

# 半导体激光器列阵的电导数及其可靠性

曹军胜<sup>1</sup>, 郭树旭<sup>2</sup>, 郜峰利<sup>2</sup>, 张爽<sup>2</sup>, 梁庆成<sup>2</sup>, 王立军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2. 集成光电子学国家重点联合实验室, 长春 130012)

**摘要:** 在研究半导体激光器电导数与可靠性的基础上, 设计了单管激光器并联实验系统, 利用单管激光器并联模拟列阵的方法研究了激光器列阵的可靠性在其电导数曲线和参数上的体现, 该实验结果为利用电导数参数作为列阵可靠性判据提供了参考。

**关键词:** 半导体激光器; 激光器列阵; 电导数; 可靠性

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-5868(2010)04-0507-05

## Electrical Derivative of Semiconductor Laser Array and its Reliability

CAO Junsheng<sup>1</sup>, GUO Shuxu<sup>2</sup>, GAO Fengli<sup>2</sup>, ZHANG Shuang<sup>2</sup>, LIANG Qingcheng<sup>2</sup>, WANG Lijun<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, CHN;

2. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Changchun 130012, CHN)

**Abstract:** Based on the study of the relationship of electrical derivative of semiconductor lasers with their reliability, a test system is designed to measure the electrical derivative of lasers in parallel, from which the characteristics of laser arrays could be simulated to a certain extent. Test result shows that the reliability of laser arrays could be reflected in the electrical derivative parameters. The result can offer references for the criterions of laser arrays' reliability.

**Key words:** semiconductor laser; laser array; electrical derivative; reliability

## 0 引言

随着应用领域对激光器输出光功率的不断提高, 高功率激光器列阵的应用越来越广泛<sup>[1-2]</sup>。列阵的可靠性, 以及什么因素影响列阵器件的可靠性等, 都是列阵在满足各个领域应用之前需要解决的问题。由于激光器列阵是多个激光器集成化的整体, 其可靠性检测远比单管器件复杂。

本文将检测单管激光器可靠性的电导数方法为基础, 探讨将电导数方法推广应用到激光器列阵的可行性, 并试图总结出初步的可靠性判据。

## 1 电导数方法

半导体激光器的电导数就是激光器电压  $V$  对电流  $I$  的微分  $dV/dI$  与  $I$  的乘积。对于半导体激光器, 通常可画出等效电路如图 1 所示, 理想情况下简化成图 2 所示。图 1 和图 2 中  $D_1$ 、 $D_2$  为理想二极管,  $Z_1$  为理想齐纳二极管。

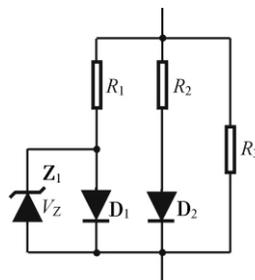


图 1 LD 等效电路

收稿日期: 2009-12-14.

基金项目: 集成光电子学国家重点联合实验室开放课题 (IOSKL-KF200908).

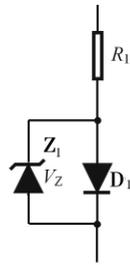


图2 LD简化等效电路

半导体激光器的电流电压方程可写为

$$I = I_s \{ \exp[qV_j/mkT] - 1 \} \quad (1)$$

其中,  $I_s$  为二极管  $D_1$  的反向饱和电流,  $m$  为其结特征参量,  $V_j$  是结电压。又因为

$$V = IR_1 + V_j \quad (2)$$

由式(1)、(2)可得

$$IdV/dI = mkT/q + IR_1 \quad (3)$$

理想半导体激光器中, 结电压即电子和空穴的准费米能级的间距, 由于受激发射, 电子和空穴高速复合, 在阈值以上为一定值, 因此  $I > I_{th}$  时,  $V$  与  $I$  关系变为

$$V = IR_1 + V_{jth} \quad (4)$$

其中阈值时结电压  $V_{jth}$  为常数, 因而阈值以上  $dV/dI$  为常数  $R_1$ 。  $IdV/dI$  与  $I$  线性相关, 可作出  $IdV/dI-I$  曲线如图3所示。

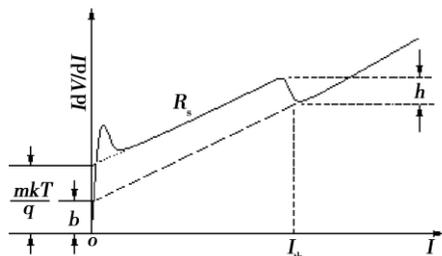


图3 半导体激光器电导数曲线

由上述分析可知在  $I = I_{th}$  时,  $IdV/dI$  有一突变  $mkT/q$ , 导致电导数曲线有一下沉, 下沉高度称为结电压饱和深度  $h$ , 阈值以下曲线的斜率反映半导体激光器的串联电阻  $R_s$ , 阈值以下曲线的截距为  $mkT/q$ , 其中  $k$  是波尔兹曼常数,  $T$  是绝对温度,  $q$  是电子电量, 据此可得结特征参量  $m$ 。阈值以上曲线的截距  $b$  反映限制层或结的完整性及载流子泄漏等。

半导体激光器的结特征参量  $m$ 、结电压饱和深度  $h$ 、截距  $b$ 、等效串联电阻  $R_s$ 、电导数曲线的初始峰、电导数曲线弯曲情况等都与器件的质量和可靠性有密切的联系<sup>[3-5]</sup>。电导数参数作为器件可靠性

的判据, 其取值范围需要通过部分器件样本进行加速老化实验来确定。首先对所选样本进行电导数测试, 得到其电导数参数及其它相关参数, 然后对样本器件进行加速电老化, 根据老化前后阈值电流变化率的大小, 或恒定工作电流下输出光功率变化率的大小, 或在恒定输出光功率下驱动电流变化率的大小, 将器件进行可靠性分类, 最后将电导数参数与可靠性程度对比, 从而总结归纳出高可靠性或不可靠器件其电导数参数的特征。以往的实验结果表明, 大部分可靠性较高的器件, 其电导数曲线较为规范, 有较小的初始峰、阈值电流、 $m$  值、 $b$  值, 以及较大的  $h$  值。

要将电导数分析的方法推广到列阵, 需要建立激光器列阵电导数测试系统以获取类似于单管激光器的电导数曲线以及相关参数。

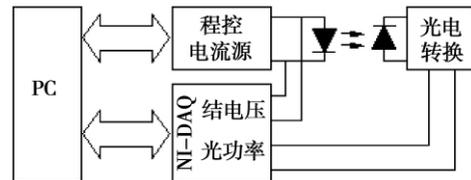


图4 激光器列阵测试系统框图

图4所示为激光器列阵测试系统的框图, 系统由主控微机、数据采集卡、程控电流源和光电转换等部分构成。微机通过 RS-232 接口控制电流源给激光器列阵提供步进扫描电流, 同时, 由数据采集卡 (NI-DAQ) 的两路模拟输入分别采集每个电流值所对应的列阵结电压和光功率, 作为列阵器件  $V-I$  曲线和  $P-I$  曲线的原始数据。将这两条曲线通过数值微分和曲线拟合等方法可进一步获得电导数曲线  $IdV/dI-I$ 、光导数曲线  $dP/dI-I$  等, 并提取出相应的参数。与单管测试系统相比, 主要不同之处在于驱动电源, 其输出电流远大于单管测试所需的电流。

图5所示为本系统实际测量得到的某支高功率半导体激光器列阵的四条曲线及相关参数, 图中1、2、3、4依次分别代表其伏安特性曲线 ( $V-I$ )、光功率曲线 ( $P-I$ )、电导数曲线 ( $IdV/dI-I$ ) 和光导数曲线 ( $dP/dI-I$ )。

与单管器件类似, 能直接说明电导数方法评价列阵质量有效性的应该是加速老化实验, 用老化结果来验证电导数评价器件质量、预测器件寿命的有效性。但由于激光器列阵功率大, 成本高, 进行加速寿命实验存在很大的困难, 因此考虑用间接的方法

研究列阵可靠性与电导数的相关性,进而得出可靠性判据。

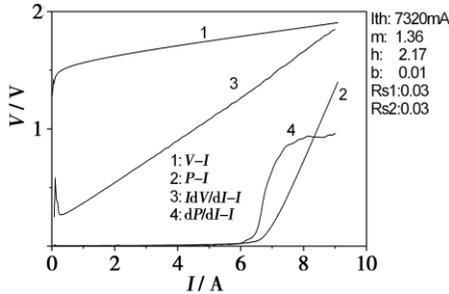


图5 列阵的典型测试结果

由于列阵激光器由多个管芯并联构成,每个单元相当于一个单管激光器,那么各个单元的特性都影响着列阵的整体特性,整体特性应该是各个单元特性的集中体现。因此,在理想情况(列阵各个单元一致性很好的情况)下,列阵的特性必然对应着各个组成单元的特性,有可能从列阵的电导数参数中获取列阵单元的信息。反过来说,对于非理想情况,即列阵单元均匀性(一致性)差的情况,均匀性差必然会导致列阵性能的降低和特征参数的异常。希望这能现在列阵的电导数曲线及其参数上。为此开展了多单管激光器的并联实验,研究目的包括理想情况下列阵与其单元的电导数参数的关系,以及列阵单元一致性较差时列阵电导数曲线及其参数的变化。一般认为列阵单元的均匀性是列阵可靠性的关键,均匀性较差的器件一定是不可靠器件。相反,对于均匀性良好的器件来说,列阵的参数则反映了其组成单元的特征。基于以上认识,开展了多单管激光器的并联实验。

## 2 激光器并联实验

### 2.1 实验系统设计

图6是多单管并联测试系统的结构框图。该系统由单管激光器电导数测试系统扩展而来,与单管测试系统相比,被测器件由1支扩展为多支并联,光电转换模块也相应地增加为多个。为了便于对不同器件的组合进行分别测量,可以通过串接在被测单管上的开关来控制该器件是否参与并联。显然,如果只选择一路器件进行测试,则与单管电导数测试系统完全一致。光功率的测量采用了多个光电探测器分别测量每路器件的光功率,然后用软件进行相加求得总的光功率。这样做的关键就是要确保多个光电探测器的一致性。本系统采取的措施是:设计

精密夹具,确保被测器件及其对应光电池的位置和距离的准确性,然后使用同一光源对各光电转换模块的增益进行校正。

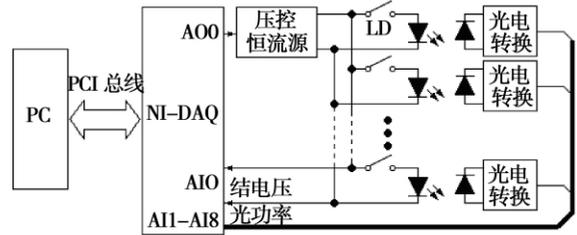


图6 多单管并联测试系统

### 2.2 实验方法

利用多管并联测试系统,可以开展各种并联实验来探讨列阵激光器与列阵单元的关系。比如,将参数相近的两管或多管并联,或将参数相差较大的两管或多管并联,或将几支参数相近的器件与一支其它器件相并联等,观察并联后总的电导数曲线及其参数与各单管参数之间的关系。

例如,h13与h35是同一批次中参数非常接近的两支器件,图7、图8分别是各自的电导数测试结果,其阈值电流均为204mA,结特征参量m分别为1.41和1.41,结电压饱和特性参数h分别为6.66mV和6.16mV,b值均为0.03,初始峰分别为

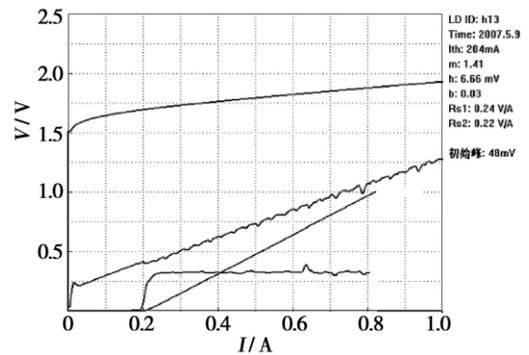


图7 #h13激光器的测试结果

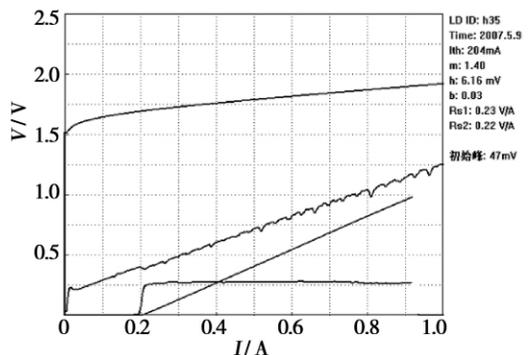


图8 #h35激光器的测试结果

48 mV 和 47 mV, 阈值前等效串联电阻分别为 0.24  $\Omega$  和 0.25  $\Omega$ 。

图 9 所示为 h13 与 h35 激光器并联后的测试结果, 其中  $m$  值为 1.40,  $h$  值为 7.28 mV,  $b$  值为 0.03, 初始峰为 43 mV。可见  $h_{13}$  与  $h_{35}$  激光器并联后的电导数参数与各自的参数基本一致, 而且阈值处仍有较好的结电压饱和特性, 表现为电导数曲线在阈值处的下沉, 以及光一阶导数良好的阶越特性。这些特征均是我们对高可靠列阵器件的预期。

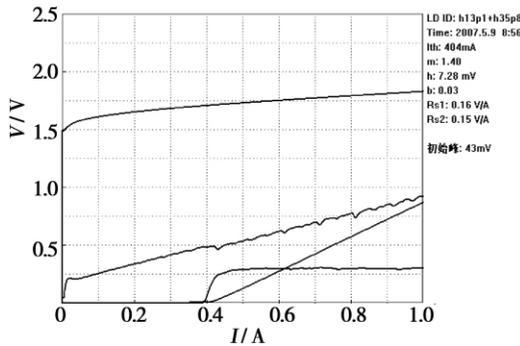


图 9 h13 与 h35 激光器并联后的测试结果

相反, t53、t55 和 t68 为同一批次中参数相差较大的 3 支激光器, 其主要参数对比如表 1 所示(表中  $I_{th}$  表示阈值电流,  $p$  表示初始峰)。

表 1 t53、t55 和 t68 三支器件的参数比较

LD	$I_{th}/mA$	$m$	$h/mV$	$b/mV$	$R_s/\Omega$	$p/mV$
t53	324	1.60	41.66	0.00	0.32	96
t55	298	1.59	35.27	0.00	0.33	59
t68	334	1.62	36.89	0.00	0.25	102

根据表 1, 这三支器件的阈值电流、等效串联电阻均相差较大, 但  $m$  值和  $b$  值较为一致, 也都有较好的结电压饱和特性。

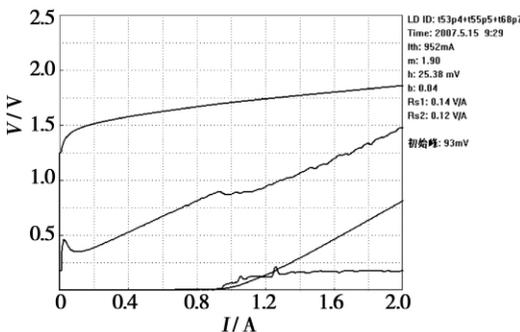


图 10 t53、t55 与 t68 激光器并联后的测试结果

图 10 所示为 t53、t55 和 t68 三支激光器并联后的测试结果, 其中  $m$  值为 1.90,  $h$  值为 25.38 mV,  $b$  值为 0.04 mV, 初始峰为 93 mV。可见,  $m$  值和  $b$  值

都有了显著的增大。这些特征均则是我们对低可靠阵列器件的预期。

我们根据大量的多单管并联实验结果进行了一些总结, 其中一些结论已经为之前的理论分析提供了佐证, 如列阵的  $m$  值与器件可靠性的关系<sup>[6]</sup>; 还有一些结论, 则启发我们寻找新的可靠性判据来评价阵列器件的质量。

### 3 实验结论

#### 3.1 列阵 $m$ 值与器件可靠性关系

参考文献[6]曾用理论分析和计算机仿真的方法对列阵  $m$  值与器件可靠性关系得出过“一致性良好的列阵其  $m$  值等于列阵单元的  $m$  值, 非理想情况下由于电流泄漏的影响列阵  $m$  值比单元的  $m$  值大”的结论, 这一结论在并联实验中得到了验证。

(1) 挑选了电导数参数相近的同类型单管激光器进行了多单管并联实验。例如, 表 2、表 3、表 4 分别列出了两管、三管、四管并联后的电导数测试结果, 表明并联后的  $m$  值基本保持不变。

表 2 h13、h35 两支器件的并联实验结果

LD	$I_{th}/mA$	$m$	$h/mV$	$b/mV$	$R_s/\Omega$	$p/mV$
h13	204	1.41	6.66	0.03	0.24	48
h35	204	1.40	6.16	0.03	0.23	47
并联	404	1.40	7.31	0.03	0.16	45

表 3 t38、t47、t69 三支器件的并联实验结果

LD	$I_{th}/mA$	$m$	$h/mV$	$b/mV$	$R_s/\Omega$	$p/mV$
t38	314	1.62	7.22	0.04	0.24	58
t47	302	1.61	9.46	0.04	0.25	56
t69	304	1.56	9.36	0.04	0.24	55
并联	948	1.62	7.81	0.04	0.13	54

表 4 h13、h26、h08、h35 四支器件的并联实验结果

LD	$I_{th}/mA$	$m$	$h/mV$	$b/mV$	$R_s/\Omega$	$p/mV$
h13	204	1.41	6.66	0.03	0.24	48
h26	204	1.50	5.68	0.04	0.20	55
h08	200	1.46	6.11	0.03	0.21	47
h35	204	1.40	6.16	0.03	0.23	47
并联	800	1.45	6.96	0.03	0.12	57

(2) 凡有大初始峰器件参与并联时, 总的  $m$  值一定偏大。(说明: 电导数曲线在小电流处有一尖峰, 根据并联线性电阻等效电路的分析可知这种器件有并联线性电阻漏电通道, 对应器件结构和制备工艺可能是器件电流限制结漏电、p-n 结不完整、界面不好和表面污染所致, 因此有较大初始峰的器件一定是不可靠的器件。)例如, 表 5-8 所示的并联实验中,  $t_{68}$  号激光器有大的初始峰及  $m$  值, 而其它参

与并联的激光器电导数参数均正常。实验结果表明,凡是  $t_{68}$  号激光器参与并联后,均导致较大初始峰及  $m$  值。

表5 t38、t47、t68、t69 四支激光器的并联实验结果

LD	$I_{th}/\text{mA}$	$m$	$h/\text{mV}$	$b/\text{mV}$	$R_s/\Omega$	$p/\text{mV}$
t38	334	1.64	7.47	0.04	0.24	56
t47	306	1.61	7.44	0.04	0.25	51
t68	390	1.95	28.11	0.01	0.23	96
t69	318	1.63	9.08	0.04	0.23	51
并联	1180	1.89	7.46	0.06	0.12	93

表6 t38、t47、t55、t68 四支激光器的并联实验结果

LD	$I_{th}/\text{mA}$	$m$	$h/\text{mV}$	$b/\text{mV}$	$R_s/\Omega$	$p/\text{mV}$
t38	334	1.64	7.47	0.04	0.24	56
t47	306	1.61	7.44	0.04	0.25	51
t55	326	1.66	36.55	0	0.32	65
t68	390	1.95	28.11	0.01	0.23	96
并联	1212	1.94	11.24	0.06	0.12	97

表7 t47、t55、t68、t69 四支激光器的并联实验结果

LD	$I_{th}/\text{mA}$	$m$	$h/\text{mV}$	$b/\text{mV}$	$R_s/\Omega$	$p/\text{mV}$
t47	306	1.61	7.44	0.04	0.25	51
t55	326	1.66	36.55	0	0.32	65
t68	390	1.95	28.11	0.01	0.23	96
t69	318	1.63	9.08	0.04	0.23	51
并联	1356	2.06	12.52	0.06	0.12	104

表8 t38、t55、t68、t69 四支激光器的并联实验结果

LD	$I_{th}/\text{mA}$	$m$	$h/\text{mV}$	$b/\text{mV}$	$R_s/\Omega$	$p/\text{mV}$
t38	334	1.64	7.47	0.04	0.24	56
t55	326	1.66	36.55	0	0.32	65
t68	390	1.95	28.11	0.01	0.23	96
t69	318	1.63	9.08	0.04	0.23	51
并联	1300	2.02	10.18	0.07	0.12	108

运用多单管并联实验结果研究列阵  $m$  值与器件可靠性的关系,可初步得出以下与列阵可靠性分析相关的结论:

(1)一致性良好的列阵其  $m$  值等于列阵单元的  $m$  值;

(2)有较大初始峰的器件参与并联时,并联后总的  $m$  值一定偏大;

(3)单元结特征参量的一致性变差将会导致列阵  $m$  值变大。

由此可见, $m$  值可以作为列阵可靠性的一个重要判据,同一批次的列阵器件中, $m$  值大的器件应属于低可靠性器件。

### 3.2 列阵 $h$ 值、 $b$ 值与器件可靠性关系

除  $m$  值外,还对多管并联实验结果中其他电导

数参数的规律做了初步总结:

(1)结电压饱和特性较差的器件参与并联后,总的结电压饱和特性也较差。也就是说,凡是  $h$  值较小的器件参与并联后,总的  $h$  值变小。

(2)并联结果中的  $b$  值较大时,几乎总是伴随着较大的初始峰或较小的  $h$  值。

总之,根据多单管并联实验来模拟不同质量的列阵器件,通过研究多单管并联后的电导数参数的规律来尝试给出列阵器件的电导数可靠性判据。对实验结果的分析初步表明,列阵器件具有与单管激光器相似的电导数可靠性判据,即高可靠性列阵应该有较小的  $m$  值、 $b$  值、初始峰  $p$  以及较大的  $h$  值。

## 4 结束语

在研究半导体激光器电导数与可靠性的基础上,采用多单管并联实验方法对列阵电导数参数与器件可靠性的关系进行了的探讨,并对可靠性判据进行了初步总结,结论与事先的推测基本一致。虽然并不能完全取代加速老化实验的作用,但多单管并联后能在一定程度上模拟列阵器件的行为,这对利用电导数参数作为列阵可靠性判据提供了参考,也可为深入研究单管和列阵性质提供了借鉴。

### 参考文献:

- [1] 张靖,刘刚明,田坤,等.大功率半导体激光器最新研究进展[J]. 半导体光电,2007,28(2):151-155.
- [2] 高劭宏,黄德修,高彦锟,等.用于光通信系统的可调谐半导体激光器[J]. 半导体光电,2005,26(1):1-5.
- [3] Li Hongyan, Qi Liyun, Shi Jiawei, et al. Effective method for evaluation of semiconductor laser quality [J]. Microelectronics Reliability, 2000, 40: 333-337.
- [4] 李红岩,石家纬,金恩顺,等.电导数测试用于大功率半导体激光器的快速筛选[J]. 中国激光,1999, A26(6): 507-510.
- [5] 石家纬,金恩顺,李红岩,等.一个检测半导体激光器质量的有效方法[J]. 半导体学报,1996,17(8):596-600.
- [6] 张爽,郭树旭,郭欣,等.激光器阵列的非本征理想因子[J]. 半导体学报,2007,28(5):87-92.

### 作者简介:

曹军胜(1978—),男,副研究员,从事半导体激光器的应用研究。

E-mail: caojunsheng@jlu.edu.cn