

高速掩埋半导体激光器设计与实验

肖建伟* 衣茂斌 高鼎三

国家集成光电子学联合实验室吉林大学实验区, 吉林大学电子科学系, 长春130023

(1992年2月10日收到; 1992年5月4日收到修改稿)

本文介绍了一种新型高速调制半导体激光器的设计思想、理论依据及实验结果。在掩埋新月型激光器的基础上, 对如何增加其调制带宽进行了深入研究。探讨了影响激光器调制带宽的主要因素, 综合分析了减小器件分布电容和增加输出功率之间的矛盾和解决的方法, 据此设计并研制出高速调制 $1.3\mu\text{m}$ InGaAsP/InP 多层限制掩埋新月型激光器, 器件的3dB调制带宽大于3GHz。

PACC: 4255P

一、引 言

随着光电子技术的迅猛发展, 半导体激光器已开始大规模地进入光纤通信等实用化领域, 并在实践中不断提出新课题。基于光频的光通信具有比一般微波通信高得多的基频, 可供开发的容量非常大。目前高速编码、解调技术对半导体激光器的带宽要求在数GHz, 一般激光器已难以胜任, 因此我们对半导体激光器高速调制特性进行了专门研究。

已达到实用化阶段的半导体激光器有 GaAs/AlGaAs 系列(波长 $0.78\sim 0.88\mu\text{m}$)和 InP/InGaAsP 系列(波长 $1.3\sim 1.55\mu\text{m}$)。为减少注入电流的扩展, 提高有源区的光功率密度进而提高激光器的张弛振荡频率和调制带宽, 高速调制激光器均采用窄条形结构, 同时要尽量减小器件的结电容。国外一般用两种主要的条形工艺达到上述目的: 采用聚酰亚胺和选择腐蚀相结合的介质电流限制层工艺的压缩台形结构^[1](Constricted Mesa); 由于其分布电容极小($\sim 1\text{pF}$), 它的调制带宽主要由张弛振荡频率 f_0 决定, 但其制作工艺却十分复杂, 包括在微米尺度上做数次精确的套刻、反应离子刻蚀、数次选择腐蚀、亚胺化工艺及刻蚀, 气相外延或质量输运外延。气相外延或质量输运等二次外延时还需精确控制生长宽度。如此复杂的工艺无疑降低了器件的成品率, 同时这种结构还存在着可靠性问题, 其寿命测试至今未见报道。另一种普遍采用的是半绝缘电流限制层掩埋条形^[2]。其优点是可做宽接触器件而仍保持很大的调制带宽, 降低了后工艺的难度。但半绝缘层的再生长一般需由气相外延(如 MOCVD 等)来完成, 不仅需要昂贵的设备, 而且半绝缘层对杂质扩散十分敏感, 这种器件往往由于 Zn 扩散而形成电流通道使器件的 P-I 特性和高频性能变坏。上述两类高速结构对工艺条件要求极为苛刻, 国内实验室还不具备条件, 因此这一研

* 现通信地址: 中国科学院半导体研究所, 北京100083。

究只能另辟途径.

掩埋类型激光器,如掩埋异质结(BH)和掩埋新月形(BC)激光器有比较好的直流特性和可靠性,寿命一般可大于10万小时,器件的成品率,重复性也比较好.通过理论分析和计算发现,若适当改进掩埋激光器的结构参数,这类激光器的调制带宽可达几个GHz,基本上可以满足目前大容量光纤通信的要求.我们选用了本实验室工艺上比较成熟的掩埋新月形激光器^[3]做为高速调制激光器的基本结构,并围绕高速响应进行了优化设计.

二、高速 BC 激光器的理论分析、计算与设计

首先定义几个与注入电流频率相关的函数:由分布参数决定的调制信号传输函数 $H(\omega) = i_1/i_i$; 光腔频率响应函数 $F(\omega) = s_1/i_1$ 和激光器的调制响应函数 $R_{mod}(\omega) = s_1/i_i = H(\omega) \cdot F(\omega)$. i_i, i_1 和 s_1 分别为调制信号电流,注入到有源区的调制电流分量和调制光子密度的模量.

1. 张弛振荡频率 f_c

我们曾用半导体激光器速率方程对有源区厚度变化由 $d(x)$ 表示的 BC 激光器进行过稳态特性分析^[4]. 其结果表明:BC 激光器稳态时载流子呈凹形分布,但当有源区宽度小于 $2\mu\text{m}$, 厚度小于 $0.3\mu\text{m}$ 时,载流子仅在 $10^{16}/\text{cm}^3$ 数量级上呈凹形分布,比起阈值载流子浓度 n_{th} 要小两个数量级 ($\sim 10^{18}/\text{cm}^3$). 在对 BC 激光器这类窄条形结构进行分析计算时,可假定光腔中载流子均匀分布,同时亦令光子呈均匀分布并忽略扩散项的影响,那么描绘激光腔中载流子和光子相互作用的单模速率方程为

$$\frac{dn}{dt} = \frac{i}{qV} + g'(n - n_t)s - \frac{n}{\tau_s} \quad (1-1)$$

$$\frac{ds}{dt} = \Gamma g'(n - n_t)s - \frac{s}{\tau_p} + \beta\Gamma \frac{n}{\tau_s} \quad (1-2)$$

式中 n, s 分别为注入载流子、光子密度, g' 是微分增益系数, i 为注入电流, V 为有源区体积, q 是电子电荷, Γ 和 β 分别为光限制因子和自发辐射因子, n_t 是有源区对激光变得“透明”时的载流子密度, τ_s 和 τ_p 分别为注入载流子寿命和光子寿命. τ_s 在激光器中约为 $1.6 \sim 2\text{ns}$, τ_p 可由公式

$$\tau_p = \frac{1}{v_g(\alpha_i + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R})} \quad (2)$$

给出. 其中 v_g 是群速度, α_i, L 和 $R = \sqrt{R_1 R_2}$ 分别为腔内损耗系数、腔长和平均端面反射率.

一般半导体激光器存在不止一个纵模模式. 做为一般分析应考虑多模速率方程,但相当繁杂,得出的调制响应分布的结果也与单模时类似,本文我们仅分析单模速率方程.

小信号时,可令 $n = n_0 + n_1 e^{j\omega t}$, $s = s_0 + s_1 e^{j\omega t}$, $i = i_0 + i_1 e^{j\omega t}$, 代入(1)式求解. 忽略高次项,激光器的光腔频率响应函数 $F(\omega)$ 为

$$F(\omega) = s_1/i_1 = \frac{A}{\omega^2 + B\omega j + C} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{其中} \quad A &= -\frac{\Gamma}{qV}(g's_0 + \frac{\beta}{\tau_s}), \\ B &= -[\frac{1}{\tau_s} + \frac{1}{\tau_p} + g'S_0 - \Gamma g'(n_0 - n_i)], \\ C &= -(g's_0 + \frac{1}{\tau_s})[\frac{1}{\tau_p} - \Gamma g'(n_0 - n_i)] - \Gamma g'(n_0 - n_i)(g's_0 - \frac{\beta}{\tau_s}). \end{aligned}$$

$F(\omega)$ 的极值点,也就是激光器的张弛振荡频率为

$$f_v = \frac{\omega_v}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{-\frac{B^2}{2} - C}. \quad (4)$$

当调制频率大于 f_v 时,半导体激光器的调制响应将急剧下降,因此 f_v 是激光器调制带宽的重要标志, f_v 大激光器可能的调制带宽也大. 为使(4)式的物理意义更明了,忽略(4)式中的阻尼项和自发辐射项,那么得出

$$f_v \propto \sqrt{\frac{g's_0}{\tau_p}} \quad (5)$$

(5)式给出了增加张弛振荡频率 f_v 的三种方法:增大光学增益系数 g' ,降低光子寿命 τ_p 和增加腔内光子密度 s_0 .

g' 与材料有关,材料选定之后 g' 主要与温度有关,室温附近应用时可不考虑 g' 的变化. 减小 τ_p 可增加张弛振荡频率 f_v , (2)式表明增加 α_i 可减小 τ_p ,但同时增加了激光器的总损耗和阈值电流,降低了激光器的外微分量子效率,因此并不能提高张弛振荡频率. 减小 R 也可减小 τ_p ,但要受到技术上的限制,如端面镀膜等. 从而减小激光器的腔长成为降低光子寿命的主要方法. 高电流偏置将会增加有源区的光子密度 s_0 ,同时也增加了按下式输出的稳态光功率密度 P_{out}

$$P_{out} = \frac{1}{2}s_0 h \omega_0 V_{gr} \ln \frac{1}{R} \quad (6)$$

$h \omega_0$ 是光子能量.

P_{out} 并不能无限增加,它要受下面几个因素的限制:1. 腔面损坏. 当单位面积腔面上所承受的光功率太大时,会烧毁激光器的解理腔面,破坏 $F-P$ 谐振腔,造成激光器无法恢复的损坏. $P_{out-cat}$ 是极限腔面光功率密度. 2. 由于热效应及激光器阈值温度敏感性,激光器的效率将随电流增加而降低,最终达到功率饱和及光子密度饱和. 3. 漏电流的影响. 若掩埋条形结构限制层参数设计不合适,当注入加大时,增加的电流将从漏电流通道流过,增加注入电流并不会增加 P_{out} 和 s_0 .

比较目前工艺上比较成熟的半导体激光器材料——GaAs/AlGaAs 和 InP/InGaAsP 系列,前者的 $P_{out-cat} \approx 1\text{MW}/\text{cm}^2$ ^[5] 而后者可高达 $20\text{MW}/\text{cm}^2$ ^[6],因此 InP/InGaAsP 材料更适合于制做高速激光器. 它的另一优点是 InP/InGaAsP 激光器 $1.3 \sim 1.55\mu\text{m}$ 的激光波长与低损耗光纤的传输窗口匹配,更具有实用价值. 另一方面,为了获得高 s_0 ,必须采用无电流扩展的窄条形掩埋结构,如前所述,我们选用了工艺简单性能优越的 BC 结构.

2. BC 激光器等效电路

BC 激光器交流等效电路见图1. 其交流漏电流主要有三种:经过 SiO_2 层的电流 I_1 , 相应的电容值很小,不随频率变化;流经 p-n-p-n 结的电流 I_2 , 由于几个结串联,相应的电容

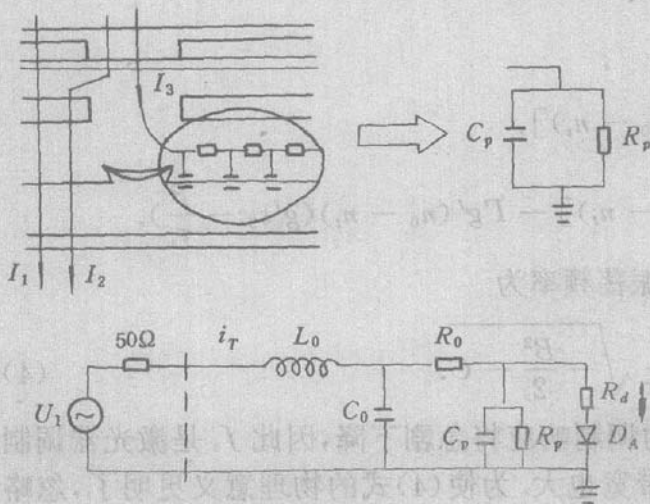


图1 BC激光器交流等效电路模型

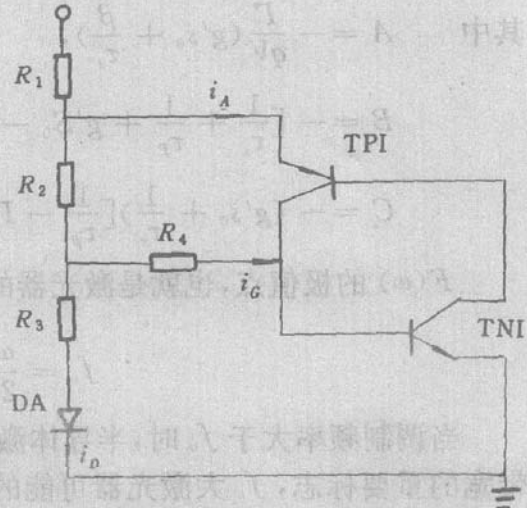


图2 BC激光器稳态直流等效电路模型

值也很小,仅有几个 pF;经下面 p 型电流限制层流过第一个 p-n 结的电流 I_3 , 我们把 I_3 流过的通道看作一系列电阻电容的串、并联,等效为电阻 R_p 和电容 C_p , 把 I_1 与 I_2 电流流经的通道等效为电容 C_0 . L_0 是引线电感, R_0 是接触电阻, R_d 是有源层上 InP 层的电阻, D_A 是有源区. 在简化计算中,高频时令 D_A 的阻抗为零. 这时可用标准的传输理论计算和分析 $H(\omega)$ 与各元件的关系,设计出最佳结构参数. 从图1中可定性看出,在高频时对 $H(\omega)$ 起作用的主要元件是 C_0 和 C_p , 其中 C_p 比 C_0 大得多,设法减小 C_p 是提高激光器电流注入效率的关键. 减小 C_p 的途径有两条,即减少单位面积的 p-n 结电容,这可由降低 p-n 结两边掺杂浓度来获得和增加夹层的横向薄层电阻,后者又可由降低夹层厚度,减低夹层掺杂或采用低迁移率材料做夹层来获得. 对 InP 材料在一般所用掺杂浓度范围内, n 型材料比 p 型材料的迁移率要大30倍左右(1500:50),采用 p 型材料做夹层比采用 n 型材料所得到的 C_p 要小得多,在高频时尤其如此.

图2是 BC 激光器的直流等效电路. BC 激光器的电流限制层的作用类似于晶闸管,对图2电路进行分析后得出的主要结论是:若要增加 s_0 , 就要避免晶闸管漏电和导通,方法是增加夹层厚度和掺杂浓度. 详细分析参见文献[7].

3. 计算与分析

图3(a)和(b)分别表示 n 型和 p 型衬底等效分布电容 C_p 和调制频率 f 的关系. 图中 P(或 N)表示下电流限制层的载流子浓度和导电类型. 从中可以看出 n 型衬底 C_p 随频率而减小的速度远大于 p 型衬底,因此尽管 p 型衬底 BC 激光器有极好的直流特性,但由于等效分布电容大, $H(\omega)$ 的带宽仅有数百 MHz 而 n 型衬底 BC 激光器可望有较高的带宽. 图4是计算得到的两类 BC 激光器的调制响应曲线. 计算时取相同的结构,输出功率 5mW, n-InP 和 p-InP 的迁移率分别为 $1400\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 和 $45\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. n-衬底和 p-衬底归一化调制带宽分别为 5.2GHz 和 0.45GHz. 从上一节的分析和计算结果我们都得出了同一结论:n-型衬底 BC 结构更适合于高速调制. 图5是在不同输出功率下 $R_{\text{mod}}(f)$ 的计算结果. 注入越高,也就是输出功率越高,BC 激光器的调制带宽越大,这里假定直流漏电流为零. 这与二、1中结论一致. 由二、2中的分析我们知道若要增加 s_0 就要增加 p-InP 电流限制层的厚度和掺杂,这又与降低 C_p 时要减小 p-InP 电流限制层的厚度和掺杂相矛盾. 为解

决这一矛盾,我们设计了一种新型的 BC 激光器结构:即增加一对 p-n InP 电流限制层. 上 p-n InP 电流限制层层厚和掺杂维持不变,以达到电流限制的目的,同时减小增加的一对下电流限制层的掺杂和层厚以降低 C_p . 这种结构既减小了器件的分布电容,又能维持高 s_0 , 是一种很好的高速激光器结构,我们称之为多层限制掩埋新月型激光器^[8].

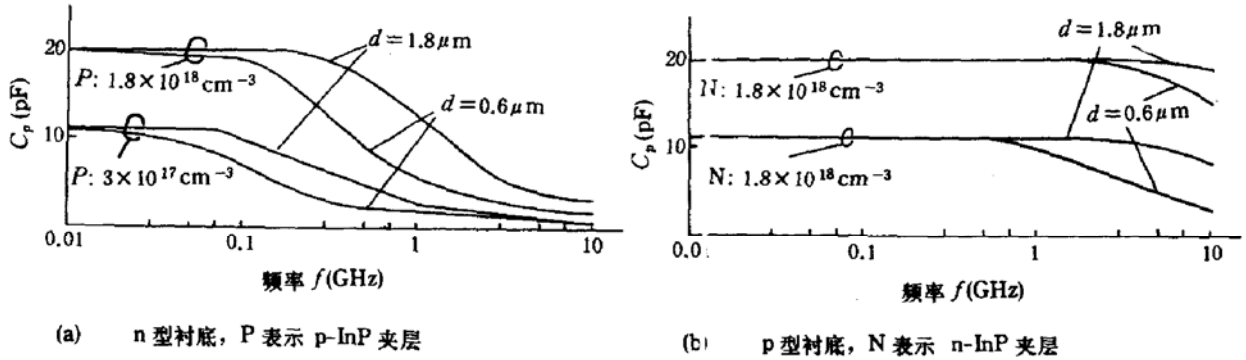


图3 计算得到的 BC 激光器电流限制层 InP 结等效分布电容 C_p . d 为电流限制层的厚度

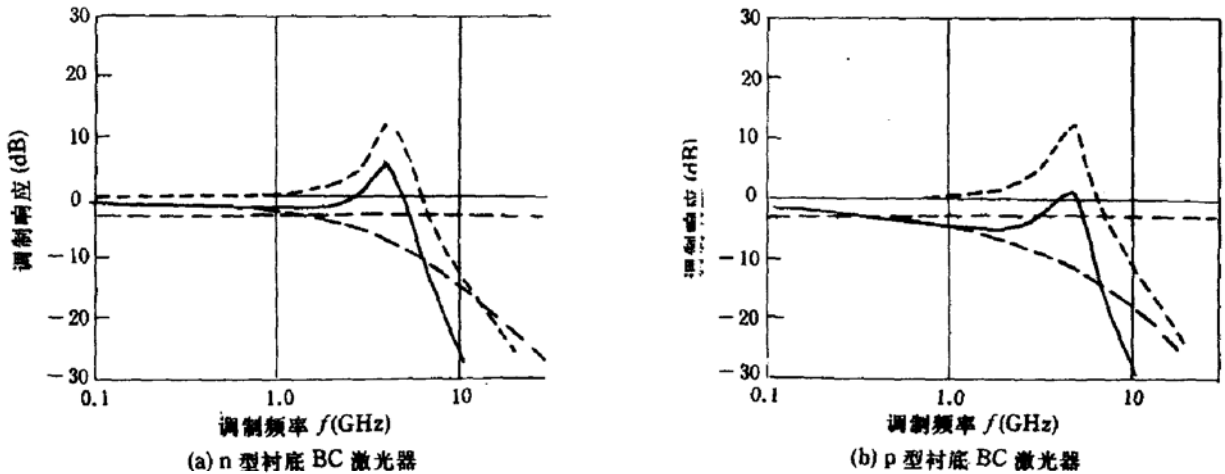


图4 两种 BC 激光调制响应曲线计算结果----- $F(f)$ ----- $H(f)$ —— $R_{mod}(f)$

三、高速调制 BC 激光器实验与结果

图6是高速调制多层限制 BC 激光器的结构图(见图版 I)。一次外延时,依次生长 n-InP 缓冲层($3\sim 5\mu\text{m}$, Sn, $4\times 10^{17}/\text{cm}^3$), p-InP($0.6\mu\text{m}$, Zn, $3\times 10^{17}/\text{cm}^3$), n-InP($0.5\mu\text{m}$, Sn, $1.5\times 10^{18}/\text{cm}^3$), p-InP($1.6\mu\text{m}$, Zn, $1.5\times 10^8/\text{cm}^3$)和 n-InP($0.7\mu\text{m}$, Te, $2.5\sim 3\times 10^{18}/\text{cm}^3$)电流限制层. 二次外延及后工艺与 BC 激光器相同^[3],不再赘述. 管芯正装在特制的高速管壳上,通过 SMA 接头与测试系统连接.

图7所示是激光器高速调制测量线路示意图. 用标量网络分析仪测出系统(激光器与探测器)的 S_{21} 参数,然后与用超短光脉冲标定过的探测器的响应曲线相比较,通过校正得到了激光器的响应曲线.^[7]图8是典型的多层限制 BC 激光器在不同注入时的调制响应曲线,调制带宽(-3dB)大于 3GHz . 需要说明的是,因标定仪器灵敏度所限,图7中所用 Ge 探测器的响应曲线只标定到 3GHz ,激光器的调制响应曲线也只能校正到 3GHz ,大于

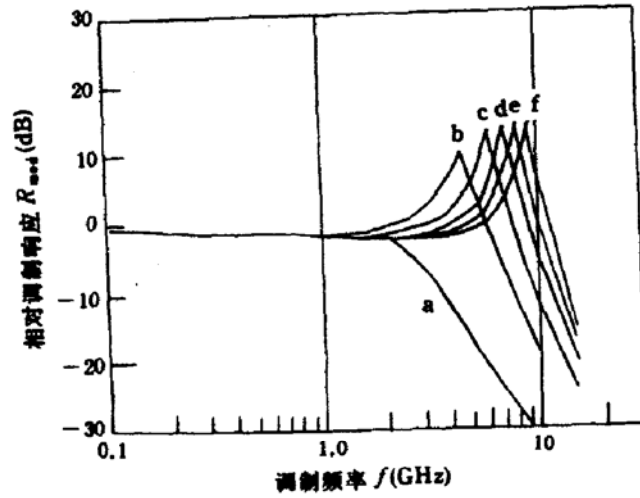


图5 不同偏置功率下n型衬底BC激光器 $R_{mod}(\omega)$ 的计算结果 激光器的偏置功率 P_0 分别为:a:1mW;b:4mW;c:7mW;d:10mW;e:13mW;f:16mW

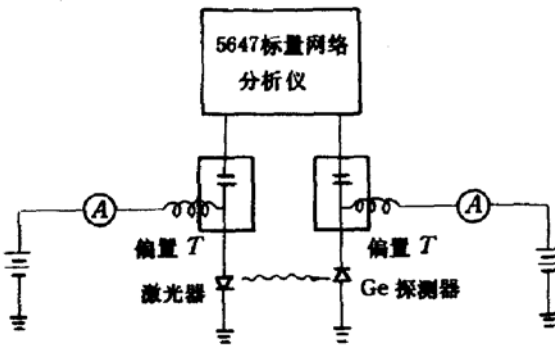


图7 激光器高速调制测量线路示意图

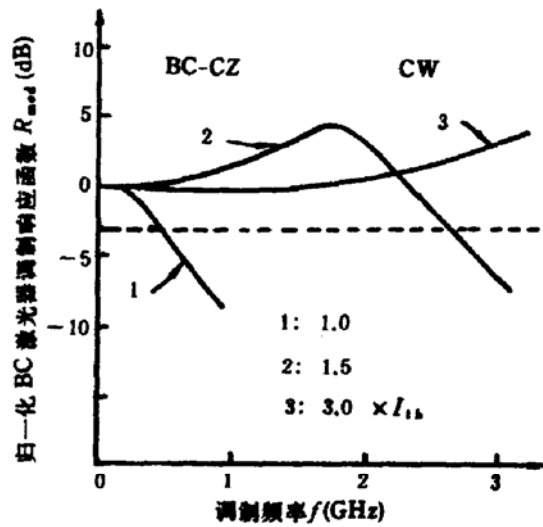


图8 不同注入时,多层限制BC激光器归一化小信号调制响应测量曲线,腔长 $L = 165\mu\text{m}$,p电极条宽 $s = 30\mu\text{m}$,p面朝上正装

3GHz 时,激光器的调制响应还不十分清楚,但从图8我们可推出一些结论:所测曲线的形状与理论计算相同,注入增加时,共振峰 f_r 向高频方向移动.若按一般经验公式 $\sqrt{P_0} \propto f_{-3\text{dB}}$ 推论,图8中曲线3的响应带宽应为5.2GHz.

图9是频率为4.0GHz 时的调制信号波形和输出光波形(见图版 I). 正弦信号由微波发生器给出,光信号是用 HP7104 取样示波器加 S_1 取样头采出的. 测量线路类似于图7. 研制出的多层 BC 激光器在4.0GHz 时仍有完好的正弦调制响应.

器件的直流特性已有报道^[8].

四、结 论

在掩埋新月形(BC)激光器的基础上,对激光器调制响应特性进行了系统的研究. 从

理论上探讨了影响 BC 激光器高频调制带宽的主要因素,分析了增加 BC 激光器调制响应带宽与增加稳态输出在结构设计上存在的矛盾,在详细分析、理论计算和实验数据的基础上,设计了可解决这一矛盾的多层限制掩埋新月形激光器.与传统高速激光器相比,其工艺简单、阈值低、重复性好.高速调制测试结果表明,多层限制 BC 激光器的调制响应带宽大于 3GHz.这种激光器为高速光通信及高速光电信息处理系统提供了一种有价值的光源.

致谢: 谨向给予支持的苗忠礼、薄报学、马玉珍同志,提供了 Ge 探测器的中国科学院半导体研究所张执中同志,提供了部份测试仪器和实验条件的中国科学院长春地理研究所张俊荣同志和机电部 13 所致谢.

参 考 文 献

- [1] J. E. Bowers, B. R. Hemenway, *et al.*, *J. Quantum Electron.*, **QE-22**, 833(1986).
- [2] N. K. Dutta, J. L. Zilko, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **48**, 1572(1986).
- [3] 肖建伟等,吉林大学自然科学学报,第四期,119(1987).
- [4] 薄报学,肖建伟等,中国激光,17,增刊,75(1990).
- [5] K. Y. Lau, A. Yariv, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-21**, 121(1985).
- [6] E Oomura, *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-17**, 643(1981).
- [7] 肖建伟,吉林大学博士学位论文,1989.
- [8] 肖建伟等,半导体学报,9,665(1988).

Design and Experiment Results for High Speed Buried Semiconductor Lasers

Xiao Jianwei*, Yi Maobin and Gao Dingsan

National Integrated Optoelectronics Lab., Department of Electronics Sciences, Jilin University, Changchun 130023

(Received 10 February 1992; revised manuscript received 4 May 1992)

Abstract

The design idea, theory and experiment results of a new semiconductor laser for high frequency modulation are reported. A detailed research was made to increase laser's modulation bandwidth based on buried crescent (BC) laser structure. The main problems which affect the bandwidth of BC lasers are found and discussed. The new kind of high speed laser structure, InGaAsP/InP multi-blocking-layer buried crescent laser, was designed and fabricated in our laboratory for high output power and low parasitic capacitance. A high 3-dB modulation bandwidth, more than 3-GHz was obtained.

PACC: 4255P

* Current address: Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083.