

文章编号: 1006-4710(2011)03-0295-06

寄生参数对半导体激光器直接调制特性的影响

林涛¹, 林楠¹, 马新尖¹, 郑凯², 马晓宇²

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 通过理论推导和模拟计算, 给出激光器调制带宽和其它参数之间的关系。分析了不同张弛振荡频率、衰减系数和寄生参数下的调制特性。结果表明当寄生参数过大时, 激光器的 3 dB 调制带宽主要受寄生参数限制, 因而只能在解决了寄生参数限制的前提下, 通过对器件的有源区和结构进行优化才能获取高的 3 dB 调制带宽。对于制作的聚酰亚胺埋沟掩埋激光器和 AlGaInAs 脊型波导激光器其最大 3 dB 调制带宽分别为 5 GHz 和 8.5 GHz, 定性解释了这两类半导体激光器调制特性的测试结果。

关键词: 半导体激光器; 调制特性; 寄生参数; 3 dB 调制带宽

中图分类号: TN365 文献标志码: A

Effects of Parasitic Parameters on the Modulation Characteristics of Semiconductor Laser Diodes

LIN Tao¹, LIN Nan¹, MA Xinjian¹, ZHENG Kai², MA Xiaoyu²

(1. Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The relationship between LD modulation bandwidths and other parameters is obtained through theoretical deducing and numeric simulating. Modulation characteristics under different relaxation oscillation frequencies, attenuation coefficients and parasitic parameters are analyzed. The results showed that the 3 dB bandwidths of LDs are just confined by the parasitic parameters when the effects of the parasitic parameters are excessive. So the effects must be overcome before optimize the active region and structure of LDs to realize high speed modulation. The measured maximum 3 dB bandwidths of planar buried LDs with buried polyimide double trenches and AlGaInAs ridge waveguide LD are 5 GHz and 8.5 GHz separately, and the modulation characteristics results of the two types of LDs are analyzed qualitatively.

Key words: semiconductor laser diode; modulation characteristics; parasitic parameter; 3 dB modulation bandwidth

1. 31 μm 和 1.55 μm 波段的半导体激光器 (LD) 具有可直接调制、体积小、功耗小、效率高、继承性好、成本低等优点, 是光信息传输领域的关键器件, 其调制特性制约着整个光传输系统的性能。对于一些短距离低成本的应用领域, 直接调制式半导体激光器具有很大的市场前景, 为了实现小型化、简单化的低成本运营, 国际上许多研究单位和大公司都对直调式高速激光器进行了研究^[1-3]。截至目

前, 已报导的 InGaAsP 有源区激光器最高 3 dB 调制带宽为 25 GHz^[4]。对用 AlGaInAs/InGaAsP 应变补偿量子阱有源区可以得到更理想的结果, 报导的最高调制带宽可达 30 GHz^[5-6]。我国中科院半导体所曾研制出波长 1.5 μm , 3 dB 调制带宽 9.1 GHz 的 InGaAsP 多量子阱自对准压缩台面高速 DFB 激光器^[7]。根据理论计算, 对于 InP 基半导体激光器, 掺杂有源区最高的调制带宽可达 60 ~ 90 GHz^[8], 应变

收稿日期: 2011-06-07

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20096118120009); 陕西省教育厅科学研究计划基金资助项目 (09JK630)。

作者简介: 林涛 (1977-), 男, 陕西西安人, 副教授, 研究方向为化合物半导体材料生长和光电子器件制作。E-mail: ltlintao@163.com。

补偿量子阱有源区的 3 dB 调制带宽可达到 70 GHz^[9], 因此需要进行系统性的研究来促进研制出更高调制带宽的半导体激光器。

尽管长波长激光器材料本身可以满足更高要求的 3 dB 调制带宽, 而且理论上也得到了证实, 但由于寄生参数的影响, 实际器件的结果尚不能令人完全满意, 因此本研究系统分析影响激光器调制特性的各种因素, 提出了实现高速激光器的主要途径, 同时通过不断的完善器件结构, 改进外延生长和改善制作工艺来提高 LD 的高频特性^[10]。

1 理论分析

半导体激光器的速率特性常用小信号调制时的 3 dB 带宽来衡量, 这一过程可以用速率方程描述。和微波调制类似, 激光器的调制也分为幅度调制和位相调制, 幅度调制过程分析简便, 和实际情况比较接近, 一般常用来分析激光器的调制特性。这里先做以下假设: 1) LD 是一个自稳定系统; 2) 光子和载流子均匀分布; 3) 单纵模工作。这样便可采用下面的速率方程组来分析激光器的调制响应^[11]。

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{qd} - \frac{c}{n}gS - \frac{N}{\tau} \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{c}{n}[g\Gamma - A_0]S + \frac{N}{\tau}\sigma\Gamma \quad (2)$$

其中, N 为有源区载流子密度; S 是光子密度; J/qd 是均匀激发情况下电子空穴对产生的速率; τ 是载流子自发辐射寿命; Γ 为振荡模式的光子被限制在有源区的比率, 即模式限制因子; σ 为自发辐射耦合进激光模式的部分, 即自发发射因子; $g\Gamma$ 表示模式增益; A_0 表示模式损耗, 它包括了所有损耗。

由于目前的半导体激光器已经很少采用体材料或是双异质结有源区, 因此采用量子阱有源区的增益表达式, $g(N)$ 近似为对数关系^[12] 为:

$$g(N) = g_w \ln\left(\frac{N}{N_t}\right) \quad (3)$$

其中, g_w 为增益系数, N_t 为透明载流子浓度。

将(3)式变形为 $g(N) = g_w(\ln N - \ln N_t)$ 后, 代入(1)式和(2)式, 可得速率方程组为:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{qd} - \frac{c}{n}g_w(\ln N - \ln N_t)S - \frac{N}{\tau} \quad (4)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{c}{n}[g_w(\ln N - \ln N_t) - A_0]S + \frac{N}{\tau}\sigma\Gamma \quad (5)$$

稳态下, $\frac{dS}{dt} = 0, \frac{dN}{dt} = 0$, 所以可得:

$$\frac{J}{qd} - \frac{c}{n}g_w(\ln N_0 - \ln N_t)S - \frac{N_0}{\tau} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{c}{n}[g_w(\ln N_0 - \ln N_t) - A_0]S + \frac{N_0}{\tau}\sigma\Gamma = 0 \quad (7)$$

小信号调制时可以得到:

$$S = S_0 + \Delta S \quad (8)$$

$$N = N_0 + \Delta N \quad (9)$$

$S_0, \Delta S$ 为光子密度的稳态值和涨落幅度; $N_0, \Delta N$ 为载流子密度的稳态值和涨落幅度。并假设 $\Delta S \ll S_0, \Delta N \ll N_0$ 。

可以严格证明:

$$\Delta S = \Delta S \cdot e^{c i \omega_n - \gamma_n t} \quad (10)$$

$$\Delta N = \Delta N \cdot e^{c i \omega_n - \gamma_n t} \quad (11)$$

将(10)、(11)两式代入上面的速率方程组, 可以得到:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta N}{dt} = & -\frac{c}{n}g_w(\ln N_0 - \ln N_t)\Delta S - \\ & \left(\frac{cg_w S_0}{n N_0} + \frac{1}{\tau}\right)\Delta N \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta S}{dt} = & \frac{c}{n}[g_w(\ln N_0 - \ln N_t) - A_0]\Delta S + \\ & \left(\frac{cg_w S_0}{n N_0}\Gamma + \Gamma\sigma\frac{1}{\tau}\right)\Delta N \end{aligned} \quad (13)$$

利用稳态解便可以得到张弛振荡频率 ω_n 和衰减系数 γ_n 的表达式, 为:

$$\omega_n^2 = \frac{1}{4}(A - D)^2 + B \times C \quad (14)$$

$$\gamma_n = \frac{B}{2} \quad (15)$$

其中:

$$\begin{cases} A = \frac{c}{n}[g_w(\ln N_0 - \ln N_t) - A_0] \\ B = \frac{cg_w S_0}{n N_0}\Gamma + \Gamma\sigma\frac{1}{\tau} \\ C = -\frac{c}{n}g_w(\ln N_0 - \ln N_t) \\ D = -\left(\frac{cg_w S_0}{n N_0} + \frac{1}{\tau}\right) \end{cases} \quad (16)$$

通常为了简单分析激光器的调制特性, 一般不考虑自发发射对激射模式的贡献, 则可对(14)式进行简化, 近似可将张弛振荡频率 ω_n 表示为等价形式即:

$$\omega_n^2 = \frac{1}{\tau\tau_p} = \frac{v_g g_0 S_0}{\tau_p} = \frac{v_g g_0 \Gamma \eta_i (I - I_{th})}{qV} \quad (17)$$

式中, τ 是载流子自发辐射寿命, τ_p 是光子寿命, v_g 为光群速, S_0 为腔内光子密度, Γ 是模式限制因子, g_0 是微分增益, η_i 为内量子效率, $I - I_{th}$ 为阈值以上的偏置电流。

同样, (14) 式的衰减系数 γ_n 也可近似表示为:

$$\gamma_n = \nu_g g_0 S_0 + \frac{1}{\tau} \quad (18)$$

2 数值模拟和结果讨论

限制激光器调制带宽的因素主要来自两方面, 一方面是器件张弛振荡频率的限制, 另一方面是器件寄生参数的影响。

对于纯电流调制, 光子的调制频率响应可写为:

$$M(\omega) = \frac{S_m(\omega)}{S_m(\omega = 0)} = \frac{\omega_n^2}{[(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \gamma_n^2]^{1/2}} \quad (19)$$

2.1 张弛振荡频率对器件调制特性的影响

对于以上分析, 我们采用 Matlab 软件进行数值模拟。图 1 是张弛振荡频率对器件调制特性的影响, 此情况下的调制特性表示成 $M(f)$ 和 f 的关系, 其中 $f = \frac{\omega}{2\pi}$, 图中的横坐标表示为频率, 单位是 GHz, 纵

坐标为相对强度, 单位是分贝 (dB)。由表 1 所示参数进行模拟得到图 1 中三条曲线 I、II、III。图 2、4、5 的曲线用相同方法进行模拟, 由图 1 可见, 激光器的调制存在一个张弛振荡峰值, 当调制频率小于该值时, 调制响应是平坦的; 当调制频率大于该值时, 调制效率迅速下降, 这主要是由器件本身的谐振效应决定的。由于自发辐射, 超辐射, 载流子扩散, 空间烧孔等因素的影响, 利用单模速率方程理论计算的谐振频率往往高于器件实际的调制带宽。

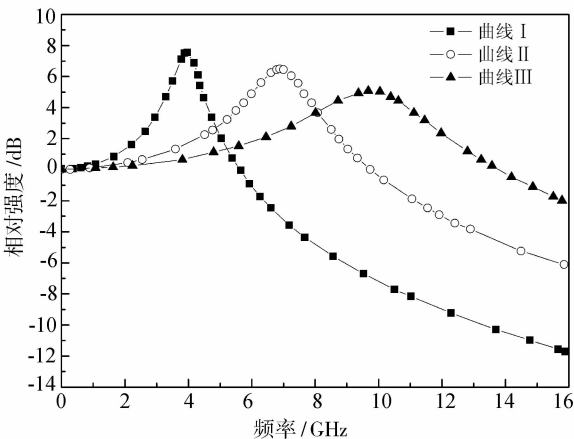


图 1 张弛振荡频率对器件调制特性的影响
Fig. 1 Effects of relaxation oscillations on the modulation characteristics

2.2 衰减系数对器件调制特性的影响

图 2 是衰减系数对器件调制特性的影响。当衰减系数 γ_n 比较小时, 调制曲线中有着比较明显的类

共振峰; 随着 γ_n 的增加, 类共振峰逐渐消失, 说明 γ_n 对类共振过程是一个内在的抑制因素。

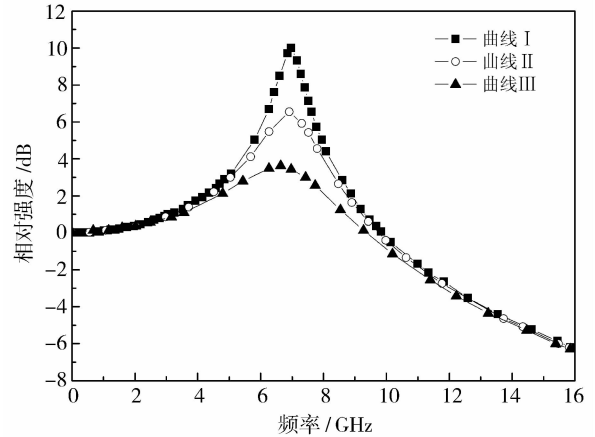


图 2 衰减系数对器件调制特性的影响
Fig. 2 Effects of attenuation coefficient on the modulation characteristics

2.3 寄生参数对器件调制特性的影响

对实际应用的器件来说, 不仅要考虑内在因素对调制特性的影响, 还要考虑寄生参数对它的影响。从电路元件的观点来看, 器件本身和电接触引线会引起电阻, 电接触引线可以引起电感, 器件的有源区电容和极间电容会引起寄生电容。作为光学器件的半导体激光器的等效电路如图 3 所示。其中 L 为引线电感, R 为激光器的串联电阻 (包括衬底电阻和接触电阻), D 为本征的二极管, C_1 为激光器的极间电容, C_2 为金属管壳的电容, 管壳电容通常忽略不计。用端电压为 V 的电流源驱动时, 由端子流入的全部电流 I 中的一部分流入半导体激光器, 其余的电流通过旁路的电容 C_1, C_2 流过, 由普通交流电路的解析方法导出的频率响应特性为^[13]:

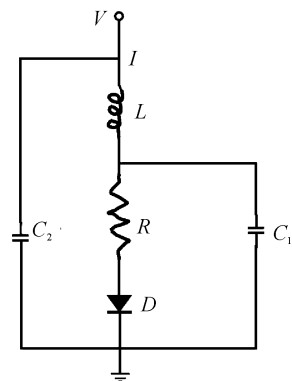


图 3 半导体激光器的等效电路
Fig. 3 Circuit diagram of laser diode

$$A(\omega) = \frac{I_{ml}(\omega)}{I_{ml}(\omega = 0)} =$$

$$\left\{ \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0 Q} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (20)$$

式中:

$$\begin{cases} \omega_0 = \left(\frac{50 + R}{LRC} \right)^{\frac{1}{2}} \\ Q = \frac{[LRC(50 + R)]^{\frac{1}{2}}}{L + 50RC} \end{cases} \quad (21)$$

半导体激光器的电阻 R 、电容 C 、电感 L 依赖于半导体激光器的材料、结构、类型、封装和布线方法,理论上难以精确求出所有的参数,但可以参考实际测试值,寄生参数在某些情况下会限制器件的调制带宽。图4是寄生参数对器件调制特性的影响。考虑到 $f = \frac{\omega}{2\pi}$,此情况下的调制特性表示成 $A(f)$ 和 f 的关系,可见对于寄生参数过大的器件,它们对器件调制带宽的影响不容忽视。

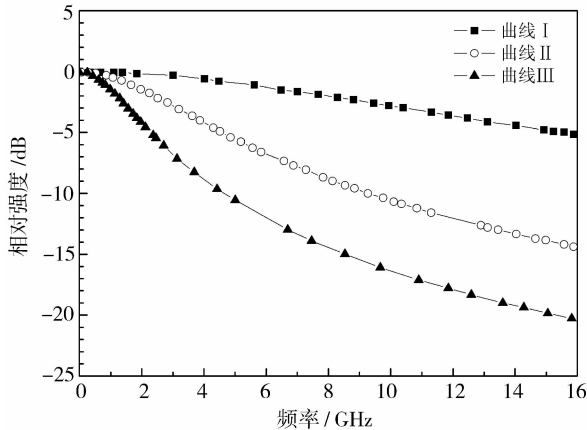


图4 寄生参数对器件调制特性的影响

Fig. 4 Effects of parasitic parameters on the modulation characteristics

表1 数值计算所需的参数值

Tab. 1 Parameters for numerical calculation

图形编号	曲线 I 的参数	曲线 II 的参数	曲线 III 的参数
图1	$f_n = 4 \times 10^9$ GHz, $\gamma_n = 4.4 \times 10^9$	$f_n = 7 \times 10^9$ GHz, $\gamma_n = 1 \times 10^{10}$	$f_n = 1 \times 10^{10}$ GHz, $\gamma_n = 2 \times 10^{10}$
图2	$f_n = 7 \times 10^9$ GHz, $\gamma_n = 4.4 \times 10^9$	$f_n = 7 \times 10^9$ GHz, $\gamma_n = 1 \times 10^{10}$	$f_n = 7 \times 10^9$ GHz, $\gamma_n = 2 \times 10^{10}$
图4	$R = 3 \Omega$, $C = 4$ pF, $L = 1$ nH	$R = 10 \Omega$, $C = 8$ pF, $L = 2$ nH	$R = 10 \Omega$, $C = 16$ pF, $L = 4$ nH
图5	$f_n = 7 \times 10^9$ GHz, $\gamma_n = 1 \times 10^{10}$ $R = 3 \Omega$, $C = 4$ pF, $L = 1$ nH	$f_n = 7 \times 10^9$ GHz, $\gamma_n = 1 \times 10^{10}$ $R = 10 \Omega$, $C = 8$ pF, $L = 2$ nH	$f_n = 7 \times 10^9$ GHz, $\gamma_n = 1 \times 10^{10}$ $R = 10 \Omega$, $C = 16$ pF, $L = 4$ nH

3 实验工作

图6为聚酰亚胺埋沟掩埋激光器的结构图和直调特性测试结果。该激光器芯片采用多次低压MOCVD外延技术生长而成,有源区为InGaAsP多量子阱结构,条形区为npnp InP掩埋结构。激光器腔长为300 μm ,有源区条宽2 μm 。由于npnp InP

2.4 测量的调制特性

对于一个器件,真实测量到的3 dB调制带宽是由激光器内在性质和寄生参数的共同作用决定的。半导体激光器的实际调制特性为 $M(f)$ 和 $A(f)$ 的关系。图5是弛振荡频率和寄生参数共同作用对器件调制带宽的影响,这里表示为 $M(f) \times A(f)$ 和 f 的关系。可见当器件的寄生参数太大时,激光器的3 dB调制带宽主要受寄生参数的带宽 $A(f)$ 限制,单纯改善器件的有源区结构成为徒劳,因此只能在解决了寄生参数限制的前提下,通过对器件的有源区和结构进行优化才能获取高的3 dB调制带宽。

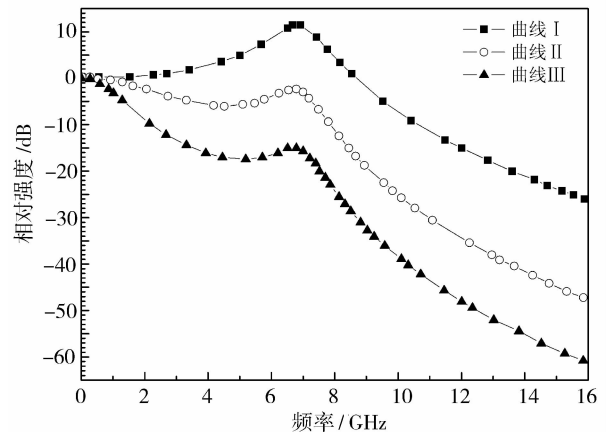


图5 弛振荡频率和寄生参数共同作用对器件调制带宽的影响

Fig. 5 Total effects of relaxation oscillations and parasitic parameters on the modulation characteristics

表1给出本研究数值计算时所需的参数值。其中各参数值的定取均参考了相关文献,计算结果也主要是为了定性描述各参数对激光器调制带宽的影响。

限制层高频下漏电严重,且该结构器件的寄生电容很大,因此采用聚酰亚胺埋沟后工艺,并在其上制作了宽度为80 μm 的电接触层,整个器件的结构示意图如图6中插图所示。腔面未镀膜时,器件的阈值电流8 mA,8 mW输出功率下的工作电流为48 mA,对应的发光波长为1.55 μm ,斜率效率0.2 W/A。HP8510微波网络分析仪测得器件的直调特性测试

结果如图6所示。从测试结果可知,对该类型的激光器,引入的聚酰亚胺埋沟后工艺增加了衰减系数,同时也有效的降低了寄生参数的影响。采用聚酰亚胺埋沟后的器件其小信号调制曲线特别平坦,但是器件的寄生电容对高频特性的影响并没有完全消除,偏置电流 20 mA 时,激光器的最大 3 dB 带宽为 5 GHz,大电流工作下器件的 3 dB 带宽仍小于器件的张弛振荡频率峰值。

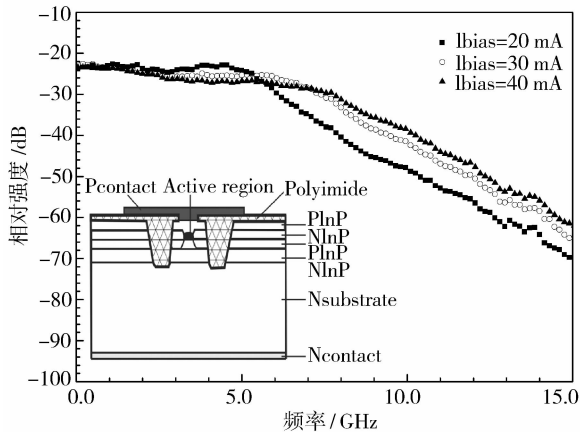


图6 聚酰亚胺埋沟掩埋激光器的结构图和直调特性测试结果

Fig. 6 Structure and high frequency characteristics test results of planar buried LDs with buried polyimide double trenches

图7为AlGaInAs脊形波导激光器的结构图和直调特性测试结果。AlGaInAs材料和InGaAsP的某些性质基本类似,四元合金AlGaInAs波长覆盖范围为 $0.8 \sim 1.6 \mu\text{m}$,也可与InP和GaAs衬底晶格匹配。但AlGaInAs可以得到更大导带偏移,进而能有效阻止高温及高注入电流密度情况下载流子的泄漏,改善器件温度特性;同时价带空穴注入一致性好,也可以改善高频特性。由于脊形波导具有小的寄生电容,因此采用常规的 SiO_2 介质膜而不是聚酰亚胺作为电隔离层,这大大降低了工艺复杂度。

本研究中的AlGaInAs材料脊形波导激光器,腔长为 $250 \mu\text{m}$,脊形条宽 $3 \mu\text{m}$,激光器P面电极是TiPtAu,N面电极AuGeNi,P面电极采用特制的光刻版制作出小电极面积。腔面未镀膜时该脊形波导激光器阈值电流15 mA,8 mW输出功率下的工作电流为55 mA,对应的发光波长为 $1.53 \mu\text{m}$,斜率效率 0.2 W/A 。测试时从激光器P面电极往铜热沉上引两根金丝,这样作虽然没有减小寄生电容的影响,但是两根引线会减小寄生电感的影响。测试结果也表明寄生参数没有限制激光器的3 dB带宽,最重要的是这种工艺相对简单、成本较低,对该类型的激光器,其最大的3 dB带宽可达8.5 GHz。由于脊形波

导器件具有较小的寄生电容,所以对于脊形波导器件的研究重点应放在提高器件的张弛振荡频率。期望通过材料优化而使得器件直流特性得到一定的改善,阈值电流的降低会使得器件的张弛振荡频率得到提高。

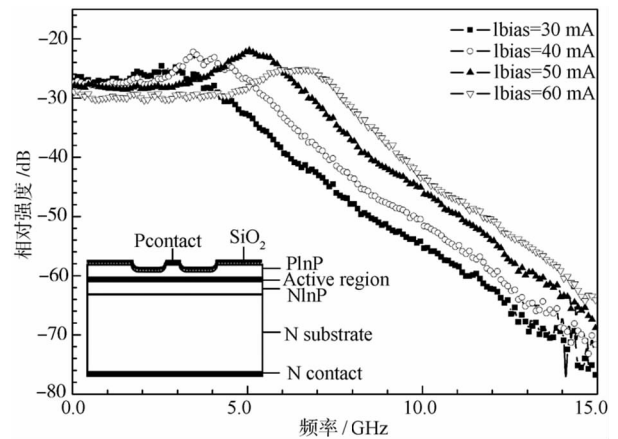


图7 AlGaInAs脊形波导激光器的结构图和直调特性测试结果

Fig. 7 Structure and high frequency characteristics test results of AlGaInAs ridge waveguide LD

4 结论

本研究通过理论推导和模拟计算,分析了寄生参数对半导体激光器调制特性的影响。对于实际中应用的半导体激光器,其3 dB调制带宽不仅受到器件有源区的结构和材料的制约,衰减系数和寄生参数(包括电阻、寄生电感、电容等,其中寄生电容的影响最大)也对器件最终的调制特性起着至关重要的作用。当器件的寄生参数太大时,激光器的3 dB调制带宽主要受寄生参数限制,因此只能在解决了寄生参数限制的前提下,通过对器件的有源区和结构进行优化才能获取高的3 dB调制带宽。对于制作的聚酰亚胺埋沟掩埋激光器,其最大3 dB调制带宽为5 GHz,聚酰亚胺埋沟后工艺减小了寄生电容对激光器调制特性的限制,同时该工艺还增加了衰减系数,使得激光器小信号调制曲线特别平坦。对于AlGaInAs脊型波导激光器其最大3 dB调制带宽为8.5 GHz,由于脊型波导结构具有小的寄生电容,该类器件的3 dB调制带宽主要受到张弛振荡频率的限制。

参考文献:

- [1] Lau K Y, Amnon Y. Ultra-high speed semiconductor lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1985, 21 (2):121-138.
- [2] Lau K Y, Bar C N, Ury I, et al. An 11 GHz direct modu-

- litation bandwidth GaAlAs window laser on semi-insulating substrate operating at room temperature[J]. Applied Physics Letter, 1984, 45:316-318.
- [3] Su C B, Lanzisera V, Olshansky R, et al. 15 GHz direct modulation bandwidth of vapour phase regrown 1.3 μm InGaAsP buried heterostructure lasers under CW operation at room temperature[J]. Electronics Letter, 1985, 21(13): 577-579.
- [4] Han H, Freeman N, Hobson W S, et al. High speed modulation of strain compensated InGaAs-GaAsP-InGaP multiple quantum well lasers[J]. IEEE Photonics Technology Letter, 1996, 8(9):1133-1135.
- [5] Matsui Y, Murai H, Arahira S, et al. 30 GHz bandwidth 1.55 μm strain compensated InGaAlAs-InGaAsP MQW lasers[J]. IEEE Photonics Technology Letter, 1997, 9(1): 25-27.
- [6] Yasuhiro M, Hitoshi M, Shin A, et al. Enhanced modulation bandwidth for strained compensated InGaAlAs-InGaAsP MQW lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998, 34(10):1970-1978.
- [7] 张静媛, 刘国利, 朱洪亮, 等. 1.5 μm InGaAsP-MQW 自对准压缩台面高速 DFB 激光器[J]. 高技术通讯, 2002, 2:51-57.
- Zhang Jingyuan, Liu Guoli, Zhu Hongliang, et al. 1.55 μm InGaAsP-MQW self-aligned constricted mesa high-speed DFB lasers[J]. High Technology Letters, 2002, 2: 51-57.
- [8] Suemune I, Coldren L A, Yamanishi M, et al. Extremely wide modulation bandwidth in a low threshold current strained quantum well laser[J]. Applied Physics Letter, 1988, 53:1378-1380.
- [9] Yasuhiro M, Hitoshi M, Shin A, et al. Novel design scheme for high speed MQW lasers with enhanced differential gain and reduced carrier transport effect[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998, 34(12): 2340-2349.
- [10] Bowers J E. High speed semiconductor laser design and performance[J]. Solid-State Electron, 1987, 30(1): 1-11.
- [11] Sergei A G. High Speed Diode Lasers [M]. Singapore: World Scientific Publishing, 1998.
- [12] 杜宝勋. 半导体激光器原理[M]. 北京:兵器工业出版社, 2001.
- [13] 斋藤富士郎著, 崔承甲译. 超高速光器件[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

(责任编辑 李虹燕)

简讯

西安理工大学新增软件工程和设计学一级学科硕士学位授权点

近日,国务院学位委员会印发了《关于下达按〈学位授予和人才培养学科目录〉进行学位授权点对应调整结果的通知》(学位[2011]51号文件),公布了一级学科对应调整的结果。经国务院学位委员会审核批准,我校新增软件工程和设计学一级学科硕士学位授权点,原艺术学硕士学位授权一级学科自动撤销。至此,我校博士学位授权一级学科达到10个,硕士学位授权一级学科达到23个,学位授予学科涵盖了经济学、法学、教育学、文学、理学、工学、农学、管理学、艺术学等九个学科门类,对于进一步完善学科布局、优化学科结构体系、提升学校综合办学实力具有重要意义。

(摘自西安理工大学新闻网 2011-09-06)