

低阈值 $1.5\mu\text{m}$ 平面掩埋脊型 (PBR) 分布反馈激光器

王 坊 张静媛 汪孝杰 田慧良

缪育博 张济志 王宝军

(集成光电子学国家重点联合实验室,中国科学院半导体研究所,北京,100083)

1991年3月7日收到,同年5月7日修改定稿

采用质子轰击的 PBR 结构,研制了室温阈电流小于 15mA , 高稳定单纵模输出的 $1.5\mu\text{m}$ DFB 激光器。为今后研制长寿命无致冷 $1.5\mu\text{m}$ DFB 激光器组合件奠定了基础, 在大温度范围 (-40 — $+60^\circ\text{C}$) 和大工作电流范围 (1.2 — $3I_{th}$) 内可稳定单纵模工作, 边模抑制比 (SMSR) 可达 30dB 以上。静态线宽一般为 30 — 40MHz , 最窄可低于 20MHz 。器件经 50°C 恒功加速老化实验, 外推 20°C 连续工作时间已超过 3000 小时无显著退化迹象。本器件已首次在国内做为信号源成功地用在 140Mb/S 相干光通信系统上。

PACC:4255P; EEACC:4320

一、引言

做为高速大容量长距离光纤通信的信号源, $1.5\mu\text{m}$ 光栅反馈型 DFB/DBR 激光器的发展极为迅速。为了提高器件的单纵模成品率, 采用了各种相移补偿结构^[1,2,3], 单纵模的成品率已达到 95% 以上^[4]。这为 DFB/DBR 激光器的商品化创造了条件。做为高速调制的信号源, 法国汤姆逊-CSF 中心研究实验室提出了一种质子轰击的平面掩埋脊型 DFB 激光器结构^[5], 利用质子轰击的办法使条型两侧的埋区形成半绝缘的高阻以减小器件的分布电容, 从而提高 DFB 激光器的调制速率。为了适应实用化的要求, 作者曾研制了工艺简单的脊型波导 (RW) 结构 DFB 激光器^[6]虽然这种结构器件能在较宽的温度范围 (2°C — 45°C) 和大的工作电流范围 (1.2 — $2.2I_{th}$) 下保持高的边模抑制比 (最高 SMSR > 30dB), 但因工艺限制了有源区的宽度不能窄于 $4\mu\text{m}$, 所以一般室温阈值都在 40mA 左右。由于工作电流过高会导致器件特性的不稳定, 也会造成实用化通信系统的诸多不便。

本文介绍了一种低阈值的 $1.5\mu\text{m}$ 质子轰击平面掩埋脊型 DFB 激光器, 其典型的室温阈值都在 12mA 左右。这就使得在制备组合件中可省去致冷器, 从而为器件的实用化以及长距离无中继通信系统的简易化创造了条件。

二、DFB 激光器参数的设计和关键工艺

1. 光栅的位置和光栅周期的确定

对于 DFB 激光器来说，光栅的位置可以刻制在 InP 衬底上，随后在光栅上生长 GaInAsP 四元有源层和波导层；另外也可以先生长四元有源层和波导层，然后再在波导层上刻制光栅。我们选择了后者，其优点是：(1) 我们可以在 InP 衬底上先生长一层 InP 过渡层，然后再生长四元有源层，这样可避免第一种结构直接在非平面的光栅上生长四元波导层和有源层而引入的结构缺陷。(2) 我们可以对先外延生长的四元有源层和波导层的厚度以及有源区的增益峰值进行测量，这有利于光栅周期的设计。

对于我们选用的在波导层上做光栅的 DFB 结构，可以看成一个五层阶梯状折射率分布的平面波导结构如图 1 所示。其中 n_1 和 n_5 分别代表 n^+ 和 P^+-InP 层的折射率， n_2 和 n_3 分别代表有源层和波导层的折射率， n_4 代表光栅层（即四元材料和 InP 材料周期交替变化层）的平均折射率。而有源层、波导层和光栅层的厚度分别用 a 、 w 和 g 代表。根据计算，可以得到有效折射系数 n_e 的解析表达式^①：

$$(s/r + t/s \cdot \tan \beta) \cdot \sin h(s \cdot g) - (t/r - \tan \beta) \cdot \cos h(s \cdot g) = 0,$$

其中 s 、 r 、 t 和 β 是逐层的折射系数，厚度以及有效折射系数 n_e 的函数。我们可以用数值法代入所选用的 n_1 、 n_2 、 n_3 、 n_4 和 n_5 ，以及有源层、波导层和光栅层的厚度 a 、 w 和 g ，就可以定出有源波导层的有效折射率系数 n_e 。例如，选 $n_1 = n_5 = 3.162$ ， $n_2 = 3.534$ ， $n_3 = 3.407$ ， $n_4 = 3.246$ ， $a = 0.12\mu m$ ， $w = 0.13\mu m$ ， $g = 0.06\mu m$ ，则可计算出 $n_e = 3.271$ 。根据 n_e 的计算值，我们可以由布拉格衍射定律 $A = m \cdot \frac{\lambda_B}{2n_e}$ 定出 $1.540\mu m$ 布拉格波长所对应的二级光栅 ($m = 2$) 的周期 $A: A = 15400/3.271 = 4720\text{ \AA}$ 。

2. 光栅制备中的等离子去胶和反应离子刻蚀

光栅工艺中最难解决的是大面积均匀光栅的重复获得。我们利用等离子去胶技术对全息曝光和显影后得到的胶膜图形进行处理，然后再用反应离子刻蚀方法对四元波导层

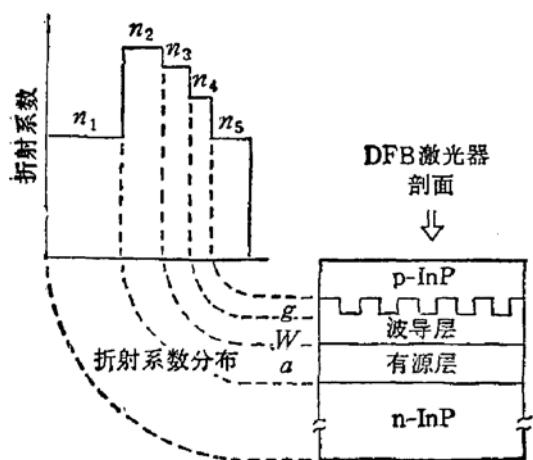


图 1 五层波导结构折射率分布

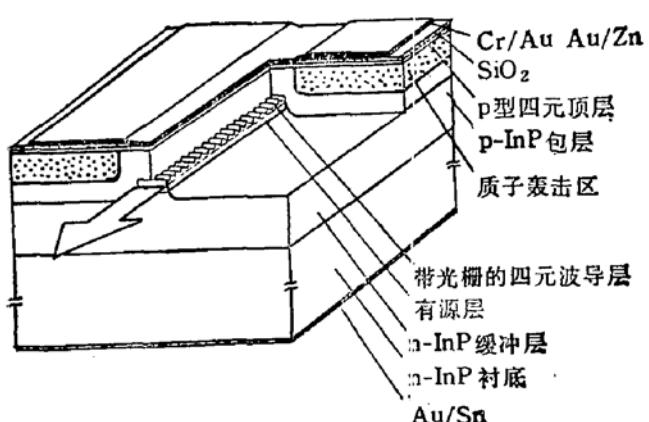


图 3 PBR-DFB 激光器结构图

进行刻蚀。图 2 (见图版 I) 是经离子刻蚀后的光栅剖面照片, 光栅深度超过 1000\AA 。

3. 二次外延生长溶液饱和度的选取

通常, GaInAsP 波导层上的光栅深度只有 $0.08\mu\text{m}$ 左右。在液相外延中, 如果不仔细地控制 InP 限制层生长溶液的过饱和度, 就会在形成 GaInAsP-InP 交界面过渡层时, 使 GaInAsP 光栅被 InP 生长溶液回溶掉。克服这一问题的关键是用较大的过冷度生长溶液来迅速生成 $(\text{GaInAsP})^s - (\text{In} + \text{InP})^l$ 固-液平衡的交界面, 从而终止 GaInAsP 光栅的继续被回溶。与此同时, 生长溶液的过冷度也在交界面处提供了成核的驱动力, 使得 InP 限制层开始生长。根据 Hsieh, J.J. 发表的富 In 溶液中各种温度下饱和磷原子分数的经验表达式^[8]:

$$X_p' = 1.76 \times 10^3 \exp(-11411/T),$$

我们可以计算出在任意生长温度下每克 In 溶剂中 InP 的饱和量 w_{InP} :

$$w_{\text{InP}} = X_p' \cdot M_{\text{InP}} / (1 - 2X_p') \cdot A_{\text{In}},$$

其中 M_{InP} 是 InP 的分子量, A_{In} 是 In 的原子量。根据我们的实验结果, 在 595°C 的外延生长溶液的过饱和度是 15°C , 即每克 In 中 InP 的加入量为 5.1 mg 。

4. 条型结构和三次外延

我们选用了平面掩埋脊型结构 (PBR) 如图 3 所示。在制备台面条型时利用选择腐蚀液刻蚀到四元波导层为止。其优点是在生长埋区前, 使条型有源区的侧面不曝露在外, 避免了外延前的污染和热损伤。因而有利于器件的长寿命工作。另外, 择优腐蚀也把台面两侧经历二次外延后的光栅再显露出来, 使我们对在光栅上生长 InP 限制层的二次外延质量有了一个直观的检测方法。

在三次外延 (生长埋区) 前, 用合适的欠饱和 InP 溶液对条型台面和条型台面两侧的光栅进行适当的回溶。为了减小器件的分布电容和防止在大驱动电流下因埋区的同质

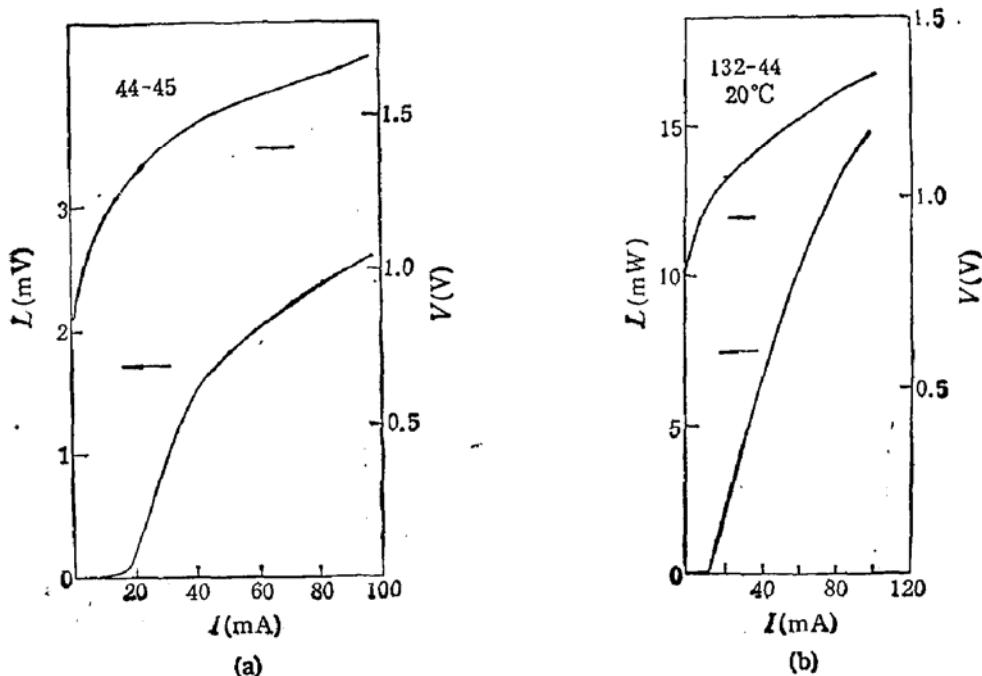


图 4(a) 阻塞区漏电的 PBR-DFB 激光器光强-电流特性和伏-安特性
(b) 经过 H^+ 离子轰击后的 PBR-DFB 激光器的光强-电流特性和伏-安特性

p-n 结导通而引起的漏电，我们用质子轰击技术在埋区形成半绝缘的高阻区。实验表明质子轰击的深度和轰击能量成正比，在轰击剂量用 $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 时，深度/能量比是 $0.8 \mu\text{m}/10\text{keV}$ 。

三、DFB 激光器特性与分析

1. 室温阈值电流和线性输出功率

由于平面掩埋脊型结构的阻塞区是由 InP 正向结组成，当器件驱动电流增加时，器件压降升高，阻塞区的漏电流也随之增加。图 4(a) 是通常 PBR 结构 DFB 激光器的光强-电流和伏-安特性曲线，当电压超过一定值时， $V-I$ 曲线发生扭折，微分串联电阻变小，电流随电压迅速增大，这表明阻塞区的正向 InP 结已导通。相应的光强-电流曲线也

发生扭折。发光效率下降。为了克服 PBR 结构的电流阻塞区漏电，采用 H^+ 质子轰击技术使阻塞区形成高阻区。图 4(b) 是经过质子轰击的 PBR-DFB 激光器的 $L-I$ 和 $V-I$ 特性曲线，都没有扭折发生，而且 $L-I$ 曲线的线性度有明显的改善。最大线性光功率输出为 10mW ，单面外微分量子效率为 22% 。典型器件的最高激射温度已超过 85°C 。

2. 静态光谱特性

光谱测量中用 PbS 作探测器，放大器为美国 EG 公司的 5208 锁相放大器，使用其对数座标挡。光栅单色仪是北京光学仪器厂出的 WDG30。激光器可用恒流源或高频信号源 ($f: 0.1-2.1\text{GHz}$ ，幅度到 16dBm) 驱动。系统备有变温装置 (美 FTS SYSTEMS, INC.)，变温范围 $-70-150^\circ\text{C}$ ，可进行不同电流，不同温度下的光谱测量。

图 5 是典型器件在 20°C 下，从 1.2 到 3 倍阈值电流的光谱，主边模强度比高达 33dB 。我们还在不同温度下测量了 1.5 倍阈值时的光谱。在我们测量的 100°C 温度范围内，都是稳定单纵模，主边模比在 30dB 以上。根据所测得的不

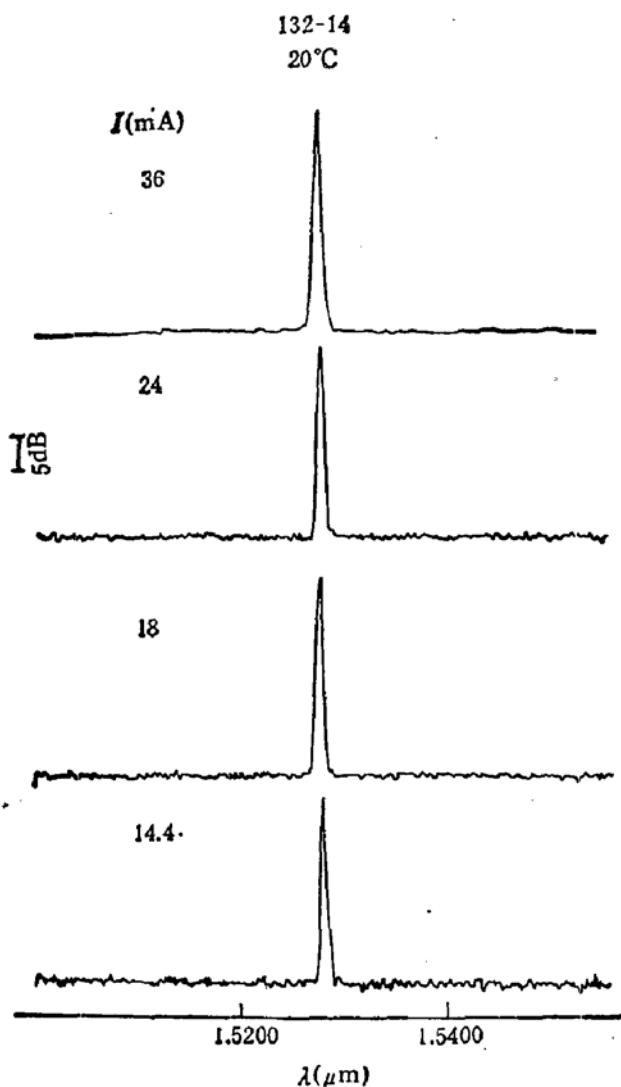


图 5 PBR-DFB 激光器在 20°C 环境温度下， $1.2-3I_{th}$ 驱动电流下的光谱

同温度下相应的单纵模波长数据，我们画出了波长和温度的正比关系直线，其斜率即波长温度系数为 $0.93 \text{ Å}/^\circ\text{C}$ (见图 6)。

我们已知, 在大的温度范围 (-40 — 60°C) 和大的电流变化范围 ($1.2I_{th}$ — $3I_{th}$) 里都能稳定的单纵模工作是 DFB 单模激光器和普通的 F-P 腔面激光器的重要区别。在实验中, 我们发现在阈值附近两者的自发发射光谱上也有很大差别。图 7 是 DFB 激光器在不同电流下的发射光谱, 其中最下面的是驱动电流为 $0.9I_{th}$ 时的自发发射光谱, 已存在一个突出的模式, 这说明该模式有较大的净增益即该器件有很强的模式选择性, 电流超过阈值后(见 68-3

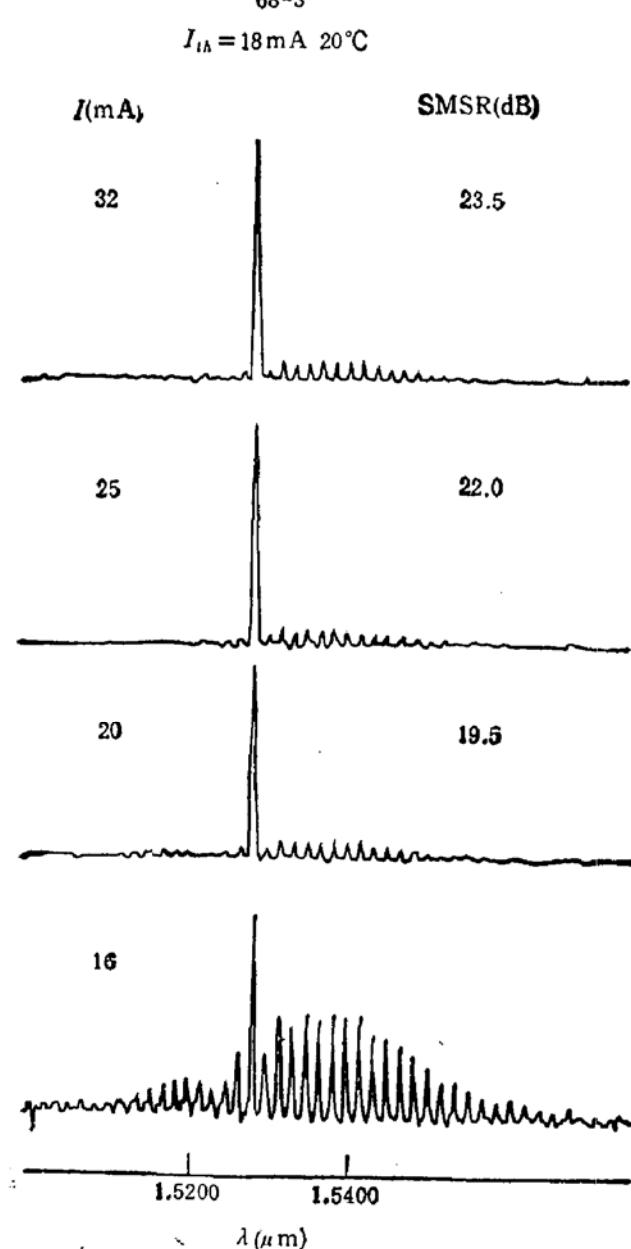


图 7 单纵模 PBR-DFB 激光器在不同电流下的发射光谱

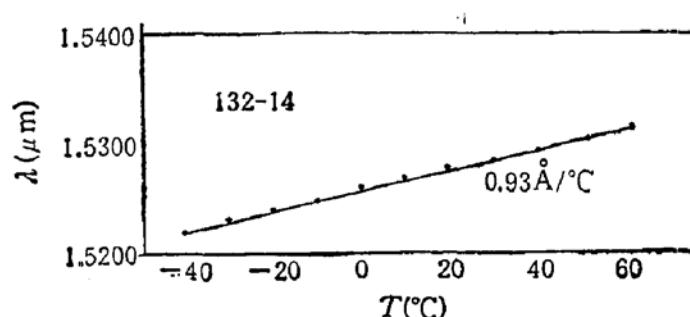
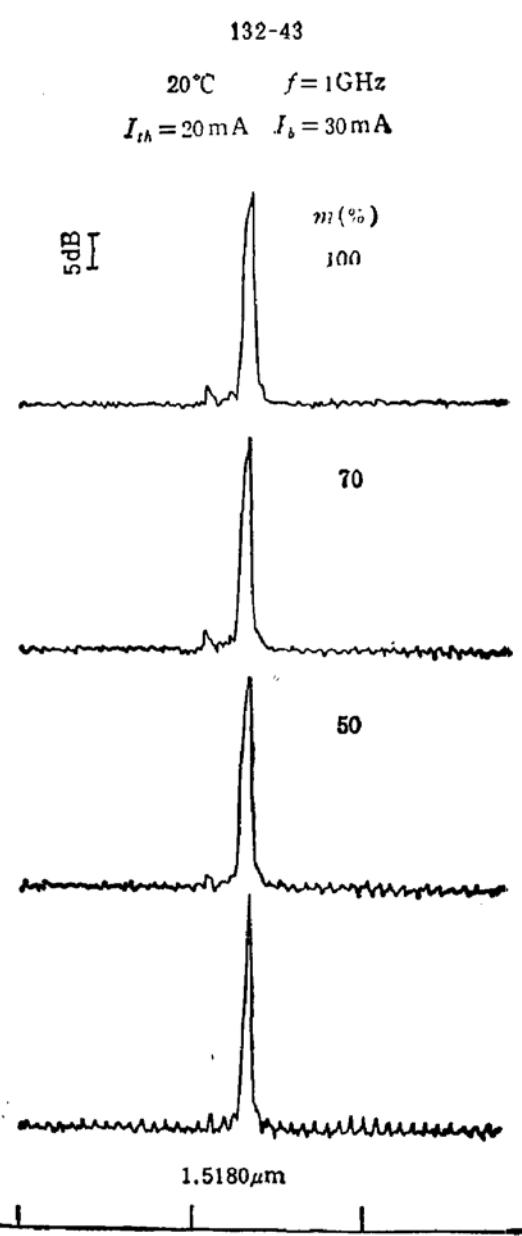


图 6 典型 PBR-DFB 激光器波长-温度关系

图 9 典型 PBR-DFB 激光器在 1 GHz 下, 不同调制度 m 时的动态光谱

上面的三套光谱),此模式即被选出。所以,这样的自发发射光谱可做为单纵模激光器初步筛选的判据。

3. 静态线宽

我们用清华大学电子工程系延迟零差拍法测量了典型器件的静态线宽,测量结果列于表 1。

表 1 典型 $1.5\mu\text{m}$ PBR-DFB 激光器静态线宽

管 号	测试温度($^{\circ}\text{C}$)	阈值 I_{th} (mA)	工作电流 (mA)	静态线宽 (MHz)
56	16.5	10	20	60
			30	24
105	16.5	10	20	40
			30	28
			40	20

由表 1 数据可知,随输出功率(工作电流)的增加,线宽变窄。图 8(见图版 I)给出了典型器件的拍频谱照片,在 30mA 工作电流下的线宽为 24MHz。

4. 动态特性

在 1GHz 正弦波调制下(偏流 $I_b = 2I_{th}$),测量了器件的动态光谱。图 9 给出了典型 PBR-DFB 激光器在 1GHz 下不同调制度 m 时的动态光谱。随着调制度的增加,谱线变宽。这意味着:虽然在高频调制下 DFB 激光器因光栅所决定的主边模的损耗差悬殊而仍可单纵模 ($\text{SMSR} > 25\text{dB}$) 工作,但在高频调制下随着调制度的加大,其注入载流子密度周期变化幅度也将增加,这会扩大有源波导区有效折射系数的变化幅度,从而加大了相应发射波长的周期移动的范围。由图可知,在调制度为 100% 时,动态谱宽 $\sim 3\text{\AA}$, $\text{SMSR} \sim 25\text{dB}$ 。本器件已做为信号源成功地用在 140Mb/S 相干光通信系统中。

5. 室温连续工作寿命

在鉴定期间曾做了五个没经预筛选的器件的高温恒功加速老化试验(50°C 恒功 1mW),连续工作 250 小时后测量 20°C 下的阈值,均无明显变化。假定慢退化的活化能为 0.7eV ,则外推室温连续工作时间 $\tau(20) = 13.14 \times \tau(20) = 13.14 \times 250 = 3285$ 小时。

四、结 束 语

采用质子轰击平面掩埋脊型结构,降低了 $1.5\mu\text{m}$ DFB 激光器的阈值,抑制了通过埋区的漏电流,改善了光输出的线性度。室温阈电流一般为 12mA ,最低为 9mA ,这为研制无致冷 $1.5\mu\text{m}$ DFB 激光器组合件奠定了基础。线性功率输出一般为 10mW ,单面外微分量子效率为 22%。最高激射温度为 85°C ,在 1.2 倍阈值到 3 倍阈值范围的主边模强度比最高可达 33dB 。静态线宽一般为 $40\text{--}50\text{MHz}$,最窄为 20MHz 。稳定单纵模的工作范围超过了 100°C 。

对所研制的器件进行了初步老化寿命考验,外推室温连续工作时间超过了 3000 小

时。从实用化(至少大于万小时)角度看,仍然需努力才能满足实际光通信系统的要求。目前正致力于消除因光栅而引入的应力和界面缺陷并设法改进电极、烧结、压焊等工艺技术,以求得到长寿命器件。

为了提高 DFB 激光器的单纵模成品率,除了在光栅制备上或在条型结构上采用相移补偿措施或开展 AR-HR 膜的研究外,实验结果还表明外延组分的均匀性亦很重要。我们有必要应用 MOCVD 超薄层生长技术来代替 LPE 方法以获得均匀厚薄和均匀组分的外延片。

致谢 作者对马朝华、王丽明、吕卉、张洪琴、关纬等同志在器件后工艺制做,陈纪英同志在 RIE 工艺,张汉一、谢世钟、孙 波、杨培生等同志在器件特性测试方面的协助和建设性的意见表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Sekariedjo, K., et al., *Electron. Lett.*, 21, 525(1985).
- [2] Utaka, K., et al., *ibid.*, 20, 1008(1984).
- [3] Broberg, B., et al., *Appl. Phys. Lett.*, 47, 4(1985).
- [4] Utaka, K., et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-22, 1042(1986).
- [5] Talneau, A., et al., *Electron. Lett.*, 24, 10(1988).
- [6] 王 坊等,半导体学报,10(10),794(1989).
- [7] Burkhard, H., et al., *IEE Proc. J. Optoelectronics*, 134(1), 7(1987).
- [8] Hsieh, J. J., *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-17(2), 119(1981).
- [9] Kamite, K., et al., *Electron. Lett.*, 24(15), 933(1988).

Low Threshold Current $1.5\mu\text{m}$ PBR-DFB Lasers

Wang Wei, Zhang Jingyuan, Wang Xiaojie, Tian Huiliang, Miao Yubo,
Zhang Jizhi and Wang Baojun

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing, 100083)

Abstract

Low threshold current of less than 15mA at room temperature and high stable single longitudinal mode $1.5\mu\text{m}$ DFB lasers were prepared by using proton bombarded PBR structure. It will be a key to developing long life time $1.5\mu\text{m}$ DFB module without cooler. The stable single longitudinal mode operation can be kept in large temperature range ($-40\text{---}+60^\circ\text{C}$) and large driving current range ($1.2I_{\text{th}}$ to $3I_{\text{th}}$). The side mode suppression ratio (SMSR) is more than 30 dB . The typical linewidth of the PBR-DFB lasers is about $30\text{---}40\text{ MHz}$ and the narrow one is less than 20 MHz . The 3000 hours CW operation at room temperature was extrapolated by using accelerated test at 50°C with APC. Without any serious degradation. The PBR-DFB lasers have been used as a signal source of 140 Mbit/s coherent communication system for the first time in China.

PACC: 4255P; EEACC: 4320