

外包壳对具有氧化孔径层的圆柱形 VCSEL 阈值增益的影响*

王英龙¹ 郑云龙¹ 武德起¹ 尚 勇² 阎 正¹ 赵顺龙¹ 阎常瑜¹

(1 河北大学物理科学与技术学院,保定 071002)

(2 河北省自然科学基金办公室,石家庄 050000)

摘 要 采用矢量场模型,对具有诱人应用前景的圆柱形垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)的模式阈值增益进行了数值模拟;为减弱金属圆柱的反射以使理论计算更接近实际,采用两种方案,将外加金属包壳视为非理想导体,或在此基础上,将金属包壳与激光器主体结构隔开.从模式的阈值增益与顶 Bragg 反射镜层周期数的关系方面,与理想金属外包壳情况进行了比较.结果表明,高阶贝塞耳函数模式的阈值增益变化规律基本相同,而 0 阶贝塞耳函数模式的阈值增益变化规律相差较大.

关键词 垂直腔面发射激光器;氧化孔径;阈值增益

中图分类号 O433.2 **文献标识码** A

0 引言

多年来,人们在改善半导体激光器性能方面做了大量工作^[1~5].垂直腔面发射激光器(VCSEL)的众多优点使之在光通信、光互连、光集成等领域有着重要的应用前景^[6].量子阱和氧化孔径层的引入,大大提高了激光器的性能^[7],但给其理论处理带来了很大困难.从标量模型、混合模型到矢量模型,人们先后提出十余个理论模型来研究具有氧化孔径层的 VCSEL 的模式等行为^[7~9].在这些模型中,矢量模型的计算耗时最长,但准确度最高.

Demeulenaere 等人^[7]从 Maxwell 矢量场方程出发,按照基模展开的方法,建立了具有氧化孔径层的 VCSEL 的模式理论,得到了氧化孔径半径、厚度对激光模式的阈值增益的影响.文献^[10]曾利用这一模型,给出了振荡波长、阈值增益随激光器内半径(氧化孔径或量子阱的半径)、外半径(激光器结构的半径)、Bragg 反射镜层折射率、周期数以及氧化孔径层厚度、位置和氧化物折射率的详细变化规律.

Bienstman 等人^[8]提出的 CAMFR 模型也先将激光放在一理想金属圆柱(外包壳)内,但各层介质的本征模直接求解超越方程^[11~13]解析地求出,因此计算量小.每一层介质内的场都按本层内的本征模展开.为了消除金属圆柱的反射,在此圆柱上“涂”了一层匹配极好的涂层(PML)^[14~16],即加上了吸收性的边界条件,基模由原来的贝塞耳函数表征变为

由虚宗量的贝塞耳函数表征,等价于使金属圆柱半径有了一个虚部,它对电磁场起吸收作用.这样可以有效地模拟开放的结构^[13].

在基模展开模型的基础上,本文融合了 CAMFR 的一些思想.在金属圆柱上引入复数的半径,以此来减小金属圆柱对腔内光场的影响,并对模型进行了修正:将激光器和金属圆柱之间加一层空气层.

1 基本结构与模拟结果

图 1 为理论计算常用的 VCSEL 结构简图.整个结构呈圆柱形、外包壳为理想导体,由顶 Bragg 反射镜、氧化孔径层、腔和底 Bragg 反射镜组成.顶、底 Bragg 反射镜均由 GaAs、Al_xGa_{1-x}As 交替多个周期形成,层长均为 $\lambda_0/4$,这里 λ_0 表激光器设计波长;氧化孔径层由 AlO_x 包裹 AlAs 组成,其细致结构标于相应位置处;5 nm 的量子阱和上下阻挡层构成腔,腔长为 λ_0 .假定氧化孔径层内半径与量子阱

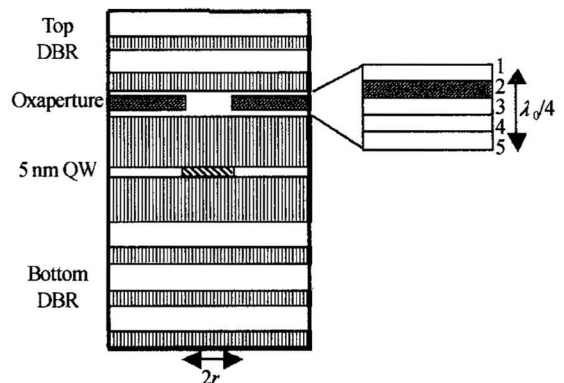


图 1 VCSEL 结构
Fig. 1 Schematic structure of VCSEL

*河北省自然科学基金资助项目(No. 601084)
Tel:0312-5977068 Email:hdwangyl@mail.hbu.edu.cn
收稿日期:2004-10-19

半径相同。

按照 Demeulenaere 等人^[7]的思想,选贝塞耳函数“基模”系(200个)、求具体各层的“层模”、计算顶反射镜和底反射镜的反射矩阵、与腔内场的传播条件结合,给出振荡模式所满足的方程 $(C_2 C_1 - 1)[A_{\text{act}}^+(0)] = 0$ 。其中 200×200 矩阵 C_1 、 C_2 与激光器结构和振荡波长有关,列阵 $[A_{\text{act}}^+(0)]$ 表量子阱中心处振荡模式向下传播的场按层模展开的系数。在激光器结构参量确定情况下,调整波长以及有源区增益,可以寻求相应振荡模式,从而得到振荡波长和阈值增益。

整个模拟过程中,主要考察阈值增益 T_g 对参量的依赖关系,希望阈值增益低。假定顶 Bragg 反射镜 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层周期数 N_i 为可变化的参量。氧化孔径的位置 pn_{ox} 与图 1 的细致结构相对应,可以取为 1~5。另外,做为基模的贝塞耳函数的阶数 or_Bessel 对波长和增益也有重要影响。激光器设计波长为 980 nm,典型结构参量列于表 1,其中 n_i 为对应量子阱增益的折射率虚部。

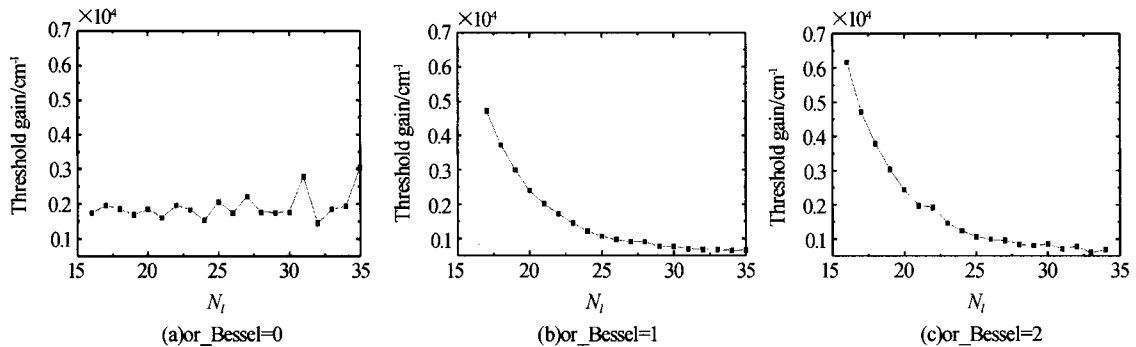


图 2 外包壳为理想导体情况下阈值增益与顶 Bragg 反射镜周期数的变化曲线

Fig. 2 Threshold gain versus pair number of top Bragg mirror if the shell of laser is considered as perfect one

8 μm ,氧化孔径层位置 pn_{ox} 选为 4。外包壳为理想导体情况下的 T_g 与 N_i 的变化关系曲线如图 2,其中(a)、(b)、(c)分别为 $\text{or_Bessel}=0, 1, 2$ 时的结果。从图(b)和图(c)中可以看到,随着 N_i 的增大,阈值增益单调减少,当 N_i 较小时,阈值增益急剧减小;而当 N_i 较大时,阈值增益缓慢降低,且趋于某一定值(或略有起伏)。这一点可以这样来解释:反射镜层数增多,反射率增大,则阈值增益降低,当反射镜层数达到一定数目后,层数的增加引起的反射率增大会很小,因而阈值降低缓慢。当反射镜层数足够多时,反射率已接近全反射(不考虑损耗),那么阈值将趋于某一定值。与高阶贝塞耳函数对应结果相比, $\text{or_Bessel}=0$ 时(图(a)),阈值增益随顶周期数振荡变化, N_i 小时比高阶对应的阈值增益小,而 N_i 大时比高阶对应的阈值增益大。这一结果表明,对于 $\text{or_Bessel}=0$ 对应的模式,反射镜的反射率并

表 1 典型 VCSEL 结构各层介质材料、折射率和厚度

	介质	折射率	厚度/nm
顶空间	空气	1	∞
顶	GaAs	3.53	69.49
DBR	AlGaAs	3.08	79.63
氧化窗口	GaAs	3.53	69.49
	AlGaAs	3.08	63.71-d
	AlAs	2.95	15.93
	AlOx	1.60	
有源区	AlGaAs	3.08	d
	GaAs	3.53	136.49
	QW	$3.53 + in_i$ $3.53 - i0.01$	5.00
底	GaAs	3.53	136.49
DBR	AlGaAs	3.08	79.63
衬底	GaAs	3.53	∞

Demeulenaere 等人^[7]给出了激光器内半径对振荡波长和阈值增益的影响,本文的模拟结果与之相同,为了便于与后面结果的比较,以顶 Bragg 反射镜层周期数 N_i 为例讨论参量对阈值增益的影响。计算中,固定内半径 r 为 4 μm ,而外半径 R 为

不是随着层数的增加而单调增加,干涉的结果导致其反射率周期性变化。

2 外包壳为非理想导体情况

计算中,引入了半径为 R 的金属(理想导体)外包壳,这给数值模拟带来了极大方便。但是,这无疑也导致了边界的寄生反射。实际上,这部分反射功率理应落在激光器之外。为了弱化这一因素的影响,使计算更接近实际,基于 CAMFR 模型的思想,视外包壳为非理想导体,降低边界出现的寄生反射。

此时,外包壳导致的边界条件为非齐次的,因而基模中出现虚宗量的贝塞耳函数,数学处理上,可以等效地将原来模型中的径向距离变为复数。与上节结果比较,可以看出理想外包壳的加入导致的寄生影响。

引入的半径虚部为 -0.1,图 3(a)、(b)、(c)分

别为 $or_Bessel=0, 1, 2$ 时对应阈值增益的结果. 与图 2 比较, 可以看出: 2 阶贝塞耳函数对应的模式, 阈值增益曲线基本相同, 均随 Bragg 周期数的增大而单调减小; 1 阶贝塞耳函数对应的模式, 相应规律变化不大, 当 Bragg 周期数小于 20 时, 非理想外包

壳与理想情况相比, 阈值增益稍小且不完全随周期数的减小而单调增大, 当 Bragg 周期数大于 20 时, 非理想外包壳与理想外包壳情况结果一致; 对于 0 阶贝塞耳函数对应的模式, 曲线变化很大, 且阈值增益总体比理想包壳时大.

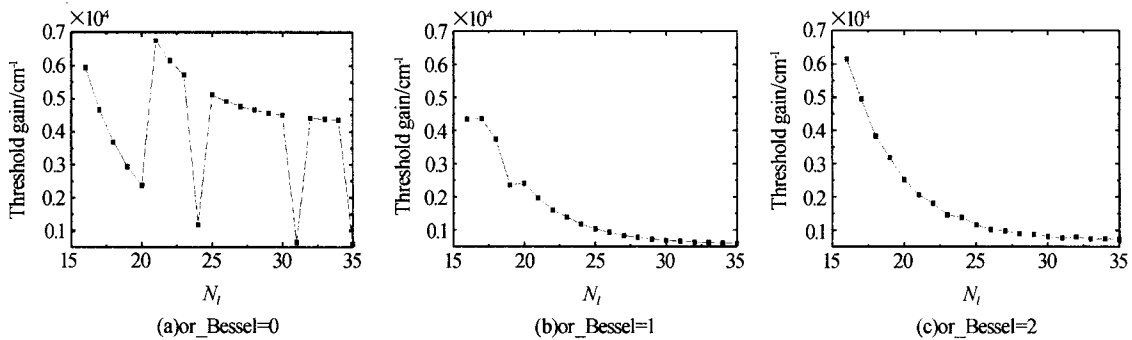


图 3 外包壳为非理想导体情况下阈值增益与顶 Bragg 反射镜周期数的变化曲线

Fig. 3 Threshold gain versus pair number of top Bragg mirror if the shell of laser is considered as non-perfect one

3 外包壳为非理想导体且与激光器结构隔开的情况

在假定外包壳为非理想导体的情况下, 又在金属包壳与激光器之间加入了一层空气层, 将外包壳与激光器结构隔开, 以期与实际更加符合.

将 Bragg 反射镜周期数对 T_g 的影响示于图 4.

引入的半径虚部为 -0.1 , 空气层厚度为 $1 \mu\text{m}$. (a)、(b)、(c) 分别为 $or_Bessel=0, 1, 2$ 时阈值增益的结果. 通过与图 2 的比较可以看出: 对于高阶(1 阶、2 阶)贝塞耳函数情形, 二者近似相同; 0 阶贝塞耳函数对应的模式的阈值增益比理想包壳情况振荡剧烈, 但比单纯非理想包壳时振荡变缓.

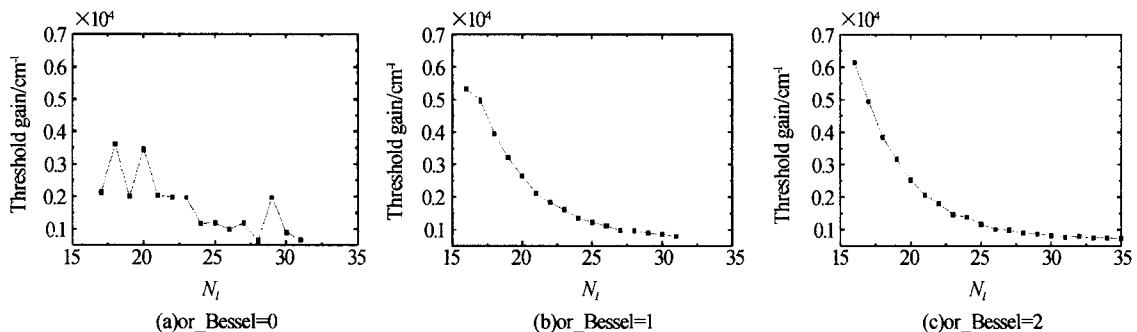


图 4 非理想外包壳与激光器结构隔开情况下阈值增益与顶 Bragg 反射镜周期数的变化曲线

Fig. 4 Threshold gain versus pair number of top Bragg mirror if the shell of laser is considered as non-perfect one and separated from the laser

4 结论

通过对三种情况(理想外包壳、非理想外包壳、非理想外包壳与激光器主体隔开)下模式阈值增益随顶反射镜层周期数变化规律的数值模拟和比较, 可以看出, 高阶贝塞耳函数模式的阈值增益变化规律基本相同, 而 0 阶贝塞耳函数模式的阈值增益变化规律相差较大. 或许可以这样理解, 对 0 阶贝塞耳函数对应的模式而言, 理想外包壳引起不必要的寄生反射, 而非理想外包壳并没有很好地消除边界引起的不必要的寄生反射.

参考文献

- 王春林, 伍剑, 林金桐. 双外腔反射半导体激光器中低频波动的研究. 光子学报, 2003, **32**(8): 917~920
Wang C L, Wu J, Lin J T. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8): 917~920
- 王英龙, 李惠青, 郑云龙, 等. 语音信号调制的微腔半导体激光器的抗噪音性能. 光子学报, 2002, **31**(4): 441~444
Wang Y L, Li H Q, Zheng Y L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(4): 441~444
- 李林, 钟景昌, 张永明, 等. 垂直腔面发射激光器的结构生长及特性研究. 光子学报, 2005, **34**(3): 343~345
Li L, Zhong J C, Zhang Y M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 343~345

- 4 李九生, 鲍振武, 金杰. 半导体激光器的噪音特性神经网络仿真. 光子学报, 2005, **34**(2):195~198
Li J S, Bao Z W, Jin J. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2):195~198
- 5 侯识华, 赵鼎, 叶晓军, 等. 吸收对垂直腔面发射激光器光学特性的影响. 光子学报, 2005, **34**(1):18~21
Hou S H, Zhao D, Ye X J, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1):18~21
- 6 王莉, 陈弘达, 潘钟, 等. 垂直腔面发射激光器的研究开发现状及其应用. 高技术通讯, 2001, **11**(4):104~108
Wang L, Chen H D, Pan Z, *et al.* *High Technology Letters*, 2001, **11**(4):104~108
- 7 Demeulenaere B, Bienstman P, Dhoedt B, *et al.* Detailed study of AlAs-oxidized apertures in VCSEL cavities for optimized modal performance. *IEEE J Quantum Electronics*, 1999, **35**(3):358~367
- 8 Bienstman P, Baets R, Vukusic J, *et al.* Comparison of optical VCSEL models on the simulation of oxide-confined devices. *IEEE J Quantum Electronics*, 2001, **37**(12):1618~1631
- 9 赵鼎, 林世鸣. 基于矢量光场的 VCSEL 数值模型. 半导体学报, 2003, **24**(12):1297~1302
Zhao D, Lin S M. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, **24**(12):1297~1302
- 10 Wang Y L, Zheng Y L, Yan Z, *et al.* On the modal performance of VCSELs with oxidized aperture. *SPIE*, 2003, **5280**:772~776
- 11 Zaki K A, Atia A E. Modes in dielectric-loaded waveguides and resonators. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1983, **31**(12):1039~1044
- 12 Zaki K A, Chen S W, Chen C. Modeling discontinuities in dielectric-loaded waveguides. *IEEE Trans Microwave Theory Tech*, 1988, **36**(12):1804~1810
- 13 Bienstman P, Derudder H, Baets R, *et al.* Analysis of cylindrical waveguide discontinuities using vectorial eigenmodes and perfectly matched layers. *IEEE Trans Microwave Theory and Tech*, 2001, **49**(2):349~354
- 14 Bienstman P, Baets R. Optical modeling of photonic crystals and VCSEL's using eigenmode expansion and perfectly matched layers. *Opt Quantum Electron*, 2001, **33**(4):327~341
- 15 Derudder H, Olyslager F, De Zutter D. Analysis of waveguide discontinuities using perfectly matched layers. *Electron Lett*, 1998, **73**(22):3324~3326
- 16 Chew W C, Jin J M, Michielssen E. Complex coordinate stretching as a generalized absorbing boundary condition. *Microwave Opt Technol Lett*, 1997, **15**(6):363~369

The Influence of the Shell on the Modal Threshold Gain of Cylindrical and Oxide-Confined VCSEL

Wang Yinglong¹, Zheng Yunlong¹, Wu Deqi¹, Shang Yong², Yan Zheng¹, Zhao Shunlong¹, Yan Changyu¹

¹ College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002

² The Office of Hebei Natural Science Foundation, Shijiazhuang 050000

Received date: 2004-10-19

Abstract The modal threshold gain of cylindrical and oxide-confined vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) with potential applications in optical communication and optical interconnect, is simulated numerically by using Vectorial Field Model. To weaken the parasitic reflections from the shell (perfectly conducting metal cylinder), more practically, it is considered the shell as non-perfect conducting one, or moreover, it is supposed that the shell is separated from the laser. The threshold gain versus pair number of top Bragg mirror in the two situations is compared with that in the case of perfectly conducting metal cylinder. The result shows that the threshold gain curves are similar for high-order Bessel modes, and they are quite distinct for 0-order Bessel modes.

Keywords Vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL); Oxidized aperture; Threshold gain



Wang Yinglong was born in 1965, in Hebei, China. He obtained the M. S. degree from Department of Physics in Hebei University in 1989 and had been assigned as a teacher in the same department. Now he is a professor and has been working toward the Ph. D. in Hebei University. His research interests are nonlinear optics and photoelectronics.