

文章编号: 1001-3806(2019)01-0001-05

激光二极管侧面抽运免温控激光器的研究

高恒, 贾凯, 杨闯, 刘亚萍, 赵刚, 高军
(西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要: 为了解决激光二极管抽运波长随温度漂移导致激光器输出能量下降的问题, 采用激光二极管抽运源波长匹配及凹凸稳定谐振腔技术实现免温控, 并进行了理论分析和实验验证。该激光器腔长 210mm, 电光转换效率 5.7%; 输出单脉冲能量大于 60mJ, 在 10℃ ~ 30℃ 范围内, 能量稳定度优于 5%; 激光器输出光斑直径 4mm、脉冲宽度 8ns、激光器 10Hz 工作时, 激光远场束散角为 1.1mrad。结果表明, 实验与理论分析计算结果符合, 该激光二极管侧面抽运免温控激光器可在一定温度范围内保持稳定的能量输出。该理论分析与方案对研究免温控激光器具有重要意义。

关键词: 激光器; 脉冲激光器; 电光调 Q; 免温控; 二极管抽运激光器; 能量稳定度

中图分类号: TN248.1; TN249

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2019.01.001

Study on free-temperature-controlled lasers side-pumped by laser diodes

GAO Heng, JIA Kai, YANG Chuang, LIU Yaping, ZHAO Gang, GAO Jun
(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to solve the problem that the laser output energy decreases when laser diode pump wavelength drifts with temperature, the technology of laser diode pump source wavelength matching and concave-convex stable resonator are used to realize temperature-free control. After theoretical analysis and experimental verification, the results show that, when the length of laser cavity is 210mm, electro-optic conversion efficiency is 5.7%. Output single pulse energy is more than 60mJ, and the energy stability is better than 5% in the range of 10℃ ~ 30℃. Laser output spot diameter is 4mm, pulse width is 8ns, and laser far-field beam divergence angle is 1.1mrad at 10Hz. The experimental results are in agreement with the theoretical analysis. The laser diode side-pumped temperature-free laser can maintain a stable energy output in a certain temperature range. The theoretical analysis and the scheme are of great significance for the study on temperature-free-controlled lasers.

Key words: lasers; pulse laser; electro-optic Q-switched; free temperature control; diode pumped laser; energy stability

引言

激光二极管 (laser diode, LD) 抽运的固体激光器 (diode pumped solid-state laser, DPSSL) 具有电光转换效率高、体积小、重量轻、寿命长等优点, 逐渐取代了氙灯抽运, 成为军用激光器新一代抽运光源。然而激光二极管的发射波长会随着环境温度变化而发生波长漂移, 导致激光二极管发射波长偏离激光工作物质的吸收谱线, 进而造成激光晶体对抽运光吸收效率下降, 激光器能量随环境温度变化大范围波动。为了稳定激光二极管发射波长, 就必须使用半导体热电致冷器 (thermo electric cooler, TEC) 及散热系统, 造成激光器体积

重量增加。

本文中分析了影响激光器能量稳定性的各种因素, 并通过对激光二极管抽运源波长匹配^[1-9], 实现了在一定温度范围内, 激光二极管侧面抽运免温控激光器^[10-11]。

1 激光器免温控理论分析

一般而言, 在激光器的光学、机械结构不变的情况下, 激光输出功率与抽运光抽运效率、工作物质的平均抽运速率及抽运速率分布存在较大的关系。其中, 抽运效率决定了工作物质对抽运光吸收效率, 平均抽运速率则决定了工作物质中反转粒子数, 而抽运速率分布决定了晶体内部热效应。这 3 个参量都将极大地影响激光器的输出功率^[12]。

根据激光器工作温度范围要求, 假设工作物质在 10℃ ~ 30℃ 内光学性质稳定, 且激光器的光学、机械结构随温度的变化几乎可以忽略, 仅有 LD 的发射中心

作者简介: 高恒 (1977-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事军用固体激光器的研究与应用。

E-mail: 369566411@qq.com

收稿日期: 2018-04-07; 收到修改稿日期: 2018-06-12

谱发生改变,那么若要获得稳定的激光输出,需要该型激光器在该温度范围内任意温度下满足如下3个条件:(1)抽运效率相同;(2)平均抽运速率相同;(3)抽运速率分布相同。

Nd:YAG晶体的抽运吸收峰为808nm。典型LD面阵中心波长的温度变换率约为0.33nm/°C,那么在全温度范围内,LD面阵中心波长漂移范围在7nm左右。由于在全温度范围内,LD发射中心谱会随着环境温度的改变而变化,若采用单一波长LD对晶体进行抽运,则在不同环境温度下,激光器输出功率和脉冲宽度会有较大的差别,无法开展工程化应用。因此,需要采用多个波长的LD靶条进行配对,使得在不同环境温度下的抽运效率近似相等。

在调Q运转的激光器中,三能级或四能级系统反转粒子数密度 n 和腔内光子数 ϕ 随时间演化的过程可表述为^[2]:

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = -c\phi n\sigma_{21} - \frac{n}{\tau_2} + \omega_p(n_0 - n) \\ \frac{d\phi}{dt} = \frac{2\sigma_{21}\phi nl}{t_r} - \frac{\phi}{t_c} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\sigma_{21} = 18.8 \times 10^{-20} \text{cm}^2$ 为激光发射频率处的受激发射截面; $\tau_2 = 230 \mu\text{s}$ 为荧光寿命; ω_p 为抽运速率; l 为增益介质长度; t_r 为光在谐振腔内传输的往返时间; c 为光速; $t_c = t_r / [L + \ln(1/R)]$ 为腔内光子寿命, L 为腔内损耗, R 为输出镜反射率; $n_0 = 1.38 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 为总粒子数密度。

由(1)式可以看出,在激光器谐振腔结构及增益介质特性均不改变的情况下,输出功率、脉冲宽度只与抽运速率 ω_p 有关。因此,只要波长配比在全温度范围内均能满足平均抽运速率一致,那么输出功率就相同。

抽运速率可以表示为:

$$\omega_p = \frac{\sigma_{13}P}{Ah\nu_p} \quad (2)$$

式中, σ_{13} 为受激吸收截面; A 为增益介质的有效截面积, h 为普朗克常数, ν_p 是抽运光子的频率。在侧面抽运情况下,由于在晶体长度方向上,抽运功率 P 是递减的,为方便讨论,假设入射光为平行光,并将抽运功率在长度方向求平均,从而得到平均抽运速率的表达式为:

$$\omega_{p,a} = \frac{\sigma_{13}P_0}{lAh\nu_p} \int_0^l \exp(-\alpha z) dz = \frac{\sigma_{13}P_0}{\alpha lAh\nu_p} [1 - \exp(-\alpha l)] \quad (3)$$

式中, α 为晶体吸收系数, P_0 为初始抽运功率。

将平均抽运速率的波动程度定义为:

$$P_{\text{FLU}} = \frac{\max |\omega_p - \omega_{p,a}|}{\omega_{p,a}} \quad (4)$$

那么,对于整个波长范围(790nm~815nm),不同吸收长度晶体对抽运光的吸收程度 E 分别为60%,70%,80%和90%时,其对抽运光的吸收效率曲线^[9]如图1所示。

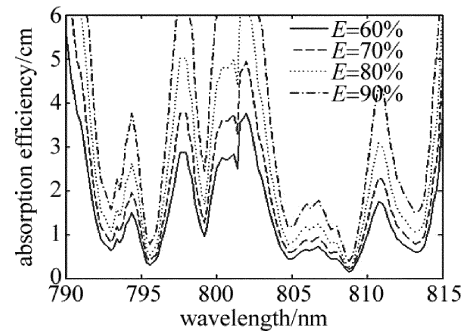


Fig. 1 Relationship between wavelength, crystal length and absorption coefficient

本文中晶体采用直径4mm晶体侧面交错抽运方式,抽运对面热沉镀金,可近似认为吸收长度为8mm。

使用MATLAB软件编程,将所需参量代入程序,模拟计算后可得到,当3个波长(803nm,808nm,810nm)的功率比为 $P_{803}:P_{808}:P_{810} = 2:3:3$ 时,经计算,激光器全温度范围吸收最大差异为3.2%,吸收曲线如图2所示。

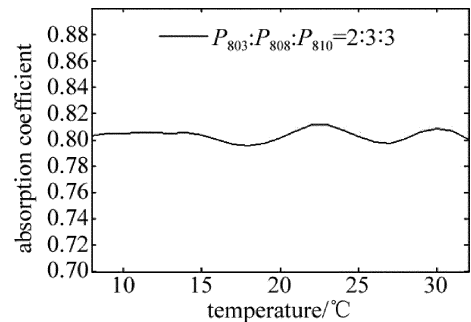


Fig. 2 Relationship between absorption coefficient and temperature

经分析,最终确定激光二极管抽运源共48根,分别由中心波长位于20°C的3组波长组成:803nm有12根,808nm有18根,810nm有18根。

2 激光侧面抽运形式优化

激光器采取环形侧面抽运的方案可以使工作物质内的增益分布趋于高斯状,有利于低阶模的起振,从而得到小束散角的光束输出。

图3是模拟实际抽运情况下的激光工作物质截面

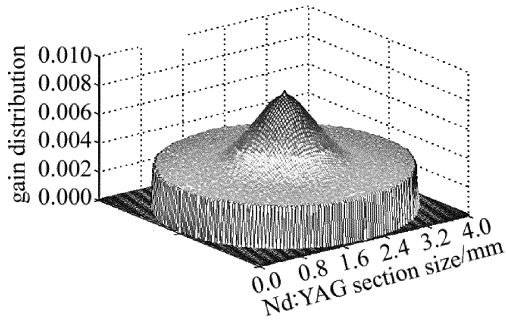


Fig. 3 Gain distribution of laser working material cross section

的增益分布。图 3 中,纵坐标为激光晶体横截面增益分布,横坐标为激光晶体横截面尺寸比例。

晶体中单个 LD 阵列输出抽运光的空间分布表示为:

$$I(x,y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_0}{w(x)} \exp\left[\frac{-2y^2}{w^2(x)}\right] \quad (5)$$

式中, $w(x)$ 表示抽运光光束半径。

考虑到 Nd:YAG 对抽运光的吸收,晶体中抽运光空间分布如下:

$$I(x,y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_0}{w(x)} \exp\left[\frac{-2y^2}{w^2(x)} - \alpha d(x,y)\right] \quad (6)$$

通过下面的分析可知,晶体的吸收系数 α 与晶体的掺杂原子数分数有关。 $d(x,y)$ 为抽运光在晶体中的传播距离,即:

$$d(x,y) = \sqrt{r_0^2 - y^2} + x \quad (7)$$

式中, r_0 为晶体的半径。

令入射到晶体侧边界的抽运光半径为 w_0 ,考虑抽运光发散角的影响,晶体中不同位置抽运光光束半径为:

$$w(x) = w_0 + \theta(x + r_0) \quad (8)$$

式中, θ 为抽运光的发散角。

在激光晶体散热条件恒定情况下,晶体热畸变的主要原因在于晶体掺杂原子数分数和抽运光分布均匀性,它与激光二极管发光面和晶体间距、晶体半径、掺杂原子数分数都有很大关系。

激光二极管侧面抽运激光器,激光二极管快轴方向半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM) 的发散角大约为 40° 。对直径为 4mm 的激光晶体,进行吸收模拟分析,结果如图 4 所示,图中纵坐标与横坐标均为晶体尺寸。

通过分析可知,采用环形侧面抽运能获得更均匀的抽运增益,同时在采用环形侧面抽运条件下,选择适当的抽运距离,可以增加整个晶体的抽运吸收均匀性;距离过远,无法获得足够的抽运功率密度。针对以上分析,采用上下圆周均匀抽运的方式,抽运面到晶体表

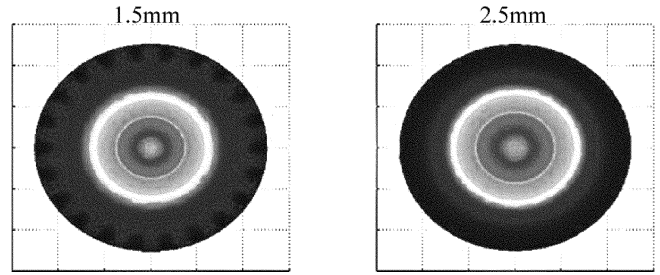


Fig. 4 Crystal absorption when the distance from laser diode array to crystal is 1.5mm and 2.5mm

面距离采用 2.5mm。

3 激光二极管侧面抽运免温控激光器设计与试验

3.1 激光二极管抽运源设计

激光器采取两段半环形激光二极管阵列上下交错抽运,激光晶体上下交错传导散热冷却,既保证输出能量与光斑均匀性,又充分考虑激光晶体散热问题^[13]。具体结构如图 5 所示。

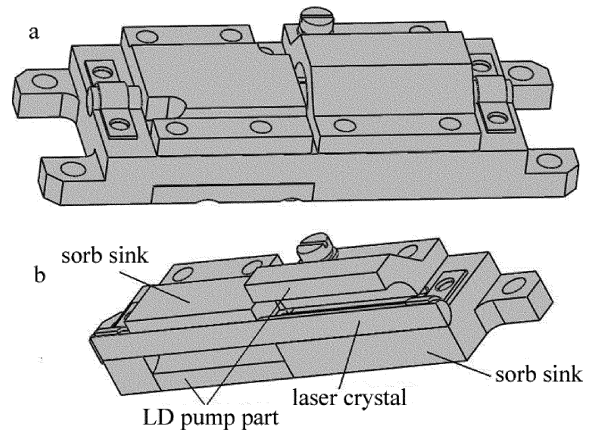


Fig. 5 a—schematic diagram of laser diode pumping source b—schematic section

激光二极管阵列由 48 个 bar 条组成,上下两个半导体热沉上分布数量各为 24 个 bar 条,单个 bar 条峰值功率为 100W。分别由中心波长位于 20°C 的 3 组波长组成:803nm 有 12 根,808nm 有 18 根,810nm 有 18 根。光谱宽度为 $6\text{nm} \pm 1\text{nm}$,为近似平顶光谱,在光谱宽度内,辐射强度的极小值不得小于辐射峰值的 70%。这样既保障了激光器的效率,又降低了激光器对环境温度的灵敏度^[14]。

抽运源的外热沉采取导热系数高的纯铜材料且反射面镀金,可以保证工作物质对抽运光的高效吸收及晶体废热导出。该激光器采用传导散热方式,由热沉将激光二极管抽运源及晶体废热传导至激光器外机

壳,与外界进行热交换散热^[15]。

3.2 激光器设计

激光器采用环形激光二极管侧面抽运结构,抽运源为2个由北京半导体所生产的LD半环形阵列(每个阵列有24个bar条,每个线阵在注入电流70A时的峰值功率为60W)组成;激光介质为Nd:YAG晶体,尺寸为 $\varnothing 4\text{mm} \times 60\text{mm}$,Nd³⁺离子掺杂原子数分数为0.01,两端镀1064nm增透膜,侧面打毛。激光二极管阵列与激光晶体均采用铜热沉传导散热,并通过激光器外壳将热量散至外界环境中。

为了压缩输出激光发散角,采用大基模体积的凸凹谐振腔。激光谐振腔由曲率半径为尺寸为1100mm的凸面全反镜与1700mm的凹面输出镜组成,激光晶体靠近凹面输出镜放置,使其作为小孔光阑,具备最佳的模式选择能力。谐振腔光学腔长为210mm,调Q方式为由偏振片1与偏振片2组成的正交偏振片加压式电光调Q,调Q晶体选用RbTiOPO₄(RTP)晶体,提高谐振腔关断能力与抗损伤阈值;腔内插入偏振片及光楔对以便获得线偏振光输出和方便精确调整激光光束光轴位置。

同时为了在有限体积内尽可能大地增加谐振腔的长度,从而提高激光器的选模能力,并有利于降低系统对热透镜的灵敏度,光路采用使用角隅棱镜的折叠结构。激光器光路如图6所示,图中T为输出镜透过率。

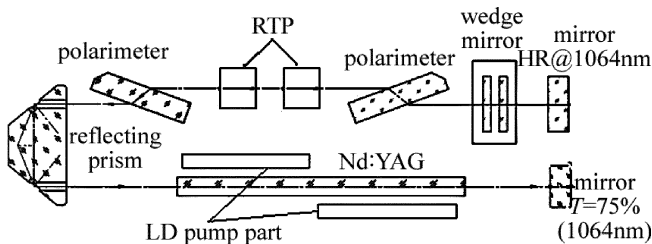


Fig. 6 Schematic of laser

在小结构尺寸下,激光器谐振腔采用了角隅棱镜一次折叠,这样使得器件长度缩短1倍,谐振腔腔长增加1倍,腔长增加后既可降低激光器束散角,也使激光器的结构布局更加紧凑,从而增强了激光器的稳定性。

输出镜与全反镜固定在一个端面上,这样结构在受热变形时,谐振腔的两个反射镜膜片位置,变形状态基本一致,而不至于引起谐振腔变形,造成输出能量下降。这种结构与角隅棱镜的配合使用也在很大程度上增强了激光器的稳定性。

3.3 实验结果

实验中使用EPM2000能量计来测量输出激光的

能量,使用Tektronix光电转换探头与TDS500MB存储示波器结合测量激光脉冲宽度,套孔法测量激光远场束散角。

在LD抽运脉宽200 μs 、重复频率10Hz条件下测量了免温控激光器的输出单脉冲能量与抽运电流的关系,测试结果如图7所示。

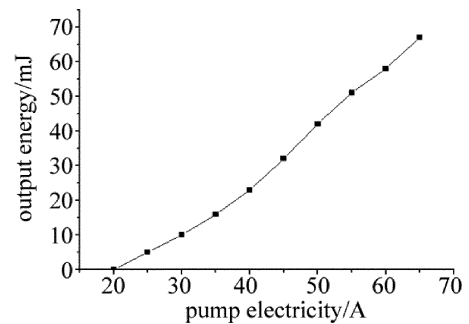


Fig. 7 Relationship between output energy and pump electric current

在激光器在注入电压90V、重复频率10Hz条件下,注入电流21A时达到谐振腔阈值条件,开始输出激光,注入电流65A时,激光能量达到67mJ,电光效率为5.7%。

在环境温度10 $^{\circ}\text{C}$ ~30 $^{\circ}\text{C}$ 范围内对激光器进行能量稳定性测试,激光器输出能量稳定度优于5%,具体数据如图8所示。

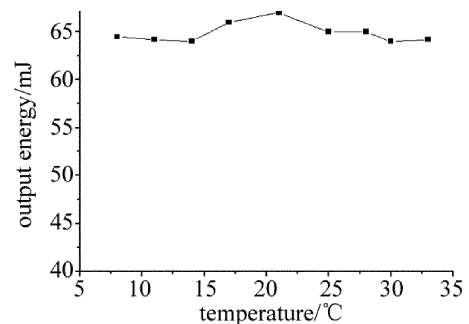


Fig. 8 Relationship between pulse energy and ambient temperature

使用Tektronix光电转换探头与TDS500MB存储示波器结合测得本激光器脉冲宽度为8ns。使用套孔法测得激光远场束散角在10Hz时达到1.1mrad。

4 结论

本文中设计了一种基于激光二极管抽运源波长匹配的激光二极管侧面抽运免温控激光器,解决了激光二极管抽运波长随温度漂移导致激光器输出能量下降的难题。研究表明,激光二极管抽运源波长匹配可以解决激光二极管抽运激光器随环境温度变化的能量下降与能量稳定性难题,凹凸谐振腔与角隅棱镜折叠谐振腔的使用解决了小体积下激光器低束散要求,正交

偏振片加压式电光调 Q 与RTP晶体的使用,解决了谐振腔高关断能力与高损伤阈值要求;与常规的激光二极管抽运激光器比较,省去了二极管温控电路、TEC,在一定温度范围内可去掉强迫风冷所需用的风扇,使激光器在体积重量与成本上有了很大的减小,在对体积重量要求日益严格的航天、机载等军事应用领域有很大的优势。频率为10Hz时,所设计的激光器输出能量为67mJ,脉宽为8ns,光束发散角为1.1mrad,能量稳定性优于5%,电光转换效率为5.7%。实验结果与理论分析计算相符合。

参 考 文 献

- [1] McCARTHY J C, YOUNG Y E, DAY R C, *et al.* Athermal, light weight, diode-pumped, 1 micron transmitter[J]. Proceedings of the SPIE, 2005, 5707: 237-242.
- [2] DEPRIEST C M, DECKER M A, HAWK M D, *et al.* Laser system with multiple wavelength diode pump head and associated method: US, 20060291520[P]. 2006-12-28.
- [3] NETTLETON J E, BARR D N. Laser diode end pumped monoblock laser: US, 20100189140[P]. 2010-07-29.
- [4] CREPY B, CLOSSE G, CRUZ J D, *et al.* Athermal diode-pumped laser designator modules for targeting application[J]. Proceedings of the SPIE, 2012, 8541: 85410R.
- [5] WANG J. Design of an advanced diode-pumped solid state laser for high-altitude airborne operations[J]. Proceedings of the SPIE, 2005, 5659: 163-170.
- [6] RAPAPORT A, ZHAO S, XIAO G, *et al.* Temperature dependence of the 1.06-microm stimulated emission cross section of neodymium in YAG and in GSGG[J]. Applied Optics, 2002, 41(33): 7052-7057.
- [7] 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.
- [8] STEINVALL O. Review of laser sensing devices and systems[J]. Proceedings of the SPIE, 2005, 5983: 598303.
- [9] GOLDBERG L, NETTLETON J, SCHILLING B, *et al.* Compact laser sources for laser designation, ranging and active imaging [J]. Proceedings of the SPIE, 2007, 6552: 65520G.
- [10] LIU Y P, PENG X J, ZHAO G, *et al.* Structure design and analysis of cooling parts of compact lasers [J]. Laser Technology, 2017, 41(6): 886-889 (in Chinese).
- [11] ZHAO G, LI J, PENG X J, *et al.* Compact repetitive diode pump slab laser without thermoelectric cooler [J]. Laser Technology, 2016, 40(5): 625-629 (in Chinese).
- [12] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002: 18-22 (in Chinese).
- [13] MEISTER J, FRANZEN R, APEL C, *et al.* Multireflection pumping concept for miniaturized diode-pumped solid-state lasers [J]. Applied Optics, 2004, 43(31): 5864-5869.
- [14] ZHOU Sh H, ZHAO H, TANG X J. High average power laser diode pumped solid-state-laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1605-1618 (in Chinese).
- [15] CHEN H T, CHE X H, XU H W, *et al.* Study on high-power laser diodes as pumping source at high operating temperature [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(11): 2799-2802 (in Chinese).