

文章编号: 0258-7025(2008)09-1346-04

高功率半导体激光器电压饱和特性与器件质量

石家纬 梁庆成 曹军胜 刘奎学 郭树旭 李红岩 胡贵军

(吉林大学电子科学与工程学院, 集成光电子国家重点实验室吉林大学实验区, 吉林 长春 130012)

摘要 为实现对高功率半导体激光器快速、有效、无损的质量检测和可靠性筛选, 对器件进行了电导数和光导数测试及分析。结果表明高功率半导体激光器的结电压饱和特性与其质量和可靠性紧密相关。结电压饱和特性不好的器件一般都存在某种缺陷, 结电压饱和特性的差异超出一定范围的同种类器件一定是质量和可靠性差的器件。因此, 阈值处电导数曲线的下沉高度 h 值可作为器件筛选的一个判据。用模拟测量的方法, 对阵列器件和组成它的单元器件的电压饱和特性的相关性进行了研究, 阵列器件的电压饱和特性与组成它的单元器件的一致性(均匀性)紧密相关。均匀性不好的器件的电压饱和特性也不好。

关键词 激光器; 可靠性检测; 导数技术; 高功率半导体激光器

中图分类号 TN 248.4 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20083509.1346

Junction Voltage Saturation and Quality of High Power Semiconductor Lasers

Shi Jiawei Liang Qingcheng Cao Junsheng Liu Kuixue
Guo Shuxu Li Hongyan Hu Guijun

(College of Electronic Science and Engineering, Jilin University,

National Joint Laboratory for Integrated Opto-Electronics, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China)

Abstract To distinguish the different reliability and quality of the high power laser diodes facilely, efficiently and nondestructively, some high power laser diode devices were measured and studied with electrical and optical derivative techniques. The results show that the value of junction voltage saturation is a valuable parameter. It closely relates with the quality and reliability of the high power semiconductor laser. The devices with poor junction voltage saturation have so certain defect. For a certain kind of devices, the values of junction voltage saturation are in a certain range. And the device with the values overstepping the range is an unqualified device. Thus, the h value of the dip at the threshold is a valuable parameter to judge the device quality. Furthermore, the laser diode array simulated with shunt-wound laser diodes was measured. The relation between cells which compose array laser and array laser itself was studied. The results show that the junction voltage saturation of the laser diode array is correlated closely with the uniformity of its cells. If the uniformity of the cells composing the laser diode array was bad, the laser diode array itself is sure to have poor junction voltage saturation.

Key words lasers; measure reliability; derivative technology; high power semiconductor laser

1 引 言

高功率半导体激光器在高新技术领域有着广泛的应用^[1~3], 且随着科技的进步其应用会越来越广泛。如何对其进行质量评估和可靠性筛选有重要意义, 对半导体激光器的筛选, 通用的方法是电老化, 但

它的效率低。特别是对大功率激光器, 驱动电流大, 对老化台有更高的要求; 阵列激光器驱动电流更大, 价格昂贵, 如用电老化进行质量评价和筛选不仅耗电费时, 而且影响使用寿命, 如带来损伤损失很大。建立一种有效、方便、无损、快速的检测方法很有必要。

收稿日期: 2007-12-03; **收到修改稿日期:** 2008-01-30

基金项目: 国家自然科学基金(60471009), 吉林省重大工程项目(200403001-4)和长春市科技局国际合作项目(06GH06)资助课题。

作者简介: 石家纬(1940—), 男, 吉林人, 教授, 博士生导师, 目前从事半导体光电子学方面的研究。

E-mail: shijw@jlu.edu.cn

2 半导体激光器的结电压饱和特性及测试方法

为了满足半导体激光器的激射条件和提高性能的要求,要有三个限制,即载流子限制、电流限制和光限制,其等效电路如图 1 所示。电导数测试给出的测试曲线如图 2 所示。

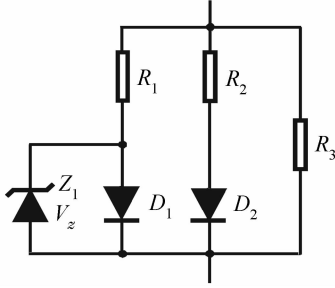


图 1 半导体激光器的等效电路

Fig. 1 Diagram of equivalent circuit of LD

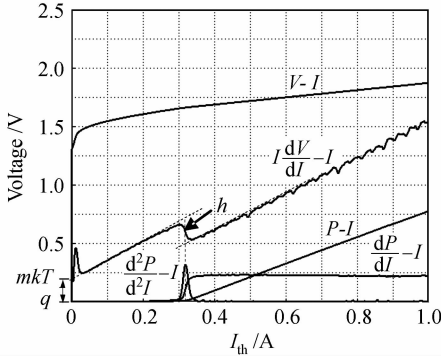


图 2 半导体激光器的典型测试曲线(78号)

Fig. 2 Typical measurement curve of LD (No. 78)

曲线在激光器的激射阈值处有一下沉,是由于半导体激光器由自发辐射转变为受激辐射时,注入的载流子电子和空穴高速率复合,使得电子和空穴的准费米能级不随注入电流的增加而改变,保持恒定,称之为结电压饱和,这时结电压对电流的微分为零。经典的二极管方程式为

$$I = I_0 \left(\exp \frac{qV}{mkT} - 1 \right), \quad (1)$$

由图 1 的等效电路可给出

$$\frac{dV}{dI} = [(m_1 kT/qi_1 + R_1)^{-1} + (m_2 kT/qi_2 + R_2)^{-1} + R_3^{-1}]^{-1}, \quad I < I_{th} \quad (2a)$$

$$\frac{dV}{dI} = [R_1^{-1} + (m_2 kT/qi_2 + R_2)^{-1} + R_3^{-1}]^{-1}, \quad I \geq I_{th} \quad (2b)$$

式中 V 为加在半导体激光器上的电压, I 为流经半导体激光器的总电流, I_{th} 为激光器的阈值电流, R_1 ,

R_2, R_3 为线性电阻, m 为结的特征参量。比较式(2a)和(2b)两者相差 $(m_1 kT/qi_1)$ 项,是由结电压饱和引起的,在电导数曲线的阈值 I_{th} 处出现下沉,下沉的大小记为 h 。考虑载流子漏和双极输运,阈值前后电导数曲线的变化为^[4]

$$h = \left| (b+1)\gamma\delta R^3 I_{th}^2 - \frac{mkT}{q} \right|, \quad (3)$$

式中 $b = \mu_n/\mu_p$ 为电子和空穴迁移率之比, R 为限制层电阻, $\delta = \mu_q^2 qA/Bd_a l^2$, μ_q 为多数载流子的迁移率, d_a 为有源层厚度, B 为辐射复合系数, A 为结面积, l 为限制层厚度, $\gamma \propto \exp(-E_g/kT)$, 为一个与温度有强依赖关系的函数。由(3)式可见,如果第一项为零,则下沉为 mkT/q , 这是理想情况;如果第一项不为零,则下沉变小,第一项越大,下沉越小;当第一项等于或大于第二项时,下沉为零或突起。我们对中小功率半导体激光器讨论了这个问题^[5]。

关于半导体激光器激射时的结电压饱和问题已有一些文章进行了讨论。Paoli 等^[6,7]指出电压饱和的损失与非线性同时出现,第二个丝状体激射可出现第二次电压饱和,并依据复合决定的电流-电压关系给出了 1~3 阶电导数计算,载流子浓度和有效复合系数之间的关系;Hiroshi 等^[8]以速率方程和扩散方程为基础,给出电流密度和结电压之间的关系,在速率方程中考虑了边缘非激射区和侧向载流子扩散以及自发发射系数在激射时对微分电阻变化的影响,从理论和实验上讨论了结电压饱和特性;J. Diaz 等^[9]对高功率 808 nm 无铝激光器的少数载流子漏的研究表明,无铝器件由于限制势垒对电子的漏限制不好而使下沉变小。

总之,使下沉 h 变化的因素可归结为:有源层中非辐射复合中心的存在或存在侧向漏电流使 τ_s (载流子自发辐射寿命)变小;有源层中有载流子积累或串联电阻加大影响载流子输运;有源区均匀性不好存在丝状发光区;结区完整性不好影响注入;异质结势垒变小载流子漏加大等。

3 高功率半导体激光器电压饱和特性的测试

用电导数技术测试了百余支 808 nm 高功率 GaAs 半导体激光器,由电导数曲线给出的电压饱和特性多种多样, No. 98 器件下沉最大,为 42.85 mV,有的下沉很小甚至看不出,也有的向上。图 3 给出几条典型曲线加以说明。

从曲线可以看出, No. 118 器件的电导数曲线在

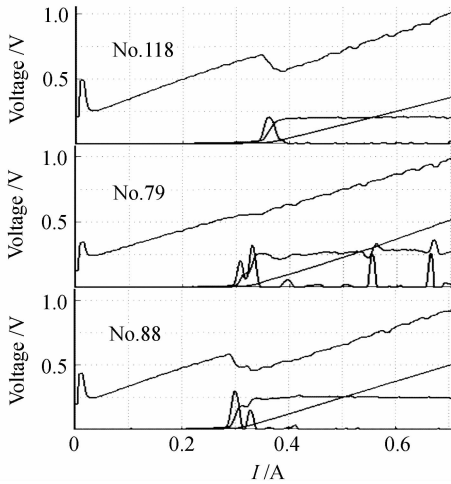


图3 No. 118, 79, 88 器件的测试曲线

Fig. 3 Measurement curves of No. 118, 79, 88 LD

表1 阵列半导体激光器的 h 值Table 1 Value h of laser diode arrays

ID	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A ₆	A ₇	A ₈	A ₉	A ₁₀	A ₁₁
h / mV	37.79	34.96	34.49	31.59	40.41	19.60	35.69	28.68	14.02	28.20	33.14
ID	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈	B ₉	B ₁₀	B ₁₁
h / mV	30.39	30.41	27.71	12.50	14.59	29.25	28.69	27.73	29.89	27.96	28.13

对 A 系, 下沉大多在 30~35 mV。对 B 系, 下沉大多在 20~30 mV。A 系下沉小于 20 mV 的有两支, 为 A₆, A₉。B 系下沉小于 15 mV 的有两支, 为 B₁, B₅。图 4(a) 为 A₂ 和 A₆ 的电导数和光导数曲线, 图 4(b) 为 B₂ 和 B₄ 的电导数和光导数曲线, 从图中对比可见 h 大的器件各参数都较好, h 小的器件显然不如 h 大的器件。

A 系与 B 系相比, A 系器件的 h 值较 B 系器件的 h 值要大, 这与 A 系器件的输出功率较 B 系小、所含的单元器件数量少有关, 这也与后面叙述的组合模拟实验给出的规律是一致的。

为了分析阵列器件的电压饱和特性与组成阵列单元器件之间的关联性, 进行了模拟测量。分别用 808 nm 高功率 GaAs 量子阱单管半导体激光器进行两管、三管、四管并联组合, 得出四种研究结果: 1) 参与组合的单元器件的下沉大, 组合后的器件下沉也大; 2) 参与组合的单元器件有下沉小的, 影响组合后的器件下沉变小; 3) 参与组合的器件分散性大, 组合后下沉变小或平缓; 4) 参与组合的器件愈多, 分散性愈大, 组合后下沉愈不明显, 情况愈复杂。

由结果可见, 下沉大小与组成阵列的单元器件的均匀性(一致性)有关。作为阵列器件的均匀性是可靠性的关键参数^[10]。

阈值电流处具有很陡的下沉, 表明这支器件的结电压饱和特性很好, 有源区均匀, 在同一电流下有源区同时满足激射条件。而 No. 79 器件的下沉小且缓, 其有源区可能出现多丝状发光区, 激射不在同一电流下发生。从二阶光导数曲线看, 有多峰出现, 表明输出光功率有变化, 其中有的峰可能与模式跳变有关。No. 88 器件的电导数曲线在阈值附近出现台阶, 相应位置的二阶光导数曲线出现双峰, 与丝状发光引起的二次电压饱和有关。

4 阵列半导体激光器的电压饱和特性

对 22 支 808 nm 高功率 GaAs 量子阱阵列半导体激光器进行了电导数测试, 其中 11 支输出光功率为 20 W, 为 A 系, 另 11 支输出光功率为 40 W 的器件, 为 B 系。测试给出各器件的下沉 h 值如表 1 所示。

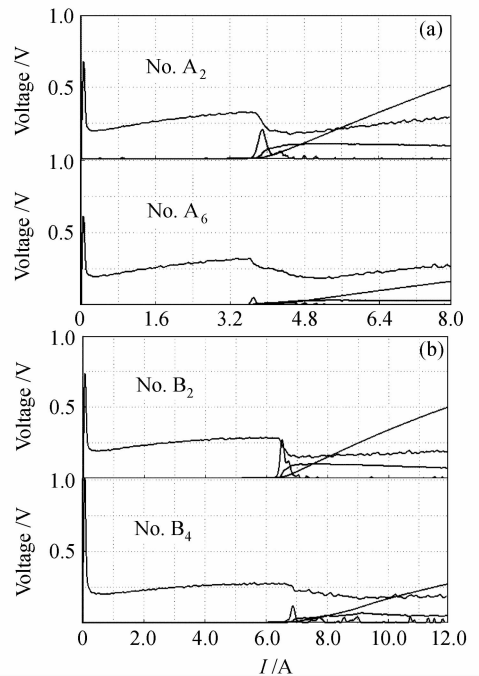


图4 阵列器件的测试曲线

Fig. 4 Measurement curves of LD array

5 电压饱和特性与器件质量

对 105 支 808 nm 高功率 GaAs 量子阱半导体激光器的电导数测试得出的电压饱和特性分析得

到:有明显下沉的 44 支,它们的阈值、输出功率、效率等都处于正常值,电导数曲线形状正常;下沉不明显的器件有 61 支,无明显下沉的器件包含几种情况:1) 输出光功率小的 11 支;2) 电导数曲线的初始峰大的 16 支;3) 电导数曲线上有多峰或较大的起伏的 20 支。

其他 14 支,情况较复杂,有的 m 较大,有的 b 值偏大,有的 R_s (串联电阻)值稍大,也有个别器件的各参数未见异常。

关于半导体激光器的电导数参数与器件质量的相关性,在以前工作的基础上^[11,12],对高功率和阵列激光器做了进一步研究,发现电压饱和特性和器件质量及可靠性紧密相关。

6 结 论

1) 使高功率半导体激光器的电压饱和特性变差的因素也是使高功率半导体激光器质量和可靠性变差的原因。

2) 电压饱和和特性不好的器件多数是质量和可靠性差的器件,因此,高功率半导体激光器的电压饱和和特性是其质量和可靠性的一个重要标志。

3) 阵列半导体激光器的电压饱和特性与其单元器件的均匀性关系密切,因此,也是阵列半导体激光器的质量和可靠性的一个重要标志。

4) 不同材料系、不同器件结构以及不同工艺制备的器件电压饱和特性会有所差异,但是同种类器件电压饱和特性的差异超出一定范围的器件是质量差的器件,因此 h 值的大小可作为器件筛选的一个判据。

参 考 文 献

1 Chunyu Wang, Huanguo Zang, Xiaoli Li *et al.*. LD-pumped

- high repetition rate Q-switched Nd:YVO₄ laser by using La₃Ga₅SiO₁₄ single crystal electro-optic modulator [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(6):329~331
- 2 Lü Yanfei, Tan Huiming, Qian Longsheng. Laser diode array pumped Nd:YAG dual wavelength laser with intracavity sum-frequency mixing at 589 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4):438~442
吕彦飞,檀慧明,钱龙生. 激光二极管阵列抽运 Nd:YAG 腔内双波长运转 589 nm 和频激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4):438~442
- 3 Xu Shixiang, Li Wenxue, Hao Qiang *et al.*. Laser diode-pumped efficient tunable Yb:LYSO laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5):799~800
徐世祥,李文雪,郝强等. 半导体激光器抽运新型高效、调谐 Yb:LYSO 激光器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5):799~800
- 4 P. J. Anthony, N. E. Schumaber. Ambipolar transport in double heterostructure injection lasers [J]. *IEEE. Electron. Device Lett.*, 1980, **4**(1):58~60
- 5 Shi Jiawei, Jin Enshun, Gao Dingsan. The junction voltage saturation and reliability of semiconductor lasers [J]. *Optical and Quantum Electron.*, 1992, **24**:775~781
- 6 Thomas L. Paoli, Peter A. Barnes. Saturation of the junction voltage in stripe-geometry (AlGa)As double-heterostructure junction lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1976, **28**(12):714~716
- 7 Thomas L. Paoli. Theoretical derivatives of the electrical characteristic of a junction laser operated in the vicinity of threshold [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1978, **QE-14**(1):62~68
- 8 Hiroshi Ishikawa, Kiyoshi Hanamitsu, Masahito Takusagawa. Lasing-induced change in the differential resistance of stripe geometry Ga_{1-x}Al_xAs DH lasers [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1979, **18**(2):331~341
- 9 J. Diaz, I. Eliashevich, H. Yi *et al.*. Theoretical investigation of minority carrier leakages of high-power 0.8 μm InGaAsP/InGaP/GaAs laser diodes [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(18):2260~2262
- 10 Dan Botez, Don R. Scifres. Diode Laser Arrays [M]. England: Cambridge University Press, 1994. Chapter 7
- 11 Shi Jiawei, Jin Enshun, Li Hongyan *et al.*. The characteristic junction parameter of a semiconductor laser and its relation with reliability [J]. *Optical and Quantum Electron.*, 1996, **28**(6):647~651
- 12 Shi Jiawei, Jin Enshun, Ma Jing *et al.*. b and its temperature dependence are the important criteria of the reliability of semiconductor lasers [J]. *Microelectronics and Reliability*, 1994, **34**(7):1405~1408