

利用多吸收峰降低全固态激光器温控功耗

楼康平^{1,2}, 赵柏秦^{1,2}

- (1. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 半导体激光器 (LD) 的工作波长是随温度变化的, 对 LD 进行温控是扩展全固态激光器 (DPSSL) 正常工作温度范围的常用方法, 但常用的控温方法在 $-50 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ 的宽温区范围存在体积大、能耗高、效率低等问题。通过实验测试得到 GaAs 量子阱激光器的波长温度漂移系数为 $0.25 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 分析了 Nd:YAG 晶体吸收谱的多峰特性。提出采用高温时工作波长为 808 nm 的 GaAs 量子阱激光器作为泵浦源, 利用 Nd:YAG 晶体的 795.7 nm 和 808 nm 的两个吸收峰, 通过分段加热控温降低温控功耗的方案。实验结果显示: 全固态激光器在两个吸收峰处得到的输出脉冲特性基本相同, 在温度较低时, 分段控温的加热功率减小了 4.7 W , 接近不分段最大加热功率的一半。

关键词: 全固态激光器; 波长漂移; Nd:YAG; 温控

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0405004

Using multiple absorption peaks to lower DPSSL temperature control power dissipation

Lou Kangping^{1,2}, Zhao Baiqin^{1,2}

- (1. Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The operating wavelength of a semiconductor laser (LD) varies with temperature. Temperature control of a LD was a common method of extending the normal operating temperature range of an all-solid-state laser (DPSSL). However, commonly used methods have large volume, high energy consumption and low efficiency in the wide temperature range of $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ to $70 \text{ }^\circ\text{C}$. The wavelength drift coefficient of the GaAs quantum well laser is $0.25 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, and the multi-peak characteristic of the absorption spectrum of Nd:YAG crystal was analyzed. A GaAs quantum well laser with a working wavelength of 808 nm at high temperature was used as the pump source. The two absorption peaks of 795.7 nm and 808 nm of Nd:YAG crystal were used to reduce the temperature control power consumption by segment heating. The experimental results show that the output pulse characteristics of the DPSSL at the two absorption peaks are basically the same. At lower temperature, the heating power of the segmented temperature control is reduced by 4.7 W , which is close to half of the maximum heating power without segmentation.

Key words: DPSSL; wavelength drift; Nd:YAG; temperature control

收稿日期: 2018-12-10; 修订日期: 2018-12-29

作者简介: 楼康平(1993-), 男, 硕士生, 主要从事被动调 Q 全固态激光器方面的研究。Email: kplou@semi.ac.cn

导师简介: 赵柏秦(1961-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事新型光电子器件及传感方面的研究。Email: bqzhao@semi.ac.cn

0 引言

半导体激光器(LD)泵浦的被动调Q全固态激光器(DPSSL)峰值功率高、脉宽窄^[1]、体积小、寿命长、泵浦灵活。相比于LD,DPSS具有更好的光束质量,在激光引信的应用上有一定的优势。Nd:YAG晶体具有高增益,好的光学性质,良好的热特性和机械特性,使其一直是很重要的固体增益介质^[2]。

Nd:YAG晶体有特定的吸收峰能产生1064 nm的激光输出,但单一吸收峰的宽度很窄,常用808 nm的吸收峰的宽度约为3~4 nm。不在吸收峰范围内的泵浦光泵浦效果会下降,以致无法形成有效的激光输出。LD的工作波长随温度变化,典型的温度波长漂移系数为0.2~0.3 nm/°C。当温度变化时,LD的工作波长很容易的就会漂移出吸收峰,所以Nd:YAG晶体的DPSS工作温度范围比较窄,一般只有10~20 °C。

为有效满足宽温度范围DPSSL的需求,人们一直都在探究不同的解决方法。改善温度漂移系数和扩展固体增益介质的吸收峰宽度能从根本上解决该问题。通过采用波长温度漂移系数小的新型LD来降低温度的影响^[3-4],DFB/DBR半导体激光器在15~85 °C范围内的波长只改变了9.7 nm,但是其功率不稳定性超过了5 dB^[5],且这种LD目前没有较大功率的产品。鲁邵文等采用Nd:GdVO₄作为激光增益介质,利用其较宽的吸收带宽获得了20~36 °C免温控的DPSSL^[6],但其改善效果还不足以满足宽温区的要求,且增益介质的温度特性有待进一步研究。刘旭等提出免温控的多波长选择方法,得到在-15.7~65.7 °C范围内功率不稳定性低于5%的DPSSL^[7],这种方法的难点是多支LD的准直和效率问题。现在较为有效的方法是增加温度控制系统,半导体制冷器(TEC)的控温速度快、精度高、噪声小,目前很多的控温系统都采用其作为温度控制器件^[8-9]。但对于激光引信要求的-50~70 °C的宽温度范围,TEC所需的功率和体积会很大,而且高温段的效率很低。

采用电阻加热效率高,且方便小型化。基于此笔者课题组叶茂生等提出采用高温(70 °C)时工作波长为808 nm的GaAs量子阱激光器作为泵浦源;温度

降低时,通过加热使波长稳定在808 nm的方案。但是当温度很低时,需要提升的温度很高,消耗的加热功率仍然很大,超过10 W。文中在该方案的基础上提出一种利用Nd:YAG晶体两个吸收峰,分段控温,降低温控功耗的设想。分析并验证了该设想的可行性,并计算了功耗的节约量,与原方案进行了对比。

1 半导体激光器的热特性

1.1 工作温度对半导体激光器的影响

温度与工作波长满足:

$$\frac{d\lambda}{dT} = -\frac{hc}{E_g^2} \cdot \frac{dE_g}{dT} \quad (1)$$

式中: h 为普朗克常数; c 为真空中的光速; E_g 为禁带宽度。对于半导体材料, dE_g/dT 一般是一个负的常数,所以工作波长 λ 正比于温度 T 。

温度与阈值电流满足:

$$J_{th} = J_{th}(T_r) \exp\left[\frac{T - T_r}{T_0}\right] \quad (2)$$

式中: T_r 为参考温度; T_0 为特征温度; $J_{th}(T_r)$ 是 T_r 温度下的阈值电流。由公式(2)可得,阈值电流的大小和温度成正比。

输出光功率与温度之间呈抛物线关系^[10],温度越高,输出功率越低。

所以对LD,相同工作电流下,低温工作有更短的工作波长,更低的阈值电流和更高的输出功率。

1.2 波长随温度漂移实验

DPSS采用GaAs量子阱激光器(以下统称LD)作为泵浦源,LD采用C-mount热沉封装。在LD与C-mount热沉之间加入一块AlN基板,其内部有多层绕线钨丝用于加热,钨丝总电阻约为4 Ω。

从理论上可以计算增益谱最大增益波长得到工作波长随温度漂移的系数。计算得到理论漂移系数约为0.228 nm/K^[11]。理论计算中用到的是结温,结温的测量难度较高,为实验的准确分析,有必要确定工作波长与环境温度之间的关系。

将LD和积分球置于高低温箱中,LD激光经过积分球,再由光纤引出到箱外的光谱分析仪,测定输出光波长。测试时,先稳定箱内温度,再启动LD,工作电流为0.8 A,经过5 min的稳定时间,测量波长,测量的温度间隔为5 °C。

根据测试结果得到如图 1 所示的图形,拟合具有很高的线性度,所得直线斜率就是漂移系数,其值平均为 0.25 nm/°C,大于理论值,验证了环境温度与实际结温的差异。

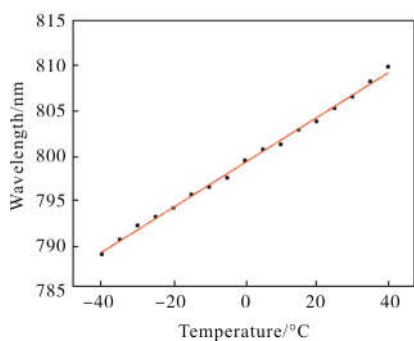


图 1 LD 波长与温度关系

Fig.1 Relationship between LD wavelength and temperatruce

1.3 工作温度与加热功率的关系

在叶茂生等提出的方案中,当环境温度降低使 LD 工作波长低于 808 nm 时,需要加热稳定工作波长为 808 nm。实验测试了消耗的加热功率与环境温度的关系,通过直流源给 AlN 基板中加热钨丝供电,利用光谱分析仪测量 LD 的工作波长是否达到 808 nm 来判断是否完成加热,测量并计算加热功率与工作温度满足如图 2 所示的关系。

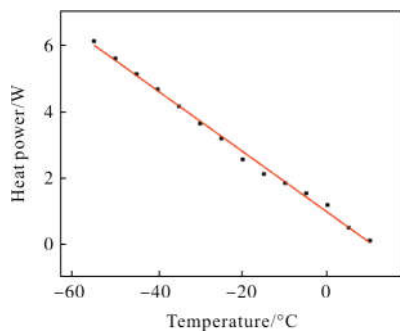


图 2 加热功率与温度关系曲线

Fig.2 Heating power and temperatruce curve

图中以 10 °C 为基准,从拟合的结果上看,加热功率与温度之间呈线性关系。温度越低,与设定温度之间温差就越大,稳定波长所需要的加热功率也越高。根据拟合结果,估算-50~70 °C 需要消耗的最大加热功率。

$$P_{\max} = \Delta T_{\max} \cdot k \quad (3)$$

式中: k 为拟合直线斜率,计算得到最大加热功率为 10.98 W。对于该器件,LD 正常工作的功率约为 2~

3 W。可见,加热功耗已经成为这个系统中主要的能耗部分。如果能削减加热功耗,将会大大降低系统的能耗

2 Nd:YAG 晶体的特性和实验

2.1 Nd:YAG 晶体的吸收峰

Nd:YAG 晶体 1 064 nm 的激光输出主要有宽为 30 nm 的两个吸收带,图 3 给出了 Nd³⁺掺杂浓度为 1% 的 Nd:YAG 晶体对 700~850 nm 波长光的吸收谱。

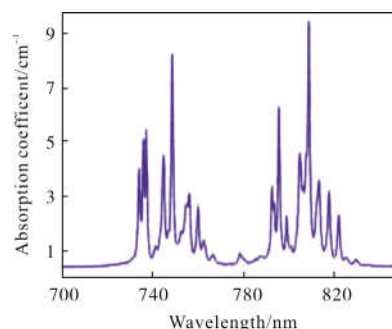


图 3 Nd:YAG(1 at.%Nd)的吸收谱

Fig.3 Absorption spectrum of Nd:YAG (1 at.%Nd)

吸收谱中吸收带的带宽为 30 nm,吸收带由很多窄的吸收峰组成。在不同的波长处,吸收系数差异明显。在 808 nm 为中心波长的吸收带中,808 nm 的峰值最高。其次,根据臧竞存等的研究,距离 808 nm 约 13 nm 处还有一较高的吸收峰,中心波长为 795.7 nm,峰宽与 808 nm 相近^[12]。

根据 LD 热特性的测试及分析结果,一定工作电流下,LD 以 795.7 nm 工作时的温度比 808 nm 时低,两个波长间的温度差约为 50 °C。Nd:YAG 晶体在 795.7 nm 处的吸收系数低于 808 nm 处,吸收峰高度随温度升高略有降低。而工作电流不变时,LD 的输出功率更高。综合以上特性,DPSSL 的最终输出,两个吸收峰之间的差异会有所减小。

如果在两个吸收峰能产生的 DPSSL 脉冲特性相同,输出功率相近。就能利用这两个吸收峰进行分段加热控温,降低温控功耗。当温度降低使 LD 波长在 795.7 nm 和 808 nm 之间时,加热稳定波长到 808 nm;温度降低使 LD 波长低于 795.7 nm 时,波长稳定到 795.7 nm 即可。

2.2 DPSSL 整体结构

DPSSL 的整体结构如图 4 所示,泵源与晶体通

过金属件连接。

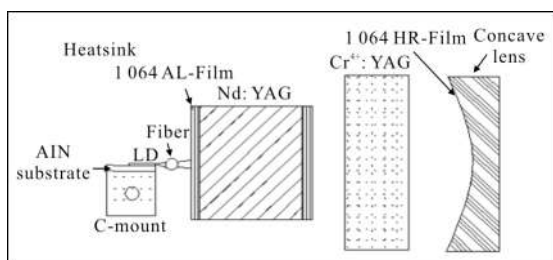


图 4 全固态激光器结构

Fig.4 Structure of DPSSL

Nd:YAG 左侧晶面与出射透镜曲面分别镀有 1 064 nm 的全反膜和高反膜构成平凹谐振腔。

在 LD 的出射面有纤径为 100 μm 的光纤横向放置作为柱透镜,对 LD 的出射光斑进行整形,压缩垂直方向发散角,保证泵浦效率。

2.3 Nd:YAG 晶体多吸收峰实验

为验证多吸收峰的可行性,将 DPSSL 置于高低温箱中,泵浦电流固定为 0.8 A。输出的激光经过倍频晶体形成绿光,通过高低温箱的窗口输出,分别用光功率计和示波器探头接收并测量在不同温度即不同工作波长下的出光功率、脉宽、重频等脉冲特性,测量温度间隔 5 °C。

出光功率和温度的关系通过高斯拟合得到如图 5 所示曲线。对照 Nd:YAG 晶体的吸收谱,测试曲线的峰与 808 nm 吸收带的吸收峰一一对应。吸收峰峰值越高,出光功率越高。但功率谱线的半峰宽要大于吸收谱的半峰宽,这应当是因为泵浦光的脉宽较宽,使得泵浦光中心波长略微偏离吸收峰位置时也能被较好的吸收,所以峰被展宽。同时功率谱线低温时的峰值高度略有提升,应当是温度降低时,LD 输出功率升高和晶体吸收系数增大有关。

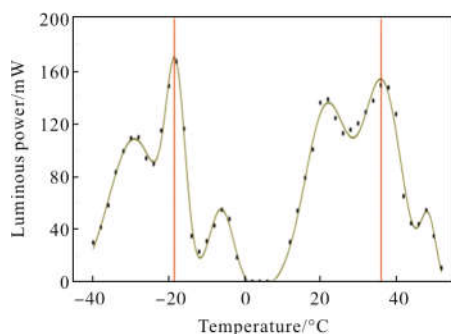


图 5 全固态激光器出光功率和温度的关系

Fig.5 Relation between luminous power and temperature of DPSSL

图中两条竖线对应两个最高峰,多次实验得两者之间温度差为(50±5)°C。测量得到该温度下 LD 波长在 795.7 nm 与 808 nm 附近。从图中不难看出,两种泵浦波长具有相近的输出功率,功率不稳定性小于 5%。

示波器的测量显示,在不同温度下,DPSSL 的输出脉冲宽度基本不变,均小于 5 ns。重复频率的变化与输出功率成正比,输出功率越高,重频越高,反之则越低。根据峰值功率计算公式为:

$$P_{\text{peak}} = P_{\text{average}} / (\nu * \Delta t) \quad (4)$$

式中:ν 为重复频率;Δt 为脉冲宽度,计算得不同温度下的峰值功率基本相同。单脉冲能量是峰值功率和脉宽的乘积,所以单脉冲能量也不变。峰值功率和脉宽等特性可以通过速率方程推导得出,现在两者均不变化,猜想在温度变化过程中与速率方程相关的晶体特性变化不明显。

所以温度变化导致工作波长不同时,DPSSL 的输出脉冲形状基本是不变的,晶体对不同波长泵浦光吸收系数的不同主要影响了输出的重复频率和输出功率。

2.4 利用双吸收峰分段加热的优势

在 1.3 节中计算得到利用 808 nm 单吸收峰所需要的最大加热功率是 10.98 W。利用 808 nm 单吸收峰时,当 LD 以 795.7 nm 工作时,稳定波长到 808 nm 需要约 4.7 W 的加热功率。如果利用双吸收峰分段加热,工作波长为 795.7 nm 时就不需要加热,当工作波长更小时,也只需要将波长稳定到 795.7 nm,加热功率都减小了 4.7 W,是利用 808 nm 单吸收峰时最大加热功率的 43%。

3 结论

分析了温度对 LD 工作特性的影响,测量了 LD 工作波长与环境温度之间的关系,得到漂移系数平均为 0.25 nm/°C,略大于理论计算的 0.228 nm/°C,并分析了 Nd:YAG 晶体的吸收谱特性。在采用高温工作波长为 808 nm 的 LD 作为泵浦源,高效率、小型化的电阻加热方式作为温控核心的基础上,提出同时利用 Nd:YAG 晶体的两个吸收峰(795.7 nm 和 808 nm) 进行分段控温降低功耗的设想。通过实验证明两个吸收峰处的输出功率不稳定性小于 5%,

而且输出脉冲宽度,峰值功率均相同,峰值功率达到 kW 量级,所以实行分段控温的方法是可行的。测试了加热功率与温度之间的关系,计算得到分段加温的方式在低温段能够节约 4.7 W 左右的加热功率,相当于不分段时最大加热功率的 43%,大大降低能耗。这些实验结果证明了分段控温方式的可行,为制作小体积、低功耗、宽温区的 DPSSL 提供了新思路。

参考文献:

- [1] Li Jingzhao, Chen Zhenqiang, Zhu Siqi. Passively Q-switched laser with a Yb:YAG/Cr³⁺:YAG/YAG composite crystal [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(1): 55-61. (in Chinese)
- [2] Dai Qin, Cui Jianfeng, Li Yeqiu, et al. Pulse LD pumped kilohertz 1.57 μm solid-state laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0105003. (in Chinese)
- [3] Tian Kun, Zou Yonggang, Ma Xiaohui, et al. Surface emitting distributed feedback semiconductor lasers [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(1): 51-64. (in Chinese)
- [4] Hai Yina, Zou Yonggang, Tian Kun. Research progress of horizontal cavity surface emitting semiconductor lasers [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(2): 194-206. (in Chinese)
- [5] Faugeron M, Tran M, Parillaud O, et al. High-power tunable dilute mode DFB laser with low RIN and narrow linewidth [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(1): 7-10.
- [6] Lu Shao wen, Meng Jie, Zhao Xueqiang. Temperature insensitive Nd:GdVO₄ laser with high peak power and narrow pulse width [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0401009. (in Chinese)
- [7] Liu Xu, Wei Jingsong. Theoretical analysis of multi-wavelength temperature-free-control pump source of laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0505004. (in Chinese)
- [8] Qin Guili, Liu Wei. Design of TEC high-precision temperature control system based on PLC [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2017, 33(11): 82-86. (in Chinese)
- [9] Zhang Kefei, Jiang Tao, Shao Long, et al. Research on precision temperature control of laser diode based on the novel fuzzy-PID control unit [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(3): 648-655. (in Chinese)
- [10] Ma Xiangzhu, Huo Jin, Qu Yi. Temperature characteristics of 808 nm semiconductor lasers [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(12): 1306-1309. (in Chinese)
- [11] Zhao Yihao. Study on wavelength stabilization of high power semiconductor laser [D]. Beijing: Institute of Semiconductors Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
- [12] Zang Jingcun, Zou Yulin, Song Yanrong. Spectroscopy of Nd:YAG crystal and its new wavelength laser [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2009, 37(8): 1338-1344. (in Chinese)