

高速调制响应垂直腔面发射激光器中的微腔效应*

赵红东¹⁾ 康志龙¹⁾ 王胜利¹⁾ 陈国鹰¹⁾ 张以谟²⁾

¹⁾ 河北工业大学信息工程学院, 天津 300130)

²⁾ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

(2002 年 4 月 13 日收到, 2002 年 5 月 21 日收到修改稿)

应用微腔物理和量子阱物理, 计算了量子阱垂直腔面发射激光器的自发发射谱和自发发射寿命, 通过对半导体激光器传输函数的研究, 发现缩短自发发射寿命是垂直腔面发射激光器实现高速调制响应的主要原因.

关键词: 垂直腔面发射激光器, 自发发射寿命, 高速调制响应, 微腔效应

PACC: 4255P, 1220, 0365

1. 引 言

量子阱(QW)垂直腔面发射激光器(VCSELs)在研制成功后, 很多学者利用单偶极子辐射元近似模型, 计算了激子、原子在微腔中的自发发射相对值, 并希望通过垂直腔面发射激光器中提高自发发射因子实现“无阈值”激光器^[1]. 然而实验上观察垂直腔面发射激光器自发发射因子远远小于单偶极子辐射元理论的结果, 并且利用分别氧化实现低阈值垂直腔激光器只是器件的尺寸效应^[2], 人们开始怀疑垂直腔面发射激光器中的腔量子电动力学行为的实用性. 我们在以前的文章中已经探讨了垂直腔面发射激光器中的自发发射, 给出了其绝对数值^[3], 本文根据自发发射谱计算了垂直腔面发射激光器的自发发射寿命, 并提出缩短载流子自发发射寿命是垂直腔面发射激光器实现高速调制响应的主要原因. 本文计算结果与文献中实验测量垂直腔面发射激光器自发发射寿命以及高速响应一致, 从而表明垂直腔面发射激光器中微腔行为的重要意义.

2. 量子阱垂直腔面发射激光器的自发发射谱和自发发射寿命

本文研究的垂直腔面发射激光器模型为高、低折射率材料交替变换构成多层 DBR, 量子阱有源区

夹在上、下 DBR 的中间区域, 量子阱和空间层的厚度为 L_c ^[3,4].

根据辐射场的量子理论, 激发的电子和场看成一个系统, 由费米-黄金规则给出单个电子和空穴的复合率. 由于半导体中的电子处于公有化运动状态, 电子按照费米统计占据其可以容纳电子的态. 考虑到经过 DBR 镜面反射后腔内真空场的分布, 结合量子阱中电子和空穴填充情况, 则量子阱垂直腔面发射激光器的 TE 模自发发射为^[3]

$$R_{sp}^{\infty}(E) = A \int_0^{\pi} d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi C_i(\theta, \varphi, E) f_c(E) \times [1 - f_v(E)] \rho_{red}(E) F_m, \quad (1)$$

其中 F_m 为量子阱跃迁矩阵元中各向异性因子, $f_c(E)$ 和 $f_v(E)$ 分别表示导带、价带电子费米函数, $\rho_{red}(E)$ 表示量子阱中载流子的台阶状态密度, C_i 为 DBR 面发射微腔中场的各向异性因子, 常数 A 为

$$A = \frac{q^2 n E}{8\pi^2 \hbar^2 \epsilon_0 m_0^2 c_0^3} |M_{ij}|^2. \quad (2)$$

各向异性因子 C_i 为

$$C_i(E, \theta, \varphi) = \frac{\epsilon_{xx}(\mathbf{k}_{x,y})}{\epsilon_j} (\cos^2 \theta \cos^2 \varphi \sin^2 \theta + \sin^2 \varphi \sin^2 \theta). \quad (3)$$

这里 θ 和 φ 表示空间角.

由于半导体量子阱带内载流子之间、载流子和声子之间的色散, 破坏了原来严格的 k 选择, 则自发发射谱写成^[4]

* 河北省自然科学基金(批准号 602074)、河北省教育厅科研计划(批准号 2000229)和河北省教育厅博士基金资助的课题.

$$R_{sp}(E) = \int_{E_g}^{\infty} R_{sp}^{\infty}(E) \frac{\frac{1}{\pi} \left(\frac{\hbar}{\tau_{in}} \right)}{(\epsilon_k - E)^2 + \left(\frac{\hbar}{\tau_{in}} \right)^2} d\epsilon_k \quad (4)$$

式中 τ_{in} 为带内弛豫时间。

图 1 模拟了半导体体材料、量子阱、垂直腔面发射激光器各个方向总的自发发射谱。其中温度 $T = 300\text{K}$ ，半导体体材料为 $i\text{-GaAs}$ ，量子阱为 $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ ，阱宽 d_w 为 5nm ，注入载流子密度为 $3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ，垂直腔面发射激光器的反射镜由 20 对 DBR 组成。

量子阱的限制作用减弱了载流子的自由运动，使电子的公有化程度变弱，相同数量载流子在量子阱填充的费米能级高于半导体体材料，同时量子阱的存在破坏了晶体的各向同性，这样引起 TE 模自发发射跃迁增强；另一方面，由于 20 对 DBR 的反射率因波长不同而变化，其在一定频率范围内接近全反射，于是垂直腔面发射激光器中真空场存在各向异性，它能够使窄频率内电子和空穴复合向某一方向辐射的光子增多，因此在量子阱和 DBR 微腔的共同作用下，量子阱垂直腔面发射激光器总的自发发射谱强度约相当于自由空间下半导体材料的 10 倍（图 1）。

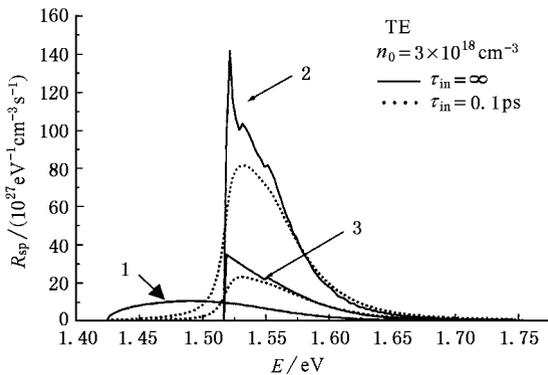


图 1 半导体体材料、量子阱、量子阱垂直腔面发射激光器总的自发发射谱。曲线 1 为半导体材料在自由空间，2 为量子阱垂直腔面发射激光器，3 为量子阱在自由空间。

半导体激光器注入载流子的寿命 τ_{sp} 是速率方程中重要的参量，它标志着注入载流子 n_0 的总体平均效应，其定义为

$$\frac{n_0}{\tau_{sp}} = \int_0^{\infty} R_{sp}(E) \lambda dE. \quad (5)$$

由图 2 可以看出，量子阱垂直腔面发射激光器自发发射寿命依赖于腔长，缩短腔长可以减小自发

发射寿命，这是垂直腔面发射激光器中微腔效应的突出表现。在腔长接近半个辐射中心波长时自发发射寿命减小到 0.5ns ，相比“无腔”量子阱自发发射寿命至少减小到 $1/4$ 。同时由 (5) 式可以看出，半导体注入载流子的寿命与所有载流子自发发射强度之和成反比，它与文献 [1] 中单个偶极子寿命相对于自由空间的值不同，两者存在物理意义和数值上的差异，因此避开复杂量子阱特性而研究量子阱垂直腔面发射激光器中自发发射只能得到近似的“相对值”。

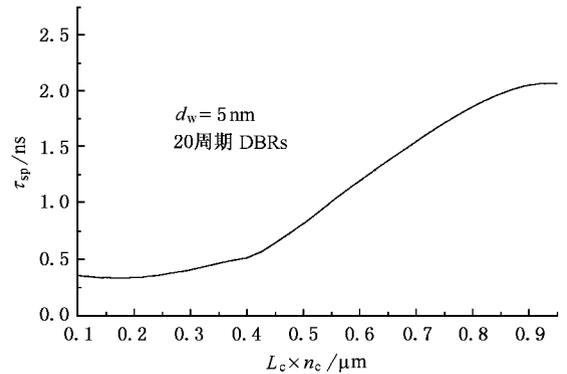


图 2 量子阱垂直腔面发射激光器自发发射寿命随空间层厚度的变化。

3. 频率空间分析垂直腔面发射激光器高频特性

通过半导体激光器的载流子和光子的速率方程^[5]，可以得到频率空间 ω 激光器的频率传输函数 $H(\omega)$ 为

$$H(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 R_s^2}}, \quad (6)$$

其中

$$\omega_0^2 = \left(\frac{1}{\tau_{sp}} + \frac{1}{\tau_{nr}} \right) \frac{1}{\tau_{ph}} - \Gamma g' (n_0 - n_e) \left(\frac{1 - \beta}{\tau_{sp}} + \frac{1}{\tau_{nr}} \right) + \frac{g' P_0}{V \tau_{ph}}, \quad (7)$$

$$R_s = \left(\frac{1}{\tau_{ph}} + \frac{1}{\tau_{sp}} + \frac{1}{\tau_{nr}} \right) - \Gamma g' (n_0 - n_e) + \frac{g' P_0}{V}. \quad (8)$$

这里 g' 、 τ_{ph} 、 n_e 、 p_0 、 β 、 τ_{nr} 、 V 分别表示为激光器的增益系数、光子寿命、透明载流子浓度、稳态光子密度、自发发射因子、载流子非辐射复合寿命和有源区的体积。

根据 (6) 式可以得到 $H(\omega)$ 的极大值对应的共振频率

$$\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{R_s^2}{2}}, \quad (9)$$

并且 3dB 带宽为

$$\omega_3 = \sqrt{\frac{(2\omega_0^2 - R_s^2) + \sqrt{(2\omega_0^2 - R_s^2)^2 + 12\omega_0^4}}{2}}. \quad (10)$$

(6)式描述了小信号调制垂直腔面发射激光器时,激光器输出衰减振荡光波特性的.利用(6)~(10)式分析各个参量的变化对垂直腔面发射激光器中性能的影响,当调制频率接近 3dB 带宽时,器件的响应下降一半.实际中经常选择这个频率表征器件能够稳定工作范围.当调制频率接近张弛频率时,调制信号和共振信号以同频率变化,在输出光中很难辨别出调制信号和张弛振荡信号,于是达到器件响应的最高调制极限.

为了更直观地观察垂直腔面发射激光器中各个参量对激光器高频调制特性的影响,我们选择有源区的体积 $V = 10^{-12} \text{ cm}^3$, 偏置电流 $I_0 = 0.4386 \text{ mA}$, 光子寿命 $\tau_{ph} = 2.5 \text{ ps}$, 并且载流子非辐射复合寿命 τ_{nr} 远远小于辐射寿命.图 3 给出不同自发发射寿命下垂直腔面发射激光器的频率传输函数,图 4 给出共振频率和 3dB 带宽随自发发射寿命的变化.可以看出缩短注入载流子的自发发射寿命,也就是减小了载流子在激光器中弛豫时间,共振频率和 3dB 带宽得到了提高.激光器中光子寿命在 10^{-12} s 量级,而注入载流子自发发射寿命在 10^{-9} s 量级,注入载流子寿命将成为半导体激光器能否实现 10GHz 调制中的一个关键因素.通常的半导体边发射激光器载流子自发发射寿命为 2ns,已经远远大于 10GHz 调制周期,即使在受激发射和自发发射共同作用下,边发射激光器输出光也很难实现 10GHz 调制.自发发射产生的光子是激光器振荡的根源,初始载流子自发发射寿命的减小,经过受激放大后光子会很快地随着调制信号变化.量子阱垂直腔面发射激光器通过微腔效应,自发发射寿命降低到 0.5ns.减小的自发发射寿命的载流子经过受激放大消耗后,缩短了光子与载流子的延迟时间,因此垂直腔面发射激光器能够达到更高的频率响应.

4. 与文献中的实验比较

实验已经对垂直腔面发射激光器中载流子自发发射寿命进行了测量,文献 [6] 测量结果为 0.6ns,已

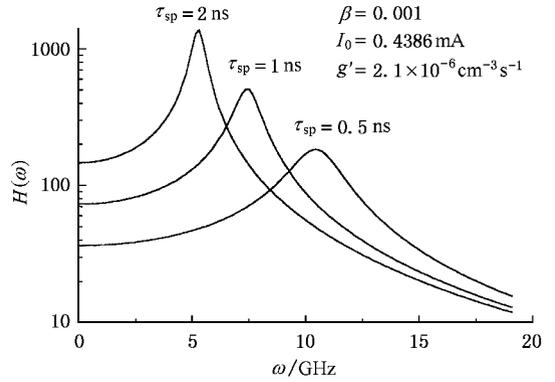


图 3 不同自发发射寿命下垂直腔面发射激光器的频率传输函数

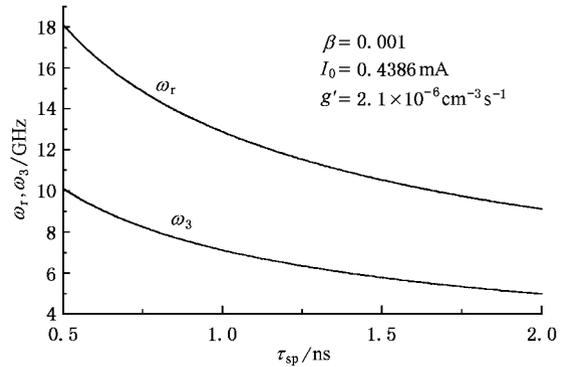


图 4 垂直腔面发射激光器共振频率和 3dB 带宽随自发发射寿命的变化

经很接近我们是模拟结果;另一方面,文献 [7] 中实验证明垂直腔面发射激光器能够实现 10GHz 调制,图 3 与该文献实验测量频率响应曲线相似,从而验证了本文提出垂直腔面发射激光器中自发发射寿命影响半导体激光器高频响应理论的正确性.

5. 总 结

本文考虑 DBR 微腔和量子阱分别对光子和载流子的限制作用,对垂直腔面发射激光器中自发发射寿命给出了定量的计算,并分析了自发发射寿命对垂直腔面发射激光器高频特性的影响,提出在垂直腔面发射激光器中自发发射因子不能达到理想的数量,但是短载流子自发发射寿命实现高速调制响应是微腔效应的突出表现.根据我们的计算结果表明,在垂直腔面发射激光器中通过微腔效应可以使自发发射寿命降低到 0.5ns,调制带宽达到 10GHz,满足高速通信的需要.

- [1] Abram I , Robert I and Kuszelewicz R 1998 *IEEE J. Quantum Electron.* **34** 71
- [2] Oh T H , Huffaker O L and Deppe D G 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 3152
- [3] Zhao H D , Zhang Y M , Zhang C S , *et al* 2000 *Chin. J. Semicond.* **21** 984 [in Chinese] 赵红东、张以谟、张存善等 2000 半导体学报 **21** 984]
- [4] Guo C Z and Chen S L 1997 *Acta. Phys. Sin.* **46** 1731 (in Chinese] 郭长志、陈水莲 1997 物理学报 **46** 1731]
- [5] Björk G and Yamamoto Y 1991 *IEEE J. Quantum Electron.* **27** 2386
- [6] Giudice G E , Kuksenkov D V and Temkin H 1998 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **10** 920
- [7] Satuby Y and Orenstein M 1988 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **10** 760

Micro-cavity effects in the high modulation response of the vertical cavity surface emitting laser^{*}

Zhao Hong-Dong¹⁾ Kang Zhi-Long¹⁾ Wang Sheng-Li¹⁾ Chen Guo-Ying¹⁾ Zhang Yi-Mo²⁾

¹⁾(College of Information Engineering , Hebei University of Technology , Tianjin 300130 ,China)

²⁾(College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering , Tianjin University , Tianjin 300072 ,China)

(Received 13 April 2002 ; revised manuscript received 21 May 2002)

Abstract

Based on physics of micro - cavity and quantum well , the spontaneous emission spectra and spontaneous emission lifetime in the vertical cavity surface emitting laser have been calculated. It is found that the minimum spontaneous emission lifetime is the main reason that the vertical cavity surface emitting laser can realize high-modulation response after the transfer function of the semiconductor laser is studied.

Keywords : vertical cavity surface emitting laser , spontaneous emission lifetime , high modulation response , microcavity effect

PACC : 4255P , 1220 , 0365

* Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province ,China(Grant No 602074)and the Scientific Research Foundation of Education Department of Hebei Province ,China(Grant No 2000229) and the Doctorate Foundation of Education Department of Hebei Province ,China.