

# 一种与光纤高效耦合的新型大光腔大功率 半导体激光器\*

于海鹰<sup>1)†</sup> 崔碧峰<sup>2)</sup> 陈依新<sup>2)</sup> 邹德恕<sup>2)</sup> 刘莹<sup>2)</sup> 沈光地<sup>2)</sup>

1) 山东建筑大学, 济南 250101)

2) 北京工业大学北京光电子技术实验室, 北京 100022)

(2006 年 7 月 6 日收到, 2006 年 12 月 18 日收到修改稿)

提出并实现了一种新型多源区隧道级联大光腔半导体激光器, 提高了激光器激射窗口的宽度, 得到低于  $20^\circ$  的垂直发散角, 从而提高了光纤输出的耦合效率. 对多种形式和规格的透镜光纤的测试结果表明, 耦合效率可以提高 30% 以上.

关键词: 半导体激光器, 大光腔, 光纤耦合, 透镜光纤

PACC: 4255P, 4260D, 4280M, 4281H

## 1. 引 言

半导体激光器二极管(LD)在光纤通信、光纤传感、激光加工、信息存储/读取、生物医学等众多领域已获得愈来愈广泛地应用. 在许多应用场合, LD 需要与光纤耦合, 把光能量输送出去, 因此在 LD 和光纤之间实现高效光耦合输出是十分必要的.

为了降低阈值电流密度和改善模式特性, LD 的有源层必须很薄, 一般仅有  $0.1 \mu\text{m}$  左右, 而有源层的宽度与 LD 的输出功率大小成正比, 大功率 LD 的条宽一般在数十到百微米数量级. 因此激射光束通过狭窄的缝隙时要发生衍射, 使光束发散, 而且在垂直和水平方向上发散的度不同, 光束远场的横截面呈椭圆形, 典型的水平发散角  $\theta_{\parallel}$  为  $5^\circ$ — $20^\circ$ , 垂直发散角  $\theta_{\perp}$  为  $30^\circ$ — $40^\circ$ . 因此, 减小 LD 的垂直发散角一直是半导体激光器的研究重点之一.

根据 Casey 等对垂直发散角的测量结果<sup>[1]</sup>和 Dumke 提出的理论<sup>[2]</sup>, 在一定范围内减小 LD 有源层厚度可以降低半导体激光器的垂直发散角, 而在超过临界值时, 增大半导体激光器的有源层厚度也可以降低半导体激光器的垂直发散角.

在减小 LD 有源区的研究方面, 通过对 LD 的波导层结构进行特殊设计, 可以使垂直发散角降到  $20^\circ$  以下<sup>[3-5]</sup>. 但代价是使阈值电流密度增加了数倍至十倍. 同时光强过于集中, 加重了端面光学灾变性毁坏. 因此通过减小有源层的厚度降低垂直发散角的做法对大功率 LD 不太适用.

在增加 LD 有源区厚度的研究方面, 采用分开限制异质结(separated confinement heterostructure)技术和大光腔结构可以得到  $23^\circ$  的垂直发散角<sup>[6,7]</sup>. 但是对于普通结构的 LD, 这已经接近于极限, 继续拓展光腔会进一步减小光限制因子, 并且会引起高阶模式激射<sup>[8]</sup>.

我们根据半导体激光器隧道级联的理论<sup>[9]</sup>, 提出一种多源区的大光腔结构<sup>[10,11]</sup>, 用隧道结连接两个相邻的有源区, 极大地拓展了光腔, 使发光面积提高 1—2 个数量级, 降低了器件光功率密度, 从而避免了半导体激光器由于发光面积窄而引起的 COD 和光束垂直发散角大的问题, 提高了半导体激光器光束质量, 并提高了半导体激光器的可靠性.

## 2. LD 结构与光场特性

本文设计的多有源区隧道级联大光腔 LD 的光

\* 国家 973 计划(批准号:G20000683-02), 北京市教委项目(批准号:2002kj018), 北工大博士启动基金(批准号:KZ0204200387), 北京市科委重点项目(批准号:0404003040221)资助的课题.

† E-mail: henryyu@sdjzu.edu.cn

腔结构如图 2 所示. 由反向隧道结连接两个子有源区, 其中子有源区具有普通 LD 的结构, 在电压的作用下, 第一个有源区内复合发光后在价带的载流子再生到第二个有源区的导带, 在第二个有源区继续复合发光, 使得注入一对电子空穴对, 得到多个光子. 能带图如图 2 所示, 同时隧道结作为无源波导参与整个光场中, 有源波导与无源波导相互耦合, 使光场拓展, 近场分布如图 3 所示, 分别示出了多有源区大光腔结构的材料层折射率以及模拟出的近场波导图, 由此图可以看出隧道结与有源区共同作用形成近场. 与普通的仅有一个有源区的 LD 相比较, 该 LD 有三个子有源区, 使得光腔尺寸大大增加. 由本光腔结构模拟得出垂直发散角为  $19^\circ$ . 用两个隧道结连接三个有源区, 两边有源区的光限制层的 Al 组分不对称, 分别为 0.30 和 0.45. 量子阱阱宽为 8 nm, 垒宽为 10 nm. 隧道结的厚度为 31 nm, 隧道结两边的耦合层间距为 60 nm. 对设计的结构进行了模拟,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  的折射率采用以下关系式:

$$n(x) = 3.590 - 0.719x + 0.091x^2. \quad (1)$$

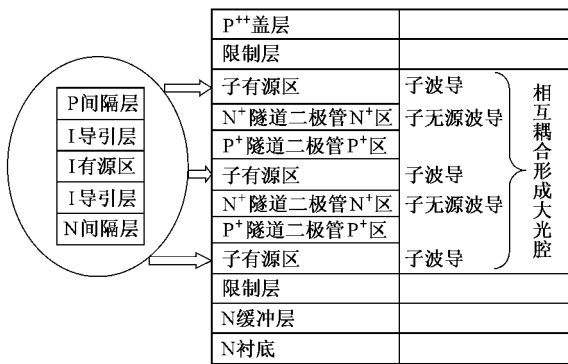


图 1 多有源区隧道级联大光腔半导体激光器结构

模拟结果为基模激射, 光限制因子为 2.24%,

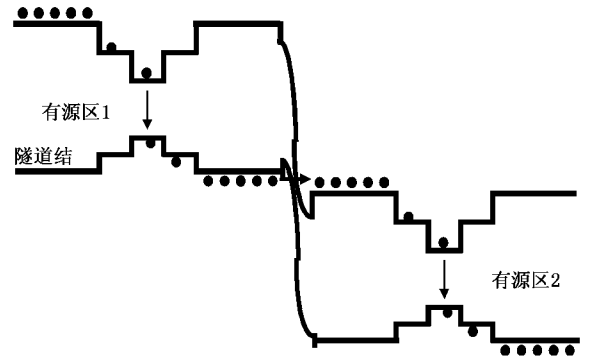


图 2 多有源区隧道级联大光腔半导体激光器能带

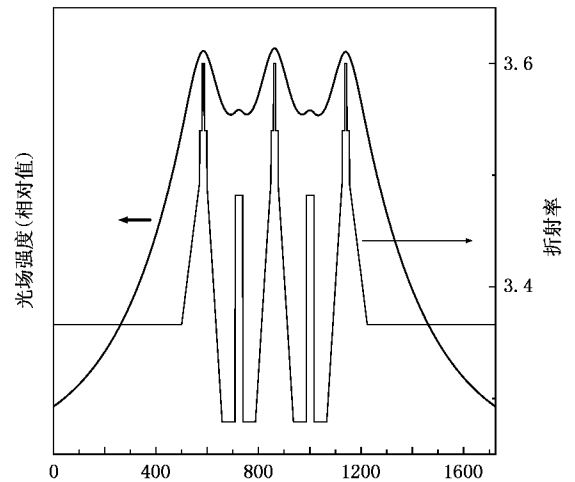


图 3 多有源区隧道级联大光腔半导体激光器折射率和模拟光场强度分布

垂直发散角为  $19^\circ$ , 近场光斑下降到  $1/e$  处的宽度为 1244 nm, 见图 3 所示.

按照上述结构, 采用 MOCVD 工艺在 n 型 GaAs 衬底上进行了材料的外延生长. 脊形波导条宽  $50 \mu\text{m}$ , 解理腔长  $750 \mu\text{m}$ , 两个解理面分别镀增透膜

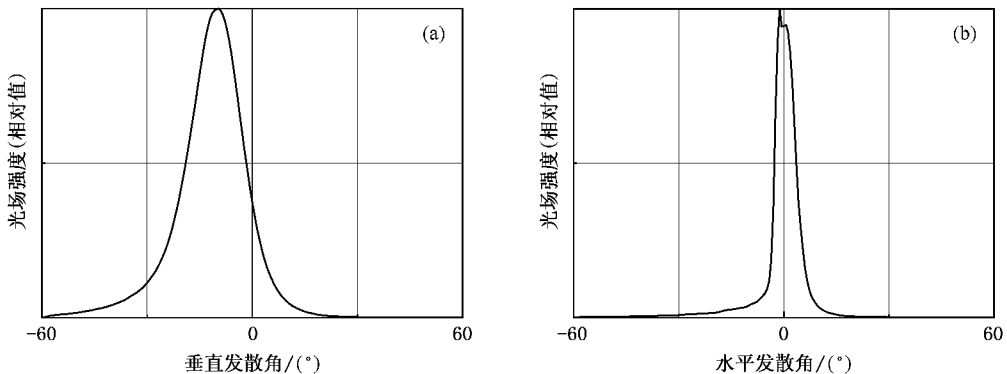


图 4 多有源区隧道级联大光腔半导体激光器远场特性 (a)垂直发散角 (b)水平发散角

和高反膜. 制成的 980 nm InGaAs/GaAs /AlGaAs LD 器件的远场特性实测结果为水平发散角  $\theta_{\parallel}$  为  $5.6^{\circ}$ , 垂直发散角  $\theta_{\perp}$  为  $16.8^{\circ}$ , 见图 4 所示. 器件的  $I-V$  特性如图 5 所示, 有源区的斜率效率与阈值电流与普通半导体激光器相差不多. 图 6 为该器件喷射时的近场显微照片.

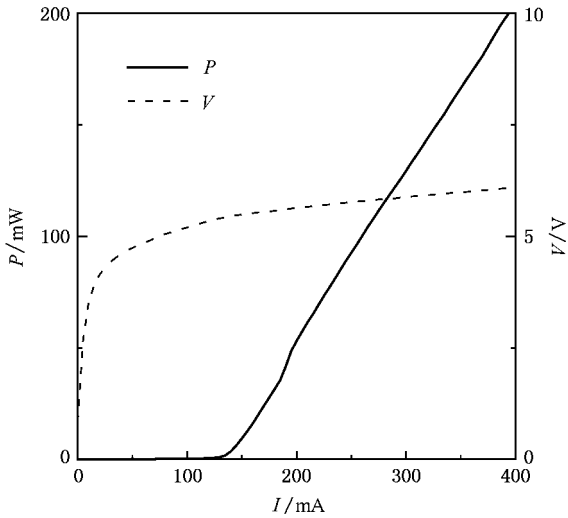


图 5 多源区隧道级联大光腔半导体激光器  $P-I$  特性

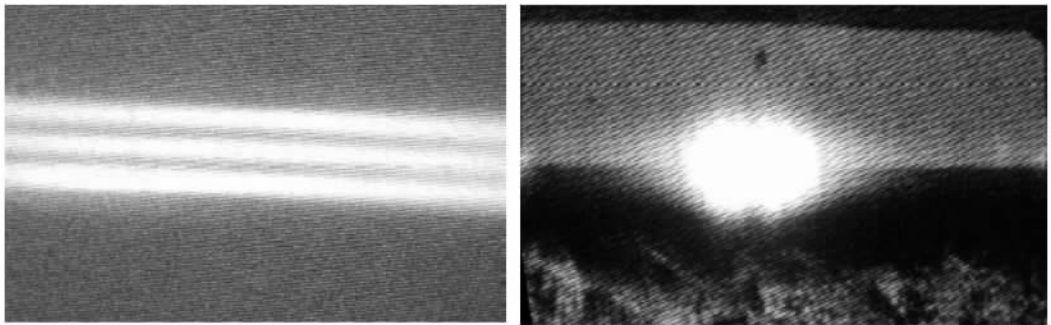


图 6 多源区大功率 LD 放大 1000 倍后的近场图形(水平方向平行于 pn 结)

### 3. 耦合效果

为检验新型多源区大功率 LD 的与光纤的耦合特性, 采用了 10 种不同形式和规格的透镜光纤对该器件进行了测试, 并与普通单源区 LD 的测试结果作对比. 两种被测 LD 的各项参数见表 1. 透镜光纤编号及规格参数见表 2.

表 1 被测 LD 特性

LD 编号	980-MALD18	980-97
有源区数量/个	3	1
有源区厚度/nm	826	251
垂直光场有效宽度/nm	1244	686
谐振腔长度/ $\mu\text{m}$	750	750
电极条宽/ $\mu\text{m}$	50/44	50/44
增透/高反膜	镀	镀
输出光束波长/nm	980	980

测试的两支 LD 均为我们实验室制备, 分别是编号为 MALD-18 的三有源区隧道级联大功率 980 nm LD 和 980-97 单有源区 980 nm LD. 脊形波导条宽均为  $50 \mu\text{m}$ , 套刻电极宽度  $44 \mu\text{m}$ , 解理腔长均为  $750 \mu\text{m}$ ,

表 2 测试用透镜光纤标号与参数

编号	透镜光纤类型	说明
1	平端面 GRIN + SMF	自聚焦光纤级联单模光纤
2	$60^{\circ}$ 锥形 SMF	圆锥状单模透镜光纤
3	$120^{\circ}$ 锥形 GRIN + SMF	锥状大芯径自聚焦光纤级联单模光纤
4	$60^{\circ}$ 楔形 SMF	楔状单模透镜光纤
5	$60^{\circ}$ 楔形 GRIN + SMF	楔状大芯径自聚焦光纤级联单模光纤
6	$90^{\circ}$ 楔形 GRIN + SMF	同上
7	$110^{\circ}$ 楔形 GRIN + SMF	同上
8	$120^{\circ}$ 楔形 GRIN + MMF	楔状大芯径自聚焦光纤级联多模光纤
9	$110^{\circ}$ 楔形 GRIN100/140	楔状大芯径自聚焦透镜光纤
10	$120^{\circ}$ 楔形 GRIN110/125	同上

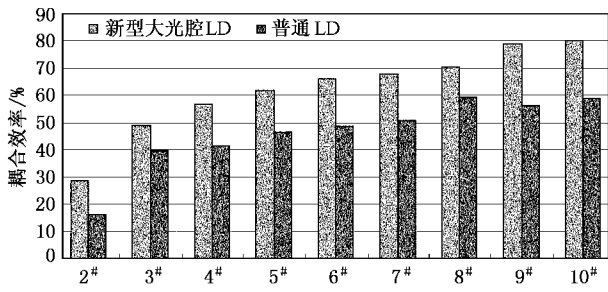


图 7 驱动电流为 500 mA 时, 两种 LD 与各种透镜光纤的耦合效率

反射面和出光面均分别镀  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$  HR 膜和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  AR 膜. 测试时将驱动电流统一设定为 500 mA 直流工作. 10 种不同规格的透镜光纤测试结果表明, 多有源区隧道级联大光腔大功率 LD 的光纤耦合效率得到明显提高. 当尾纤为由 1/4 节距  $100 \mu\text{m}$  芯径/ $140 \mu\text{m}$  包层的渐变折射率 (GRIN) 光纤作透镜, 然后熔接长度为 1 m 的普通单模光纤 (SMF) 组成的平端

面透镜光纤时, 新型器件比普通器件的耦合效率提高一倍. 对于锥角为  $60^\circ$ , 端面球形透镜半径为  $7 \mu\text{m}$  的单模透镜光纤, 两种 LD 的耦合效率分别为 28.7% 和 16%, 新型 LD 比普通 LD 高 79.38%. 楔形透镜光纤目前是大功率 LD 光纤耦合输出应用最为广泛的一种透镜光纤, 为此我们测试了 5 种类型的 7 种规格的楔形透镜光纤, 耦合效率比平均提高了 33.3%. 对比结果详见图 7 所示.

## 4. 结 论

基于隧道级联理论制备的新型多有源区大光腔大功率半导体激光器, 改善了输出光束的远场特性, 降低了 LD 的垂直发散角. 与透镜光纤耦合时, 新型 LD 显示出明显优于普通单有源区 LD 的耦合效率. 对 9 种不同规格透镜光纤测试的结果表明, 平均耦合效率可以提高 30% 以上.

[ 1 ] Casey H C , Panish M B , Merz J L 1973 *J. Appl. Phys.* **44** 5470  
 [ 2 ] Dumke W P 1975 *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-11** 400  
 [ 3 ] Temmyo J , Sugo M 1995 *Electron. Lett.* **31** 642  
 [ 4 ] Lin G , Yen S T 1996 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **8** 1588  
 [ 5 ] Buda M , Hay J , Tan H , Wong-Leung J , Jagadish C 2002 *Lasers and Electro-Optics Society , LEOS2002. The 15th Annual Meeting of the IEEE* **2** 647  
 [ 6 ] Fang G Z , Xiao J W , Ma X Y , Xu Z T , Zhang J M , Tan M Q , Liu Z S , Liu S P , Feng X M 2002 *Chinese J. of Laser B* **11** 9  
 [ 7 ] Zhu X P , Xu Z T , Zhang J M , Ma X Y , Chen L H 2002 *J. Semiconductor* **23** 398  
 [ 8 ] Chen Y C , Waters R G , Dalby R J 1990 *Electron. Lett.* **26** 1348

[ 9 ] Shen G D , Lian P , Guo X , Yin T , Chen C H , Wang G H , Du J Y , Cui B F , Li J J , Liu Y , Gao G , Zou D S , Chen J X , Ma X Y , Chen L H 2000 *Proceeding of SPIE* **4225** 327  
 [ 10 ] Lian P , Yin T , Gao G , Zou D S , Chen C H , Li J J , Shen G D , Ma X Y , Chen L H 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2374 ( in Chinese )  
 [ 廉 鹏、殷 涛、高 国、邹德恕、陈昌华、李建军、沈光地、马骁宇、陈良惠 2000 物理学报 **49** 2374 ]  
 [ 11 ] Cui B F , Li J J , Zhou D S , Liang P , Han J R , Wang D F , Du J Y , Liu Y , Zhao H M , Shen G D 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2150 ( in Chinese ) [ 崔碧峰、李建军、邹德恕、廉 鹏、韩金茹、王东风、杜金玉、刘 莹、赵慧敏、沈光地 2004 物理学报 **53** 2150 ]



# A novel high-power semiconductor laser diode with large cavity for high efficiency coupling with the optical fibers<sup>\*</sup>

Yu Hai-Ying<sup>1</sup>† Cui Bi-Feng<sup>2</sup> Chen Yi-Xin<sup>2</sup> Zou De-Shu<sup>2</sup> Liu Ying<sup>2</sup> Shen Gunag-Di<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China*

<sup>2</sup> *Beijing Optoelectronic Technology Laboratory, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China*

( Received 6 July 2006 ; revised manuscript received 18 December 2006 )

## Abstract

A novel high-power semiconductor laser diode ( LD ) with very large cavity using multi-active -layer cascaded by tunnel-junction was developed. The window size of the LD was enlarged extremely and less than 20 degree of the lasing beam divergency was obtained ,which benefits the coupling between the LD and the optical fiber. Many types of lensed fibers were used to test with the LD and the coupling efficiencies were increased over 30% compared with the conventional LD.

**Keywords** : semiconductors , large optical cavity , fiber coupling , lensed fiber

**PACC** : 4255P , 4260D , 4280M , 4281H

<sup>\*</sup> Project supported by the State 973 Basic Program ( Grant No. G20000683-02 ), the Program of Education Committee of Beijing ( Grant No. 2002kj018 ), The Doctoral Starting Foundation , Beijing University of Technology ( Grant No. KZ0204200387 ), and Key Program of the Science Committee of Beijing ( Grant No. D0404003040221 ).

† E-mail : henryyu@sdjzu.edu.cn