

高功率垂直腔面发射半导体激光器优化设计研究

李惠青^{1)†} 张 杰¹⁾ 崔大复¹⁾ 许祖彦¹⁾
宁永强²⁾ 晏长岭²⁾ 秦 莉²⁾ 刘 云²⁾ 王立军²⁾ 曹健林²⁾

¹⁾ 中国科学院物理研究所, 光物理重点实验室, 北京 100080)

²⁾ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 激发态物理重点实验室, 长春 130033)

(2004 年 5 月 24 日收到)

与传统的端发射半导体激光器相比, 垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)具有可单模输出, 光束对称性好, 可被高度聚焦, 进入光纤的耦合效率极高和有利于大规模二维列阵等优点. 为了得到高功率的激光输出, 除了要增大 VCSEL 的发射面积之外, 关键的是要选择适当的量子阱层数、有源区电流密度的均匀分布和良好的热管理等. 本文详细研究和分析了高功率 VCSEL 有源区量子阱层数, 有源区直径, 材料的热导和电阻, 电极间距等对 VCSEL 器件性能的影响. 通过优化参数, 进行最佳设计, 研制出了 980 nm $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ VCSEL 器件, 单管室温连续波输出功率已达 1.95W, 为目前最高输出功率.

关键词: 垂直腔面发射激光器(VCSEL), 量子阱, 高功率

PACC: 4255P, 7320D

1. 引 言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)的出现正引发了半导体激光器领域的一场革命, 与传统的端发射半导体激光器相比, VCSEL 具有许多独特的优点, 可单模输出, 光束对称性好, 可被高度聚焦, 进入光纤的耦合效率极高, 有利于大规模二维列阵等. 因而在多通道高速光通讯、光学信号处理、高密度光存储、光互联及光学读写等方面有重要应用价值. 过去研制的 VCSEL 大多采用较小的激光窗口($< 25\mu\text{m}$)输出功率为 10 mW 左右^[1]. 由于在自由空间通讯、医学、材料加工和激光抽运源等方面对于大功率半导体激光器的需求日益增长, 因而有必要开发大功率 VCSEL. 要想提高输出光功率, 必需通过增大 VCSEL 的光束发射窗口面积, 并相应增大 VCSEL 的有源区有效面积^[2-7]来实现. 然而, 当 VCSEL 的有源区有效面积和光束发射窗口面积增大以后, 用传统的顶发射 VCSEL 结构所产生的光斑分布很不均匀. 最近, Miller 等^[8]采用底发射方法研制出了光束较为均匀的高功率 VCSEL, 单管连续功率为 0.89 W, 脉冲功

率 10 W.

就高功率 VCSEL 器件而言, 结构参数的优化, 良好的热沉, 以及合适的氧化物限制层等对器件的性能均起着至关重要的作用. 在 VCSEL 中, 有源区的电流分布直接影响出射光的强度分布, 因而有些人曾进行过电流分布的计算^[9-12], 但他们都是针对小面积发射器件进行的. 有关大发射孔径的 VCSEL, 目前还没有人对其电流分布做过理论研究. 本文针对底发射大孔径($> 100\mu\text{m}$)VCSEL 首先从理论方面研究了有源区量子阱层数, 有源区直径, 材料热导, 串联电阻, 电极间距等对 VCSEL 器件性能的影响, 优化参数, 进行最佳设计, 研制出了高性能的 980 nm $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ VCSEL 器件, 单管室温连续波输出功率已达 1.95W, 为 VCSEL 目前最高输出功率.

2. 物理模型

载流子浓度, 量子阱层数, 以及材料的热导等, 对半导体激光器的性能, 如阈值增益, 输出功率等均有重要影响. 垂直腔面发射半导体激光器的阈值

[†]E-mail: huiqing0910@yahoo.com; 电话: 010-82649351.

载流子浓度 $N_{th}(R, n)$ 与阈值增益 $G_{th}(R, n)$ 的关系可表示为

$$N_{th}(R, n) = N_0 \exp[G_{th}(R, n) / g_0], \quad (1)$$

其中 $R = (R_p \cdot R_n)^{1/2}$, R_p 和 R_n 分别为 p 型和 n 型 Bragg 反射器 (DBR) 的反射率, N_0 是量子阱材料的透明载流子浓度, g_0 是增益系数, n 是量子阱层数. $N_{th}(R, n)$ 和 $G_{th}(R, n)$ 均与 R 和 n 有关,

$$G_{th}(R, n) = \alpha(n) + \ln(1/\sqrt{R}) / (\Gamma \cdot n \cdot L_w), \quad (2)$$

这里 $\alpha(n)$ 是包括量子阱和氧化层等在内的材料损耗, L_w 是单个量子阱宽度, Γ 是限制因子, 对大面积垂直腔面发射半导体激光器 $\Gamma \approx 1$.

输出功率 P 可以表示为^[13]

$$P(R, n) = \eta_d(R, n) \cdot h\nu/q \cdot (I - I_{th}) \cdot (1 - \Delta T/T_{off}), \quad (3)$$

其中 $\eta_d(R, n) = \eta_g \cdot \frac{\ln(1/\sqrt{R})}{\alpha(n) + \ln(1/\sqrt{R})}$ 是微分量子效率, η_g 为最大微分量子效率, $h\nu$ 是光子能量, q 是基本电荷, I 是外加电流, I_{th} 是阈值电流.

截止温度 $T_{off} = 170\text{K}$, 器件的上升温度 ΔT 表示为

$$\Delta T = R_{therm} [(V_k + I \cdot R_d) \cdot I - P], \quad (4)$$

这里 V_k 代表折点电压, R_d 代表微分电阻. 热阻 R_{therm} 与平均热导 σ 及激光有源区直径 D 成反比, 即

$$R_{therm} = (2\sigma D)^{-1}. \quad (5)$$

利用 (1)~(5) 式, 研究了量子阱层数对输出功率的影响, 还计算了输出功率、温差与有源区直径、热导、激光器电流之间的关系.

为考察 VCSEL 出射激光的强度分布, 本文着重研究了电极间距和串联电阻对有源区的电流密度的影响, 用有限元分析软件 ANSYS 数值计算了有源区的电流密度分布.

3. 结果与讨论

在具体计算和分析中, 以 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 多量子阱双 DBR 底发射 VCSEL 为例, 激光器的输出波长为 980nm , 基本结构如图 1 所示. 有源区为 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 多量子阱, 氧化物限制层采用 AlAs 材料, 氧化物限制层的孔径相应于有源区有效直径, 氧化物孔径对电流起到限制作用, 使有源区中心部分电流密度增大, 减小阈值, 提高抽运效率. 激光器的腔镜

由不同反射率的 p 型和 n 型 DBR 组成, 激光输出窗口在 GaAs 衬底一侧, p 型上电极为圆形金属电极, n 型下电极为围绕着圆形激光输出窗口的环形电极.

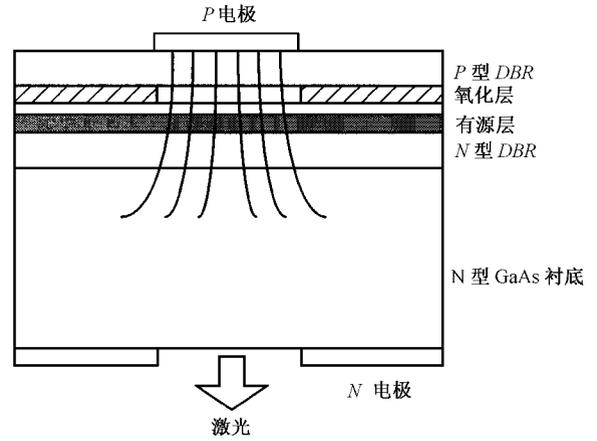


图 1 底发射 VCSEL 的基本结构示意图

有源区是 VCSEL 的核心部分, 对于多量子阱 VCSEL, 量子阱的层数直接影响到器件的输出特性. 我们对双 DBR 结构, 在有源区直径 $D = 0.5\text{mm}$, 注入电流 $I = 6\text{A}$, 不考虑温升的条件下, 计算了不同反射率 R 时的输出功率 P 与量子阱层数 n 之间的典型依赖关系, 如图 2 所示. 由图可知, 在 R 为 $99.0\% \sim 99.3\%$ 范围内, 量子阱层数 n 取为 $2 \sim 4$ 时, VCSEL 的输出功率有最大值, 一般选择 3 个量子阱为佳.

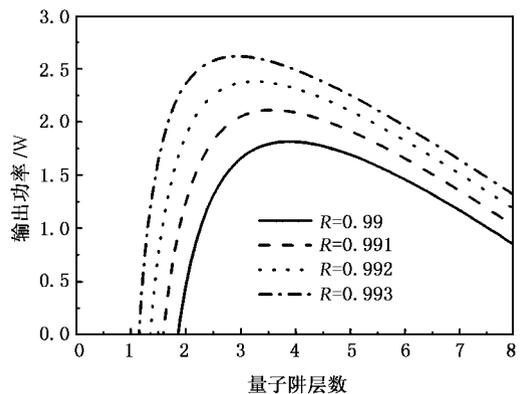


图 2 不同反射率 R 条件下, 输出功率与量子阱层数的依赖关系

为研究 VCSEL 的输出特性, 我们在阈值电流密度 $J_{th} = 0.8\text{kA}/\text{cm}^2$ 和热导 $\sigma = 5\text{W}/\text{cmK}$ 条件下, 对不同激光有源区直径分别计算了输出功率与外加电流的依赖关系, 如图 3 所示. 从图 3 可以清楚看出,

在给定的阈值电流密度和热导条件下,输出功率首先随着激光有源区直径和外加电流的增加而增加;接着,输出功率达到最大值;然后,输出功率呈下降趋势.显然,输出功率与激光有源区直径及外加电流之间有一个最佳值.如图3所示,在目前的条件下,当有源区直径 $D = 0.5 \text{ mm}$ 和电流 $I = 6 \text{ A}$ 时,VCSEL 的输出功率可达 2 W .

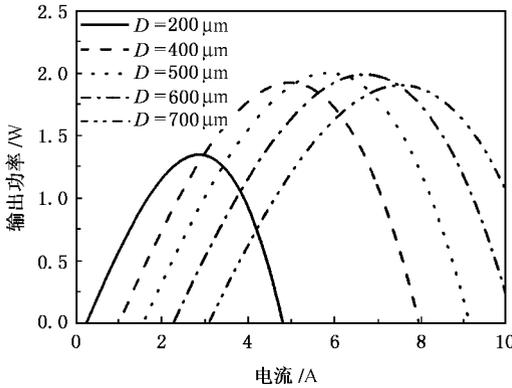


图3 不同激光有源区直径条件下,输出功率及外加电流的依赖关系

大发射窗口面积的 VCSEL 与小发射窗口面积的 VCSEL 相比,最大的优势是可增大输出功率,对于有源区直径确定的装置,最大输出功率由热交换所限制^[8].为讨论热交换对最大输出功率的影响,图4给出了阈值电流密度 $J_{th} = 0.8 \text{ kA/cm}^2$ 时,在不同热导条件下最大输出功率与激光有源区直径依赖关系.显然,在给定的热导条件下,最大输出功率对应最佳有源区直径,热导越大,对应的最佳有源区直径越大,输出功率也越大.由此可见,在制作 VCSEL 器件时,应尽量选用热导大的材料,有效的热沉对于大功率 VCSEL 是很关键的.

图5给出了量子阱层数 $n = 3$ 时,阈值电流密度 $J_{th} = 0.8 \text{ kA/cm}^2$ 和热导 $\sigma = 5 \text{ W/cmK}$ 条件下,器件上升温度 ΔT 与激光有源区直径及外加电流的关系.正如图5所示,当电流增加时,有源区直径越小,器件的温度上升越快;反之,有源区直径越大,器件的温度上升的越慢.这就意味着,激活区直径越大,就越有利于器件的散热,从而有利于提高激光器的效率.

有源区有效直径内的电流分布对激光束光斑强度分布有直接影响.在以上的研究中,采用了有源区直径内电流是均匀分布的模型,从而,认为激光束光斑也是均匀分布.实际上,对于大面积底发射

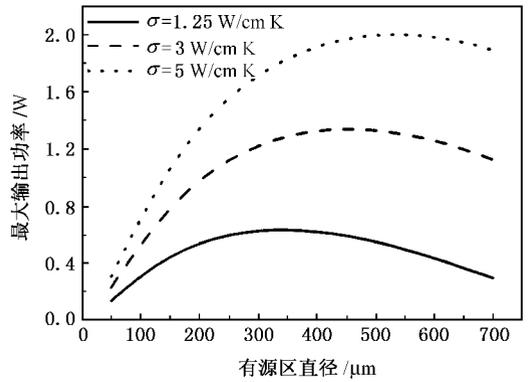


图4 不同热导条件下,最大输出功率与激光有源区直径的依赖关系

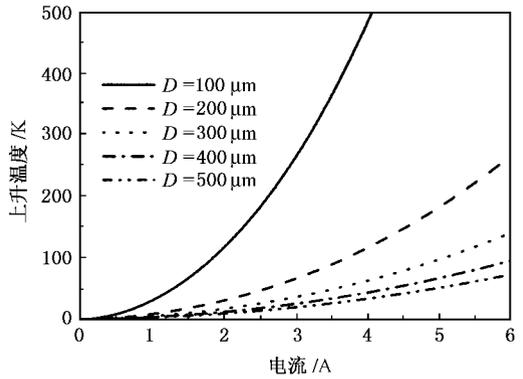


图5 不同有源区直径条件下,器件上升温度 ΔT 与外加电流的关系

VCSEL,由于 n 型下电极是围绕着圆形激光输出窗口的环形电极,这就使得有源区内电流分布具有不均匀性.因此,采用适当的技术,使激光束光斑能够均匀分布,则是大面积底发射 VCSEL 的一个重要研究课题.下面,用 ANSYS 有限元分析软件,对 VCSEL 的有源区内电场进行分析,得到有源区的电流密度分布.我们分别计算了 GaAs 衬底厚度(相应于电极间距)串联电阻大小与有源区电流密度分布的关系.

图6给出了有源区直径取为 $500 \mu\text{m}$,器件串联电阻取为 0.4Ω ,加 25 V 电压的条件下,有源区的电流密度分布随衬底厚度 D_{sub} 的变化关系.对于大面积底发射 VCSEL, n 型和 p 型电极间距主要取决于 GaAs 衬底厚度,有源区与 DBR 等所占的厚度只是电极间距中很小一部分,而且该厚度值是相对固定的(约 $10 \mu\text{m}$).因而,调节电极间距,就是靠改变衬底厚度.从图6可以看出,当衬底厚度小于 $50 \mu\text{m}$

时,有源区的电流密度分布非常不均匀,中央区域电流密度几乎为 0,电流主要集中在有源区的边缘.这样,激光光斑就呈现环状,环中间光强几乎为 0.中央区域电流密度随着衬底厚度的增加而增加,当衬底厚度为 $200\ \mu\text{m}$ 时,有源区的电流密度分布就比较均匀了.考虑到衬底损耗等因素,衬底厚度也不宜太厚.综合各种因素以后,衬底最佳厚度取 $200\ \mu\text{m}$ 左右.对于较厚的衬底,可以考虑对衬底部分刻蚀,减薄出射窗口处的衬底厚度,以减小衬底对出射光的吸收,因为影响电流密度分布的主要因素是两电极间的距离.

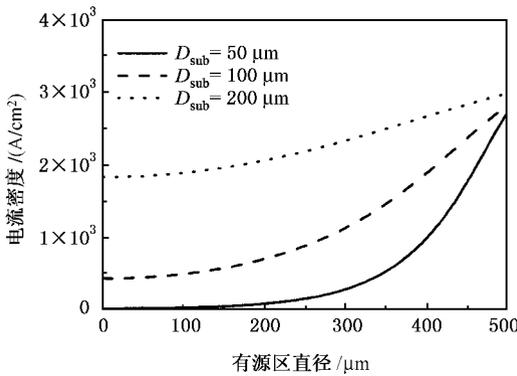


图 6 有源区的电流密度分布与衬底厚度的关系

图 7 给出了有源区直径取为 $500\ \mu\text{m}$,衬底厚度取为 $200\ \mu\text{m}$,加 25V 电压的条件下,器件串联电阻分别取 $1\ \Omega$, $0.8\ \Omega$, $0.5\ \Omega$ 和 $0.2\ \Omega$ 时有源区的电流密度分布.显然,串联电阻越小,有源区的电流密度越大,从而就有利于提高激光输出功率.

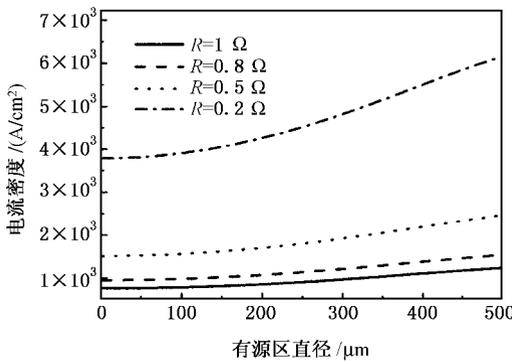


图 7 有源区的电流密度分布与串联电阻的关系

根据理论计算结果,对 VCSEL 进行了优化设计,研制出了有源区有效直径为 $500\ \mu\text{m}$ 的 3 量子阱的 VCSEL,外加电流与激光输出的关系曲线如图 8 所示,在注入电流为 6A 时得到了室温连续波 1.95W 的激光输出,为 VCSEL 最高输出功率.图 9 为实验得到的谱线图,峰值波长为 987.7nm ,线宽为 0.7nm ,更详细的实验结果将另外发表.

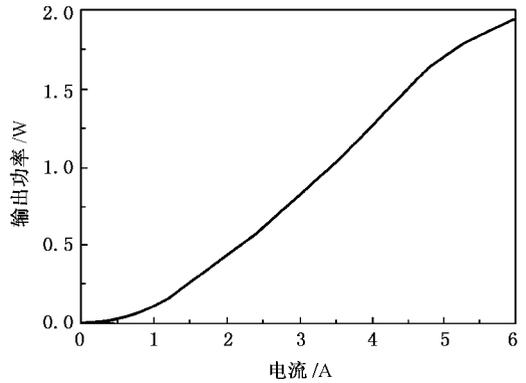


图 8 实验得到的输出功率与注入电流的关系

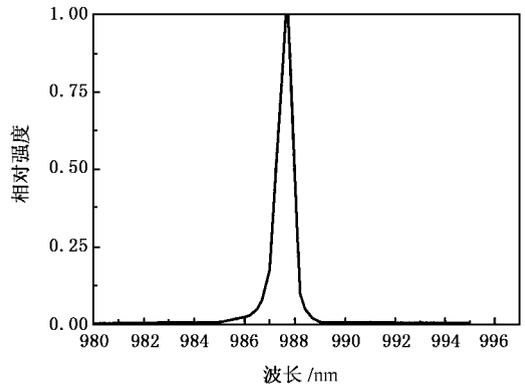


图 9 实验得到的激光线型

综上所述,对于大发射窗口面积的 VCSEL,要得到高功率的激光输出,且有源区的电流分布更加均匀以及中心区的电流密度相对较大,应选择适当的量子阱层数、有源区直径和衬底厚度以及热导大、电阻小的材料.优化参数,进行最佳设计,研制出了高性能的 $980\ \text{nm}\ \text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ VCSEL 器件,单管室温连续波输出功率已达 1.95W ,为 VCSEL 最高输出功率.结果表明实验与理论分析符合得很好.

- [1] Milster T , Jiang W , Walker E , Burak D , Clalssse P , Kelly P and Binder R 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 3425
- [2] Peters F H , Peters M G , Young D B , Scott J W , Thibeault B J , Corzine S W and Coldren L A 1993 *Electron Lett.* **29** 200
- [3] Grabherr M , Weigl B , Reiner G , Miller M and Ebeling K J 1996 *Electron Lett.* **32** 1723
- [4] Grabherr M , Jäger R , Miller M , Thalmaier C , Heerlein J , Michalzik R and Ebeling K J 1998 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10** 1061
- [5] Choquette K D , Hou H Q , Geib K M and Hammons B E 1997 *Proc. IEEE/LEOS Summer Topical Meetings , Montreal , Canada , Aug. 11 – 12*
- [6] Francis D , Chen H L , Yuen W , Li G and Chang-Hasnein C 1998 *Electron Lett.* **34** 2132
- [7] Huffaker D L , Deppe D G and Kumar K 1994 *Appl. Phys. Lett.* **65** 97
- [8] Miller M , Grabherr M , King R , Jäger R , Michalzik R and Ebeling K J 2001 *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **7** 210
- [9] Hirayama H , Miyake Y and Asada M 1992 *IEEE J. Quantum Electron.* **28** 68
- [10] Dutta N K 1990 *J. Appl. Phys.* **68** 1961
- [11] Nakwaski W and Osiński M 1991 *IEEE J. Quantum Electron.* **27** 1391
- [12] Hegblom E R , Margalit N M , Thibeault B J , Coldren L A and Bowers J E 1997 *Proc. SPIE Photonics West* **3003** 176
- [13] Grabherr M , Miller M , Jäger R , Michalzik R , Martin U , Unold H J and Ebeling K J 1999 *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **5** 495

Optimal designs for high-power vertical cavity surface emitting lasers

Li Hui-Qing¹⁾ Zhang Jie¹⁾ Cui Da-Fu¹⁾ Xu Zu-Yan¹⁾

Ning Yong-Qiang²⁾ Yan Chang-Ling²⁾ Qin Li²⁾ Liu Yun²⁾ Wang Li-Jun²⁾ Cao Jian-Lin²⁾

¹⁾ *Laboratory of Optical Physics , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 ,China)*

²⁾ *Laboratory of Excited State Processes , Changchun Institute of Optics , Fine Mechanics and Physics , Chinese Academy of Sciences , Changchun 130033 ,China)*

(Received 24 May 2004)

Abstract

Vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL 's) lase in a single longitudinal mode , have a circularly symmetric output beam that can be very tightly focused , offer extremely high coupling efficiencies into optical fiber , and can be mass produced in two – dimensional arrays relative to the conventional edge-emitting semiconductor laser. To obtain a high optical output power , besides enlarging of VCSEL 's lasing area , the key points are proper number of quantum wells , homogeneous distribution of current density in the active layer and good thermal control. The dependence of VCSEL 's performance on the number of quantum wells , the active diameter , the thermal conductivity and the electric resistance of the material ; and the distance between electrical contacts are investigated. By optimizing the design parameters for a 980 nm $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ VCSEL , a maximum continuous wave (cw) output power of 1.95 W at room temperature is obtained , which to our knowledge is the highest cw output power of any single VCSEL so far.

Keywords : vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL 's) , quantum well , high power

PACC : 4255P , 7320D