

微机械可调谐垂直腔面发射激光器 调谐范围分析与设计*

王红航 郭 霞 渠红伟 董立闯 沈光地

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 光电子技术实验室, 北京 100022)

摘要: 介绍了可调谐激光器的意义和它的基本调谐方法及调谐原理. 对影响微机械可调谐垂直腔面发射激光器调谐范围的因素做了重点分析, 计算了空气隙的最大变化范围和由此引起的激光波长的调谐范围.

关键词: 可调谐; 垂直腔面发射激光器; 调谐范围

PACC: 4225G; 4255P EEACC: 4320J; 2575D

中图分类号: TN248 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2005)S0-0180-04

1 引言

随着网络的飞速发展, 网络用户急剧上升, 网络拥挤日益严重, 网络的传输容量和传输速度受到了极大的挑战. 为此, 人们采用时分复用和波分复用技术来解决问题. 对光电子器件来说, 时分复用技术已经应用了很长时间, 但对于波分复用, 因为种种原因, 到 90 年代初期才开始受到关注. 波分复用技术的要求, 导致了可调谐激光器的提出.

2 调谐原理及讨论

对于普通激光器, 要想实现激光的出射, 需要满足一定的条件. 其中相位条件是光子在激光腔中往返程的相移差是 2π 的整数倍, 即 $\frac{4\pi nl}{\lambda} = 2m\pi$, 得到

$$nl = m \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

其中 n 为有源区材料的折射率; l 为有效腔长; m 为整数; λ 为激光波长. 从(1)式可以看出, 要想调谐激光器的出射波长, 可以改变折射率 n , 也可以改变激光器谐振腔的物理长度 l . 前期工作主要集中在通过改变折射率 n 来调谐谐振波长. 这种办法得到的波长变化率在 1% 左右, 主要是折射率变化受半

导体材料的限制. 当采用更加复杂的结构时, 可以得到更大范围的调谐波长, 但是制作复杂, 很难有效控制, 并且调谐不连续, 容易跳模, 不适于大规模生产. 因此很多研究人员开始探索调谐谐振腔的物理波长, 初始通过渐变的层厚来调谐被证明是可行的, 但是调谐范围很窄, 所以又将空气隙的概念引入了激光器的整个制作过程中. 通过空气隙的厚度变化使得激光器的有效腔长变化, 从而使激光器的激光波长发生变化, 达到调谐激光器输出波长的目的.

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 是一种新型的半导体激光器, 它与常规的侧向出光的边发射激光器在结构上有着很大的不同: 边发射激光器的出射光平行于芯片表面, VCSEL 的出射光垂直于芯片表面, 因为这一特性, 使得它易于实现二维平面阵列; VCSEL 极短的光腔长度导致其纵模间距大 ($\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nl}$), 容易实现单纵模工作, 这样的特性使得波长调谐可以在一个较大的范围内连续进行; VCSEL 腔体积小使其自发辐射因子较普通边发射激光器高几个数量级, 能实现极低阈值激励或无阈值激励, 从而大大降低器件功耗和热能耗; VCSEL 工艺与平面硅工艺完全兼容, 便于与电子器件实现光电子集成. 这些优点都有利于 VCSEL 低成本、大规模的现代化工业生产, 也使得以 VCSEL 为基础的可调谐波

* 国家自然科学基金 (批准号: 60276033, 69889601), 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2002AA312070) 及国家重点基础研究发展规划 (批准号: G20000683-02) 资助项目

长激光器得以迅速发展。

典型的 VCSEL 由上、中、下三部分构成, 仅约几十纳米厚的量子阱发光区夹在上下布拉格反射镜 (DBR) 之间, 有源区的发射光在上、下反射镜之间往返多次得到放大, 最后相干性极高的激光从顶部或底部激光射出。图 1 所示为悬臂式可调谐 VCSEL 结构示意图^[2]。该结构包括三个部分: 多对半导体材料组成的底部 n 型 DBR、中间光腔部分, 包括有源区及最上面的可动顶镜部分。可动顶镜又包括 p 型 DBR、空气隙和 n 型 DBR。激光器的激光依靠在底部 n 型 DBR 和 p 型 DBR 之间加电压; 而激光器的波长调谐则是依靠在 p 型 DBR 和顶部 n 型 DBR 之间的反向偏压, 该反向偏压使得 n 型 DBR 向衬底方向偏移, 空气隙的长度变短, 从而改变激光器的有效腔长, 调谐激光器的激光波长。

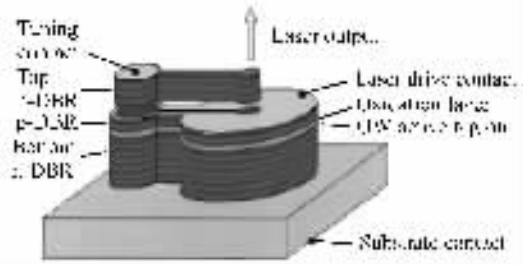


图 1 悬臂式可调谐 VCSEL 结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of cantilever tunable VCSEL

3 调谐范围因素分析

微机械波长可调谐 VCSEL 的连续调谐范围至少受下面三个因素控制^[2]: (1) 两个 FP 模之间的距离; (2) 顶 DBR 的最大偏移量; (3) DBR 的反射带宽和有源区的增益带宽。

对于 VCSEL 而言, 因为其极短的光腔长度, 使得纵模间距大, 这样的特性使得调谐在一个较大的范围内可以连续进行, 所以我们暂且假定 VCSEL 的波长调谐是在两个 FP 腔之间进行的。

为此, 首先计算了顶 DBR 的偏移量。由静电理论, 如果平行平板面积为 A , 距离为 d , 所加电压为 V 时, 两极板间的静电力是

$$F_1 = \frac{\epsilon_0 AV^2}{2(L_d/\epsilon_d + d)^2} \quad (2)$$

其中 ϵ_0 为真空介电常数; L_d 和 ϵ_d 分别为构成悬臂顶镜材料的物理厚度和相对介电常数。

在该悬臂梁的移动中, 如果忽略悬臂梁自身的

重力作用, 悬臂梁受到两个力的作用: 加在悬臂梁和 p 型 DBR 之间的静电力和悬臂梁自身的恢复力, 该恢复力是由悬臂在生长过程中的本征应力引起的。对于悬臂梁, 我们采用下面的模型^[3]: 悬臂梁顶镜的中心区域为刚性的, 而悬臂是细而具弹性的, 且整个悬臂处于张应力状态。如果在小位移的情况下, 可以将悬臂的张应力近似看作弹性恢复力, 其弹性系数为 $K = \frac{at\sigma}{l}$, 其中 l, a, t 分别为悬臂的长度、宽度和厚度, σ 是悬臂梁的应力。这样悬臂的弹性恢复为:

$$F_2 = K(d_{in} - d) \quad (3)$$

其中 d_{in} 为空气隙的初始厚度。

图 2 是悬臂梁所受弹性恢复力(虚线)和静电力(实线)与位移的关系曲线, 其中表示静电力的三条曲线由 V_1 到 V_3 电压依次升高。从图中可以看出, 当电压较低为 V_1 时, 两个力有两个交点, 表示悬臂梁在该电压时有两个平衡状态, 但是很明显, 只有较小位移的平衡状态是稳定的, 因为如果达到后一个平衡状态, 则静电力总是高于恢复力, 使得悬臂倒塌, 悬臂的调谐作用失效; 当电压较高为 V_3 时, 两个力没有交点, 悬臂的静电力总是大于弹性恢复力, 使得悬臂没有一个平衡的状态, 悬臂处于失效状态; 当电压为 V_2 时, 两个力仅有一个交点, 此时整个悬臂处于一种临界状态, 该状态对应的位移近似为原始空气隙厚度的 $1/3$, 为悬臂所能达到的最大位移。

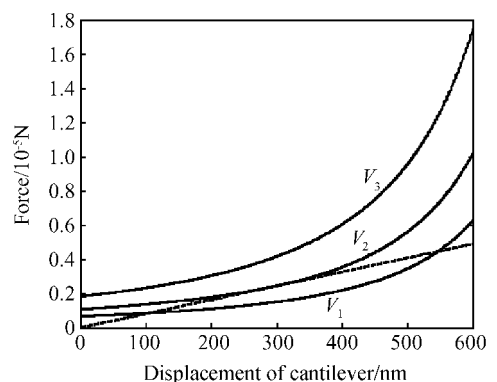


图 2 悬臂梁在三种不同电压下的弹性恢复力(虚线)和静电力(实线)与位移的关系

Fig. 2 Elastic restoring force (dash line) and electrostatic force (solid curves) for three different applied biases as a function of membrane displacement

其次, 计算了空气隙厚度变化时激光波长的改变。当空气隙厚度为 $1/4$ 波长奇数倍附近数值的时候, 顶镜、空气隙、空气/半导体腔接触面形成一个可

调谐相移的分布顶镜. 根据 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{r_{\Phi}\Delta d}{L_{\text{eff}}}$ [4], 其中 $\Delta\lambda$ 是波长调谐的范围, λ 是激光波长, Δd 是空气隙的变化范围, r_{Φ} 是相位耦合因子, L_{eff} 是激光器的等效腔长, 考虑了光波场透射入镜子的部分. 可以看出, 当 r_{Φ} 越大时, $\Delta\lambda$ 越大. 当空气隙厚度为 $1/4$ 波长奇数倍时, r_{Φ} 最大, 此时形成相长干涉, 镜子反射率最高, 阈值电流最低, 输出功率最大. 考虑到调谐范围, 将空气隙的厚度设定波长的 $3/4$, 又由于顶镜自身的重力作用会使其向衬底方向偏移, 将空气隙的厚度设计得略大于 $3/4$ 波长. 图 3 是空气隙厚度分别为 810, 735 和 660nm 时悬臂式可调谐 VCSEL 的反射谱.

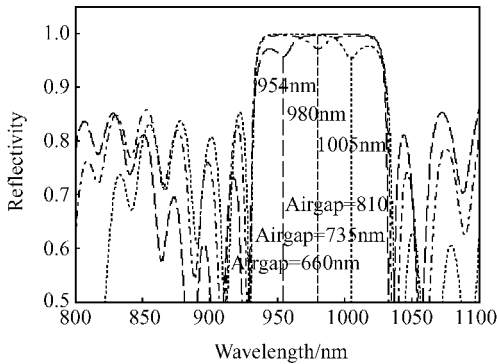


图 3 空气隙厚度分别为 810, 735 和 660nm 时悬臂式可调谐 VCSEL 的反射谱

Fig. 3 Reflectivity spectrum of the cantilever tunable VCSEL when the thickness of air gap is 810, 735, and 660nm, respectively

从图中可以看出, 当空气隙厚度在 810 ~ 660nm 范围变化时, 激光波长在 1005 ~ 954nm 范围内变化. 如果我们假定增益谱的波长范围与该调谐范围相一致, 则理论上的调谐范围为 51nm, 调谐效率为 $\Delta\lambda/\Delta d = 0.34$. 当增益谱宽度有一定范围时, 各个激光波长处的输出功率应该基本稳定, 即没有大的起伏, 其中心波长为 980nm.

设计激光器结构时另外一个需要注意的问题是 p 型 DBR 的反射率. 根据文献 [2] 可知, 可变腔长部分距有源区越近, 得到的调谐范围就会越大. 这要

求 p 型 DBR 不能太厚, 也就是 p 型 DBR 的反射率一般很低; 如果 p 型 DBR 反射率很低的话, 则整个可移动顶镜部分的反射率就会很低, 使得激光器的阈值电流很高, 输出功率降低, 损害了激光器的性能. 但是如果将 p 型 DBR 的反射率设计很高, 则因为可调腔长部分距有源区太远, 使调谐范围下降. 为使两者达到折中, 采取如下办法: 做 p 型 DBR 的时候, 调整其生长顺序使空气和半导体腔之间的耦合系数加大, 这样使得器件调谐范围变宽, 但同时应该看到顶镜反射率将降低稍许, 激光器的阈值电流将增加. 所以器件的整体性能与其调谐范围在同时达到最优时存在矛盾, 要求我们合理解决.

4 结论

根据可调谐激光器的调谐原理, 我们首先从理论上计算了可调波长的范围, 对可能影响调谐范围的因素进行了一一剖析, 为实际微机械可调谐垂直腔面发射激光器的结构设计和制作工艺打下了基础.

致谢 感谢北京工业大学光电子实验室的邹德恕、杜金玉、韩金茹、王冬凤等老师, MEMS 组同学及实验技术人员在研究中的大力支持.

参考文献

- [1] Du Baoxun. The theory of the semiconductor lasers. Beijing: Publishing Company of Weapon Industry, 2001: 193 (in Chinese) [杜宝勋. 半导体激光器原理. 北京: 兵器工业出版社, 2001: 193]
- [2] Chang-Hasnain C J. Tunable VCSEL. IEEE J Sel Topics Quantum Electron, 2000, 6(6): 978
- [3] Larson M C. Microelectromechanical wavelength-tunable vertical-cavity light-emitters and lasers. PhD Thesis, Stanford University, 1996
- [4] Sugihwo F, Larson M C, Harris J S Jr. Micromachined widely tunable vertical cavity laser diodes. Journal of Microelectromechanical Systems, 1998, 7(1): 48

Analysis and Design About Tuning Range of Micro-Electromechanical Tunable Vertical Cavity Surface Emitting Lasers *

Wang Honghang, Guo Xia, Qu Hongwei, Dong Limin, and Shen Guangdi

*(School of Electronic Information & Control Engineering, Beijing University of Technology,
Beijing Optoelectronic Technology Laboratory, Beijing 100022, China)*

Abstract: The significance of the tunable lasers, the basic tunable method and theory are introduced and described. The factors which affect the tunable range of micro-electromechanical tunable vertical cavity surface emitting lasers are analyzed in details. The maximum range of air gap and the corresponding tunable range of wavelength are simulated.

Key words: tunable; VCSEL; tunable range

PACC: 4225G; 4255P **EEACC:** 4320J; 2575D

Article ID: 0253-4177(2005)S0-0180-04

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 60276033, 69889601), the National High Technology Research and Development Program of China (No. 2002AA312070), and the State Key Development Program for Basic Research of China (No. G20000683-02)