

## 多波长红外激光二极管峰值光谱热漂移研究\*

薛明晰<sup>1)</sup> 陈志斌<sup>1)†</sup> 王伟明<sup>1)</sup> 欧阳慧泉<sup>2)</sup> 刘先红<sup>1)</sup>  
宋岩<sup>1)</sup> 张超<sup>1)</sup> 肖文健<sup>1)</sup> 侯章亚<sup>1)</sup>

1)(石家庄军械工程学院, 军械技术研究所, 石家庄 050003)

2)(中国兵器工业标准化研究所, 北京 100089)

(2014年2月17日收到; 2014年3月9日收到修改稿)

为了满足红外激光测试技术对多光谱集成光源在光谱范围和峰值精度等方面的要求, 提出了一种高精度的多波长红外激光二极管, 并设计了能够集成 860 nm, 905 nm 和 1064 nm(脉冲/单模) 四种激光芯片的封装结构. 建立了基于上述封装结构下中心热沉的温度场分布模型, 并根据数学建模工具求解的中心热沉温度场数值分布规范了中心热沉的加工工艺. 为了验证多波长激光二极管中心热沉对输出峰值光谱热漂移现象的抑制效果, 制备了多波长激光二极管样机, 并搭建了观察其峰值光谱热漂移现象的实验装置. 实验结果显示, 样机仅有两种芯片的峰值光谱发生了 1—3 nm 的微弱漂移, 并未超出规定的峰值半宽. 该现象证明了多波长激光二极管的输出光谱具备较高的精度和良好的稳定性.

关键词: 多波长, 峰值光谱, 热漂移, 温度场

PACS: 42.55.Px, 42.62.Fi, 11.10.Wx, 52.35.Kt

DOI: 10.7498/aps.63.154206

## 1 引言

激光光源在激光设备接收性能测试技术上有广泛的应用<sup>[1-4]</sup>. 近年来, 从国际光学仪器及半导体激光器生产厂商研发的一系列激光光源仪器不难看出, 激光光源制备技术的发展逐渐趋于多波长多光谱集成化<sup>[5,6]</sup>、体积质量小型化和轻量化, 光源仪器的通用性和便携性有了较大提高. 然而结合激光测试技术对光源的要求, 上述这些光源仪器在以下两个方面的性能尚待提高: 1) 光谱范围: 近年来一些国家研发的可调谐多波长激光器<sup>[7-11]</sup>或多束、三色和双色激光二极管<sup>[12-14]</sup>, 其峰值光谱大多在可见光或近红外波段, 红外波段的光谱极少. 2) 峰值精度: 这些激光光源大多用于 CD/DVD 刻录及播放、激光笔和激光打印, 其峰值光谱半宽  $\Delta\lambda$  偏大, 且在长时间连续工作状态下容易发生漂移, 不符合用于测试的标准光源对于峰值精度的要求.

基于上述需求, 本文拟研究并制备一种高精度

的多波长红外激光二极管, 并通过其封装结构下温度场分布的物理建模及软件仿真, 提出该二极管的 860 nm, 905 nm 和 1064 nm(脉冲/单模) 四种激光芯片在长时间同步工作状态下对峰值光谱热漂移误差的抑制方法; 通过实验测量试制样机的各芯片在长时间同步工作状态下的峰值波长, 观察并测量由该方法制备的多波长激光二极管峰值光谱热漂移现象.

## 2 温度场分布模型

## 2.1 封装结构

我们拟将 860 nm, 905 nm 和 1064 nm(脉冲/单模) 四种不同激光芯片封装在同一热沉表面上, 在常温条件下, 对四种待封装芯片的峰值光谱及发散角参数进行测试, 测试数据如表 1 所示.

多波长激光二极管的封装结构如图 1(a) 所示: 芯片  $\lambda_1$ — $\lambda_4$  封装在四边形截面热沉的四个侧面, 通

\* 总装人才战略工程专项资助基金(批准号: 装政[2013]714号)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: shangxinboy@163.com

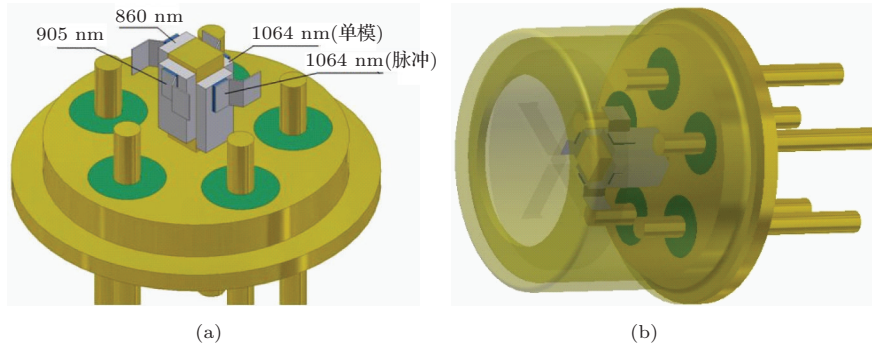


图1 多波长激光二极管封装结构示意图 (a) 芯片封装; (b) 整体封装

过底座引出的4路阳极管脚和1路共阴极管脚供电; 如图1(b), 所示各芯片发光端面严格位于各自的焦平面位置(封装管壳的十字分划板位于可见光焦平面位置).

表1 待封装芯片的主要规格参数

| 芯片          | 工作模式 | 峰值波长 /nm | 峰值半宽 /nm | 垂直发散角 /( $^{\circ}$ ) | 水平发散角 /( $^{\circ}$ ) |
|-------------|------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|
| $\lambda_1$ | 脉冲   | 860      | $\pm 5$  | 25                    | 10                    |
| $\lambda_2$ | 脉冲   | 905      | $\pm 5$  | 25                    | 10                    |
| $\lambda_3$ | 脉冲   | 1064     | $\pm 10$ | 25                    | 10                    |
| $\lambda_4$ | 单模   | 1064     | $\pm 10$ | 30                    | 10                    |

## 2.2 热漂移机理分析

根据上述方法制备的多波长激光二极管, 其热效应在其发射光谱中直接表现为峰值光谱的热漂移现象 [15-17]. 导致该现象的主要原因如下: 1) 芯片中的结温度升高导致谐振腔折射率发生变化从而影响腔内激光震荡频率 [18]; 2) 温度升高导致谐振腔尺寸发生热膨胀引起峰值波长的变化 [19]; 3) 半导体材料中电声子相互作用导致峰值波长的热位移和光谱线的热加宽 [20,21]. 激光二极管峰值波长的变化与其结温度呈线性关系 [22]:

$$\Delta\lambda = k\Delta T. \quad (1)$$

对表1中多波长激光二极管的几种待封装芯片进行热漂移测试, 测试结果和(1)式基本相符, 其变化曲线如图2所示.

由上述几种芯片封装制备的多波长激光二极管共用同一热沉, 如果该热沉各边界不具备良好的绝热性能, 当芯片 $\lambda_1$ — $\lambda_4$ 在长时间同步工作状态下, 芯片内除了自身产生的热量外, 还存在其他芯片通过热沉的热交换能量. 这样会导致(1)式中峰

值波长的热位移 $\Delta\lambda_i$ 增大, 二极管的输出峰值精度降低. 因此, 我们可以通过建立各芯片在热沉边界表面的温度场分布模型, 合理匹配热沉的各项尺寸参数, 从而提高各芯片在长时间同步工作状态峰值光谱的精度.

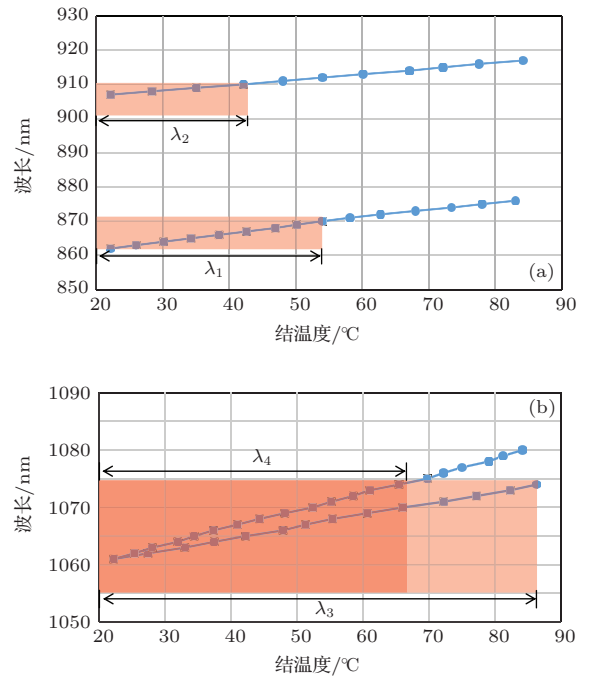


图2 芯片 $\lambda_1$ — $\lambda_4$ 峰值波长热漂移曲线 (a)  $\lambda_1, \lambda_2$ ; (b)  $\lambda_3, \lambda_4$

## 2.3 物理模型

以脉冲芯片 $\lambda_1$ 和单模芯片 $\lambda_4$ 作为例进行建模分析: 长度为 $L$ , 宽度为 $D$ , 厚度为 $H$ 的芯片组, 在模型中视作整体热源考虑. 如图3所示, 热沉的长度为 $L_1$ , 宽度为 $D_1$ , 厚度为 $H_1$ ;  $\lambda_4$ 的发光端面在 $z$ 方向上后退一定距离, 该距离等于 $\lambda_1$ 和 $\lambda_4$ 在相同耦合光学系统下的后截距之差 $\Delta l'_{F14}$ .

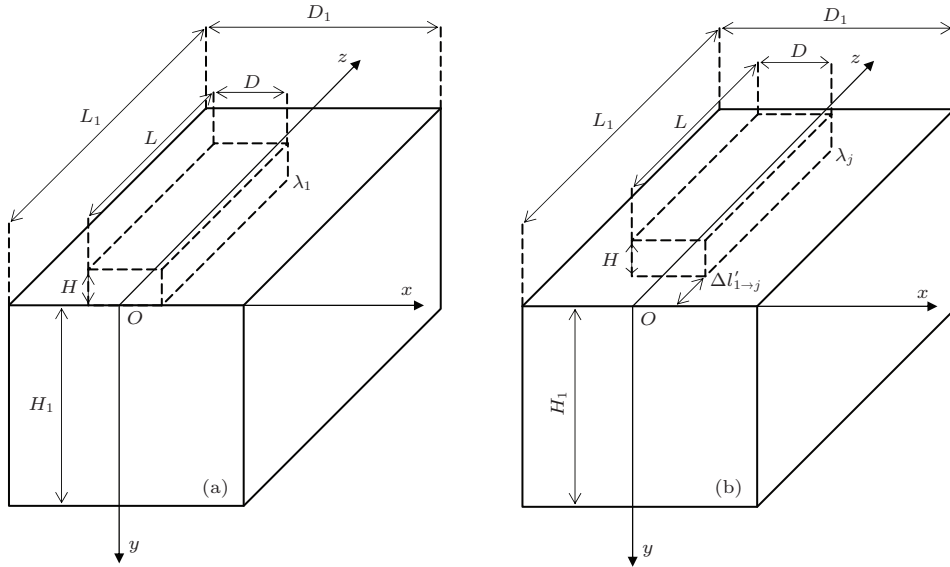


图3 脉冲、单模芯片组在热沉表面的热传导物理模型 (a) 脉冲芯片  $\lambda_1$ ; (b) 单模芯片  $\lambda_4$

假设芯片组至热沉的导热为稳态导热过程, 芯片在工作过程中产生的热量全部传导至热沉. 在图3所示直角坐标系下, 由  $\lambda_1, \lambda_4$  到载体的三维热传导微分方程分别为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} + \frac{Q_1(x, z)}{\kappa_s} \\ &= \frac{\rho_s c_s}{\kappa_s} \frac{\partial T_1}{\partial t}, \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial z^2} + \frac{Q_4(x, z)}{\kappa_s} \\ &= \frac{\rho_s c_s}{\kappa_s} \frac{\partial T_4}{\partial t}, \end{aligned} \quad (2b)$$

其中  $\rho_s, c_s, \kappa_s$  分别为热沉的密度、比热容和导热系数. 由于芯片组在  $y$  方向上的高度  $H$  和热沉在  $x, z$  方向上的尺寸相比可以忽略不计, 故芯片组可以近似为面热源, 其热源函数  $Q_1(x, z)$  和  $Q_4(x, z)$  可以近似为<sup>[23]</sup>

$$\begin{aligned} Q_1(x, z) &= \frac{R_s I_1^2 + V I_1}{xz}, \quad x \in \left[-\frac{D}{2}, \frac{D}{2}\right], \\ & \quad z \in [0, L], \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} Q_4(x, z) &= \frac{R_s I_4^2 + V I_4}{x(z - \Delta l'_{F14})}, \quad x \in \left[-\frac{D}{2}, \frac{D}{2}\right], \\ & \quad z \in [\Delta l'_{F14}, L + \Delta l'_{F14}], \end{aligned} \quad (3b)$$

其中  $R_s$  为芯片内阻,  $I_1$  为注入芯片  $\lambda_1$  的脉冲电流的等效平均电流,  $I_4$  为注入芯片  $\lambda_4$  的恒流;  $V = h\nu/q$  为常量, 其中  $h$  为普朗克常数,  $\nu$  为光子频率,  $q$  为元电荷.

设微分方程的初值条件  $T(x, y, z, 0) = T_0$ , 热沉各边界和空气介质无热交换, (2a), (2b) 式的边

界条件分别为

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=\pm \frac{D}{2}} &= \frac{\partial T_1}{\partial y} \Big|_{y=0, H_1} = \frac{\partial T_1}{\partial z} \Big|_{z=0, L_1} \\ &= 0, \end{aligned} \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=\pm \frac{D}{2}} &= \frac{\partial T_4}{\partial y} \Big|_{y=0, H_1} = \frac{\partial T_4}{\partial z} \Big|_{z=0, L_1} \\ &= 0. \end{aligned} \quad (4b)$$

由初值条件和边界条件(4a), (4b)式即可求解  $\lambda_1, \lambda_4$  在该热沉结构下的温度分布函数  $T_1(x, y, z, t)$  和  $T_4(x, y, z, t)$ .

## 2.4 仿真分析

通过图3的物理模型可知, 芯片  $\lambda_1$ — $\lambda_4$  之间可能发生的热交换在  $x, y$  两个方向上, 因此我们主要分析  $T_1(x, y, z, t)$  和  $T_4(x, y, z, t)$  在  $x, y$  方向上的分布即可. 设芯片  $\lambda_1, \lambda_4$  正常工作了若干时间 ( $T = 0.5$  h), 初值条件  $T_0 = 25$  °C, 通过数学工程计算软件 MAPPLE 可以求得,  $T_1(x, y, z, t)$  和  $T_4(x, y, z, t)$  分别在各自的  $z \in [0, L]$  和  $z \in [\Delta l'_{F14}, L + \Delta l'_{F14}]$  区间存在极大值. 代入上述数值计算后, 选取  $T_1$  和  $T_4$  共有的一个极大值点  $z = 0.38$  mm 所在平面为参考截面, 将温度函数解析式  $T_1(x, y, 0.38 \text{ mm}, 0.5 \text{ h})$  和  $T_4(x, y, 0.38 \text{ mm}, 0.5 \text{ h})$  输入到数学仿真软件 MATLAB 中, 即可得到该截面上温度场在  $x, y$  方向上的数值分布如图4所示.

通过上述分析可知, 热沉在  $x, y$  方向上的尺寸  $D_1, H_1$  越大, 热沉边界的绝热性能越好, 多波长激

光二极管的峰值光谱精度越高. 然而热沉的截面尺寸  $D_1$  和  $H_1$  大于允许的范围, 会导致芯片  $\lambda_1-\lambda_4$  在发射光束时的离轴距离增加, 从而影响光束的耦合精度. 例如根据图 4 的温度场分布可知: 满足绝热条件的热沉尺寸  $D_1, H_1 \leq 2$  mm; 将该尺寸作为发散角最大的激光芯片  $\lambda_4$  (1064 nm) 在垂直于光轴方向上的最大离轴参量 ( $\leq 1$  mm), 经光学设计软件 ZEMAX 计算, 其输出光束经准直透镜耦合的发散角极小 ( $\leq 0.1$  mrad). 即可认为该尺寸为热沉截面的最优化尺寸.

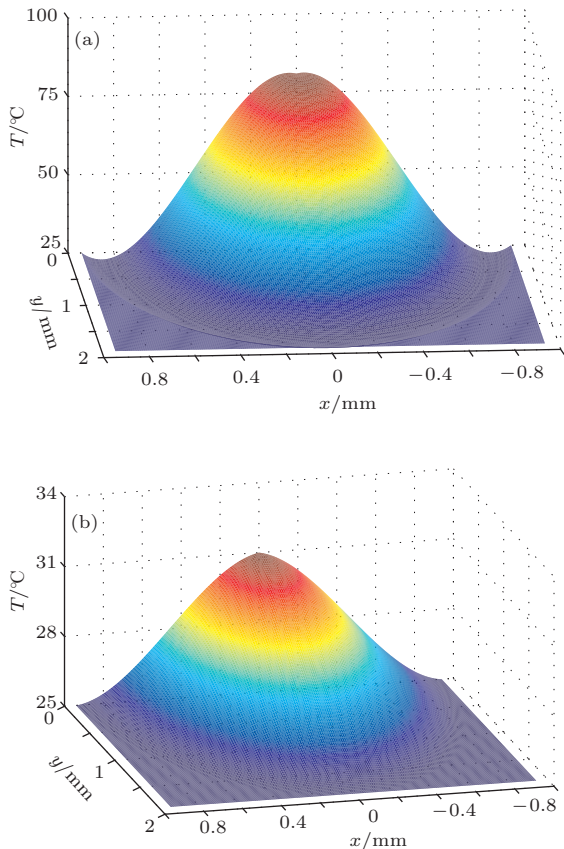


图 4 温度分布函数  $T_1, T_4$  在热沉截面上的数值分布 ( $T = 0.5$  h) (a)  $T_1(x, y)$ ; (b)  $T_4(x, y)$

### 3 实验方法及测量结果

为了验证多波长激光二极管峰值光谱的精度, 可以参考 2.4 的仿真结果试制多波长激光二极管样机器件, 并通过实验观察该样机器件在长时间连续工作状态下峰值光谱的热漂移现象.

#### 3.1 实验方法

综合考虑温度场在  $x, y$  方向上的分布及现有机械加工工艺所能达到的最小尺寸规格, 热沉的截

面尺寸暂定为  $1.88$  mm  $\times$   $1.88$  mm. 多波长激光二极管试制样机的热沉尺寸和实物照片如图 5 所示.

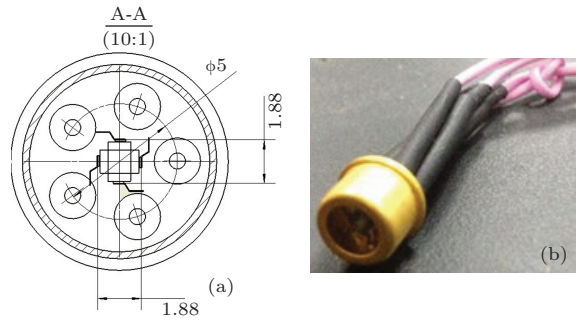


图 5 试制样机的工艺参数及实物照片 (a) 热沉尺寸; (b) 样机照片

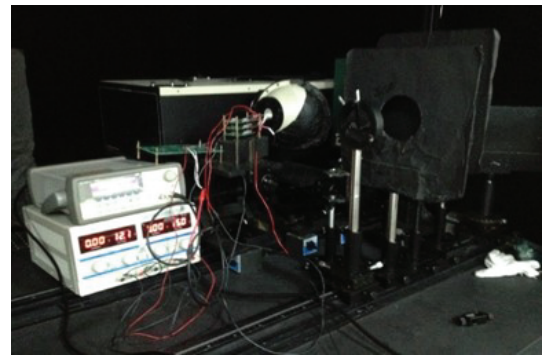


图 6 多波长激光二极管峰值光谱热漂移实验装置

多波长激光二极管峰值光谱热漂移实验装置如图 6 所示: 该装置由脉冲信号发生器、直流电源、驱动模块、试制样机和时间高分辨光谱仪(配积分球)等部分组成. 实验方法及步骤如下:

- 1) 由脉冲信号发生器和直流电源同时向激光二极管试制样机提供 3 路脉冲信号 ( $f = 5$  kHz, 脉宽  $\leq 100$  ns,  $u_i = 15$  V) 和 1 路直流信号 ( $I = 50$  mA).
- 2) 将光谱仪采样间隔设置为 1 nm, 采样范围设置为 850—1080 nm, 采集并保存试制样机的初始光谱, 并在采集完毕后开始计时.
- 3)  $T = 30$  min 时, 在相同采样间隔和采样范围内采集并保存试制样机的光谱.
- 4) 将两次采样扫描结果拟合光谱曲线, 观察并记录各峰值光谱的热漂移情况.

#### 3.2 结果与讨论

由光谱仪两次采样扫描结果拟合而成的峰值光谱曲线如图 7 所示: 第一次采样扫描 ( $T = 0$ ) 获取的峰值波长分别为 859 nm, 906 nm 和 1061

nm (单模激光  $\lambda_4$  输出功率很小, 峰值光谱被  $\lambda_3$  覆盖), 第二次采样扫描 ( $T = 30 \text{ min}$ ) 获取的峰值波长分别为 862 nm, 907 nm 和 1061 nm, 峰值谱线热位移量分别为 3 nm 和 1 nm.

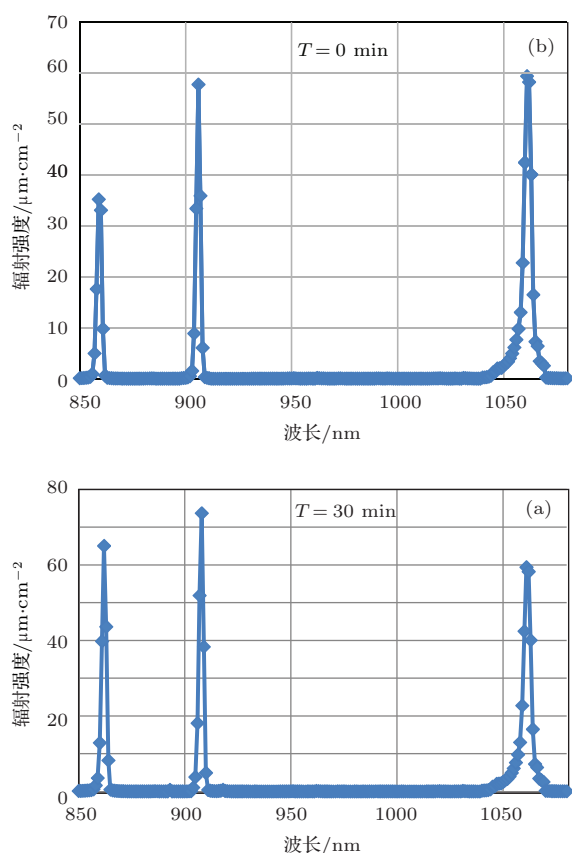


图7 多波长激光二极管峰值波长谱线变化情况 (a) 初始采样; (b) 二次采样

通过以上实验数据我们发现, 试制样机在各芯片长时间同步工作状态下, 输出光束的峰值波长具有很高的精度, 峰值谱线仅发生 1—3 nm 的热位移, 远小于表 1 中相应波长芯片的峰值半宽. 峰值光谱发生微小热漂移的原因在于: 多波长激光二极管实际工作状态无法满足温度场分布模型的理想条件, 激光芯片产生的热量没有全部传导至热沉; 发生热漂移的峰值光谱热位移量极小, 没有超出表 1 中的峰值半宽, 说明热沉各边界具有良好的绝热性能.

## 4 结 论

本文提出了一种高精度多波长红外激光二极管的封装结构, 并建立了基于该封装结构下热沉温度场分布模型; 在该模型指导和规范下, 试制了集成有 860 nm, 905 nm 和 1064 nm (脉冲/单模) 四种激光芯片的多波长激光二极管样机, 并通过

实验观察并记录了试制样机各芯片在长时间同步工作状态下峰值光谱的热漂移情况. 通过和文献 [12—14] 中报道的多波长半导体发光器件或光源对比后发现, 该二极管的输出光谱具备较高的峰值精度和更好的热稳定性, 而文献 [9] 所描述的多波长多束系列半导体激光器件迄今仍处于正在研发状态 (Under Development).

## 参考文献

- [1] Hecht J 2003 *Optics and Photonics News*. **1** 42
- [2] Wang X J, Wang Y G, Cao X P 2004 *Military Metrology* (Beijing: Defense Industry Press) (in Chinese) [王焯军, 汪元贵, 曹小平 2003 军事计量学 (北京: 国防工业出版社)]
- [3] Huai G M, Guo Q F 2003 *Defense Metrology* (Beijing: Defense Industry Press) (in Chinese) [怀国模, 郭群芳 2003 国防计量 (北京: 国防工业出版社)]
- [4] Yang H R 2005 *Applied Optics* **26** 1 (in Chinese) [杨鸿儒 2005 应用光学 **26** 1]
- [5] Masaki Tatsumi *US Patent* US 20050069006 A1 [2005-03-31]
- [6] Liu H, Xu D G, Yao J Q 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1077
- [7] Wu D H, He Z H, Niu Z C 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 1005
- [8] Wang W, Wang L F, Xie H Y 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 126
- [9] Qioptiq, Inc. Co. <http://www.onset-eo.com/chs/productdetails.php?cde=PDT510fdc5a32537> [2013-8-11]
- [10] Li P L, Wang Y S, Zhao S L, Zhang F J, Xu Z 2012 *Chin. Phys. B* **21** 127804
- [11] Zhu J F, Xu L, Lin Q F, Zhong X, Han H N, Wei Z Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 054210
- [12] ROHM semiconductor Co. <http://www.rohm.com/web/global/products/-/RLD2WMFR1#nogo> [2013-9-11]
- [13] ROHM semiconductor Co. <http://www.rohm.com/web/global/products/-/MSL0301RGBW>[2013-9-11]
- [14] ROHM semiconductor Co. <http://www.rohm.com/web/global/products/-/RLD4BP MP1#nogo> [2013-9-11]
- [15] Yu H Y, Suo L, Su M K, Liu X, Li D Y, Li Q 2012 *Applied Optics* **33** 30 (in Chinese) [于海鹰, 索琳, 苏美开, 刘潇, 李大勇, 李琪 2012 激光杂志 **33** 30]
- [16] Park J, Lee C C 2005 *IEEE Electron Device Lett.* **26** 308
- [17] Li H G 2000 *Ph. D. Dissertation* (Xian: Xidian University) (in Chinese) [李汉国 2000 博士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [18] Hou L Z, Qiang X F, Sun X M 1999 *Applied Laser* August 178 (in Chinese) [侯立周, 强锡富, 孙晓明 2005 应用激光 August 178]
- [19] Liu Y Y 2008 *Ms. D. Dissertation* (Changchun: Changchun University of Science and Technology) (in Chinese) [刘谊元 2008 硕士学位论文 (长春: 长春理工大学)]

- [20] Luo Z D, Huang Y D 2003 *Spectroscopic Physics of Solid Laser Material* (Fujian: Fujian Press of Science and Technology) p97–102 (in Chinese) [罗遵度, 黄艺东 2003 固体激光材料光谱物理学 (福建: 福建科技出版社) 第 97—102 页]
- [21] Xiang T, Song J R, Luan Z Y, Zhang X X 2012 *Physical Experiment of College* **25** 41 (in Chinese) [项婷, 宋俊如, 栾中岳, 张欣欣 2012 大学物理实验 **25** 41]
- [22] Su M K, Ni G Q, Zuo F 2007 *Opto-Electronic Engineering* **34** 48 (in Chinese) [苏美开, 倪国强, 左昉 2007 光电工程 **34** 48]
- [23] Du B X 2001 *Semiconductor Laser Theory* (Beijing: The Publish of Enginery Industry) p264–269 (in Chinese) [杜宝勋 2001 半导体激光器原理 (北京: 兵器工业出版社) 第 264—269 页]

## Research on spectral peaks thermal-drifting in multi-wavelength infrared laser diode\*

Xue Ming-Xi<sup>1)</sup> Chen Zhi-Bin<sup>1)†</sup> Wang Wei-Ming<sup>1)</sup> Ouyang Hui-Quan<sup>2)</sup> Liu Xian-Hong<sup>1)</sup>  
Song Yan<sup>1)</sup> Zhang Chao<sup>1)</sup> Xiao Wen-Jian<sup>1)</sup> Hou Zhang-Ya<sup>1)</sup>

1) (Shijiazhuang Mechanical Engineering College, New Technology Application Institute, Shijiazhuang 050003, China)

2) (China North Standardization Research Center, Beijing 100089, China)

( Received 17 February 2014; revised manuscript received 9 March 2014 )

### Abstract

To meet the requirements, requested in infrared-laser testing techniques, in spectral range and peaks precision of multi-spectral source, we present a method for preparing multi-wavelength infrared laser diode with a high precision, and design a packaging structure which can integrate four kinds of laser chips with wavelengths 860 nm, 905 nm and 1064 nm (pulse/single). The 3D heat conduction differential equations of central-substrate are given based on the above packaging structure. According to the solutions of numerical temperature field distribution, which are solved through a mathematic-modeling tool, the processing technique of central-substrate is optimized. And the prototype of multi-wavelength laser diode is prepared, and the experimental apparatus is built which can be used to observe the phenomenon of spectral peak thermal-drifting. Experimental results show that only two spectral peaks are drifting slightly 1—3 nm. The drifting amount is within the half width range of their spectral peak. This phenomenon proves that the output spectra of multi-wavelength laser diode have a high precision and a well thermal stability.

**Keywords:** multi-wavelength, spectral peaks, thermal drifting, temperature field

**PACS:** 42.55.Px, 42.62.Fi, 11.10.Wx, 52.35.Kt

**DOI:** 10.7498/aps.63.154206

\* Project supported by the Strategic Talented Project Specialized Foundation of the General Armament Ministry (Grant No. ZZ[2013]714).

† Corresponding author. E-mail: [shangxinboy@163.com](mailto:shangxinboy@163.com)