

# 分布布拉格反射器(DBR)对半导体微腔一些特性的影响\*

刘宝利 王炳燊 徐仲英

(中国科学院半导体研究所 半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 从光学传输矩阵方法出发, 研究了分布布拉格反射器(DBR)生长顺序的不同对半导体平面微腔中电场振幅极大值位置及整个微腔选频特性的影响; 同时指出了 DBR 对于  $\lambda_0/2$  和  $\lambda_0$  腔不同情况的最佳生长模式.

**关键词:** 半导体平面微腔; 光学传输矩阵

**PACC:** 7866; 8140T; 4250

**中图分类号:** TN 248.4      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0253-4177(2001)03-0335-05

## 1 引言

近年来, 量子微腔结构(QMC)的激子极化激元引起人们在理论和实验方面的极大兴趣, 这是因为 QMC 可以在同一个半导体结构中同时控制光子和激子的特性. 这种新的光场与物质的相互作用在具有低阈值的垂直腔面发射激光器(VCSELs)方面具有直接的应用. 1997 年, 郑厚植对半导体微腔物理及其应用进行了详细论述<sup>[1]</sup>.

1992 年 Weisbuch<sup>[2]</sup> 等人通过反射谱的测量, 首次在半导体微腔中观察到拉比分裂现象, 从此以后, 半导体微腔中激子极化激元性质的研究引起人们极大的兴趣. 按照 Zhu<sup>[3]</sup> 的线性介电函数理论, 在半导体微腔中实现拉比分裂, 有两个条件需要满足: 1) 腔两端需要有高反射镜, 形成类似 Fabry-Pérot 腔的选频结构, 这在半导体微腔中可由两个分布布拉格反射器(DBR) 来达到这个要求; 2) 有源区(一般由一个或几个量子阱组成) 位于腔中受限光场的极大值处. 这样, 在生长微腔之前必须要准确定出所设计微腔受限光场的极大值的位置. 另外, 郭长志<sup>[4]</sup> 等人已经对微腔中的有效腔长进行了仔细的讨论. 基于

这种考虑, 本文从传输矩阵方法出发, 计算了 DBR 对微腔中光场极大值位置的影响, 发现 DBR 生长顺序的不同, 会引起微腔中光场极大值位置的变化; 同时对 DBR 不同生长顺序及周期数为整数和半整数时的微腔选频特性进行了讨论.

## 2 理论模型

半导体微腔是由两个 DBR 及 DBR 之间的腔体组成的, 其示意图如图 1 所示.  $M(N)$  为顶层(底层) DBR 的周期数,  $n_1, n_2$  是两种不同半导体材料的折射系数,  $n_1, n_2$  层的光学厚度同为  $\lambda_0/4$ , 腔体由量子阱及腔材料组成, 光学长度为  $\lambda_0/2$  或  $\lambda_0$ (两种典型的腔体长度),  $\lambda_0$  为腔中激子发光在真空中的波长. DBR 及整个微腔的反射率可由光学传输矩阵方法计算, 在正入射的情况下(以下考虑的都为正入射的情况), 具体公式如下<sup>[5]</sup>:

$$M_i = \begin{pmatrix} \cos(k_{0n_i}d_i) & -\frac{i}{n_i} \sin(k_{0n_i}d_i) \\ -i n_i \sin(k_{0n_i}d_i) & \cos(k_{0n_i}d_i) \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中  $M_i, n_i, d_i$  分别为第  $i$  层介质的传输矩阵、折

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 19774045).

刘宝利 男, 1969 年出生, 博士生, 从事半导体光学性质的研究.

徐仲英 男, 1942 年出生, 研究员, 博士生导师, 主要从事半导体光谱研究.

2000-01-05 收到

© 2001 中国电子学会

射系数(实数或复数)、实际生长厚度;  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  是真空电磁波的波矢。

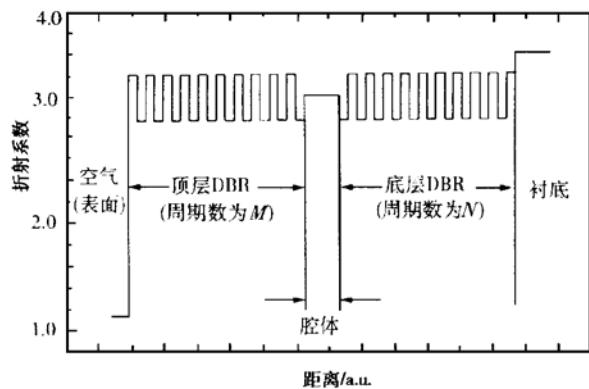


图 1 微腔组成示意图

FIG. 1 Schematic Diagram of Microcavity

### 3 结果与讨论

现在我们考虑空腔的情况, 即腔体由一种材料组成, 而且其禁带宽度远大于我们要考虑的共振光子能量。假设这个空腔腔体的光学厚度为  $\lambda_0/2$  或  $\lambda_0$  ( $\lambda_0$  为共振波长), 材料的折射系数定义为  $n_c$ , 对于波长为  $\lambda_0$  的入射光, 其传输矩阵为:  $\begin{bmatrix} \mp 1 & 0 \\ 0 & \mp 1 \end{bmatrix}$ , 腔长为  $\lambda_0/2(\lambda_0)$  时取负(正)号。

设整个微腔的传输矩阵写为如下形式:

$$M = M_{\text{tDBR}} M_c M_{\text{bDBR}} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中  $M_{\text{tDBR}}$  ( $M_{\text{bDBR}}$ ) 是中心波长为  $\lambda_0$ 、周期数为  $M$  ( $N$ ) 的 DBR 的传输矩阵;  $M_c$  是腔体的传输矩阵。振幅反射率的计算公式为:

$$r = \frac{n_0 M_{11} - n_g M_{22} + n_0 n_g M_{12} - M_{21}}{n_0 M_{11} + n_g M_{22} + n_0 n_g M_{12} + M_{21}} \quad (3)$$

当  $M = N$ 、 $n_0 = n_g = 1$ (微腔两端与空气接触)、入射电磁场的波长为  $\lambda_0$  时, 整个微腔的传输矩阵为:  $\begin{bmatrix} \mp 1 & 0 \\ 0 & \mp 1 \end{bmatrix}$ , 正负号的选择与前面相同。此时, 整个微腔的振幅反射率  $r = 0$ , 此式为微腔发生共振的条件。

下面讨论腔中的电场分布。

(1) DBR 的周期数为整数( $M$  为整数)

在共振条件下, 顶层 DBR 的传输矩阵为:

$$M_{\text{tDBR}} = \begin{bmatrix} (-\frac{n_2}{n_1})^M & 0 \\ 0 & (-\frac{n_1}{n_2})^M \end{bmatrix} \quad (4)$$

设腔中的电场为  $E(z) = a \exp(i k n_c z) + b \exp(-i k n_c z)$ ,  $z$  为微腔生长方向。令  $E_0 = 1$ ,  $E_0$  为入射电场的振幅, 共振条件下, 系数  $a$ 、 $b$  的取值为:

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{2} \left[ (-\frac{n_1}{n_2})^M + \frac{1}{n_c} (-\frac{n_2}{n_1})^M \right] \\ b &= \frac{1}{2} \left[ (-\frac{n_1}{n_2})^M - \frac{1}{n_c} (-\frac{n_2}{n_1})^M \right] \end{aligned} \quad (5)$$

腔中电场极值点的空间分布见表 1。

表 1 腔中电场极值点的空间分布

Table 1 Spacial Distribution of Maximum and Minimum Values of Electric Field in Cavity

空间位置( $nz$ )	0	$\lambda_0/4$	$\lambda_0/2$	$3\lambda_0/4$	$\lambda_0$
振幅大小 (绝对值)	$(\frac{n_1}{n_2})^M$	$\frac{1}{n_c} (\frac{n_2}{n_1})^M$	$(\frac{n_1}{n_2})^M$	$\frac{1}{n_c} (\frac{n_2}{n_1})^M$	$(\frac{n_1}{n_2})^M$
$n_1 > n_2$	极大值	极小值	极大值	极小值	极大值
$n_1 < n_2$	极小值	极大值	极小值	极大值	极小值

$n_1 > n_2$  时和  $n_1 < n_2$  时, 整个微腔电场振幅绝对值的分布如图 2 所示。

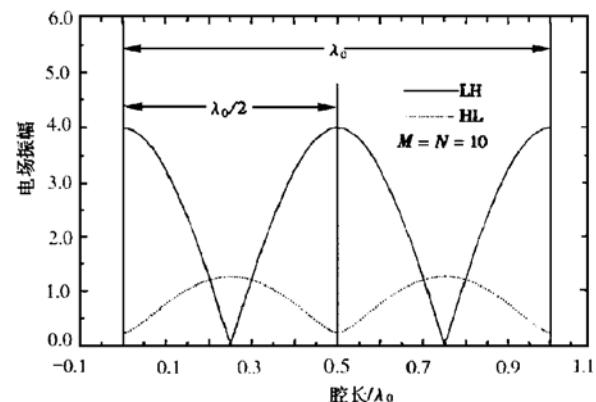


图 2 DBR 的周期数为整数、生长顺序不同时腔中的电场分布 LH (HL) 表示从腔中向外看的 DBR 生长顺序; H (L) 表示高 (低) 折射系数的介质, 以下相同。

FIG. 2 Electric Field Distribution in Cavity with Different Growth Sequences of DBR as Period Number of DBR Being an Integer LH (HL) represents the growth sequence of DBR observed inside the cavity; H (L) represents the medium of high (low) refraction index (all the same in the latter).

(2) DBR 的周期为半整数( $M$  为整数)

在共振条件下, 顶层 DBR 的传输矩阵为:

$$M_{tDBR} = \begin{pmatrix} \left(-\frac{n_2}{n_1}\right)^M & 0 \\ 0 & \left(-\frac{n_1}{n_2}\right)^M \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0 & -i\frac{1}{n_1} \\ -in_1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{i}{n_1}\left(-\frac{n_2}{n_1}\right)^M \\ -in_1\left(-\frac{n_1}{n_2}\right)^M & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

腔中的电场表达式与(1)中的相同. 此时系数  $a, b$  在共振条件下的取值为:

$$\begin{aligned} a &= \frac{i}{2} \left[ \frac{1}{n_1} \left(-\frac{n_2}{n_1}\right)^M + \frac{n_1}{n_c} \left(-\frac{n_1}{n_2}\right)^M \right] \\ b &= \frac{i}{2} \left[ \frac{1}{n_1} \left(-\frac{n_2}{n_1}\right)^M - \frac{n_1}{n_c} \left(-\frac{n_1}{n_2}\right)^M \right] \end{aligned} \quad (7)$$

腔中电场极值点的空间分布见表 2.

表 2 腔中电场极值点的空间分布

Table 2 Spacial Distribution of Maximum and Minimum Values of Electric Field in Cavity

空间位置( $n_c z$ )	0	$\lambda_0/4$	$\lambda_0/2$	$3\lambda_0/4$	$\lambda_0$
振幅大小 (绝对值)	$\frac{1}{n_1} \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^M \frac{n_1}{n_c} \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^M$	$\frac{1}{n_1} \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^M$			
$n_1 > n_2$	极小值	极大值	极小值	极大值	极小值
$n_1 < n_2$	极大值	极小值	极大值	极小值	极大值

$n_1 > n_2$  时和  $n_1 < n_2$  时, 整个微腔电场振幅绝对值的分布如图 3 所示.

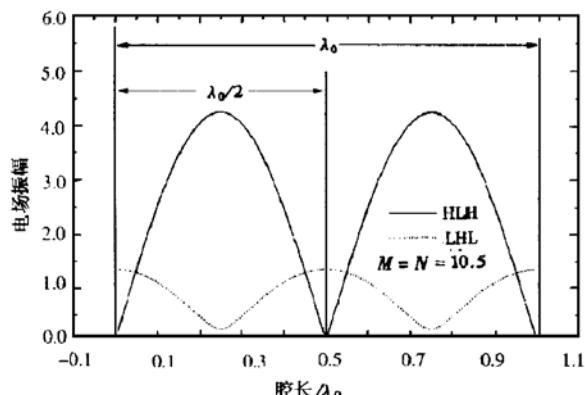


图 3 DBR 的周期数为半整数、生长顺序不同时腔中的电场分布(图 2, 图 3 中, 参数取值为:  $n_h = 3.4, n_L = 2.96, n_c = 3.2, n_0 = 1$ . 以下相同)

FIG. 3 Electric Field Distribution in Cavity with Different Growth Sequences of DBR as Period Number of DBR Being a Half-Integer

仔细分析以上两组讨论, 发现(1)中的  $n_1 > n_2$  和(2)中  $n_1 < n_2$  的情况, 腔中的电场分布是相同的, 即腔中电场极大值的位置分布是相同的, 这是由于从腔中向外看 DBR 的生长顺序, 这两种情况的 DBR 的生长顺序是相同的; 同样(1)中的  $n_1 < n_2$  和(2)中  $n_1 > n_2$  的情况腔中的电场分布相同也是由于

从腔中向外看, DBR 的生长顺序是相同的. 这样, 只有从腔中向外看的 DBR 生长顺序影响腔中电场极值点的空间位置分布, 与 DBR 的周期数为整数或半整数无关, 这个结论与黄永箴<sup>[6]</sup>的数值计算结果相同, 他的结论是当与空气接触的 DBR 再生长一层光学厚度为  $\lambda_0/4$  的 GaAs 时, 腔中光场的分布不变.

另外, 在 DBR 的周期数相同且为整数( $N = M = 10$ )的情况下, 生长顺序为 LH 的腔中电场振幅极大值大于 HL 顺序的腔中电场振幅极大值. 从物理意义上讲, 这是由于生长顺序的不同, DBR 的反射率不同造成的, 对微腔最直接的影响是微腔选频差异很大. 此种情况下, 从腔中向外看, 折射系数低高顺序的微腔选频特性远好于高低顺序的微腔, 从图 4 可以看出, DBR 低高顺序的微腔透射谱的半宽

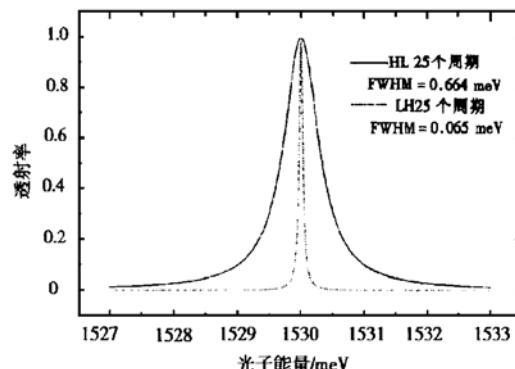


图 4 DBR 周期数为整数、生长顺序不同时, 整个微腔的透射谱

FIG. 4 Transmission Spectra with Different Growth Sequences as Period Number of DBR Being an Integer

小于高低顺序的半宽. 这在实际中是非常有意义的, 即 DBR 选择低高顺序时, 所需要的 DBR 周期数比高低顺序的 DBR 要少, 就可以达到好的选频效果, 减少微腔的生长时间和材料的损耗. 反之, DBR 周期数相同但为半整数( $N = M = 10.5$ )的情况下, 从腔中向外看, 折射系数高低顺序的微腔选频特性远好于低高顺序的微腔, 从图 5 可以看出这两种顺序的 DBR 对微腔选频性的影响, 即 DBR 高低顺序的微腔透射谱的半宽小于低高顺序的半宽. 这在实际中的意义与 DBR 周期数为整数的情况相同.

(图 4 中, HL(LH) 代表从腔中向外看 DBR 的高低(低高)生长顺序, 周期数为整数。图 5 中, LHL(HLH) 代表从腔中向外看 DBR 的低高(高低)生长顺序, 周期数为半整数。以下相同)。

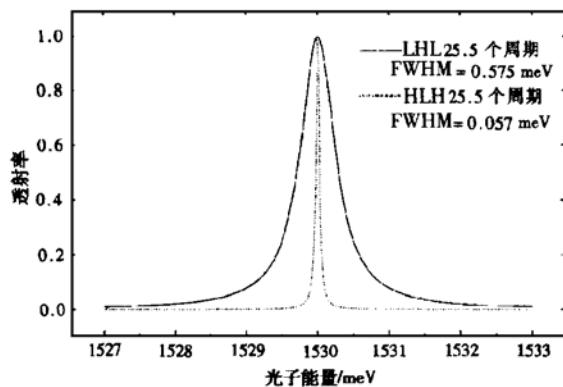


图 5 DBR 周期数为半整数、生长顺序不同时, 整个微腔的透射谱

FIG. 5 Transmission Spectra with Different Growth Sequences as Period Number of DBR Being a Half-Integer.

下面考虑衬底折射系数  $n_g \neq 1$  的实际半导体  $\lambda_0$  微腔的情况。这是实际生长微腔会遇到的情形。微腔结构如图 1 所示, 在入射光真空波长为  $\lambda_0$  的情况下, 整个微腔的传输矩阵可以写成如下形式:

$$M_{\text{Microcavity}} = \begin{bmatrix} (-\frac{n_2}{n_1})^{M-N} & 0 \\ 0 & (-\frac{n_1}{n_2})^{M-N} \end{bmatrix} \quad (8)$$

此时电场振幅的反射系数为:

$$r = \frac{1 - n_g(-\frac{n_1}{n_2})^{2(M-N)}}{1 + n_g(-\frac{n_1}{n_2})^{2(M-N)}} \quad (9)$$

为了达到共振条件  $r = 0$ ,  $1 - n_g(-\frac{n_1}{n_2})^{2(M-N)} = 0$  的条件必须成立, 即前后两个 DBR 的周期数之差满足

$M - N = -\frac{\ln n_g}{2(\ln n_1 - \ln n_2)}$ , 这就是说当  $n_1 > (<) n_2$  时, 与衬底接触的 DBR 的层数要大于(小于)顶层 DBR 的层数, 才能达到  $r = 0$  的条件。1994 年 Houdré 等人<sup>[7]</sup>曾说明他们的样品 DBR 前后的周期数之差为 4, 按照他们给出的参数  $n_1 = 3.482$ ,  $n_2 = 2.96$ ,  $n_g = 3.54$ , 可以得出  $M - N \approx 3.89 \approx 4$ (周期数只能为整数), 由此说明这个公式是成立的, 也是有意义的, 因为反射率为 0 在实验中更容易观测到。这

样, 实际生长的、前后两个 DBR 的周期数满足  $M - N = -\frac{\ln n_g}{2(\ln n_1 - \ln n_2)}$  的微腔可以等效为本文前面所讨论的理想微腔。

腔中电场的分布与上面讨论的方法相同, 在此不再重述。

## 4 结论

本文用传输矩阵方法, 针对典型的  $\lambda_0/2$  和  $\lambda_0$  腔, 深入探讨了 DBR 生长顺序(从腔中向外看, 以下相同)对腔中电场空间分布及整个微腔选频特性的影响, 这种影响具体见表 3。

表 3 微腔选频特性与 DBR 的关系

Table 3 Mode Selection Properties of Photon Field Versus DBR

	周期数	生长顺序	$\lambda_0/2$	$\lambda_0$	整个微腔选频特性
DBR	整数	HL	无极值点	一个极大值	好
		LH	一个极大值	两个极大值	差
	半整数	HLH	一个极大值	两个极大值	好
		LHL	无极值点	一个极大值	差

由表 3 可以看出,  $\lambda_0/2$  腔的最佳生长模式为: DBR 的周期数取半整数, 生长顺序为 HLH;  $\lambda_0$  腔的最佳生长模式有两种: 1) DBR 的周期数取整数, 生长顺序为 HL; 2) DBR 的周期数取半整数, 生长顺序为 HLH, 具体取哪一种生长模式要根据实际需要而定。这些结论对于半导体微腔的生长及设计具有非常重要的指导意义, 因为在实际的半导体微腔生长过程中, 有源区一定要位于微腔中电场振幅的极大值处, 同时腔中应该有带宽很窄的模式(模式频率为  $\omega = 2\pi c/\lambda_0$ ), 这是实现拉比分裂的必要条件。

致谢 本文作者感谢中国科学院半导体研究所黄永箴研究员有益的讨论。

## 参考文献

- [1] Zheng Houzhi, Chinese Journal of Semiconductors, 1997, **18**(7): 481—491 (in Chinese) [郑厚植, 半导体学报, 1997, **18**(7): 481—491].
- [2] C. Weisbuch, M. Nishioka, A. Ishikawa et al., Phys. Rev. Lett., 1992, **69**(23): 3314—3317.
- [3] Yifu Zhu, Daniel J. Gauthier, S. E. Morin et al., Phys. Rev. Lett., 1990, **64**(21): 2499—2502.

- [ 4 ] Guo Changzhi and Chen Shuilian, *Acta Physica Sinica*, 1997, **46**(9): 1731—1743(in Chinese) [ 郭长志、陈水莲, 物理学报, 1997, **46**(9): 1731—1743].
- [ 5 ] M. Born and E. Wolf, *Principle of Optics*, Pergamon, New York, 6th ed., 1980, 90—98.
- [ 6 ] Huang Yongzhen, *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(2): 181—185 (in Chinese) [ 黄永箴, 光学学报, 2000, **20**(2): 181—185].
- [ 7 ] R. Houdré, C. Weisbuch, R. P. Stanley *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**(15): 2043—2046.

## Effects of DBR on Properties of Semiconductor Microcavity\*

LIU Bao-li, WAGN Bing-shen and XU Zhong-ying

(*National Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** Using the transfer-matrix scheme, the effects of DBR's growth sequence have been studied on the properties of semiconductor planar microcavity, in particular on the spatial position of the amplifier maximum of electric field and the mode selection properties of the photon field. The best growing-mode of DBR for  $\lambda_0/2$  and  $\lambda_0$  cavities, is also given.

**Key words:** semiconductor planar microcavity; transfer matrix

**PACC:** 7866; 8140T; 4250

**Article ID:** 0253-4177(2001)03-0335-05

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19774045).

LIU Bao-li male, born in 1969, Ph. D candidate, is engaged in the research on optics characteristics of semiconductors.

XU Zhong-ying male, born in 1942, professor, is engaged in the research on spectrum of semiconductors.