

宽温范围 LD 端泵 Nd:YAG 激光器泵浦源 光谱理论优化

彭春*, 陈仁, 刘亚萍, 吴振宇, 罗杰平, 李勤财, 牟惠蓉

西南技术物理研究所, 四川 成都 610041

摘要 为实现二极管泵浦激光器在宽温度环境下免温控稳定工作,分析了激光器泵浦源发射光谱对激光系统稳定性的影响。综合考虑了泵浦过程中的能量利用率,提出了激光器免温控泵浦源光谱优化设计方案。所提方案可有效降低泵浦源波长漂移对激光器系统吸收率和热焦距的影响,实现激光器宽温度范围内免温控工作。在 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工作温区内,计算了不同吸收长度和掺杂浓度(原子数分数)的 Nd:YAG 激光器系统泵浦源的最优发射光谱。从理论角度而言,与一般无温控单波长激光二极管(LD)泵浦源相比,利用所提优化方案获得的泵浦源,可以将激光器系统的工作稳定性明显提高,将系统的泵浦光吸收率波动和晶体热焦距波动分别降低到 13% 和 16% 以内。对吸收长度为 30 mm,掺杂浓度为 0.8% 的 Nd:YAG 激光器系统,设计了一种双波长 LD 泵浦源(中心波长为 803.7 nm@10 $^{\circ}\text{C}$ 和 809.2 nm@10 $^{\circ}\text{C}$,对应比重为 68.4% 和 31.6%)。模拟结果表明,在 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,晶体对该泵浦光的吸收率可保持在 90.7% 以上,泵浦光吸收稳定性和晶体热焦距稳定性分别为 91.4% 和 85.4%。

关键词 激光器; 二极管泵浦; 光谱优化; 多波长泵浦

中图分类号 TN242

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0414001

Theoretical Optimization for Spectrum of Pump Source of LD End Pumped Nd:YAG Laser in Wide Temperature Range

Peng Chun*, Chen Ren, Liu Yaping, Wu Zhenyu, Luo Jieping, Li Qincai, Mu Huirong

Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China

Abstract To enable the stable operation of diode-pumped lasers without temperature control in a wide temperature range, the influence of the emission spectra of laser pump sources on the stability of laser systems is analyzed. Taking into account the energy utilization efficiency of the pumping process, an optimization scheme for the pump source spectra of lasers without temperature control is proposed. The scheme can effectively reduce the influence of the wavelength drift of pump sources on the absorption efficiency and thermal focal length of laser systems, thus making lasers work stably in a wide temperature range without temperature control. In the operating temperature range from $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, the optimal emission spectrum of a pump source is calculated for a Nd:YAG laser system with different absorption lengths and doping concentrations (atomic number fractions). In theory, compared with a conventional single-wavelength laser diode (LD) pump source without temperature control, the pump source designed by this scheme can significantly improve the working stability of laser systems and reduce the fluctuations of absorption efficiency and thermal focal length to less than 13% and 16% respectively. A LD pump source with two wavelengths (803.7 nm@10 $^{\circ}\text{C}$ and 809.2 nm@10 $^{\circ}\text{C}$ with proportions of 68.4% and 31.6% respectively) is designed for the Nd:YAG laser system with an absorption length of 30 mm and a doping concentration of 0.8%. The simulation results show that within the temperature range from $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, the absorption efficiency of pump light remains above 90.7%, and the absorption stability and thermal focal length stability are 91.4% and 85.4%, respectively.

Key words lasers; diode pumping; spectrum optimization; multi-wavelength pumping

收稿日期: 2021-07-14; 修回日期: 2021-08-11; 录用日期: 2021-08-27

通信作者: *pengchun1729@foxmail.com

1 引言

在二极管泵浦固体激光器(DPSSL)中,由于激光二极管(LD)泵浦源具有发射谱线较窄和中心波长可控的优点,故其可以与激光器增益介质的吸收谱线较好地匹配,进而泵浦光吸收效率高,能量转换效率高,系统产生废热低,这有助于激光器发射激光光束质量的控制。DPSSL 相对一般其他激光器具有体积小、质量轻、效率高和能耗低等优点,故其在激光测距、激光雷达等对小型化、轻量化有需求的应用领域中有广阔的应用前景。

LD 泵浦源的发射光谱会随其工作温度变化而发生漂移,当中心波长漂移超过一定范围时,LD 泵浦源的发射光谱与增益介质的吸收光谱间会匹配失调,这将导致增益介质对泵浦光的吸收效率下降,直接影响激光器能量输出。同时,在泵浦光注入功率保持一定的情况下,LD 泵浦源波长漂移会影响激光增益介质内的空间热源分布,增益介质相应的热焦距也会发生变化,最终激光光束质量会受到影响。激光器设计的重要原则之一便是通过匹配谐振腔腔镜的方式控制或抵消增益介质的热焦距,以获得高光束质量稳定激光输出。在激光器谐振腔设计中,谐振腔腔镜匹配更多针对的是小范围内变化的热焦距。当热焦距变化超过腔镜匹配范围时,谐振腔失调,进而激光器的输出效率会降低,输出激光光束质量会下降。

LD 泵浦源发射光谱随工作温度漂移范围过大引起的激光器工作效率降低、谐振腔系统匹配失效和激光输出不稳定等问题已成为激光器设计中的重大难题。目前,保持 LD 泵浦源发射光谱稳定的常用方式:1)添加额外的温控系统来保持 LD 泵浦源工作温度稳定。多用半导体制冷器(TEC)传导冷却的方案将 LD 的工作温度稳定在可接受范围内^[1-2],这种方案将温控系统加入激光器整机系统中,此时激光器的体积和功耗明显增加,激光器原本的小型化、低能耗的优势会被削弱;2)通过外加辅助光学设备的方式将 LD 泵浦源的发射波长锁定在一定范围内^[3-4]。然而,由于外加的锁波长光学器件本身也存在温度漂移的问题,其锁定波长的性能仅在相对较窄的温度范围内能得到保障,因此在宽温度范围内其不能很好地满足目前的工程需求。可以发现,两种方案在实际工程中都存在适用性受限问题。

从工程角度而言,对宽温度范围内 LD 泵浦源发射光谱的稳定,本质上是稳定激光增益介质对泵

浦光的吸收效率和激光增益介质本身的热焦距。当泵浦光吸收效率和增益介质热焦距在宽温度范围内保持稳定时,激光器的相应输出也会保持稳定。本文针对端泵 DPSSL,在无温控情况下,从激光增益介质对泵浦光的吸收出发,从理论角度对宽温度范围内泵浦光吸收效率的稳定性和增益介质热焦距的稳定性做了量化定义,通过两者的组合可得到系统的稳定性。同时,考虑了泵浦过程系统能量的利用效率,并提出了一种宽温度范围内免温控泵浦源光谱理论设计方案。在无温控情况下,所提方案通过调整 LD 泵浦源的发射光谱,理论上可以使激光器系统在宽温度范围内稳定工作,增益介质上产生的热焦距变化微小。

2 激光二极管泵浦源光谱优化理论

2.1 激光器宽温度范围内工作系统的稳定性

对于一般无温控的 LD 泵浦激光器,当 LD 泵浦源工作温度 T 发生变化时,其发射光谱将发生漂移。当泵浦源发射光谱发生漂移时,激光器增益介质对泵浦光的吸收效率和增益介质自身的热焦距均会发生不同程度的变化。当激光器在宽温度范围 $[T_{\min}, T_{\max}]$ 内工作时,泵浦光吸收效率和增益介质热焦距在工作温区内会有一定波动,这将直接导致激光器输出激光能量和光束质量的波动。激光器的稳定工作需要同时考虑泵浦光吸收效率和晶体热焦距在工作温区的稳定性。

在本研究中,利用被考察物理量在工作温区内的最小值与最大值之比来衡量该物理量在工作温区内的稳定性。当稳定性越高(越接近于 1)时,工作温区内物理量的最小值与最大值越接近,物理量在工作温区内波动的相对范围就越小。同时,由于稳定性是无量纲的,故不同物理量的稳定性可以通过运算被综合考虑。

增益介质对泵浦光吸收效率的稳定性为

$$S_{\eta} = \frac{\eta_{\min}}{\eta_{\max}}, \quad (1)$$

式中: η_{\min} 和 η_{\max} 分别对应工作温区内增益介质对泵浦光吸收效率的最小值和最大值。

同样,增益介质热焦距的稳定性为

$$S_f = \frac{f_{\min}}{f_{\max}}, \quad (2)$$

式中: f_{\min} 和 f_{\max} 分别对应工作温区内增益介质热焦距的最小值和最大值。

同时考虑吸收稳定性和热焦距稳定性,将系统

总稳定性定义为

$$S = tS_\gamma + (1-t)S_f, \quad (3)$$

式中: t 的取值范围为 $0 \leq t \leq 1$ 。 $t=0$ 表示只考虑热焦距稳定性; $t=1$ 表示只考虑吸收稳定性; $0 < t < 1$ 表示同时考虑吸收稳定性和热焦距稳定性。可以看出, 系统稳定性 S 同样为无量纲参数, 且取值范围为 $0 \leq S \leq 1$ 。系统总稳定性 S 越接近于 1, 表示波动越小, 系统越稳定, 此时激光输出也越稳定。

若需要考虑更多其他类型物理量的稳定性, 则将所考虑的物理量的稳定性以一定比重加入(3)式定义的无量纲系统稳定性中即可。

2.2 激光器泵浦过程能量利用效率

由 2.1 节的分析可知, 在无温控情况下, 当由(3)式定义的系统稳定性 S 足够高时, 激光器在宽温度范围 $[T_{\min}, T_{\max}]$ 内可以稳定工作。在激光器中, 除了 2.1 节讨论的稳定性, 系统能量利用效率也是衡量激光器的重要标准。泵浦过程的能量利用效率可以由泵浦光吸收效率近似得到, 其定义为

$$U = \frac{\eta_{\min}}{100\%}, \quad (4)$$

可以看出, U 为无量纲参数, 其表示在温度范围 $[T_{\min}, T_{\max}]$ 内泵浦光最小吸收率和总注入能量(100%)的比值。 U 的取值范围为 $0 \leq U \leq 1$, 其值越接近于 1, 表示系统能量用率越高。

2.3 激光器免温控泵浦源设计的优化目标函数

在激光器免温控泵浦源光谱设计中, 需要同时考虑系统稳定性和能量利用率。利用(3)、(4)式定义系统免温控泵浦源设计的优化目标函数为

$$O = rS + (1-r)U, \quad (5)$$

式中: r 的取值范围为 $0 \leq r \leq 1$ 。 $r=0$ 表示在优化目标函数中只考虑能量利用效率; $r=1$ 表示在优化目标函数中只考虑系统稳定性; $0 < r < 1$ 表示在优化目标函数中同时考虑能量利用效率和系统稳定性。可以看到, O 的取值范围为 $0 \leq O \leq 1$ 。优化目标函数 O 越接近于 1, 表示波动越小, 系统越稳定, 此时能量利用率也越高。

2.4 泵浦源最优光谱分布与多波长激光二极管的组合近似

从理论角度而言, 在宽温度范围 $[T_{\min}, T_{\max}]$ 内, 对于每一种具体的激光器系统来说, 始终存在一个最优的免温控泵浦源光谱分布与该系统对应。通过 2.3 节的理论分析可知, 调节泵浦源的光谱分布可使得由(5)式定义的免温控泵浦源优化目标函数 O 达到最大, 此时可以获得同时考虑了激光器系统

稳定性和能量利用效率的免温控泵浦源的最优光谱分布。

免温控泵浦源最优光谱分布是理论上的最优分布, 分布相对复杂, 在实际工程中并不能直接获得, 需要利用中心波长在不同位置的单波长 LD 进行组合逼近。多波长 LD 组合光谱分布(概率密度函数)可以表示为

$$f(\lambda, T) = \sum_{i=1}^N a_i f(\lambda_i, T), \quad (6)$$

式中: $f(\lambda_i, T)$ 为中心波长为 λ_i 的 LD 光谱分布, 通常可以用高斯分布近似表示; a_i 为第 i 个波长的 LD 在组合中的比重(非负), 且 $\sum_{i=1}^N a_i = 1$; N 表示组合中 LD 中心波长的个数, 通常由实际工程设计确定。

为了衡量多波长 LD 组合近似的好坏, 假设系统对应的最优光谱分布为 $f_{\text{opt}}(\lambda, T)$, 多波长组合光谱分布为 $f(\lambda, T)$ 。定义两个分布之间的距离^[5]为

$$d = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [\sqrt{f(\lambda, T)} - \sqrt{f_{\text{opt}}(\lambda, T)}]^2 d\lambda}, \quad (7)$$

其中, 根号下的积分运算是对其光谱分布范围中的所有波长进行的; 在波长为离散分布的情况下, 积分运算需要转化为求和运算。对任意两个分布函数, 恒有 $0 \leq d \leq 1$ 。当 $d=0$ 时, 表示两种分布完全一致; d 越小, 两个分布越相近, 重合面积越大; 当 $d=1$ 时, 表示两种分布完全不重合, 距离最远。

2.5 免温控泵浦源光谱的优化设计方案

基于 2.1~2.4 节中的基本理论分析, 本研究中激光器免温控泵浦源光谱理论优化设计方案的主要步骤如下。

1) 激光器系统免温控泵浦源最优光谱分布求解

在确定了激光器系统增益介质、泵浦模型等系统物理参数后, 利用蒙特卡罗(MC)算法^[6], 随机生成泵浦源的初始光谱分布。然后, 计算分布对应的由(5)式定义的优化目标函数 O 的取值。最后, 利用 MC 算法调节光谱分布, 当 O 值取最大值时, 对应的分布就是免温控泵浦源的最优光谱分布。

2) 最优光谱分布的多波长 LD 组合近似

选定 LD 中心波长的个数, 调整(6)式定义的多波长 LD 组合光谱参数, 使得由(7)式定义的光谱距离函数 d 达到最小值, 即与步骤 1) 中求得的泵浦源最优光谱分布最接近, 进而获得多波长 LD 组合的

中心波长位置和对应比重。

在上述计算过程中,需要计算工作温区内泵浦光吸收效率 η 和晶体热焦距 f , 两者的具体形式可以根据实际物理模型和计算条件选取, 并进行相应的取舍和近似。所提优化方案可适用于不同类型激光器泵浦源的光谱优化设计中。

3 端泵 Nd:YAG 激光器泵浦源的理论设计、分析与讨论

3.1 基本参数优化

根据 2.5 节中的理论优化设计方案, 以最大化优化目标函数为目标, 对增益介质为 Nd:YAG 的端泵 DPSSL 免温控泵浦源光谱进行了优化分析设计。

在计算中, 设定泵浦模式为端泵模式, 采用常用的指数吸收模型推导泵浦光吸收效率 η 和晶体热焦距 f ^[7-9]。晶体吸收长度设为 20, 30, 40 mm, 晶体掺杂浓度 (原子数分数, 下同) 设为 0.5%, 0.8%, 1.0%, 共计 9 种组合形式。掺杂浓度为 1.0% 的 Nd:YAG 晶体的吸收系数 $\alpha(\lambda, T)$ ^[10] 如图 1 所示。可以发现, Nd:YAG 晶体的物理性质相对稳定。在实际计算中取 $\alpha(\lambda, T)$ 的近似, 让 $\alpha(\lambda, T)$ 仅与波长 λ 相关, 不随温度 T 变化。同时, 假设不同掺杂浓度的 Nd:YAG 晶体的吸收系数与掺杂浓度成正比。

泵浦带优化区域为 790~830 nm 与 Nd:YAG 吸收系数左右两端极限波长值对应。泵浦源光谱整体的温度漂移系数为 0.24 nm/°C, 与一般常用 LD 温度漂移系数一致, 便于之后用单色 LD 进行组合逼近。激光器泵浦源工作温度范围为 -40~60 °C, 工作温区跨度为 100 °C。为了简化计算, 在优化过程中未考虑温度对泵浦源发光效率的影响。(3) 式和(5)式中的 t 和 r 为组合比重系数, 需要由实际工程经验决定。在实际计算中取 $t=0.5$ 、 $r=0.4$, 即

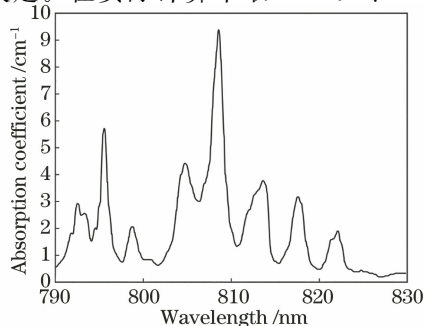


图 1 掺杂浓度为 1.0% 的 Nd:YAG 晶体的吸收系数

Fig. 1 Absorption coefficient of Nd:YAG crystal with doping concentration of 1.0%

吸收稳定性和热焦距稳定性对系统稳定性贡献相同, 但系统能量利用效率 U 相对系统稳定性 S 更加重要一些。

3.2 系统泵浦源的最优光谱分布

利用 MC 算法, 获得了 Nd:YAG 晶体各吸收长度、掺杂浓度组合对应的泵浦源理论最优光谱分布 (概率密度函数)。当温度为 10 °C (工作温区中点) 时, 最优分布光谱如图 2 所示。可以发现, 不同的吸收长度和掺杂浓度对应的最优光谱分布不同; 随着吸收长度和掺杂浓度的增加, 最优光谱分布范围逐渐缩窄。由于最优光谱结构在分布范围内是非均匀的, 且具有明显峰值, 故工程上用多波长 LD 组合得到相似光谱结构具有一定可行性。

在 -40~60 °C 的工作温度范围内, 具有最优光谱分布的泵浦源系统 (最优泵浦源系统) 对应的优化目标函数取值如表 1 所示。表 1 中还包含了中心波长为 808 nm、光谱半高宽为 4 nm 的单色 LD 泵浦源系统 (单色 LD 泵浦源系统) 在相同晶体参数情况下的优化目标函数取值, 用于对比。可以发现, 在相同情况下, 最优泵浦源系统的优化目标函数取值均高于单色 LD 泵浦源系统的对应值, 即最优泵浦源系统对应的系统稳定性和能量利用率对单色 LD 泵浦源系统有一定优势; 随着晶体吸收长度和掺杂浓度的增加, 最优泵浦源系统和单色 LD 泵浦源系统的优化目标函数取值均有所上升, 两者优化目标函数取值在逐渐接近, 同时向最大值 1 靠近。

3.3 最优泵浦源系统的吸收效率

工作温度在 -40~60 °C 范围内变化时, 各参数 Nd:YAG 晶体对其相应的最优泵浦源系统泵浦光吸收效率的具体变化如图 3 中实线所示。图 3 中虚线反映了单色 LD 泵浦源系统在同样条件下的吸收效率变化。由于优化目标函数中包含能量利用率部分, 因此可以看到最优泵浦源系统吸收效率的最大值不是 100%。此外, 吸收长度和掺杂浓度的增加可以提高工作温度范围内晶体对泵浦光的总体吸收效率。

对不同参数的 Nd:YAG 晶体, 晶体对最优泵浦源系统泵浦光的吸收稳定性可保持在 87.1% 以上, 如表 2 所示, 相应的泵浦光吸收波动性小于 13%。随着吸收长度和掺杂浓度的增加, 对单色 LD 泵浦源系统而言, 其泵浦光的吸收稳定性由 65.1% 上升至 94.9%, 但均低于相同情况下最优泵浦源系统泵浦光的吸收稳定性。最优泵浦源系统的吸收稳定性最大可达 97.6%。

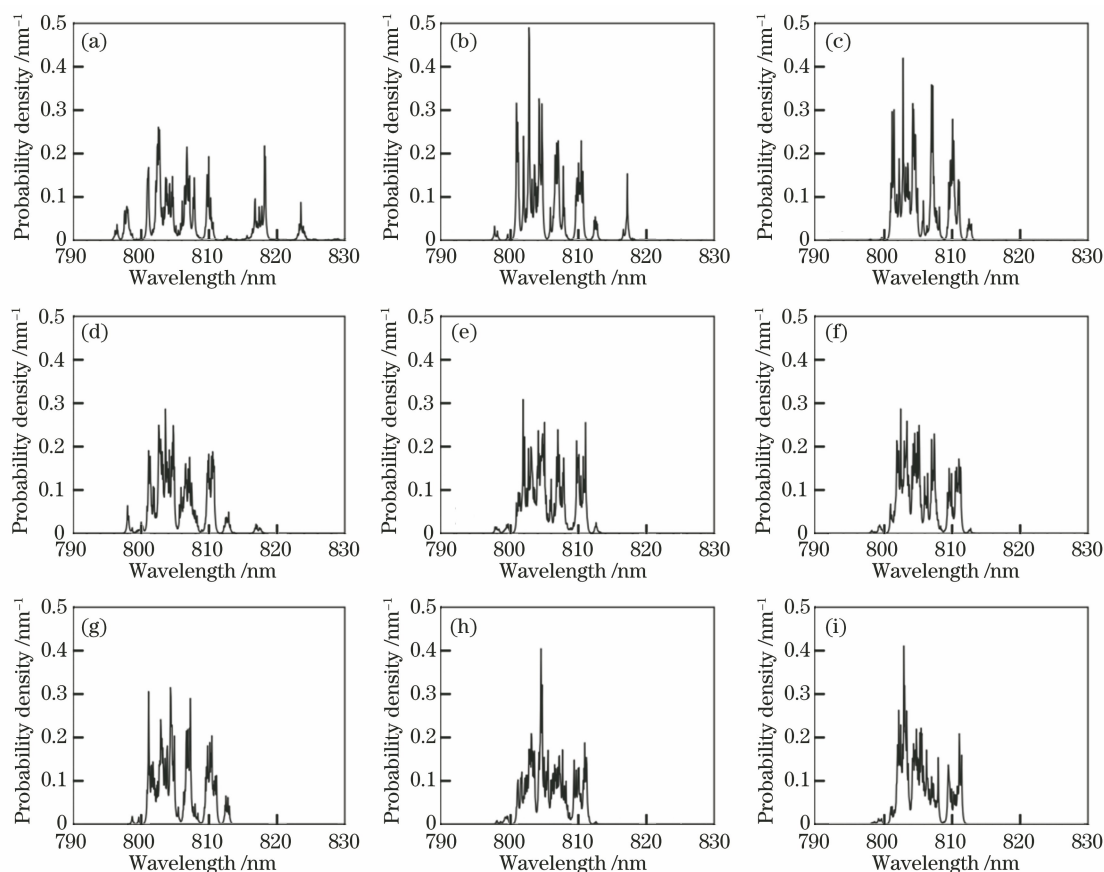


图 2 不同吸收长度和掺杂浓度情况下的最优泵浦源光谱分布。(a)吸收长度为 20 mm,掺杂浓度为 0.5%;(b)吸收长度为 30 mm,掺杂浓度为 0.5%;(c)吸收长度为 40 mm,掺杂浓度为 0.5%;(d)吸收长度为 20 mm,掺杂浓度为 0.8%;(e)吸收长度为 30 mm,掺杂浓度为 0.8%;(f)吸收长度为 40 mm,掺杂浓度为 0.8%;(g)吸收长度为 20 mm,掺杂浓度为 1.0%;(h)吸收长度为 30 mm,掺杂浓度为 1.0%;(i)吸收长度为 40 mm,掺杂浓度为 1.0%

Fig. 2 Optimal spectral distribution of pump source with different absorption lengths and doping concentrations. (a) Absorption length of 20 mm and doping concentration of 0.5%; (b) absorption length of 30 mm and doping concentration of 0.5%; (c) absorption length of 40 mm and doping concentration of 0.5%; (d) absorption length of 20 mm and doping concentration of 0.8%; (e) absorption length of 30 mm and doping concentration of 0.8%; (f) absorption length of 40 mm and doping concentration of 0.8%; (g) absorption length of 20 mm and doping concentration of 1.0%; (h) absorption length of 30 mm and doping concentration of 1.0%; (i) absorption length of 40 mm and doping concentration of 1.0%

表 1 目标函数取值

Table 1 Value of objective function

Doping concentration / %	Absorption length of 20 mm		Absorption length of 30 mm		Absorption length of 40 mm	
	Optical pump source system	808 nm LD pump source system	Optical pump source system	808 nm LD pump source system	Optical pump source system	808 nm LD pump source system
0.5	0.731	0.628	0.837	0.748	0.896	0.820
0.8	0.855	0.765	0.919	0.858	0.948	0.907
1.0	0.894	0.819	0.942	0.897	0.965	0.936

3.4 最优泵浦源系统的相对热焦距

晶体热焦距的绝对值与注入功率和能量利用率相关,且热焦距绝对值仅影响光学腔镜的设计,故为

了对比稳定性,不考虑热焦距绝对值。当温度为 T 时,定义晶体的相对热焦距为

$$f_R(T) = \frac{f(T)}{f_{\max}} \times 100\%, \quad (8)$$

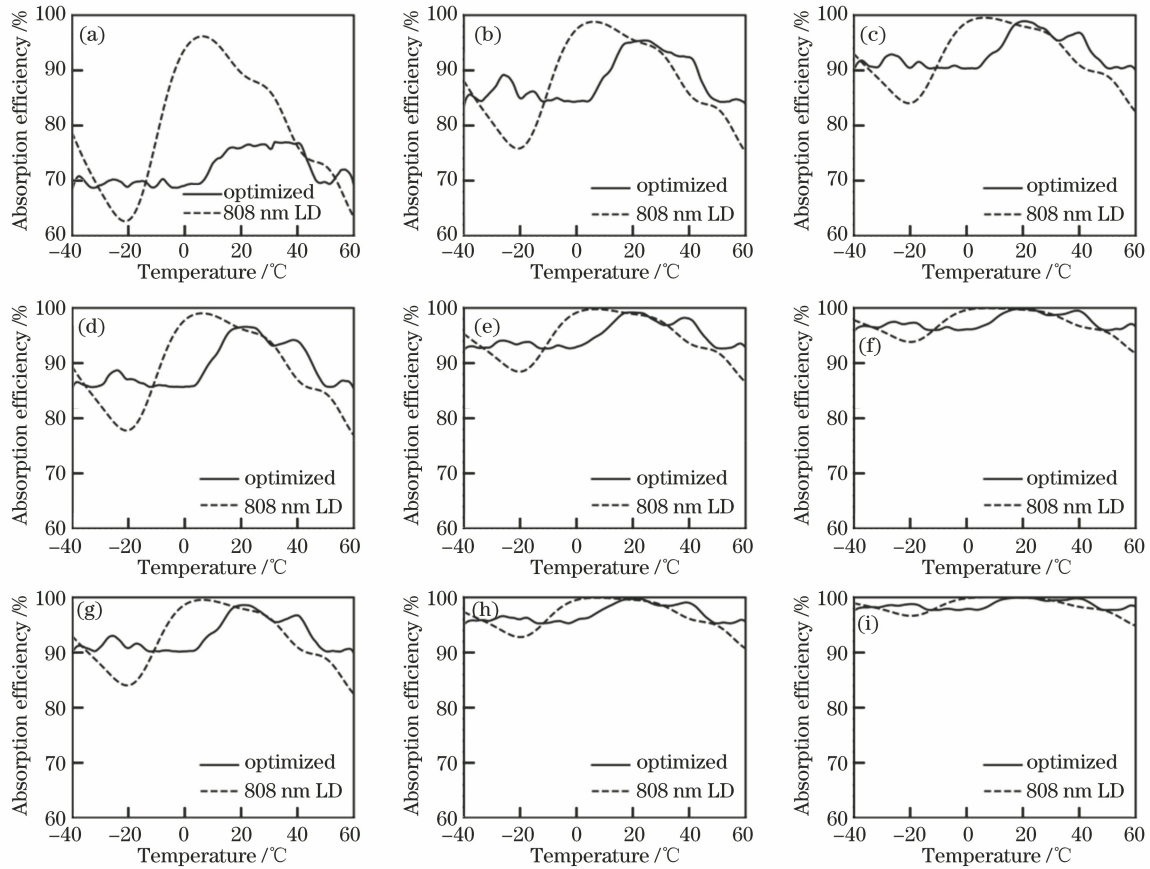


图 3 不同吸收长度和掺杂浓度情况下的泵浦源系统吸收效率。(a)吸收长度为 20 mm,掺杂浓度为 0.5%;(b)吸收长度为 30 mm,掺杂浓度为 0.5%;(c)吸收长度为 40 mm,掺杂浓度为 0.5%;(d)吸收长度为 20 mm,掺杂浓度为 0.8%;(e)吸收长度为 30 mm,掺杂浓度为 0.8%;(f)吸收长度为 40 mm,掺杂浓度为 0.8%;(g)吸收长度为 20 mm,掺杂浓度为 1.0%;(h)吸收长度为 30 mm,掺杂浓度为 1.0%;(i)吸收长度为 40 mm,掺杂浓度为 1.0%

Fig. 3 Absorption efficiency of pump source system with different absorption lengths and doping concentrations. (a) Absorption length of 20 mm and doping concentration of 0.5%; (b) absorption length of 30 mm and doping concentration of 0.5%; (c) absorption length of 40 mm and doping concentration of 0.5%; (d) absorption length of 20 mm and doping concentration of 0.8%; (e) absorption length of 30 mm and doping concentration of 0.8%; (f) absorption length of 40 mm and doping concentration of 0.8%; (g) absorption length of 20 mm and doping concentration of 1.0%; (h) absorption length of 30 mm and doping concentration of 1.0%; (i) absorption length of 40 mm and doping concentration of 1.0%

表 2 吸收稳定性

Table 2 Absorption stability

unit: %

Doping concentration / %	Absorption length of 20 mm		Absorption length of 30 mm		Absorption length of 40 mm	
	Optical pump source system	808 nm LD pump source system	Optical pump source system	808 nm LD pump source system	Optical pump source system	808 nm LD pump source system
0.5	88.5	65.1	87.1	76.1	90.8	82.9
0.8	88.2	77.7	93.0	86.8	95.8	91.8
1.0	90.9	82.9	95.3	90.8	97.6	94.9

式中: $f(T)$ 为当温度为 T 时,晶体对应的绝对热焦距,根据文献[7-9]近似计算获得。

在 $-40 \sim 60$ °C 温度范围内,最优泵浦源系统对应的相对热焦距变化如图 4 中的实线所示。图 4 中

虚线为单色 LD 泵浦源系统在同样条件下的相对热焦距变化。可以看到,吸收长度和掺杂浓度的增加,对工作温度范围内最优泵浦源系统的相对热焦距稳定性提升微弱。

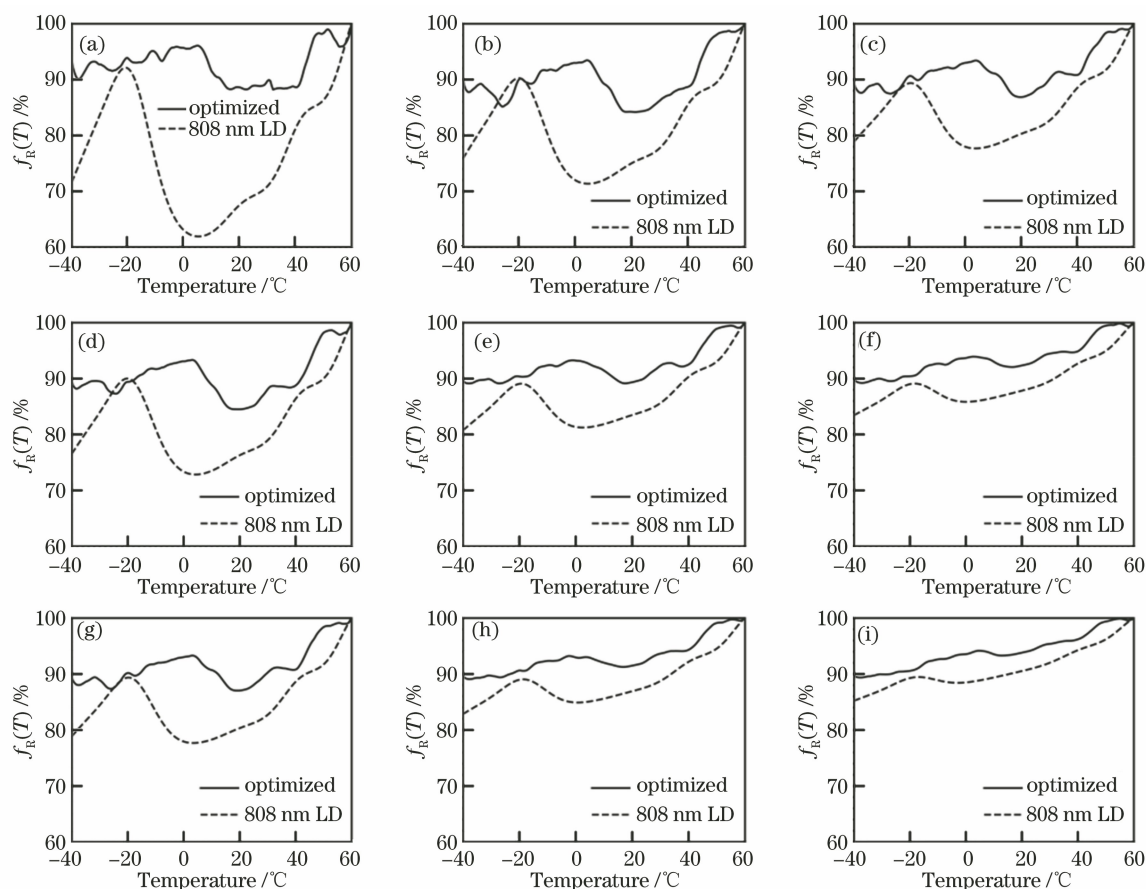


图 4 不同吸收长度和掺杂浓度情况下激光晶体的相对热焦距。(a)吸收长度为 20 mm,掺杂浓度为 0.5%;(b)吸收长度为 30 mm,掺杂浓度为 0.5%;(c)吸收长度为 40 mm,掺杂浓度为 0.5%;(d)吸收长度为 20 mm,掺杂浓度为 0.8%;(e)吸收长度为 30 mm,掺杂浓度为 0.8%;(f)吸收长度为 40 mm,掺杂浓度为 0.8%;(g)吸收长度为 20 mm,掺杂浓度为 1.0%;(h)吸收长度为 30 mm,掺杂浓度为 1.0%;(i)吸收长度为 40 mm,掺杂浓度为 1.0%

Fig. 4 Relative thermal focal length of laser crystal with different absorption lengths and doping concentrations. (a) Absorption length of 20 mm and doping concentration of 0.5%; (b) absorption length of 30 mm and doping concentration of 0.5%; (c) absorption length of 40 mm and doping concentration of 0.5%; (d) absorption length of 20 mm and doping concentration of 0.8%; (e) absorption length of 30 mm and doping concentration of 0.8%; (f) absorption length of 40 mm and doping concentration of 0.8%; (g) absorption length of 20 mm and doping concentration of 1.0%; (h) absorption length of 30 mm and doping concentration of 1.0%; (i) absorption length of 40 mm and doping concentration of 1.0%

由稳定性定义可知,晶体的相对热焦距稳定性和热焦距稳定性一致。对不同参数的 Nd:YAG 晶体,最优泵浦源系统的热焦距稳定性可保持在 84.2%以上,最高为 89.3%,如表 3 所示,即在全温度范围内,最优泵浦源系统可将系统热焦距波动控制在 16%以内。随着晶体吸收长度和掺杂浓度的增加,单色 LD 泵浦源系统的晶体热焦距稳定性从 61.9%提高到 85.2%,但均低于相同情况下最优泵浦源系统的晶体热焦距稳定性。

3.5 最优泵浦源光谱分布设计与讨论

图 2(a)光谱对应的各类稳定性均高于图 2(b)

和图 2(d)光谱的对应值,如表 2 和表 3 所示,这是因为优化目标函数考虑了系统能量利用效率。在较短的有效吸收长度和较低的掺杂浓度情况下,如图 2(a)所示,最优泵浦源光谱对应的能量利用率仅为 70%左右。在较低的能量利用率情况下,优化目标函数的最大化相当于各类稳定性的最大化。由于所提方案中优化目标函数是对多个相互制约物理量的同时优化,故从整体系统考虑,并不是所有物理量都可以取到最优值的,具体取舍还需要通过实际工程决定。

从表 2 和表 3 的数据中可以发现,当晶体吸收

表 3 热焦距稳定性

Table 3 Stability of thermal focal length

unit: %

Doping concentration /%	Absorption length of 20 mm		Absorption length of 30 mm		Absorption length of 40 mm	
	Optical pump source system	808 nm LD	Optical pump source system	808 nm LD	Optical pump source system	808 nm LD
		pump source system		pump source system		pump source system
0.5	88.2	61.9	84.2	71.3	86.8	77.6
0.8	84.5	72.8	89.1	80.7	89.2	83.4
1.0	87.0	77.6	89.1	82.8	89.3	85.2

长度和掺杂浓度增加时,最优泵浦源系统的各类稳定性和单色 LD 泵浦源系统相应的稳定性在逐渐靠近,并向上限 1 接近。当在上述基础上进一步增加晶体吸收长度和掺杂浓度时,对应的最优泵浦源系统的光谱将会变得更窄,其光谱分布将和单色 LD 泵浦源系统的光谱分布更接近,系统各种稳定性会无限接近于 1,表明在晶体吸收长度足够长和掺杂浓度足够高的情况下,单色 LD 泵浦源也可以在宽温度范围内免温控工作。然而,在实际端泵 DPSSL 工程设计中,晶体有效吸收长度会受到材料本身工艺、LD 泵浦源光束质量等因素的影响,掺杂浓度会受到晶体受激自发辐射(ASE)^[11-12]、热应力^[13-15]等效应的限制,此时优化泵浦源光谱分布将是实现激光器在宽温范围内稳定工作的有效手段。

3.6 最优光谱分布的多波长激光二极管组合近似

3.2 节中求得的最优泵浦源光谱分布是理论上的最优分布,故泵浦源的实际工程设计应当以其为标准,利用多波长 LD 组合逼近该分布。为了对比分析,针对吸收长度为 30 mm,掺杂浓度为 0.8% 的 Nd:YAG 激光器系统,选择了双波长 LD 组合(LD 光谱的半封全宽为 4 nm)对图 2(e)所示的最优泵浦源光谱分布进行近似逼近。当工作温度为 10 °C,双波长 LD 组合中心波长位置分别在 803.7 nm 和 809.2 nm 处,对应比重分别为 68.4% 和 31.6% 时,光谱分布如图 5 中短划线所示。文献[10]中设计了四波长 LD 组合,当工作温度为 10 °C,中心波长位置分别在 795.3, 800.2, 804.8, 808.5 nm, 对应比重分别为 25%, 25%, 25%, 25% 时,光谱分布如图 5 中密集点虚线所示。可以发现,与四波长 LD 组合相比,双波长 LD 组合的光谱分布与系统的最优泵浦源光谱分布重叠面积更大。

理论模拟结果表明,在 -40~60 °C 温度内,相对系统最优泵浦源,双波长 LD 组合对应的能量利用率由 92.2% 下降到 90.7%, 泵浦光吸收率稳定性由 93.0% 下降到 91.4%, 相对热焦距稳定性由 89.1% 下降到 85.4%, 双波长情况下的值均高于四

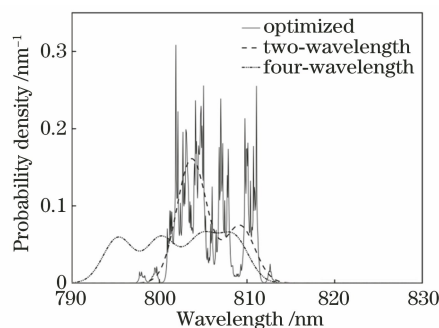


图 5 泵浦源光谱

Fig. 5 Spectra of pump source

波长 LD 组合对应的 55.6%、57.9% 和 60.0%。从图 6 和图 7 中可以看到,四波长 LD 组合在 0~60 °C 的工作温度区间内具有更好的吸收稳定性和相对热焦距稳定性,但是在 -40~0 °C 的低温范围内,吸收率和热焦距波动范围过大,能量利用率不能得到保证。在 -40~60 °C 的宽温度范围内,双波长 LD 组合有更加不错的稳定性和能量利用率。

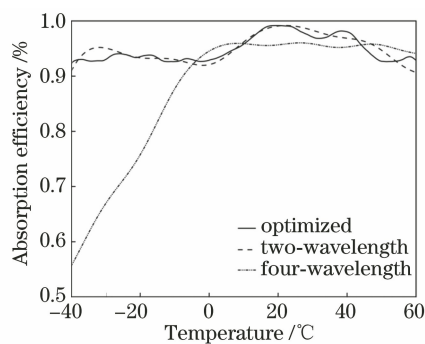


图 6 泵浦光吸收效率

Fig. 6 Absorption efficiency of pump light

4 结 论

通过理论定义与激光器泵浦源系统相关的各种稳定性,在考虑系统能量利用率的基础上定义了泵浦源光谱优化目标函数,以最大化目标函数为目标,提出了端泵 DPSSL 免温控泵浦源光谱优化设计方案。所提方案可在不增加额外系统的情况下,仅通过调节泵浦源发射光谱分布就可实现宽温度范围内

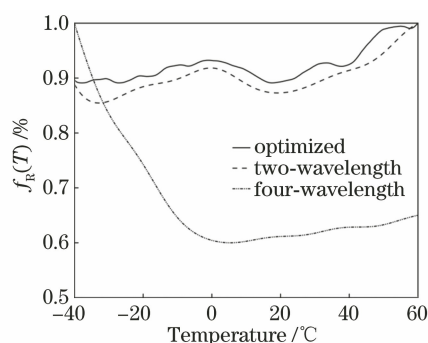


图 7 相对热焦距

Fig. 7 Relative thermal focal length

激光器的稳定工作。利用所提方案对增益介质为 Nd:YAG 的端泵 DPSSL 泵浦源光谱进行了优化讨论。理论计算结果表明,在 $-40 \sim 60$ °C 的工作温度范围内,利用所提方案获得的最优泵浦源光谱可以将系统稳定性控制在 87% 以上,使得晶体对泵浦光的吸收波动小于 13%、晶体热焦距波动小于 16%,且各项稳定性指标均优于单色 LD 泵浦源系统。对于吸收长度为 30 mm,掺杂浓度为 0.8% 的 Nd:YAG 激光器系统,可利用双波长 LD 组合近似逼近最优泵浦源光谱分布。此外,所提方案可以应用于其他类型增益介质激光器的泵浦源的优化设计中。同时,所提方案中能一并考虑其他需要考察稳定性的物理量。因此,所提方案在工程设计中有一定的指导参考意义。

参 考 文 献

- [1] Luo L, Hu J C, Wang C Y, et al. Design of high-precision driving power and temperature control circuit for semiconductor laser [J]. *Laser Technology*, 2017, 41(2): 200-204.
罗亮, 胡佳成, 王婵媛, 等. 高精度半导体激光器驱动电源及温控电路设计[J]. *激光技术*, 2017, 41(2): 200-204.
- [2] He Q X, Liu H F, Li B, et al. Multi-channel semiconductor laser temperature control system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1114002.
何启欣, 刘慧芳, 李彬, 等. 多通道半导体激光器温控系统[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1114002.
- [3] Cao B, Ou P, Jia M, et al. An innovative temperature-compensate package for fiber Bragg grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(12): 1959-1961.
曹彬, 欧攀, 贾明, 等. 一种新型光纤光栅温度补偿装置[J]. *中国激光*, 2008, 35(12): 1959-1961.
- [4] Zhang X, Zhang Y C, Li J, et al. Research and design of continuous-wave Nd:YVO₄ self-Raman laser in-band pumped by a wavelength-locked laser diode [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(19): 194203.
张鑫, 张蕴川, 李建, 等. 波长锁定激光二极管共振泵浦 Nd:YVO₄ 晶体连续波自拉曼激光器的设计与研究[J]. *物理学报*, 2017, 66(19): 194203.
- [5] Beran R. Minimum Hellinger distance estimates for parametric models [J]. *The Annals of Statistics*, 1977, 5(3): 445-463.
- [6] Gilks W R, Richardson S, Spiegelhalter D J, et al. Markov chain Monte Carlo in practice [J]. *Technometrics*, 1997, 39(3): 338-338.
- [7] Sheldon S J, Knight L V, Thorne J M. Laser-induced thermal lens effect: a new theoretical model [J]. *Applied Optics*, 1982, 21(9): 1663-1669.
- [8] Qu P F, Wang S Y, Guo Z, et al. Adaptive adjusting technique of thermal effect to laser beam quality [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0514001.
屈鹏飞, 王石语, 过振, 等. 热效应对激光器光束质量的自适应调整技术[J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 0514001.
- [9] Zhang S Y, Liu H L, Yu G L, et al. Study of thermal effect of LD end-pumped cylindrical Nd:YAG crystal [J]. *Infrared*, 2007, 28(3): 5-8.
张帅一, 刘辉兰, 于果蕾, 等. LD 端面泵浦圆柱形 Nd:YAG 晶体热效应研究[J]. *红外*, 2007, 28(3): 5-8.
- [10] Peng C, Liu X S, Si H Y, et al. Multi-color laser diode array end-pump Nd:YAG pulsed laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(2): 162-168.
彭超, 刘学胜, 司汉英, 等. 多波长半导体激光阵列端泵 Nd:YAG 脉冲激光器[J]. *发光学报*, 2018, 39(2): 162-168.
- [11] Li M, Jiao H F, Wu Y C, et al. Technology of amplified spontaneous emission suppression in high gain Nd:YAG slab [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(12): 1214003.
李密, 焦宏飞, 邬映臣, 等. 高增益 Nd:YAG 板条中的放大自发辐射抑制技术[J]. *光学学报*, 2017, 37(12): 1214003.
- [12] Cheng X J, Xu J Q. Research on parasitic oscillation in slab amplifiers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(10): 1827-1830.
程小劲, 徐剑秋. 板条激光放大器中寄生振荡的研究[J]. *光学学报*, 2007, 27(10): 1827-1830.
- [13] Murdough M P, Denman C A. Mode-volume and pump-power limitations in injection-locked TEM₀₀ Nd:YAG rod lasers [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(30): 5925-5936.
- [14] Sun Y, Li T, Yu G L, et al. Characteristics of laser

diode end-pumped laser crystal on thermal effect and second harmonic generation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(3): 359-363.

孙尧, 李涛, 于果蕾, 等. 激光二极管端面抽运 Nd:GdYVO₄ 晶体热效应分析及倍频研究 [J]. 中国激光, 2007, 34(3): 359-363.

[15] Ji L T, Zou Y, Li Z T, et al. Improvement of gain

medium thermal effect in Nd:YAG grazing incidence slab laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1101005.

季林涛, 邹岩, 李之通, 等. 改善 Nd:YAG 掠入射板条激光器增益介质热效应的研究 [J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1101005.