

# 半导体激光器电导数及其可靠性的研究

刘夏<sup>1,2</sup> 李特<sup>1</sup> 路国光<sup>2</sup> 郝明明<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学高功率半导体激光器国家重点实验室, 吉林 长春 130022

<sup>2</sup>工业和信息化部电子第五研究所 电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室, 广东 广州 510610

**摘要** 为了探索和验证半导体激光器电导数参数与其可靠性的关系,将12个半导体激光器串联后进行高温加速电老化,直到器件不激射。监测在加速老化过程中半导体激光器电导数参数的变化情况。通过分析老化期间监测的数据,发现电导数曲线在阈值电流处的下沉高度随着老化时间的增加而变小;特征参量与电导数曲线(在大于阈值电流的工作状态下)在电流 $I=0$ 处的截距值随着老化过程逐渐变大。并且特征参量的变化量在早期处于比较小的平稳状态,然后快速增加到一定值并保持一段时间,之后快速下降并最终稳定在比较小的值,这说明器件退化分为3个阶段:在早期退化较慢,之后退化很快并保持一定的退化速度,最后又到了慢速退化期。从实验结果得知电导数参量与器件的寿命和老化程度有密切关系,并且电导数参数可表征半导体激光器的退化状态。

**关键词** 激光器;半导体激光器;可靠性;电导数;加速老化

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.041404

## Research on Electric Derivatives and Reliability of Semiconductor Lasers

Liu Xia<sup>1,2</sup> Li Te<sup>1</sup> Lu Guoguang<sup>2</sup> Hao Mingming<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

<sup>2</sup>Science and Technology on Reliability Physics and Application of Electronic Component Laboratory, The 5th Electronics Research Institute of the Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou, Guangdong 510610, China

**Abstract** For exploring and proving the relationship between semiconductors lasers' electrical derivatives and their reliability, 12 semiconductor lasers are put in series to electric accelerated aging until the devices do not work. Monitor the variation of semiconductors' electric derivatives in the process. Then, the figure is gotten by dealing the experimental data. The experiment finds that the dip of the electric derivative curve at the threshold becomes smaller in the accelerated aging process; The characteristic parameter of junction and the intercept of the electrical derivative above the threshold at  $I=0$  become larger in the accelerated aging process. And the variable of characteristic parameter keeps a small one early. Then, it becomes larger and keeps a large one some time. Finally, it decreases quickly and keeps a small one. The phenomenon indicates that there are three stages of deterioration of devices: devices deteriorate slowly early, then deteriorate quickly and keep for some time, and devices deteriorate slowly again. There is a close relationship between electric derivatives and lifetime of devices and the deterioration of devices, and electric derivatives can characterize state of semiconductor lasers.

**Key words** lasers; semiconductor lasers; reliability; electric derivatives; accelerated aging

**OCIS codes** 140.2020 ; 140.3460 ; 140.5960

## 1 引言

半导体激光器越来越广泛地直接应用于材料加工、医疗及军事等领域<sup>[1]</sup>。半导体激光器可靠性的筛选

收稿日期: 2014-09-24; 收到修改稿日期: 2014-11-26; 网络出版日期: 2015-03-29

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ040077)、工业和信息化部电子第五研究所发展基金(13Q05)、国家自然科学基金(61107054)

作者简介: 刘夏(1989—),男,硕士研究生,主要从事半导体激光器方面的研究。E-mail: liu8313990@aliyun.com

导师简介: 李特(1981—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事高功率半导体激光器方面的研究。

E-mail: ltcust@gmail.com

\*通信联系人。E-mail: ciomp2007@163.com

和检测具有重要意义,常规方法通常是通过传统加速老化的方式来进行老化处理,这样的老化处理不但耗时间,而且耗费资源,并且容易导致器件老化。因此,建立一种快速筛选机制是非常必要的,电导数方法就是很重要的筛选方法之一<sup>[2]</sup>。

自从1976年Barnes等<sup>[3-4]</sup>首次提出电导数方法的构想评价半导体激光器可靠性以来,电导数方法越来越受到有关研究者的广泛关注。Joyce等<sup>[5]</sup>利用结电压饱和特性测量双异质结激光器。1982年,Wright等<sup>[6]</sup>根据掩埋异质结InGaAsP激光器的结构建立了电导数方法的等效电路模型。1985年,贝尔实验室的Choy在前人关于激光器电导数温度特性的基础上提出利用阈值后电导数曲线的参数来对退化快的器件进行筛选。目前,电导数方法筛选器件已经作为一个研究方向并且得到了极大发展,并引起了国内研究者的关注,吉林大学曹军胜、石家纬等<sup>[7-14]</sup>从事于电导数及其相关研究多年,在器件的电导数与可靠性关系到阵列的电导数与可靠性关系都做了深入的研究,并且推进了电导数方法筛选器件的设备开发。

## 2 电导数方法的基本原理

电导数就是结电压 $V$ 对电流 $I$ 的微分 $dV/dI$ 与 $I$ 的乘积,半导体激光器可以用一个等效电路来描述,用电导数测量可以得到器件的一些参数,半导体激光器的等效电路模型<sup>[6]</sup>如图1所示。

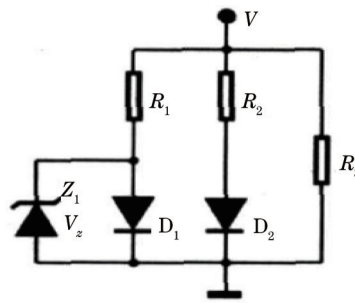


图1 半导体激光器等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit model of semiconductor lasers

半导体激光器的电压电流特性就是二极管电压电流特性,其特性方程为

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

式中 $V_j$ 是PN结上所加的电压, $I_0$ 为反向电流。若激光二极管 $I=I_0$ 所加的偏置电压为 $V$ , $R$ 为串联电阻,则

$$V_j = V - IR. \quad (2)$$

由(1)式和(2)式可得

$$I \frac{dV}{dI} = IR + \frac{mkT}{q}, \quad (3)$$

式中 $I dV/dI$ 与 $I$ 呈线性关系,其斜率为 $R$ ,截距为 $mkT/q$ , $m$ 为质量, $k$ 为玻尔兹曼常数, $T$ 为绝对温度, $q$ 为电子电荷。

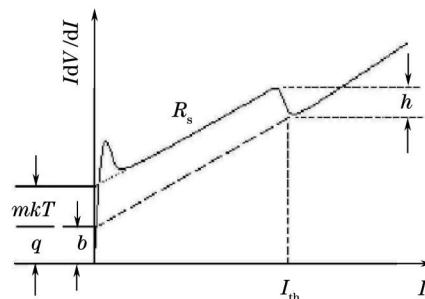


图2 理想电导数曲线

Fig.2 Ideal curve of electrical derivative

典型半导体激光器的电导数曲线如图2所示。其中 $R_s$ 为等效串联电阻、 $m$ 为结特征参量、 $b$ 为电导数曲线阈值电流之后部分曲线与 $Y$ 轴的截距, $h$ 为曲线在阈值电流处下沉高度。

理想情况下, $b$ 值应接近零,但实际情况比较复杂,阈值以上电导数曲线斜率可能与阈值前不同,而且曲线还可能弯曲。常见情况是阈值以后曲线下弯,使 $b$ 值变大,这是由于存在一个与PN结并联的非线性电阻路径。使 $h$ 值减小, $m$ 值变大的因素都可能使 $b$ 值变大。

$h$ 是由结饱和电压导致的, $b$ 受到非线性的并联电阻的显著影响。 $m$ 是PN结特性中的一个指数参数,涉及了材料和器件的结构参数,其对非辐射复合很敏感。PN结中有位错,而这些位错能够造成缺陷的产生。在耗尽区可以产生相当复杂的电效应。 $m$ 值的大小是二极管特性的一个重要标志,可以作为材料和工艺水平评定的一个重要参数<sup>[2-3,8]</sup>。

电导数( $I dV/dI$ )在形式上包含了对 $V-I$ 的一阶导数运算,可以反映 $V-I$ 特性的细节特征,对于器件的潜在缺陷比 $V-I$ 特性更为敏感;另一方面通过电导数检测方法可以提取出表征激光器特性的某些定量参数,从而使可靠性评价有了定量描述的依据,这种方法显然优于简单的 $V-I$ 检测。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 电导数参数测试条件

基于 Arrhenius 模型别对 5 个串联的蝶式封装的异质结条形半导体激光器进行加速老化,将这 5 个器件置于 80 °C 恒温老化箱体中,并且保持一定湿度,将每个器件固定在铝散热片上,通入 2A 恒流电流源,接通后总电压为 10.0 V。由于测量设备较大,并且测试设备不适宜在高温下工作,则每隔 48 h 将器件从老化箱中取出,为了保证了每一次测量器件的外界条件均相同,并且受到测试设备的限制,采用了每隔一段时间后取出测试而不选择在线测试。测试条件为在 25 °C 恒温室温下对器件测量其  $V-I-P$  特性和电导数等参数。

图 3 为试验老化环境以及样品器件工作状态。图 4 为在 25 °C 常温下对样品器件进行测试图。图 5 为测试设备的系统软件,以及测试过程中的曲线情况。试验的测试设备进行了校准,并且进行了环境适应性试验,确保了测试设备的测试数据的准确性和有效性。

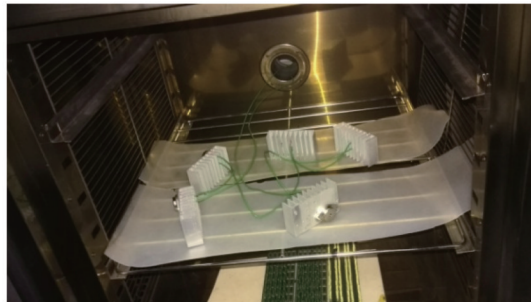


图3 器件加速老化环境图

Fig.3 Environment of accelerated aging experment

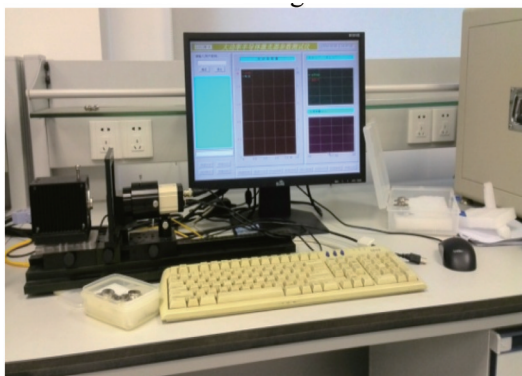


图4 测试设备图

Fig.4 Equipment of test

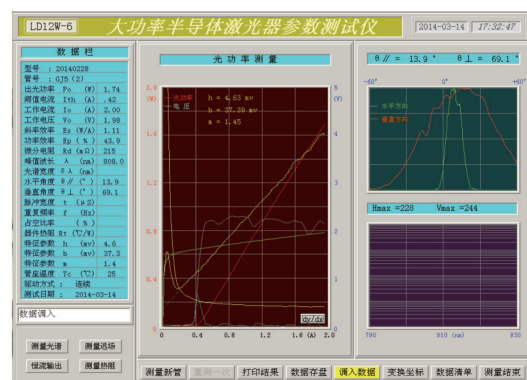


图5 测试软件

Fig.5 Software of test

#### 3.2 阈值电流变化情况

老化过程中始终保证恒定电流为 2 A,老化过程中,电压随着老化时间的变长不断变大,从起始的 10 V 变化至 10.8 V。说明样品在老化过程中电阻变大,并且在每次测试  $I-V-P$  曲线和电导数参数时,图 6~8 分别

为样品#A1、#A3、#A8在老化过程中阈值电流  $I_{th}$  的变化情况(定义阈值电流为0时器件不激射)

由图6、7、8可知:样品器件#A1、#A3、#A8的阈值电流呈现递增趋势。并且器件#A1呈现锯齿状递增,而器件#A3呈现先增后减再递增,最后不激射的老化情况,器件#A8阈值电流在老化240 h之前表现稳定,并且在之后的老化时间里阈值电流突然增大,随后再次减小。3个器件在老化过程中的阈值电流表现均不相同。

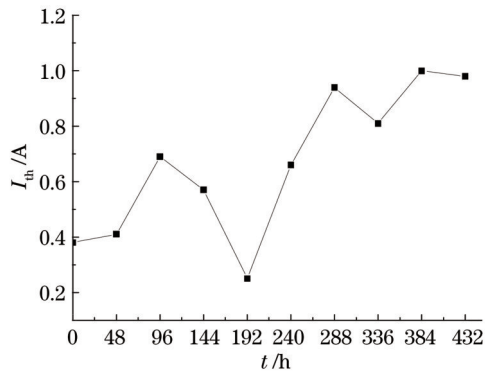


图6 #A1 阈值电流变化曲线

Fig.6 Curve of threshold current for #A1

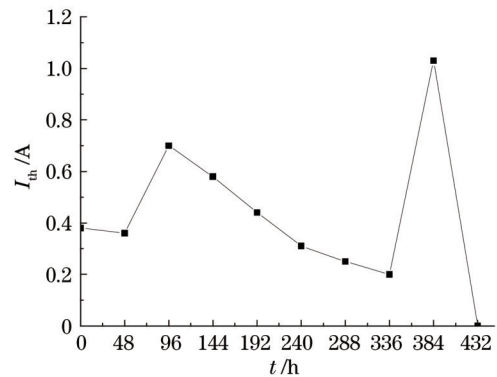


图7 #A3 阈值电流变化曲线

Fig.7 Curve of threshold current for #A3

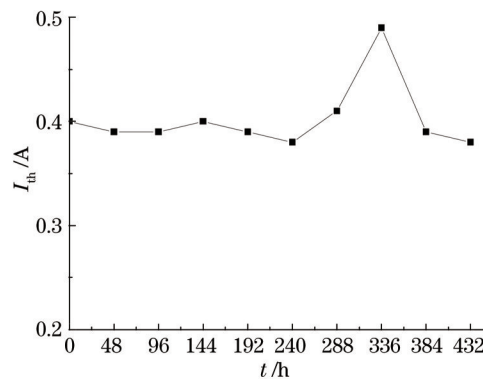


图8 #A8 阈值电流变化曲线

Fig.8 Curve of threshold current for #A8

### 3.3 输出功率变化情况

老化过程中记录了样品器件#A1、#A3、#A8的输出功率  $P$  的变化情况,如图9~11所示。

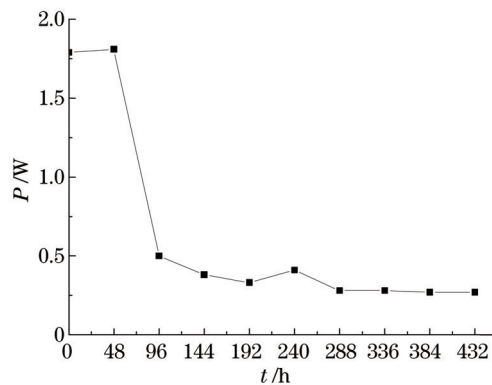


图9 #A1 输出功率变化曲线

Fig.9 Curve of output power for #A1

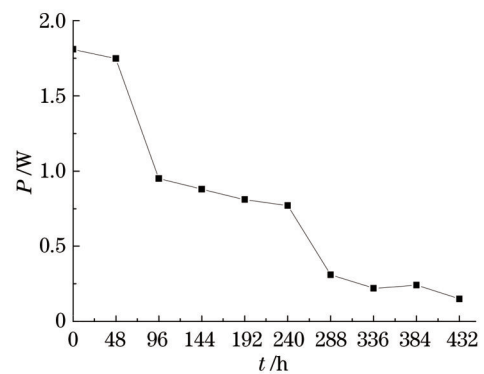


图10 #A3 输出功率变化曲线

Fig.10 Curve of output power for #A3

图9~11均表明器件在老化过程中输出功率呈现减小趋势,图9表明样品器件#A1在老化96 h后输出功率明显变小;图10表明样品器件#A3的输出功率呈阶梯式下降,直至器件不再激射;图11表明样品器件#A8在老化240~288 h之间输出功率突然变小。

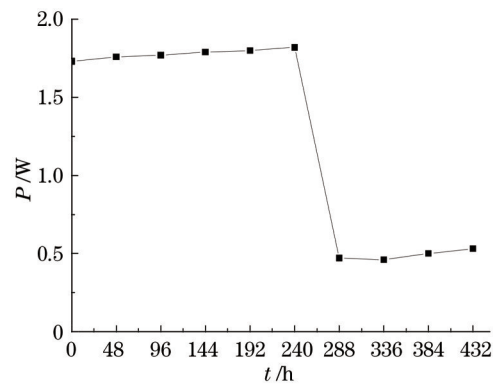


图 11 #A8输出功率变化曲线

Fig.11 Curve of output power for #A8

### 3.4 发散角变化情况

器件在通入 2 A 恒流源之后的工作状态下激光的发散角随着老化时间不断变化。阈值电流变大的情况下,斜率效率降低,发散角变小,其中快轴变化较为明显。

图 12~14 分别为样品器件#A1、#A3、#A8 的发散角变化图,分别表明了#A1、#A3、#A8 样品器件的发散角呈现递减趋势。并且样品器件#A8 的快、慢轴变化与图 11 对应,老化时间为 240~288 h 区间内, #A8 阈值电流升高,功率降低,其发散角也突然减小。说明器件在老化过程中,器件的输出阈值电流、功率、发散角变化情况具有相关性。

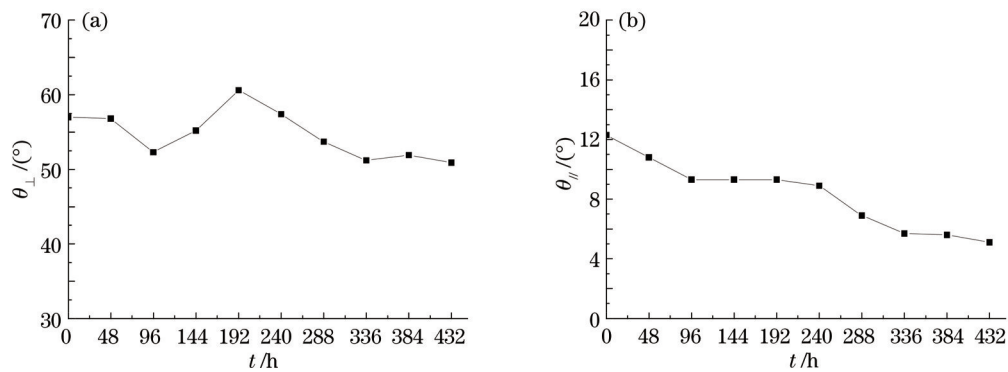


图 12 #A1(a)快轴和(b)慢轴发散角的变化曲线。(a) 快轴发散角;(b) 慢轴发散角

Fig.12 Change curve of (a) fast axis and (b) slow axis angle for #A1

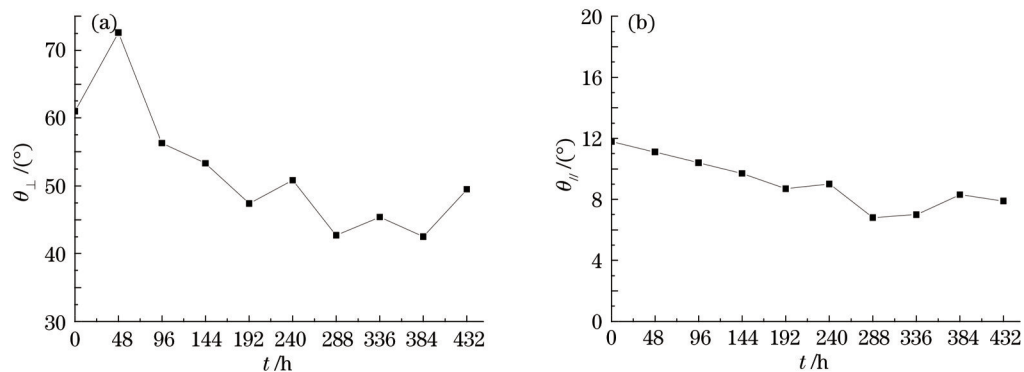


图 13 #A3(a)快轴和(b)慢轴发散角变化曲线

Fig.13 Change curve of (a) fast axis and (b) slow axis angle for #A3

半导体激光器的快轴方向发散角度由外延层的结构决定,确切地说是由波导模式确定,而波导模式又主要由波导的折射率构型决定<sup>[15-16]</sup>。由此可知在器件老化过程中发散角的变化主要是因为外延层结构的变化,外延层在生长过程中的工艺水平和限制层的缺陷扩展都与发散角密切相关,发散角的变化直接反映了外延层结构的变化。

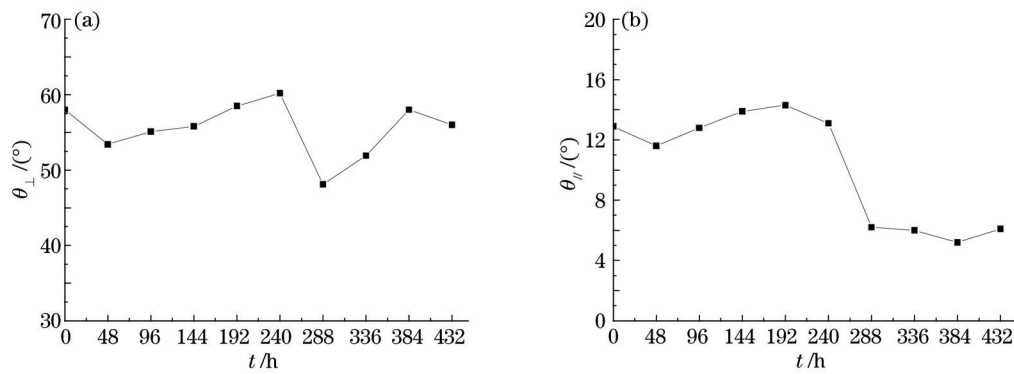


图14 #A8(a)快轴和(b)慢轴发散角的变化曲线

Fig.14 Change curve of (a) fast axis and (b) slow axis angle for #A8

### 3.5 电导数参数与寿命关系

规定器件输出功率在低于80%为失效,工作至失效时间为其寿命。老化过程中得到的寿命和器件初始时电导数参数如表1所示。

表1 样品寿命和电导数参数

Table 1 Lifetime and electrical derivatives of samples

No. of sample	Life time $\tau$ /h	$h$ /mV	$b$	$m$
A19	13	2.7	312	10.2
A7	21	2.8	230	8.7
A11	53	3.7	168	5.2
A1	61	5.4	43.9	1.7
A3	78	4.5	31.6	1.2
A5	234	3.6	41.7	0.6
A8	276	168.7	3.2	0.2

由表1可知,器件寿命与其电导数参数关系密切, $h$ 值较大的器件寿命较长,而 $b$ 、 $m$ 较大的器件寿命较短。因此可以定性分析电导数和器件寿命关系,即 $h$ 较小而 $b$ 、 $m$ 较大的器件寿命较长。

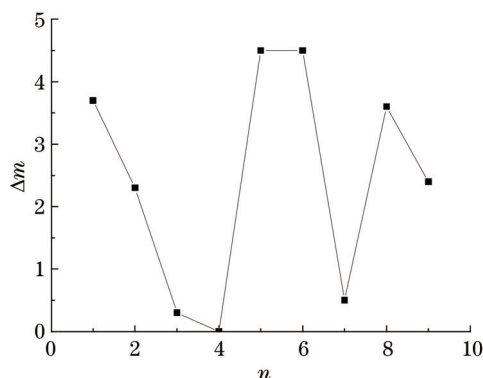
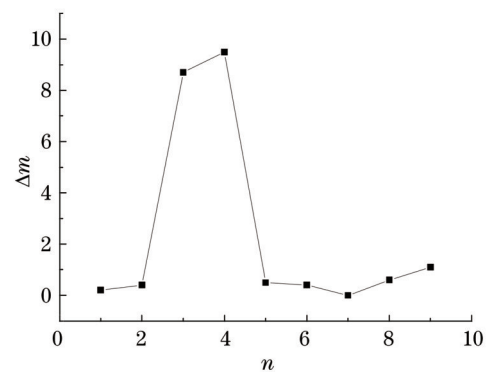
### 3.6 $m$ 值的变化量与老化关系

二极管电流电压方程为

$$I = I_0 \{ \exp[qv/(mkT)] - 1 \}, \quad (4)$$

式中 $m$ 值为结的特征参数也成为理想因子,是结特征的重要标志。它与结区的载流子输运特性、结的界面状况、结区内缺陷、杂质有关。 $m$ 值的大小也受到非辐射复合的影响, $m$ 值小表明材料中的缺陷、位错和工艺过程中带来的应力较小,表明器件的完整性较好; $m$ 值大,表明了材料内部非辐射复合中心较多,结区漏电、载流子泄漏、器件的完整性不好<sup>[17-18]</sup>。

由等效电路可知在 $k$ 、 $q$ 、 $T$ 已知的情况下,由电导数曲线在纵轴上的截距可得 $m$ 值,定义为

图15 #A1的 $\Delta m$ 曲线Fig.15 Curve of  $\Delta m$  for #A1图16 #A3的 $\Delta m$ 曲线Fig.16 Curve of  $\Delta m$  for #A3

$$\Delta m = m_{n+1} - m_n, (n > 1), \quad (5)$$

式中  $n$  为第几次老化,  $n=0$  时为初始时刻, 即每个 48 h 测一次参数,  $m_0$  为初始时刻器件的  $m$  特征参量值,  $m_1$  为老化第一次数据(老化 48 h 后测得数据), 以此类推。

通过处理#A1、#A3、#A8的  $m$  值的数据变化得到  $\Delta m$  值变化量的曲线示意图。

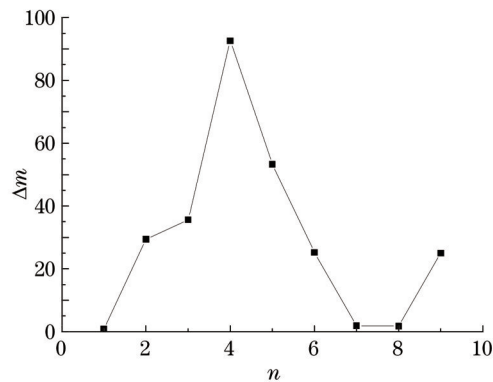


图17 #A8的  $\Delta m$  曲线图

Fig.17 Curve of  $\Delta m$  for #A8

老化过程中,  $\Delta m$  值不断变化, 并且总体呈现 n 型曲线。由图分析可知  $\Delta m$  的值迅速增大并且在增大一定程度之后保持较为稳定的数值, 这说明  $m$  值也在增大然后保持了一定的增量;  $\Delta m$  再逐渐变小, 表明了  $m$  值在保持一定的增量之后又变得缓慢增大趋于平稳。器件中不断有漏电流和缺陷及非辐射复合的影响, 导致了  $m$  值的变化规律, 从  $m$  值的变化规律又可知器件中的位错和缺陷先迅速扩展和增多然后在增大到一定程度以后保持了一定的老化速度, 再逐渐趋于稳定。漏电流和缺陷严重地影响了器件的输出特性。

## 4 结 论

器件老化过程中的阈值电流、输出功率、发散角均随着器件老化发生变化, 且都具有很强的关联性。器件某一参数的变化情况和和其他参数的变化情况在时间节点上具有同一性。

电导数参数与器件老化有密切关系, 在老化实验中证明了电导数参数  $h$ 、 $b$ 、 $m$  的数值有助于评价器件可靠性, 实验证明了  $m$ 、 $b$  随着器件的老化呈现变大趋势; 而  $h$  随着老化呈现变小趋势。可得出  $m$ 、 $b$  较小而  $h$  较大的器件可靠性高, 其寿命也较长。实验验证了电导数方法有利于半导体激光器的无损筛选。

$m$  为器件结特征参量, 其数值的大小与半导体激光器器件本身的材料和结构密切相关, 并且对非辐射复合过程, 漏电流的增加和缺陷的增多都极其敏感。 $m$  值能够反映出半导体激光器 PN 结质量, 在老化过程中也是随着器件的老化而变大。定义了  $\Delta m$  概念, 其数值的变化情况在某种程度上反映了器件退化模式。

$\Delta m$  的变化曲线可以体现半导体激光器的老化程度, 器件早期退化较慢, 然后加剧退化并保持一定的退化加速, 最终又以较慢的速度退化直至完全不激射。

因此电导数参数对器件的筛选和对器件的退化模式分析具有重要意义。

## 参 考 文 献

- Hao Mingming, Zhu Hongbo, Liu Yun. Research on transform lens in spectral beam combination for laser diode array [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0302005.  
郝明明, 朱洪波, 刘云. 半导体激光阵列光谱合束技术中变换透镜的研究 [J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0302005.
- Lu Guoguang, Tao Getao, Yao Shun, *et al.*. Accelerated aging of 808 nm high-power semiconductor laser diodes [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2005, 26(2): 97-99.  
路过光, 套格套, 尧舜, 等. 808 nm 大功率半导体激光器的加速老化实验 [J]. 半导体光电, 2005, 26(2): 97-99.
- P A Barnes, T L Paoli. Derivative measurements of the current-voltage characteristics of double-heterostructure injection lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1976, 12(10): 633-639.
- T L Paoli. Observation of second derivatives of the electrical characteristics of double-heterostructure junction lasers [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1976, 23(12): 1333-1336.

- 5 W B Joyce, R W Dixon. Electrical characterization of heterostructure lasers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1978, 49(7): 3719–3728.
- 6 P D Wright, W B Joyce, D C Craft. Electrical derivative characteristics of InGaAsP buried heterostructure lasers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1982, 53(3): 1364–1372.
- 7 Zhang Shuang, Guo Shuxu, Guo Xin, *et al.* Extrinsic ideality factor of laser array [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2007, 28(5): 768–773  
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): 768–773.
- 8 Liang Qiangcheng, Shi Jiawei, Cao Junsheng, *et al.* Relationship between  $m$  and quality of high power semiconductor lasers [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, 29(6): 847–850.  
梁庆成, 石家纬, 曹军胜, 等. 高功率半导体激光器的  $m$  值与器件质量的相关性[J]. *半导体光电*, 2008, 29(6): 847–850.
- 9 Qi Liyun, Shi Jiawei, Li Hongyan, *et al.* The peaks in the electric derivative curves and optic derivative curves of GaAs/GaAlAs high-power QW lasers [J]. *Microelectronics Reliability*, 2000, 40(12): 2123–2128.
- 10 Cao Junsheng. Research on Non-destructive Test for Semiconductor Lasers and Laser Arrays [D]. Jilin: Jilin University, 2007.  
曹军胜. 半导体激光器及其阵列的无损检测技术研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2007.
- 11 Li Hongyan, Shi Jiawei, Jin Enshun, *et al.* Screening of visible semiconductor lasers by electrical derivative technique [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2000, 21(2): 115–117.  
李红岩, 石家纬, 金恩顺, 等. 用电导数技术筛选可见光半导体激光器[J]. *半导体光电*, 2004, 21(2): 115–117.
- 12 Shi Jiawei. Degradation and screen of semiconductor lasers [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 1997, 18(1): 14–19.  
石家纬. 半导体激光器退化及其筛选[J]. *半导体光电*, 1997, 18(1): 14–19.
- 13 Cao Junsheng, Guo Shuxu, Gao Fengli, *et al.* Electrical derivative of semiconductor laser array and its reliability [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010, 31(4): 507–511.  
曹军胜, 郭树旭, 郜锋利, 等. 半导体激光器阵列的电导数及其可靠性[J]. *半导体光电*, 2010, 31(4): 507–511.
- 14 Liang Qingcheng, Shi Jiawei, Guo Shuxu, *et al.* Optic and electric derivative measurement of high power laser diode arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1385–1389.  
梁庆成, 石家纬, 郭树旭, 等. 半导体激光器阵列电-光特性导数测量方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(5): 1385–1389.
- 15 Wang Xiaoyan, Zhao Run, Shen Mu. High-power semiconductor lasers with small divergence[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(3): 302–335.  
王晓燕, 赵润, 沈牧. 小发散角高功率半导体激光器研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(3): 302–335.
- 16 Li Yajing, An Zhenfeng, Chen Guoying, *et al.* Study of quantum-well laser with small far-field divergence angle [J]. *Nanoelectronic Device & Technology*, 2008, 45(11): 635–638.  
李雅静, 安振峰, 陈国鹰, 等. 小发散角量子阱激光器研究[J]. *纳米器件与技术*, 2008, 45(11): 635–638.
- 17 Li Hongyan, Shi Jiawei, Jin Enshun, *et al.* An application of the electrical derivative measurement in rapid screening of high-power semiconductor lasers [J]. *Chinese J Lasers*, 1999, A26(6): 507–510.  
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.
- 18 Ma Dongge, Shi Jiawei, Jin Enshun, *et al.* Low frequency optical noise and electrical noise investigation of 1.3  $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP superluminescent diodes [J]. *Chinese J Lasers*, 1996, A23(9): 785–790.  
马东阁, 石家纬, 金恩顺, 等. 1.3  $\mu\text{m}$  InGaAsP/InP 超辐射发光二极管的低频光、电噪声研究[J]. *中国激光*, 1996, A23(9): 785–790.

栏目编辑: 宋梅梅