

高频大功率 InGaAsP/InP SPB-BC 激光器*

张佰君 衣茂斌 李德辉 申智渊 苗忠礼 高鼎三

(吉林大学电子工程系集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区 长春 130023)

提要 在普通掩埋新月型激光器的基础上,提出了一种高频大功率的 InGaAsP/InP 激光器结构——选择性质子轰击掩埋新月型(SPB-BC),并对激光器结构模型进行了理论分析。采用 p -InP 衬底,最大输出功率为 80 mW。500 μm 腔长激光器,它的调制带宽可以达到 6.0 GHz。

关键词 选择性质子轰击,调制带宽,寄生电容

1 引 言

高频大功率 InGaAsP/InP 半导体激光器在长距离光通讯、相控天线阵雷达及光纤有线电视(CATV)等方面有广泛的应用。为了得到大功率的 InGaAsP/InP 半导体激光器,出现了各种各样的结构。比较典型的是掩埋新月型(BC)激光器^[1],由于漏电流较小,所以有大功率特性,但是这种结构的激光器由于它的电流阻挡层有反向的 p - n 结,寄生电容很大,激光器的高频调制特性较差。为了减小器件的寄生电容,在 BC 激光器新月型有源区两侧腐蚀出两个隔离沟,这种结构在减小器件寄生电容方面起到了一定作用,但它使制作的工艺过程复杂化。随着 MOCVD 生长技术的发展,出现了一种带有掺 Fe-InP 半绝缘层的 BC 结构^[2,3]。这种掺 Fe-InP 半绝缘层有较高的电阻率和较小的寄生电容。为了进一步减小激光器的寄生电容,可以在新月型有源区两侧腐蚀出两个隔离沟^[4,5],这种激光器有较好的功率和高频特性,但是,这种结构不但制作工艺复杂、造价高,而且存在一个问题,那就是在半绝缘层的两侧有双注入现象,漏电流高。另外,生长出高质量的掺 Fe-InP 半绝缘层还是一项比较难的技术。目前,国内还没有这方面的报道。众所周知,InP 材料经过质子轰击之后,它的电阻率能够提高,尤其对 p 型 InP 材料,只要质子轰击时,轰击的能量和剂量合适,它的电阻率可以达到 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 量级^[6]。在实验中,利用掩埋新月型激光器具有高功率特点,又结合 InP 材料经过质子轰击电阻率提高这一特性,提出了一种新型的高频大功率激光器结构——选择性质子轰击掩埋新月型(SPB-BC)。这种结构的激光器具有很好的功率和高频特性。腔长为 500 μm ,最大输出功率可达 80 mW,调制带宽可达 6.0 GHz。

* 博士点基金资助项目。

收稿日期: 1997-01-06; 收到修改稿日期: 1997-07-08

2 SPB-BC 激光器的制作

选择性质子轰击掩埋新月型激光器是在传统的掩埋新月型激光器的基础上建立起来的。这种激光器是经过两次液相外延实现的。首先,用 LPE 技术生长电流阻挡层,在掺 Zn 的 p -InP 衬底上依次生长 p -InP 缓冲层(掺 Zn, $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $5 \mu\text{m}$), p -InP 层(掺 Zn, $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $3 \mu\text{m}$), n -InP 层(掺 Sn, $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $0.7 \mu\text{m}$), p -InP 层(掺 Zn, $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $2 \mu\text{m}$), InGaAsP 掩蔽层。经过光刻,用 $\text{HCl}:\text{CH}_3\text{COOH}:\text{H}_2\text{O}_2$ (体积比 1:2:1, 室温)腐蚀液,沿 $\langle 011 \rangle$ 方向把 InGaAsP 层开出 $2 \mu\text{m}$ 宽的窗口,再用 $\text{HCl}:\text{H}_3\text{PO}_4$ (体积比 3:1, 2°C) 腐蚀液腐蚀出箭头形沟道,去掉 InGaAsP 掩蔽层,进行二次液相外延生长,依次为 p -InP 下限制层(掺 Zn, $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), InGaAsP 有源区($l_g = 1.3 \mu\text{m}$), n -InP 上限制层(掺 Sn, $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), n^+ -InGaAsP 接触层(掺 Te, $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)。在外延片的 n 面蒸镀 Au-Ge-Ni, p 面蒸镀 Au-Zn, 合金之后,用一个带有钨网并可以微调的特殊框架对有源区沟道作掩蔽,然后作质子轰击。钨网的周期与有源区沟道相同,钨丝的直径为 $10 \mu\text{m}$ 。为了使质子轰击的效果更好,在实验中采用多能量质子轰击的方法,使轰击区域成为一条轰击带,轰击的能量和剂量分别为 $400 \text{ keV}, 1 \times 10^{15} \text{ cm}^2$; $300 \text{ keV}, 6 \times 10^{14} \text{ cm}^2$; $200 \text{ keV}, 3 \times 10^{14} \text{ cm}^2$; $100 \text{ keV}, 2 \times 10^{14} \text{ cm}^2$ 。图 1 为选择性质子轰击激光器结构示意图 (a) 与电镜照片 (b)。

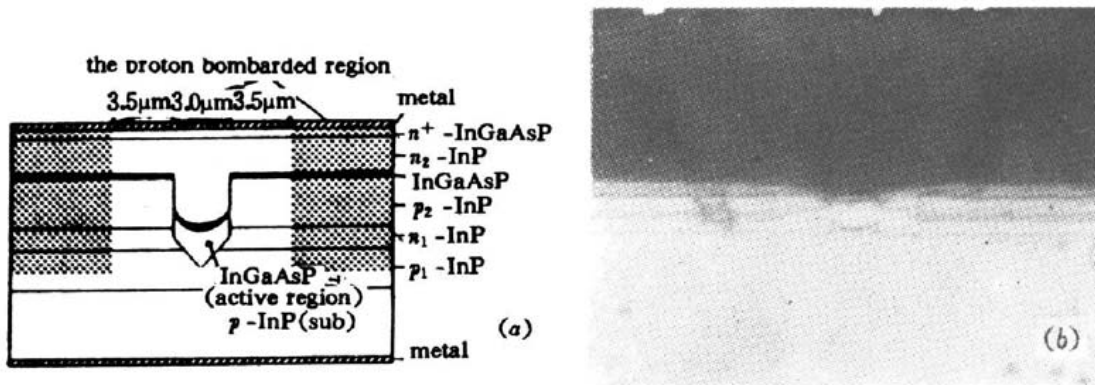


图 1 选择性质子轰击激光器的结构示意图 (a) 与电镜照片 (b)

Fig. 1 The cross-sectional view (a) and SEM photograph (b) of the SPB-BC laser

这种结构的优点为:(1) 从电镜照片中可以看出由于这种结构有源区生长在沟内,有源区在沟的边缘是夹断的,只要掩蔽得好,有源区不会被质子轰击损伤,不会产生轰击缺陷,量子效率及寿命不会受到影响;(2) 从工艺过程可以看出,由于合金过程是在质子轰击之前完成的,所以,不会产生退火现象,质子轰击的效果不会受到影响;(3) 由于是用钨丝作掩蔽,轰击的能量可以足够高,能够消除限制层的闩流管导通现象,提高了限制层对电流的限制作用,器件的寄生电容也明显减小;(4) 工艺过程简单,成品率高。

3 SPB-BC 激光器结构模型的理论分析

3.1 SPB-BC 激光器漏电流分析

激光器结构的好坏直接影响激光器的性能。本文从限制层对电流的限制作用及有源区不同生长位置对漏电流的影响两方面进行分析。

InP 材料经过质子轰击之后电阻率提高,这是因为 InP 材料经过质子轰击相当于引入深能

级杂质缺陷,这些深能级杂质缺陷将俘获自由载流子,使自由质子浓度下降,从而提高了 InP 材料的电阻率。高剂量质子轰击引入的深能级缺陷费米能级在距本征费米能级之上 0.3~0.34 eV 处。对于 *n*-InP 材料,随着质子轰击剂量的提高,费米能级将由导带底向下移动,当移动到高剂量质子轰击引入的深能级缺陷费米能级处时,轰击的剂量再增加时费米能级也不再向下移动,这时,质子轰击的 *n*-InP 材料达到最大的电阻率,约为 $10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 量级。对于 *p*-InP 材料,随着轰击剂量的增加费米能级从价带顶向上移动,电阻率将不断提高,当轰击剂量增加到一定程度时,费米能级将移动到本征费米能级处,这时,材料的电阻率达到最大值,约为 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 量级,这一剂量为质子轰击的最佳剂量值。当质子轰击的剂量继续增加时,费米能级将继续向上移动,这时 *p* 型 InP 材料变成弱 *n* 型,电阻率也将随着轰击剂量的提高而下降。质子轰击的射程与轰击的能量成比例,一般为 $0.9 \mu\text{m}/100 \text{keV}$,质子轰击所带来的损伤深度约为射程的两倍。因此,选择一个适当的轰击剂量和能量可以使轰击区获得最大的电阻率和最佳的轰击损伤深度。对于普通的 BC 激光器,电流比较小时,限制层对电流的限制作用比较好,随着电流的增加,具有 *pnpn* 限制层结构的限制层将会导通,从而使漏电流变大,影响激光器的输出功率。而对于 SPB-BC 激光器,由于选择性质子轰击使 *pnpn* 限制层结构的限制层效应消失,提高了限制层对电流的限制作用。

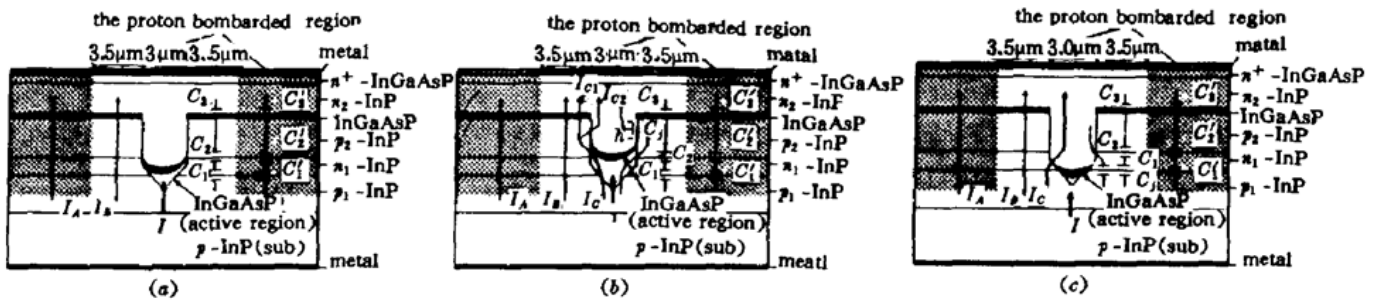


图 2 有源区不同生长位置的漏电流及寄生电容分布示意图
Fig. 2 The distribution of leakage current and parasitic capacitance

当有源区的生长位置不同时,对电流的限制也不同。图 2 给出了有源区三种不同生长位置的漏电流情况。图 2 (a) 是新月型有源区刚好生长在 n_1p_2 结的结线处,漏电流有经过轰击区的电流 I_A 和经过有源区两侧各 $3.5 \mu\text{m}$ 非轰击区的电流 I_B 。轰击区的电阻率很高,电流 I_A 非常小,漏电流主要是 I_B ,这是一种理想的情况。实验中,有源区经常是生长在 n_1p_2 结线之上或之下,对于有源区生长在 n_1p_2 结线之上的图 2(b) 情况,漏电流除了 I_A 和 I_B ,还有经过有源区两侧正向 *pn* 结漏掉的电流 I_C ,它包括两部分, I_{C2} 是经正向 p_2n_2 结漏掉的电流, I_{C1} 是经正向 *pn* 结夹有源层所漏掉的电流。对于 *pnpn* 结构的限制层,它相当于一个限制管,而漏电流 I_C 就相当于限制管的门极,随着工作电流的不断提高,漏电流 I_C 将不断增加,当增加到一定程度时 *pnpn* 限制层结构的限制层就会导通,但有源区两侧各 $3.5 \mu\text{m}$ 的非轰击区的面积比较小,这部分的漏电流也比较小。图 2(c) 是有源区生长在 n_1p_2 结线之下的情况,与图 2(b) 相同,漏电流由 I_A, I_B 和 I_C 三部分组成,但由于与有源区相邻的 InP 材料类型不同, I_C 部分的电流不同,在图 2(c) 中,与有源区相邻的是 *n*-InP,电子的迁移率比空穴的迁移率大,因此,电流 I_C 比图 2(b) 中的 I_C 大。比较这三种情况,第三种情况的漏电流最大,第一种情况最小,但这只是理想情况,实验中,希望把有源区长在 n_1p_2 结线之上,这时漏电流比较小。

3.2 SPB-BC 激光器寄生电容分析

根据 pn 结势垒电容理论^[7], 对于突变结, 在耗尽层近似的条件下, pn 结的势垒电容可表示为

$$C_T = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{x_m}$$

$$x_m = \left[\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{q} \frac{N_D + N_A}{N_D N_A} (V_D - V) \right]^{1/2} = 1.15 \times \left(\frac{\varepsilon}{12} \right)^{1/2} \left(\frac{V_D - V}{V} \right)^{1/2} \left(\frac{10^{15} \text{ cm}^{-3}}{N^*} \right)^{1/2} (\mu\text{m})$$

其中, x_m 为 pn 结空间电荷区厚度; N_D, N_A 分别为 n 区的施主浓度, p 区的受主浓度; $N^* = \frac{N_D N_A}{N_D + N_A}$ 被称为约化浓度; V_D 为 pn 结的接触电势差; V 为外加电压; ε_0 为真空介电常数; ε 为介质的介电常数, 对于 InP 材料, $\varepsilon = 12.4$ 。在没有轰击的情况下, 取 $N_D = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_A = 7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $V_D - V = 3 \text{ V}$, 则 $x_m = 0.1 \mu\text{m}$, $C_T = 1.0 \times 10^{-3} \text{ pF}/\mu\text{m}^2$ 。在正向偏压下, pn 电容可以表示为

$$C_D = \frac{e^2}{kT} (p_n^0 L_p + n_p^0 L_n) e^{eV/kT}$$

其中 L_p, L_n 分别为空穴和电子的扩散长度; V 为 pn 结上的压降。 $C_D \approx 4.2 \times 10^{-3} \text{ pF}/\mu\text{m}^2$ 。对轰击后的情况, 由前面的分析可知, 质子轰击使 InP 材料的电阻率提高, 根据 $1/\rho_n = \sigma_n = ne\mu_n$, $1/\rho_p = \sigma_p = pe\mu_p$ 。对 n -InP 材料, $\mu_n = 4500 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 轰击后电阻率 $\rho_n = 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$, 对 p -InP 材料, $\mu_p = 100 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 轰击后电阻率 $\rho_p = 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$, 所以有 $n = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, $p = 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 。轰击前与轰击后电容比为

$$\frac{C_T}{C_{TH}} = \frac{x_m}{x_{mH}} = \left[\frac{N_{DH} + N_{AH}}{N_{DH} N_{AH}} (V_{DH} - V) \right]^{1/2} \left[\frac{N_D + N_A}{N_D N_A} (V_D - V) \right]^{-1/2}$$

式中 $C_{TH}, x_{mH}, N_{DH}, N_{AH}$ 和 V_{DH} 分别为轰击后的 pn 结势垒电容、空间电荷区厚度、施主浓度、受主浓度和接触电势差。其中 $[(V_{DH} - V)/(V_D - V)]^{1/2} \approx 1$, 所以

$$C_T/C_{TH} = \left(\frac{N_{DH} + N_{AH}}{N_{DH} N_{AH}} \frac{N_D N_A}{N_D + N_A} \right)^{1/2} \approx 10^5$$

从这里可以看出轰击后 pn 结的势垒电容变得很小, 可以忽略不计。

对于异质结情况, 空间电荷区厚度 x 可表示为

$$x = \left[\frac{2\varepsilon_n \varepsilon_p \varepsilon_0 (N_D + N_A)^2 (V_D - V)}{e N_D N_A (\varepsilon_n N_D + \varepsilon_p N_A)} \right]^{1/2} = 1.05 \times \left(\frac{\varepsilon^*}{10} \right)^{1/2} \left(\frac{V_D - V}{V} \right)^{1/2} \left(\frac{10^{15} \text{ cm}^{-3}}{N^*} \right)^{1/2} (\mu\text{m})$$

式中 $N^* = \frac{N_D N_A}{N_D + N_A}$ 为约化浓度; $\varepsilon^* = \frac{\varepsilon_n \varepsilon_p (N_D + N_A)}{\varepsilon_n N_D + \varepsilon_p N_A}$ 为约化介电常数。异质结势垒电容 C_H 可表示为

$$C_H = \frac{\varepsilon^* \varepsilon_0}{x} = 8.42 \times 10^3 \left(\frac{\varepsilon^*}{10} \right)^{1/2} \left(\frac{N^*}{10^{15}/\text{cm}^3} \right)^{1/2} \left(\frac{V}{V_D - V} \right)^{1/2} (\text{pF}/\text{cm}^2)$$

由此可以推算出异质结电容为 $C_H = 3.0 \times 10^{-4} \text{ pF}/\mu\text{m}^2$ 。图 2 给出了有源区生长位置不同时 SPB-BC 激光器寄生电容的分布情况: (1) 有源区生长在 $n_1 p_2$ 结的结线处, 器件的寄生电容是两部分的并联, 一部分是有源区两侧非轰击区的电容, 它是三个电容的串联: 正向 $p_1 n_1$ 结的结电容 C_1 , 反向 $n_1 p_2$ 结的结电容 C_2 和异质结空间电荷区的电容 C_3 。根据分析, 对 $500 \mu\text{m}$ 长, $7 \mu\text{m}$ 宽的非轰击区, $C_1 = 14.7 \text{ pF}$, $C_2 = 3.5 \text{ pF}$, $C_3 = 1.1 \text{ pF}$, 串联电容 $C_1 = 0.8 \text{ pF}$ 。另一部分是轰击区的电容, 它也是三个电容的串联: 轰击了的正向 $p_1 n_1$ 结的结电容 C_1' , 轰击了的反向 $n_1 p_2$ 结的结电容 C_2' 和异质结空间电荷区的电容 C_3' 。根据前面的分析, 这部分的串联电容 C_4 比较小,

可以忽略不计。器件总的电容等于有源区两侧非轰击区的串联电容 $C = C_f$ ；(2) 有源区生长在 n_1p_2 结线之上，激光器的电容是三部分电容的并联：有源区两侧非轰击区的电容 C_f ，轰击区的电容 C_h 和通过有源区两侧正向 p_2n_2 结漏掉的电流 I_{c2} 引起的电容 C_J 。设 p_2 -InP 层的厚度为 $2.0 \mu\text{m}$ ，有源区生长在 p_2 -InP 层的中间， $h = 1.0 \mu\text{m}$ ，对于 $500 \mu\text{m}$ 腔长的激光器， $C_J = 4.2 \text{ pF}$ ，总的电容 $C = C_J + C_f + C_h = 5.0 \text{ pF}$ ；(3) 有源区生长在 n_1p_2 结线之下的情况，如图 2(c)，与图 2(b) 的情况相似，也是由电容 C_f, C_h 和 C_J 三部分的并联，与图 2(b) 不同的是由于漏电流的途径不同， C_J 是 p_1n_1 结的电容。对于 $500 \mu\text{m}$ 腔长，这部分的结面积 $A = 500 \times 3.5 \times 2 \mu\text{m}^2$ ， $C_J = 14.7 \text{ pF}$ ，总电容 $C = C_f + C_h + C_J = 15.5 \text{ pF}$ 。

通过以上的分析可以看出 SPB-BC 激光器在减小漏电流和寄生电容方面是非常成功的，是一种理想的高频大功率激光器结构。

4 SPB-BC 激光器的特性

4.1 SPB-BC 激光器的 L-I 特性

图 3 是 SPB-BC 激光器的 L-I 特性曲线、远场图及近场光斑。激光器的腔长为 $500 \mu\text{m}$ ，两个腔面分别镀 91% 的增反膜和 5% 的增透膜，在室温下连续工作，它的平均阈值电流为 30 mA，平均输出功率为 65 mW，最大输出功率为 80 mW，量子效率为 45%，从远场图中可以看出在输出功率为 40 mW 时仍然是基横膜工作。

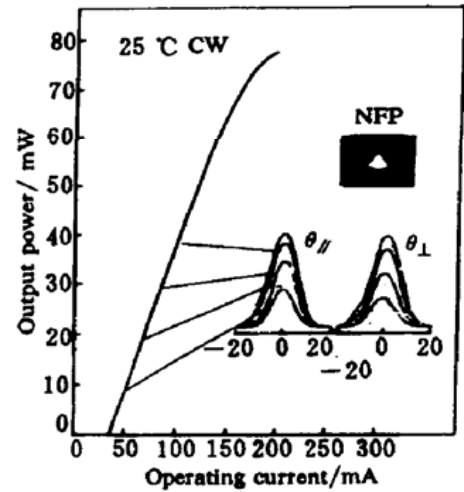


图 3 SPB-BC 激光器的 L-I 特性曲线、远场图及近场光斑

Fig. 3 L-I characteristics, typical near-field pattern and far-field patterns

4.2 SPB-BC 激光器的调制特性

这种 SPB-BC 激光器结构借鉴了掩埋新月型结构具有大功率这一特点，同时又结合质子轰击技术，使功率特性进一步改善，而且它又减小了器件的寄生电容，使激光器的调制特性得到明显的改善。在实验中，对 SPB-BC 激光器采用一种微波封装，用网络分析仪对 $500 \mu\text{m}$ 腔长的 SPB-BC 激光器的调制特性进行测量，图 4 是 $500 \mu\text{m}$ 腔长 SPB-BC 激光器的调制特性曲线。

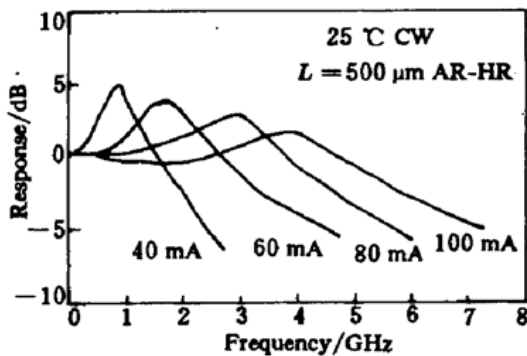


图 4 $500 \mu\text{m}$ 腔长 SPB-BC 激光器的调制特性曲线

Fig. 4 Small-signal modulation characteristics of a $500 \mu\text{m}$ -long SPB-BC laser

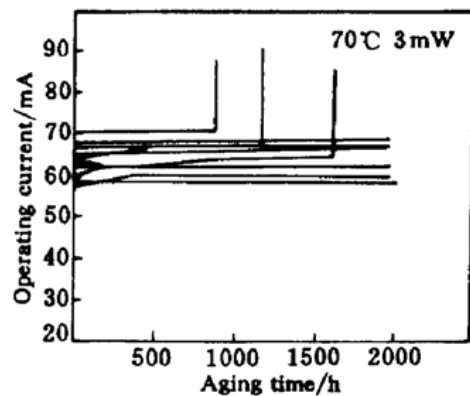


图 5 SPB-BC 激光器的老化实验曲线，老化温度为 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ ，输出功率为 3 mW

Fig. 5 Operating currents versus aging time at $70 \text{ }^\circ\text{C}$ with a 3 mW constant output power

从图中可以看出它的 3 dB 调制带宽为 6.0 GHz。

4.3 SPB-BC 激光器的寿命测量

质子轰击条形激光器在使用时轰击的缺陷区域将扩展,这会影晌激光器的使用寿命,这就是质子轰击条形激光器的缺点之一,但是,SPB-BC 激光器的 2~3 μm 宽的有源区生长在沟道内,有源区在沟的边缘是夹断的,轰击时用 10 μm 粗的钨丝作掩蔽,有源区不会受到损伤,被轰击的区域只是电流阻挡层,因此,SPB-BC 激光器的寿命不会受到影响。在实验中,对 SPB-BC 激光器的寿命进行了测量,结果也证实了这一点。图 5 是这种激光器的老化实验曲线,在温度为 70 $^{\circ}\text{C}$,输出功率 3 mW 条件下老化 2000 h 激光器的阈值没有明显的变化。

参 考 文 献

- 1 E. Oomura, H. Higuchi, Y. Sakakibara *et al.*. InGaAsP/InP buried crescent laser diode emitting at 1.3 μm wavelength. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1984, **QE-20**(8): 866~874
- 2 H. Horikawa, H. Wada, Y. Matsui *et al.*. High-power and high-speed semi-insulating blocked V-grooved inner-stripe lasers at 1.3 μm wavelength fabricated on *p*-InP substrates. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **54**(12): 1077~1079
- 3 H. Wada, H. Horikawa, Y. Matsui *et al.*. High-power and high-speed 1.3 μm V-grooved inner-stripe lasers with new semi-insulating current confinement structures on *p*-InP substrates. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **55**(8): 723~725
- 4 W.-H. Cheng, A. Mar, J. E. Bowers *et al.*. High-speed 1.3 μm InGaAsP Fabry-Perot lasers for digital and analog applications. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1993, **29**(6): 1660~1667
- 5 W.-H. Cheng, C. B. Su, K. D. Buehring *et al.*. High-speed and high-power 1.3 μm InGaAsP buried crescent injection lasers with semi-insulating current blocking layers. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**(22): 1783~1785
- 6 J. P. Donnelly, C. E. Hurwitz. Proton bombardment in InP. *Solid-state Electronics*, 1977, **20**: 727~730
- 7 S. M. Sze. *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley and Sons, Inc., 1969, 140

High-frequency and High-power InGaAsP/InP SPB-BC Lasers

Zhang Baijun Yi Maobin Li Dehui Shen Zhiyuan Miao Zhongli Gao Dingsan

(*Department of Electronics Engineering, Jilin University, National Integrated Optoelectronics Laboratory, Jilin University Region, Changchun 130023*)

Abstract A high-frequency and high-power InGaAsP/InP laser structure was established on the basis of buried crescent lasers by using the proton bombardment technique—the selected proton bombarded the buried crescent laser (SPB-BC). At room temperature, the maximum CW output power of 80 mW and a 3 dB modulation bandwidth of 6 GHz were obtained for a laser with a cavity 500 μm long on a *p*-type InP substrate.

Key words selective proton bombardment, modulation bandwidth, parasitic capacitance