

表面等离子体调制单模面发射激光器的研究^{*}

宋国峰[†] 张 宇 郭宝山 汪卫敏

(中国科学院半导体研究所纳米光电子实验室 北京 100083)

(2008 年 12 月 30 日收到 2009 年 2 月 19 日收到修改稿)

对单模面发射半导体激光器的研究随着其应用的不断扩展而引起了人们的广泛的重视,应用多种方法可以提高其输出功率并改善其模式抑制比.利用金属表面等离子体纳米结构调制的方法可以获得单模面发射激光器输出功率的提高,理论计算表明这种方法增强效应可达近 50%.

关键词:表面等离子体,单模面发射激光器,模式选择

PACC: 7865

1. 引 言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)以其单色性好、发散角小、单纵模激光、低阈值电流、高调制带宽、易与光纤耦合、易于高密度集成、能够进行“在片”检测和低成本等优势,广泛应用于激光打印、密度光存储和读出、短程光通讯、自由空间光互连以及单模光纤中数据高速传输等各领域.VCSEL的微型腔结构的应用,在纵模上改进了激光光源的单色性,从而在一定程度上抑制光在光纤传输中的材料色散和波导色散,但对模式色散依旧无能为力.使用单模光纤与激光器耦合可以作为一种解决办法,但在低成本的局域网或者家庭接入网等中小型网络(850 nm光源)中,由于性价比的原因不宜大量使用.因此在实际应用中,为了使激光器能更好地与光纤耦合,多要求VCSEL具有稳定的基横模工作特性,特别是高输出功率的基横模工作特性.于是,如何廉价地得到基横模即单模的激光光束成为人们所关注的焦点.

传统的制备单模 VCSEL 的方法是减小其 VCSEL 的氧化孔径,实质上是为了减少有源物质的工作区域,增加高阶模式损耗.由于受限于发光的孔径和微分电阻,传统结构单模 VCSEL 输出功率一直难以有效提升.为了获得单模高功率 VCSEL,人们采用了离子注入和氧化限制相结合、表面刻蚀、三角形孔径、外腔结构等多种不同的方法^[1-2],但这些方法

得到的都是夹杂有高阶模式的变形的基模,高阶模式的散射损耗难以避免.

为了进一步改进 VCSEL 的性能,人们采用的方法包括光子晶体结构^[3]、通过对上分布布拉格反射镜(DBR)结构中进行质子注入限制注入电流的半径、表面刻蚀金属等离子体结构^[4]等.这些方法有效地提高了输出功率并进一步改进了光束质量.其中利用表面等离子体激元(SPPs)的增强和调制效应提高半导体光器件性能的方法近几年成为研究亮点.尤其是表面激元能够对光进行调制、选择透过的特点,成为科研者感兴趣的研究领域.本文模拟设计应用表面激元物理效应调制增强的办法,通过对 VCSEL 发光端面出光的调制和高阶模的衰减,获得高功率密度的单模垂直腔面发射激光光源.

2. 单孔结构获得单模输出的模拟

对垂直腔面发射激光器的模拟,为实现对输出光模式的模拟计算,首先我们利用有效折射率^[5]的概念建立一个光纤结构模型,如图 1 所示.把上、下 DBR 结构不透光部分与氧化孔径的氧化层拟合成光纤包层,把 DBR 结构透光部分和氧化孔径拟合成光纤芯径.利用光纤结构代替 VCSEL 结构,模拟过程中,假设光波不断从光纤中传导到表面,于是使用连续波就可以模拟激光器的出光情况了.而且由于光纤对光有限制作用,用光限制替代氧化孔径对电

^{*} 国家自然科学基金(批准号:60677045)资助的课题.

[†] E-mail: ssgf@semi.ac.cn

流的限制,因此使用光纤结构可以对氧化孔径的效果进行模拟.

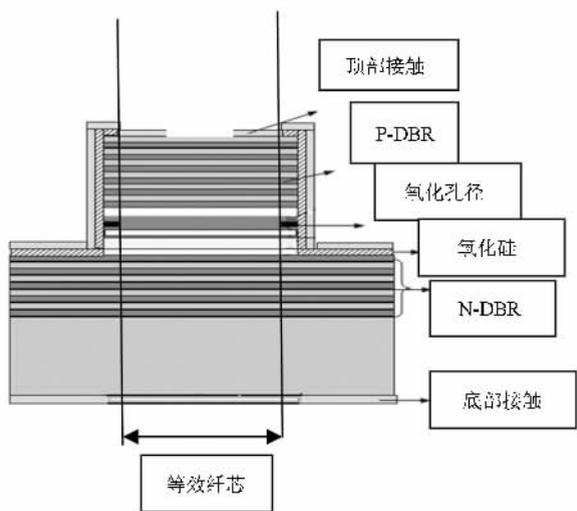


图1 垂直腔面发射激光器等效光纤结构图

模拟计算所采用的单孔垂直腔面发射激光器腔面结构如图2所示,面发射激光器出光腔面沉积一层金属薄膜,设在出光面镀上100 nm厚的金,形成金属半导体界面.

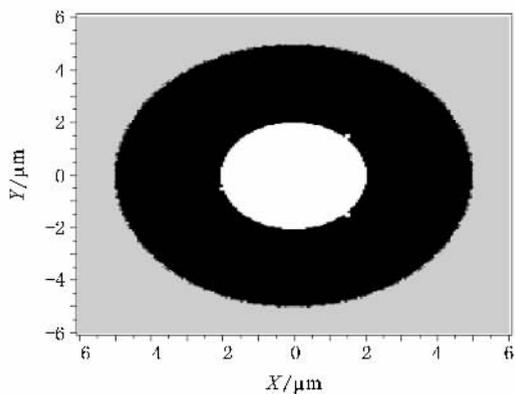


图2 单孔的模型图

首先对 VCSEL 出光的功率和存在模式进行模拟.先对氧化孔径为 8 μm 的 VCSEL 进行模式的模拟计算,得到其在 10 mA 时有三种偏振模式 LP01, LP02, LP11. 分别对 LP01, LP02, LP11 三种模式的每种能流测算,然后利用软件将三个能流分布加权拟合.在离出光口 500 nm 位置处的能流进行监测.分别得到其能流曲线,见图3.

在上述计算的基础上,再对在出光腔面制备金属单孔的模式输出进行计算.考虑到对能量最大的边模 LP11 模的抑止作用,因此把孔的边缘与 LP11

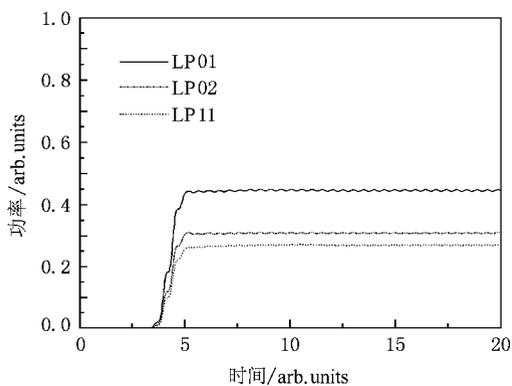


图3 单孔的模式输出计算结果

模式的峰值能量位置对齐,使得 LP11 模式的能量得到衰减.LP02 模式,由于其最大峰值能量位置都比 LP11 的能量峰值位置远离孔径中心,所以在满足上述条件时,也可以对此边模起到一定的抑制作用.通过对每种模式光透过单孔以后的波形进行模拟,得到在距离出光口 500 nm 位置处的光斑和在注入电流为 10 mA 时的能流分布.分别对 LP01, LP02, LP11 三种模式的每种能流测算,然后利用软件将三个能流分布加权拟合.得到如图4的计算结果.图5

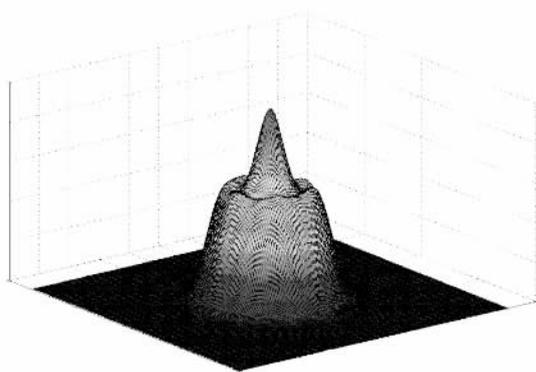


图4 单孔模拟计算的能流分布

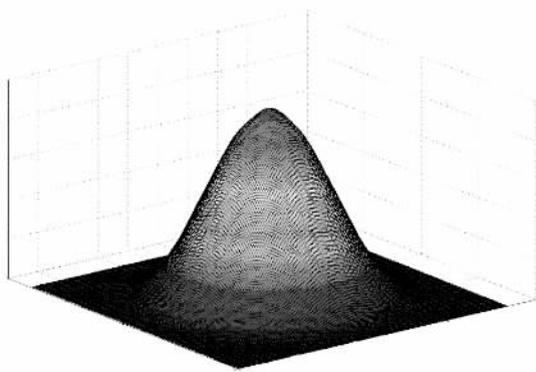


图5 理想单孔基模光斑能流分布

是理想单模垂直腔面发射激光器的能流计算得到的分布图,可以看出单孔的表面限制与理想单孔的光束束斑的差别.

3. 孔阵结构获得单模输出的模拟

为进一步提高功率密度并改善光束束斑质量,我们模拟加入周期孔阵结构来调制、改善光斑.所采用的周期性结构如图 6 所示,中间为直径 4 μm 的缺陷孔径,周围采用周期性孔阵结构.对不同厚度和材料的金属表面结构的透射增强作用,在前期的工作中已经做了部分研究工作^[61],这里对不同孔阵周期和不同孔径大小的出光功率和模式改变情况进行了模拟计算,计算结果如图 7 和图 8 所示.通过计算可以看出周期 250 nm,孔径在 100—140 nm 时 LP01 和 LP11 出光模式差别最大,模式改善相对其他情况要好.孔径 100 nm 时,可以看到周期大于 250 nm 时会出现较大的模式改善.根据计算的结果我们采用孔阵为周期 250 nm,孔径 100 nm 的圆形周期孔阵作为

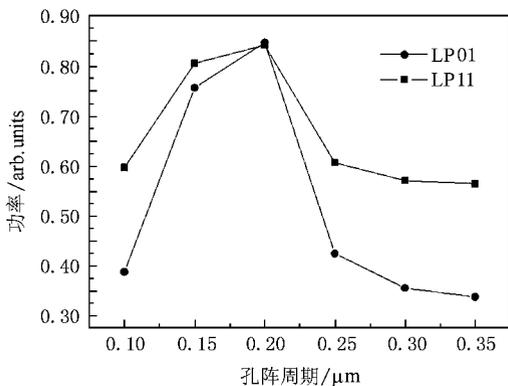


图 8 孔径 100 nm 时改变周期的出光情况

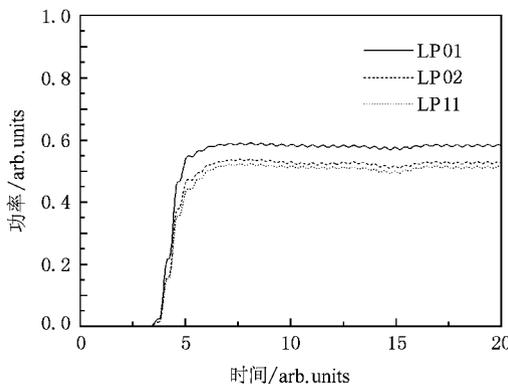


图 9 周期孔阵结构模式输出计算结果

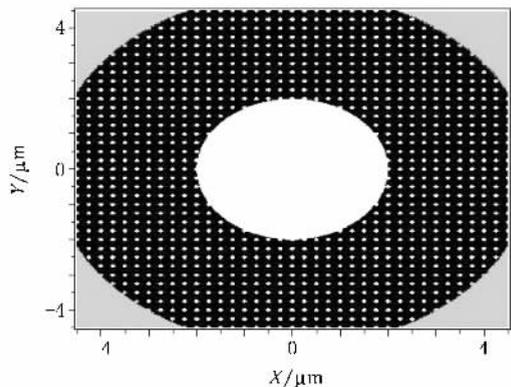


图 6 具有周期孔阵的结构模型

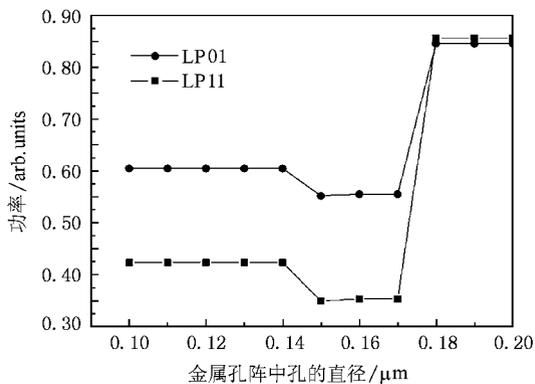


图 7 周期 250 nm 时改变孔径大小的出光情况

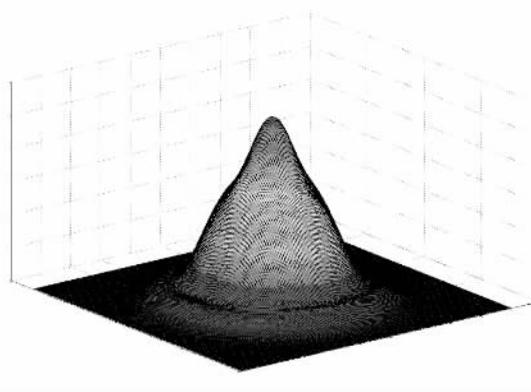


图 10 周期孔阵结构模拟计算的能流分布

优化条件对器件的参数进行模拟,照明光波为包含三个模式的垂直腔面发射激光器的出射电磁波,入射光场沿着 z 方向穿过金属薄膜后的电场强度作为监测评价量.模拟实验采用时域有限差分算法(FDTD)进行.计算得到的在 10 mA 注入电流下的光斑能流分布如图 9 所示.图中各灰度实线给出了各模式光的输出强度计算结果,从图 9 中可以看出:

LP01, LP11 等的输出强度都有显著的增强. 然后将三种模式的能流分布加权拟合. 得到图 10. 对比图 3 和图 9, 图 4, 图 5 和图 10 的结果可以看出.

1) 添加孔阵以后, 可以增大出光功率. 三个模式的能流均有提升. 初步计算表明, 总体功率可以提升 50% 左右.

2) 添加孔阵以后, 能够改善能流分布, 使光斑的能量分布和 LP01 模式相近. 不会出现单孔情况下出现的 LP11 模式能量过高, 导致光斑中能流分布不均匀的情况.

3) 光斑相对于没加孔阵的情况有所扩大, 但是相对于整个等效光纤出光面还是有所减小.

4) 添加孔阵后相对而言高阶模式增强更大, 因此模式抑制比有所减小.

4. 结 论

通过对 980 nm 的 VCSEL 激光器近场出射光斑模拟的对比分析, 证明了表面等离子体共振可以改善面发射激光器的出光强度, 并且改善出光束斑. 通过表面等离子体对共振电子近场光子调控可以实现光波矢量的操控从而实现光能量、波矢量、光束质量的调制和操控实现纳米结构下对光子选择、传输、储存等功能.

- [1] Martinsson H, Vukusić J A, Larsson A 2000 *IEEE Photonic Tech. Lett.* **12** 1129
- [2] Fischer A J, Chow W W, Serkland D K, Memman A A, Geib K M, Choquette K D 2001 *Conf. Lasers and Electro-Optics (CLEO)* p106
- [3] Jung C, Jäger R, Grabherr M, Schnitzer P, Michalzik R, Weigl B, Müller S, Ebeling K J 1997 *Electron. Lett.* **33** 1790

- [4] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W 2003 *Nature* **424** 824
- [5] Ronald Hadley G 1995 *Opt. Lett.* **20** 1483
- [6] Gan Q Q 2006 (M. S. Thesis) (Beijing: Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) 甘巧强 2006 (硕士学位论文) (北京: 中国科学院半导体研究所)

Single mode vertical-cavity surface emitting laser with surface plasmon nanostructure^{*}

Song Guo-Feng[†] Zhang Yu Guo Bao-Shan Wang Wei-Min

(Laboratory of Nano-Optoelectronics, Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(Received 12 December 2008; revised manuscript received 19 February 2009)

Abstract

The vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) has proved to be a low cost light source with attractive properties such as surface emission, circular and low divergence output beam, and simple integration in two-dimensional array. Many new applications such as in spectroscopy, optical storage, short distance fiber optic interconnects, and in longer distance communication, are continuously arising. Many of these applications require stable and single-mode high output power. Several methods that affect the transverse guiding and/or introduce mode selective loss or gain have been developed. In this study, a method for improving the single mode output power by using metal surface plasmons nanostructure is proposed. Theoretical calculation shows that the output power is improved about 50% compared to the result of standard VCSELs.

Keywords: surface plasmons, vertical-cavity surface-emitting laser, mode selection

PACC: 7865

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60677045).

† E-mail: sgf@semi.ac.cn