

基于传导冷却端面泵浦板条和正交 Porro 棱镜谐振腔的宽温区工作激光器

乔占朵^{1*}, 孟冬冬^{1*}, 张铁亮¹, 高宝光^{1,2}, 王天齐¹

¹中国科学院空天信息创新研究院光学工程研究部, 北京 100094;

²中国科学院大学光电学院, 北京 100049

摘要 本文报道了一种基于传导冷却端面泵浦板条(CCEPS)结合正交 Porro 棱镜谐振腔,采用中心波长为 805.8 nm (60 °C 时)、半峰全宽为 6.8 nm 的泵浦源,可实现在 15~70 °C 宽温度区间工作的激光器。实验上获得了脉冲能量为 49.82 mJ、脉冲宽度为 8.11 ns、重复频率为 20 Hz 的脉冲激光输出,光斑直径为 2.12 mm,发散角小于 2 mrad,峰值功率达到 6.14 MW,输出能量不稳定度在 -1.5%~+1.5% 以内。实验测得的激光器输出能量随温度的变化曲线与理论计算得到的板条对泵浦光的吸收效率随温度的变化趋势具有较好的一致性。将该模型进一步优化,设置宽光谱泵浦源的中心波长为 806 nm (25 °C 时),激光器的温度不敏感区间较本实验测试温度区间拓宽了将近一倍。

关键词 激光器; 正交 Porro 棱镜谐振腔; 端面泵浦板条; 宽温区; 高可靠性

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221188

1 引言

纳秒脉冲小型化激光器在激光探测、目标指示等领域被广泛应用。在多数实际应用场景中,不仅要求激光器对冲击、振动和大的温度变化保持不灵敏,还要求激光器具有小体积、轻量化、低功耗等特点。正交 Porro 棱镜偏振耦合输出腔于 1976 年被 Chun 等^[1]提出,其对环境温度变化和冲击不灵敏,可以有效消除振动造成的对准失调,具有较高的抗失谐特性^[2-6]。传导冷却端面泵浦板条结构(CCEPS)于 2001 年由美国的 Goodno 等^[7]提出。泵浦光从晶体端面反射进板条,激光在板条中以“之”光路传播,板条上下表面通过传导冷却,冷却更加均匀,可以提升输出激光的光束质量^[8-12]。端泵板条结构往往会形成严重的端面热积累效应^[13-14],为了减小端面热积累效应的影响,2009 年,清华大学的付星等^[15]采用弱泵浦吸收的方法,实现了 253 W 的输出功率和 39.6% 的光光转换效率;2017 年,中国工程物理研究院的李密等^[16]采用多段复合陶瓷板条,获得了 7.08 kW 的输出功率以及 39.2% 的光光转换效率。激光二极管(LD)的发射波长会随着环境温度的变化而发生漂移,导致激光二极管发射波长偏离激光工作物质的吸收峰,从而影响吸收效率。在实际应用中,往往通过半导体制冷片(TEC)对半导体激光泵浦源进行精确控温,确保泵浦源的波长位于增

益介质的吸收峰处,但温控系统会增大系统的复杂性、重量和功耗等。为了实现激光器小体积、轻量化、低功耗等要求,目前国内外通常采用多波长匹配与长程吸收两种方法来实现激光器在宽温度区间工作,从而减小了半导体泵浦激光器对精确温控系统的依赖。2005 年,英国 BAE 系统公司的 McCarthy 等^[17]采用中心波长为 807 nm (55 °C 时)、谱线宽度为 6 nm 的阵列侧面泵浦吸收长度为 12 mm 的板条,将温度不敏感区间扩展到了 15 °C,并结合分段温控及波长锁定技术实现了激光器在 100 °C 以上宽温区工作。2006 年,美国的 Schilling 等^[18]采用 4 nm 光谱宽的泵浦源端面泵浦长度为 30 mm 的 Nd:YAG 晶体,获得了一 20~50 °C 范围内 10 Hz 1.57 μm 激光输出。2018 年,中国科学院上海光学精密机械研究所的马秀华课题组^[19]通过三波长匹配结合长程吸收方案实现了一 30~50 °C 范围内激光器输出温度脱敏,实验中通过调节电流进行能量补偿,得到了 95 mJ 的最大输出能量。2020 年,北京工业大学的刘学胜课题组^[20]利用 25 °C 下波长为 799、804、809、812 nm 的 4-λLD 阵列端泵 60 mm 长棒状晶体,实现了一 40~0 °C 范围内不稳定度为 10%、重复频率为 20 Hz、能量为 70 mJ 的脉冲输出。可见,多波长匹配及晶体的长程吸收是实现半导体泵浦激光器在宽温区工作的有效手段^[21]。

笔者采用谱宽为 6.8 nm 的 LD 泵浦源端面泵浦

收稿日期: 2022-08-29; 修回日期: 2022-10-01; 录用日期: 2022-10-31; 网络首发日期: 2022-11-04

基金项目: 国家自然科学基金(62075221)、国家重点研发计划(2020YFF0400800)

通信作者: *mjf09@163.com

分段掺杂 Nd:YAG 板条, 结合正交 Porro 棱镜腔, 获得了脉冲能量为 49.82 mJ、脉冲宽度为 8.11 ns、重复频率为 20 Hz 的脉冲激光输出, 光斑直径为 2.12 mm, 发散角小于 2 mrad, 峰值功率达到 6.14 MW, 输出能量不稳定度在 -1.5%~+1.5% 以内。在近 30 mm 的吸收长度下, 激光器实现了在 15~70 °C 温度范围内工作。所设计的激光器无须复杂的泵浦波长匹配和过大的晶体长度, 降低了泵浦器件的复杂度, 具有良好的抗失谐特性, 而且结构紧凑, 具有较高的应用价值。

2 激光器设计

2.1 板条对宽谱泵浦源的吸收效率分析

泵浦光在激光增益介质中被吸收的规律符合比尔定律, 其表达式为

$$I(x) = I_0 \exp[-\alpha(\lambda)x], \quad (1)$$

式中: I_0 为初始光强; $I(x)$ 为泵浦光在增益介质中传输 x 距离后的强度; α 为增益介质对泵浦光的吸收系数; λ 为波长。利用比尔定律可以计算出泵浦光被吸收 $N\%$ 时所需要的增益介质的长度 L , 计算公式为

$$L = -\ln(1 - N\%) / \alpha. \quad (2)$$

根据 Nd 掺杂原子数分数为 1.0% 的 Nd:YAG 的吸收曲线以及式(2)可以计算出该 Nd:YAG 晶体在不同波长处对泵浦光吸收 $N\%$ 时对应的吸收长度 L , 计算结果如图 1 所示。

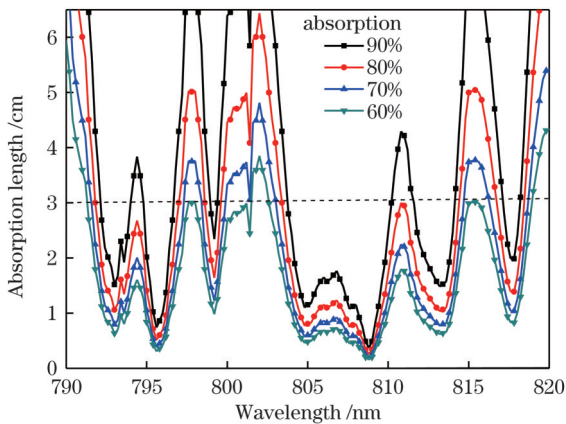


图 1 Nd:YAG 晶体在不同波长处对泵浦光吸收 $N\%$ 时对应的吸收长度 ($N\% = 60\%, 70\%, 80\%, 90\%$)

Fig. 1 Absorption length required to absorb $N\%$ of pump radiation by Nd:YAG at different wavelengths for $N\% = 60\%, 70\%, 80\%, 90\%$

由图 1 可以看出, 在 802 nm 左右晶体的吸收系数较小, 要达到 $N\%$ 吸收效率所需的吸收长度较其他波段长。要在 20 nm 范围内保持 70% 以上的吸收效率, 需要晶体长度达到近 5 cm。如果晶体长度约为 3 cm, 则不能保证 20 nm 范围内吸收效率达到 60% 以上。半导体泵浦源具有一定的谱线宽度, 会对吸收曲线的剧烈变化起到一定的平滑效果。

接下来分析泵浦光谱线宽度对晶体吸收特性的影响。泵浦光的光强分布可以近似表示为

$$I(\lambda) = I_{\lambda_0} \cdot \exp\left[-\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{w}\right)^2\right], \quad (3)$$

式中: I_{λ_0} 为谱线中心光强; λ_0 为 LD 的中心波长; w 与光谱的半峰全宽 (FWHM) 有关。每段 Nd:YAG 的吸收系数曲线为 $\alpha(\lambda, \beta_i)$, 其中 λ 代表波长, β_i 代表掺杂 Nd 的原子数分数。键合板条对某中心波长泵浦光的吸收效率为

$$\eta(\lambda_0) = \frac{\int I(\lambda) \cdot \sum_{i=1}^N \exp[-\alpha(\lambda, \beta_i) \cdot L_i] d\lambda}{\int I(\lambda) d\lambda} = \frac{\int I_{\lambda_0} \cdot \exp\left[-\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{w}\right)^2\right] \cdot \sum_{i=1}^N \exp[-\alpha(\lambda, \beta_i) \cdot L_i] d\lambda}{\int I_{\lambda_0} \cdot \exp\left[-\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{w}\right)^2\right] d\lambda}, \quad (4)$$

式中: L_i 为增益介质长度。

根据式(4)可以绘制出长度为 30 mm、掺杂 Nd 的原子数分数为 1.0% 的板条对谱线宽度不同的泵浦光的吸收效率随中心波长的变化曲线, 如图 2 所示。

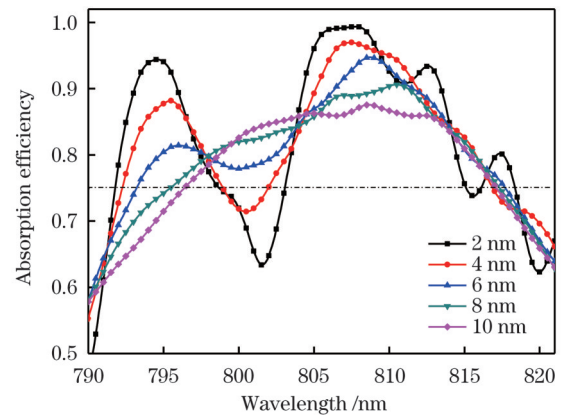


图 2 板条对谱线宽度不同的泵浦光的吸收效率随中心波长的变化曲线

Fig. 2 Absorption efficiency of slab to pump light with different linewidths versus central wavelength

图 2 对比了相同板条对不同谱线宽度 (2、4、6、8、10 nm) 泵浦光的吸收效率。随着泵浦光的谱线宽度增加, 最大吸收效率有所下降, 但是整体的吸收效率曲线逐渐变得平缓, 802 nm 附近的吸收低谷逐渐上升, 高吸收效率区间逐渐连接在一起。值得注意的是, 采用宽光谱泵浦源使激光器在连续宽温度区间高效输出的同时, 需要综合考虑由宽光谱泵浦导致的短波长与长波长的吸收效率下降问题。实验设计吸收效率在 75% 以上的区间为高吸收效率区间。当谱线

宽度为 2、4 nm 时, 802 nm 附近曲线凹陷区的吸收效率低于 75%, 这会导致实际应用时高效吸收的温度区间不连续; 当谱线宽度为 6、8、10 nm 时, 802 nm 附近的曲线凹陷区消失, 但 6 nm 谱线宽度对应的吸收曲线高于 75% 吸收效率的波长范围为 793.2~817.7 nm, 8 nm 谱线宽度对应的吸收曲线高于 75% 吸收效率的波长范围为 795.9~817.3 nm, 10 nm 谱线宽度对应的吸收曲线高于 75% 吸收效率的波长范围为 796.4~817.1 nm。根据以上分析, 既满足连续波长区间吸收效率高于实验设计值 75%, 又具有较宽波长区间的是谱线宽度(半峰全宽)为 6 nm 的泵浦光。因此, 选择谱线宽度(半峰全宽)为 6 nm 的 LD 作为泵浦源进行泵浦。

增益介质对泵浦光的吸收效率直接影响激光器的输出, 当其他条件不变时, 激光器的输出基本随增益介质对泵浦光吸收效率的变化而改变。由于半导体泵浦源的泵浦波长随温度基本呈线性漂移, 漂移量约为 0.28 nm/°C, 所以可将增益介质对泵浦光的吸收效率随温度的变化转换为增益介质对泵浦光的吸收效率随其中心波长的变化进行分析。在工程应用中, 可以根据激光器输出能量随温度的变化进行电流补偿, 以保证整个温度区间内能量输出的稳定性, 而宽光谱泵浦时的吸收曲线更为平滑, 且具有高吸收效率的工作区间连续, 更有利于通过调节电流进行能量补偿的电流补偿方案的设计。

2.2 偏振耦合输出分析

在正交 Porro 腔中, 通常将二分之一波片与偏振分光棱镜(PBS)组合成偏振耦合系统。退偏输出量由腔内偏振系统决定的偏振面与棱镜全反射时入射面的夹角决定, 这一夹角为方位角 γ 。垂直偏振光由 PBS 反射输出, 水平偏振光在腔内振荡。耦合输出量 T_s ^[4] 的计算式为

$$T_s = \sin^2(\delta/2) \cdot \sin^2(2\gamma), \quad (5)$$

其中,

$$\delta = \pi + 4\arctan\left(\cos\sigma \cdot \sqrt{\sin^2\sigma - 1/n^2} / \sin^2\sigma\right), \quad (6)$$

式中: δ 表示光线经 Porro 棱镜两次全反射后的平行光矢量分量与垂直光矢量分量的总相位差; σ 为光线在 Porro 棱镜直角面上的入射角, 通常为 45°; γ 为二分之

一波片光轴与水平方向夹角 θ 的 2 倍。

由以上分析可知, 光线以 45° 入射 Porro 棱镜直角面时, δ 仅与棱镜的材质有关, 可以通过旋转二分之一波片调节谐振腔的耦合输出量 T_s 。耦合输出量与 θ 的关系如图 3 所示。

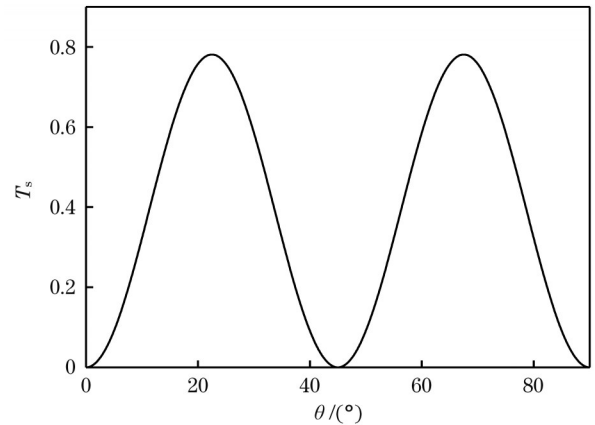


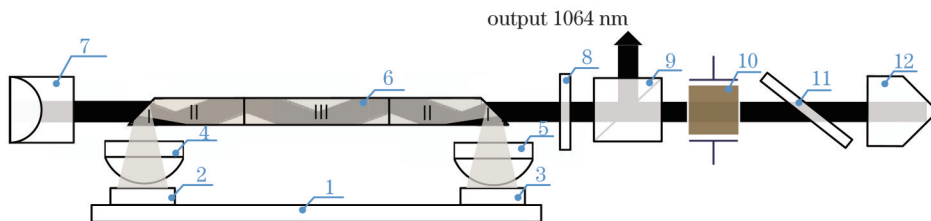
图 3 耦合输出量与 θ 的关系

Fig. 3 Relation between coupling output and angle θ

当二分之一波片光轴与水平方向夹角 θ 为 22.5°、67.5° 时, 谐振腔的耦合输出量 T_s 达到最大值 78.1%。

2.3 激光器整体设计

所设计的基于 CCEPS 结合正交 Porro 棱镜腔的宽温区工作激光器的整体结构如图 4 所示。泵浦光由两组宽谱 LD 阵列输出后分别经过短焦耦合系统耦合进板条两端, 再经过板条端面反射进入板条掺杂区。每组 LD 阵列由 6 块巴条组成, 巴条长度为 5 mm, 工作温度 60 °C 时对应的中心波长为 806 nm, 光谱的半峰全宽为 6 nm, 工作电流最高为 150 A。单组阵列的最大输出功率不低于 750 W, 快轴发散角经过准直后为 6°~8°, LD 阵列被安装在热沉上。通过控制激光器热沉温度来控制 LD 的温度, 以便研究不同温度下激光器的输出性能。正交 Porro 棱镜谐振腔由两个正交放置的 Porro 棱镜、二分之一波片和 PBS 构成, 可实现偏振耦合输出。退压调 Q 模块由 RTP 晶体、PBS 和偏振片组成。正交 Porro 棱镜腔可以提高激光器输出的稳定性, 传导冷却端面泵浦板条可以提高泵浦光的吸收长度, 再结合宽光谱泵浦光就可以实现激光器在宽温度区间工作。



1: heat sink; 2,3: LD; 4,5: couple lens; 6: Nd:YAG slab; 7: Porro prism 1; 8: half wave plate; 9: PBS; 10: Q switch; 11: polarizer; 12: Porro prism 2

图 4 激光器整体结构图

Fig. 4 Overall structure diagram of laser

2.4 板条及耦合系统设计

板条尺寸设计为 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 39.9\text{ mm}$, 由 5 段晶体键合而成, 切角为 45° , 如图 5 所示。板条两端区域 I 是未掺杂的 YAG 晶体, 区域 II 是掺杂 Nd 的原子数分数为 0.4% 的 Nd:YAG, 区域 III 是掺杂 Nd 的原子数分数为 1.0% 的 Nd:YAG。板条上表面 A 与下表面 B 均镀 SiO_2 , 以减小 1064 nm 表面全反射损耗; 表面 A 金属化, 以便实现板条与热沉的焊接; 表面 B 在两端 (区域 I 的下表面) 镀泵浦光高透膜。板条两端 C_1 面与 C_2 面镀 1064 nm 高透膜及泵浦光高反膜。

板条对泵浦光吸收的均匀性会直接影响板条的热分布。所设计激光器的工作温度区间较宽, 不同波长

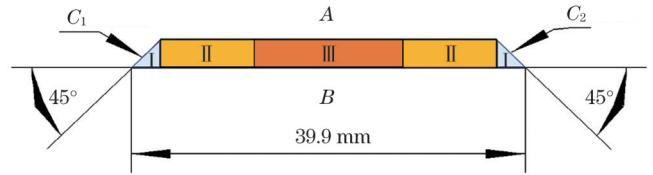


图 5 键合板条结构图

Fig. 5 Structure of bonding slab

对应的吸收系数不同, 在进行板条对泵浦光吸收的分析时, 选取的是吸收系数居中的 805 nm 单点波长对应的吸收系数。通过光线追迹分析, 对比了分段掺杂键合板条与单一掺杂键合板条的 805 nm 泵浦光吸收通量分布, 结果如图 6 所示。

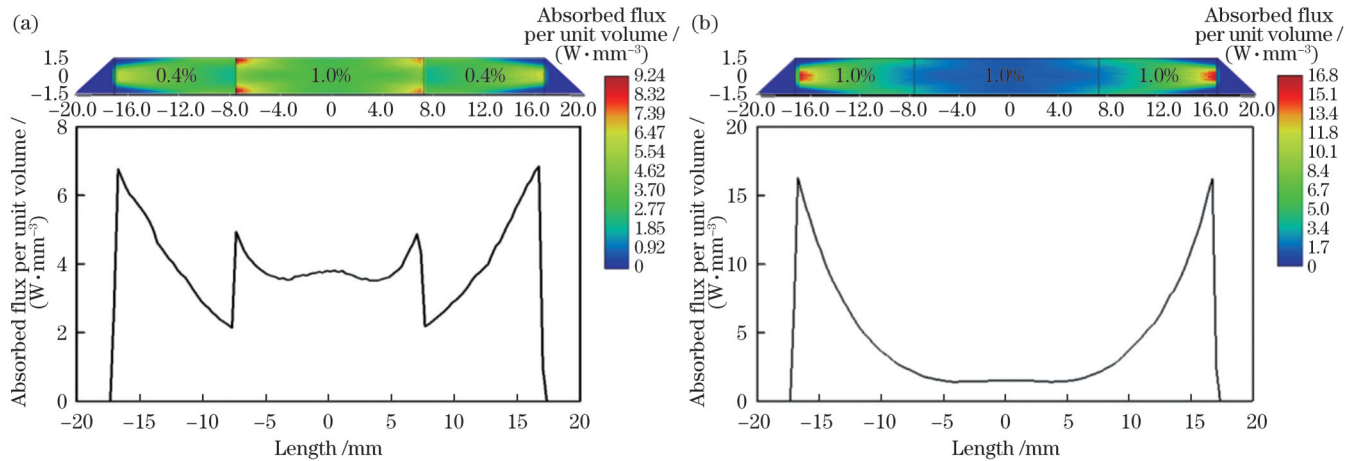


图 6 分段掺杂和单一掺杂键合板条的单位体积吸收通量分布。(a) 分段掺杂键合板条; (b) 单一掺杂板条

Fig. 6 Absorbed flux distribution per unit volume of segmented- and single-doping bonding slabs. (a) Segmented-doping bonding slab; (b) single-doping bonding slab

如图 6 所示, 分段掺杂键合板条与单一掺杂键合板条两端均由未掺杂的 YAG 键合而成。泵浦光由反射面反射进入掺杂区域后被吸收。图 6(a) 所示的掺杂区域分为三段, 两边掺杂 Nd 的原子数分数为 0.4%, 中间掺杂 Nd 的原子数分数为 1.0%。图 6(b) 所示掺杂区域掺杂 Nd 的原子数分数均为 1.0%。图 6(a) 表明泵浦光在分段掺杂键合晶体内传输可以实现单位体积吸收通量的分段调整, 避免了泵浦光集中在端面, 此时掺杂区端面处的单位体积吸收通量为 6.78 W/cm^3 。图 6(b) 表明泵浦光在单一掺杂键合板条内传输时, 单位体积吸收通量随传输距离增加呈指数下降, 掺杂区端面处的单位体积吸收通量为 16.3 W/cm^3 , 是分段键合晶体的 2 倍以上; 此时掺杂区端面有较强的热积累, 不利于稳定、高光束质量激光的输出。采用分段掺杂键合板条可以提高板条对泵浦光吸收的均匀性, 有效避免热积累, 有利于提高输出激光的稳定性和光束质量。

采用短焦耦合系统分别将泵浦光耦合进板条两端的区域 I, 泵浦光经 C_1 、 C_2 端面反射进入区域 II 后被增益介质吸收。泵浦光进入区域 II 端面时的光斑分布如图 7 所示, 可见光斑分布较为均匀。

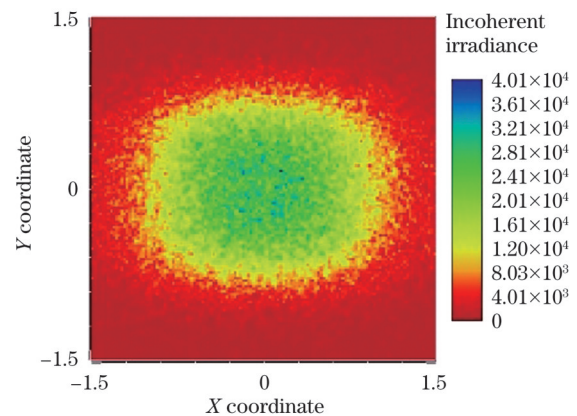


图 7 吸收区端面的光斑分布图

Fig. 7 Distribution of light spot at the end face of absorption zone

3 实验结果与分析

3.1 激光器输出特性测试及分析

采用 Ophir 公司的 PE50-DIF-C 型能量计测试不同温度下激光器的能量输出, 然后计算动静比, 计算结果如图 8 所示。测试了 60、40、20 $^\circ\text{C}$ 下, 电流从

50 A 增大到 140 A 过程中的能量输出及动静比。能量测试方法如下:固定温度及电流值,激光器连续工作 1 min,取输出能量的平均值及能量波动值,间隔 0.5 min,进行 10 个周期的测试。将 10 组平均能量及能量波动值取平均,得到该状态下的能量输出值及能量波动值。每个温度及电流下,能量波动均保持在 $-1.5\% \sim +1.5\%$ 以内。当温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、电流为 140 A 时,脉冲输出能量达到最大值,为 49.82 mJ。当温度固定时,随着泵浦电流增加,静态能量输出基本保持线性增加,当电流增大到一定程度时,动态能量输出的增速变缓,动静比基本随电流的增大而减小,最大

可达到 1.29,最小为 0.83。实验中动静比的测试过程如下:在固定温度($20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$)下,当电流为 120 A 时,将静态能量调节至最大,保持其他条件不变,测试各泵浦电流对应的静态、动态能量输出,并计算动静比。在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,当注入电流小于等于 80 A 时,出现动静比大于 1 的情况,其原因是不同注入电流下谐振腔的最佳参数发生了变化。在小电流注入模式下,介质的增益较小,谐振腔未在最佳参数下运行,静态模式的输出耦合率小于当时谐振腔的实际输出耦合率,导致静态能量输出降低,进而使得动静比大于 1。

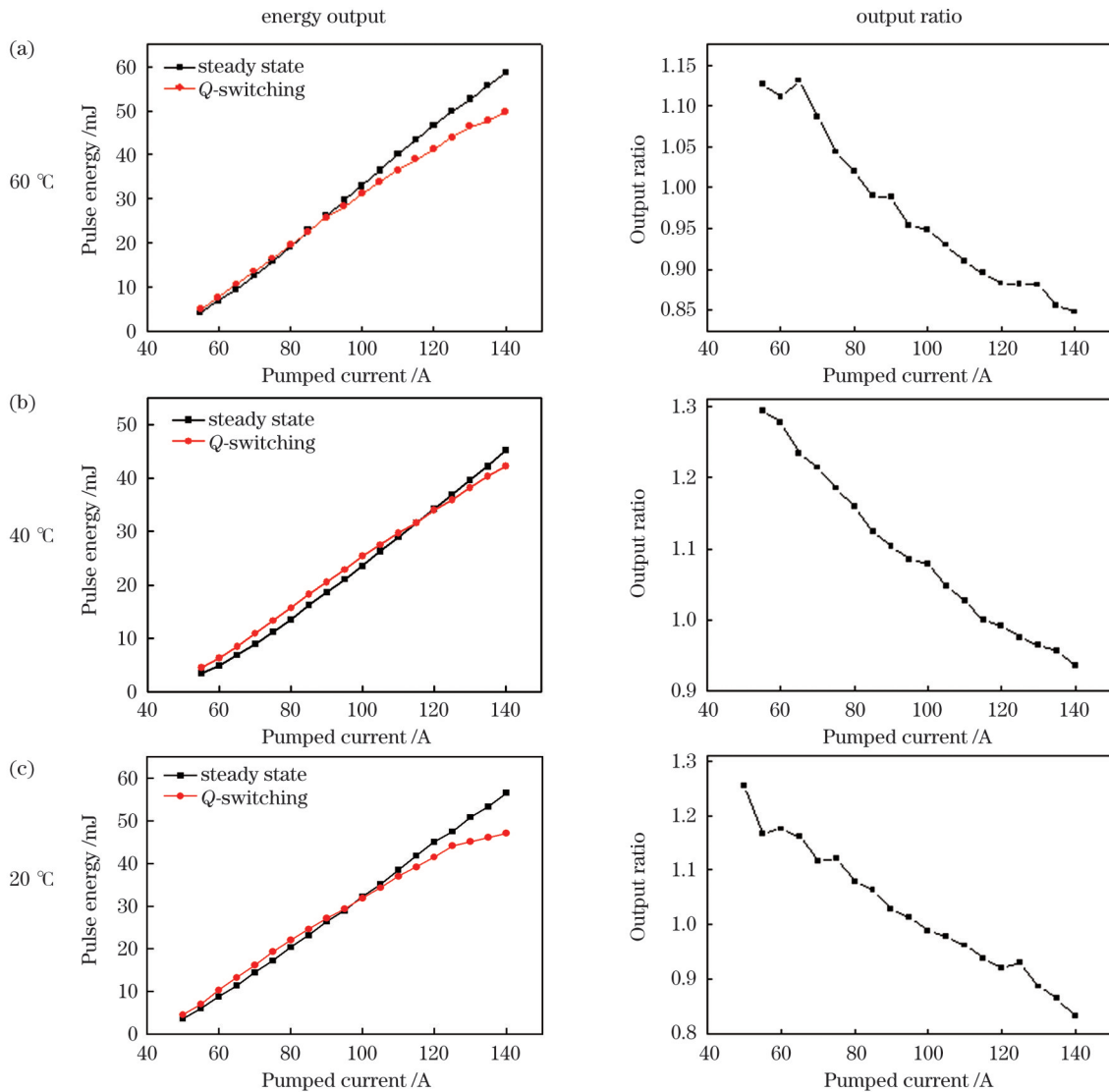


图 8 不同温度下激光器的能量输出及动静比

Fig. 8 Laser energy output and output ratio of Q-switching to free running at different temperatures

采用 DPO4104B 示波器及 DET10A2 光电探测器测得 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、140 A 泵浦电流下激光器输出脉冲宽度为 8.11 ns,采用 CCD 测试了该条件下的输出光斑,光斑有效直径为 2.12 mm,如图 9 所示。采用过孔法测试 1064 nm 输出光的发散角:用焦距为 2 m 的 1064 nm 聚焦镜将输出光聚焦,将直径为 4 mm 的小孔置于聚焦

镜后 2 m 处,测试过孔后能量与过孔前能量。测得过孔后能量与过孔前能量之比为 86.85% (大于 86.5%),进而计算得输出激光的发散角小于 2 mrad。

结合图 8(a) 所示的动态能量数据 ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、140 A 泵浦电流时,动态能量输出为 49.82 mJ),可以计算出此时的峰值功率为 6.14 MW,峰值功率密度为 $174\text{ MW}/\text{cm}^2$ 。

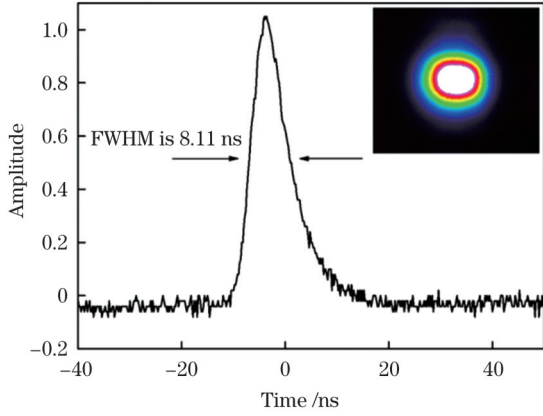


图 9 脉冲宽度与光斑

Fig. 9 Pulse duration and spot

3.2 激光器宽温区工作特性测试及分析

在泵浦电流为 90、120、140 A 下,分别测试了 15~70 °C 范围内输出能量随温度的变化,结果如图 10 所示。随着温度从 15 °C 变化到 70 °C,脉冲能量分别在 20、60 °C 时达到极大值,在 40 °C 时脉冲能量最低。当泵浦电流固定时,输出能量随温度变化,最小值与最大值之比大于 75.8%。在实际应用中,可以通过调节泵浦电流对随温度变化的输出脉冲能量进行补偿,以保证激光器在该温度区间内稳定工作。由于实验条件限制,笔者未测试激光器在更低温度时对应的输出能量值。

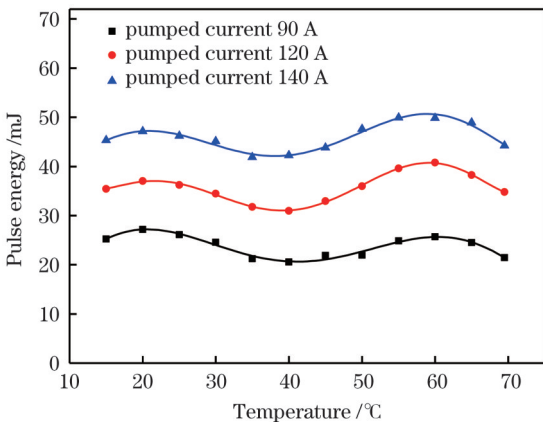


图 10 不同泵浦电流下脉冲能量随温度的变化

Fig. 10 Variation of pulse energy with temperature under different pump currents

采用 AVASPEC-3648-USB2 光谱仪测量了 60 °C 时泵浦光的光谱,结果如图 11 所示。图中实线为仪器实测值,虚线为高斯拟合曲线,拟合曲线的中心波长为 805.8 nm,半峰全宽为 6.8 nm。

随着温度变化,LD 的中心波长也在发生变化。在一定电流下,泵浦光的光谱形状基本保持不变,其半峰全宽也基本保持不变。利用绘制图 1 的方法可以绘制出实验用板条对谱线宽度为 6.8 nm 的泵浦光吸收效率随其中心波长的变化曲线。将 25 °C 和 60 °C 两个温度点的实测 LD 中心波长 796.7 nm 和 805.8 nm 与温度

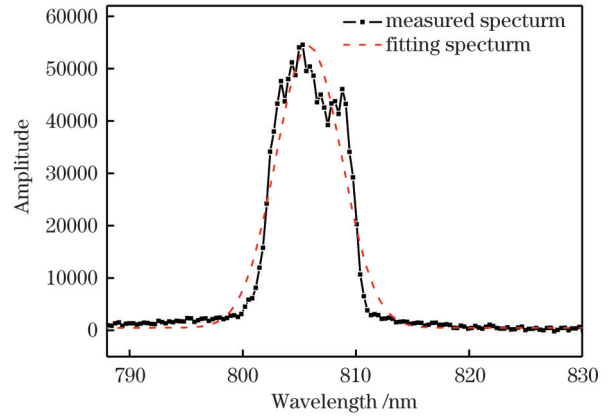


图 11 泵浦光的光谱图

Fig. 11 Spectra of pump light

对应,就可以获得泵浦波长随温度变化的关系。泵浦波长随温度的漂移会直接影响板条的吸收效率,而板条的吸收效率会直接影响激光器的能量输出,这样就可以将不同温度下板条对泵浦光的吸收效率与输出能量随温度的变化曲线联系起来,如图 12 所示。

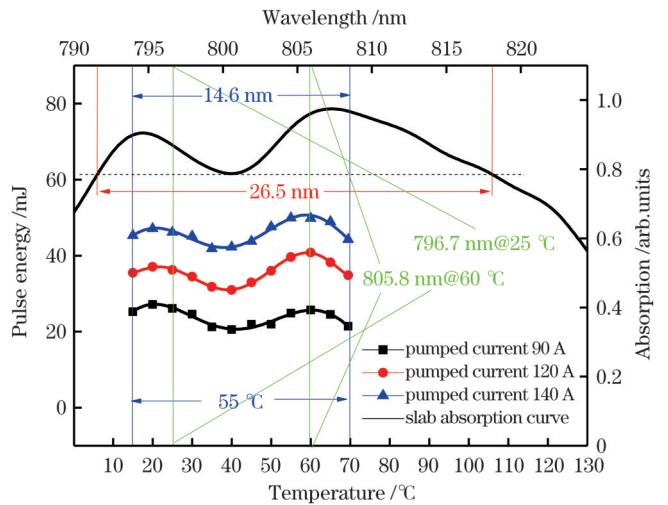


图 12 脉冲能量与吸收效率随温度的变化

Fig. 12 Variation of pulse energy and absorption efficiency with temperature

在图 12 中,上横轴表示泵浦光的中心波长,下横轴表示激光器热沉对应的温度,左纵轴表示脉冲能量值,右纵轴表示板条的吸收效率,黑色实线是实验用板条对宽光谱泵浦光的吸收效率曲线,三角形、圆形、正方形标志曲线为不同泵浦电流下激光器的脉冲能量随温度变化的曲线。可以看出,由于泵浦光的光谱较宽,板条可以在 791.6~818.1 nm 较宽的光谱范围(26.5 nm)内获得 78.7% 以上的吸收效率,在 794.6 nm 和 807.2 nm 波长处吸收效率达到极大值 90.5% 与 97.5%,在 800.6 nm 波长处吸收效率达到极小值 78.7%,吸收效率-泵浦波长曲线较为平滑,有利于实际工程应用中能量补偿方案设计。激光器在 15~70 °C 温度区间内的输出脉冲能量随温度变化的趋势与 793.9~808.5 nm (14.6 nm) 范围内板条对泵浦光的吸收效率基本一致;

在相同的电流时,能量下降不会超过 75.8%。当温度高于 60 °C 时,实验测得的脉冲能量曲线与板条吸收曲线偏离较多,这主要是因为高温时 LD 输出功率下降,所以输出脉冲能量下降。根据工程应用经验,LD 低温输出能量不会下降。结合实验及计算数据可以对该模型进行进一步优化,将泵浦源常温(25 °C)中心波长设置为 806 nm,充分利用板条对宽光谱泵浦源的高吸收效率区间(26.5 nm),可使激光器输出能量不低于输出最大值 75% 的温度区间比实验测试的 15~70 °C 的温度区间拓宽近一倍。

4 结 论

通过分析增益介质对宽光谱泵浦光吸收效率的影响、正交 Porro 棱镜谐振腔的偏振耦合输出特性,以及 CCEPS 的泵浦光吸收通量分布的仿真分析,设计了一种基于 CCEPS 结合正交 Porro 腔结构,采用 6.8 nm 宽光谱泵浦源,适合在宽温度区间工作的激光器。实验测试结果显示:激光器可在 15~70 °C 的宽温度区间内工作,获得了脉冲能量为 49.82 mJ、脉宽为 8.11 ns、光斑直径为 2.12 mm、发散角小于 2 mrad 的 20 Hz 脉冲激光输出,峰值功率可达到 6.14 MW,能量输出不稳定度在 -1.5%~+1.5% 以内。当该激光器的泵浦源波长在 791.6~818.1 nm(26.5 nm) 范围内变化时,所对应的板条吸收效率可达到 78.7% 以上,793.9~808.5 nm(14.6 nm) 波段内的吸收效率曲线与实验测得的激光器在 15~70 °C 温度区间输出能量的变化趋势基本一致。结合实验及仿真结果对该模型进行进一步优化,设置宽光谱泵浦源的中心波长为 806 nm(25 °C 时),充分利用板条对宽光谱泵浦源的高吸收效率区间(26.5 nm),使得激光器保持高能量输出的温度区间拓宽了将近一倍。本工作可以为宽温度区间工作激光器的设计提供新思路。

参 考 文 献

- [1] Chun M K, Teppo E A. Laser resonator: an electrooptically Q-switched Porro prism device[J]. *Applied Optics*, 1976, 15(8): 1942-1946.
- [2] Lee J F, Leung C Y. Beam pointing direction changes in a misaligned Porro prism resonator[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(13): 2701-2707.
- [3] Saxena R, Pathak P P. Study of effects of wave plate orientation in cross Porro prism diode pumped Nd: YAG laser resonator[J]. *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, 2014, 3(3): 47-51.
- [4] 刘旭, 卢常勇, 程勇, 等. 激光二极管抽运正交波棱镜腔光学参量振荡激光器[J]. *中国激光*, 2009, 36(9): 2257-2261.
Liu X, Lu C Y, Cheng Y, et al. Laser diode pumped optical parametric oscillator laser with orthogonal Porro-prism resonator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(9): 2257-2261.
- [5] Alperovich Z, Buchinsky O, Greenstein S, et al. Misalignment sensitivity in an intra-cavity coherently combined crossed-Porro resonator configuration[J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(8): 085802.
- [6] 李之通, 赵一鸣, 李祚涵, 等. Porro 棱镜相位延迟及其补偿波片的设计分析[J]. *中国激光*, 2021, 48(21): 2101004.
Li Z T, Zhao Y M, Li Z H, et al. Design and analysis of phase delay of Porro prism and compensation wave-plate[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(21): 2101004.
- [7] Goodno G D, Palese S, Harkenrider J, et al. High average-power Yb:YAG end-pumped zig-zag slab laser[C]//*Advanced Solid State Lasers 2001*, January 28, 2001, Seattle, Washington United States. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2001: MA2.
- [8] Palese S, Harkenrider J, Long W, et al. High brightness, end-pumped, conduction cooled Nd:YAG zig-zag slab laser architecture [C]//*Advanced Solid-State Lasers*, January 28, 2001, Seattle, Washington. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2001: TuC4.
- [9] Goodno G D, Komine H, McNaught S J, et al. Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(9): 1247-1249.
- [10] 李密, 胡浩, 李建民, 等. 激光二极管阵列端面抽运高功率板条激光器技术研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0514004.
Li M, Hu H, Li J M, et al. Technology research on high power slab laser end-pumped with laser diode arrays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0514004.
- [11] 王亚楠, 周唐建, 尚建力, 等. 7.13 kW、2 倍衍射极输出的 Yb 板条激光放大器[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(11): 1114007.
Wang Y N, Zhou T J, Shang J L, et al. Yb slab laser amplifier with a laser output of 7.13 kW, 2 times diffraction limit[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(11): 1114007.
- [12] Najafi M, Shayganmanesh M, Majidof M M, et al. Nd:YAG end-pumped zigzag multi-pass slab amplifier optimization: numerical and experimental study regarding the saturation effects[J]. *Optics Express*, 2022, 30(10): 16184-16195.
- [13] Tang B, Zhou T J, Wang D, et al. Optical distortions in end-pumped zigzag slab lasers[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(10): 2693-2702.
- [14] 李隆, 牛娟, 张春玲, 等. 连续 LD 端面泵浦 YAG/Yb:YAG 复合晶体温度场分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(13): 1314002.
Li L, Niu J, Zhang C L, et al. Temperature field of continuous LD end-pumped YAG/Yb:YAG composite crystal[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(13): 1314002.
- [15] Fu X, Liu Q, Yan X P, et al. End-pumped Nd:YAG zigzag slab laser with weak pump absorption[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(6): 492-494.
- [16] Li M, Hu H, Gao Q S, et al. A 7.08-kW YAG/Nd:YAG/YAG composite ceramic slab laser with dual concentration doping[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(4): 1504010.
- [17] McCarthy J C, Young Y E, Day R C, et al. Athermal, lightweight, diode-pumped, 1-micron transmitter[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5707: 237-242.
- [18] Schilling B W, Chinn S R, Hays A D, et al. End-pumped 1.5 μm monoblock laser for broad temperature operation[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(25): 6607-6615.
- [19] Xie W, Chen X, Ma X H, et al. LD pumped Q-switched Nd:YAG slab laser with stable output within temperature range of -30 °C~50 °C[C]//2018 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), July 29-August 3, 2018, Hong Kong, China. New York: IEEE Press, 2018.
- [20] Song Y H, Liu X S, Yang S, et al. Multiwavelength diode array end-pumped, thermally stabilized, Nd:YAG pulsed laser[J]. *Journal of Laser Applications*, 2020, 32(3): 032028.
- [21] 彭春, 陈仁, 刘亚萍, 等. 宽温范围 LD 端泵 Nd:YAG 激光器泵浦源光谱理论优化[J]. *光学学报*, 2022, 42(4): 0414001.
Peng C, Chen R, Liu Y P, et al. Theoretical optimization for spectrum of pump source of LD end pumped Nd:YAG laser in wide temperature range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(4): 0414001.

Wide Temperature Range Laser Based on Conduction-Cooled End-Pumped Slab and Crossed-Porro Prism Resonator

Qiao Zhanduo^{1**}, Meng Dongdong^{1*}, Zhang Tieliang¹, Gao Baoguang^{1,2}, Wang Tianqi¹

¹*Optical Engineering Research Department, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*

²*School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

Abstract

Objective Nanosecond pulse miniaturized lasers are widely used in laser detectors and target designators, among other applications. In most practical applications, lasers must remain insensitive to shock, vibration, and large temperature variations and have a small volume, light weight, and low power consumption. Cross-Porro prism resonators can effectively reduce the misalignment caused by vibration and exhibit high anti-detuning characteristics. Locally and internationally, many methods, such as multiwavelength matching and long-range absorption, are usually used to enable the laser to work in a wide temperature range; this wide range reduces the dependence of the semiconductor-pumped laser on its accurate temperature control. In this study, we used single-wavelength pump sources with a spectral width of 6.8 nm to end pump a segmented doped Nd:YAG slab and a combined crossed-Porro prism resonator to achieve a compact laser with good beam quality, anti-detuning characteristics, and a wide temperature range. The work presented in this study can provide a new reference for the design of lasers operating over a wide temperature range.

Methods First, the influence of different spectral widths (2, 4, 6, 8, and 10 nm) on the absorption efficiency of a gain medium with 30 mm length and atomic fraction 1.0% of doping Nd was numerically analyzed. The results show that pump light with a spectral width of 6 nm increases the absorption efficiency of the slab by more than 75% in a continuous and wide temperature range (Fig. 2). The polarization coupling output characteristics of the crossed-Porro prism resonator were then calculated theoretically (Fig. 3). Next, to prevent end-face heat accumulation caused by the end-pumped slab structure, the distribution characteristics of the absorption flux of 805 nm pump light in the segmented bonding slab were simulated (Fig. 6), and the results show that the segmented bonding slab can effectively homogenize the pump light distribution. According to the theoretical analysis, a laser with wide-temperature operation based on a conduction-cooled end-pumped slab (CCEPS) combined with a crossed-Porro prism resonator configuration was designed. The laser can operate over a wide temperature range using a broad-spectrum, single-wavelength pump source to end pump the segmented bonding slab (Fig. 4). The central wavelength of the pump source used in the experiment was 805.8 nm at 60 °C, and the spectral width was 6.8 nm (Fig. 11), which is favorable for laser operation in a wide temperature range. The crossed-Porro prism resonator used in the experiment comprises two orthogonal Porro prisms: a half-wave plate and polarization beam splitter (PBS) that can realize a polarization coupling output. The slab size was designed to be 3 mm × 3 mm × 39.9 mm, which is formed by bonding five segments of crystals with a cutting angle of 45° (Fig. 5), which is conducive to improving laser beam quality.

Results and Discussions The laser system achieves a maximum output pulse energy of 49.82 mJ (Fig. 8) with a pulse width of 8.11 ns at a repetition rate of 20 Hz (Fig. 9). The spot diameter and divergence angle of the output laser are approximately 2.12 mm and 2 mrad, respectively. The peak power reaches 6.14 MW with energy instability within -1.5% - +1.5%. The experimental results show that the laser could operate over a wide temperature range of 15–70 °C (Fig. 10). The relationship between the pump wavelength and temperature can be obtained from the spectrum of the pump source at different temperatures; hence, the absorption efficiency curve of the slab to the pump light at different temperatures and the curve of the output energy with temperature can be linked. When the wavelength of the pump source changes in the range of 791.6 to 818.1 nm (26.5 nm), the absorption efficiency of the slab can reach more than 78.7%, and the partial absorption efficiency curve of 793.9 to 808.5 nm (14.6 nm) is consistent with the measured change of the output energy in the temperature range of 15 to 70 °C (Fig. 12). When the design of the pump source is further optimized, the central wavelength of the pump source with a broad spectrum is set to 806 nm at 25 °C. The temperature-insensitive range of the laser is nearly double that of the experiment's temperature range.

Conclusions In this study, a wide-temperature-operating CCEPS laser combined with a crossed-Porro prism resonator is designed. The laser is compact, has good anti-detuning characteristics, and can operate over a wide temperature range using single-wavelength pump sources with a 6.8 nm spectrum width to end pump the segmented bonding slab. This design reduces the complexity of the pump source without complex wavelength matching of the pump light and does not require a crystal length that is too long. Related parameters are analyzed theoretically, including the influence of pump light with a broad spectrum on the absorption efficiency of the gain medium, polarization coupling output characteristics of the crossed-Porro prism resonator, and distribution characteristics of the pump light absorption flux in segmented bonding crystals. The results show that the laser can operate in a wide temperature range of 15–70 °C. When the design of the pump source is further optimized, the central wavelength of the pump source with a broad spectrum is set to 806 nm at 25 °C, and the temperature-insensitive range of the laser can nearly be double that of the test temperature range in this experiment. The work presented in this paper provides a valuable reference for the design of thermally insensitive lasers.

Key words lasers; crossed-Porro prism resonator; end-pumped slab; wide temperature range; high-reliability