

激光器阵列的非本征理想因子*

张 爽^{1,†} 郭树旭¹ 郭 欣² 曹军胜¹ 郜峰利¹ 单江东¹ 任瑞治¹

(1 吉林大学电子科学与工程学院, 长春 130012)

(2 吉林大学物理科学学院, 长春 130026)

摘要: 研究了激光器阵列的电导数表征方法,建立了激光器阵列的等效电路模型,导出了理想情况下阵列的电导数公式.理论、PSPICE 仿真和实验结果表明:一致性良好的阵列的非本征理想因子等于每个阵列单元的非本征理想因子,该结论可用于对阵列单元非本征理想因子检测与阵列可靠性研究.导致单元本征理想因子变大,电流泄漏的可靠性问题均可导致阵列非本征理想因子变大.

关键词: 激光器阵列; 等效电路模型; 电特性; 可靠性; 理想因子; 电导数

PACC: 0150K; 4255P

中图分类号: TN304.07

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)05-0768-06

1 引言

近年来,激光器阵列陆续商业化并在很多领域广泛应用,由于其工作电流大,电流密度高,功率损耗大且价格昂贵,所以对其可靠性的研究显得尤为重要. $I-V$ 检测是对半导体激光器(LD)进行可靠性评价的一种常用方法,但它所能提供的信息是有限的.而通过对 $I-V$ 求导来获得所谓的电导数($IdV/dI-I$)的方法,因其对 $I-V$ 特性敏感且能够将表征 $I-V$ 特性的参数如非本征理想因子、下沉高度、阈后截距、阈前和阈后等效串联电阻等测量出来,从而使 LD 可靠性研究有了定量的参数描述^[1~11].然而,以往的研究都局限于单管激光器,至于阵列的电导数研究尚未见报道.本文首次将电导数方法应用于阵列,在单管等效电路模型^[1~3]的基础上,建立了激光器阵列的等效电路模型,推导出阵列的电导数表达式,确定了阵列电导数与单元电导数之间的关系.进一步的仿真和实验发现,一致性良好的阵列其非本征理想因子与其单元的非本征理想因子相等,据此可通过阵列非本征理想因子的测量来获得阵列单元的非本征理想因子,从而对单元的整体结构、材料、工艺、掺杂、缺陷和电流泄漏等可靠性问题进行分析 and 评价.同时还发现,个别单元导致本征理想因子变大的可靠性问题均会引起阵列一致性变差从而导致阵列非本征理想因子变大.本文研究可为利用非本征理想因子和电导数评价激光器阵列可靠性提供参考,也可为深入研究单管和阵列性质提供借鉴.

2 激光器阵列等效电路模型及电导数测量方法

2.1 激光器阵列等效电路模型

电流泄漏是 LD 的一种失效机制,它使一部分注入电流流经无源区,从而导致阈值电流增大,量子效率降低,可靠性降级.电导数方法通过建立电流泄漏的电路模型,从而能够对 LD 的并联泄漏作出定量描述.针对掩埋异质结构的单管激光器的典型等效电路如图 1 所示^[1~3].其中线性电阻 R_1, R_2, R_3 分别代表激光器支路、并联非线性泄漏支路和并联

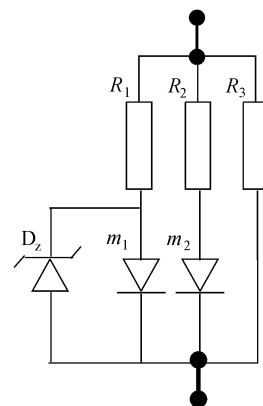


图 1 典型的激光二极管等效电路模型
Fig.1 Typical equivalent circuit model of laser diode

* 国家自然科学基金(批准号:60471009)和吉林省重大科技发展计划(批准号:200403001-4)资助项目

† 通信作者. Email: zhangshuang@jlu.edu.cn

2006-10-23 收到,2006-12-01 定稿

线性泄漏支路中的线性电阻. 本征理想因子为 m_1 和 m_2 的理想二极管分别代表激光器和泄漏支路的非线性. 齐纳二极管 D_z 代表当注入电流大于阈值电流时, 载流子高速率复合, 准费米能级不随注入电流变化而发生结电压饱和^[1~3]. 一维线阵列通常是

由若干个单管的管芯经并联集成、封装制成的, 因此 n 个单管并联而成的激光器阵列的等效电路模型如图 2 所示. 因本文讨论的均为阈前参数, 故在以下讨论中不考虑 D_z 的影响.

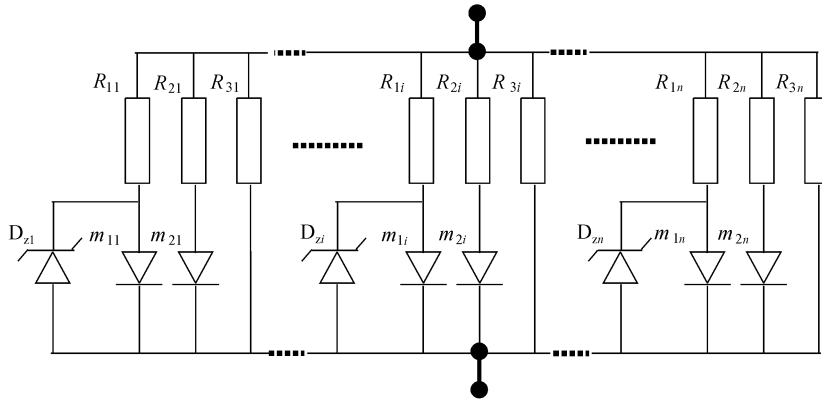


图 2 激光器阵列等效电路模型
Fig.2 Equivalent circuit model of laser array

图 2 所示的阵列等效电路, 其通解为

$$\frac{dV}{dI} = \left[\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{m_{1i}kT}{qI_{1i}} + R_{1i} \right)^{-1} + \left(\frac{m_{2i}kT}{qI_{2i}} + R_{2i} \right)^{-1} + (R_{3i})^{-1} \right] \right]^{-1} \quad (1)$$

其中 V, I 分别为阵列两端电压和流经阵列的总电流; I_{1i}, I_{2i} 为各支路电流; kT/q 为温度电压; m_{1i}, m_{2i} 为本征理想因子. 若阵列一致性良好, 可假设 $R_{1i} = R_1, R_{2i} = R_2, m_{1i} = m_1, m_{2i} = m_2$, 若考虑 $R_{3i} = \infty$, 则有

$$\frac{dV}{dI} = \left[\left(\frac{m_1kT}{qI_1} + \frac{R_1}{n} \right)^{-1} + \left(\frac{m_2kT}{qI_2} + \frac{R_2}{n} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (2)$$

其中 $I_1 = \sum_{i=1}^n I_{1i}$ 是通过激光器支路的总电流; $I_2 = \sum_{i=1}^n I_{2i}$ 是通过非线性泄漏支路的总电流. 如果 I 大, 则 $(R_1 + R_2)/n > m_1kT/qI_1 + m_2kT/qI_2$ 成立, 通过泰勒展开并取前两项近似, (2)式可表示为

$$I \frac{dV}{dI} \approx \frac{m_1kTR_2^2I}{q(R_1 + R_2)^2I_1} + \frac{m_2kTR_1^2I}{q(R_1 + R_2)^2I_2} + \frac{1}{n} \times \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2} I, \quad I < I_{th} \quad (3)$$

假设 $I_1 \propto I_2 \propto I$, 令 $m = m_1R_2^2I/[(R_1 + R_2)^2I_1] + m_2R_1^2I/[(R_1 + R_2)^2I_2]$ 为非本征理想因子, $R_{s1} = R_1R_2/(R_1 + R_2)$ 为阈前等效串联电阻,

则阵列阈前电导数可表示为

$$I \frac{dV}{dI} \approx \frac{mkT}{q} + \frac{R_{s1}I}{n} \quad (4)$$

令 $n = 1$, 得到单管激光器阈前电导数为

$$I \frac{dV}{dI} \approx \frac{mkT}{q} + R_{s1}I \quad (5)$$

如果 $R_2 \gg R_1$, (4)和(5)式可表示为

$$I \frac{dV}{dI} \approx \frac{m_1kT}{q} + \frac{R_1I}{n} \quad (6)$$

和

$$I \frac{dV}{dI} \approx \frac{m_1kT}{q} + R_1I \quad (7)$$

(6)和(7)式分别为理想阵列和它的单元的阈前电导数表达式, 当 $n = 1$ 时(6)式简化为理想单管的(7)式. 对比(4)和(5)式, 一致性良好的阵列其非本征理想因子与其单元的相等, 而等效串联电阻应为其单元的 $1/n$, 同时 $R_{3i} = \infty$ 时 R_{s1} 应是 R_1 和 R_2 的并联电阻.

2.2 电导数测量方法

阈前电导数的测量依据(4)和(5)式两个线性关系, 阈后电导数利用结电压饱和 $m_1 = 0$ ^[2] 可由(4)和(5)式获得. m 通过阈前电导数线性部分拟合得到的截距 b_0 由 $b_0 = mkT/q$ 公式提取, 也可以由 $(IdV/dI) \times (q/kT) - I$, 即 $m(I) - I$ 曲线提取. 单管 m 较大, 预示器件的可靠性较差^[3~7,10,11]. b 由阈

后电导数曲线延长后在纵轴上的截距获得,理论上理想激光器 $b = 0$,但由于阈后电流泄漏和非线性成分的存在使得实际器件 $b \neq 0$ ^[2,3],有文献[2,3,6,7]表明, b 越大器件越不可靠. h 由阈值处电导数的下降高度获得,文献[3,6,7]认为 h 过小反映器件结电压饱和特性差,为不可靠器件.但本文研究的该批样品,无论单管还是阵列在阈值处均无下沉($h \approx 0$),而 P - I 特性优良,这一问题有待进一步研究. R_{s1} , R_{s2} 分别由阈前和阈后电导数曲线的斜率获得.电导数参数提取方法如图 3 所示.电导数测量系统由微机、PCI-NI6014 数据采集卡和驱动电源组成,测试系统如图 4 所示,通过基于 Measurement Studio 的 VC++ Net 编程完成自动测量和参数提取.

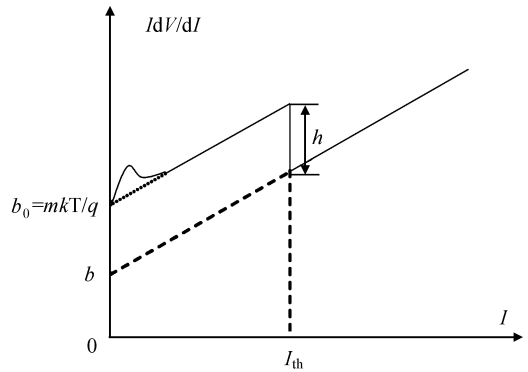


图 3 电导数参数提取示意图

Fig.3 Schematic plan of electrical derivative parameters extraction

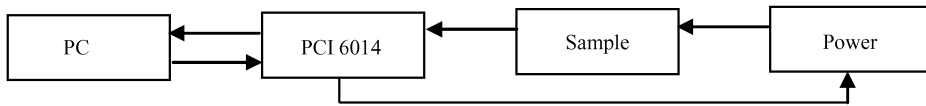


图 4 电导数自动测量系统示意图

Fig.4 Automatic measurement system of electrical derivative

3 仿真、实验及结果分析

3.1 阵列非本征理想因子与阵列单元非本征理想因子的关系

非理想情况下 $R_2, R_3 \neq \infty$, 取单管参数 $R_1 = 1\Omega, R_2 = 200\Omega, R_3 = 80\Omega, I_{s1} = 180\text{nA}, I_{s2} = 20\text{nA}$,

$m_2 = 2.0$, 单管 ($n = 1$) 和阵列 ($n = 10$) 的阈前电导数仿真曲线如图 5(a) 和 (b) 所示. 理想情况下 $R_2 = R_3 = \infty$, 取单管参数 $R_1 = 5\Omega, I_{s1} = 2\text{nA}$, 单管 ($n = 1$) 和阵列 ($n = 10$) 的阈前电导数仿真曲线如图 5(c) 和 (d) 所示. 其中 I_{s1}, I_{s2} 为反向饱和电流, n 为并联单管的个数.

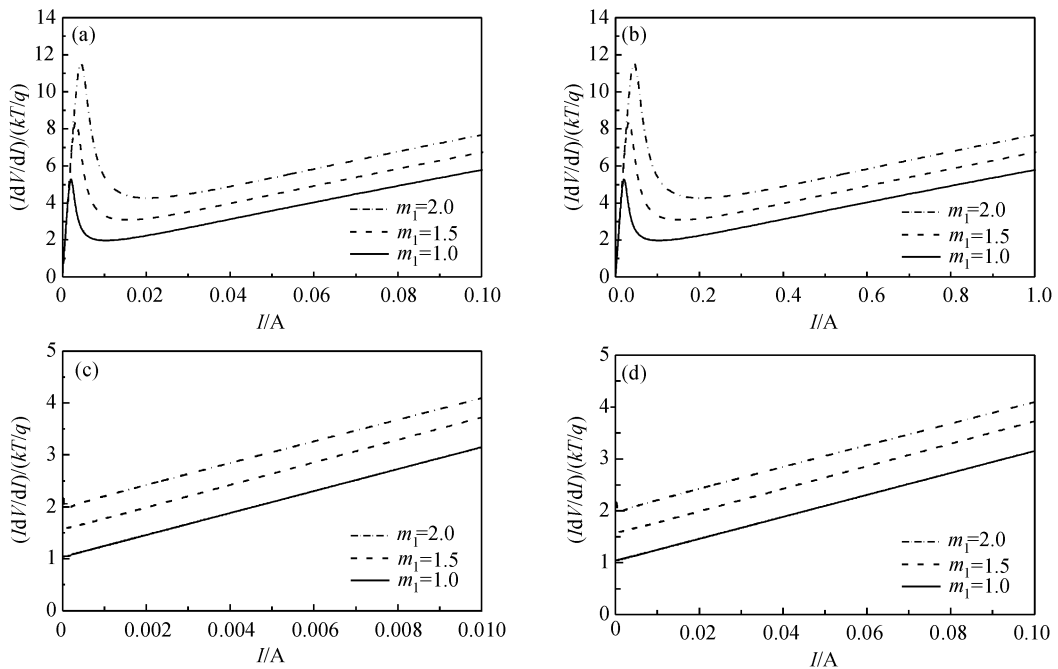


图 5 激光器单管和阵列阈前电导数仿真曲线 (a)非理想激光器单管;(b)非理想激光器阵列;(c)理想激光器单管;(d)理想激光器阵列

Fig.5 Emulated before-threshold IdV/dI - I curves of laser diode and laser array (a) Nonideal laser diode;(b) Nonideal laser array;(c) Ideal laser diode;(d) Ideal laser array

为了更清楚地显示阵列与其单元的非本征理想因子和等效串联电阻之间的关系,本文在取图5单管参数的基础上,针对 $n=1\sim 5$ 的情况分别对阵列电导数进行了仿真,由仿真结果提取的 m 和 R_{s1} 分别列于表1和表2.由图5、表1和表2可见,一致性良好的阵列其非本征理想因子等于阵列单元的非本征理想因子,阈前等效串联电阻为其单元的等效串联电阻的 $1/n$,且在理想情况下,非本征理想因子与本征理想因子相等.这一仿真结果与理论公式(4)和(5)(或(6)和(7)式)完全吻合.值得注意的是,非理想情况下由于电流泄漏的影响,非本征理想因子 m 比本征理想因子 m_1 大.

表1 模拟的具有不同单元个数的理想阵列电导数参数
Table 1 Simulated electrical derivative parameters of ideal laser arrays with different number elements

n	$m_1 = 1.0$		$m_1 = 1.5$		$m_1 = 2.0$	
	R_{s1}	m	R_{s1}	m	R_{s1}	m
1	5.2889	1.0356	5.4282	1.5542	5.1974	2.0161
2	2.6444	1.0356	2.7141	1.5542	2.5987	2.0161
3	1.7629	1.0356	1.8094	1.5542	1.7324	2.0161
4	1.3222	1.0356	1.3570	1.5542	1.2993	2.0161
5	1.0577	1.0356	1.0856	1.5542	1.0394	2.0161

表2 模拟的具有不同单元个数的非理想阵列电导数参数
Table 2 Simulated electrical derivative parameters of non-ideal laser arrays with different number elements

n	$m_1 = 1.0$		$m_1 = 1.5$		$m_1 = 2.0$	
	R_{s1}	m	R_{s1}	m	R_{s1}	m
1	1.1009	1.3922	1.1451	2.1677	1.1630	3.0381
2	0.5504	1.3922	0.5725	2.1677	0.5815	3.0381
3	0.3669	1.3922	0.3817	2.1677	0.3876	3.0381
4	0.2752	1.3922	0.2862	2.1677	0.2907	3.0381
5	0.2201	1.3922	0.2290	2.1677	0.2326	3.0381

为进一步证实上述结论,对具有相同管芯的激光器阵列和单管的电导数进行了测量,结果如图6

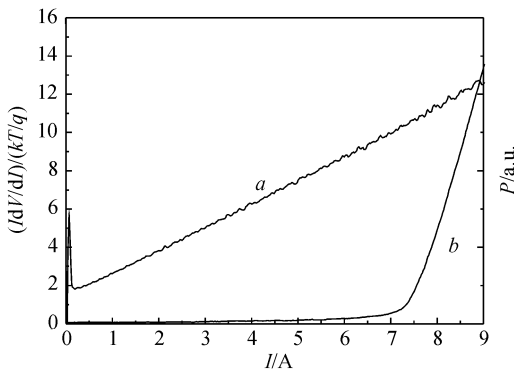


图6 实测激光器阵列电导数曲线 a:电导数曲线;b:光功率曲线
Fig.6 Measured electrical derivative curves of laser array a: $I dV/dI-I$ curve; b: $P-I$ curve

和图7所示.实测阵列参数为 $m = 1.35, I_{th} = 7340\text{mA}, R_{s1} = 0.03\Omega$,而单管参数为 $m = 1.33, I_{th} = 370\text{mA}, R_{s1} = 0.19\Omega$.这一结果表明,阵列与其单元的理想因子之间确实具有相等的关系.另外我们选取了#1~#4共4只电导数参数基本相同的单管,分别并联(用 \wedge 表示)后对非本征理想因子进行了测量,测量结果(见表3)显示,并联后的非本征理想因子并没有发生变化,这一实验结果与理论和仿真模拟结果吻合.

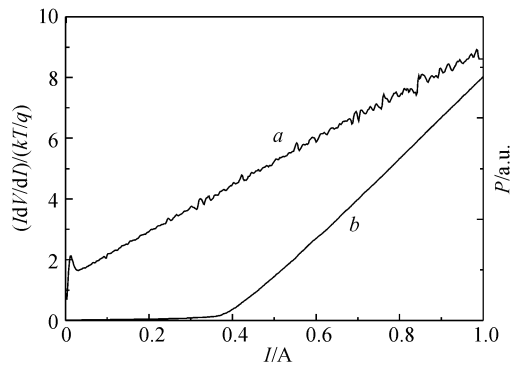


图7 实测激光二极管电导数曲线 a:电导数曲线;b:光功率曲线
Fig.7 Measured electrical derivative curves of laser diode a: $I dV/dI-I$ curve; b: $P-I$ curve

表3 单管并联对非本征理想因子的影响
Table 3 Dependence of the extrinsic ideality factor on the parallel connection of laser diodes

	#1	#2	#3	#4	#1 \wedge #2	#2 \wedge #4	#1 \wedge #3	#1 \wedge #4
m	1.51	1.50	1.50	1.51	1.52	1.52	1.52	1.52

3.2 阵列电流泄漏对阵列非本征理想因子的影响

根据本文推导出的非本征理想因子表达式 $m = m_1 R_2^2 I / [(R_1 + R_2)^2 I_1] + m_2 R_1^2 I / [(R_1 + R_2)^2 I_2]$, m 既可以反映本征理想因子的大小,也可以反映电流泄漏对本征理想因子的影响.依据上述一致阵列非本征理想因子与其单元非本征理想因子相等的关系,可以对阵列单元的非本征理想因子进行检测,从而进一步对阵列整体电流泄漏作出评价.非理想情况下(1)式的影响关系是复杂的,可根据图2改变 R_2 和 R_3 仿真,实现电流泄漏对阵列理想因子的影响,结果如图8所示.

由图8可见,当阵列越接近理想情况,其非本征理想因子越接近其单元的本征理想因子,而阵列的电流泄漏越严重,小电流下电导数线性越差,拐点明显上移和右移,甚至会出现明显的初始峰,另外 R_2 和 R_3 减小会导致等效串联电阻减小,此时通过电导数拐点右侧线性部分延长得到的阵列非本征理想因子越大.实际测量的激光器阵列电导数曲线(见图

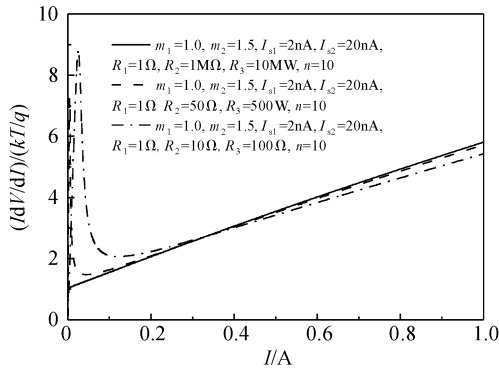


图8 R_2 和 R_3 对激光器阵列非本征理想因子的影响

Fig.8 Dependence of the laser array extrinsic ideality factor on the resistances R_2 and R_3

6) 有较明显的初始峰,按照本文模拟结果的分析应是电流泄漏导致的,同时说明被测阵列单元的本征理想因子应接近1,由此推测该阵列单元在阈值前应以扩散电流为主^[8].因此,非本征理想因子变大可能预示阵列的线性和非线性电流泄漏严重.此外,非优化的结构、材料、工艺、掺杂以及非辐射复合等^[8,10,11]会导致单元本征理想因子变大,这些均可从阵列非本征理想因子中反映出来,并可以作为阵列可靠性设计和评价的依据.

3.3 阵列单元本征理想因子变化对阵列非本征理想因子的影响

阵列与单管很大的不同在于一致性对其本征理想因子影响很大.单管本征理想因子的大小与可靠性密切相关,非辐射复合以及非优化掺杂可导致单元本征理想因子变大^[8,11],为了验证这种变化对阵列实测理想因子的影响,将阵列中某一个单元的理想因子变大(1.5→2.0),对阵列电导数进行了仿真.由图9结果可见, m_1 变大会导致曲线发生弯曲,这

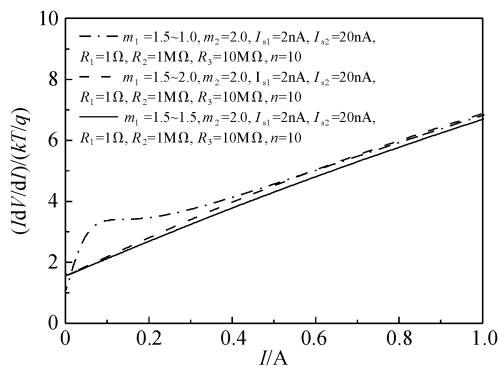


图9 阵列单元本征理想因子对阵列非本征理想因子的影响

Fig.9 Dependence of laser array extrinsic ideality factor on the intrinsic ideality factor of element

种弯曲会导致曲线的拟合直线截距变大,即非本征理想因子变大.此外,将某一个单元的理想因子变小(1.5→1.0),对阵列电导数进行了同样的仿真.由图9可见, m_1 变小同样会导致曲线发生弯曲,非本征理想因子变大.因此,单元 m_1 的改变无论变大或变小都会导致阵列一致性变差,从而引起阵列电导数曲线弯曲,非本征理想因子变大.

4 结论

本文对激光器阵列的电导数表征方法进行了研究.给出了激光器阵列的等效电路模型,推导出阵列的电导数公式.理论、模拟和实验结果表明:一致性良好的阵列其非本征理想因子等于每个阵列单元的非本征理想因子.利用该结论,可通过对阵列非本征理想因子的测量来获得阵列单元的非本征理想因子,据此可对阵列单元的整体结构、工艺、掺杂、电流泄漏等可靠性问题进行评价和研究,且电流泄漏可导致阵列非本征理想因子变大.此外,非辐射复合等导致阵列单元本征理想因子变大因素会引起阵列一致性变差,从而导致阵列电导数曲线发生弯曲,并使阵列的非本征理想因子变大.

参考文献

- [1] Wright P D, Joyce W B, Craft D C. Electrical derivative characteristics of InGaAsP buried heterostructure lasers. *J Appl Phys*, 1982, 53: 1364
- [2] Choy M M, Barnes C E. Effective screen for fast aging In-GaAsP BH lasers using electrical derivatives. *Electron Lett*, 1985, 21: 846
- [3] Shi J W, Jin E S, Gao D S. The junction voltage saturation and reliability of semiconductor lasers. *Opt Quantum Electron*, 1992, 24: 775
- [4] Shi J W, Jin E S, Ma J, et al. b and its temperature dependence are the important criteria of the reliability of semiconductor lasers. *Microelectron Reliab*, 1994, 34: 1405
- [5] Shi J W, Jin E S, Li H Y, et al. The characteristic junction of a semiconductor laser and its relation with reliability. *Opt Quantum Electron*, 1996, 28: 647
- [6] Li H Y, Qi L Y, Shi J W, et al. Effective method for evaluation of semiconductor laser quality. *Microelectron Reliab*, 2000, 40: 333
- [7] Qi L Y, Shi J W, Li H Y, et al. The peaks in the electric derivative curves and optic derivative curves of GaAs/GaAlAs high-power QW lasers. *Microelectron Reliab*, 2000, 40: 2123
- [8] Deshayes Y, Bechou L, Mendizabal L, et al. Early failure signatures of 1310nm laser modules using electrical, optical and spectral measurements. *Measurement*, 2003, 34: 157
- [9] Cong Hongxia, Feng Liefeng, Wang Jun, et al. Accurate measurement of forward electrical characteristics in laser diodes. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, 27(1): 105 (in Chinese) [丛红侠, 冯列峰, 王军, 等. 激光二极管正向电特性的精确检测. *半导体学报*, 2006, 27(1): 105]

- [10] Shi Jiawei, Jin Enshun, Li Hongyan, et al. Effective method of evaluation of semiconductor laser quality. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1996, 17 (8): 595 (in Chinese) [石家伟, 金恩顺, 李红岩, 等. 一个检测半导体激光器质量的有效方法. 半导体学报, 1996, 17(8): 595]
- [11] El-Tahchi M, Khoury A, de Labardonnie M, et al. Degradation of the diode ideality factor of silicon n-p junctions. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2000, 62: 393

Extrinsic Ideality Factor of Laser Array*

Zhang Shuang^{1,†}, Guo Shuxu¹, Guo Xin², Cao Junsheng¹, Gao Fengli¹,
Shan Jiangdong¹, and Ren Ruizhi¹

(1 *College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China*)

(2 *College of Physical Science, Jilin University, Changchun 130026, China*)

Abstract: An equivalent circuit model of a laser array is established, and simulated processes are imposed on the model using PSPICE. The simulated and experimental results indicate that the ideality factor of the laser array is equal to that of its elements, and the current leakage and abnormal ideality factor variation of elements can result in the increase of the ideality factor of the laser array. We propose a new method to detect the ideality factor of a laser array element by using an electrical derivative test of the laser array, and we also propose the use of the ideality factor of a laser array as a screen to estimate the reliability of the array.

Key words: laser array; equivalent circuit model; electrical characteristics; reliability; ideality factor; electrical derivative

PACC: 0150K; 4255P

Article ID: 0253-4177(2007)05-0768-06

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60471009) and the Science and Technology Development Program of Jilin Province (No. 200403001-4)

† Corresponding author. Email: zhangshuang@jlu.edu.cn

Received 23 October 2006, revised manuscript received 1 December 2006

©2007 Chinese Institute of Electronics