

# 高效率 高亮度 半导体激光器的技术进展

李晨<sup>1</sup>, 刘英斌<sup>2</sup>, 宋雪云<sup>3</sup>

(1 中国电子科技集团公司, 北京 100846)

(2 中国电子科技集团公司第十三研究所, 石家庄 050051)

(3 南京大学 扬州光电研究院, 南京 225009)

**摘要:** 描述了提高半导体激光器功率转换效率的技术方法和途径, 指出通过工艺优化来降低焦耳热和阈值热是提高激光器的功率转换效率的主要技术方法. 介绍了波长稳定激光器的两种制作方法: 外光栅法和内光栅法, 采用该方法制作的激光器的波长稳定性优于 0.1 nm/K. 在外延材料结构中采用各种形式的大光腔结构设计, 可以扩展近场光斑, 从而使半导体激光器的光束发散角减小到 25° 甚至更低. 对目前研究较热的近衍射极限激光器的制作方法进行了介绍, 分析了不同方法的优缺点及应用情况.

**关键词:** 激光二极管; 功率转换效率; 阈值电流密度; 光束发散角; 近衍射极限

**中图分类号:** TN248.4

## 0 引言

半导体激光器的一个重要应用是作为二极管泵浦固体激光器 (Diode Pump Solid State Laser, DPSSL) 的泵浦源, 另外它还作为光源直接应用在光纤通信、数据存储系统. 高效率、高稳定性、低运行成本是实用激光器系统最根本的设计要求. 最近美国国防部高技术研究计划署 (The Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 资助了一系列激光器研发项目, 引领着激光器系统的技术进步和设计创新. 其中最主要的两个项目是超高效率半导体激光光源 (Super High Efficiency Diode Sources, SHEDS) 和相干合成高功率单模发射器 (Coherently-Combined High-Power Single-Mode Emitters, COCHISE). 对半导体激光器的功率效率、光谱特性、光束质量、寿命等提出了综合的技术要求. SHEDS 项目主要针对半导体激光器阵列的功率转换效率, 项目要求是获得 80% 转换效率. 到 2007 年该项目结束时激光二极管的功率转换效率由 2003 年的 45% 提高到了 70% 以上, 成为效率最高的电致发光光源. COCHISE 项目要求获得长寿命、近衍射极限的激光器, 并且对这些激光器阵列进行相干合成.

本文将介绍半导体激光器在功率转换效率、波长稳定性、发散角、光束质量等几个性能方面取得的研究进展, 对半导体激光器的品质进行综合评述.

## 1 提高功率转换效率

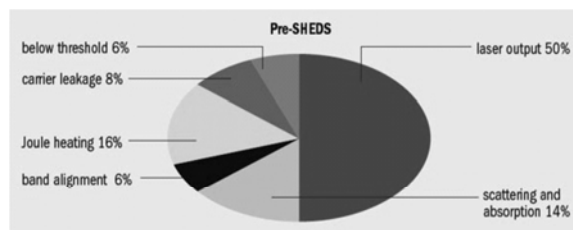
### 1.1 高功率转换效率量子阱激光器

半导体激光器的最大优点是电-光转换效率高.

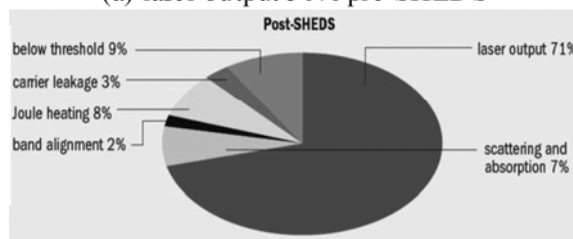
**文献标识码:** A

高的功率转换效率不仅能获得更多的光功率, 同时意味着器件工作产生的废热更少. 废热的减少对于高功率激光系统的实用意义更大, 会大大减少热管理系统的体积和重量.

Alfalight 公司的 R. Williamson 和 M. Kanskar<sup>[1],[2]</sup> 详细分析了 970 nm 大功率激光器的功率损耗来源: 1) 阈值以下损耗, 包括粒子数反转以及一部分非辐射复合造成的损耗; 2) 载流子溢出损耗, 电子和空穴不能有效在量子阱中复合产生的损耗; 3) 焦耳热损耗, 来源于二极管的欧姆接触电阻、半导体体电阻等; 4) 内建电场损耗, 主要由于异质结材料界面能带不对准引起的; 5) 光吸收和散射损耗, 包括波导散射、自由载流子吸收等因素产生的损耗. 通过有针对性的结构设计、工艺改进等措施, Alfalight 公司制作的器件的功率转换效率由 50% 提高到 71%, 各种损耗所占比例也有明显变化, 如图 1. 由图 1 可知,



(a) laser output 50% pre-SHEDS



(b) laser output 71% post-SHEDS

图 1 Alfalight 公司的二极管激光器功率损耗分布  
Fig.1 Power loss analysis of laser diode in Alfalight

对于功率转换效率为 71% 的激光二极管,最大的损耗来源于阈值以下损耗(约占总输入功率的 9%),因此如何降低阈值电流密度成为进一步提高激光器转换效率的关键.减少二极管的废热将大大提高功率转换效率,通过对封装、散热结构等方面的改进,激光器单 bar 的最大输出功率不断提高. Newport 公司的 Spectra-Physics 通过优化外延结构设计、金属有机化学汽相沉积(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)外延工艺和器件工艺,在 25 °C 下 976 nm 波长的单发光区激光二极管获得了 72.2% 的功率转换效率,激光器单 bar 的连续工作输出功率达到 928 W,即将达到具有里程碑意义的单 bar 千瓦的连续激光功率输出.

## 1.2 低阈值激光二极管

目前 GaAs 基高功率、高效率激光器材料都采用传统的应变量子阱结构有源区,阈值电流密度一般在 100-300 A/cm<sup>2</sup> 左右.量子点激光器和(111)面上的极性量子阱激光器是最有希望的低阈值有源区设计.美国新墨西哥州立大学的 G. T. Liu 和 A. Stintz<sup>[3]</sup>等采用阱中点(Dots-in-a-Well, DWELL),用分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)方法在 GaAs 衬底上制作了 InAs 量子点激光器,激光器波长在 1.25 μm 左右.通过优化 DWELL 结构以及外延工艺,7.8 mm 腔长、100 μm 条宽的量子点激光器在 20 °C 脉冲条件下其阈值电流密度最低,为 16 A/cm<sup>2</sup>,仅为通常的 970 nm InGaAs 量子阱激光器(150-200 A/cm<sup>2</sup>)的 1/10.量子点激光器由于外延工艺难以控制,目前不能达到高重复性、批量生产等实用化要求.量子点激光器性能上的主要缺点为:量子点密度引起的增益饱和问题使器件很难实现高功率输出;载流子注入的不可控性造成内量子效率偏低;载流子限制问题使器件温度特性较差等.因此短期内量子点激光器不会进入高功率、高效率的实用化领域.

在 GaAs 的极性晶面如(110)、(111)面生长量子阱结构,将处于 100 kV/cm 量级的压电场中,这个电场极大地改变量子阱的电学、光学特性.希腊的研究者<sup>[4]</sup>用 MBE 方法制作了 GaAs(111)B 面上的量子阱激光器,通过对比(100)面上同样结构器件的阈值电流密度,发现(111)B 面的阈值电流密度(17 K 低温下为 15 A/cm<sup>2</sup>),比(100)面(17 K 低温下为 30-40 A/cm<sup>2</sup>)低 1 倍左右,研究者认为主要是因电场的作用以及(111)B 面的空穴有效质量低造成的.由于目前 GaAs 极性面上的外延工艺很不成熟,器件性能比较差,研究内容限于理论探索和原理验证.

## 2 提高光谱纯度和波长稳定性

半导体激光器作为固体激光器的泵浦源,它发出

的激光被其他激光晶体吸收后,再产生出满足波长、功率、光束质量等应用要求的激光.大多数激光晶体对泵浦源波长的要求是严格的,如最常见的 Nd:YAG 峰值吸收波长为 808±0.5 nm,Er:YAG 晶体对泵浦源要求为 960.5±0.5 nm.因此,如果二极管泵浦源的波长与晶体的吸收波长相差太大,或随温度变化过大,DPSSL 的光-光转换效率将迅速下降.

半导体材料的发光波长受到温度的影响,温度越高发光波长越长,即激光器随温度升高发生波长红移.某些特定的使用环境无法通过稳定工作温度控制发光波长,这时可以通过激光器光栅结构控制不同波长的增益损耗,从而稳定激光器的发光波长.

一种方法是采用外腔光栅,如使用体 Bragg 光栅(Volume Bragg Grating, VBG),它是通过全息光刻技术写入的在光敏玻璃材料中形成的折射率呈周期变化的多层平面结构,对激光器波长有反射滤波作用.B. L. Volodin<sup>[5]</sup>等人将 VBG 引入激光器形成外腔结构,将单 bar 激光器用微透镜进行快轴准直后照射到 VBG 上,VBG 对固定波长进行反射来稳定激光器的输出波长.使用这种外腔结构制作的大功率半导体激光器,谱宽约为 0.2~0.4 nm,峰值波长随温度的变化系数约 0.01 nm/K.这种外腔光栅在单 bar 上可以应用但成本很高,对于堆积(stack)阵列这种方法过于复杂而几乎不能使用.

另一种方法是在器件加工过程中引入内建光栅对每个发光区进行波长稳定和限制.其做法是:在量子阱有源区和波导区生长结束后,对整个外延片进行全息干涉光刻并制作出光栅,最后进行二次外延.这些光栅远离有源区,能够起到减少波长发散、提高波长的温度稳定性的作用,激光器的效率损失仅为 3%~5%.Alfalight<sup>[6]</sup>采用这种内部光栅结构,研制的主动制冷 976 nm 单 bar 在 25 °C 下 50 W 连续输出时获得的最高功率转换效率为 58%,其光谱曲线如图 2.

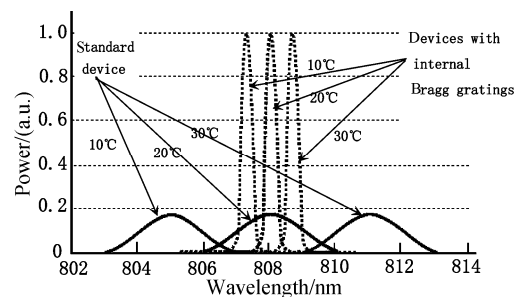


图 2 Alfalight 808 nm 阵列激光器有、无内部布拉格光栅的光谱

Fig.2 spectral of 808nm laser array with Internal Bragg gratings, compared with standard lasers

## 3 光束发散角

相对于气体激光器或其他固体激光器,量子阱半

导体激光器几何尺寸很小,发光区很薄(nm量级)、谐振腔较短(mm量级),因此输出激光的光束发散角很大,不利于远距离传输以及高功率密度应用,也不利于光纤耦合应用.最近人们采用大光腔(LOC)发光区设计扩大了激光器的近场光斑,不仅减小了激光器的垂直发散角,并且获得较低的腔面光功率密度,提高了激光器的可靠性.

光腔大小依赖于半导体材料的波导区结构变化,LOC设计能通过外延生长一次制作完成,工艺简单,效果显著.最简单的方法是将波导区厚度增加,从而扩大激光器的近场光斑.德国FBI研究所(Ferdinand-Broun Institute)<sup>[7]</sup>制作了AlGaAs/GaAsP张应变量子阱激光器,在2 $\mu\text{m}$ 波导区厚度的LOC结构中,获得了 $\theta_{\perp}=26^{\circ}$ ,25 $^{\circ}\text{C}$ 时单bar最大连续输出功率148W,最高效率45%,70W时 $\theta_{\perp}=23^{\circ}$ .英国的P. M. Snowton和G. M. Lewis<sup>[8]</sup>等研究者采用模式扩展层结构,将650 nm激光器的垂直发散角由35 $^{\circ}$ 减小为24 $^{\circ}$ ,见图3.

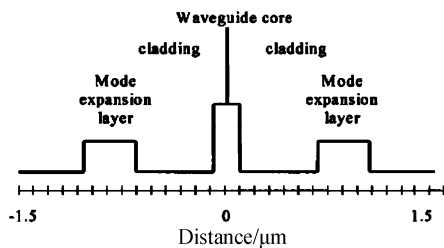


图3 带模式扩展层的650 nm激光器

Fig.3 Near field of 650nm laser diode with mode expansion layer

俄罗斯约飞研究所的L. Ya. Karachinsky和I. I. Novikov等人采用纵向光子带晶体(Photonic Band Crystal, PBC)将激光器近场光斑极大扩展,在980 nm<sup>[9]</sup>采用大于10  $\mu\text{m}$ 的PBC波导层获得了小于5 $^{\circ}$ 的垂直发散角.文献[10]采用周期性Al<sub>0.15</sub>GaAs/Al<sub>0.3</sub>GaAs PBC结构,将基横模完全限制并且过滤掉高阶模式.制作的100  $\mu\text{m}$ 条宽、0.5 mm腔长850 nm激光器在4倍阈值时,垂直发散角为9 $^{\circ}$ .这种极窄发散角的激光器可以达到通常的功率转换效率(40%)和腔面灾变阈值(Catastrophic Optical Mirror Damage, COMD),但阈值电流密度却比通常的半导体激光器高约1倍以上.

## 4 近衍射极限光束

随着近年来空间光通信以及激光相干合成技术的发展,近衍射极限激光器受到了重视.代表性的设计有平板耦合光波导激光器(Slab Coupled Optical Waveguide Laser, SCOWL,美国专利号3899235,1975年)和垂直耦合大面积(Vertically Coupled Large Area, VECLA,美国专利号7376319,2008年)激光

器.这两种设计结构独特,但因对材料外延生长和器件制作的工艺要求很高,未获得普遍应用.Missaggia, Leo J.等报道了SCOWL激光器阵列的功率特性<sup>[14]</sup>和制备方法<sup>[15]</sup>.

更普遍的方法是采用普通的分别限制异质结(Separate Confinement Heterostructure, SCH)激光器材料,通过器件图形的设计获得近衍射极限光束.代表性的结构有锥形(tapered)激光器阵列和 $\alpha$ -DFB结构的激光器阵列.M. Mikulla和A. Schmitt<sup>[11]</sup>等制作了锥形激光器阵列(见图4),发光波长980 nm,阵列宽度为1 cm,腔长2 mm,包含25个锥形发光区.阵列的阈值电流为 $I_{\text{th}}=16.3\text{A}$ ( $J_{\text{th}}=320\text{A}/\text{cm}^2$ ),斜率效率为0.77A/W.连续工作输出25W光功率时功率转换效率达到35%,单个发光区的光束质量因子 $M^2=2.6$ ,其慢轴发散角比通常的宽条激光器减小一个量级,达到0.39 $^{\circ}$ ,但快轴发散角没有改善仍为40 $^{\circ}$ .采用这种锥形阵列激光器,经过微透镜准直后能够获得1 MW/cm<sup>2</sup>的激光功率密度.

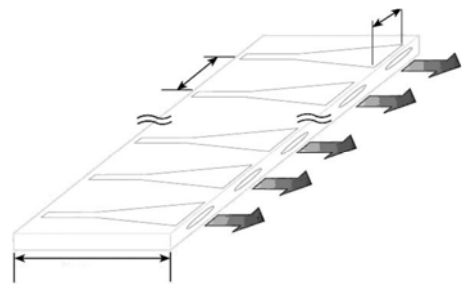


图4 锥形激光器阵列的器件结构

Fig.4 Devices schematics of tapered laser diode arrays

倾斜分布反馈光栅(Angled-grating Distributed Feedback,  $\alpha$ -DFB)结构是制作出与激光器腔面成一定角度的DFB光栅,使该光栅不仅能控制激光器的纵模,而且能控制激光器的横模.A. Schoenfelder和S. D. DeMars<sup>[12]</sup>等在1997年首次引入 $\alpha$ -DFB结构,制作了峰值波长为960.5 nm的 $\alpha$ -DFB激光器阵列,该阵列包含11个发光单元,在8 $^{\circ}\text{C}$ 时能输出连续4W的高质量光束.阵列的峰值波长范围为960.5 $\pm$ 0.5 nm,随温度上升有0.08 nm/K的红移.在5W CW输出时慢轴发散角仅为0.33 $^{\circ}$ .用焦距为8mm的非球面透镜可以将4W以上的光功率聚焦在50 $\mu\text{m}$ 的光斑内.Katrin Paschke和Alexander Bogatov<sup>[13]</sup>等在2003年制作了1064 nm的 $\alpha$ -DFB激光器,采用15 $^{\circ}$ 倾角的光栅,在160  $\mu\text{m}$ 条宽、4 mm腔长、2W的功率输出时,光束质量因子 $M^2=2.0$ ;当输出功率为3W时,光束的稳定性与质量稍差, $M^2=3.0$ .

## 5 结论

高效率、高亮度的半导体激光器已经取得了巨大

的技术进步,在功率效率、光束质量、光束合成等方面有了重大突破,大大改善了 DPSSL 或直接应用激光器系统的效率.未来的半导体激光器将根据具体应用要求,以提高激光器系统的整体效率和性能为目标,使激光器系统更高效、更灵活、更可靠.

#### 参考文献

- [1] WILLIAMSON R. SHEDS leaves high-power legacy[EB/OL]. <http://compoundsemiconductor.net/cws/sign-up;jsessionid.2007.06>.
- [2] KANSKAR M, EARLES T. 73% CW power conversion efficiency at 50W from 970nm diode laser bars[J]. *Electron Lett*,2005, **41**(5): 226-227.
- [3] LIU G T, STINTZ A, LI H, *et al.* The influence of quantum-well composition on the performance of quantum dot lasers using InAs/InGaAs dots-in-a-well (DWELL) structures[J]. *IEEE of Quantum Electronics*, 2000, **36** (11): 1272-1279.
- [4] DELIGEORGIS G, DIALYNAS G. Reduced threshold current in (111)B grown InGaAs/AlGaAs laser diodes: the positive role of piezoelectric effect[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, **90**:121-126.
- [5] VOLODIN B L, DOLGY S V. Wavelength stabilization and spectrum narrowing of high-power multimode laser diodes and arrays by use of volume Bragg gratings[J].*Optics Lett*, 2004, **29**(16):1891-1893.
- [6] PAUL R. On-chip gratings add stability to high-power semiconductor lasers [EB/OL]. <http://compoundsemiconductor.net/cws/sign-up;jsessionid.2006-08>.
- [7] SEBASTIAN J, BEISTER G. High-Power 810nm GaAsP-AlGaAs diode lasers with narrow beam divergence[J]. *IEEE J on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, **7**(2):334-339.
- [8] SMOWTON P M, LEWIS G M. 650-nm lasers with narrow far-field divergence with integrated optical mode expansion layers[J]. *IEEE J on Selected Topics in Quantum Electronics*, 1999, **5** (3) :735-739.
- [9] MAXIMOV M V, SHERNYAKOV Y M. Narrow vertical beam divergence laser diode based on longitudinal photonicband crystal waveguide[J]. *Electron Lett*,2003, **39**(24):1729.
- [10] KETTLER T, POSILOVIC K, SCHULZ O, *et al.* Single transverse mode 850nm GaAs/AlGaAs lasers with narrow beam divergence[J]. *Electron Lett*,2006, **42**(20): 1157-1158.
- [11] MIKULLA M, SCHMITT A. 25-W CW high-brightness tapered semiconductor laser-array[J]. *IEEE Photon Technol Lett.*, 1999, **11**(4): 412-414.
- [12] SCHOENFELDER A, DEMARS S D, LANG R J. Narrowlinewidth high-brightness laser diodes arrays[A]. Digest of the IEEE/LEOS Summer Topical Meetings[C]. 1997: 72-73.
- [13] PASCHKE K, BOGATOV A, *et al.* Modeling and measurements of the radiative characteristics of high-power  $\alpha$ -DFB lasers[J]. *IEEE J on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2003, **9**(3): 835-843.
- [14] HUANG R K, MISSAGGIA L J, DONNELLY J P, *et al.* High-brightness slab-coupled optical waveguide laser arrays[J]. *Photon Technol Lett.*, 2005, **17**(5):959-961.
- [15] MISSAGGIA L J, HUANG R K, CHANN B, *et al.* High-power, slab-coupled optical waveguide laser array packaging for beam combining[C]. *SPIE*, 2007, **6478**:647806.

## Development of High-efficiency High-brightness Semiconductor Lasers

LI Chen<sup>1</sup>, LIU Ying-bin<sup>2</sup>, SONG Xue-yun<sup>3</sup>

(1 China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100846, China)

(2 The 13<sup>th</sup> Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050051, China)

(3 Yangzhou Opto-Electronics Institute of Nanjing University, Nanjing 225009, China)

Received date: 2008-12-18

**Abstract:** The approaches for improving the power conversion efficiency of semiconductor diode were introduced. Reducing the Joule heat and the threshold heat by optimizing the process would be the most critical method for high efficiency LD research in the future. Two approaches, extra-cavity grating and cavity grating, for stabilizing the wavelength were introduced, and the thermal shift of the wavelength would be less than 0.1 nm/K. Several large optical cavity (LOC) designs in epitaxial material structure were applied to enlarge the size of the near field spot, which decreased the vertical beam divergence to be 25° or even less. The design, manufacture and applications of the near diffraction-limit laser diode were analyzed.

**Key words:** Laser diode; Power conversion efficiency; Threshold current density; Beam divergence; Near diffraction-limit

**LI Chen** was born in 1963. He received the B.S. degree from Southwest University in 1984. His main research interests focus on project management and development strategy of key electronic components.

