

激光二极管正向电特性的精确检测^{*}

丛红侠^{1,†} 冯列峰¹ 王 军¹ 朱传云¹ 王存达¹ 谢雪松² 吕长志²

(1 天津大学应用物理学系, 天津 300072)

(2 北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100022)

摘要: 采用正向交流特性结合 $I-V$ 特性的方法, 检测了激光二极管的串联电阻、理想因子、结电压和结电容与外加电压或电流的关系. 首次发现, 激光二极管的结电压、串联电阻、理想因子和结电容在阈值附近同时出现了明显的阶跃, 之后结电压呈现饱和. 此外还观察到, 在较低的测试频率和较大的正向电压下, 激光二极管的结电容具有负值.

关键词: 正向交流特性; 激光二极管; 激光阈值; 阶跃; 结电压饱和; 负电容

PACC: 0150K; 4255P

中图分类号: TN304.07

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)01-0105-05

1 引言

激光二极管(LD)在光纤通信、光盘存储、全色显示、激光印刷、激光加工、医疗卫生和军事技术等众多方面,有着越来越重要的应用.通常激光二极管工作在注入电流较大的光激励状态下,对于此时电特性的准确检测将有助于对器件工作状况及其相应的微观机制的研究,并为改进现有器件和研制新型器件提供可靠信息.但遗憾的是,长期以来一直缺乏表征两端子器件正向电特性的精确方法.直流下的电流-电压($I-V$)法是检测半导体二极管最常用的方法,然而单独的 $I-V$ 法不能提供足够的信息量,所用的各种数据分析方法无不假设串联电阻为常数,并因其他种种不同的简化假设而各显现出局限性^[1-5].传统的电容-电压($C-V$)法^[6,7]都基于并联模式,并采用了反向电压下的耗尽层模型.这种 $C-V$ 法忽略了二极管串联电阻的影响,通常把测试的并联表观电容直接看作结电容,这个假设在反向和很小的正向电压下一般都能很好地近似成立.然而在较大的正向电压下,实际的结电容可能比表观电容大得多.

本文采用正向交流特性结合 $I-V$ 特性的方法来测试和分析激光二极管的正向电特性.这种方法类似于已经成功地检测了肖特基二极管电参数的串联模式方法^[8,9],不同的是它利用半导体二极管的并联模式测试电路.虽然不论采用哪种模式最终都应

得到相同的结果,但是对于激光二极管在阈值附近的行为,采用并联模式的直接测量结果更为直观一些.本文分别用电导数技术^[4,5]和我们的方法对激光二极管进行了测试和比较.首次发现,激光二极管的串联电阻、理想因子、结电压和结电容在阈值附近同时出现了明显的阶跃,之后结电压呈现饱和;此外还在测试的激光二极管中观察到了负电容现象.

2 理论分析

不论是 p-n 结或是肖特基结的半导体二极管,其等效电路通常都由结电容 C 、结电导 G 和串联电阻 r_s 组成,如图 1(a)所示. $C-V$ 法通常采用图 1(b)所示的并联等效电路,其中 G_p 和 C_p 分别为表观电导和表观电容.比较图 1(a), (b) 两个电路,有:

$$G_p = \frac{G(1 + r_s G) + r_s (C)^2}{(1 + r_s G)^2 + (r_s C)^2} \quad (1)$$

$$C_p = \frac{C}{(1 + r_s G)^2 + (r_s C)^2} \quad (2)$$

其中 ω 是测试时所加交流小信号的角频率. 现把二极管的 $I-V$ 特性表示为:

$$I = I_s (\exp(qV_j/nkT) - 1) \quad (3)$$

其中 I_s 是饱和电流; q 是电子电荷; n 是理想化因子; k 是玻耳兹曼常数; T 是温度, 结电压 $V_j = V - r_s I$. 当 $V_j \gg nkT/q$ 时, 结电导的主要部分在正向电压下可表示为:

$$G = \frac{dI}{dV_j} = \frac{qI}{nkT} \left(1 - \frac{V_j}{n} \times \frac{dn}{dV_j} \right) \quad (4)$$

^{*} 国家自然科学基金资助项目(批准号:60376027)

[†] 通信作者. Email: hz.chx @eyou.com; lnlsbc @163.com

2005-07-20 收到, 2005-09-01 定稿

在较大正向偏压下,当 $G \gg C$ 时,简化方程(1),(2)可得:

$$r_s = \frac{1}{G_p} - \frac{1}{G} \quad (5)$$

$$C = (1 + r_s G)^2 C_p \quad (6)$$

通过拟合方程(3),(4),(5)和(6),就可以确定不同正向电压或电流下二极管的串联电阻 r_s 、结电容 C 、结电压 V_j 和理想化因子 n 的电参数值。

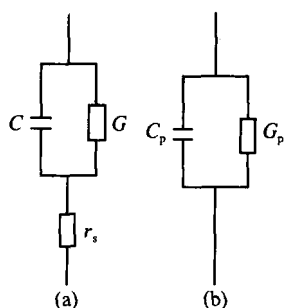


图 1 (a) 二极管等效电路; (b) 并联模式的测量电路

Fig. 1 (a) Equivalent circuit for a diode; (b) Parallel measurement circuit

针对激光二极管的电导数^[4,5]技术以方程(3)为理论基础,并假定 r_s 和 n 是定值,当 $I \gg I_s$ 时,可以得到以下方程:

$$I \frac{dV}{dI} = I r_s + \frac{nkT}{q} \quad (7)$$

不难看出,在 $\frac{IdV}{dI} - I$ 曲线中,线性段对应的斜率即是串联电阻的数值,而其反向延长线在纵轴上的截距则是 nkT/q 的数值. 实验发现,在阈值电流附近,半导体激光管的 IdV/dI 曲线突然下沉,之后的部分又大致呈现直线形状. Paoli 和 Barnes 用结电压的饱和来解释这种现象,他们认为从阈值开始,高速率的受激辐射致使两个准费米能级被钉扎,结电压也就不再随外加电压变化而呈现饱和. 学术界一直没有能够从实验或理论的角度对这种论断做出进一步的判定.

3 实验和结果

使用上述方法我们测试和分析了许多激光二极管,在此只选取了来自不同厂家的两个较为典型的样品,其标称波长同为 780nm,其中工作电流稍小的命名为 1#,工作电流稍大的命名为 2#. 测量器件交流特性使用的仪器是 HP4285A LCR Meter,测试时在直流电压上叠加 10mV 交流小信号,测试频率为 1~100kHz. 实验过程中运用多种有效方法消除包括寄生阻抗在内的各种实验误差. 测量 $I-V$ 特性使用的仪器是 Agilent4155C. 所有测试都是在室

温下进行的.

激光二极管两个样品的 IdV/dI 特性如图 2 所示. 从图中看出,两个样品的 IdV/dI 曲线都在 30mA 附近出现了明显的下沉,可以判断样品在这附近开始激射. 1# 样品在下沉点以下部分的曲线接近直线,其斜率对应的串联电阻值为 2.97,由其反向延长线在纵轴的截距得到的 n 值为 2.03. 而 2# 样品在下沉点以下部分的曲线呈现拱形,由此我们只能大致判断其串联电阻是非线性的,根本无法求出 r_s 和 n 的准确数值.

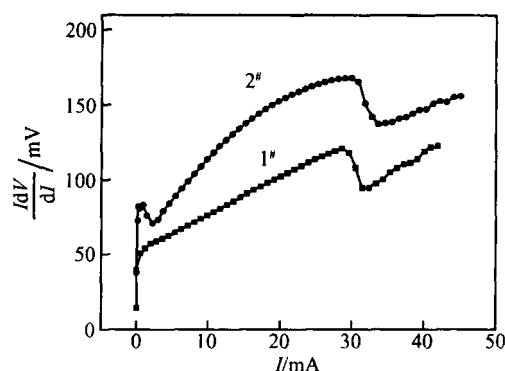


图 2 1# 和 2# 样品的 IdV/dI 特性

Fig. 2 IdV/dI current curves of both samples

1# 样品的并联表观电导 G_p 与外加电压 V 的关系如图 3 所示. 可以看出,确如方程(5)表示的,在外加电压较大(大于 1.2V),即当 $G \gg C$ 时, G_p 与无关. 而在小电压时,三个不同频率的 G_p 数值可相差一到两个数量级,因其数值太小,这种差别在图上不能显现出来. 此外,我们还意外发现,恰在与样品的 IdV/dI 曲线突然下沉对应的电压处, G_p 出现了一个明显的间断,“上扬”了一定的幅度. 图 3 内嵌的表观电容与外加电压的关系图则表明, C_p 也在此处出现了明显的间断,突然下沉. 注意在较大的电压下,表观电容 C_p 为负值. 在阈值附近,直接测量值 G_p , C_p 和 IdV/dI 特性都发生了不连续的变化,这应是 LD 阈值附近行为的直接反映. 由此可见,相比电导数技术,正向交流信号法可以更为直观和便捷地测得激光二极管的阈值.

利用本文提出方法计算出的串联电阻 r_s 与电流关系如图 4 所示. 在注入电流较小时,两个样品的串联电阻都是非线性的,2# 样品尤甚. 这可能是因为欧姆接触电阻很难视做一个与电压或电流无关的常数^[8,9]. 不过,较小电流下的串联电阻的压降甚小,这种非线性很难被其他测试方法发现,也基本上不影响器件性能. 1# 样品在二极管导通后,阈值电流之前的串联电阻值基本不变,并与通过 IdV/dI 曲线的线性段斜率所得 2.97 的结果相当一致. 而 2# 样品串联电阻值在此电流区间内的变化很大,这

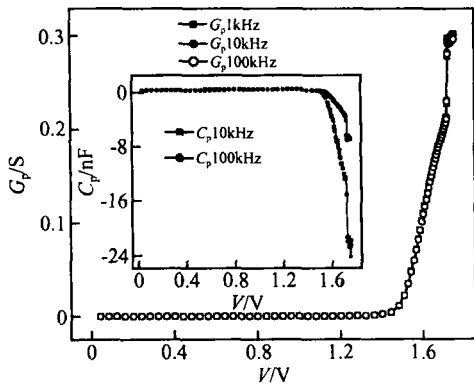


图 3 1# 样品的表现电导与外加电压的关系 内嵌图是其表现电容-外加电压关系图。

Fig. 3 Apparent conductance-voltage curves of sample 1# The inset shows its apparent capacitance-voltage plots.

与拱起的 I_dV/dI 曲线所传达的信息一致. 可以肯定, 串联电阻的非线性是电导数技术和其他 $I-V$ 方法所不能表征的. 在阈值附近, 样品的串联电阻都发生了明显的跃变, 我们认为这个变化来源于体电阻的变化, 它是由有源区及其周围的载流子浓度在激励前后的改变引起的. 图 4 内嵌图显示了阈值前后理想化因子 n 与电流的关系. 1# 样品的 n 值在 2.03 与 2.05 之间, 这与由 I_dV/dI 曲线的线性段斜率所得的 2.03 相当一致. 而 2# 样品的 n 值变化稍大一些. 由以上结果可知, 用正向交流小信号结合 $I-V$ 曲线的理论方法来分析二极管的正向电特性, 能够更有效地获得参数随电流或电压变化的准确信息.

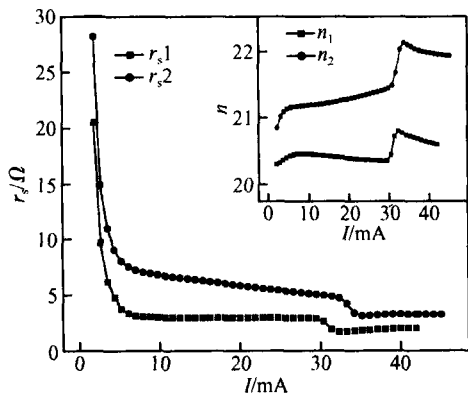


图 4 样品的串联电阻与电流的关系 内嵌图是理想因子-电流图。

Fig. 4 Serial resistance-current curves The inset shows ideality factor-current curves of samples.

图 5 所示的是电流与结电压的关系, 为明显起见, 内嵌图给出了样品在阈值附近结电压随电流的变化情况. 从图中可以看出, 两个样品的结电压与电流的关系是相当类似的, 刚开始电流随结电压都以

指数形式迅速增长, 在上述 I_dV/dI 曲线下沉处, 结

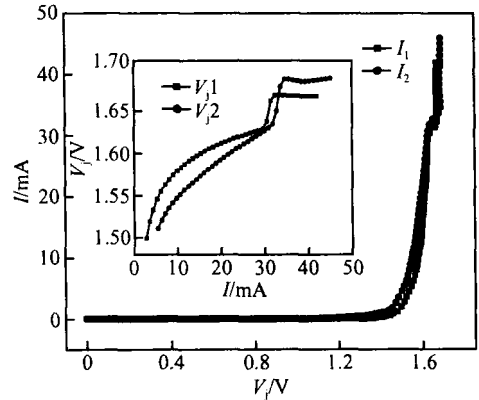


图 5 样品的电流与结电压的关系 内嵌图是结电压随电流的变化图。

Fig. 5 Current-junction voltage curves The inset shows junction voltage-current plots of samples.

电压出现了大约 0.05V 的阶跃, 之后达到饱和. 测量求出的 1# 和 2# 样品的饱和电压值分别是 $1.6679 \pm 0.0004V$ 和 $1.6868 \pm 0.0013V$. 这表明, 在测试精度范围内, 在激励条件下, 结电压严格地趋于一个常数. 这个图像与以前的理论猜测和从电导数技术得到的简单结果有相当大的不同. 我们的测量证明在激励点附近, 激光二极管的结电压先是出现一个明显阶跃, 然后才达到饱和. 而对其对应物理机制的探讨, 除了需要做进一步深入的理论研究之外, 还有赖于对激励点附近发光光谱和强度的认真测试. 在此还需说明一点: 一般理论都认为结电压对应着电子的准费米能级和空穴的准费米能级之间的差, 而这个差值大于激励时的光子能量. 我们的测量结果与此不相违背.

在 1 ~ 100kHz 的频率下, 1# 样品的结电容与外加电压的关系如图 6 所示, 内嵌图是样品的结电容与外加电压关系的细节图. 分析表明, 结电容在较小的正向电压下主要为耗尽层电容, 在稍大的正向电压下主要为随电压指数增长的扩散电容, 导通后则迅速减小并很快变为负值, 随电压增加其绝对值急速地增大, 在阈值附近 (外加电压 1.72V) 也出现了阶跃. 上述现象在频率越低时表现越明显. 负电容现象已在许多半导体器件中被报道, 如 p-n 结^[10], 肖特基结^[11], 量子阱红外光电探测器^[12] 和同质结远红外探测器^[13] 等, 值得注意的是以往报道的都是器件在并联模式下负的表现电容. 我们认为在发光或激光二极管中的负电容现象, 主要是由辐射复合引起的^[14]. 因为负电容的出现总是稍稍落后于明显发光的出现, 而阈值处结电容的阶跃则充分表明了负电容效应与发光之间有着直接的关系.

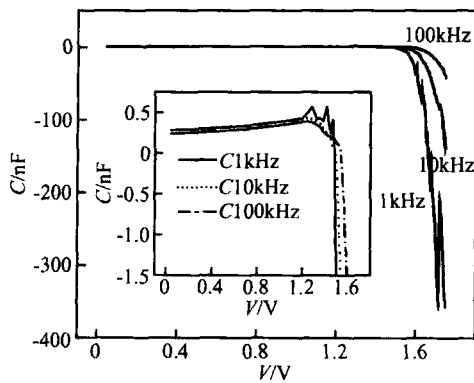


图 6 1[#] 样品的结电容与外加电压的关系 内嵌图是其结电容-电压细节图.

Fig. 6 Junction capacitance-voltage curves of sample 1[#]. The inset shows the detail plots.

4 结论

采用正向交流特性结合 $I-V$ 特性的方法测试和分析了激光二极管的正向电特性. 结果表明它是一种能够精确地确定半导体二极管正向电特性的方法, 可以准确地获得二极管的串联电阻、结电容、结电压和理想化因子等电参数与电压或电流的关系. 许多半导体二极管, 尤其是激光或发光二极管要在较大电压或电流下工作, 此方法为准确解读此类实际问题提供了全新的手段.

与以前的理论猜测和实验判断不同, 我们的测量证明了: 在阈值附近, 激光二极管的结电压先是呈现一个幅度相当可观的阶跃, 然后达到饱和; 与此相应, 串联电阻、理想化因子和结电容也都同时出现了明显的阶跃. 激光二极管结参数变化的清晰图像与量值的精确测定, 将为深入分析其工作性能和内部机制奠定可靠的实验基础.

研究发现许多激光二极管中都存在负电容现象, 在电压越大和频率越低时, 此现象越明显. 激光二极管中的负电容现象应该引起学术界的足够关注, 因为较大电压下的负电容效应会直接影响到频率调制和瞬态开关特性.

参考文献

- [1] Werner J H. Schottky barrier and p-n junction I/V plots-small signal evaluation. *Appl Phys A*, 1988, 47:291
- [2] Lyakas M, Zaharia R, Eizenberg M. Analysis of nonideal Schottky and p-n junction diodes-extraction of parameters from FV plots. *J Appl Phys*, 1995, 78(9):5481
- [3] Kaminski A, Marchand J J, Laugier A. FV methods to extract junction parameters with special emphasis on low series resistance. *Solid-State Electron*, 1999, 43(4):741
- [4] Paoli T L, Barnes P A. Saturation of the junction voltage in stripe-geometry (AlGa) As double-heterostructure junction lasers. *Appl Phys Lett*, 1976, 28(12):714
- [5] Barnes P A, Paoli T L. Derivative measurement of the current-voltage of double-heterostructure injection lasers. *IEEE J Quantum Electron*, 1976, QE-12(10):633
- [6] Goodman A M. Metal-semiconductor barrier height measurement. *J Appl Phys*, 1963, 34(2):329
- [7] Lu Fang, Wang Qinhu, Wang Jianbao, et al. $C-V$ characteristics associated with quantum wells located in a junction. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1996, 17(4):245 (in Chinese) [陆芳, 王勤华, 王建宝, 等. 结区中存在量子阱结构样品的 $C-V$ 特性分析. *半导体学报*, 1996, 17(4):245]
- [8] Wang C D, Zhu C Y, Zhang G Y, et al. Accurate electrical characterization of forward AC behavior of real semiconductor diode: giant negative capacitance and nonlinear interfacial layer. *IEEE Trans Electron Devices*, 2003, 50(4):1145
- [9] Wang Cunda, Zeng Zhibin, Zhang Guoyi, et al. A new method of accurate electrical characterization of semiconductor diodes at forward bias. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, 24(12):1307 (in Chinese) [王存达, 曾志斌, 张国义, 等. 一种精确检测半导体二极管正向电特性的新方法. *半导体学报*, 2003, 24(12):1307]
- [10] Noguchi T, Kitagawa M, Taniguchio I. Negative capacitance of silicon diode with deep level traps. *Jpn J Appl Phys*, 1980, 19(7):1423
- [11] Champness C H, Clark W R. Anomalous inductive effect in selenium Schottky diodes. *Appl Phys Lett*, 1990, 56(12):1104
- [12] Ershov M, Liu H C, Li L, et al. Unusual capacitance behavior of quantum well infrared photodetectors. *Appl Phys Lett*, 1997, 70(14):1828
- [13] Perera A G U, Shen W Z, Shov M E. Negative capacitance of GaAs homojunction far-infrared detectors. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(21):3167
- [14] Shen Jun, Wang Cunda, Yang Zhijian, et al. Negative capacitance effect of GaN LEDs. *Chinese Journal of Luminescence*, 2000, 21(4):338 (in Chinese) [沈君, 王存达, 杨志坚, 等. GaN 发光二极管的负电容现象. *发光学报*, 2000, 21(4):338]

Accurate Measurement of Forward Electrical Characteristics in Laser Diodes^{*}

Cong Hongxia^{1,†}, Feng Liefeng¹, Wang Jun¹, Zhu Chuanyun¹, Wang Cunda¹,
Xie Xuesong², and Lü Changzhi²

(¹ Department of Applied Physics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(² School of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract : The dependence of series resistance, ideality factor, junction voltage, and capacitance on the applied voltage or current of laser diodes (LDs) is determined by examining forward AC behavior together with I - V characteristics. The experimental results, for the first time, demonstrate that the junction voltage saturation occurs after the junction voltage, series resistance, ideality factor, and junction capacitance simultaneously show step offsets near the threshold. A negative capacitance effect in LDs is also observed under larger voltages or lower frequencies.

Key words : forward AC behavior; LDs; lasing threshold; step offsets; junction voltage saturation; negative capacitance

PACC : 0150 K; 4255 P

Article ID : 0253-4177(2006)01-0105-05

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60376027)

[†] Corresponding author. Email: hz.chx@eyou.com; lnshc@163.com

Received 20 July 2005, revised manuscript received 1 September 2005