

# 吸收对垂直腔面发射激光器光学特性的影响\*

侯识华<sup>1</sup> 赵鼎<sup>2</sup> 叶晓军<sup>1</sup> 钟源<sup>1</sup> 谭满清<sup>1</sup> 陈良惠<sup>1</sup>

(1 中国科学院半导体研究所,北京 100083)

(2 中国科学院电子学研究所,北京 100080)

**摘要** 采用光学传输矩阵方法,详细分析了反射镜以及键合界面的吸收对垂直腔面发射激光器光学特性的影响. 结果表明,反射镜以及键合界面的吸收对反射镜和垂直腔面发射激光器的反射率和势透射率有较大影响,而对反射镜中心波长处的反射相移以及垂直腔面发射激光器模式的反射相移和模式位置影响很小. 随着反射镜以及键合界面的吸收增大,反射镜中心波长处的反射率逐渐减小,垂直腔面发射激光器的模式反射率变化则是先急剧减小,达到一个极小值,然后再逐渐增大,而反射镜中心波长处以及垂直腔面发射激光器模式处的势透射率则都是迅速降低的. 此外,将有吸收的键合界面离有源区的距离远一些,有利于提高垂直腔面发射激光器模式处的光输出效率.

**关键词** 垂直腔面发射激光器;晶片键合;吸收;反射率;反射相移;势透射率

**中图分类号** TN248.4 **文献标识码** A

## 0 引言

波长为 1.3 ~ 1.6 μm 的垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 在光纤通信系统中具有广阔的应用前景,因此对其的研究受到广泛的注意和重视. 目前制备这种长波长垂直腔面发射激光器有多种技术,其中,晶片键合 (wafer bonding) 技术是最成功的技术之一<sup>[1-4]</sup>. 这种技术采用 InP/GaAs 界面的直接键合,将 GaAs 基高反射率 DBR (distributed Bragg reflector) 与传统的 InP 基有源区熔接在一起,从而能大大改善器件的温度特性,实现长波长垂直腔面发射激光器的室温连续激励. 但是,采用这种技术制作的器件,在键合界面处存在位错等缺陷<sup>[5-8]</sup>,由此可能使界面层产生较大的光吸收. 而且高反射率 DBR 材料也往往有一定的吸收<sup>[8-10]</sup>. 这些吸收因素将可能影响垂直腔面发射激光器的性能. 本文采用光学传输矩阵方法,在考虑反射镜以及键合界面的各种吸收的情况下,对晶片键合结构垂直腔面发射激光器的反射率、反射相移和势透射率等光学特性进行了分析和讨论.

## 1 VCSEL 的结构

图 1 是 VCSEL 的结构示意图<sup>[1-3]</sup>. 其中,上部反射镜由 25.5 对 P 型掺杂的 GaAs/AlGaAs DBR 组成,通过选择氧化其中一层 Al<sub>0.98</sub>Ga<sub>0.02</sub>As 层,实现对注入电流的横向扩展的限制. 下部反射镜由 30 对未掺杂的 GaAs/AlAs DBR 组成. 有源区由 GaInAsP

应变多量子阱和 InP 空间限制层构成,其光学厚度为  $3\lambda_0/2$ ,  $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$ . 通过 GaAs/InP 的晶片键合工艺,使有源区与上、下部反射镜熔接,得到 VCSEL 器件结构.

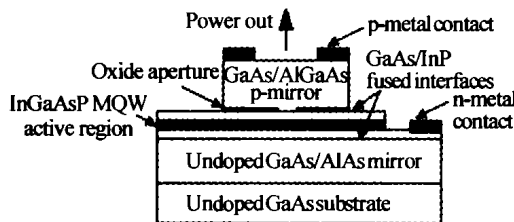


图 1 VCSEL 的结构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of double fused VCSEL

## 2 计算方法

采用光学传输矩阵方法,在光正入射的情况下,可得到膜系的特征矩阵为<sup>[11,12]</sup>

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $\delta_j$  为第  $j$  层膜的位相厚度

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left( n_j + i \frac{\alpha_j \lambda_0}{4\pi} \right) d_j \quad (2)$$

$\eta_j$ 、 $\alpha_j$ 、 $n_j$  和  $d_j$  分别为第  $j$  层膜的光学导纳、吸收系数、折射率和几何厚度. 膜系的反射率  $R$ , 透射率  $T$  和反射相移  $\Phi$  则可分别由下列公式表达

$$R = \left( \frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left( \frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^* \quad (3)$$

$$T = \frac{4\eta_0 \eta_{k+1}}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*} \quad (4)$$

$$\Phi = \arctan \left( \frac{i\eta_0 (CB^* - BC^*)}{(\eta_0^2 BB^* - CC^*)} \right) \quad (5)$$

\* 国家 863 计划资助课题 (编号: 2001AA312180)

Tel: 010-82304408 转 21 Email: shhou@red.semi.ac.cn  
收稿日期: 2003-11-04

式中,  $\eta_0$  和  $\eta_{k+1}$  分别是入射介质和出射介质的光学  
导纳.

### 3 计算结果及讨论

图 2 是假定 30 对 GaAs/AlAs DBR 的各层具有  
均等的吸收系数  $\alpha$ , 对不同的  $\alpha$  值情况分别进行计  
算得到的 DBR 的反射谱、反射相移和势透射率. 其  
中, 势透射率为  $T$  与  $1 - R$  的比值<sup>[12]</sup>. 由图可见, 随

着吸收系数的增大, DBR 的高反射带宽逐渐变窄,  
中心波长处的反射率逐渐减小, 反射相移基本不变,  
势透射率则显著减小并趋近于零. 因此, DBR 材料  
的吸收对 DBR 中心波长处的反射率和势透射率有  
重要影响, 而对反射相移产生的影响很小. 为了有  
利于激光通过 DBR 输出, 应该选择吸收系数小的材  
料来制备 DBR.

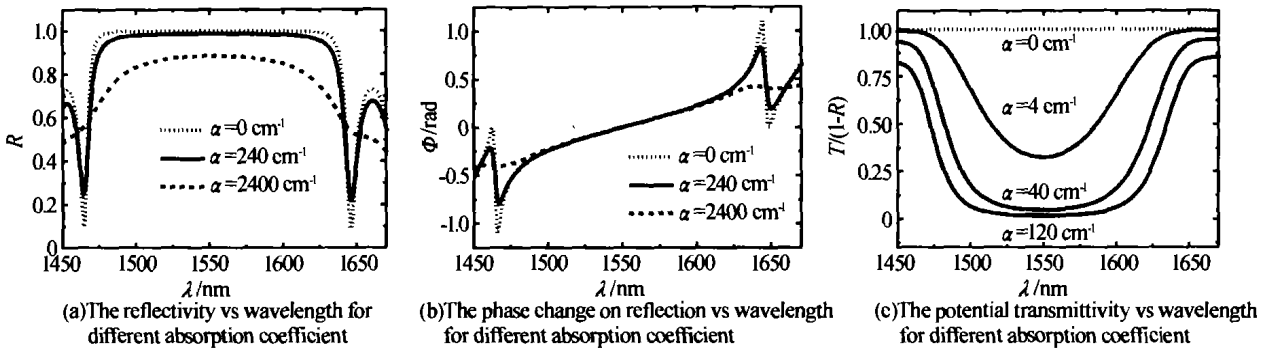


图 2 不同吸收系数下, DBR 的反射谱、反射相移和势透射率

Fig. 2 The reflection spectra, phase change on reflection and potential transmittivity of DBR for different absorption coefficient

图 3 是假定 VCSEL 中的 GaAs/AlAs DBR、  
GaAs/AlGaAs DBR 的各层具有均等的吸收系数  $\alpha$ ,  
对不同的  $\alpha$  值情况分别进行计算得到的 VCSEL 的  
模式反射率和势透射率. 由图可见, 随着吸收系数  
的增大, VCSEL 的模式反射率是先急剧减小, 达到  
一个极小值, 然后逐渐增大, 而模式的势透射率则  
是显著减小并趋近于零. 所以, DBR 材料的吸收对  
VCSEL 模式的反射率和势透射率能产生较大的影  
响. 在设计和应用中为保证较高的光输出效率, 应  
该选择吸收系数小的材料制备 DBR.

图 4 是假定在两个键合界面处的相邻两层光学  
厚度均为  $\lambda_0/4$  的 GaAs 层和 InP 层具有相等的吸  
收系数  $\alpha$ , 而其它部分的吸收为零, 对不同的  $\alpha$  值情  
况分别进行计算得到的 VCSEL 的模式反射率和势透  
射率随键合界面吸收的变化曲线. 由图可见, 随着  
吸收系数的增大, VCSEL 模式的反射率是先急剧减  
小, 达到一个极小值, 然后逐渐增大, 而模式的势透  
射率则是显著减小并趋近于零. 将其与图 3(a) 的  
结果比较, 可知键合界面的吸收对 VCSEL 的模式反  
射率和势透射率影响很大. 因此, 键合界面的良好  
键合质量是非常重要的, 否则, 键合界面处存在的吸  
收损耗将严重降低 VCSEL 的光输出效率.

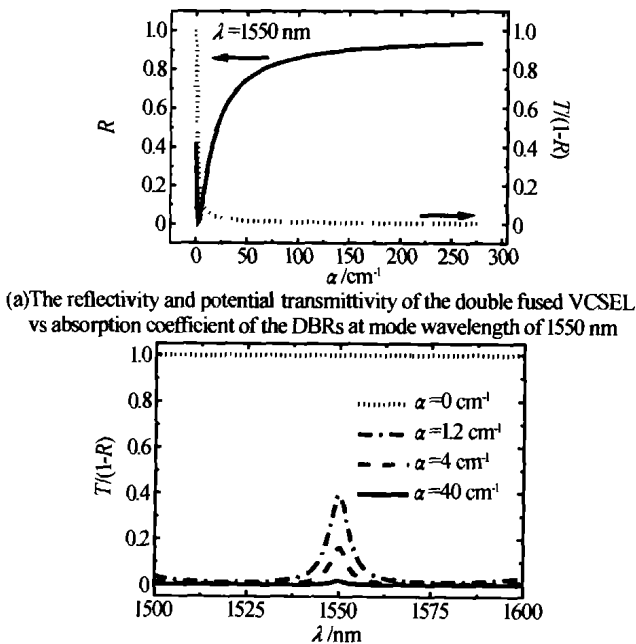


图 3 不同吸收系数下, VCSEL 的模式反射率和势透射率

Fig. 3 The reflectivity and potential transmittivity of the double fused VCSEL for different absorption coefficient

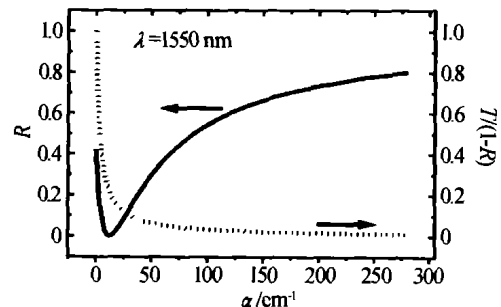


图 4 VCSEL 的模式反射率和势透射率随键合界面吸收的  
变化曲线

Fig. 4 The reflectivity and potential transmittivity of the  
double fused VCSEL vs absorption coefficient of the  
GaAs/InP interfaces at mode wavelength of 1550 nm

图 5 是假定在两个键合界面处的相邻两层光学  
厚度均为  $\lambda_0/4$  的 GaAs 层和 InP 层的吸收系数均为  
 $240 \text{ cm}^{-1}$ , 而其它部分的吸收为零. 在只将吸收的  
位置改变, 其它参数不变的情况下, 分别进行计算得  
到的 VCSEL 的反射谱、反射相移和势透射率. 由图

可见,随着吸收位置离有源区越远,由紧邻有源区的第一对 DBR 位置处移到第三对 DBR 位置处时, VCSEL 模式处的反射率减小,势透射率增大,而反射相移变化很小. 这个结果与一般 VCSEL 中的纵向光场驻波分布规律相符<sup>[10]</sup>. 在 VCSEL 中,光波能

量主要分布在有源区中心区域,波峰强度随着离有源区距离的增加而很快衰减. 所以,为了减小键合界面吸收的影响,提高光输出效率,应该使键合界面离有源区距离远一些.

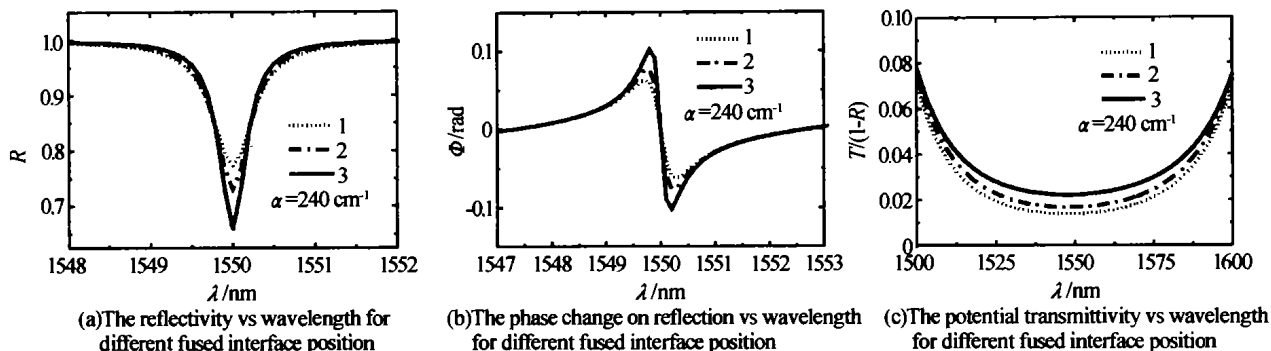


图5 键合界面在不同位置处时, VCSEL 的反射谱、反射相移和势透射率

Fig. 5 The reflection spectra, phase change on reflection and potential transmittivity of the double fused VCSEL for different fused interface position

## 4 结论

采用光学传输矩阵方法,详细分析了反射镜以及键合界面的吸收对晶片键合结构垂直腔面发射激光器的反射率、反射相移和势透射率等光学特性的影响. 结果表明,反射镜以及键合界面的吸收对 DBR 和 VCSEL 的反射率和势透射率有重要影响,而对 DBR 中心波长处的反射相移以及 VCSEL 模式处的反射相移和模式位置影响很小. 随着吸收系数的增大, DBR 中心波长处以及 VCSEL 模式处的势透射率显著降低. 将有吸收的键合界面离有源区距离远一些,有利于提高 VCSEL 的光输出效率.

### 参考文献

- Margalit N M, Black K A, Chiu Y J, *et al.* Top-emitting double-fused 1.5  $\mu\text{m}$  vertical cavity lasers. *Electronics Letters*, 1998, **34** (3): 285 ~ 287
- Black K A, Abraham P, Margalit N M, *et al.* Double-fused 1.5  $\mu\text{m}$  vertical cavity lasers with record high  $T_0$  of 132K at room temperature. *Electronics Letters*, 1998, **34** (20): 1947 ~ 1949
- Karim A, Abraham P, Lofgreen D, *et al.* Wafer bonded 1.55  $\mu\text{m}$  vertical-cavity lasers with continuous-wave operation up to 105°C. *Applied Physics Letters*, 2001, **78** (18): 2632 ~ 2633
- Margalit N M, Babic D I, Streubel K, *et al.* Laterally oxidized long wavelength cw vertical-cavity lasers. *Applied Physics*

*Letters*, 1996, **69** (4): 471 ~ 472

- Liau Z L, Mull D E. Wafer fusion: A novel technique for optoelectronic device fabrication and monolithic integration. *Applied Physics Letters*, 1990, **56** (8): 737 ~ 739
- Tong Q Y, Gosele U. *Semiconductor Wafer Bonding: Science and Technology*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 1999. 1 ~ 48
- Patriarche G, Jeannes F, Oudar J L, *et al.* Structure of the GaAs/InP interface obtained by direct wafer bonding optimised for surface emitting optical devices. *Journal of Applied Physics*, 1997, **82** (10): 4892 ~ 4903
- Sagalowicz L, Ruda A, Kapon E, *et al.* Defects, structure, and chemistry of InP-GaAs interfaces obtained by wafer bonding. *Journal of Applied Physics*, 2000, **87** (9): 4135 ~ 4146
- Piprek J, Babic D I, Bowers J E. Simulation and analysis of 1.55  $\mu\text{m}$  double-fused vertical-cavity lasers. *Journal of Applied Physics*, 1997, **81** (8): 3382 ~ 3390
- Wilmsen C, Temkin H, Coldren L A. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 293 ~ 324
- Macleod H A. *Thin-film Optical Filters*. London: Adam Hilger Ltd., 1969. 8 ~ 25
- 林永昌, 卢维强. *光学薄膜原理*. 北京: 国防工业出版社, 1990. 23 ~ 49
- Lin Y C, Lu W Q. *Principle of Optical Thin Films*. Beijing: National Defence Industry Press, 1990. 23 ~ 49

## Effect of Absorption on the Optical Characteristics of VCSELs

Hou Shihua<sup>1</sup>, Zhao Ding<sup>2</sup>, Ye Xiaojun<sup>1</sup>, Zhong Yuan<sup>1</sup>, Tan Manqing<sup>1</sup>, Chen Lianghui<sup>1</sup>


<sup>1</sup> *Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*

<sup>2</sup> *Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*

Received date: 2003-11-04

**Abstract** The effect of absorption in DBR and fused interface on the optical characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) has been analysed in detail by using optical transfer matrix method. The result shows that the absorption in DBR and fused interface has significant influence on both the reflectivity and the potential transmittivity of the DBR and the VCSEL, but has a weak effect on the phase change on reflection of the DBR at center wavelength and the mode phase change on reflection and mode position of the VCSEL. With the increase of the absorption in DBR and fused interface, the reflectivity of DBR at center wavelength decreases gradually, and the mode reflectivity of VCSEL decreases greatly to a minimum and then increases gradually, and the potential transmittivity of DBR at center wavelength and of VCSEL at mode wavelength reduce greatly respectively. Moreover, it is beneficial to increase the optical output efficiency of VCSELs to put the fused interface a little far away from the active region.

**Keywords** VCSEL; Wafer bonding; Absorption; Reflectivity; Phase change on reflection; Potential transmittivity



**Hou Shihua** was born on September 6, 1969, in Hunan Province, China. He received his Bachelor's degree from Hunan Normal University in 1998 and received his Master's degree from Xinjiang Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, in 2001. He is currently pursuing his Ph. D. degree in Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences. His current research interests include design, simulation and fabrication of VCSELs.