

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0240-04

# 980 nm 垂直外腔面发射激光器理论分析

单肖楠<sup>1,2</sup>, 路国光<sup>1,2</sup>, 何春风<sup>1,2</sup>, 秦 莉<sup>1</sup>, 晏长岭<sup>1</sup>, 王立军<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)  
(<sup>2</sup>中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 利用周期谐振增益结构设计了以 InGaAs/GaAsP/AlGaAs 为有源区的 980 nm 二极管抽运垂直外腔面发射半导体激光器的材料结构。根据理论模型计算了纵模限制因子、阈值增益、光增益、输出功率等特征参量。优化了激光器特征参量并设计了光抽运垂直外腔面发射激光器的器件结构。理论计算表明, 激光二极管(LD)抽运的垂直外腔面发射激光器的输出功率将大于 1 W。

**关键词** 激光技术; 半导体激光器; 垂直外腔面发射激光器; 光抽运

**中图分类号** TN248.4      **文献标识码** A

## 980 nm Optical Pumped Semiconductor Vertical External Cavity Surface Emitting Semiconductor Laser

SHAN Xiao-nan<sup>1,2</sup>, LU Guo-guang<sup>1,2</sup>, HE Chun-feng<sup>1,2</sup>, QIN Li<sup>1</sup>,  
YAN Chang-ling<sup>1</sup>, WANG Li-jun<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)  
(<sup>2</sup> Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** Using period resonance gain structure, a laser diode (LD) pumped 980 nm vertical external-cavity surface-emitting laser (VECSEL) with active region of InGaAs/GaAsP/AlGaAs system is developed. The characteristic parameters such as longitudinal confinement factor, threshold gain, optical gain and output power etc. are calculated through theoretical model. With the optimized characteristic parameters, the structure of VECSEL is designed. Theoretical calculations show that the output power of a LD-pumped VECSEL can be higher than 1.0 W.

**Key words** lasers technique; semiconductor laser; vertical external-cavity surface emitting laser; optical pumping

## 1 引 言

面发射激光器与传统的边发射激光器相比有很多优点,但由于输出功率小、器件的出光窗口大,很难实现单模输出,并且器件不能实现腔内倍频方面的应用。因此光抽运垂直外腔面发射激光器(OP-VECSEL)应运而生<sup>[1,2]</sup>。国内关于光抽运垂直外腔面发射激光器的理论研究报道很少,本文从理论方面计算了 980 nm 光抽运垂直外腔面发射激光器的特性参量,在此基础上给出激光器芯片材料的结构及器件结构图,为实验工作作出了理论预测。国外有研究人员采用有限差分法模拟计算器件参量,这

种方法的优点是可以计算器件温度场分布,缺点是计算量和软件的编制工作量都很大。一些器件参量如增益、阈值、输出功率不涉及温度场的影响,因此我们采用了简化算法(即不考虑温度场分布),用量子阱激光器的一些公式来进行器件参量的模拟。这种简化方法也被国外的一些研究者采用。

## 2 理论模型

### 2.1 纵模限制因子 $\Gamma_z$

光抽运垂直外腔面发射激光器的工作区由多个  $\lambda/2$  周期增益结构(PGS)组成。每个  $\lambda/2$  周期增益

**基金项目:** 吉林省科技厅项目(20040519)资助课题。

**作者简介:** 单肖楠(1979—),男,吉林九台人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要从事新型半导体激光器设计及应用的研究。E-mail: shanxiaon@sina.com

结构包括有源和无源部分,其中有源部分(量子阱)提供腔内增益,无源部分(吸收层)作为间隔层使得有源区与腔内电场最大值保持一致。依据 Scott W. Corzine<sup>[3,4]</sup>的模型来分析纵模限制因子 $\Gamma_z$ 。周期增益结构的腔长 $L$ 定义为有源部分和无源部分的复合长度,不包括光学模式进入无源镜面的穿透深度。设周期增益结构中,每个有源部分的长度为 $t$ ,所有有源部分的复合长度为 $d$ 。

忽略了有源与无源部分的交界面处引起的折射率突变,则在阈值处需要的材料增益为

$$g_{\text{th}} = \frac{1}{\Gamma_z} \left[ \alpha + \frac{1}{L} \ln \left( \frac{1}{R} \right) \right], \quad (1)$$

式中 $R$ 为镜面的几何平均反射率, $\alpha$ 为内部损耗, $L$ 为有效腔长, $\Gamma_z$ 为纵模限制因子,是器件设计时要考虑的一个主要参量,定义为

$$\Gamma_z = \left[ \int_{\text{active}} E^2(z) dz \right] / \left[ \int_L E^2(z) dz \right]. \quad (2)$$

只需考虑对(2)式在一个周期结构中的积分,然后将分子乘以腔内有源部分的个数,分母乘以整个腔长中半波长的个数,即

$$\Gamma_z = \left[ \frac{d}{t} \int_0^t \cos^2(kz) dz \right] / \left[ \frac{L}{\lambda/2} \int_0^L \cos^2(kz) dz \right] = \frac{d}{L} \left\{ 1 + \frac{\sin[\pi t/(\lambda/2)]}{\pi[t/(\lambda/2)]} \right\}. \quad (3)$$

设计的器件中,有源区处恰好为每个驻波的波峰,即 $d = Nt$ ,其中 $N$ 为腔内半波长的总个数, $\Gamma_r$ 为相对限制因子。因为 $L = N(\lambda/2)$ ,则(3)式变为

$$\Gamma_z \frac{d}{L} \left[ 1 + \frac{\sin(\pi d/L)}{\pi d/L} \right] = \frac{d}{L} \Gamma_r. \quad (4)$$

## 2.2 量子阱增益

基于 M. Kuznetsov 等<sup>[4]</sup>的半经验模型对量子阱增益 $g$ 进行理论推断。 $g$ 与载流子浓度 $N$ 间存在的对数关系为

$$g = g_0 \ln(N/N_0), \quad (5)$$

式中 $g_0$ 为材料增益系数, $N$ 为载流子浓度, $N_0$ 为透明载流子浓度,则激射的阈值条件就是

$$R_1 R_2 T_{\text{loss}} \exp(2\Gamma_r g_{\text{th}} N_w L_w) = 1, \quad (6)$$

式中 $R_1$ 为分布式布拉格反射体(DBR)镜面反射率, $R_2$ 为外腔镜面反射率, $T_{\text{loss}}$ 为腔内往返一次所造成的损耗,称为输运因子, $N_w$ 为增益介质内量子阱的个数, $L_w$ 为量子阱的厚度。由抽运功率 $P_p$ 可以计算载流子浓度

$$N = \frac{\eta_{\text{abs}} P_p}{h\nu N_w L_w A_p} \tau(N), \quad (7)$$

式中 $\eta_{\text{abs}}$ 为抽运吸收效率, $h\nu$ 为光子能量, $A_p$ 为抽运光斑面积, $\tau(N)$ 为载流子寿命,可表达为<sup>[5]</sup>

$$\frac{1}{\tau(N)} = A + BN + CN^2, \quad (8)$$

式中 $A, B, C$ 分别为单分子,双分子和俄歇复合效率。从(5)式~(8)式可以推导出阈值抽运功率 $P_{\text{th}}$

$$P_{\text{th}} = N_{\text{th}} \frac{h\nu N_w L_w A_p}{\eta_{\text{abs}} \tau(N_{\text{th}})}, \quad (9)$$

$N_{\text{th}}$ 为阈值载流子浓度,表示为

$$N_{\text{th}} = N_0 \left( \frac{1}{R_1 R_2 T_{\text{loss}}} \right)^{(2\Gamma_r g_0 N_w L_w)^{-1}}. \quad (10)$$

激光器的输出功率为

$$P_{\text{las}} = (P_p - P_{\text{th}}) \eta_{\text{diff}}, \quad (11)$$

式中 $\eta_{\text{diff}}$ 为微分效率,表达式为

$$\eta_{\text{diff}} = \eta_{\text{out}} \eta_{\text{quant}} \eta_{\text{abs}}, \quad (12)$$

$\eta_{\text{out}}$ 为输出效率, $\eta_{\text{quant}}$ 为量子数亏损效率,二者的表达式分别为

$$\eta_{\text{out}} = \frac{\ln(R_2)}{\ln(R_1 R_2 T_{\text{loss}})}, \quad (13)$$

$$\eta_{\text{quant}} = \lambda_{\text{pump}} / \lambda_{\text{laser}}, \quad (14)$$

$\lambda_{\text{pump}}$ 和 $\lambda_{\text{laser}}$ 分别是抽运波长和激射波长。

考虑热效应后,输出功率修正为

$$P_{\text{laser}} = (P_p - P_{\text{th}}) \times \left( 1 - \frac{\Delta T}{T_{\text{off}}} \right), \quad (15)$$

$T_{\text{off}}$ 为器件的截止温度, $\Delta T$ 为

$$\Delta T = R_{\text{th}} (P_p - P_{\text{laser}}), \quad (16)$$

其中热阻 $R_{\text{th}} = (2\sigma D)^{-1}$ , $\sigma$ 为热导率, $D$ 是抽运光斑直径。

## 3 计算结果与讨论

通过上述理论分析,计算了激光器材料的特性参量,并给出了材料结构,如图1所示,计算所用激光器材料的各项参量<sup>[5]</sup>示于表1中。图2给出不同的外腔镜面反射率条件下,计算的输出功率与量子阱数目的函数关系。图3为不同外腔镜面反射率条件下,输出功率与输入功率的函数关系曲线。图4是输入功率为2 W时,不同光斑直径情况下输出功率与量子阱数关系曲线,可见当量子阱的数目达到10以上时,输出功率达到饱和。图5给出考虑了热效应以后不同光斑直径时,输出功率与输入功率的关系,可见光斑直径越大,输出功率就越小。由于热效应的存在,输出功率并没有随着输入功率的增加而增加,而是在达到某个极值后开始下降<sup>[6,7]</sup>。材料增益系数 $g_0$ 会影响器件实际性能,实际的 $g_0$ 与

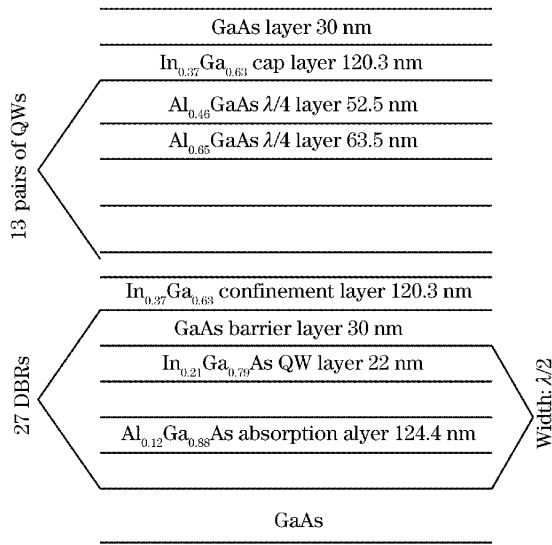


图 1 光抽运垂直外腔面发射激光器材料示意图  
Fig. 1 OPS-VECSEL material structure

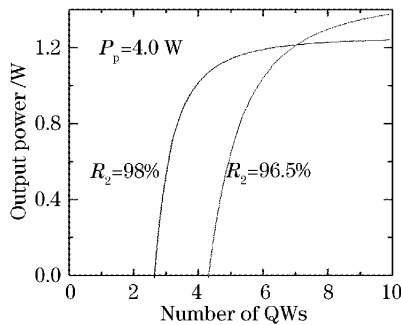


图 2 不同外腔镜面反射率条件下,输出功率与量子阱数的关系

Fig. 2 Output power versus number of quantum wells (QWs) for different external mirror reflectivities

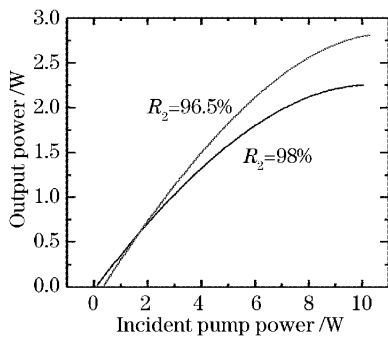


图 3 不同外腔镜面反射率条件下,输出功率与输入功率的关系

Fig. 3 Output power versus input pump power for different external mirror reflectivities

理论值有偏差,与材料的生长、器件工艺等都有直接的关系,因此影响输出功率。 $\eta_{\text{abs}}, \sigma, A_p, T_{\text{loss}}$  这些参量均受实验条件影响,与理论值有一定差别,这样将

会对计算结果产生影响。为了减少这些影响,要对实验工艺进行优化,改进对热沉、焊料等的选择,减少不利因素的影响。

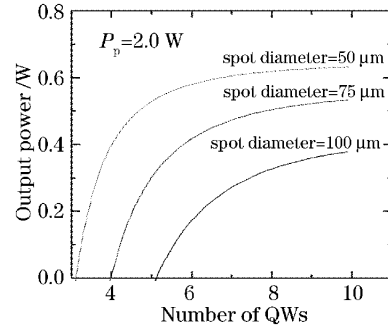


图 4 不同光斑直径时,输出功率与量子阱数的关系  
Fig. 4 Output power versus number of QWs for different spot diameters

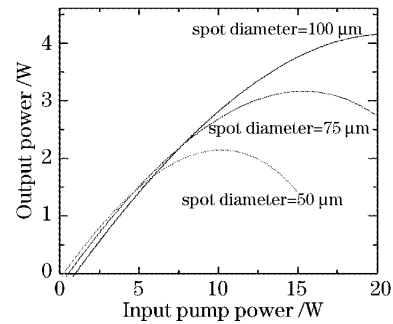


图 5 不同光斑直径时,输出功率与输入功率的关系曲线

Fig. 5 Output power versus input pump power for different spot diameters

表 1 激光器和材料的特性参量

Table 1 Characteristic parameters of material and laser

| Parameter                           | Value                | Parameter   | Value                 |
|-------------------------------------|----------------------|---|-----------------------|
| $g_0 / \text{cm}^{-1}$              | 2000                 | $\lambda_{\text{laser}} / \text{nm}$              | 980                   |
| $N_0 / \text{cm}^{-3}$              | $1.7 \times 10^{18}$ | $\eta_{\text{abs}}$                               | 0.75                  |
| $\Gamma_r$                          | 1.8                  | $A / \text{s}^{-1}$                               | $1.0 \times 10^{-7}$  |
| $L_w / \text{nm}$                   | 8.0                  | $B / (\text{cm}^3 / \text{s})$                    | $1.0 \times 10^{-10}$ |
| $T_{\text{loss}}$                   | 0.990                | $C / (\text{cm}^6 / \text{s})$                    | $6.0 \times 10^{-30}$ |
| $R_1$                               | 0.999                | $D / \mu\text{m}$                                 | 100~400               |
| $\lambda_{\text{pump}} / \text{nm}$ | 808                  | $\sigma / [\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})]$ | 44                    |

## 4 结构设计

根据上述理论分析,设计了光抽运垂直外腔面发射激光器器件结构,如图 6 所示。

光斑大小  $\omega$  与腔长  $L_c$  和腔镜曲率半径  $R_c$  之间的关系为

$$\omega = \frac{4\lambda L_c}{\pi} \sqrt{(R_c - L_c)/L_c}, \quad (17)$$

式中  $\lambda$  为基频波长。表 2 数据表明,当光斑直径一定时,外腔镜曲率半径越小,腔长也越短。

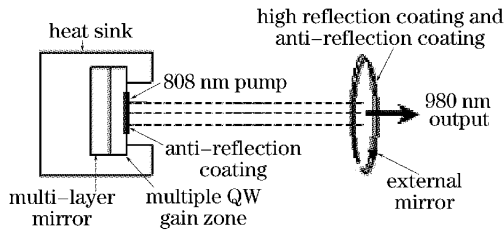


图 6 光抽运垂直外腔面发射激光器结构示意图

Fig. 6 Structure of OPS-CECSEL

表 2 光斑直径与腔长和外腔镜曲率半径之间的关系

Table 2 Relation between spot diameter and cavity length and radius of curvature of external lens

| Spot diameter / $\mu\text{m}$ | Cavity length /mm | Radius of curvature of external lens /mm |
|-------------------------------|-------------------|--|
| 400                           | 35                | 50                                       |
| 400                           | 57                | 75                                       |
| 400                           | 78                | 100                                      |
| 400                           | 176               | 200                                      |

## 5 结 论

理论计算了 980 nm 光抽运垂直外腔面发射激光器的特性,并根据计算的结果给出了材料的结构。分析了激光器阈值功率、输出功率与量子阱数目之间的关系。结果表明,光斑直径越大输出功率就越小,光斑直径在 400  $\mu\text{m}$  以下,量子阱数目达到 10 以上时,激光器输出功率达到饱和。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Yonggang, Ma Xiaoyu, Jiang Li *et al.*. A kind of novel and excellent semiconductor vertical external cavity surface emission laser [J]. *Laser and Infrared*, 2003, **33**(6): 406~408  
王勇刚,马晓宇,江李等.一种新型垂直外腔面发射半导体激光器[J].*激光与红外*,2003,**33**(6):406~408
- 2 Sun Yanfang, Jin Zhenhua, Ning Yongqiang *et al.*. Fabrication and experimental characterization of high power bottom-emitting VCSELs [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(5): 449~453  
孙艳芳,金珍花,宁永强等.高功率底发射 VCSELs 的制作与特性研究[J].*光学精密工程*,2004,**12**(5):449~453
- 3 A. Garnache, A. A. Kachanov, F. Stoeckel *et al.*. Diode-pumped broadband vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor laser applied to high-sensitivity intracavity absorption spectroscopy [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **17**(9): 1589~1598
- 4 Mark Kuznetsov, Farhad Hakimi, Robert Sprague *et al.*. Design and characteristics of high-power (>0.5-W CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM<sub>00</sub> beams [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1999, **5**(3): 561~573
- 5 Jiang Jianping. Semiconductor Laser [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000. 54~55, 74~75, 83~86, 90~91, 138~139, 145~148  
江剑平.半导体激光器[M].北京:电子工业出版社,2000.54~55,74~75,83~86,90~91,138~139,145~148
- 6 Geng Jianxin, Li Lin, Zhao Ling *et al.*. Temperature tunability of metallized fiber Bragg gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8): 735~738  
耿健新,李琳,赵岭等.金属化光纤光栅的温度调谐[J].*中国激光*,2003,**30**(8):735~738
- 7 Wang Shunquan, [Hu Hongzhang], Xiao Lifeng *et al.*. A novel temperature sensor based on acousto-optic tunable filter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(11): 1006~1010  
王顺权,[胡鸿璋],肖立峰等.一种基于声光可调谐滤波器的新型温度传感器[J].*中国激光*,2003,**30**(11):1006~1010