对增益的提升也有促进作用。

由于放大器增益介质内部的 ASE 光线角度各异,所以无法采用解析的方法计算 ASE 光线反射总量。针对放大器应用的具体条件,使用光学分析软件 Tracepro 建立块状 Yb:YAG 晶体的光传输模型,将晶体的侧面设计成三角形沟槽,并采用电子氟化液对晶体外部进行冷却,使用光线追迹的方法分析了三角形沟槽对 ASE 光线泄漏的影响(图 4)。在计算过程中设定晶体的折射率为 1.82,晶体外冷却流体的折射率为 1.27,计算结果表明 ASE 光线的泄漏比例大于 90%。三角形沟槽结构不仅可以将 ASE 光线导出增益介质,还隔断了增益介质内部的封闭光路,很好地抑制了寄生振荡的产生。

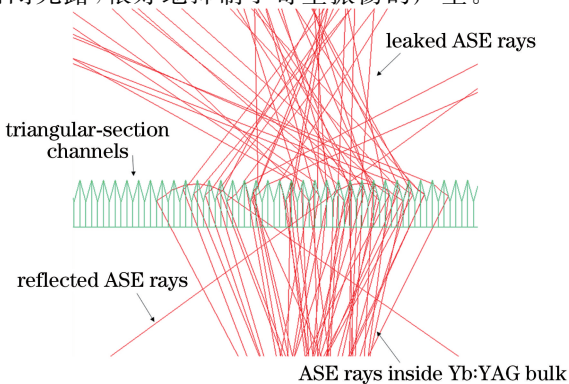


图 4 块状 Yb:YAG 晶体侧面局部光线追迹仿真示意图

Fig. 4 Simulation of local ray tracing on side of bulk Yb:YAG crystal

3.2 放大器储能与放大过程仿真

Yb:YAG 中 Yb^{3+} 的能级如图 5 所示,只有间距约 10000 cm^{-1} 的 ${}^2F_{7/2}$ 基态和 ${}^2F_{5/2}$ 受激多重态,抽运和激光跃迁发生在 Stark 分裂的子能级之间,在常温下,激光下能级约有 5% 的固定热布居,因此 Yb:YAG 的能级结构具有准三能级特点。低温冷却可以减小激光下能级的布居数,从而减小粒子反转所需的抽运强度;受激发射截面也随温度的降低而增加,所提取的饱和通量和材料损伤风险均降低,但 ASE 和寄生振荡均增强。

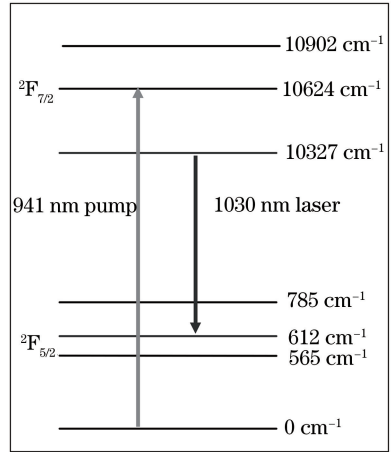


图 5 Yb 离子能级与 Stark 子能级示意图

Fig. 5 Schematic of Yb ion energy level and Stark sublevel

为了获得放大器储能与放大过程随工作条件的变化规律,优化放大器的工作性能,在 Yb^{3+} 抽运和放大动力学的基础上,根据速率方程,建立了抽运过程和能量提取过程的物理模型,对不同温度和抽运强度下放大器内的储能情况和放大输出情况进行了仿真分析^[14]。

与 Yb:YAG 上能级寿命相对应,设计抽运脉宽为 1 ms。抽运结束时刻放大器内的储能情况见图 6。在常温(300 K)条件下,放大器的增益和储能效率都非常低,需要更高的抽运强度才能使放大器处于正常工作的状态。随着工作温度的降低,放大器的小信号增益系数不断提高,一方面是因为在低温条件下,Yb:YAG 晶体受激发射截面增大,导致放大器增益增大;另一方面是温度降低时,激光下能级的热布居数减少,在相同的抽运强度下实现反转的粒子数增多。但温度降低时,增益提升,放大器内 ASE 增强,导致上能级粒子的消耗速度加快,从而降低了放大器的储能效率,所以放大器中存在一个可获得最高储能效率的最佳工作温度。可以看出,抽运强度越高,最高储能效率对应的温度点越高。

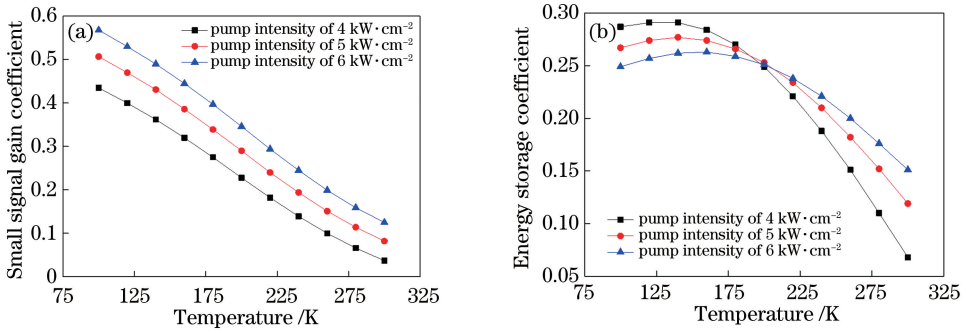


图 6 1 ms 抽运脉宽下不同温度和抽运强度的放大器储能情况。(a)小信号增益系数;(b)储能效率

Fig. 6 Energy storage in amplifier at different temperatures and pumping intensities with 1-ms pump pulse duration.

(a) Small signal gain coefficient; (b) energy storage efficiency

基于各抽运强度的最佳工作温度 T 进行激光放大输出的仿真计算,不同注入能量下的四程放大输出能量见图7。可以看到,当注入激光能量大于

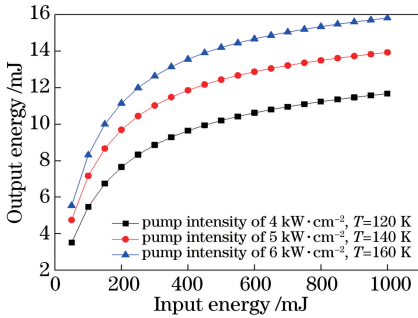


图 7 最佳工作温度下放大器四程放大输出能量与注入能量的关系

Fig. 7 Output energy as a function of injection energy of four-pass amplification at optimized temperature

500 mJ 后,放大输出能量的增幅变缓,使用焦耳量级的激光注入即可实现放大器储能饱和提取。

3.3 热管理仿真

放大器选取的冷却液的液态温区为 $-135 \sim 61 \text{ }^\circ\text{C}$ ($138 \sim 334 \text{ K}$),但其在温度低于 $-110 \text{ }^\circ\text{C}$ (163 K)时,黏度迅速增加,对激光晶体的冷却能力急剧下降,所以选取冷却液温度 163 K 作为热管理设计的边界条件,计算了 5 kW/cm^2 抽运强度下 5 Hz 重复频率工作时放大器 Yb:YAG 晶体内部温度,仿真结果见图 8。可以看到:对于未将侧面加工成沟槽的晶体,放大器正常工作时晶体内部温度的最大值为 176 K ;对于已将侧面加工成沟槽的晶体,放大器正常工作时晶体内部温度的最大值为 172 K 。这表明沟槽结构增加了介质侧面换热面积,对于增益介质热管理效果具有很好的改善作用。

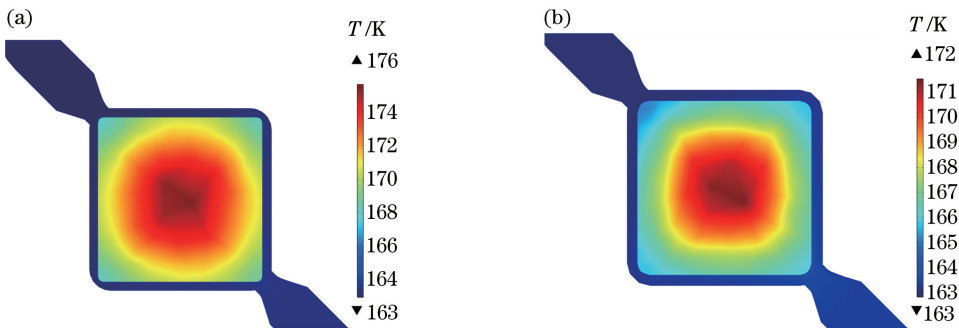


图 8 放大器晶体的温度分布。(a)侧面无沟槽晶体;(b)侧面有沟槽晶体

Fig. 8 Temperature distributions of laser crystal. (a) Crystal without triangular-section channels on side; (b) crystal with triangular-section channels on side

4 实验研究

图9为加工完成的 Yb:YAG 晶体与激光放大器的实物图,实验中采用 LD 面阵从 2 个端面抽运激光 Yb:YAG 晶体,低温流体从 4 个侧面对晶体进行

冷却。低温工作时使用真空室进行晶体隔离,防止晶体表面结露,真空室两端的高透过率真空窗口可供放大激光通过。晶体端面单面抽运强度为 4.5 kW/cm^2 ,工作重复频率为 5 Hz ,对输出能量为焦耳量级、脉冲宽度为 10 ns 、波长为 1030 nm 脉冲

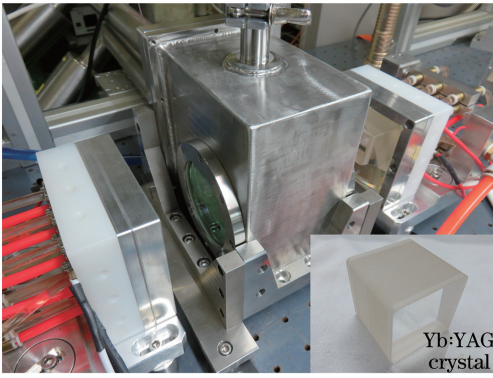


图 9 Yb:YAG 激光放大器的实物图

Fig. 9 Photo of Yb:YAG laser amplifier

激光进行放大。

图 10 所示为不同工作温度点放大器四程放大实验获得的输出能量和注入激光能量之间的关系及其与理论模拟值的对比。由于冷却系统的限制,放大器未能工作在理论计算得到的最佳工作温度点,所以选取了 190 K 与 207 K 两个工作温度点进行实验和理论计算的校核。从图 10 可以看出:实验测量值和理论模拟值基本一致;工作温度点为 190 K 时放大器的增益特性明显优于工作温度点为 207 K 时

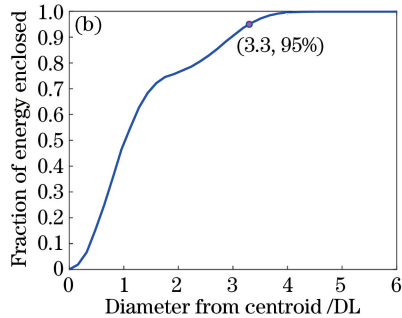
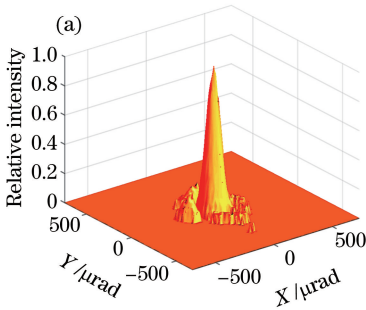


图 11 放大器输出远场光斑分析。(a)远场相对强度分布;(b)能量集中度曲线

Fig. 11 Analysis of far-field spot of amplifier output. (a) Distribution of relative intensity in far field;

(b) curve of energy concentration

5 结 论

分析了 Yb:YAG 在低温环境下工作的优势,提出一种新构型的低温 Yb:YAG 激光放大器方案并完成设计,对该放大器在寄生振荡抑制、高效储能与提取、提升热管理能力等方面的效果进行了仿真分析和实验验证。理论模拟值与实验测量结果基本吻合,证明了理论计算模型的正确性和方案设计的合理性,实现了能量为 9.4 J、脉冲宽度为 10 ns、重复频率为 5 Hz、远场 3.3 倍衍射极限的激光输出,为进一步研究和设计更大能量的 Yb:YAG 激光放大器提供了有益的参考。

放大器的增益特性,其可实现更大能量的激光输出,本实验中获得的最大激光输出能量为 9.4 J。图 11 (a)所示为放大器输出远场光斑在不同角度时的相对强度分布,图 11(b)所示为计算得到的远场能量集中度曲线,95%的远场光斑能量位于 3.3 倍衍射极限(DL)范围内,表明光束质量较好。实验验证了低温环境对 Yb:YAG 激光放大器性能具有明显的提升作用,良好的热管理机制可有效改善光束质量,保证放大器安全高效地工作。

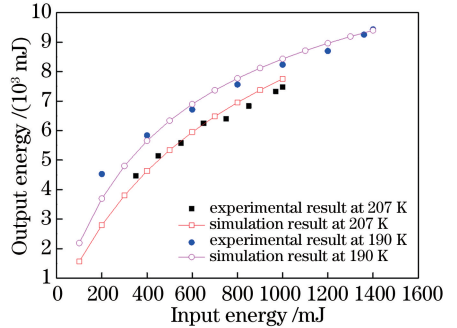


图 10 放大器四程放大模拟与实验结果

Fig. 10 Simulation and experimental results of four-pass amplification

参 考 文 献

- [1] DeLoach L D, Payne S A, Chase L L, *et al.* Evaluation of absorption and emission properties of Yb³⁺ doped crystals for laser applications[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993, 29(4): 1179-1191.
- [2] Sumida D S, Fan T Y. Radiation trapping in solid-state laser media and its impact on fluorescence lifetime and emission cross section measurements[C] // OSA Proceedings Series, Advanced Solid State Lasers, January 30, 1999, Memphis, Tennessee, USA. Washington, D.C.: OSA, 1995: SC20.
- [3] Brown D C. The promise of cryogenic solid-state

- lasers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(3): 587-599.
- [4] Brown D C, Cone R L, Sun Y C, *et al.* Yb:YAG absorption at ambient and cryogenic temperatures [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11(3): 604-612.
- [5] Dong J, Bass M, Mao Y L, *et al.* Dependence of the Yb³⁺ emission cross section and lifetime on temperature and concentration in yttrium aluminum garnet[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2003, 20(9): 1975-1979.
- [6] Aggarwal R L, Ripin D J, Ochoa J R, *et al.* Measurement of thermo-optic properties of Y₃Al₅O₁₂, Lu₃Al₅O₁₂, YAlO₃, LiYF₄, LiLuF₄, BaY₂F₈, KGd(WO₄)₂, and KY(WO₄)₂ laser crystals in the 80-300 K temperature range [J]. Journal of Applied Physics, 2005, 98(10): 103514.
- [7] Ripin D J, Ochoa J R, Aggarwal R L, *et al.* 165-W cryogenically cooled Yb:YAG laser [J]. Optics Letters, 2004, 29(18): 2154-2156.
- [8] Perevezentsev E A, Mukhin I B, Kuznetsov I I, *et al.* Cryogenic disk Yb:YAG laser with 120-mJ energy at 500-Hz pulse repetition rate[J]. Quantum Electronics, 2013, 43(3): 207-210.
- [9] Kawanaka J, Takeuchi Y, Yoshida A, *et al.* Highly efficient cryogenically-cooled Yb:YAG laser [J]. Laser Physics, 2010, 20(5): 1079-1084.
- [10] Mason P D, Banerjee S, Ertel K, *et al.* DiPOLE - an efficient and scalable high pulse energy and high average power cryogenic gas cooled multi-slab amplifier concept [J]. Plasma and Fusion Research, 2013, 8: 3404051.
- [11] Lucianetti A, Albach D, Chanteloup J C. Active-mirror-laser-amplifier thermal management with tunable helium pressure at cryogenic temperatures [J]. Optics Express, 2011, 19(13): 12766-12780.
- [12] Zhang Y L, Ye H X, Li M Z, *et al.* ASE suppression in high-gain solid-state amplifiers by a leak method [J]. Laser Physics, 2013, 23(7): 075802.
- [13] Zhang Y L, Wei X F, Li M Z, *et al.* Parasitic oscillation suppression in high-gain solid-state amplifiers[J]. Laser Physics, 2013, 23(5): 055802.
- [14] Yan X W. Study on ASE and energy flow characteristics of repetition rate Yb:YAG laser system[D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2009.
严雄伟. 重复频率 Yb:YAG 激光系统 ASE 及能流特性研究[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2009.