第 21 卷第 10 期　　半　导　体　学　报　　Vol. 21, No. 10
2000 年 10 月　　CHINESE JOURNAL OF SEMICONDUCTORS　　Oct., 2000

量子阱 DBR 微腔激光器中自发发射的控制*

赵红东[1,2]　张以谟[2]　张存善[1]　周　革[2]　沈光地[3]

(1 河北工业大学 电气信息学院, 天津　300130)
(2 天津大学 精密仪器与光电子工程学院 教育部光电子信息工程实验室, 天津　300072)
(3 北京工业大学 电子工程学系 北京市光电子技术实验室, 北京　100022)

概要: 应用腔量子电动力学和量子阱物理, 计算了量子阱 DBR 微腔激光器的自发发射谱. 发现由于 DBR 微腔和量子阱分别对光子和载流子的限制, 单方向的自发发射可以增进约三个量级, 总的自发发射增强一个量级.

关键词: 量子阱微腔激光器; 自发发射; DBR
PACC: 4255P; 1220; 0365
中图分类号: TN248.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 0253-4177(2000)10-0984-04

Control of Spontaneous Emission in Quantum Well Micro-Cavity Lasers with Distributed Bragg Reflectors*

ZHAO Hong-dong[1,2], ZHANG Yi-mo[2], ZHANG Cun-shan[1], ZHOU Ge[2] and SHEN Guang-di[3]

(1 *College of Electricity Information, Hebei University of Technology, Tianjin* 300130, *China*)
(2 *Information Engineering Laboratory of The Ministry of Education, College of Precision Instrument & Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin* 300072, *China*)
(3 *Department of Electronic Engineering, Beijing Polytechnic University and Beijing Optoelectronics Technology Laboratory, Beijing* 100022, *China*)

Received 1 October 1999, revised manuscript received 2 April 2000

Abstract: Based on cavity quantum electrodynamics and physics of quantum well, the spontaneous emission spectra in quantum well micro-cavity lasers with DBRs have been calculated. As a result, spontaneous

* 北京市自然科学基金(No. 4972006), 河北省博士基金, 河北省教育厅科研计划和河北工业大学科研计划资助项目
[Project Supported by Beijing Natural Science Foundation No: 4972006, by Hebei Province Doctor Foundation, by Scientific Rescarch Plan of Education Department of Hebei Provence Under Grant No. 2000229 and by Scientific Research Plan of Hebei University of Technology].

赵红东　男, 1968 年出生, 博士后, 副教授, 现从事半导体量子理论、微腔激光器及光互连的研究[ZHAO Hong-dong, male, post doctor, associate professor, was born in 1968. His current research interests are in semiconductor quantum theory, micro-cavity laser and optical inter connection].

1999-10-01 收到, 2000-04-02 定稿

emission intensity in one direction can be enhanced to about 10^3 times greater than that in the semiconductor bulk material due to the confinement of the micro-cavity with DBRs and quantum well to the photons and carries, respectively. The total spontaneous emission intensity also increases 10 times.

Key words: quantum-well micro-cavity laser; spontaneous emission; DBR
PACC: 4255P; 1220; 0365
Article ID: 0253-4177(2000)10-0984-05

1　引言

垂直腔面发射激光器(VCSELs)被研制成功后,人们在近年更重视腔控制自发发射的微腔效应[1—7],很多学者以腔长在光波波长量级的垂直腔激光器作为微腔的一种典型结构,探讨增进激光器自发发射的途径.为了简化研究半导体微腔激光器的自发发射,很多学者常常突出腔的限制作用,而忽略了半导体中载流子的填充情况,这就是现在经常被采用的单偶极子辐射元近似模型[2,3,6].单偶极子模型只能给出激子、原子在微腔中的自发发射相对值,但实际中人们更希望知道半导体量子阱微腔中的自发发射绝对数量的大小,更重要的是,室温下半导体微腔中多个载流子的自发发射与单偶极子近似存在一定的差异.我们在以前的文章中已经探讨了金属平面微腔激光器控制注入载流子的自发发射,给出了其绝对数值[5],本文用 DBR 腔面取代金属平面的腔面,讨论了量子阱 DBR 微腔激光器的自发发射,深入研究微腔行为.

2　模型和理论机制

本文研究的微腔模型是腔长为半个波长的 DBR 垂直腔面发射激光器. DBR 是由高、低折射率材料交替变换构成,量子阱有源区夹在上、下 DBR 的中间区域(图 1 所示),其中 $\bar{n}$、$\bar{n}_1$ 和 $\bar{n}_2$、$\bar{n}_c$、$\bar{n}_0$ 分别表示有源区、一对 DBR、腔和底层的折射率,L_1、L_2 表示 DBR 高、低折射率区的厚度.

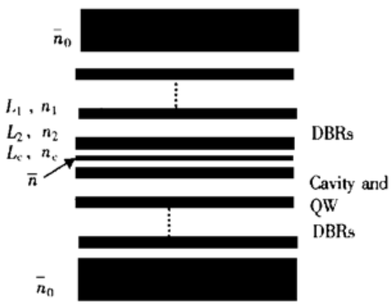

图 1　量子阱 DBR 微腔激光器的结构

FIG. 1　Structure of Quantum Well DBR Laser with Microcavity

光在折射率分别为 $\bar{n}_0$、$\bar{n}_1$、$\bar{n}_2$ 的三层介质中的有效反射率为:

$$r_{1\mathrm{eff}} = \frac{r_{21} + r_{10}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\delta_1}}{1 + r_{21}r_{10}\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\delta_1}} \tag{1}$$

$$\delta_1 = \frac{4\pi}{\lambda}\bar{n}_1 L_1 \cos i_1 \tag{2}$$

式中 r_{21}、r_{10} 分别表示折射率为 $\bar{n}_1$、$\bar{n}_2$ 和 $\bar{n}_0$、$\bar{n}_1$ 材料之间的反射率;i_1 为入射角.由等效反射率公式依次类推可得到整个 DBR 膜系的有效反射率.考虑到光场经过 DBR 镜面反射后腔内水平方向真空场强度为:

$$\epsilon^2_{f(x,y)} = |A_+ + A_-|^2\epsilon^2_f \tag{3}$$

这里

$$A_+\epsilon_f = \frac{\sqrt{T}\exp(\mathrm{i}\phi/2)}{1 - r^2_{\mathrm{eff}}\exp(\mathrm{i}2\phi)}\epsilon_f \tag{4a}$$

$$A_-\epsilon_f = \frac{\sqrt{T}\,r_{\mathrm{eff}}\exp\left[\mathrm{i}\frac{3}{2}\phi\right]}{1 - r^2_{\mathrm{eff}}\exp(\mathrm{i}2\phi)}\epsilon_f \tag{4b}$$

$$\phi = \frac{2\pi L_c}{\lambda_c}\cos\theta \tag{4c}$$

式中　$r_{\rm eff}$ 为 DBR 镜面场反射系数; T 为光的透射系数; λ_c 是真空场在腔中的波长; L_c 是微腔两平面镜之间距离; θ 表示真空场与竖直方向夹角; ϵ_f 为自由真空场的振幅. 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[2,3]. 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, 参考金属平板量子阱微腔的在出射光方向 $\Delta\theta$ 角度内的自发发射[5], 用 DBR 光强有效反射率取代平板微腔激光器腔面的反射率, 可以得到 DBR 微腔中真空场的分布, 结合量子阱中电子和空穴填充情况, 则 DBR 量子阱微腔激光器的自发发射为:

$$R_{\rm sp}^{\infty}(E) = A\int_0^{\Delta\theta}{\rm d}\theta\int_0^{2\pi}{\rm d}\varphi C_i(\theta,\varphi,E)f_{\rm c}(E)[1-f_{\rm v}(E)]\rho_{\rm red}(E)F_{\rm m} \tag{5}$$

式中　$F_{\rm m}$ 为量子阱跃迁矩阵元中各向异性因子; $f_{\rm c}(E)$ 和 $f_{\rm v}(E)$ 分别表示导带、价带电子费米函数; $\rho_{\rm red}(E)$ 表示量子阱中载流子的台阶状态密度[8], C_i 为 DBR 微腔中场的各向异性因子; A 为常数[5].

$$A = \frac{q^2\bar{n}E}{8\pi^2\hbar^2\epsilon_0 m_0^2 c_0^3}|M_{ij}|^2 \tag{6}$$

微腔各向异性因子 C_i:

$$C_i(E,\theta,\varphi) = \frac{\epsilon_{f(x,y)}^2}{\epsilon_f^2}(\cos^2\theta\cos^2\varphi\sin\theta + \sin^2\varphi\sin\theta)\ (i = x, y) \tag{7}$$

式中　φ 为真空场与平方向的夹角. 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[8]:

$$R_{\rm sp}(E) = \int_{E_g}^{\infty}R_{\rm sp}^{\infty}(E)\frac{\frac{1}{\pi}\left(\frac{\hbar}{\tau_{\rm in}}\right)}{(\epsilon_k - E)^2 + \left(\frac{\hbar}{\tau_{\rm in}}\right)^2}{\rm d}\epsilon_k \tag{8}$$

其中　$\tau_{\rm in}$ 为带内弛豫时间.

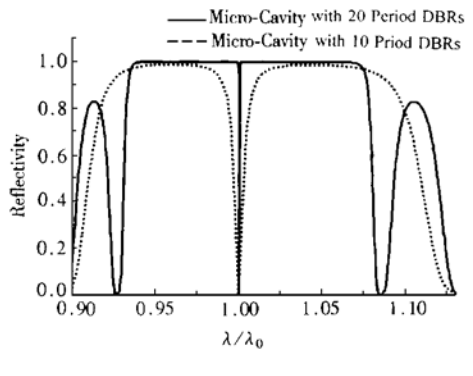

图 2　DBR 微腔激光器的有效反射率

FIG.2　Reflectivity of DBR Laser with Microcavity

3　结果与讨论

3.1　DBR 微腔激光器的反射率

图 2 为有效反射率法计算 DBR 微腔的有效反射率, 其中 $\bar{n}_0 = \bar{n}_1 = 3.59$(GaAs), $\bar{n}_2 = \bar{n}_c = 2.97$(AlAs). 由图可以看出, 在中心波长 λ_0 处的光场经过 DBR 的反射和腔的谐振, 实现光场的输出. 因此在图中存在明显的"凹坑"图样, 这是多层 DBR 微腔激光器腔的固有特性. 随着 DBR 层数的增加, 这个小区域变得更窄, 说明多层 DBR 具有严格的选模作用, 因此多层 DBR 有利于微腔激光器实现窄线宽的光束输出和某一频率范围内真空场的增进.

3.2　量子阱 DBR 微腔激光器的自发发射谱

实验中经常要观测激光器某一方向的自发发射, 并且只有有效地将自发发射控制在出射光方向内才能增进微腔的自发发射因子, 半导体微腔效应也就能充分体现出来, 为此这里模拟半导体体材料、量子阱、微腔激光器沿垂直底片方向 0.5 度内的自发发射谱(图 3)和各个方向总的自发发射谱(图 4). 其中温度 $T = 300$K, 半导体体材料为 i-GaAs, 量子阱为 GaAs/$\rm Al_{0.3}Ga_{0.7}As$, 阱宽为 5nm, 注入载流子密度为 3×10^{18} cm^{-3}; 微腔的反射镜由 20 对 DBR 组成, 腔长为: $L_c\times\bar{n}_c = 0.4047\mu$m. 这里为了便于比较, 图 3 中半导体体材料和量子阱在 0.5 度内的自发发射谱已经扩大了 50 倍, 与量子阱 DBR 微腔激光器单方向的自发发射谱绘制在同一坐标系下. 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 DBR 微腔中真空场的各向异性比金属平面微腔更强, 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, DBR 微腔控制单方向内的自发发射远远优于金属平面半导体微腔, 因此在量子阱和 DBR 微腔的共同作用下, 腔长为半波长的 DBR 微腔量子阱单方向的 TE 模自发发射约相当于半导体体材料的 3 个量级(图 3), 并且总的自发发射谱强度约相当半导体体材料的 10 倍(图 4).

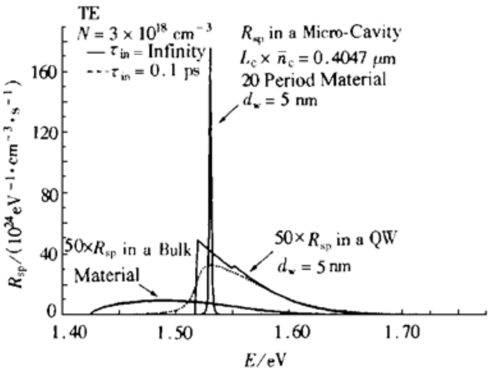

图 3 半导体体材料、量子阱、DBR 量子阱微腔激光器单方向的自发发射谱

FIG. 3 Spontaneous Emission Along Single Direction of QW Microcavity Laser with Distributed Bragy Reflector

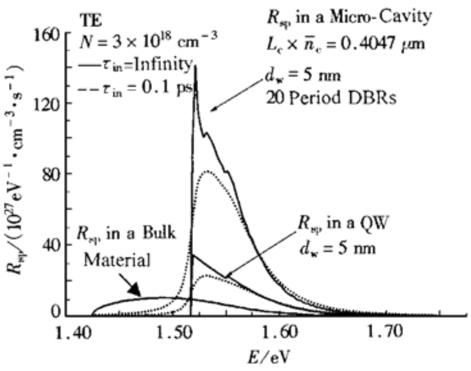

图 4 半导体体材料、量子阱、量子阱 DBR 微腔激光器总的自发发射谱

FIG. 4 Total Spontaneous Emission Spectra of QW Microcavity Laser with DBR

3.3 与文献中的实验比较

实验中经常通过激光照射 DBR 微腔激光器测量其反射谱和自发发射谱, 同样可以通过电流注入的方法测量半导体材料的光致发光谱. 对比文献[6], 发现本文中的图 2、图 3 分别与其实验上测定半导体微腔反射率和自发发射的结果一致, 从而验证了本文计算 DBR 微腔有效反射率和自发发射谱的正确性.

4 结论

研究量子阱 DBR 微腔激光器的自发发射必须同时考虑 DBR 微腔和量子阱分别对光子和载流子的限制作用. 在二者共同作用下, 腔长为半个波长的量子阱 DBR 微腔激光器中的单方向自发发射可以增进约三个量级, 总的自发发射谱增强一个量级.

致谢 真诚地感谢北京大学物理系郭长志教授和中国科学院半导体研究所集成光电子实验室林世鸣研究员的指导和帮助.

参 考 文 献

[1] 郑厚植, 半导体学报, 1997, **18**(7): 481—491[ZHENG Houzhi, Chinese Journal of Semiconductors, 1997: **18**(7): 481—491(in Chinese)].
[2] G. Bj rk, H. Heitmann and Y. Yamamoto, Phys. Rev. A, 1993, **47**(5): 4451—4463.
[3] I. Abram, I. Robert and R. Kuszelewicz, IEEE J. Quantum Electron., 1998, **34**(1): 71—76.
[4] K. Iga, F. Koyama and S. Kinoshita, IEEE J. Quantum Electron., 1988, **24**(9): 1845—1855.
[5] 赵红东, 张存善, 周 革, 等, 半导体学报, 2000, **21**(1): 33—37[ZHAO Hongdong, ZHANG Cunshan, ZHOU Ge *et al.*, Chinese Journal of Semiconductors, 2000, **21**(1): 33—37(in Chinese)].
[6] G. M. Yang, M. H. MacDougal, H. Zhao *et al.*, J. Appl. Phys., 1995, **78**(6): 3605—3609.
[7] 王文利, 姬 扬, 郑厚植, 半导体学报, 1998, **19**(5): 385—388[WANG Wenli, JI Yang and ZHENG Houzhi, Chinese Journal of Semiconductors, 1998, **19**(5): 385—388(in Chinese)].
[8] C. Z. Guo(郭长志), "Semiconductor Quantum Well Lasers", Workshop on Semiconductor Superlattice/Quantum Well Physics and Opto-Electronics Devices, Guang-zhou, China, Jan, 1991.