

# 垂直腔面发射激光器的 TO 封装的耦合效率模拟分析\*

刘 超<sup>1,†</sup> 王 欣<sup>1</sup> 袁海庆<sup>1</sup> 钟宝璇<sup>2</sup> 祝宁华<sup>1</sup>

(1 中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)  
(2 香港城市大学电子工程系, 香港)

摘要: 采用 FRESNEL 光学软件和 MATLAB 软件,详细分析了垂直腔面发射激光器的 TO 封装组件对耦合效率的影响.发现增加耦合透镜的折射率、减少管帽的高度和耦合透镜的尺寸可以提高耦合效率.

关键词: 耦合效率; 垂直腔面发射激光器; 封装

EEACC: 4320J; 4330

中图分类号: TN305. 94

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2006)04-0751-05

## 1 引言

垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有许多边发射激光器不具备的优点,比如阈值电流低、光束发散角小、可以在片测试等,使其在光纤通信、光互连、并行光信息处理等领域具有广阔的应用前景.随着近年来人们对 VCSEL 芯片研制的日益关注,发展与之相适应的封装设计技术是十分必要的.

VCSEL 芯片的封装形式<sup>[1]</sup>有塑料封装、TO (transistor outline) 封装、陶瓷衬底封装和倒装焊<sup>[2]</sup>.其中,TO 封装曾经是晶体管器件常见的封装形式,后来被广泛应用于光电子器件封装.由于其操作工艺简单、成本低、技术成熟,VCSEL 芯片的 TO 封装日益受到人们的重视.

迄今为止,关于边发射激光器 TO 封装已有很多相关报道<sup>[3~7]</sup>,由于 VCSEL 芯片的研发历史比边发射激光器短,有关其 TO 封装的工作却未见报道,只有文献[8]简单分析了 VCSEL 与多模光纤直接耦合时的轴向、横向和倾斜角度的容差. VCSEL 应用于高速远程光通信时,为了减少模式色散,只能用单模光纤而非多模光纤作为光的传输媒质.因此,分析 VCSEL 的 TO 封装与单模光纤组成的光学系统的耦合效率是十分必要的.本文通过 FRESNEL 软件结合 MATLAB 软件,分析了 VCSEL 的 TO 封装的耦合效率随封装元件结构参数的变化.这将对 VCSEL 的 TO 封装的设计和生

## 2 VCSEL 的 TO 封装的光学耦合系统

由于 VCSEL 的出光方向垂直于芯片的外延生长方向,所以 VCSEL 的 TO 封装结构与半导体光电探测器的 TO 封装结构类似.我们设计的 TO 封装为插拔式结构,其侧向剖面如图 1 所示.这种封装结构的具体工艺流程为:首先将烧结好芯片的热沉焊接在管座上;然后采用金丝球焊技术将芯片的电

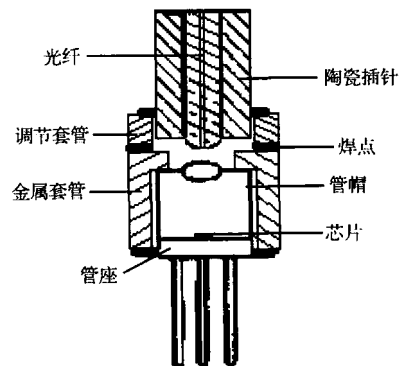


图 1 VCSEL 的插拔式 TO 封装剖面图

Fig. 1 Cross-section diagram of pluggable TO-packaged of VCSEL

极和相应的管脚连接起来;再用盖帽机将管座用带有透镜的管帽密封起来;其后采用激光点焊技术将起到保护作用的环状金属套管焊接在管座上;接着套上调节套管,并在金属套管和调节套管的结合缝

\*国家自然科学基金国际合作重大资助项目(批准号:00410760)

†通信作者. Email: chliu@red.semi.ac.cn

2005-08-27 收到,2005-11-25 定稿

处实施激光点焊;最后通过调整带有单模光纤的陶瓷插针的高度,在耦合效率最大的位置,用激光光束将其和调节套管焊接在一起.由图 1 可以看出 TO 封装的光路由 VCSEL 芯片、管帽上的耦合透镜和单模光纤三部分组成.

### 3 VCSEL 的 TO 封装的光学系统的耦合损耗来源

根据文献[4]报道,边发射激光器的 TO 封装的耦合损耗主要来自以下五个方面:透镜的像差、激光器与单模光纤的模场形状的失配和尺寸的差异、菲涅尔反射损耗、透镜表面的不平整产生的波前形变.对于理想的 VCSEL 的 TO 封装光路来讲,激光器和光纤的模场都可以近似为圆形的高斯光束,所以由于模场的形状产生的损耗可以忽略;菲涅尔反射损耗是由于光纤和透镜表面存在菲涅尔反射引起的,可以通过镀合适的减反膜来消除<sup>[9]</sup>;对于质量检验合格的商用管帽来讲,透镜表面不平整产生的损耗可以忽略不计.综上所述,如果分析 VCSEL 的 TO 封装光学系统的耦合效率变化时,只考虑从激光器出射的高斯光束与单模光纤模场尺寸失配和透镜的像差产生的损耗是合理的.

### 4 VCSEL 的 TO 封装的耦合效率模拟结果与讨论

为了提高耦合效率,必须使激光光束的模场与光纤的模场匹配.单模光纤的芯径仅为  $9\mu\text{m}$  左右,一般情况下小于激光器的发光窗口.为了使二者的模场匹配,通常采用的方法是在光路中加入透镜<sup>[3,10]</sup>,使激光器输出的光功率最大限度地耦合进光纤中.由于单模光纤的基模功率分布也是高斯分布<sup>[10]</sup>,因此激光器与单模光纤耦合效率与这两束高斯光束的模场匹配密切相关.VCSEL 的 TO 封装的耦合效率可以通过计算如下所示的交迭积分得到<sup>[3,11]</sup>:

$$= \frac{\left| \iint_0^{\infty} \rho^* dxdy \right|^2}{\iint_0^{\infty} \rho^* dxdy \iint_0^{\infty} \rho^* dxdy} \quad (1)$$

式中  $\rho$  表示进入光纤的激光器高斯光束的光场强度; $\rho^*$  表示单模光纤的模场强度复数分布,\* 表示复数共轭.

在图 1 所示的 VCSEL 的 TO 封装结构中,管帽是一个非常重要的组件.一般在选择商用的管帽产品时,主要考虑管帽的高度以及耦合透镜的形状、大小和折射率.由于 VCSEL 芯片激射的高斯光束

具有近似圆形对称的光场结构,所以其 TO 封装的耦合透镜可以采用制作工艺相对简单、成本相对低廉的球形透镜.

我们用于模拟分析的实验样品包括:由德国慕尼黑技术大学肖特基研究所研发设计制备的 VCSEL 芯片样品,其远场发散角为  $20^\circ$ ,输出光功率为  $1\text{mW}$ ;模场直径为  $10\mu\text{m}$  的单模光纤;两种带有球形耦合透镜的管帽,其结构参数如表 1 所示.我们以这两种管帽为例,分析了当管帽的高度、球透镜的尺寸和折射率变化时,VCSEL 的 TO 封装耦合效率变化趋势.

表 1 模拟选用的 TO 管帽结构参数

Table 1 Parameters related to TO-cap for simulation

管帽编号	1 #	2 #
透镜材料	Bk-7	Taf-3
透镜折射率	1.5168	1.8042
透镜直径/mm	1.6	0.8
透镜焦距/mm	1.17	0.45
管帽高度/mm	3	2.1

我们的模拟工作步骤是:首先利用 FRESNEL 光学软件分析得到 VCSEL 芯片激射的高斯光束经过透镜折射后的光场分布,然后再用 MATLAB 软件编程得到不同轴向距离的激光光束的模场和单模光纤的光场的交迭积分((1)式),从而得到耦合效率的解析值.在此基础上,绘出当单模光纤沿着光轴方向移动时,耦合效率的变化曲线.

#### 4.1 球透镜的大小对耦合效率的影响

将表 1 所示的 1# 和 2# 管帽样品的其他结构参数固定,只是调整它们的球形透镜的大小,分析球形透镜的尺寸变化对耦合效率的影响.当将 1# 管帽的球形透镜的直径由  $1.6\text{mm}$  变化为  $1.8$  和  $2\text{mm}$ ,将 2# 管帽的球形透镜的直径由  $0.8\text{mm}$  变化为  $0.6, 1$  和  $1.2\text{mm}$  时,耦合效率随光纤和透镜距离的变化趋势如图 2 所示.从这两组曲线的变化趋势中可以发现当球形透镜曲率半径逐渐增大时,耦合峰对应的光纤与透镜的距离逐渐增加.这是由于球形透镜的焦距与曲率半径和折射率的关系为:

$$f = \frac{nR}{2(n-1)} \quad (2)$$

其中  $f$ ,  $R$  和  $n$  分别代表透镜的焦距、曲率半径和折射率.从这个表达式可以明显看出,当透镜的曲率半径增加时,透镜的焦距也会增加,所以成像的位置离透镜远些.从图 2(a) 和 (b) 还可以看出:随着透镜曲率半径的增加,耦合峰的峰值相对降低.这是由于随着透镜曲率半径的增加,从不同角度入射的光线的路径长度差异增加,所以由像差产生的损耗增加而导致的<sup>[4]</sup>.

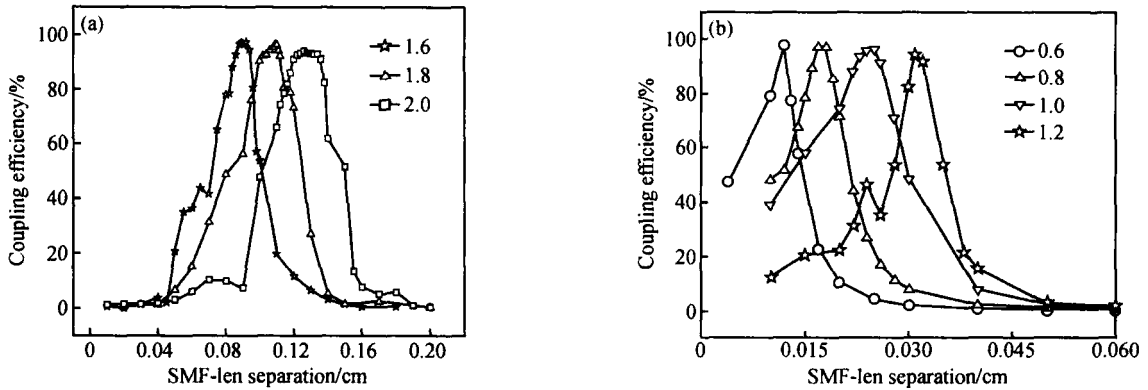


图 2 耦合效率与透镜尺寸的关系 (a) 1# 管帽; (b) 2# 管帽

Fig. 2 Dependence of coupling efficiency on dimension of lens (a) 1# TO-cap; (b) 2# TO-cap

### 4.2 管帽的高度对耦合效率的影响

我们还从改变管帽的高度,即从改变芯片与球透镜之间的距离的角度来分析它对耦合效率的影响.将 1# 管帽高度由 2.1mm 变化为 1.5, 1.8 和 2.4mm,将 2# 管帽高度由 3mm 变化为 2.75, 2.5, 2.25 和 2mm 时,耦合效率随光纤和透镜距离的变化趋势如图 3 所示.从图 3(a) 和 (b) 可以看出:管帽的高度越低,耦合曲线的峰值位置离透镜越远,而且

耦合曲线也逐渐加宽.这是由于我们选取的管帽高度都大于透镜的焦距,物距减少时,像距增大的缘故.此外,从这两组耦合曲线还可以看出,随着管帽的高度降低,耦合峰的峰值高度逐渐增加.表 2 列出了改变这两种管帽高度时,耦合曲线峰值对应的光纤与透镜和芯片与光纤之间距离的变化.从这个统计表可以看出当管帽的高度降低时,耦合峰位置对应的芯片与光纤头的距离减少,透镜的像差产生损耗就变小,所以耦合曲线的峰值增高.

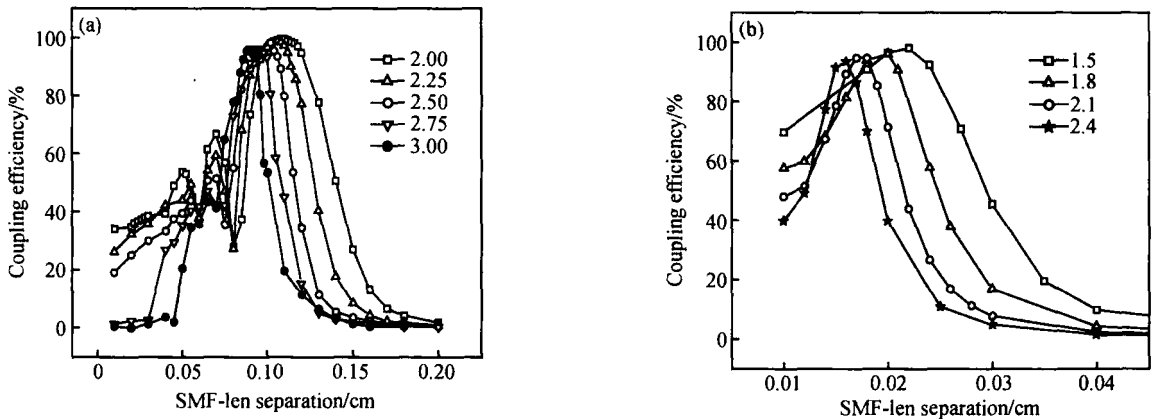


图 3 耦合效率与管帽高度的关系 (a) 1# 管帽; (b) 2# 管帽

Fig. 3 Dependence of coupling efficiency on height of TO-cap (a) 1# TO-cap; (b) 2# TO-cap

表 2 不同高度管帽的耦合曲线峰值对应的光纤与透镜距离,及芯片与光纤距离

Table 2 Distances between fibers and lens and the distances between chips and fibers corresponding to the peaks of coupling efficiency curves of various TO-cap heights

参数	1# 管帽					2# 管帽				
	管帽高度/mm	2	2.25	2.5	2.75	3	1.5	1.8	2.1	2.4
耦合峰位置对应的透镜与光纤头的距离/mm	1.12	1.06	1.02	0.94	0.89	0.22	0.18	0.17	0.16	
耦合峰位置对应的芯片与光纤头的距离/mm	3.12	3.31	3.52	3.69	3.89	1.72	1.98	2.27	2.56	

### 4.3 透镜的折射率对耦合效率的影响

球透镜一般是由高折射率玻璃制作成的. 制作透镜的玻璃材料主要有四种: Bk-7, Hardglass, Sapphire 和 Taf-3, 它们的折射率分别为 1.5168, 1.5231, 1.75 和 1.8042. 如果这两种管帽的球透镜分别采用这四种玻璃材料, 耦合效率曲线的变化趋势如图 4 所示. 从这个图中的两组曲线可以看出: (1) 球透镜的折射率越大, 耦合曲线达到峰值时, 光纤离透镜越近. 因 (2) 式可看出, 当透镜的折射率增

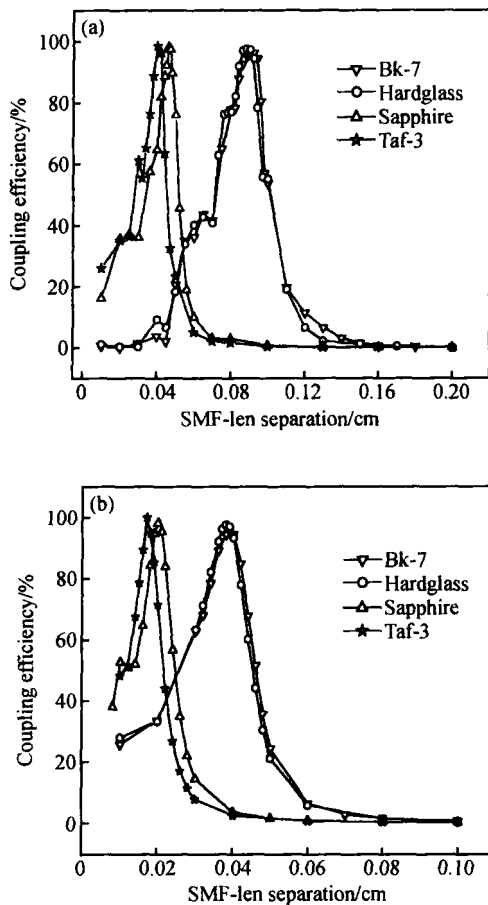


图 4 耦合效率与透镜折射率的关系 (a) 1# 管帽; (b) 2# 管帽

Fig. 4 Dependence of coupling efficiency on refractive index of lens (a) 1# TO-cap; (b) 2# TO-cap

加时, 球透镜的焦距减少, 所以会在离透镜的近处出现耦合峰. (2) 如果球透镜的折射率减少 (即按照 Taf-3, Sapphire, Hardglass, Bk-7 的顺序), 会导致耦合峰的峰值降低. 因为根据菲涅耳定律 (Snell's law):

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

其中  $n_1$  和  $n_2$  分别为空气和透镜的折射率, 当透镜的折射率较大时, 在透镜内会产生较小的传播角度, 由于透镜像差产生的损耗会相对小些, 从而导致

耦合曲线的峰值相对高些<sup>[4]</sup>.

## 5 结论

管帽的结构参数的变化对 VCSEL 芯片的 TO 封装的耦合效率曲线的影响可以由表 3 概括表示. 可以看出, 如果减小管帽高度、选用曲率半径小或者折射率高的球透镜可以有效减少透镜的像差损耗, 达到更高的耦合效率. 此外, 耦合曲线会由于相干光的干涉现象出现次峰. 在实际操作中通过光纤沿轴向多次扫描来检测光功率的方法找到耦合效率的峰值位置.

表 3 VCSEL 的 TO 封装耦合效率与管帽的结构参数的关系  
Table 3 Dependence of coupling efficiency of TO-packaged VCSEL on structures of TO-cap

管帽的结构参数	耦合曲线峰值位置对应的光纤与透镜之间的距离	耦合曲线的峰值
增加管帽高度	变近	变小
增大球透镜尺寸	变远	变小
增加球透镜折射率	变近	变大

本文通过模拟分析得出了 VCSEL 的 TO 封装的耦合曲线变化趋势, 并做出了相应的误差分析. 这些模拟分析的结果将对 VCSEL 的 TO 封装的设计和和生产提供有价值的参考和指导.

## 参考文献

- [1] VCSEL packaging for data communication transceiver design. <http://www.fpnmag.com>
- [2] Dang G T, Mehandru R, Luo B, et al. Fabrication and characteristics of high-speed implant-confined index-guided lateral-current 850-nm vertical cavity surface-emitting lasers. *J Lightwave Technol.* 2003, 21(4):1020
- [3] Cheung Y M, Yiu C H. Simulation of the alignment sensitivity on the coupling efficiency of a ball-lens capped TO-can laser diode source into a single-mode fiber. *Int'l Symposium on Electronic Materials and Packaging*, 2002:197
- [4] Karstensen H. Loss analysis of laser diode to single-mode fiber couplers with glass spheres or silicon planar-convex lenses. *J Lightwave Technol.* 1990, 8(5):739
- [5] Chang Y L, Trott K, Ratowsky G, et al. Ball lens modeling for laser-fiber coupling-A direct solution of Maxwell equations. *Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting*, 1995, 1:242
- [6] Faizd A R, Chuah H T, Ghafouri-Shiraz H. Coupling efficiency between a laser diode and a conically lensed single mode fibre. *TENCON 2000 Proceedings*, 2000, 3(24-27):66
- [7] Ogura A, Kuchiki S, Shiraishi K, et al. Efficient coupling between laser diodes with a highly elliptic field and single-mode fibers by means of GIO fibers. *Photonics Technology Letters*, 2001, 13(11):1191
- [8] Lin S I E, Liu Y L. Design and analysis of optical subassem-

- bly (OSA) used in high speed parallel transmission package. The 5th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, 2003, 1(12):277
- [ 9 ] Mao Hu, Wu Hengfeng. Application of Gaussian beam transmission theory in semiconductor laser's coupling. Chinese Semiconductor Optoelectronics, 2001, 22(5):359 (in Chinese) [毛虎, 吴恒锋. 高斯光束传输理论在半导体激光器耦合中的应用. 半导体光电, 2001, 22(5):359]
- [10] Tang Z, Zhang R, Shi F G. Effects of angular misalignments on fiber-optic alignment automation. Opt Commun, 2001, 196:173
- [ 11 ] Gaugopadhyay S, Sarkar S M. Misalignment considerations in laser diode to single-mode fibre excitation via hyperbolic lens on the fibre tip. Opt Commun, 1998, 146:104
- [12] Sakai J, Kimura T. Design of a miniature lens for semiconductor laser to single-mode fiber coupling. Quantum Electron, 1980, 16(10):1059
- [10] Tang Z, Zhang R, Shi F G. Effects of angular misalignments

## Analysis of Coupling Efficiency of TO-Packaged VCSELs \*

Liu Chao<sup>1,†</sup>, Wang Xin<sup>1</sup>, Yuan Haiqing<sup>1</sup>, Zhong Baoxuan<sup>2</sup>, and Zhu Ninghua<sup>1</sup>

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

(2 Department of Electronic Engineering, Hong Kong City University, Hong Kong, China)

**Abstract:** The dependences of TO-packaged VCSELs on packaging subassemblies are analyzed using FRESNEL and MATLAB softwares. It is found that the coupling efficiency can be improved by increasing the refractive index of the coupling lens and by decreasing the height of the TO-cap or the size of the coupling lens.

**Key words:** coupling efficiency; VCSEL; package

**EEACC:** 4320J; 4330

**Article ID:** 0253-4177(2006)04-0751-05

\* Project supported by the International Cooperation of the National Natural Science Foundation of China (No. 00410760)

† Corresponding author. Email: chliu@red.semi.ac.cn

Received 27 August 2005, revised manuscript received 25 November 2005

© 2006 Chinese Institute of Electronics