激光器免温控泵浦源的多波长选择理论

刘 旭,魏靖松,谭朝勇,朱孟真,程 勇

(武汉军械士官学校 光电技术研究所,湖北 武汉 430075)

摘 要:为了实现激光器在一定温度范围内LD泵浦源免温控稳定工作,具有较高并且稳定的泵浦光吸收效率,分析了 DPL 激光器中 LD 发射谱和 Nd:YAG 增益介质吸收谱的特点及匹配问题,据此提出了一种激光器免温控泵浦源的多波长选择理论和方法,同时增加泵浦光吸收长度克服 Nd:YAG 吸收谱和 LD 波长失配的不利影响。优化设计了一个波长为 802.35 nm@25 ℃、813.15 nm@25 ℃和 810.95 nm@25 ℃的三波长 LD 泵浦方案,计算结果表明:在一定吸收长度下,多波长泵浦光吸收效率可达 73.96%,并且在-15.7~65.7 ℃宽温度波动范围内,激光器输出能量不稳定度优于 5%。同时还模拟分析了增益介质吸收长度和掺杂浓度对泵浦光吸收效率的影响。

关键词:激光器; 多波长泵浦; LD 泵浦; 免温控

中图分类号:TN248.1 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.0505004

Theoretical analysis of multi-wavelength temperature-free-control pump source of laser

Liu Xu, Wei Jingsong, Tan Chaoyong, Zhu Mengzhen, Cheng Yong

(Institute Opto-Electronics Technology, Wuhan Ordnance Non-commissioned Officers Academy, Wuhan 430075, China)

Abstract: To make the laser diode (LD) pump source of laser operate reliably in a wide ambient temperature range without temperature control system, and improve the absorption efficiency and stability of the pump light, the spectral properties of LD and the absorption spectrum properties of Nd:YAG were analyzed, then a new theory and method to design LD pump source with multi-wavelength were proposed, and the absorption length in the gain media was increased to overcome the disadvantage produced by the mismatch between the LD wavelength and the absorption peak of Nd:YAG. A LD pump source with three wavelengths (802.35 nm@25 ℃, 813.15 nm@25 ℃ and 810.95 nm@25 ℃) was designed. The simulation result shows that the pump light absorption efficiency can reach 73.96% under a certain absorption length, and while the ambient temperature changes from -15.7 ℃ to 65.7 ℃, the instability of the output energy is less than 5%. The influence of the absorption length and the doped concentration of Nd^{3+} in the laser crystal on the pump light absorption efficiency was also simulated.

Key words: laser; multiple wavelengths pump; LD pump; free temperature control

收稿日期:2015-09-07; **修订日期**:2015-10-08

基金项目:国家自然科学基金(61440011)

作者简介:刘旭(1983-),男,讲师,硕士,主要从事固体激光器方面的研究。Email: gdyjs@263.net

0 引 言

二极管泵浦固体激光器 (Diode Pumped Solid-State Laser,DPL)具有体积小、质量轻、热耗散小、效率高等特点,这主要是由于泵浦源激光二极管(Laser Diode,LD)谱线较窄、中心波长可控,可与固体激光器增益介质 Nd:YAG 吸收谱线实现较好匹配,能量转换效率高,废热产生率低,有助于光束质量的控制。因此,这种激光器在激光测距、激光雷达等对小型轻量化有需求的应用领域中具有广阔的前景。

由于 LD 的发射谱线较窄,在 DPL 设计中往往需要将其发射谱线中心与激光介质吸收谱线匹配,以达到有效利用泵浦能量的目的。然而,LD 发射波长会随其工作温度变化,一旦 LD 发生波长漂移,将导致与工作物质的吸收谱线失配,造成泵浦光吸收效率降低,激光器功率/能量下降,从而温度波动导致激光器输出功率/能量不稳定。因此,业内普遍认为保持 LD 工作波长恒定是实现激光稳定输出的关键。目前,普遍采用两种方式来保持波长恒定,一是外加控温设备来保持 LD 工作温度稳定,多用 TEC 传导冷却结合闭环温控的手段来将 LD 的温度稳定在一定范围内[1-2],这种方法将温控系统变成了 DPL 中的重要组成部分,激光器的体积和功耗明显增加,使得 DPL 原本小型化高效率的优点被明显削弱;二是通过外加辅助光学设备将 LD 发射波长稳定在一定范围内[3-4],而采用外加辅助锁定波长的光学设备本身也存在温度漂移的问题,其锁定波长随着环境温度而变化,解决这个问题比较复杂。因此,这两种解决 LD 波长漂移的方法都存在一定适用性受限问题。

多波长泵浦免温控技术思想是科学的扩展 LD 谱线数量,使得在较宽的温度范围内,实现多波长 LD 泵浦光和 Nd:YAG 吸收谱较好匹配,进而获得激光器宽温度范围免温控运转。但是,传统的多波长泵浦思想仅人为地扩展了泵浦源的谱线宽度,使得在一定温度范围内,即使大部分泵浦光不能被吸收,总有部分 LD 泵浦光能和 Nd:YAG 的吸收峰相匹配,从而保证了在宽温度范围内 DPL 正常工作,但其代价是损失了大部分泵浦光能量,降低了光光转换效率。值得注意的是,文中提出的免温控设计思想与传统多波长泵浦激光器设计思想所不同,文中始终以多波长泵浦光的高效率吸收为首要考虑,提出了一种宽温度范围免温控的多波长 LD 泵浦源波长选择方法,并研究了 LD 波长和 Nd:YAG 吸收谱失配条件下,基于一定吸收距离的多波长泵浦光充分吸收问题。

针对激光器中免温控泵浦源多波长选择与失配吸收问题,通过对增益介质吸收谱线、LD 发射谱线及其温度漂移的综合分析发现:采用不同中心波长的 LD 泵浦源同时泵浦增益介质,会在一定温度范围内得到稳定的输出功率,结合长吸收距离和端面泵浦方案,文中以三波长 LD 泵浦 Nd:YAG 为例,介绍了利用不同波长 LD 泵浦效率相互补偿,获得宽温度范围 DPL 稳定输出激光的方法,可为宽温度范围工作的激光器泵浦源设计提供理论依据。

1 激光器免温控泵浦源多波长泵浦原理及方案

激光器多波长免温控泵浦原理是在对 LD 发射光谱线特性和 Nd:YAG 晶体吸收特性分析的基础上,研究二者的匹配耦合问题,通过科学地扩展 LD 谱线数量,使得在较宽的温度范围内,实现多波长 LD 泵浦光和 Nd:YAG 吸收谱较好匹配,并通过一定的吸收长度获得较好的吸收效率,从而保证在宽温度范围内激光器泵浦源免温控工作。

图 1 是 808 nm LD 的发射谱线,由于 LD 具有较好的单色性,其谱线宽度较其它类型的泵浦源更窄,在同样的电功率输入情况下,LD 能够更高效地激发增益介质掺杂粒子的同时,也可以降低晶体中的无效产热[5-6]。但是,随着工作温度的升高,LD 谐振腔的折射率和谐振腔的尺寸发生变化,造成输出波长往长波方向漂移,其变化量为 0.2~0.3 nm/℃[7]。根据实验室测量结果,文中取 0.24 nm/℃。除了波长漂移之外,同样工作电流条件下,随着温度的增加,LD 的输出功率会近似线性地下降,LD 功率随温度的变化率为-0.8%/℃[8]。

图 2 是长度 3.81 mm、掺杂浓度为 6.5%的 Nd:YAG 晶体透过率实测曲线。可以发现,吸收谱线中没有效率较高且较为平整的光谱区域,在 808 nm 附近存在一个吸收峰值。由于 LD 的发射谱线半高全

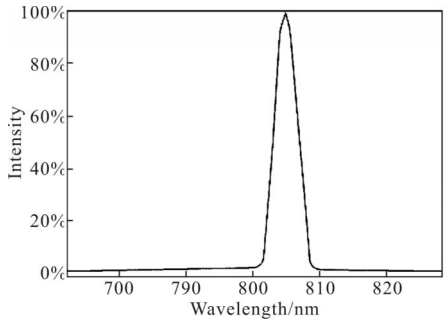


图 1 808 nmLD 谱线

Fig.1 Spectrum of 808 nm LD

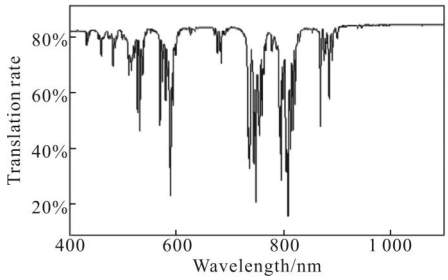


图 2 Nd^{3+} 6.5%掺杂的 YAG 晶体透过率曲线

Fig.2 Transmission curve of an 6.5% impure YAG crystal with Nd^{3+}

宽约为 4 nm,能够覆盖宽度 10 nm 左右的吸收峰。有研究表明,在 9 ℃范围内,由 LD 漂移导致的输出功率变化 5%,一旦超出这一温度范围,输出功率会有显著的变化[8]。

图 3 是三个波长 LD 光谱与增益介质光谱耦合的示意图。图中类似高斯曲线的三脉冲组合是 LD 的谱线分布,工作温度低时,LD 的谱线波长较短,对横坐标左侧位置,这里用虚线表示;随着温度的升高,三个 LD 曲线向长波方向以 0.24 nm/℃的速度漂移,实线示意了高温条件下 LD 波长所在位置。泵浦波长随温度变化的特性导致其在泵浦增益介质时,匹配程度跟随增益介质的谱线的起伏而波动,激光器的输出功率也相应地波动。观察这组 LD 与 Nd:YAG 增益介质某一吸收波长的匹配情况发现:随着工作温度逐渐升高或者降低,三个 LD 的泵浦波长将逐一经历从波长匹配到波长失配的过程。在增益介质对泵浦光吸收上,可以发现吸收能量是随着波长变化而起伏的,而且,当泵浦波长在某些范围内变化时,吸收能量能够保持相对平稳,图 3 中的增益介质吸收能量曲线示意了吸收能量随 LD 波长变化而波动。因此,通过合理地选择各泵浦 LD 的波长和间距,各波长泵浦能量的相对关系,以及适当的增益介

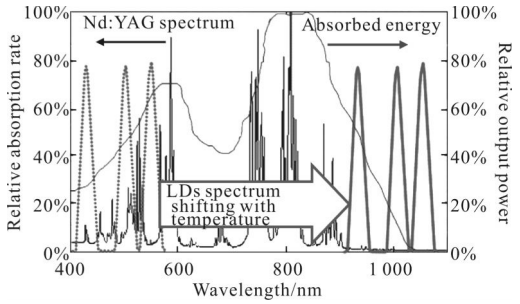


图 3 多波长 LD 光谱与 Nd:YAG 耦合示意图

Fig.3 Sketch map of LDs spectrum coupling with Nd:YAG

质吸收长度,可以使得在一定工作温度范围内,即使 LD 泵浦光的波长发生了漂移,也能够让增益介质吸收到的泵浦总能量保持稳定,从而在一定范围内实现激光器免温控。

为获得相对较长的 Nd:YAG 增益吸收长度,使多波长泵浦光吸收充分,采用端面泵浦方式,如图 4 所示,由于多波长 LD 泵浦源的发射谱线不完全与增益吸收峰相匹配,考虑多波长泵浦光的波长失配吸收问题,需要一定的吸收距离来提高泵浦光的吸收效率。在泵浦方案中,多波长 LD 阵列发出的泵浦光经过空间耦合镜,进入到激光增益介质中,并通过全反射方式在 Nd:YAG 晶体内向前传播,获得较长的吸收距离,保证泵浦光的充分吸收。

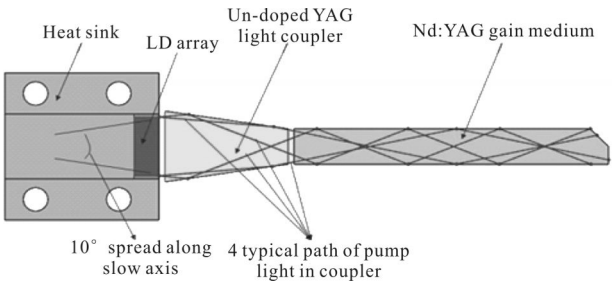


图 4 多波长 LD 阵列端面泵浦示意图

Fig.4 Sketch map of LDs array end-pump gain medium

2 泵浦光多波长选择理论分析

假设 LD 的发射谱线为一个单峰曲线,其发射谱线强度分布可以近似由高斯函数来表示:

$$I(\lambda)=I_{\lambda_0}\cdot e^{-\frac{(\lambda-\lambda_0)^2}{\sigma^2}} \tag{1}$$

式中:I_{λ_0} 为频域中谱线中心光强,与工作电流和工作温度相关;λ_0 为 LD 中心波长;σ 为发射谱线的半高全宽,文中取值 4 nm。Nd:YAG 晶体的吸收系数曲

线由函数 $\alpha(\lambda,\beta)$表示，其中 λ 代表波长，β 代表 Nd 的掺杂浓度。

根据比尔定律可以得到增益介质吸收的能量：

$$E_{ab}=\int I(\lambda)\cdot e^{-\alpha(\lambda,\beta)\cdot L}d\lambda=\int I_{\lambda_0}\cdot e^{-\frac{(\lambda-\lambda_0)^2}{\sigma^2}-\alpha(\lambda,\beta)\cdot L}d\lambda \tag{2}$$

式中：L 为泵浦光在增益介质中的光程。

多波长 LD 泵浦源由多个不同中心波长的 LD 组合而成，多波长泵浦时增益介质吸收的能量表示为：

$$E_{ab}'=\sum_{i=1}^{N}A_i\cdot\int I_{\lambda_0}\cdot e^{-\frac{(\lambda-\lambda_0)^2}{\sigma^2}-\alpha(\lambda,\beta)\cdot L}d\lambda_i \tag{3}$$

式中：A_i 为不同波长 LD 所输出光能量的加权系数，表征了工作时各波长 LD 输出功率之间的比例关系，加权系数之和为 1。

实际上，免温控的最终目的是追求激光器输出功率与工作温度的相对稳定，激光器的输出能量与增益介质吸收的能量存在如下的关系：

$$E_0=\eta_q\cdot\eta_b\cdot\eta_r\cdot\eta_e\cdot\eta_s\cdot E_{ab} \tag{4}$$

式中：E_0 为激光输出能量；E_{ab} 为吸收能量；η_q 为量子效率；η_b 为交叠效率；η_r 为辐射量子效率；η_e 为激光提取效率；η_s 为斯托克斯损失。在众多影响输出能量的因素中，唯一与波长相关的是斯托克斯损失，在这里用 $\eta_e(\lambda)$表示，而其它效率的乘积用 η 表示，则激光器的输出能量可以表示为：

$$E_0=\eta\cdot\sum_{i=1}^{N}A_i\cdot\int I_{\lambda_i}\cdot\eta_e(\lambda)\cdot e^{-\frac{(\lambda-\lambda_i)^2}{\sigma^2}-\alpha(\lambda_i,\beta)\cdot L}d\lambda \tag{5}$$

在公式(5)中，能够对激光器输出能量造成影响的可控变量为：增益介质吸收长度 L；泵浦源中各个波长的泵浦强度 $A_i\cdot I_{\lambda_i}$；和增益介质吸收系数 $\alpha(\lambda_i,\beta)$，其中包含泵浦波长 λ_i 和增益介质浓度参量 β。

可计算多波长泵浦光的吸收效率 ε 和设定的免温控温度范围内的输出激光能量不稳定性 κ 分别为：

$$\varepsilon=\frac{E_{ab}'}{\sum_{i=1}^{N}\int I(\lambda_i)d\lambda_i} \tag{6}$$

$$\kappa=\frac{E_{0max}-E_{0min}}{(E_{0max}+E_{0min})/2} \tag{7}$$

式中：E_{0max} 和 E_{0min} 分别为免温控温度范围内激光器输出能量 E_0 的最大值和最小值。

图 5 给出了 DPL 免温控泵浦源多波长选择算法，算法以多波长泵浦光的吸收效率 ε 和免温控温度范围内的激光输出能量不稳定性 κ 作为主要观察量，将多个 LD 的波长 λ_i 以及各自的归一化泵浦能量系数 A_i 作为变量，计算其在不同的温度下的泵浦结果。

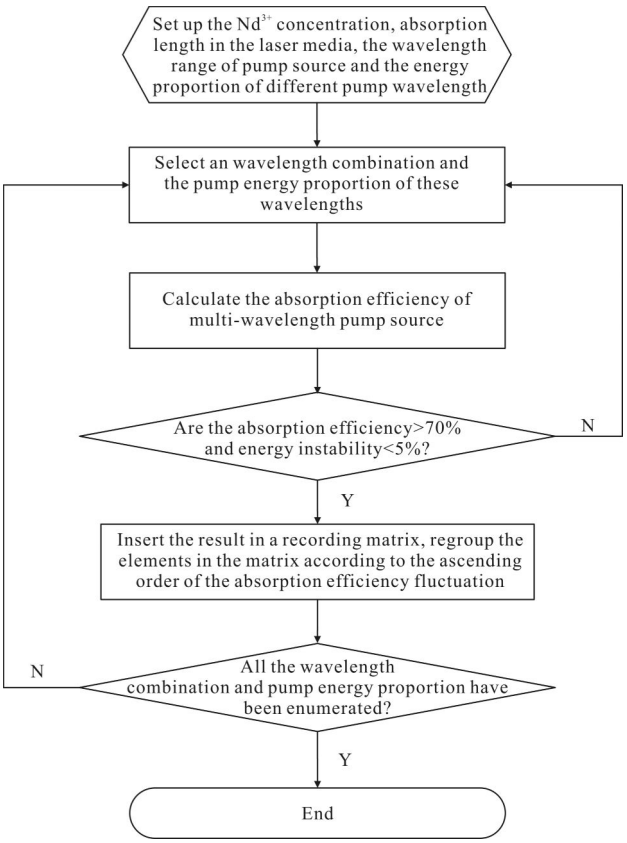


图 5 多波长选择算法

Fig.5 Process of multi-wavelength choice

根据实际需求和 LD 的制作工艺水平，以三波长选择为例，波长选择程序设定以一个波长作为基准，在 780~830 nm 范围内变化，另外两个波长的变动范围在基准波长的±20 nm 以内，各自的归一化泵浦能量系数在 0.6 至 1 之间变化。设 Nd:YAG 晶体掺杂浓度为 0.65%，吸收长度分别为 50 mm 和 30 mm，选择泵浦光吸收效率大于 70%，且吸收效率不稳定性小于 5%波长组合，计算得到了不同波长组合条件下泵浦光吸收的数据如表 1 所示。以 50 mm 吸收长度的第一组数据分析，三个波长分别为 λ、λ+10.8 nm、λ+8.6 nm，在满足吸收效率波动小于 5%的约束条件下，基准波长的可用波段为 792.6~812.1 nm。若以 25 ℃为中心工作温度，则可取基准波长为 802.35 nm@25 ℃，另外两组波长为 813.15 nm@25 ℃和 810.95 nm@25 ℃，三

表 1 吸收长度 50 mm 和 30 mm 条件下三波长选择结果

Tab.1 Results of three wavelength LDs for 50 mm and 30 mm absorption length

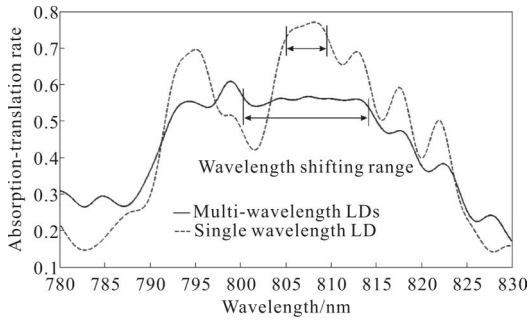
Absorption length	LD2 wavelength difference from LD1/nm	LD3 wavelength difference from LD1/nm	Pump energy distribution			Wavelength shifting range of LD1/nm	Temperature shifting span/℃	Instability of absorption-translation rate	Lowest absorption-translation rate
			LD1	LD2	LD3				
50 mm	10.8	8.6	1	0.6	1	792.6~812.1	81.3	5.0%	73.96%
	−5	−11	1	1	0.6	801.2~820.7	81.3	5.0%	73.96%
	10.4	8.6	1	0.7	0.9	792.7~812.9	84.2	4.9%	74.03%
30 mm	−5.2	−11.2	1	0.7	0.8	803.8~816.7	53.8	4.6%	70.85%
	−5	−11	1	0.7	0.8	803.8~816.7	53.8	4.5%	71.25%
	−5	−10.8	1	0.6	0.7	803.7~816.8	54.6	4.4%	71.14%

者之间泵浦能量比例为 1∶0.6∶1。根据 0.24 nm/℃的 LD 温漂数据可以算出,泵浦源在−15.7~65.7 ℃温度变化区间内泵浦光吸收效率波动小于 5%,且最小吸收效率达到 73.96%。

3 泵浦光波长失配吸收问题分析

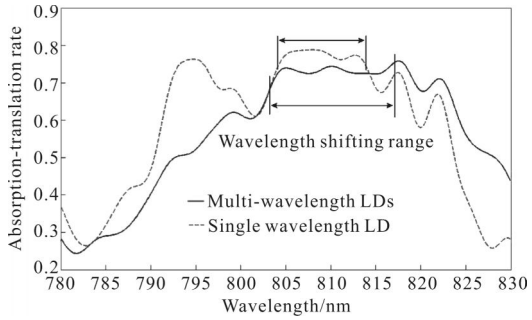
3.1 吸收长度对多波长泵浦光吸收效率稳定度的影响

泵浦光吸收效率是指转化为激光介质中掺杂粒子上能级的泵浦光能量与输入能量之比，文中用来描述泵浦光被增益介质吸收的程度，并表征泵浦源免温控的激光器输出能量稳定度的变化。图 6 是 Nd∶YAG 晶体掺杂浓度为 0.65%，吸收长度分别为 15 mm、30 mm 和 50 mm 条件下，第一组多波长的泵浦光吸收效率随基准波长变化曲线,并与同样吸收长度下单波长泵浦光吸收效率曲线作对比。可以发现随着吸收长度的增加，多波长泵浦光的转换率逐渐上升，单波长泵浦光的转换率曲线的峰值基本保持不变,而波动逐渐变小。这是由于泵浦光中与增益介质吸收谱线失配的部分在长吸收距离条件下获得充分吸收所造成的。三种吸收长度条件下,多波长泵浦始终能在较宽的波长变化范围内保持吸收效率曲线稳定,且随着吸收长度的增加,曲线稳定的区域逐渐增加。相对而言,单波长泵浦光的吸收效率随波长的变化较为明显，且这种差异在吸收长度较短时尤为明显。图中标注的区间是各个泵浦光吸收效率曲线振幅波动 5%所对应的波长变化范围。图 6(a)中,单波长范围 4.4 nm (805.1~809.5 nm)，多波长范围 13.7 nm (800.4~814.1 nm)；图 6(b)中，单波长范围 9.5 nm (804.3~813.8 nm)，多波长范围 12.9 nm(803.8~816.7 nm)；图 6(c)中，单波长范围 15.1 nm(803.3~818.4 nm)，多波



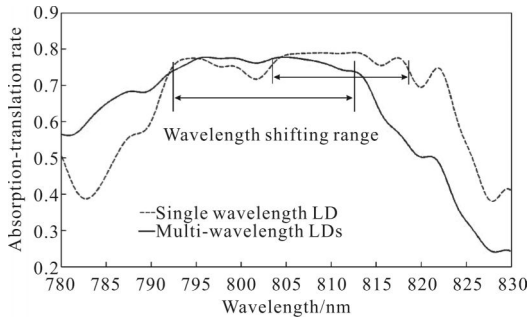
(a) 吸收长度 15 mm

(a) Absorption length 15 mm



(b) 吸收长度 30 mm

(b) Absorption length 30 mm



(c) 吸收长度 50 mm

(c) Absorption length 50 mm

图 6 不同吸收长度条件下三波长和单波长泵浦光吸收效率曲线对比

Fig.6 Curves of absorb-translation rate of three wavelength and single wavelength pumps in different absorption length

长范围 19.5 nm(792.6~812.1 nm)。

3.2 掺杂浓度对多波长泵浦光吸收效率的影响

为了对比不同掺杂浓度条件下,吸收长度和吸收效率之间的变化，理论模拟了不同掺杂浓度(0.5%~1.5%)条件下,三波长泵浦源的吸收效率与吸收长度之间的关系曲线如图 7 所示，在 10 mm 的吸收长度内,各种掺杂浓度的能量转换曲线迅速上升,表明泵浦光与增益吸收谱线匹配的光子能量被迅速地吸收,而泵浦光中失配的部分则需要更长的吸收距离。随着增益介质长度的增加，吸收效率逐渐趋向一个定值,曲线的斜率趋向于 0,其原因是匹配的光子能量已被完全吸收,而失配的光子吸收速率极低。随着掺杂浓度的增加，吸收效率在更短的吸收距离内达到极值附近，这意味着高掺杂的增益介质将大量的泵浦光能量在较短的吸收距离内吸收完毕，介质中的反转粒子更倾向于在离泵浦源较近的位置集中，相对而言，低掺杂的增益介质中反转粒子的分布更加平均。

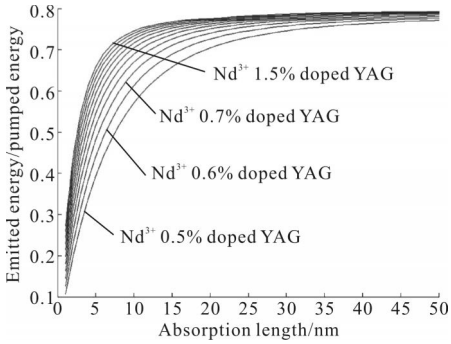


图 7 不同掺杂浓度介质的泵浦能量吸收效率/吸收长度曲线

Fig.7 Pump energy translation rate/absorption length curves of the doped mediums with Nd^{3+}

从激光器泵浦源免温控设计的角度考虑，在满足激光器出光阈值的条件下,选择低掺杂浓度、长吸收距离的增益介质能够使增益介质内部反转粒子浓度和温度更均匀，易获得好的光束质量与稳定的激光输出，同时更小的增益介质内的温度梯度也有助于控制光束质量,在模拟过程中,除了波长和掺杂浓度等与泵浦源相关的参数，其它影响激光输出能量和光束质量的因素,如反转粒子数密度、增益分布、热分布等腔内参数,并未深入讨论。相关研究和实验限于文章篇幅,后续另文报道。

4 结 论

针对一定条件下免温控激光器研究需求,在分析 LD 光谱特性、温漂特性和 Nd:YAG 吸收特性基础上,文中提出了一种基于长吸收距离的激光器免温控泵浦源的多波长选择方法。研究了一定范围温度变化时 LD 多波长与增益介质吸收光谱的匹配理论，通过计算优化,确定泵浦源波长组合及各波长间的能量分配关系,从而使泵浦光吸收效率在一定温度范围内保持稳定。文中对比分析了吸收长度、掺杂浓度对吸收效率稳定度的影响,结果表明:采用低掺杂(0.65%)、长增益吸收距离(50 mm)的多波长(802.35 nm、813.15 nm 和 810.95 nm@25 ℃)LD 泵浦方案能够在较大温度范围内(-15.7~65.7 ℃)实现免温控运转,且泵浦光吸收效率波动小于 5%,最小吸收效率达到 73.96%。文中可为宽温度范围激光器泵浦源免温控工作设计提供理论依据和新思路,对小型化高效率激光器的技术发展和应用拓展具有积极意义。

参考文献:

[1] Li Jianglan, Shi Yunbo, Zhao Pengfei, et al. High precision thermostat system with TEC for laser diode[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(6): 1745-1749. (in Chinese)

[2] Hu Yang, Zhang Yajun, Yu Jinquan. Design of temperature control circuit for laser diode [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2010, 39(5): 839-842. (in Chinese)

[3] Cao Bin, Ou Pan, Jia Ming, et al. An innovative temperature-compensate package for fiber Bragg grating [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2008, 35(12): 1959-1961. (in Chinese)

[4] Shi Xiumei, Shen Qihao, Chen Jianguo, et al. Wavelength stabilization of an external cavity semiconductor laser array[J]. ***Opto-Electronic Engineering***, 2008, 35(10): 54-57. (in Chinese)

[5] Chen Xiaohan, Zhang Xingyu, Wang Qingpu, et al. 1 342 nm YVO_4-Nd: YVO_4 laser under direct pumping at 880 nm[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2011, 40(8): 1453-1456. (in Chinese)

[6] Zheng Tianjiao. Investigation 946 nm directly pumped Nd: YAG Laser [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013: 18-20. (in Chinese)

[7] Both W, Piprek J. Thermal resistance of InGaAsP/InP laser diodes [J]. ***Journal of Thermal Analysis***, 1990, 36 (36): 1441-1456.

[8] Zhang Wenping, Li Mingshan, Shang Weidong, et al. Temperature control precision of LD in DPL [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2008, 37(1): 69-72. (in Chinese)