

文章编号: 0258-7025(2006)12-1671-04

# 大功率半导体激光器热弛豫时间的测量

程 灿, 辛国锋, 皮浩洋, 瞿荣辉, 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 根据脉冲工作状态下半导体激光器激光光谱随结温升高而发生红移的原理, 提出了一种测试半导体激光器热弛豫时间的新方法——利用调节取样积分器(Boxcar)取样门, 测量光信号脉冲内不同时刻的时间分辨光谱。采用此方法对 TO 封装和厘米-靶条(cm-Bar)阵列的 AlGaAs/GaAs 半导体激光器的动态热特性进行了测试, 得到其热弛豫时间分别为 66  $\mu\text{s}$  和 96  $\mu\text{s}$ 。

**关键词** 激光技术; 半导体激光器; 时间分辨谱; 热弛豫时间

**中图分类号** TN 248.4 **文献标识码** A

## Measurement of Thermal Relaxation Time of High Power Semiconductor Lasers

CHENG Can, XIN Guo-feng, PI Hao-yang, QU Rong-hui, FANG Zu-jie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** Based on lasing wavelength red-shift of semiconductor lasers due to junction temperature rising in pulsed operations, time-resolved spectra were measured by adjusting Boxcar gate position related to the current pulse. The thermal relaxation times of TO-can and cm-Bar array AlGaAs laser were obtained to be 66  $\mu\text{s}$  and 96  $\mu\text{s}$ , respectively. The measured dynamic thermal characteristics are of significance for pumping solid-state lasers.

**Key words** laser technique; semiconductor laser; time-resolved spectrum; thermal relaxation time

### 1 引言

近年来, 大功率半导体激光器在抽运固体激光器方面的应用得到了广泛重视。半导体激光器与闪光灯抽运相比, 具有光谱匹配好、体积小、效率高、重复频率高等优点。由半导体激光器抽运的全固态激光器, 在激光加工、测距、激光雷达以及很多军事应用中已经展现了良好的发展前景。用于抽运光源的半导体激光器的主要性能要求是: 大的输出功率和工作波长与固体激光材料的吸收谱线准确匹配。在半导体量子阱材料已经得到充分发展的情况下, 材料的热特性是影响激光器性能的一个重要因素。为此要求半导体激光器有尽可能小的热阻。热阻大, 激光器工作时温升就高, 输出功率就降低。另外激

光器的温升还会引起工作波长的漂移, 影响固体激光器工作物质对抽运光的吸收, 降低抽运效率<sup>[1~3]</sup>。因此对半导体激光器热阻的测试和研究受到了广泛重视<sup>[4~6]</sup>。

在脉冲运转的全固态激光器中, 除了热阻之外, 热弛豫时间是另一个重要参数。半导体激光器在脉冲电流驱动下, 结温在一个脉冲宽度内, 有一个上升的过程。热弛豫时间就是反映半导体激光器结温上升速率的一个参数, 也是一个反映在一个脉冲宽度内激光波长变化快慢的参数。因此热弛豫时间的测定是一项有意义的工作。

对激光器动态热特性参数的测试方法, 已经报道的大致有三种: 通过研究脉冲工作状态下阈值电流、斜率效率和温度的关系可得到热弛豫时间<sup>[7]</sup>; 通

收稿日期: 2006-04-14; 收到修改稿日期: 2006-06-15

**作者简介:** 程 灿(1983—), 女, 河南人, 中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生, 目前主要从事激光与光电子器件方面的研究。E-mail: chengcan@siom.ac.cn

**导师简介:** 瞿荣辉(1972—), 男, 湖北人, 中国科学院上海光学精密机械研究所研究员, 博士生导师, 目前主要从事光电子器件与信息系统技术方面的研究。E-mail: rhqu@siom.ac.cn

过光谱分辨脉冲波形的测试,计算得到热弛豫时间<sup>[8]</sup>;通过给光谱仪设置光开关而得到时间分辨光谱<sup>[9]</sup>。本文提出了一种新的测试半导体激光器热弛豫时间的方法,利用取样积分器(Boxcar)取样门信号给光信号设置电开关而得到时间分辨光谱,并对常用的大功率半导体激光器抽运源的动态热特性进行了测量,给出了弛豫时间的测试结果。

## 2 基本原理和实验方法

半导体激光器的结温取决于结区在电流注入下产生热量和热传导之间的动态平衡。可用一个微分方程近似地描述

$$C \frac{dT}{dt} = Q(t) - C \frac{T - T_0}{\tau}, \quad (1)$$

式中热源  $Q = (1 - \eta)P$  为注入电流产生的热量,  $\eta$  为激光器的发光效率,  $P$  为注入的总电功率。  $C$  为等效热容量。在热传导方程中,热传导与空间温度场的散度成正比。在这里主要讨论激光器 P-N 结的温度  $T$ 。散热效果在方程右边第二项用一个弛豫时间  $\tau$  近似地描述。  $T_0$  为环境温度。在一个方波工作电流情况下,可得到脉冲宽度范围内和脉冲间隔内器件的结温

$$T_1 = T_0 + R_{th}(1 - \eta)P[1 - \exp(-t/\tau)], \quad (0 < t < d), \quad (2a)$$

$$T_2 = T_1(d)\exp(-t/\tau), \quad (t > d), \quad (2b)$$

式中  $d$  为电流脉冲的宽度。  $R_{th}$  为激光器热阻,它相当于等效热容量的倒数。  $R_{th}$  和  $\tau$  与激光器材料的比热容和热导率有关,与激光器的散热机构有关;对于给定的激光器,在一定工作电流范围内,这两个参数可认为是常数。图 1 给出了一个单纵模激光器在脉冲工作状态下的不同时刻光谱的模拟计算结果,得到的热弛豫时间为  $100 \mu\text{s}$ ,一个脉冲宽度内由温升引起的波长变化量为  $0.99 \text{ nm}$ 。

为了得到热弛豫时间常数,需要测量激光器结温的变化。与测量热阻的基本原理一样,半导体激光器的光谱是了解激光器结区温度最直接的信息来源。有源区材料的禁带宽度  $E_g$  及折射率都是温度的函数,温度变化将导致半导体激光器激光光谱峰值及各个纵模的移动。热阻的测量可以从激光器输出的时间平均光谱的测量中计算得到。而热弛豫时间的测量就需要了解激光器的光谱在脉冲宽度内随时间的变化,即时间分辨光谱。利用取样积分器可以实现这样的目的。实验装置如图 2 所示,对激光

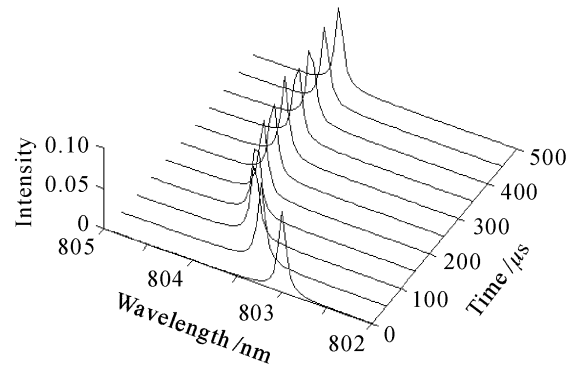


图 1 模拟计算的单纵模半导体激光器时间分辨光谱  
Fig. 1 Simulated time-resolved spectra of single-mode

semiconductor laser

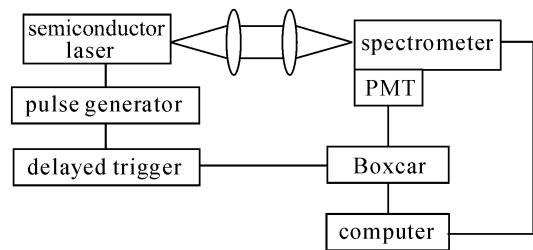


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

器施加方波电流脉冲,激光通过光谱仪 SPEX-1702,由光电倍增管(PMT)转换为电信号。激光器驱动电流脉冲的同步信号触发取样积分器取样门信号。调节取样积分器取样门对于触发脉冲的延迟时间,对光电倍增管输出的电信号在脉冲宽度内进行取样;用计算机采集到取样积分器的输出信号,得到脉冲宽度不同时刻的光谱。根据光功率谱峰值波长的变化,就可以计算得到热弛豫时间。

图 1 是对单纵模激光器的模拟分析,对于多纵模激光器而言,原理是相同的,不同的是多纵模激光器的温度系数由纵模温度系数和光谱包络温度系数构成,其中纵模温度系数取决于材料折射率的温度效应,光谱包络峰值的温度系数取决于材料禁带宽度的温度效应。

## 3 实验结果与讨论

文中主要对两种半导体激光器的热弛豫时间进行测试。

第一种是 TO18 管壳封装的 AlGaAs/GaAs 低功率半导体激光器。激光器发光区的宽度为  $50 \mu\text{m}$ ,主要用作为低功率固体激光器及倍频绿光源的抽运。激光器阈值电流为  $40 \text{ mA}$ 。驱动电流

脉宽为500 μs,重复频率为100 Hz,测试电流脉冲峰值为300 mA.光谱仪狭缝宽度为30 μm,对应波长分辨率为0.03 nm.用光谱仪测得的激光器稳态工作发射光谱如图3所示.并通过不同占空比光谱的测量,得到该器件的热阻为150 K/W.图4为激光器脉冲宽度内不同测试时刻下激光器的光谱,即时间分辨谱.取样积分器取样脉冲信号宽度为0.5 μs,时间步长为0.05 ms.可以看到,光谱包络峰值波长

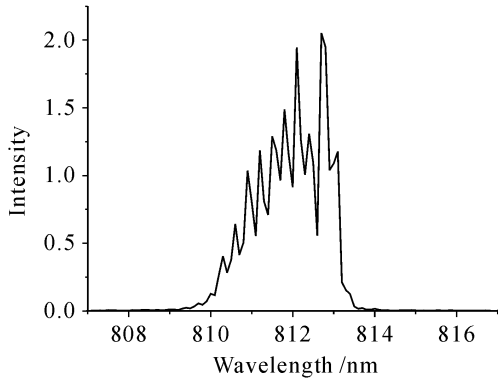


图3 TO18封装半导体激光器的激光光谱  
Fig.3 Lasing spectrum of TO18-can laser

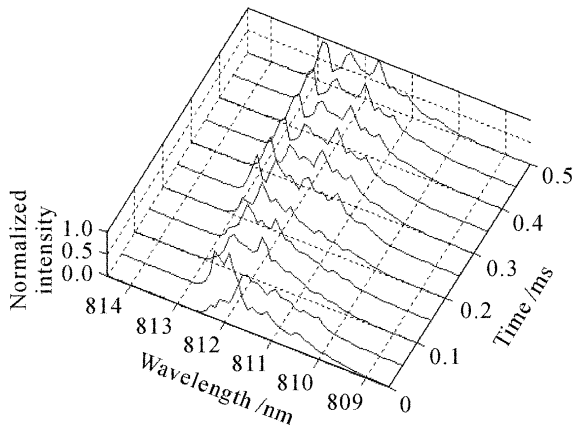


图4 脉冲宽度内不同时刻的光谱  
Fig.4 Time-resolved spectra during a pulse

向长波长方向移动,而且光谱有所展宽.反映了结温从脉冲电流上升沿开始随时间而升高的物理过程.由于激光器为多模激射,光谱会出现多个峰值.为此对每一个时间分辨光谱引入权重平均峰值波长  $\bar{\lambda} = \frac{\sum [I_i(\lambda_i)\lambda_i]}{\sum I(\lambda_i)}$ ,  $I_i$  是波长为  $\lambda_i$  时的光强.图5给出在脉宽范围内峰值波长随时间变化的曲线.可以看到,激光器的时间分辨谱的峰值波长随时间呈指数型上升,这与理论分析结果相符.由图5中的拟合曲线计算,得到此半导体激光器热弛豫时间为66 μs.测试数据反映了该激光器的动态热特性.实验测试不同温度条件下低占空比发光光谱的移动,得到波长温度系数为0.3 nm/K.由测试得到

的热弛豫时间可知,在500 μs的脉冲宽度内,激光器结温快速达到热平衡状态,平均峰值波长在脉冲宽度内变化量为0.8 nm,对应结温变化量约2.6 K,温升较小,波长稳定性良好.

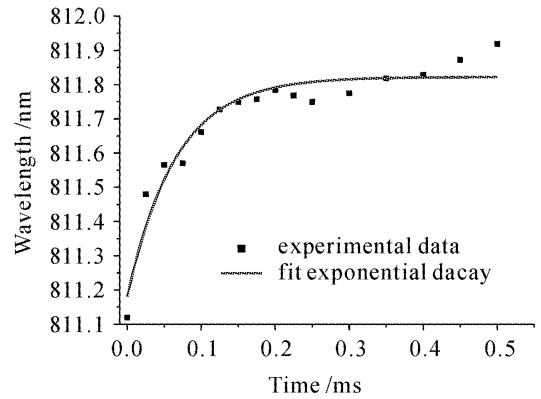


图5 权重平均峰值波长随时间的变化  
Fig.5 Relationship between weighted average wavelength and moment

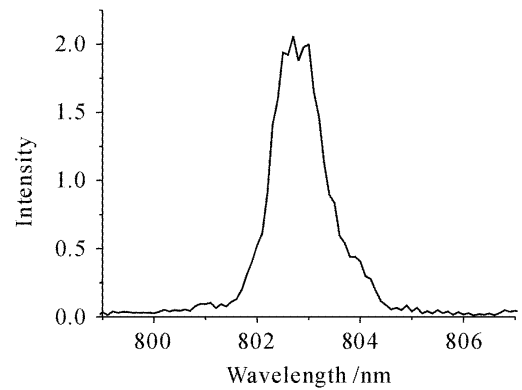


图6 大功率半导体激光器阵列的激光光谱  
Fig.6 Measured spectrum of high power laser diode array

第二种是大功率半导体激光器阵列.包含有25个条宽为200 μm,周期为400 μm,腔长为1.5 mm的发光单元,通常称为厘米-靶条(cm-Bar).芯片键合在两片钨铜热沉之间,热沉压触在20 °C水循环散热器上.脉冲运转器件的阈值电流为18 A.工作时注入电流脉宽500 μs,重复频率100 Hz,测试电流为50 A.由于激光器阵列发光区面积较大,需在光路中加透镜进行聚焦.测量光谱如图6所示,测得器件的热阻为1.2 K/W.

图7为该激光器的时间分辨光谱.测试中取样积分器取样脉冲信号宽度设定为50 ns.图8给出了脉宽内权重平均峰值波长随时间的变化.由图8中的拟合曲线计算得到,该激光器的热弛豫时间为96 μs.由测试得到的结果可知,在500 μs的脉冲宽度内,平均峰值波长在脉冲宽度内变化量约为

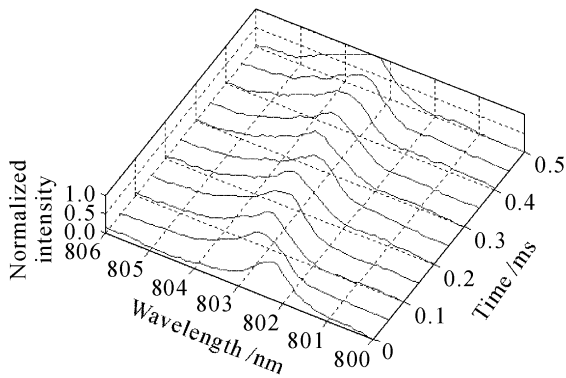


图7 半导体激光器阵列的时间分辨谱

Fig. 7 Time-resolved spectra of laser diode array

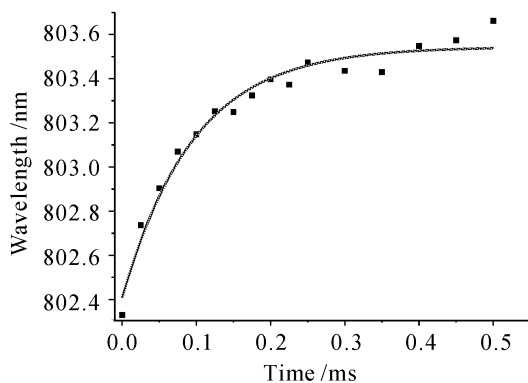


图8 激光器阵列波长随时间的变化关系

Fig. 8 Relationship of weighted average wavelength of laser diode array and time

1.2 nm, 对应结温变化量为4 K。表明这种封装形式散热较好, 热弛豫时间也较小, 激光器结温能快速达到热平衡状态, 用于抽运固体激光器, 可以达到较高的抽运效率。

文中采用的测量激光器动态热特性的方法, 与文献[7,8]中的通过阈值电流、斜率效率、光谱分辨光波形的的方法相比, 更直观, 更简单。该方法不需要文献[9]中的高速光开关, 成本较低。实验测量精度主要取决于以下几个方面: 实验测试器件为大功率宽条形激光器, 纵模特性比较复杂。虽然引入加权平均峰值波长的概念, 但与理论曲线相比仍然会发生一定的偏离。如果被测器件为单纵模或纵模结构简单的激光器, 结果就会更为精确。此外激光器驱

动电流信号的抖动和取样积分器的门信号的漂移也带来一定的误差。对器件的多次测试表明, 用该方法确定的热弛豫时间的重复性误差约为10  $\mu$ s。

## 4 结 论

新的测试半导体激光器的动态热特性参数的方法, 与文献报道的方法相比, 具有设备成本较低, 数据处理比较简单的优点。对脉冲工作状态下 TO-18 封装的 AlGaAs/GaAs 半导体激光器和厘米-靶条激光器阵列的热弛豫时间进行了测试, 分别得到 66  $\mu$ s 和 96  $\mu$ s 的结果。研究半导体激光器的热特性, 对大功率半导体激光器作为全固化固体激光器抽运源使用的性能及其改进有着重要的意义。

## 参 考 文 献

- 1 John G. Edriz, Mitral Vakili, Gerald S. Browder *et al.*. High power diode laser arrays [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4):952~965
- 2 R. Comiskey, R. Beach, D. Munding. Diode pumped 70 watt average power Nd:YAG laser [C]. *OSA Proc. Advanced Solid-State Lasers*, 1991, **10**:251~254
- 3 H. Injeyan, R. J. St. Pierre, J. G. Berg *et al.*. Diode array pumped kilowatt laser development [C]. *Tech. Dig. 1994 Conf. Lasers Electro-Optics (CLEO)*, 1994, paper CThC1. 281
- 4 H. Y. Zhang, D. Pinjala, P. K. Chan *et al.*. Thermal analysis and modeling of diode array integrated with directional liquid-cooled heat sink [C]. 2004 Inter Society Conference on Thermal Phenomenon, 2004. 331~338
- 5 R. Pernas, M. Sanchez, R. Pena-Sierra *et al.*. A new method to determine the thermal resistance in semiconductor lasers [C]. Fourth IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems, 2002. 17~19
- 6 Jason Carter, David Snyder, Jerry Reichenbaugh. Temperature dependence of optical wavelength shift as a validation technique for technique for pulsed laser diode array thermal modeling [C]. Proceeding of IEEE Semiconductor Thermal Measurement & Management Symposium, 2003. 357~363
- 7 H. I. Abdelkader, H. H. Hausien, J. D. Martin. Temperature rise and thermal rise-time measurement of a semiconductor laser diode [J]. *J. Rev. Sci. Instrum.*, 1992, **63**(3):2004~2007
- 8 Chen Chen, Guofeng Xin, Ronghui Qu *et al.*. Measurement of thermal rise-time of a laser diode based on spectrally resolved waveforms [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **206**(1):223~226
- 9 M. Voss, C. Lier, U. Menzel *et al.*. Time-resolved emission studies of GaAs/AlGaAs laser diode arrays on different heat sinks [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, **79**(2):1170~1172