

阶梯和窄台衬底内条形激光器光输出 稳态特性分析

张晓波 赵方海 王文 杜国同 杨树入 高鼎三

吉林大学电子科学系,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

丛志先 金希卓

吉林大学数学系,长春 130023

(1992年1月18日收到;1992年4月9日收到修改稿)

对阶梯和窄台衬底内条形(TSIS和NMSIS)半导体激光器的稳态光输出特性进行了数值计算.得到TSIS激光器的侧向导非对称性允许其在大范围电注入下基横模工作和NMSIS器件远场光强分布呈现双峰现象,这些计算结果得到了实验验证.

PACC: 4255P, 4220, 7485

一、引言

我们曾报道了所研制的阶梯衬底内条形和窄台衬底内条形(TSIS和NMSIS)可见光半导体激光器的实验结果^[1,2],也曾对这两种器件结构的无源波导特性用缓变解析近似方法进行了分析^[3],但这种分析所给出的结果中没有考虑注入载流子的增益波导作用,因此不能得到光输出功率和阈值特性,而且光场分布的计算结果与实验结果偏差大.

本文对这二种非平面衬底器件的光输出稳态特性进行了理论分析和数值求解.模型的建立和求解基本过程为:首先推导或给出二种p型衬底器件有源层中的电流密度分布,通过对包含受激辐射项在内的有源层中载流子扩散方程以及阈值条件和增益函数的联立自洽求解,得到侧向导基模和高阶模的光场分布,光输出特性曲线,自由载流子和增益分布,高阶模和基模的模式增益,侧向导有效折射率分布.所得到的结果比较好地解释了实验现象,同时使非平面衬底激光器特性的分析工作得到了补充.

二、TSIS和NMSIS激光器光输出稳态特性的数学描述

1. 电流分布

在以往文献中,电流密度分布多采用Yonezu^[4]得到的公式,它是针对n型衬底器件的.TSIS和NMSIS结构都为p型衬底,作相应的变换NMSIS结构的电流密度分布可直接由Yonezu公式给出.而对图1所示的TSIS结构,可参照Yonezu和Sugino^[5]的方法得

到其电流密度分布表达式(1)~(3).

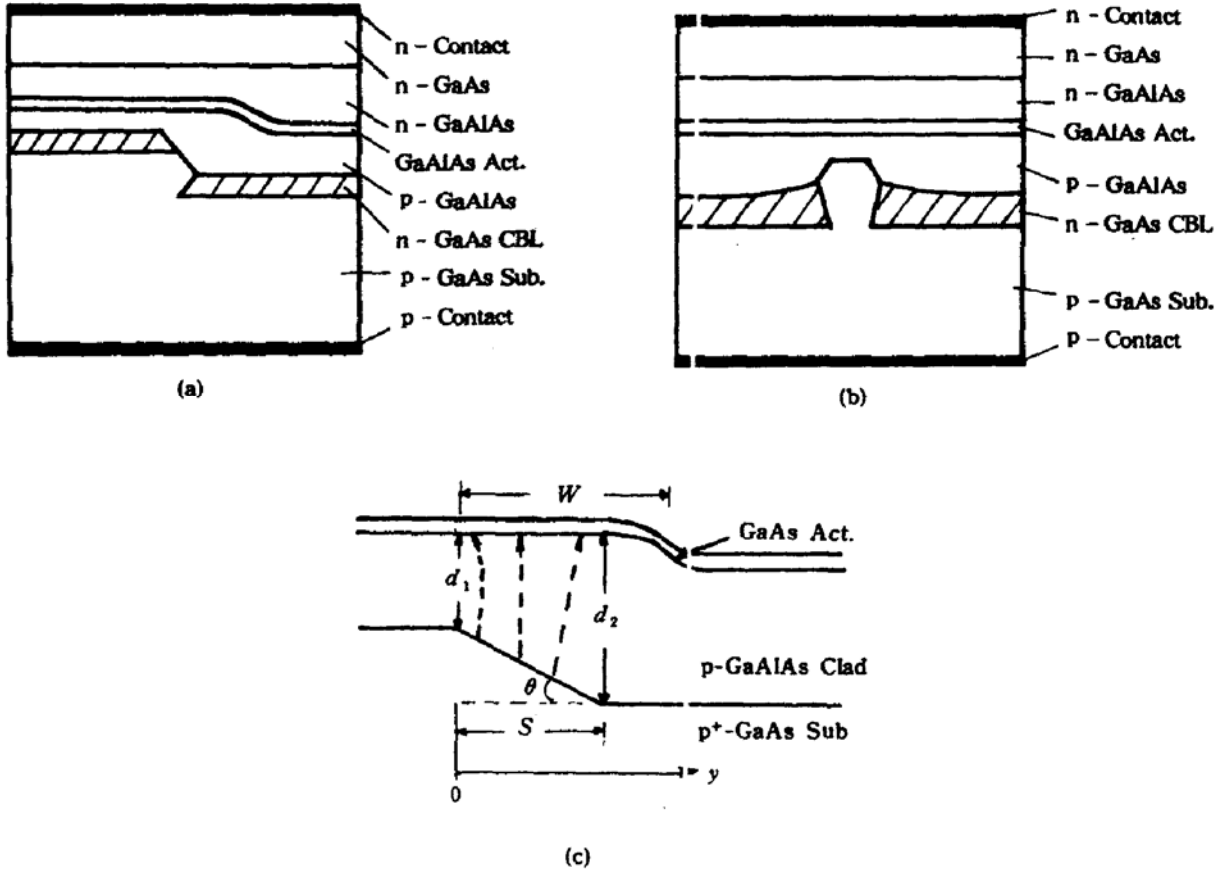


图 1 (a)TSIS 结构 (b)NMSIS 结构示意图 (c)TSIS 结构注入电流扩展和波导结构模型 S 为电流注入条宽

$$J_j(y) = \frac{I_{02}}{l_{02} \cdot L(1 + \frac{y-S}{l_{02}})^2}, \quad y > S \quad (1)$$

$$J_j(y) = \frac{I_{01}}{l_{01} \cdot L(1 - \frac{y}{l_{01}})^2}, \quad y < 0 \quad (2)$$

$$J_j(y) = \frac{I_e \cdot \text{tg}\theta}{L \cdot \ln(\frac{d_1 + S \text{tg}\theta}{d_1})} \cdot \frac{1}{d_1 + y \text{tg}\theta}, \quad S > y > 0 \quad (3)$$

其中, I_{01} 、 l_{01} 和 I_{02} 、 l_{02} 分别为向左侧和右侧的扩展电流和扩展长度^[6], I_e 为流经电极条区下的电流值, L 为激光器谐振腔长, 并有:

$$l_{01} = \frac{0.10344L}{R_{y1} I_{01}}, \quad l_{02} = \frac{0.10344L}{R_{y2} \cdot I_{02}},$$

$$I_{01} = I_{02} = \sqrt{\frac{0.10344L \cdot I_e \cdot \text{tg}\theta}{\rho_s \ln(\frac{d_1 + S \text{tg}\theta}{d_1})}} \quad (4)$$

其中, ρ_p 为下限制层电阻率, $R_{y_1} = \frac{\rho_p}{d_1}$, $R_{y_2} = \frac{\rho_p}{d_2}$. 设 $\alpha = \frac{0.10344 \cdot L \cdot \text{tg}\theta}{\rho_p \ln(\frac{d_1 + S \text{tg}\theta}{d_1})}$, 由总电流关系

$$I_t = I_e + I_{01} + I_{02},$$

有
$$I_e = I_t + 2\alpha - 2\sqrt{\alpha I_t + \alpha^2}. \quad (5)$$

2. 非平面衬底激光器光输出稳态特性方程

描述非平面衬底激光器的光输出特性可采用 Streifer 所给出的一组方程^[7]. 本文所用方程同文献[7]基本相同, 它们是包含有源层厚度变化的载流子扩散方程:

$$\begin{aligned} & \frac{d^2 n(y)}{dy^2} + \frac{1}{t_a(y)} \cdot \frac{dt_a(y)}{dy} \cdot \frac{dn(y)}{dy} - \frac{n(y)}{L_a^2} \\ & = \frac{J_j(y)}{e \cdot D \cdot t_a(y)} + \frac{P_{av} \cdot \Gamma(y) g(y) |G(y)|_n^2}{h\nu \cdot e \cdot D \cdot t_a(y)}. \end{aligned} \quad (6)$$

其中, D 为少子扩散系数, $n(y)$ 载流子浓度侧向分布函数, h 为普朗克常数, ν 为激射频率, e 为电子电荷, $t_a(y)$ 为有源层厚度侧向变化函数, $g(y)$ 为局部增益, P_{av} 为腔内平均激光功率, $\Gamma(y)$ 为垂直于 p-n 结方向的光限制因子, $|G(y)|_n^2$ 为侧向电场分量模平方归一化分布函数.

增益分布函数与注入载流子浓度函数之间关系为:

$$g(y) = An(y) - B. \quad (7)$$

其中, A 和 B 为两个常数.

电磁场横向分量满足

$$\frac{\partial^2 F(x, y)}{\partial x^2} + [k_0^2 N_i - \beta_x^2(y)] F(x, y) = 0. \quad (8)$$

其中 $k_0 = \frac{2\pi\nu}{c}$ 为真空中光传播常数, c 为光速, β_x 为横向光传播常数, N_i 代表外延层材料的实折射率(对应衬底、下限制层、有源层和上限制层分别为 \tilde{N}_i 、 N_i 、 N_s 和 N_w).

电场侧向分量方程:

$$\frac{d^2 G(y)}{dy^2} + [\beta_x^2(y) + ik_0 N_s \alpha_i - k_0 N_s \Gamma(y) g(y) (b + i) - \beta_x^2] G(y). \quad (9)$$

α_s 为模式增益, α_i 为有源层内吸收系数, b 为自由载流子引起的复折射率实部和虚部之比.

激射条件或增益钳位条件

$$\alpha_s = \int_{-\infty}^{\infty} |G(y)|_n^2 \Gamma(y) g(y) dy = -2I_m(\beta_x) = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right). \quad (10)$$

单端面出射功率:

$$P_1 = 2(1 - R) \sqrt{R} \frac{(1 + R) \sqrt{R} - 4R^2}{1 - 2R^2} \cdot P_{av}, \quad (11)$$

R 为端面反射率.

远场光强分布^[8]

$$I(\theta) = \cos^2 \theta \left| \int_{-\infty}^{\infty} G(y) \exp(j \sin \theta k_0 y) dy \right|^2. \quad (12)$$

3. TSIS 和 NMSIS 结构输出特性的求解

方程(6)–(12)及电流分布式(1)–(3)的自洽解可通过差分法得到^[7]. 由于 TSIS 结构的特点本文在处理上述方程中所作的特殊考虑为:(a)用微扰方法考虑衬底的吸收作用,这种吸收作用构成 TSIS 结构侧向一侧光波导^[9]. (b)求解 TSIS 结构时,通过合理选择方程(9)的边界条件考虑了该结构侧向固有不对称性. 由图 1(a)所示的 TSIS 结构左侧有源区的激光可透过下限制层进入衬底而产生吸收,利用微扰方法可求出带有微扰的横向传播常数为^[9]:

$$\beta_x = \beta_{0x} - \frac{2}{\beta_{0x}} \frac{V}{(1/H^2 + \frac{1}{P^2})(2 + Pd)}. \quad (13)$$

其中, β_{0x} 为无衬底吸收时的传播常数, $H^2 = N_1^2 k_0^2 - \beta_{0x}^2$, $P^2 = \beta_{0x}^2 - N_1 k_0^2$, $R^2 = \beta_{0x}^2 - \tilde{N}_1 k_0^2$, $V = \frac{(P-R)\exp(-2Pt)}{(P+R)}$, t 为下限制层厚度. 解横向电场方程(8)时,首先利用差分方法求出无衬底吸收区 $W > y > 0$ 的横向传播常数 β_{0x} 和电场分量 $F_0(x, y)$. 而在 $y < 0$ 区,横向传播常数由(13)式给出. 由衬底吸收带来的横向电场变化较少可忽略. 所求器件结构的不对称性表现在解载流子浓度分布方程(6)和侧向电场分量方程(9)时,方程的差分形式没有以往的关于原点的对称性,此时边界条件为,当 $|y|$ 足够大时 $G(y), n(y) = 0$. 计算时,取 TSIS 结构有源层厚度变化在 $y = W$ 处为突变形式, $\Delta t_a = 0.05 \mu\text{m}$. 其它有关参数(除特殊注明)取如下值: $\lambda = \frac{C}{\nu} = 0.76 \mu\text{m}$, $N_1 = N_2 = 3.38$, $N_3 = 3.492$, $\tilde{N}_1 = 3.59 - i0.0676$, $L = 250 \mu\text{m}$, $R = 0.3$, $D = 30 \text{cm}^2/\text{s}$, $b = 2$, $\alpha_i = 20 \text{cm}^{-1}$, $\rho_p = 4.26 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$, $A = 1.5 \times 10^{-16} \text{cm}^2$, $B = 150 \text{cm}^{-1}$, $S = 1.5 \mu\text{m}$, $c_1 = 0.4 \mu\text{m}$, $d_2 = 2.0 \mu\text{m}$, $W = 4 \mu\text{m}$, $\theta = 45^\circ$.

三、计算结果及讨论

利用前述方程及其边界条件,计算得到的 TSIS 结构的光功率-注入电流关系曲线由图 2 给出. 它表明器件结构参数对激光器阈值和发光效率的重要影响,比如当 $W = 4 \mu\text{m}$, $d_1 = 0.4 \mu\text{m}$ 时器件有比较理想的光输出特性曲线,这条曲线所示器件的局部增益、电场侧向分量和远场光强归一化分布示于图 3、图 4 和图 5 中.

由图 3–图 5 的结果可以看出,TSIS 这种侧向非对称波导结构可以保证其在大电流注入范围内具有稳定的基模工作. 图 3 和图 4 表明电流增加导致局部增益和光场分布的侧向移动,同 Butler^[10]计算的 CSP 结构由于电极条错位时的结果相似. 图 6 为两个最低阶模(零阶和一阶模)的模式增益在零阶模阈值以上随注入电流变化的曲线. 它说明 TSIS 结构在阈值(32mA)以上,电流增加时一阶模式增益稍有增加后就呈衰减趋势,并且直到注入电流为两倍阈值时,一阶模也没有达到阈值模式增益($\alpha_g \approx 48 \text{cm}^{-1}$). 这一点同一般对称结构中一阶模式增益随注入电流增加而增加,而在某一注入电流值下达到阈值模式增益的情况不同. 对于 NMSIS 结构,它的最主要特点是窄条增益分布特性^[11],这种器件可获得高功率线性输出. 理论计算和实际测量都表明该结构的器件具有近场单峰,而对应的

远场光强分布具有双峰结构,如图 7 和图 8 所示,计算中取 NMSIS 结构电注入条宽为 $4\mu\text{m}$. 若在保证近场单峰下远场也为单峰分布只有加大条宽,但那样又会引起模式不稳定^[11]. 我们将理论计算所得到的 TSIS 和 NMSIS 两种结构的阈值电流值和近场、远场分布半宽同实验测量结果进行了比较,对比结果列于表 1 和表 2 中.

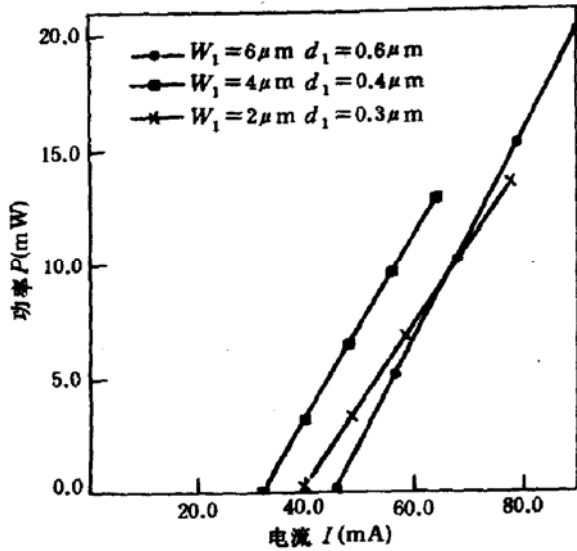


图 2 不同波导宽度和台上下限制层厚度的 TSIS 结构光功率-注入电流关系曲线

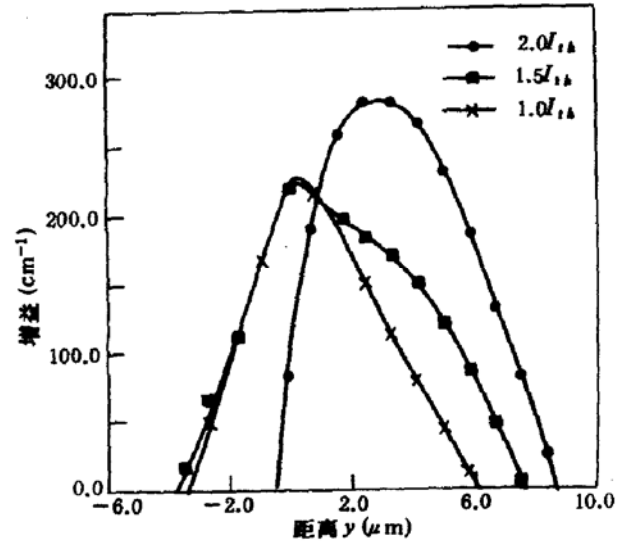


图 3 TSIS 结构局部增益侧向分布

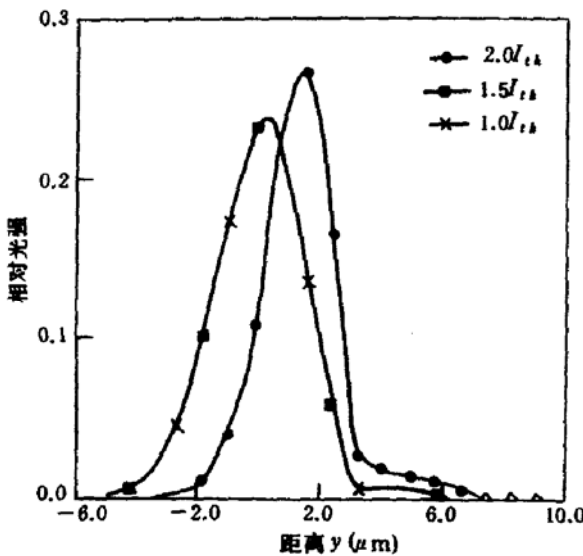


图 4 TSIS 结构的基模近场归一化分布

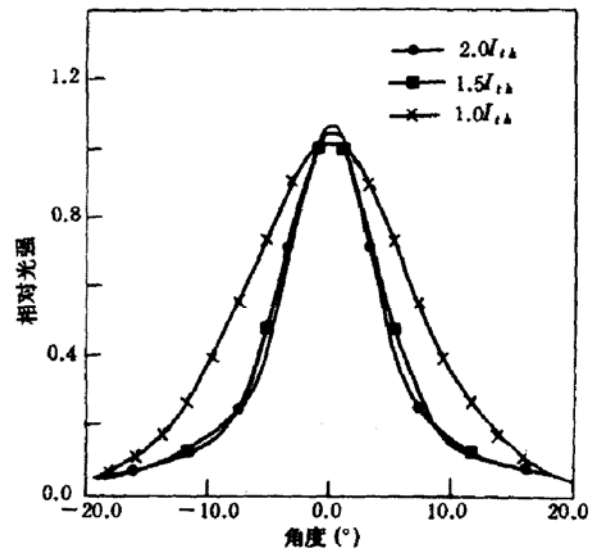


图 5 TSIS 结构的基模远场光强归一化分布

表 1 TSIS 和 NMSIS 结构器件的阈值电流的计算和测量值

	$I_{th}(\text{mA})$	$\frac{W}{S}(\mu\text{m})$					
		$\frac{6}{1.5}$	$\frac{8}{1.5}$	$\frac{2}{1.5}$	$\frac{3}{1.5}$	$\frac{4}{1.5}$	$\frac{\infty}{4}$
TSIS	实验值			45—60		30—50	
	理论值			38		32	
NMSIS	实验值						50—80
	理论值						76.5

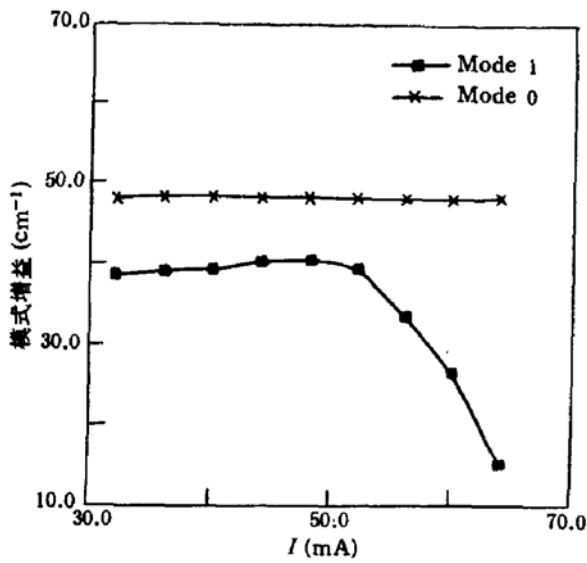


图 6 TSIS 结构的一阶模和零阶模模式增益随注入电流变化曲线

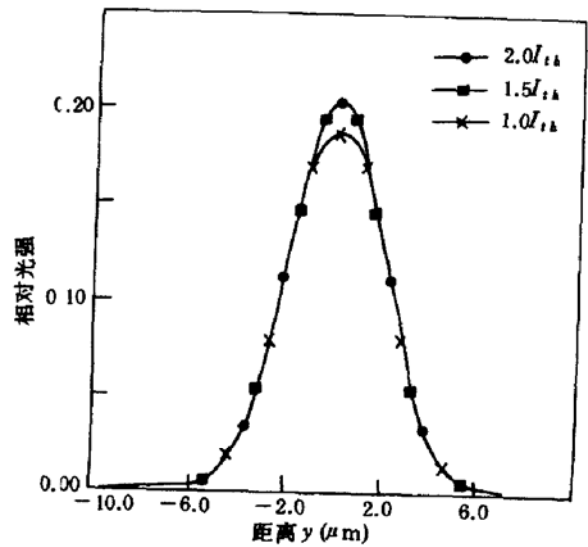


图 7 NMSIS 结构的基模近场光强侧向归一化分布

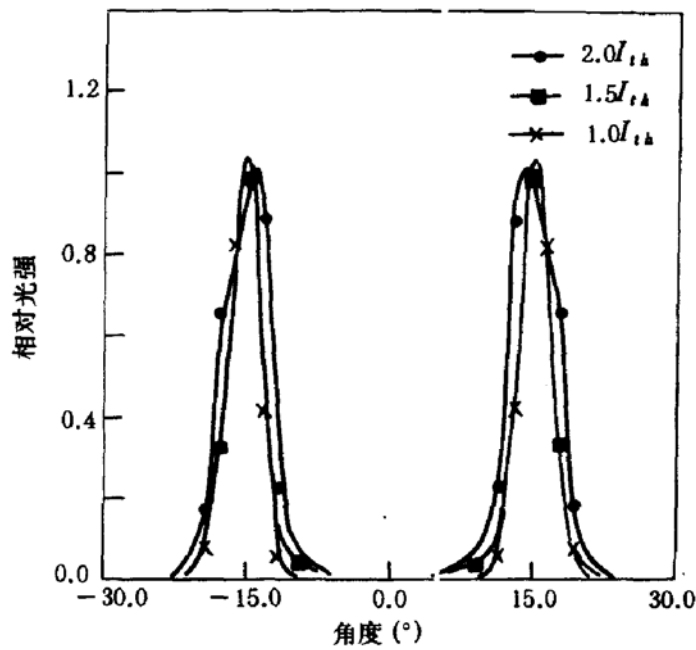


图 8 NMSIS 结构的基模远场光强侧向归一化分布

表 2 TSIS 和 NMSIS 结构器件的近场和远场光强分布半宽的计算和测量结果

结 构		注入条件		I_{th}	$1.5I_{th}$	$2.0I_{th}$
TSIS	近场 (μm)	计算		4	4	2.8
		测量		4.5	4.2	4.0
	远场 (度)	计算		15.3	10.0	9.8
		测量		11.3	10.0	10.0
NMSIS	近场 (μm)	计算		5.2	5.0	5.0
		测量		5.0	4.8	4.8
	远场 (度)	计算		35.0	35.0	37.0
		测量		30	30	30

表 1 和表 2 所列的计算结果与实验结果中的分布半宽对单峰结构指光强下降到峰值一半处两点间距,对于 NMSIS 中的远场双峰结构指双峰外侧光强下降到峰值一半处两点角间距. 在考虑到器件特性测量结果的分散性后,认为两者符合较好. 因此理论计算为优化器件设计和进一步开发应用上述器件提供了依据.

五、结 论

利用非平面衬底激光器的载流子扩散方程和电磁场传播方程计算了所设计的 TSIS 和 NMSIS 激光器的光输出特性. 这些特性包括光输出功率、阈值电流、局部增益、模式增益、近场和远场光强分布,它们较好地解释了实验现象,得到 TSIS 结构的波导宽度为 $4\mu\text{m}$,台上下限制层厚为 $0.4\mu\text{m}$ 时,光输出特性中的阈值电流值最低,且外微分量子效率高. 此外,计算结果和实验结果都表明如 TSIS 这样的非对称波导结构可保证在大范围内 ($\geq 2I_{th}$) 基模工作. 这些计算结果补充了已有的关于非平面衬底激光器光输出稳态特性的分析工作.

参 考 文 献

- [1] G. Du, *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-26**,496(1990).
- [2] 杜国同等,半导体学报,**11**(4),311(1990).
- [3] 张晓波等,吉林大学自然科学学报, No. 1,67(1992).
- [4] H. Yonezu, *et al.*, *Jan. J. Appl. Phys.*, **12**,1585(1973).
- [5] T. Sugino, *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-17**,745(1981).
- [6] 郭长志,半导体激光器模式理论, p. 404,人民邮电出版社.
- [7] W. Streifer, *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-17**, 736(1981).
- [8] H. C. 凯西, M. B. 帕尼什,异质结构激光器,中译本上册, p. 76,国防工业出版社.
- [9] 张敬明、郑宝真,半导体学报,**15**,76(1984).
- [10] J. K. Butler, *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-23**,1890(1987).
- [11] P. M. Asbeck *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-15**,727(1979).

Terraced Substrate and Narrow Mesa Substrate Inner Stripe Laser Steady-State Analysis

Zhang Xiaobo, Zhao Fanghai, Wang Wen, Du Guotong, Yang Shuren and Gao Dingsan

*Department of Electronics Science, Jilin University and National Laboratory for
Integrated Optoelectronics, Changchun 130023*

Cong Zhixian and Jin Xizhuo

Department of Mathematics, Jilin University, Changchun 130023

(Received 18 January 1992; revised manuscript received 9 April 1992)

Abstract

Numerical analysis of Terraced and Narrow Mesa Substrate Inner Stripe (TSIS and NMSIS) Laser steady-state characteristics is carried out. TSIS Laser maintaining fundamental lateral mode operation at a large injection range and NMSIS presenting double peak in far-field distribution are concluded, and are Supported by the experimental results.

PACC: 4255P, 4220, 7847