

垂直腔面发射激光器中顶层相位 对模式特性的影响*

黄永箴

(中国科学院半导体研究所, 集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100083)

摘 要 研究了垂直腔面发射激光器中不同的顶层厚度对激光器模式特性的影响。结果表明空气界面反射与分布布拉格反射器(DBR)的反射率反相时, 将导致阈值增益增加几倍, 而且模式光场强度在出射端面有反常的增强, 但对光场进入分布布拉格反射器的等效厚度影响不大。精确腐蚀顶层厚度可代替调节分布布拉格反射器周期数, 以改善器件特性。

关键词 半导体激光器, 垂直腔面发射激光器, 分布布拉格反射器。

1 引 言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有阈值电流低、动态单纵模工作、可以形成二维面阵、易于得到圆对称出射光束、光纤耦合效率高等优点, 是中、短距离光通信的理想光源, 在光互联及光并行处理中具有广泛的应用前景^[1]。自从 1988 年首次实现垂直腔面发射激光器室温连续工作以来^[2], 垂直腔面发射激光器在波长覆盖范围、阈值电流、多波长列阵、以及功率转换效率等方面都取得了很大的进步。适于较长距离光纤通信的 1.3 μm 垂直腔面发射激光器的室温阈值电流已经降到 1 mA^[3]。本文作者也参与了垂直腔面发射激光器的研制工作, 并实现了 GaAs 和 InGaAs 垂直腔面发射激光器的室温连续激光^[4, 5], 采用 AlAs 氧化层限制的 InGaAs 垂直腔面发射激光器的阈值电流已降到 100 μA 量级。最近, 文献[6]从分布布拉格反射器(DBR)和垂直腔面发射激光器的反射谱特性出发, 研究了分布布拉格反射器的结构和顶层相位匹配对微腔效应的影响。为了进一步探讨相位匹配对垂直腔面发射激光器模式特性的影响, 本文将从阈值增益、光限制因子、以及光场强度分布等方面着重研究垂直腔面发射激光器的模式特性。

2 理论模型

采用 z 方向的一维多层波导结构模拟垂直腔面发射激光器中的光场分布, 可以把在波导中传播的波函数写成 $\Psi(z, t) = \mathcal{Q}(z) \exp(-i\omega t)$, 并取在第 j 层中的电场强度 $\mathcal{Q}(z)$ 为

$$\mathcal{Q}(z) = A_j \exp(iK_j z) + B_j \exp(-iK_j z), \quad (1)$$

* 国家自然科学基金(69688002)和半导体光子集成基础研究基金的(69896260)资助项目。

其中第 j 层 ($j = 1, 2, \dots, m$) 的复传播常数 K_j 与复折射率 n_j 的关系为

$$K_j = k_0 n_j = k_0 (n_{jr} + i\kappa_j), \quad (2)$$

$k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空波失, n_{jr} 为实折射率, 消光系数 κ_j 与增益系数 g_j 的关系为 $\kappa_j = -g_j/2k_0$ 。 A_j 和 B_j 为沿 $+z$ 和 $-z$ 方向传播的光场振幅。在外层只有朝外传播的光场, 因此 $A_1 = 0$ 和 $B_m = 0$ 。设第 j 层与 $j-1$ 和 $j+1$ 层的界面为 z_{j-1} 和 z_j , 且 $z_j > z_{j-1}$, 而且在 j 层中传播的光入射到界面 z_{j-1} 和 z_j 感受到的反射系数为 $R_{j,1}$ 和 $R_{j,m}$, 从光场在这两个界面的反射可以得到

$$A_j \exp(iK_j z_{j-1}) = R_{j,1} B_j \exp(-iK_j z_{j-1}), \quad (3)$$

$$B_j \exp(-iK_j z_j) = R_{j,m} A_j \exp(iK_j z_j). \quad (4)$$

由(3)和(4)式相乘可以得到下述本征方程:

$$R_{j,1} R_{j,m} \exp(2iK_j d_j) = 1, \quad (5)$$

其中 $d_j = z_j - z_{j-1}$ 为第 j 层的厚度。反射系数 $R_{j,1}$ 包括 z_{j-1} 界面, $j-1, j-2, \dots, 1$ 层的作用, $R_{j,m}$ 包括 z_j 界面, $j+1, j+2, \dots, m$ 层的作用。采用 s 偏振模式的边界条件 $\mathcal{Q}(z)$ 和 $d\mathcal{Q}(z)/dz$ 在界面连续^[7], 得到 z_{j-1} 界面的边界条件为

$$\begin{aligned} A_{j-1} \exp(iK_{j-1} z_{j-1}) + B_{j-1} \exp(-iK_{j-1} z_{j-1}) = \\ A_j \exp(iK_j z_{j-1}) + B_j \exp(-iK_j z_{j-1}), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} K_{j-1} [A_{j-1} \exp(iK_{j-1} z_{j-1}) - B_{j-1} \exp(-iK_{j-1} z_{j-1})] = \\ K_j [A_j \exp(iK_j z_{j-1}) - B_j \exp(-iK_j z_{j-1})]. \end{aligned} \quad (7)$$

由(7)式除以(6)式可以导出下述递推关系:

$$R_{j,1} = \frac{R_{j,j-1} + R_{j-1,1} \exp(2iK_{j-1} d_{j-1})}{1 + R_{j,j-1} R_{j-1,1} \exp(2iK_{j-1} d_{j-1})}, \quad (8)$$

其中反射系数 $R_{j-1,1}$ 和 $R_{j,1}$ 都满足(3)式, 而 z_{j-1} 界面的反射系数为

$$R_{j,j-1} = \frac{K_j - K_{j-1}}{K_j + K_{j-1}}. \quad (9)$$

对 $R_{j,m}$ 也可以得到类似的递推关系。由复本征方程(5)式、反射系数(8)式和(9)式, 可以求出不同垂直腔面发射激光器波导结构中的模式波长和所需的阈值增益, 或者在各层复折射率和厚度确定的条件下求出模式波长和模式寿命。同样形式的方程也曾用于讨论量子阱中的子能级和垂直腔面发射激光器的横模选择^[8, 9]。

经过数值结果的比较, 得出面发射激光器的光限制因子应为^[7]

$$\Gamma = \int_{\text{active}} n_r(z) |\mathcal{Q}(z)|^2 dz / \int_{\text{VCSEL}} n_r(z) |\mathcal{Q}(z)|^2 dz. \quad (10)$$

$n_r(z)$ 为随位置变化的实折射率分布, 积分号下的 active 和 VCSEL 表示积分域分别为有源区和整个垂直腔面发射激光器。人们一般直接由光场强度积分来计算光限制因子, 即去掉上式中的 $n_r(z)$ 。根据阈值增益 g_{th} 随吸收系数 α 的变化, 从阈值条件 $\Gamma g_{\text{th}} + (1 - \Gamma)\alpha = \alpha_m$, 可以得出另一种定义的光限制因子

$$\Gamma = \Delta\alpha / (\Delta\alpha - \Delta g_{\text{th}}), \quad (11)$$

其中 α_m 为镜面损耗, 而 Δg_{th} 为各层都有吸收系数变化 $\Delta\alpha$ 时对应的阈值增益变化。分别由(10)式与(11)式定义的垂直腔面发射激光器的光限制因子所得的数值结果符合很好, 而与直接由光场强度积分得到的光限制因子[即去掉(10)式积分函数中的 $n_r(z)$] 差别较大^[7]。

3 数值结果及讨论

本文采用包维尔(Powell)最优化方法^[10]求解本征值方程(5),即以模式波长及有源区增益为变量寻找 $|R_{j-1}R_{j,m}\exp(2iK_jd_j) - 1|^2$ 的零点。所考虑的垂直腔面发射激光器为在GaAs衬底上依次生长24.5周期 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ 四分之一波长($\lambda/4$)n型分布布拉格反射器、光学厚度为980 nm的对称谐振腔、和上部 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ $\lambda/4$ p型分布布拉格反射器。谐振腔由131.9 nm $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 、10 nm GaAs 垒层以及8 nm的InGaAs量子阱组成中心为单量子阱有源区的对称结构。 InGaAs 、 GaAs 、 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 、和 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 的折射率分别取为3.6、3.5、3.34、和2.93,各层的吸收系数为 5 cm^{-1} 。

图1(a)和图1(b)分别为阈值增益和归一化的输出光强 $|B_i|^2$ 随顶层GaAs厚度的变化,实线、虚线和点线分别是p型分布布拉格反射器周期数为20、18、和16的垂直腔面发射激光器的结果。当顶层为0时,p型分布布拉格反射器实际为19.5、17.5、和15.5周期的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$,即顶层为 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$,这时从空气界面的反射与p型分布布拉格反射器的反射系数反相,因此阈值增益最高。具有20周期p型分布布拉格反射器的垂直腔面发射激光器,当它的顶层为18 nm GaAs时,其阈值增益与具有 $\lambda/4$ GaAs顶层的16周期p型分布布

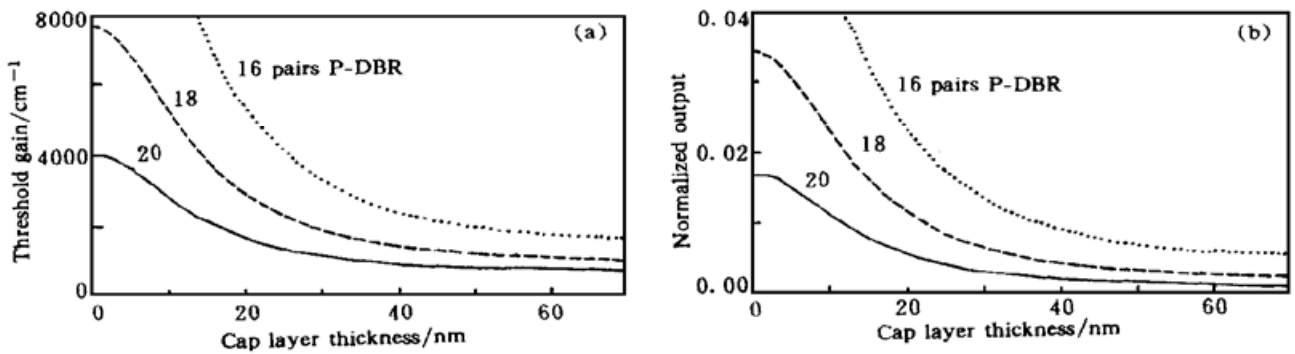


Fig. 1 (a) Threshold gain and (b) normalized output intensity versus the thickness of the cap layer. The solid, dashed, and dotted lines are the results for VCSELs with 20, 18, and 16 pairs p-DBR, respectively

拉格反射器的垂直腔面发射激光器结果基本一致,由此可见顶层相位非常重要。图1(b)的归一化输出光强 $|B_i|^2$,其归一化仅仅是对垂直腔面发射激光器的波导结构而不是整个无限空间,因为光强在自由空间并不衰减。当顶层厚度接近于零时,光从紧挨顶层的AlGaAs层到

顶层的总反射(包括空气界面反射)接近于从空气的直接反射,因此在这个界面反射相位近似为零,另外光在 $\lambda/4$ AlGaAs层中来回传播相位变化为 π ,而光从这一AlGaAs层到p型分布布拉格反射器其它各层的反射相位也为 π ,因光在紧挨顶层的AlGaAs层中有相干增强的效应,这导致模式光强在输出窗口反常增强。图2所示为光限制因子 Γ 随顶层厚度的变化,实线、虚线和点线也分别代表具有20、18、和16周期p型分布布拉格反射器的垂直腔面发射激光

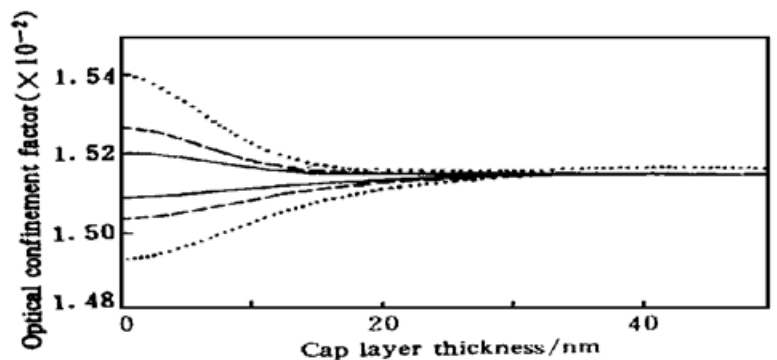


Fig. 2 Optical confinement factor is plotted as a function of the thickness of the cap layer. The solid, dashed, and dotted lines are results for VCSELs with 20, 18, and 16 pairs p-DBR. The upper and lower branches are obtained from equation (11) and (10), respectively

器。当顶层厚度较小时, Γ 分为两支, 数值较大的是由(11)式得出的, 而数值较小的是积分公式(10)式的结果, 当顶层增大时, 两者趋于一致。当顶层厚度为 0, 而且 p 型分布布拉格反射器周期数为 16 时, 两式差别最大, 但也小于 4%。从图 2 还可以看出, 光限制因子随顶层厚度变化很小。考虑到光限制因子与垂直腔面发射激光器的等效腔长成反比^[7], 而垂直腔面发射激光器的等效腔长又为两个分布布拉格反射器的等效厚度和激光器谐振腔长之和, 因此图 2 也表明光场进入 p 型分布布拉格反射器的等效厚度随顶层厚度的变化很小。

图 3 为计算得到的具有 20 周期 p 型分布布拉格反射器的垂直腔面发射激光器中的光场强度分布, 实线和虚线分别是顶层厚度为 70 nm GaAs 和顶层厚度为零的情况。图 3(a) 为中心光场分布, 两种情况的光场分布基本重叠, 不能区分开, 这也表明光场进入 p 型分布布拉格反射器的等效长度变化不大。图 3(b) 则为接近输出端面的光强分布。顶层厚度为零的垂直腔面发射激光器, 由于空气界面的反射系数与 p 型分布布拉格反射器的反相, 导致光场强度在输出端面反常增强, 其归一化的输出光强比顶层厚度为 70 nm GaAs 的垂直腔面发射激光器增加一个量级左右, 而阈值增益增加约 4 倍。改变 p 型分布布拉格反射器的周期数可以改变输出光功率和阈值电流, 实现最大的输出光功率^[11]。上述结果表明, 精确控制顶层 GaAs 的腐蚀深度, 也能实现腐蚀多层分布布拉格反射器所得到的结果。

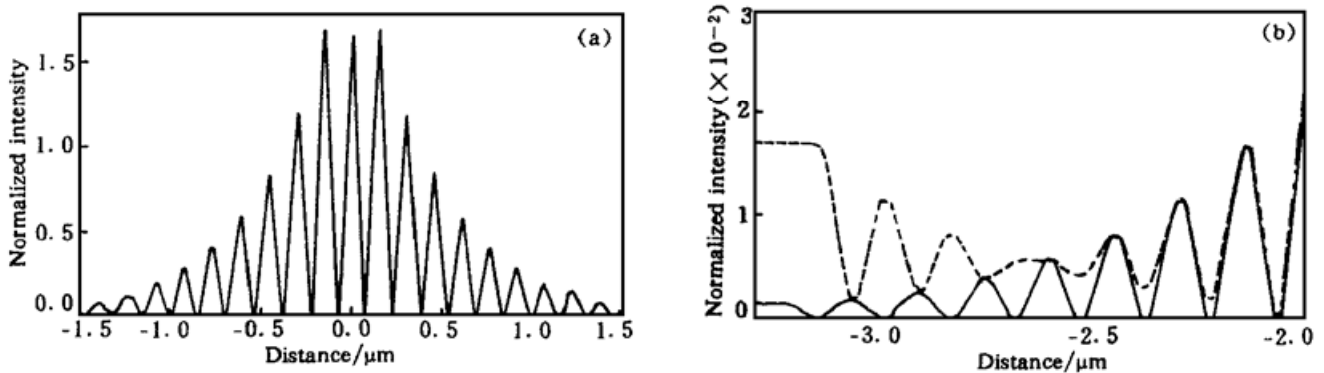


Fig. 3 Normalized mode field intensity distribution for a VCSEL with 20 pairs p-DBR. The solid and dashed lines are results as the thickness of the cap layer is 70 nm and zero, respectively. The flat distribution at the left of (b) is the intensity at the air, i. e., the output intensity

结 论 深入探讨了顶层反射相位对垂直腔面发射激光器模式特性的影响, 得出空气界面的反射相位将极大地影响器件的阈值增益, 但对光场进入分布布拉格反射器的等效长度影响不大。当空气界面的反射与分布布拉格反射器的反射系数反相时, 阈值增益可能增加几倍, 而且光强分布在出射面会有反常的增加, 利用这一现象可以达到调节输出光功率的目的。

参 考 文 献

- [1] Giboney K S, Aronson L B, Lemoff B E. The ideal light source for datanets. *IEEE Spectrum*, 1998, **35**(2): 43~ 53
- [2] Koyama F, Kinoshita S, Iga K. Room-temperature continuous wave lasing characteristics of a GaAs vertical cavity surface-emitting laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **55**(3): 221~ 222
- [3] Qian Y, Zhu Z H, Lo Y H *et al.*. Long wavelength (1.3 μm) vertical-cavity surface-emitting lasers with a wafer-bonded mirror and an oxygen-implanted confinement. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(1): 25 ~ 27

- [4] 林世鸣, 吴荣汉, 黄永箴等. 低阈值电流的 GaAs/GaAlAs 垂直腔面发射激光器. 高技术通讯, 1994, 4(10): 11~13
- [5] 吴荣汉, 周增圻, 林耀望等. 亚毫安室温连续工作 InGaAs 垂直腔面发射激光器. 高技术通讯, 1995, 5(9): 24~26
- [6] 郭长志, 陈水莲. 分布反射面发射垂直微腔半导体激光器的微腔效应. 物理学报, 1997, 46(9): 1731~1743
- [7] Huang Y Z, Pan Z, Wu R H. Analysis of the optical confinement factor in semiconductor lasers. *J. Appl. Phys.*, 1996, 79(8): 3827~3830
- [8] Huang Y Z, Wang C M. Resonant tunneling, eigenvalue and energy band calculation for potential and periodical potential structures. *Appl. Phys. (A)*, 1992, 54(2): 191~195
- [9] Huang Y Z. Effect of reflectivity at the interface of oxide layer on transverse mode control in oxide confined vertical-cavity surface-emitting lasers. *J. Appl. Phys.*, 1998, 83(7): 3769~3772
- [10] 刘德贵, 费景高, 于泳江等编. FORTRAN 算法汇编, 第二分册, 北京: 国防工业出版社, 1983. 334~341
- [11] Yang G M, MacDougal M H, Pudikov V *et al.*. Influence of mirror reflectivity on laser performance of very-low-threshold vertical-cavity surface-emitting lasers. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, 7(11): 1228~1230

Influence of Reflection Phase of Air Interface on Mode Characteristics of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers

Huang Yongzhen

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

(Received 2 July 1998; revised 29 December 1998)

Abstract The mode characteristics for vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSEL) with different cap layer thickness are numerically analyzed. The results show that the threshold gain can increase several times for VCSEL with unmatched cap layer, which results from an anti-phase reflectivity from the air-interface. The mode field intensity distribution inversely increases near the air interface as the reflectivity of the air interface is anti-phase with that of distributed Bragg reflector. A precision etching of the cap layer can be used for improving the laser performance.

Key words semiconductor lasers, vertical-cavity surface-emitting lasers, distributed Bragg reflector.