

## 《面发射激光器·腔内倍频》专题文章导读

宁永强

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

半导体激光器体积小、效率高,在信息、医疗、工业、军事等领域得到广泛应用。作为半导体激光器家族中的一员,垂直腔面发射激光器结构与普通边发射半导体激光器不同,其谐振腔是通过外延生长而成的两个高反射镜,激光沿垂直表面方向出射。垂直腔面发射激光器具有圆形对称光束、发散角小、光束质量好、阈值低、可二维集成等优点。由于谐振腔在波长量级,器件可以动态单模工作,在光通信领域有重要的应用潜力。

自从80年代发展出侧氧化技术、离子注入技术等对器件的电流和光场实现有效的横向限制开始,器件的性能得到迅速提高。目前面向光通信领域应用的波长850 nm、调制速率2.5 GHz小功率器件已经商品化,调制速率达到5 GHz甚至10 GHz的产品也开始进入应用。

随着外延材料质量的提高和器件工艺技术的发展,输出达到瓦级的大功率垂直腔面发射激光器也开始进入视野。德国Ulm大学先后报道了连续输出达到890 mW的单管器件和连续输出达到1.4 W的列阵器件。中国科学院长春光机所2004年研制出连续输出1.95 W的单管器件。2005年美国Princeton Optronics公司进一步将单管输出功率提高到3 W。垂直腔结构与外腔结合起来构成复合腔结构,可以很方便地插入倍频晶体等光学元件,获得新的波长输出。美国Novalux公司2003年展示了连续输出42 mW的腔内倍频蓝光激光器。

半导体激光泵浦外腔面发射激光器及腔内倍频由于具有优越的光束质量和大功率输出,在激光泵浦、显微分析、激光显示、数据存储等方面表现出良好的应用前景而引起人们的重视。英国斯特拉思克莱德大学2002年报道用850 nm光泵浦器件实现了500 mW连续输出。2004年在美国伯明翰召开的Solid State Lasers: Technology and Devices国际会议上,美国相干公司与圣地亚国家实验室联合报道了连续输出达到30 W的卓越成果。美国Novalux公司利用其光泵浦920~1 064 nm VECSEL进行腔内倍频,研制出200 mW的488 nm蓝光激光产品,将取代风冷氦离子激光器;也研制出100 mW以上的460 nm蓝光激光器,用于长距离通信、数字成像、激光显示等。

国内在这一领域也做了大量的工作,取得了很好的进展。在《面发射激光器·腔内倍频》这一专栏中,我们选发《高功率980 nm垂直外腔面发射激光器(VECSEL)的理论研究》、《VCSEL直接倍频蓝光固态激光器的研究》和《全固态589 nm复合腔连续波和频激光器》三篇文章向大家展示目前国内该领域的相关研究和进展情况。

文章编号 1004-924X(2005)03-0247-06

# 高功率980 nm垂直外腔面发射 激光器(VECSEL)的理论研究

何春风<sup>1</sup>, 路国光<sup>1</sup>, 单肖楠<sup>1</sup>, 秦 莉<sup>1</sup>, 晏长岭<sup>1,2</sup>,  
宁永强<sup>1</sup>, 李 特<sup>1</sup>, 孙艳芳<sup>1</sup>, 王立军<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 长春理工大学 高功率半导体激光重点实验室, 吉林 长春 130022)

**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二极管泵浦垂直外腔面发射半导体激光器。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

收稿日期:2005-03-10;修订日期:2005-04-14.

基金项目:吉林省科技厅项目(No. 20040519)

数,优化了激光器特征参数并设计了 OPS-VECSEL 结构。理论计算表明,LD 泵浦的垂直外腔面发射激光器的输出功率可大于 1.0 W。

**关键词:**垂直外腔面发射激光器;LD 泵浦;纵模限制因子;光增益

**中图分类号:**TN248.4 **文献标识码:**A

# Theoretical analysis of 980 nm high power vertical external cavity surface emitting semiconductor laser (VECSEL)

HE Chun-feng<sup>1</sup>, LU Guo-guang<sup>1</sup>, SHAN Xiao-nan<sup>1</sup>, QIN Li<sup>1</sup>, YAN Chang-ling<sup>1,2</sup>,  
NING Yong-qiang<sup>1</sup>, LI Te<sup>1</sup>, SUN Yan-fang<sup>1</sup>, WANG Li-jun<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese

Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. State Key Lab of High Power

Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** By 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 was developed. The longitudinal confinement factor, threshold gain, optical gain and output power were calculated. The characteristic parameters of VECSEL were optimized, and the structure of VECSEL was designed. The results show that the output power of a LD-pumped VECSEL can be larger than 1.0 W based on the theoretical calculations.

**Key words:** vertical external-cavity surface emitting laser; diode laser pumping; longitudinal confinement factor; optical gain

## 1 引言

经过 20 多年的发展,垂直腔面发射激光器作为光纤通信、高速光局域网、光盘、激光打印机、光互连等许多光电子技术新领域中的重要器件,成为研究最活跃的半导体激光器之一。垂直腔面发射激光器与传统的边发射激光器相比虽然具有很多优点,但由于工艺难度大,在国内尚处于研制阶段,并且输出功率很小,一般仅几毫瓦。应运而生的光泵半导体垂直外腔面发射激光器(Vertical external cavity surface emitting laser OPS-VECSEL)<sup>[1-3]</sup>吸收了二极管泵浦激光器和半导体 VCSEL 激光器的优点<sup>[4-5]</sup>,作为半导体激光技术中的新型器件,以其高功率、体积小和优质光束质量的

特点在激光显示、激光通信、材料加工、医疗及国防工程等领域具有广泛的应用前景。OPS-VECSEL 易于锁模,制作相对简单,在光时钟、显微分析、三基色显示等方面已经表现出良好的应用前景<sup>[6]</sup>。

## 2 理论模型

### 2.1 纵模限制因子 $\Gamma_z$

OPS-VECSEL 的工作区采用多个  $\lambda/2$  周期增益结构(Periodic gain structure PGS)。每个  $\lambda/2$  周期增益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. Cokzine 等人<sup>[7]</sup>的模型来分析纵模限制因子  $\Gamma_z$ 。PGS 的腔长  $L$  定义

为有源部分和无源部分的复合长度,特别强调的是,腔长并不包括光学模式进入无源镜面的穿透深度。设 PGS 中,每个有源部分的长度为  $t$ ,所有有源部分的复合长度为  $d$ 。

忽略有源与无源部分的交界面处引起折射率的突变后,在阈值处需要的材料增益可简单地记为

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

其中,  $R$  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数。定义为

$$\Gamma_z = \frac{\int_{\text{active}} E^2(z) dz}{\int_L E^2(z) dz}, \quad (2)$$

只需考虑对方程(2)在一个周期结构中的积分,然后对上部分积分乘以腔内有源部分的个数,下部分积分乘以整个腔长中半波长的个数,即

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

设计的 PGS 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。因为  $L = N(\lambda/2)$ ,则上式变为

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

$\Gamma_r$  为相对限制因子,计算的  $\Gamma_r$  与  $d/L$  曲线示于图 1 中。

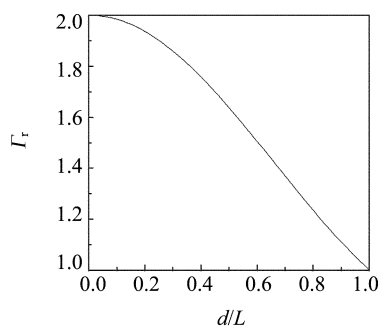


图 1  $\Gamma_r$  作为  $d/L$  的函数曲线

Fig. 1  $\Gamma_r$  as a function of  $d/L$

## 2.2 量子阱增益

基于 M. Kuznetsov 等人<sup>[2]</sup>的半经验模型对量子阱增益  $g$  进行了理论上的推断,  $g$  与载流子  $N$  之间存在的对数关系为

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

其中  $g_0$  是材料增益常数。  $N$  是载流子浓度,  $N_0$  是透明载流子浓度,则激射的阈值条件为

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

其中  $R_2$  是外腔镜面反射率,  $R_1$  是分布式布拉格反射镜(Distribution Bragg reflector, DBR)镜面反射率,  $T_{\text{loss}}$  是腔内往返一次所造成的损耗叫做输运因子,  $g_{\text{th}}$  是材料阈值增益,  $N_w$  是增益介质内量子阱的个数,  $L_w$  是量子阱的厚度。由泵浦功率  $P_p$  可以计算载流子浓度  $N$ ,

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

其中  $\eta_{\text{abs}}$  为泵浦吸收效率,  $h\nu$  为光子能量,  $A_p$  为泵浦光斑面积,  $\tau(N)$  为载流子寿命,可表达为,

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

其中  $A$ ,  $B$ , 和  $C$  分别为单分子, 双分子和俄歇复合效率。从方程(5)-(8)可以推出阈值泵浦功率  $P_{\text{th}}$

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

$N_{th}$  为阈值载流子浓度, 由下式给出

$$N_{th} = N_o \left( \frac{1}{R_1 R_2 T_{loss}} \right)^{(2\Gamma_r g_o N_w L_w)^{-1}}, \quad (10)$$

激光器的输出功率为

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

其中,  $\eta_{diff}$  为微分效率, 表达式为:

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

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

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

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

$\lambda_{pump}$  和  $\lambda_{laser}$  分别为泵浦波长和激光波长。

考虑热效应以后输出功率修正为<sup>[8]</sup>:

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

$T_{off}$  为器件的截止温度,  $\Delta T$  为,

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

其中热阻  $R_{th} = (2\sigma D)^{-1}$ ,  $\sigma$  为热导率,  $D$  为泵浦光斑直径。

### 3 计算结果

通过上述理论分析, 计算了器件的特性参数。计算所用激光器和材料的特性参数示于表 1 中。图 2、图 3 分别给出不同的外腔镜面反射率下计算的阈值功率、输出功率与量子阱数目的函数关系。图 4 为不同外腔镜面反射率下, 输出功率与输入功率的函数关系曲线。图 5 为在输入功率为 4 W 时, 不同光斑直径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 6 为考虑了热效应以后输出功率与光斑直径的关系, 可见光斑面积越大, 输出功率就越小。由于热效应的存在, 虽然输入功率增加, 但输出功率并没有增加, 而是在达到某个极值后开始下降。

表 1 激光器和材料的特性参数

Tab. 1 Characteristic parameters of materials and lasers

参量	名称	数值	单位
$g_o$	材料增益常数	2000	$\text{cm}^{-1}$
$N_o$	透明载流子浓度	$1.7 \times 10^{+18}$	$\text{cm}^{-3}$
$\Gamma_r$	相对纵模限制因子	1.8	—
$L_w$	量子阱厚度	8.0	nm
$T_{loss}$	双程损耗限制因子	0.990	—
$R_1$	在片镜面反射率	0.999	—
$\lambda_{pump}$	泵浦波长	808	nm
$\lambda_{laser}$	激射波长	980	nm
$\eta_{abs}$	泵浦吸收效率	0.79	—
$A$	单分子复合效率	$1.0 \times 10^{+7}$	$\text{sec}^{-1}$
$B$	双分子复合效率	$1.0 \times 10^{-10}$	$\text{cm}^3/\text{sec}$
$C$	俄歇复合效率	$6.0 \times 10^{-30}$	$\text{cm}^6/\text{sec}$
$D$	泵浦光斑直径	100~500	$\mu\text{m}$
$\sigma$	GaAs 热导率	44	W/mK

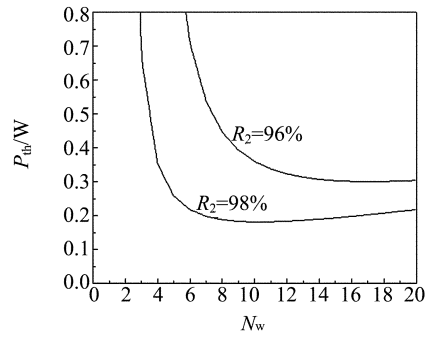


图 2 不同镜面反射率下, 阈值功率与量子阱数目的关系

Fig. 2 Output power vs number of QW's for different external mirror reflectivities

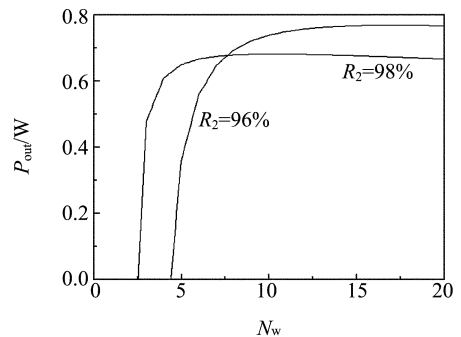


图 3 不同镜面反射率下, 输出功率作为量子阱数的函数

Fig. 3  $P_{out}$  vs number of QW's for different external mirror reflectivities

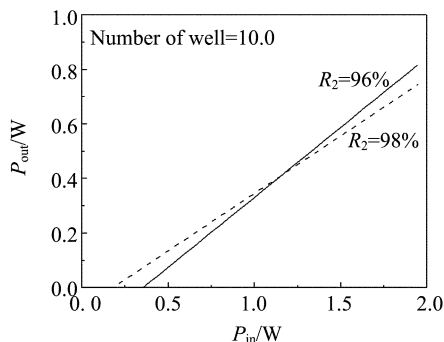


图 4 不同镜面反射率下,输出功率与输入功率的关系曲线

Fig. 4 Output power vs input power for different external mirror reflectivities

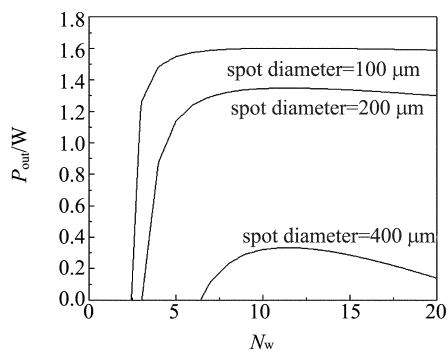


图 5 不同光斑直径下,输出功率与量子阱数的关系

Fig. 5  $P_{out}$  dependent of number of wells for different spot diameters

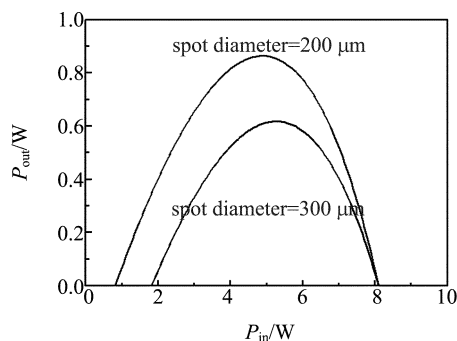


图 6 不同光斑直径下,输出功率与输入功率的关系曲线

Fig. 6  $P_{out}$  vs  $P_{in}$  for different spot diameters

## 4 OPS-VECSEL 结构设计

根据上述理论分析,设计的 OPS-VECSEL 结构如图 7 所示。

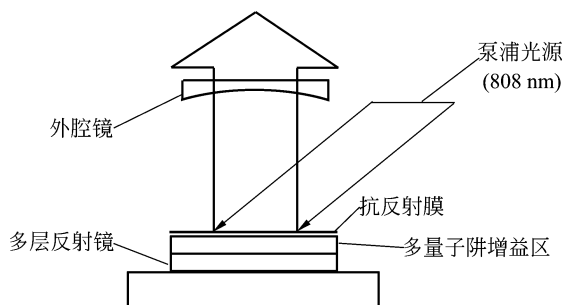


图 7 OPS-VECSEL 结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of OPS-VECSEL

对于腔长为  $L$  的器件,芯片和曲面外腔镜上的光斑直径  $\omega_1$  和  $\omega_2$  由下式给出

$$\omega_1^2 = \frac{4\lambda L_c}{\pi} \sqrt{(R_c - L_c)/L_c}$$

$$\omega_2^2 = \frac{4\lambda L_c}{\pi} \sqrt{L_c/(R_c - L_c)}, \quad (17)$$

利用式(17)确定了 VECSEL 的腔长和外腔镜的曲率半径。对于一般的激光器,光斑直径为  $100 \mu\text{m}$ ,腔长  $L_c$  和曲率半径分别为  $20 \text{ mm}$ 、 $25 \text{ mm}$ 。

OPS-VECSEL 由  $808 \text{ nm}$  二极管激光耦合模块做泵源。激光谐振腔由外腔镜与片上的高反射镜和工作区组成,工作区的多量子阱提供光增益,激光波长为  $980 \text{ nm}$ 。外腔镜通过控制传输模式对输出光束起整形作用。高反射镜是  $1/4 \lambda$  的  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{AlAs}$  交错结构形成的分布 DBR,同时也可以防止激光载流子的复合。工作区的吸收层是为泵浦光进入限制层和量子阱区域提供光学窗口<sup>[9]</sup>。镜面的反射率是决定器件性能的重要因素<sup>[10]</sup>。泵浦光以  $45^\circ$ 角入射聚焦在 OPS-VECSEL 上,形成具有一定光束直径的入射光斑。OPS-VECSEL 半导体芯片固定在高导热层上,以便取得好的散热效果<sup>[11]</sup>。

## 5 结 论

理论计算了 980 nm 光泵半导体垂直外腔面发射半导体激光器的特性。计算得

出其阈值功率、输出功率随量子阱数目而变化,光斑直径越大输出功率就越小。光斑直径 400  $\mu\text{m}$  以下,量子阱数目 10 以上时,输出功率达到饱和。

### 参考文献:

- [1] KUZNETSOV M, HAKIMI F, SPRAGUE R, *et al.* High power ( $>0.5$ -W CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular  $\text{TEM}_{00}$  beams[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, 9:1063-1065.
- [2] KUNETSOV F, HAKIMI F, SPRAGUE R. Design and characteristics of high-power ( $>0.5$ -W CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular  $\text{TEM}_{00}$  beams[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron*, 1999, 5(3):561-573.
- [3] GARNACHE A, KACHANOV A A, STOECKEL F. Diode-pumped broadband vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor laser applied to high-sensitivity intracavity absorption spectroscopy[J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2000, 17(9):1589-1598.
- [4] ZAYHOWSKI J J, MOORADIAN A. Single-frequency microchip ND lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1989, 14:24-26.
- [5] ZAKHARIAN A R, HADER J, MOLONEY J V, *et al.* Experimental and theoretical analysis of optically pumped semiconductor disk lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83:1313-1315.
- [6] 王勇刚, 马骁宇, 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.  
WANG Y G, MA X Y, JIANG L, *et al.* A kind of novel and excellent semiconductor vertical external cavity surface emission laser[J]. *Laser and Infrared*, 2003, 33(6):406-408. (in Chinese)
- [7] CORZINE S W, GEELS R S, SCOTT J W, *et al.* Design of fabry-perot surface-emitting lasers with a periodic gain structure[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, 25:1513-1524.
- [8] 孙艳芳, 金珍花, 宁永强, 等. 高功率底发射 VECSELs 的制作与特性研究[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(5):449-453.  
SUN Y F, JIN ZH H, NING Y Q, *et al.* Fabrication and experimental characterization of high power bottom-emitting VECSELs[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(5):449-453. (in Chinese)
- [9] ALFORD J, RAYMOND T D, ALLERMAN A A. High power and good beam quality at 980 nm from a vertical external-cavity surface-emitting laser[J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2002, 19(4):663-666.
- [10] SANDUSKY J V, BRUECK S R J. A cw external-cavity surface-emitting laser[J]. *IEEE Photonics Technology Lett.*, 1996, 8:313-315.
- [11] YAN C, QIN L, ZHANG S. Design and calculation characteristics of a novel diode-pumped long wavelength vertical-cavity surface-emitting semiconductor laser[J]. *SPIE*, 2004, 5280:15-21.

作者简介:何春风(1980—),女,黑龙江齐齐哈尔人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在读博士研究生,研究方向为垂直外腔面发射激光器。E-mail:hcf4405@tom.com