

动态综述

大功率半导体激光器最新研究进展

张 靖, 刘刚明, 田 坤, 廖 柯

(重庆光电技术研究所, 重庆 400060)

摘 要: 大功率半导体激光器在军事领域和工业领域有着广泛的应用。综述了大功率半导体激光器最新研究进展, 着重于在提高可靠性、提高功率转换效率、波长稳定、拓展波长范围等方面所取得的进步, 并对目前大功率半导体激光器在材料加工领域中的直接应用进行了介绍, 并展望了其发展趋势。

关键词: 大功率半导体激光器; 功率转换效率; 波长稳定; 扩展波长范围

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5868(2007)02-0151-05

Recent Progress of High Power Semiconductor Lasers

ZHANG Jing, LIU Gang-ming, TIAN Kun, LIAO Ke

(Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400060, CHN)

Abstract: High power semiconductor lasers have broad applications in the fields of military and industry. The recent progress of high power semiconductor lasers are reviewed with focusing on reliability, power conversion efficiency, wavelength stabilization and extended wavelength range. Direct applications of high power semiconductor lasers in the field of material processing are introduced.

Key words: high power semiconductor lasers; power conversion efficiency; wavelength stabilization; extended wavelength range

1 引言

由于具有极高的输出功率和良好的光束质量, 在军事应用以及工业加工领域中, 二极管泵浦固态激光器已经成为主流的大功率激光器系统。作为泵浦光源, 大功率半导体激光器是上述激光器系统中的核心元件。随着研究的深入, 近年来大功率半导体激光器的性能得到了快速提升, 这在很大程度上促进了全固态激光器的发展。随着大功率半导体激光器电光功率转换效率和输出功率的提高, 人们也越来越多地尝试将其直接应用于材料加工领域中, 以达到提高稳定性、减小功率消耗和降低运行维护成本的目的。

从上世纪 80 年代起, 人们就开始对大功率半导体激光器进行研究。随着对其物理机制的深入了解

以及半导体工艺的革新, 特别是在材料生长技术上的突破, 大功率半导体激光器在输出功率和可靠性方面都取得了巨大进步。到 2000 年, 单条器件输出功率已经超过 100 W, 功率转换效率约为 40%~60%, 寿命长达 10 000 h。美国国防高技术研究计划署(DARPA)于 2003 年启动了超高效率半导体激光光源项目(super high efficiency diode source, SHEDS), 目标是将功率转换效率提升到 80%以上。在此项目推动下, 最近 3 年中大功率半导体激光器的研究工作获得了显著的进步, 目前单条器件输出功率已经达到 400 W 以上, 功率转换效率超过 70%。

本文将详细介绍近年来国外研究人员在提升大功率半导体激光器性能方面所做的研究工作, 例如: 增强可靠性、提高功率转换效率、实现波长稳定以及拓展器件工作波长范围; 然后讨论大功率半导体激

收稿日期: 2006-12-11.

光器直接应用于材料加工领域中所取得的进展以及发展趋势。

2 大功率半导体激光器技术进展

2.1 增强可靠性

早期的 808 nm 大功率半导体激光器有源层采用接近匹配的 AlGaAs 材料。尽管该材料易于生长,但寿命实验结果显示,采用该材料制作的器件存在长期可靠性的问题。人们通过深入研究,发现 AlGaAs 材料在可靠性方面存在两个固有缺陷:(1) AlGaAs 激光器腔面容易氧化形成缺陷,在大电流大功率工作情况下,缺陷快速发展导致器件失效^[1];(2)在 AlGaAs 材料中,暗线缺陷可以沿〈100〉方向借助位错攀升传播,导致器件快速老化^[2]。从 90 年代开始,两种新的材料被应用于大功率半导体激光器有源层中以提高可靠性,分别是:InGaAlAs^[3]和 InGaAsP^[4]。其中 InGaAlAs 量子阱与波导层、包层之间存在较大的导带差,对注入电子有较强的限制能力,温度特性好;但由于有源层中含 Al,腔面氧化对可靠性仍然有严重影响。

真空解理镀膜方法可以有效抑制腔面的氧化,提高含 Al 激光器的可靠性,但需要比较昂贵的设备。近年来,各种腔面钝化技术被应用于大功率半导体激光器的腔面镀膜中。R. W. Lambert 等人^[5]研究了不同腔面钝化技术对于可靠性的影响,实验中采用了三种不同的钝化方法:(1)Ar 离子清洗并淀积 Si 钝化层;(2)硫化处理;(3)氮化处理并淀积 Si₃N₄ 钝化层。根据器件老化结果,他们指出:方法(1)和方法(2)仅适合于无 Al 或者低 Al 含量激光器腔面钝化,而方法(3)可以有效延长高 Al 含量激光器的寿命。C. Silfvenius 等人^[6]利用俱生氮化物离子束外延方法(native nitride ion beam epitaxy, N²IBE)进行腔面钝化处理。该方法使用氮离子对解理腔面进行清洗和离子注入,注入的氮离子与腔面悬键结合,生成 InN、GaN、AlN 等宽带隙表层,在降低表面态的同时减少了腔面吸收,有利于增强高温大电流注入下激光器的可靠性。图 1 是采用 N²IBE 工艺的激光器与仅使用增透/反射镀膜的激光器在加速老化实验中功率变化的比较。实验结果显示,在 90 °C 结温和 60~80 W 输出功率工作情况下,利用该钝化方法制备的 805 nm 激光器每 1 000 h 的功率变化小于 0.1%,器件有很好的可靠性。

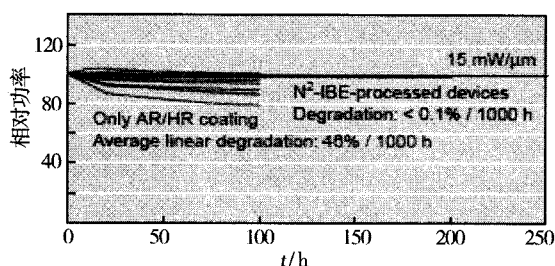


图 1 采用 N²IBE 工艺和仅使用增透/反射镀膜的大功率激光器老化特性对比

2.2 提高功率转换效率

大功率半导体激光器工作时的 pn 结温度对激光器性能影响很大:阈值电流随温度升高呈指数上升,斜率效率随温度升高呈指数下降,寿命随温度升高呈指数衰减。激光器 pn 结温度由工作过程中产生的热量决定。例如一个功率转换效率为 50% 的单条激光器,如果输出 100 W 光功率,则相应地将有 100 W 电功率以热损耗的形式散失。为了维持激光器工作在正常的 pn 结温度,需要有效地移除热损耗,目前一个典型的制冷系统需要消耗 3 倍以上的能量来有效散热。因此,提高激光器的功率转换效率对于降低散热系统能耗、提高激光器光电特性以及延长激光器寿命非常重要。

Alfalight 公司的 R. Williamson 和 M. Kanskar 研究了转换效率为 50% 的 970 nm 单条大功率半导体激光器的能量消耗情况^[7],指出工作过程中产生的多余热量主要由以下几个方面构成:(1)阈值以下消耗,这部分能量用来实现粒子数反转,也包括一部分非辐射复合过程,约占总体消耗的 6%;(2)载流子溢出消耗,电子和空穴不能有效地在量子阱中复合,约占总体消耗的 8%;(3)焦耳热消耗,由串联的接触电阻和体电阻决定,约占总体消耗的 16%;(4)内建电场消耗,由于异质结材料界面处能带不完全对准产生内建电场,约占总体消耗的 6%;(5)吸收和散射消耗,包括波导散射、自由载流子吸收等因素,约占总体消耗的 14%。大功率半导体激光器工作中能量消耗比例如图 2 所示。

半导体激光器的最大功率转换效率可以由下式表示:

$$\eta_{p, \max} = \eta_{\text{ext}} \frac{V_F}{V_0} (1 - 2\sqrt{R_s I_{\text{th}} / V_0})$$

可以看到,为了提高功率转换效率,应当增加输出斜率效率 η_{ext} ,减小串联电阻 R_s 、阈值电流 I_{th} 以及内建电场 V_0 。从激光器结构设计考虑,量子阱层引

入应变可以降低阈值电流;提高温度稳定性可以在较高工作结温下保证高的斜率效率;优化掺杂形貌可以减小串联电阻和内建电场;优化光限制因子可以减少自由载流子吸收,从而减小阈值电流和提高斜率效率。

M. Kanskar 等人^[8]优化了 970 nm 激光器的结构设计,通过细致调整掺杂形貌,他们在 10 °C 热沉温度下获得了 73% 的功率转换效率。P. Crump 等人^[9]也制备了 10 °C 热沉温度下功率转换效率达到 76% 的 975 nm 大功率半导体激光器,该器件在 -50 °C 低温工作条件下,功率转换效率更是高达 85%。

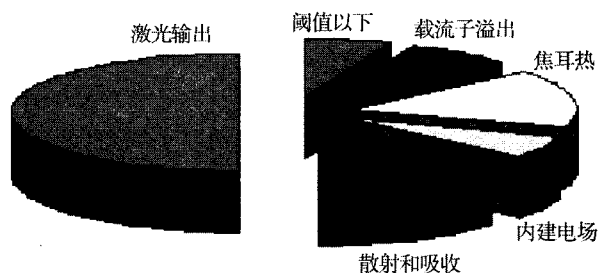


图 2 大功率半导体激光器工作能量消耗示意图

2.3 波长稳定

某些全固态激光器(例如钕镱共掺 YAG 激光器)要求泵浦源有很好的波长稳定性以及较窄的谱线宽度。FP 腔结构的大功率半导体激光器通常具有约 2~3 nm 的谱线宽度,峰值波长随温度变化系数约为 0.3 nm/K,不能满足上述应用要求。近年来,研究人员采用多种方式将光栅引入激光器结构中,成功地实现了波长稳定和谱宽压缩。根据光栅在激光器结构中的位置,这些方式可划分为两类:光栅独立于激光器管芯的外腔结构,例如使用体 Bragg 光栅(volume Bragg grating, VBG)的外腔激光器;光栅刻写于激光器管芯上的内置结构,例如分布 Bragg 反射(DBR)激光器。

2.3.1 使用 VBG 的外腔结构

体 Bragg 光栅是在光敏玻璃材料中形成的折射率周期变化的多层平面结构,可以通过全息曝光方法写入,它对光栅周期确定的波长具有反射滤波作用。B. L. Volodin 等人^[10]将体 Bragg 光栅作为波长稳定元件引入到激光器中形成外腔结构,如图 3 所示,其中微透镜用来实现光束的快轴准直。使用该外腔结构制作的大功率半导体激光器,谱线宽度约为 0.2~0.4 nm,峰值波长随温度变化系数约为 0.01 nm/K。

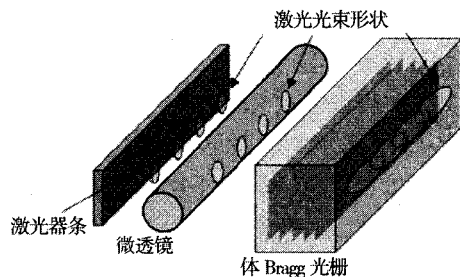


图 3 使用体 Bragg 光栅实现波长稳定的大功率激光器

2.3.2 DBR 激光器

Quintessence 公司的 R. M. Lammert 等人^[11]使用具有 DBR 的表面发射结构实现波长稳定,如图 4 所示。在该结构中,激光器后端面的 DBR 反射器是利用全息干涉曝光方法制作的,具有波长选择功能,用来实现波长稳定和谱宽压缩。激光器腔处于水平方向,通过湿法腐蚀形成的 45°角全反射镜将激光导引到垂直表面发射。该结构的一个巨大优势是可以使用标准半导体工艺制备大功率激光器二维阵列,无需复杂的解理、镀膜、测试、组装过程,同时二维阵列可以使用一个具有良好可靠性的大通道水冷热沉散热,减轻了致冷器失效导致的可靠性问题。采用该结构制作的大功率激光器阵列谱线宽度为 0.9 nm,峰值波长随温度变化系数为 0.08 nm/K。使用 10 × 22 的二维表面发射激光器列阵,Quintessence 公司获得了 300 W 的输出光功率,其电流-功率特性如图 5 所示,最大输出功率受到热饱和和限制。

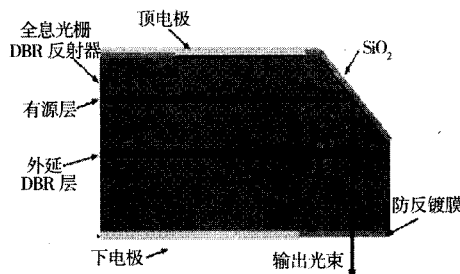


图 4 具有内置分布反射 Bragg 光栅的表面发射激光器

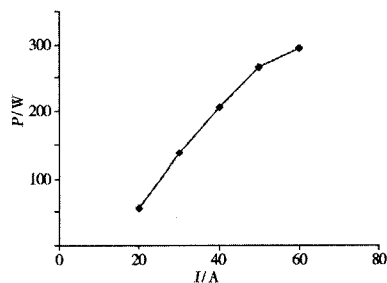


图 5 10 × 22 二维表面发射激光器阵列的电流-功率特性

2.4 拓展工作波长范围

大功率半导体激光器早期主要应用于固态泵浦激光器中,波长集中在 780~1 064 nm。近年来,研究人员利用不同材料体系开发大功率半导体激光器,将其工作波长范围扩展到 660 nm 可见光至 2 μm 红外区域,以满足更广泛的应用需求。

nlight 公司的 P. Crump 等人^[12]研制了 660 nm 的大功率激光器。该波长激光器采用 AlGaInP/GaAs 材料,波导层对载流子限制作用弱,具有温度特性差的固有缺点。他们使用高性能低热阻的水冷微通道制冷器进行散热,并通过优化的钝化镀膜方法解决了灾变性光学腔面损伤问题。研制的 660 nm 单条大功率激光器具有 30% 的填充因子和 1.5 mm 腔长,在 10 $^{\circ}\text{C}$ 工作热沉温度下,1 cm 单条出光功率达到 90 W。

D. Garbuzov 等人^[13]报道了该公司对 1 450 nm 大功率半导体激光器的研发工作。该激光器采用温度特性较差的 InGaAsP/InP 材料,在大电流注入下斜率效率的降低决定了最大输出功率。他们使用了 2.5 mm 的激光器腔长以提高温度特性,并优化结构设计减少激光器内损耗。他们研制的单条器件获得了 38 W 光输出,功率转换效率为 29.5%。

P. Crump 等人^[14]还研制了 1 900 nm 的大功率激光器。该波长激光器采用大应变的 InGaAs/InP 材料,生长上需严格控制以防止晶格弛豫形成缺陷。为了减少 Auger 复合影响,Crump 等人优化了激光器结构以达到最低的阈值电流,并使用高性能热沉实现良好的散热。研制的 1 900 nm 大功率激光器单条器件具有 20% 的填充因子和 1 mm 腔长,在 5 $^{\circ}\text{C}$ 热沉温度下,1 cm 单条出光功率达到 23.5 W。

图 6 显示了 nlight 公司研制的不同波长单条大功率激光器输出功率、功率转换效率随波长的变化关系。可以看到,高的功率转换效率对应于大的输出功率。

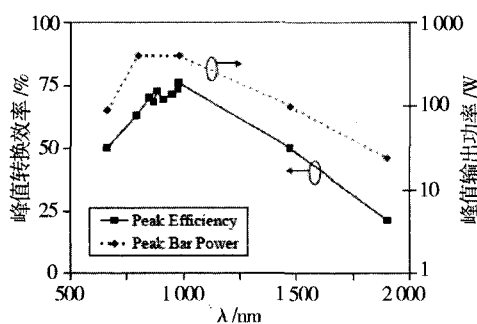


图 6 峰值输出功率、功率转换效率与波长的关系曲线

3 大功率半导体激光器的直接应用

大功率半导体激光器具有功率转换效率高、可靠性好、尺寸小等诸多优点,可以被直接应用于材料加工领域。近年来,人们在此方面进行了大量的研究工作。

Nuvonyx 公司的 J. M. Haake 等人^[15]讨论了该公司研制的大功率直接应用半导体激光器 (high power direct diode laser, HPDDL) 在淬火、焊接、图形去除方面的应用。在淬火应用中,HPDDL 取代了一台灯泵浦的 Nd:YAG 激光器,经过几个月的试运行,HPDDL 显示出了四点明显优势:(1)低的安装成本,仅花费一天时间完成安装;(2)高稳定性和低维护费用,正常运行时间超过 99%;(3)产能显著提高,一个生产周期时间缩短 10%~25%;(4)低的运行成本,功耗低于 Nd:YAG 激光器的 5%。在焊接应用中,相对于传统的金属惰性气体弧焊 (metal inert gas arc welding) 而言,HPDDL 引起的材料变形较小,焊接后处理所需要的工作量减少了 30%;在图形去除应用中,HPDDL 采用脉冲工作方式,在清除表面图案的同时有效防止了基底材料遭到破坏。

相对于目前材料加工领域中普遍使用的 CO₂ 激光器、Nd:YAG 激光器而言,目前大功率半导体激光器的主要缺点是光束质量较差,尚不能满足对光束质量有严格要求的加工应用。F. G. Bachmann^[16]详细讨论了光束质量与输出功率之间的关系,并指出:在大功率半导体激光器堆叠阵列中,随着激光器条数的增加,表征光束质量的束腰半径与发散角乘积线性上升,光束质量下降。他提出通过波长复用方式提升大功率半导体激光器输出功率,并同时保证光束质量。图 7 给出了堆叠阵列中光束质量与输出功率之间的关系,以及目前大功率半导体激光器的直接应用领域。

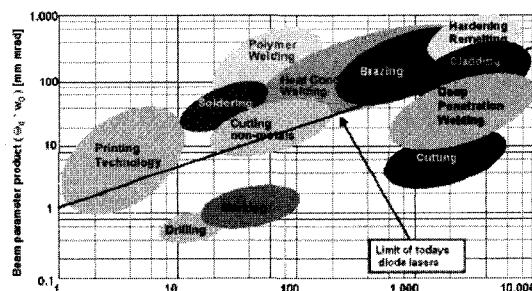


图 7 大功率半导体激光器的光束质量与输出功率关系以及目前的应用领域

大功率半导体激光器以单条为基本单位,可以被灵活地装配成各种几何形状,例如环形、矩形、长线形,这是目前其他激光器例如 CO_2 、Nd:YAG 难以甚至无法做到的。在直接应用于材料加工领域中时,根据用户需求灵活配置单条激光器以形成特定的模块,将成为大功率半导体激光器的一个重要发展方向。

4 结束语

近年来,大功率半导体激光器的研发取得了巨大的进步:优化的腔面钝化镀膜方法使可靠性得到大幅度提高;室温功率转换效率已经提升到 70% 以上;利用外置体光栅或者内置 DBR 光栅实现了波长稳定;工作波长也已经覆盖了从 660 nm 到 2 μm 的整个区域。

除了作为固态激光器泵浦源以外,大功率半导体激光器也被直接使用于材料加工领域中,并在降低成本、提高产能、增强稳定性等方面显示出优势。可以预见,随着输出功率的提高和光束质量的改善,大功率半导体激光器将会在材料加工领域中得到更广泛的应用,根据用户需求,模块化配置将成为一个重要发展方向。

参考文献:

- [1] Tomm J W, Thamm E, Bärwolff A, et al. Facet degradation of high-power diode laser arrays[J]. Appl. Phys. A: Materials Science & Processing, 2000, 70(4): 377-381.
- [2] Waters R G, Bour D P, Yellen S L, et al. Inhibited dark-line defect formation in strained InGaAs/AlGaAs quantum well lasers[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1990, 2(8): 531-533.
- [3] Qu Y, Yuan S, Liu C Y, et al. High-power InAlGaAs/GaAs and AlGaAs/GaAs semiconductor laser arrays emitting at 808 nm[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2004, 16(2): 389-391.
- [4] Asonen H, Aarik J, Salokatve A, et al. High performance laser diode bars with aluminum-free active regions[J]. Optics Express, 1999, 4(1): 3-11.
- [5] Lambert R W, Ayling T, Hendry A F, et al. Facet-passivation processes for the improvement of Al-containing semiconductor laser diodes[J]. J. Lightwave Technol., 2006, 24(2): 956-961.
- [6] Silfvenius C, Blixt P, Lindström C, et al. High COMD, nitridized InAlGaAs laser facets for high reliability, 50 W bar operation at 805 nm[J]. Proc. SPIE, 2004, 5 336: 131-143.
- [7] Williamson R, Kanskar M. Improving the efficiency of high-power diode lasers[J]. Compound Semiconductor, 2004, July.
- [8] Kanska M, Earles T, Goodnough T J, et al. 73% CW power conversion efficiency at 50 W from 970 nm diode laser bars[J]. Electron. Lett., 2005, 41(5): 226-227.
- [9] Crump P, Grimshaw M, Wang J. 85% Power conversion efficiency 975 nm broad area diode lasers at -50 °C, 76% at 10 °C[C]. CLEO, 2006, JWB24.
- [10] Volodin B L, Dolgy S V, Melnik E D, et al. 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): 1 891-1 893.
- [11] Lammert R M, Oh S W, Osowski M L, et al. Advances in Semiconductor Laser Bars and Arrays [J]. Proc. SPIE, 2005, 5 887: 57-67.
- [12] Crump P, Wang J, Patterson S, et al. 400-W peak CW power per bar from 1-cm GaAs bars for emission wavelengths from 800-nm to 980-nm, 90-W at 660-nm [A]. Solid State and Diode Laser Technology Review [C]. 2006, DIODE1-5.
- [13] Garbuzov D, Dubinskii M. InP-based long wavelength sources for solid state lasers pumping[A]. Solid State and Diode Laser Technology Review[C]. 2004, Poster Presentations.
- [14] Crump P, Wang J, Patterson S, et al. Diode laser efficiency increases enable > 400 W peak power from 1-cm bars and show clear path to peak powers in excess of 1-kW[J]. Proc. SPIE, 2006, 6 104: 77-86.
- [15] Haake J M, Zediker M S. High power direct diode laser successes[J]. Proc. SPIE, 2004, 5336: 107-115.
- [16] Bachmann F G. Chances and limitations of high power diode lasers[J]. Proc. SPIE, 2004, 5 336: 95-106.

作者简介:

张 靖(1975—),男,重庆人,2005年毕业于中国科学院半导体研究所,获博士学位,研究方向为大功率半导体激光器、高速激光器及其集成器件。

E-mail: zhangjingsemi@gmail.com