

宽温区 Yb : YAG 板条激光模块热畸变仿真研究

朱 铎^{1,3}, 宋艳洁^{1,2,4}, 陈中正^{1,2,4}, 许元斋^{1,3}, 薄 勇^{1,2,4}, 彭钦军^{1,2,4}

(1. 中国科学院物理与化学技术研究所固体激光重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院理化技术研究所功能晶体与激光技术重点实验室, 北京 100190;

3. 中国科学院大学, 北京 100190; 4. 齐鲁中科光学物理与工程技术研究所, 山东 济南 250000)

摘要: 本文对不同冷却温度下的 Yb : YAG 晶体板条激光模块高功率运转时的温度场、应力场及对应的热畸变进行了仿真分析研究。结果显示, 随着冷却温度从 300 K 降低至 77 K, 板条的温度梯度热应力与应变都明显降低。当冷却温度为 77 K 时, 最大主应力为 4.14 MPa, 仅为常温时的 15.6%, 最大主应变为 3.82×10^{-5} , 仅为常温时的 6%。为了分析 Yb : YAG 晶体板条激光模块不同冷却温度下输出激光的光束质量, 以确定其最佳运转温度, 我们采用光线追迹的方法, 对单程通过板条的 1030 nm 探测光进行仿真。可以看到, 当冷却温度为 77 K 时, 远场光斑能量更为集中, 且探测光光程差的 PV 值为 0.7941 μm , 仅为 300 K 时的 59.6%。模拟结果表明低温运转有利于 Yb : YAG 晶体板条激光模块产生高功率高光束质量激光输出, 这为高功率高光束质量 Yb : YAG 晶体板条激光的设计工作奠定了基础。

关键词: 板条激光器; Yb : YAG; 热效应; 仿真模拟

中图分类号: TN248; O436 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.04.003

Simulation study of thermal aberration of Yb : YAG slab laser module in wide temperature region

ZHU Duo^{1,3}, SONG Yan-jie^{1,2,4}, CHEN Zhong-zheng^{1,2,4}, XU Yuan-zhai^{1,3},

BO Yong^{1,2,4}, PENG Qin-jun^{1,2,4}

(1. Key Lab of Solid State Laser, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Key Lab of Functional Crystal and Laser Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

4. Institute of Optical Physics and Engineering Technology, Qilu Zhongke, Jinan 250000, China)

Abstract: In this paper, the temperature field, stress field and corresponding thermal distortion of Yb : YAG crystal slab laser module during high power operation at different cooling temperatures are simulated and analyzed. The results show that the temperature gradient thermal stresses and strains of the slats decrease significantly as the cooling temperature is reduced from 300 K to 77 K. The maximum principal stress is 4.14 MPa, which is only 15.6% of that at room temperature. When the cooling temperature is 77 K, the maximum principal stress is 4.14 MPa, which is only 15.6% of that at room temperature, and the maximum principal strain is 3.82×10^{-5} , which is only 6% of that at room temperature. In order to analyze the beam quality of the output laser at different cooling temperatures of the Yb : YAG crystal slab laser module to determine its optimal operating temperature, the 1030 nm probe light passing through the slat in one pass is simulated by the method of light tracing. It can be seen that when the cooling temperature is 77 K, the far-field spot energy is more concentrated, and the PV value of the detection light path difference is

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 62205349); 2021 年“泉城学者”建设工程项目资助。

作者简介: 朱 铎 (1996 -), 男, 博士研究生, 主要从事大功率全固态激光技术的研究。E-mail: zhuduo18@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 宋艳洁, 女, 博士, 主要从事固态板条激光器技术的研究。E-mail: songyanjie@mail.ipc.ac.cn

收稿日期: 2023-06-19

0.7941 μm , which is only 59.6 % of that at 300 K. The simulation results show that the low-temperature operation is favourable to the generation of high-power and high-beam-quality laser output from the Yb : YAG crystal slab laser module, which lays a foundation for the design of high-power and high-beam-quality Yb : YAG crystal slab lasers.

Keywords: slab laser; Yb : YAG; thermal effects; simulation

1 引言

高功率高光束质量激光器在工业生产、科学研究和军事国防等领域中有着广泛的应用^[1-3],其中稀土掺杂的钇铝石榴石(YAG)是目前应用最广泛的高功率激光材料。相比于广泛使用的 Nd^{3+} 掺杂的 YAG ($\text{Nd} : \text{YAG}$) 晶体, Yb^{3+} 掺杂的 YAG ($\text{Yb} : \text{YAG}$) 晶体具有更小的量子亏损、更高的储能并且在高掺杂浓度下不产生猝灭,非常有利于获得高功率高光束质量的激光输出^[4-5]。然而,由于 Yb^{3+} 的激光下能级在室温下具有较高的热布居,使得掺 Yb^{3+} 的激光器在室温下是准三能级激光器,这导致了泵浦阈值功率高以及较低的激光效率等。幸运的是,在低温下, Yb^{3+} 会大幅减少激光下能级的热布居,从而实现掺 Yb^{3+} 激光器真正的“四能级”运转^[6]。除此之外,低温条件会使 $\text{Yb} : \text{YAG}$ 材料具有更高的导热系数、更低的热膨胀和热光系数,极大降低了高功率下的热效应,利于固态激光器获得高功率高光束质量的激光输出^[7]。因此,低温运转的 $\text{Yb} : \text{YAG}$ 固体激光器得到了广泛地关注与研究。2005 年, D. C. Brown 等人使用液氮冷却端面泵浦的 $\text{Yb} : \text{YAG}$ 棒获得了 300 W 的平均输出功率,对应的光光效率为 64 %^[8]。Yong Wang 等人使用低温冷却的 $\text{Yb} : \text{YAG}$ 皮秒激光放大器,获得了 1.1 kW 的平均功率^[9]。J. K. Brasseur 等人使用低温冷却($\sim 100 \text{ K}$)的 $\text{Yb} : \text{YAG}$ 作为增益介质的主振功率放大系统,获得了 2.3 kW 的激光输出,其插头效率超过 30 %^[10]。

对于固态激光器来说,常用的几何结构包括棒状,板条和碟片等。其中,板条激光器由于具有较大的纵横比,从而具有较大的散热面积,有利于其在高功率下运转。同时,板条激光器沿特殊的“之字形”光路传播,从而能够自动补偿厚度方向的低阶像差,这也有利于产生高功率高光束质量的激光输出。为了分析在宽温区内,尤其是低温下运转的 $\text{Yb} : \text{YAG}$ 晶体板条激光模块的热效应,并为高功率高光束质量 $\text{Yb} : \text{YAG}$ 晶体板条激光器的结构设计与运转温度提供指导,本文对一种大面泵浦冷却的 $\text{Yb} : \text{YAG}$ 晶体板条激光模块结构进行数值模拟,分析了该结

构在不同冷却温度下运行产生高功率高光束质量的潜力。通过有限元方法,模拟了板条在不同冷却温度下高功率运行下的温度分布与应力分布,并在此基础上,通过光线追迹方法分析了板条的热透镜效应与热应力形变带来的光学畸变。

2 Yb : YAG 晶体板条激光模块数值模型

本文采用的板条激光模块结构如图 1(a) 所示,板条整体结构为梯形,长度为 150 mm,宽 50 mm,厚 6 mm,两端面与下大面成 40° 角,上大面尺寸为 $135.7 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。板条上大面镀 940 nm 增透膜,下大面镀 940 nm 高反膜,板条上下大面通过高速流动的冷却液直接液冷,以去除激光模块运行过程中产生的废热。模拟中采用输出波长为 940 nm 的激光二极管(LD)阵列进行泵浦,板条所吸收的泵浦光平均功率为 20000 W。由 LD 阵列发射的泵浦光先通过整形系统被匀化整形,再通过冷却液层从上大面进入板条,并被下大面反射后再次通过板条,以确保板条增益介质对泵浦光双程吸收,以提高泵浦光的利用效率。

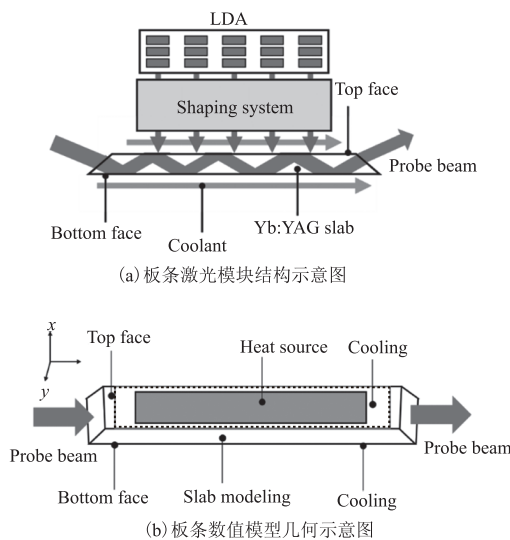


图 1 模拟的板条激光模块示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a simulated slab laser module

板条增益介质在产生激光的过程中,由于量子亏损等效应的存在,板条吸收的泵浦功率会以一定比例被转化为废热,并产生热透镜效应与热应力,不仅影响激光输出功率极限,而且使板条输出激光产

生畸变,影响激光的光束质量。为了分析 Yb : YAG 晶体板条激光模块运转的最佳冷却温度,并分析其热效应,建立了一个数值模型来模拟宽温区内不同冷却温度下,板条运转过程中产生的温度分布与应力分布,以此评价板条激光模块运行过程中产生的输出功率和对激光光束质量的影响。

对于固体传热过程,在笛卡尔坐标系下,遵循下列热传导方程:

$$k_x \frac{\partial^2 T(x,y,z)}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T(x,y,z)}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T(x,y,z)}{\partial z^2} +$$

$$Q(x,y,z) = 0 \tag{1}$$

其中, Q_0 为热源分布,而 k_x, k_y, k_z 为固体材料在不同方向上的热导率; $T(x,y,z)$ 为固体材料的温度分布。而为了求解上述方程,还需要提供固体材料的边界条件,其中对流边界条件公式如下:

$$k_x \frac{\partial T(x,y,z)}{\partial x} \Big|_{x=x_0} = h(T(x_0,y,z) - T_0) \tag{2}$$

$$k_y \frac{\partial T(x,y,z)}{\partial y} \Big|_{y=y_0} = h(T(x,y_0,z) - T_0) \tag{3}$$

$$k_z \frac{\partial T(x,y,z)}{\partial z} \Big|_{z=z_0} = h(T(x,y,z_0) - T_0) \tag{4}$$

其中, h 为对流介质的对流换热系数; T_0 为换热介质的温度。因此,为了分析板条介质的温度分布,需要给出热源及换热的边界条件。

数值模型的几何示意图如图 1(b) 所示,其中灰色区域为体热源,即板条吸收泵浦光并产生废热的区域。对于 Yb : YAG 晶体而言,其发热功率约为吸收泵浦功率的 11 %^[4],因此将总发热功率设为 2200 W。同时,废热是由泵浦光能量转化而来,因此可将泵浦光的能量分布近似看做热源的能量分布。为了得到热源的能量分布,使用软件 Zemax 对泵浦整形系统进行了仿真,结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出,泵浦光在板条宽度方向上分布较为均匀,这有利于改善板条在运行过程在宽度方向的热分布,从而有利于板条输出激光的光束质量。

图 1(b) 虚线框所示区域为面冷却区域,其中上大面与下大面各有一个冷却区域,通过冷却液对流换热,对该区域进行冷却,并将冷却液的对流换热系数设定为 30000 W/(m² · K)。数值模拟过程中,冷却温度分别设置为 300 K, 250 K, 200 K, 150 K, 100 K, 77 K 六种不同情况来分析不同温度下板条激光模块热效应的影响。

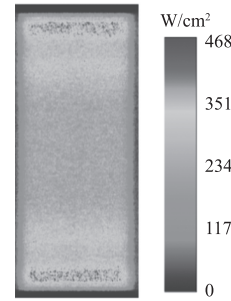


图 2 泵浦光强度分布

Fig. 2 Distribution of pump light

3 Yb : YAG 晶体板条激光模块热效应模拟与分析

使用商业软件 Ansys, 通过有限元方法, 根据上述的几何模型及边界条件, 建立并求解了不同冷却温度下的仿真模型。图 3 展示了不同冷却温度下板条内最高温度与最低温度的差值。从图中可以看出, 随着冷却温度逐渐降低, 板条内最大温差也逐渐降低, 且温度越低, 下降速度越快。当冷却温度为 300 K 时, 最大温差为 45.8 K, 而当冷却温度下降至 77 K 时, 最大温差则只有 16.6 K, 约为常温的 36 %, 这说明低温下板条内的温度梯度较小。

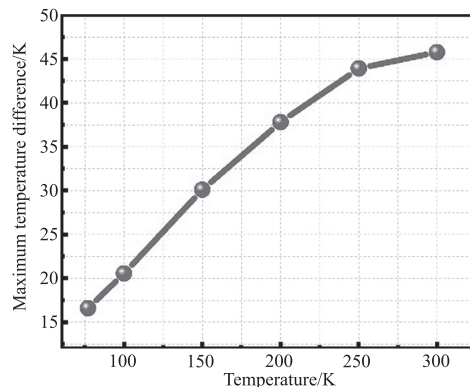


图 3 不同冷却温度下板条最大温差的模拟曲线

Fig. 3 Simulated temperature difference in slab versus different cooling temperature

在温度仿真结果的基础上, 进行了应力与应变的数值仿真, 图 4 展示了在冷却温度为 300 K 时的应力与应变的分布情况。可以看出, 应力与应变的最大点都分布在发热区域的边缘位置, 这可能是由于发热区域的边缘, 温度存在剧烈变化, 即具有较大的温度梯度。图 5 展示了不同温度下板条最大主应力与最大主应变的变化曲线, 图中可以看出, 板条最大主应力与最大主应变的变化趋势类似, 随着冷却温度降低, 二者都出现了显著下降。冷却温度为 300 K 时, 最大主应力达到了

68.8 MPa, 当冷却温度下降到 77 K 时, 板条最大主应力则下降到了 4.14 MPa, 约为常温下的 6%, 这意味着低温冷却下的板条, 可承受更高的输出功率与废热而不发生应力断裂。板条的最大主应变随着冷却温度从 300 K 下降到 77 K, 最大主应变从 24.22×10^{-5} 下降到 1.47×10^{-5} , 而较小的应变, 有利于减少形变带来的波前畸变, 从而提升输出激光的光束质量。

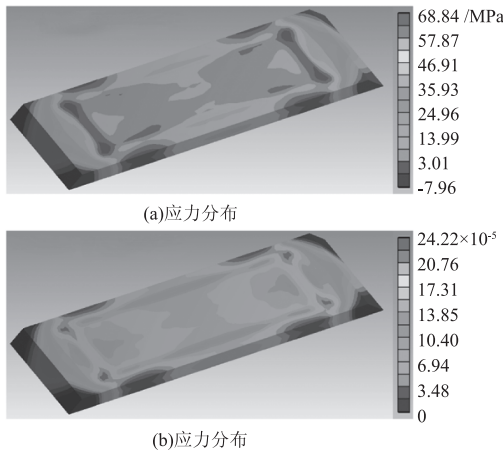


图 4 冷却温度为 300 K 时, 模拟的应力与应变分布

Fig. 4 Simulated stress and strain distribution when the cooling temperature is 300 K

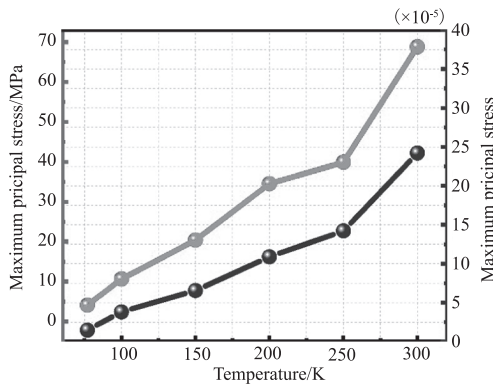


图 5 模拟的板条最大主应力(灰)与最大主应变(黑)随冷却温度变化的曲线

Fig. 5 Simulated maximum principal stress (gray) and maximum principal strain (black) versus different cooling temperature

板条激光的波前畸变, 可以用光程差 (OPD) 来表示, 而热效应引起的 OPD 可以分为三种: 一是由热透镜效应引起的 OPD, 二是由增益介质形变引起的 OPD, 三是有弹光效应引起的 OPD, 其中前两项占主要地位^[11]。Yb: YAG 板条增益介质的折射率受温度影响, 遵循如下公式:

$$n = n_0 + \frac{dn}{dT}(T - T_0) \quad (5)$$

其中, $\frac{dn}{dT}$ 为增益介质的热光系数; n_0 为增益介质在温度 T_0 时的折射率, 而 n 为介质在温度 T 时的折射率。因此, 当介质内温度梯度较大时, 增益介质内部受温度影响会产生明显不均匀的折射率分布, 这会使输出激光产生不可忽视的 OPD。同时, 板条受热梯度的影响, 会产生一定的热应力与形变, 而激光在形变的介质内发生反射, 这也会使得激光产生一定的 OPD。为了分析上述原因产生的 OPD, 我们在温度分布与应力应变仿真的基础上, 进行了光学模拟仿真。模拟过程中, 设定探测光为 1030 nm 平行光, 尺寸为 5.4 mm \times 45 mm, 探测光从板条的一个端面入射, 沿着与激光同轴的“之字形”光路通过板条, 并从另一个端面出射。探测光单程通过板条后, 对其波前畸变进行了分析, 并使用焦距为 1000 mm 的标准透镜对其进行聚焦, 在焦点处探测远场聚焦光斑, 并分析了聚焦光斑的分布情况。

图 6 展示了不同冷却温度下探测光单程通过模拟板条后被聚焦所得到的远场光斑, 从图中可以看出, 随着温度下降, 远场光斑光强分布越来越集中, 这说明与常温相比, 当温度下降到 77 K 时, 光斑光束质量明显上升。图 7 展示了不同冷却温度下探测光的 OPD, 从中可以看出, 探测光的中间部分, 与上下边缘的 OPD 有较大差异。当冷却温度为 77 K 时, 探测光 OPD 的 PV 值为 0.7941 μm , 且探测光中间部分光程差较为接近。而随着温度上升, 探测光的 OPD 的 PV 值逐渐增加, 当冷却温度为 300 K 时, 已经达到了 1.3315 μm , 探测光中间部分的 OPD 起伏变得较大, 且在中间部分出现了四个较为明显的凸起。模拟结果说明, 在 300 K 到 77 K 的温度区间内, 随着温度下降, 探测光的光束质量得到改善。

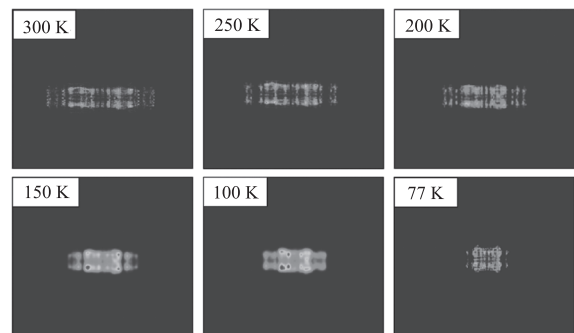


图 6 不同温度下探测光的远场光斑

Fig. 6 Simulated far field intensity distribution for probe beam at different cooling temperatures

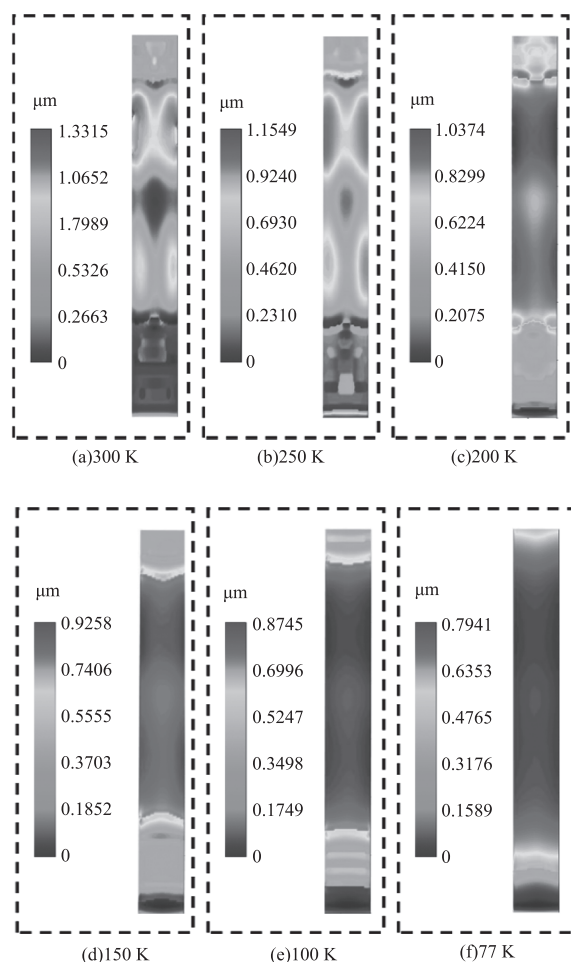


图7 不同温度下探测光的 OPD

Fig. 7 OPD of probe beam at different temperature

4 结论

本文对不同冷却温度下的大 Yb : YAG 晶体板条激光模块高功率运转时的温度场与应力场进行了仿真分析研究,以分析不同温度下板条激光模块热效应的影响。结果显示,随着冷却温度从 300 K 降低至 77 K,板条的温度梯度热应力与应变都明显降低。同时,当冷却温度为 77 K 时,板条内最大温差为 16.6 K,仅为常温时的 36%,最大主应力为 4.14 MPa,仅为常温时的 6%,最大主应变为 1.47×10^{-5} ,仅为常温时的 6.1%。为了对不同冷却温度下板条模块产生高功率高光束质量激光输出的潜力进行评价,采用光线追迹的方法,对单程通过板条的 1030 nm 探测光进行仿真。结果显示,当冷却温度为 77 K 时,远场光斑能量更为集中,且探测光光程差的 PV 值为

0.7941 μm ,仅为 300 K 时的 59.6%。以上的模拟结果表明,低温运转有利于 Yb : YAG 板条激光模块产生高功率高光束质量激光输出,这为高功率高光束质量 Yb : YAG 板条激光模块的设计工作提供了指导。

参考文献:

- [1] Devireddy K, Muralimohan C, Venkateswarlu D. A review of research progress on dissimilar laser weld-brazing of automotive applications [C]//Proceedings of 2017 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Hyderabad, India., June 1-2, 2017.
- [2] Salamin Y, Harman Z, K eitel C. Direct high-power laser acceleration of ions for medical applications [J]. Physics Review Letter, 2008, 100(15): 155004.
- [3] Extance A. Military technology: laser weapons get real [J]. Nature, 2015, 521(7553): 408-410.
- [4] Fan Y. Heat generation in Nd : YAG and Yb : YAG [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993, 29(6): 1457-1459.
- [5] Bruesselbach H, Sumida D, Reeder R, et al. Low-heat high-power scaling using InGaAs-diode-pumped Yb : YAG lasers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1997, 3(1): 105-116.
- [6] Körner J, Jambunathan V, Hein J, et al. Spectroscopic characterization of Yb³⁺-doped laser materials at cryogenic temperatures [J]. Applied Physics B, 2017, 116: 75-81.
- [7] Fan T, Ripin D, Aggarwal R, et al. Cryogenic Yb³⁺-doped solid-state lasers [J]. IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 448-459.
- [8] Ripin D, Ochoa J, Aggarwal R, et al. 300 W cryogenically cooled Yb : YAG laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2005, 41(10): 1274-1277.
- [9] J Ogino, Tokita S, Kitajima S, et al. 10 J operation of a conductive-cooled Yb : YAG active-mirror amplifier and prospects for 100 Hz operation [J]. Optics Letters, 2021, 46(3): 621-624.
- [10] J K Brasseur, Abeeluch A, Awtry A, et al. 2.3 kW cryogenically cooled Yb : YAG laser [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optica Publishing Group, 2009), CThR1, 31 May-5 June, 2009.
- [11] Ferrara P, Ciofini M, Esposito L, et al. 3-D numerical simulation of Yb : YAG active slabs with longitudinal doping gradient for thermal load effects assessment [J]. Optics Express, 2014, 22(5): 5375-5386.