

高功率半导体激光器光束非相干合成技术进展

辛国锋 皮浩洋 沈力 瞿荣辉 蔡海文 方祖捷 陈高庭

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 半导体激光器阵列的输出光功率密度较低、输出光束质量较差的缺点限制了它的广泛应用。介绍了提高输出光功率密度和输出光束质量的非相干技术——波长合成技术、偏振合成技术和空间交叉合成技术的最新进展, 对实现各种技术的结构和实验结果进行了综述报道。

关键词 光电子学; 半导体激光器阵列; 非相干; 光束合成技术

中图分类号 TN248.4

OCIS 140.3298 250.5960 140.2010 140.2020

文献标识码 A

Beam Incoherence Combination of High Power Laser Diode

Xin Guofeng Pi Haoyang Shen Li Qu Ronghui Cai Haiwen

Fang Zujie Chen Gaoting

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract The low power density and the bad beam quality of the laser diode array limit its application fields. The new developments of incoherent technology, such as beam combination, polarization and spatial multiplex, for increasing power density and beam quality are introduced. The new structure and the experimental results of different combination techniques are summarized.

Key words optoelectronics; laser diode array; incoherent; beam combination

1 引言

虽然半导体激光器具有转化效率高、波长覆盖范围广、体积小、重量轻等一系列的优点,已经在光通信等领域得到了广泛应用,但是由于结构的限制,其具有输出光功率密度较低、光束质量较差等缺点,限制了其在材料加工、表面处理、抽运固体介质等方面的进一步应用。为了改善这些缺点,人们提出了利用光束合成的方法提高其输出功率密度,改善光束质量。

光束合成技术可以分为相干合成技术和非相干合成技术,相干合成技术包括线性合成技术(腔内滤波器、相位锁定等)和非线性合成技术(相位共轭、受激拉曼散射等)。相干合成可以大大地提高光束的空间和波长亮度,但是必须控制激光光源的相位或对其进行锁定以满足光束在远场处进行干涉的条件。该方法结构非常复杂,相位的微小变化就会影响合成的效率。而非相干合成技术结构相对简单,而且无需对光束的相位进行控制,它将是实现高功率半导体激光器的首选技术之一。本文详细介绍了高功率半导体激光器光束非相干合成技术——波长合成技术、偏振合成技术和空间交叉合成技术的结构和相应的实验结果,对其在不同场合的应用进行了判断。

2 波长合成技术

波长合成技术(即光谱合成技术)是将不同波长的光束通过光栅等色散元件或滤光镜等元件进行耦合,其结构如图1所示。该结构由激光器阵列单元、传输透镜、衍射光栅和输出耦合镜4部分组成。从半导体激光器发出的不同波长的光波经过透镜,聚焦到衍射光栅上,由于每束到达衍射光栅的光具有不同的入射角,

收稿日期: 2010-05-10; 收到修改稿日期: 2010-06-28

基金项目: 上海市自然科学基金(08ZR1421400)资助课题。

作者简介: 辛国锋(1975—),男,副研究员,主要从事半导体光电器件方面的研究。E-mail: gfxin@siom.ac.cn

经过衍射光栅后可以同轴传输到输出耦合镜输出。此结构的工作原理类似于光谱仪的反向工作。目前采用的衍射光栅主要有平面衍射光栅和体布拉格光栅^[1,2]。此技术可以使激光器阵列的光束质量与单个发光单元的光束质量类似。

波长合成技术结构相对简单,具有对很多光束(10~100个)进行合成实现较高空间亮度的能力,但由于其要求阵列单元具有较宽的光谱,所以此项技术不能在要求单波长或较窄波长的情况下使用,因此不易作为全固态激光器和光纤激光器的抽运源来使用,可以应用于对波长要求不是很严格的激光加工、表面处理、光动力学研究等方面。国外 Aculight 公司已经利用半导体激光器光谱合成技术实现了 50 W 激光输出。国内的光谱合成技术主要集中在光纤激光器方面,对半导体激光器光谱合成的研究刚刚起步,处于理论模拟和实验阶段^[3~7]。

3 偏振合成技术

在偏振合束中,用偏振分束片将偏振方向相互垂直的两束光进行合成,合成后光束的宽度没有改变,这两束光可以在近场和远场进行叠加,而不必考虑其相位关系。结构如图 2 所示。两个半导体激光器阵列首先用微透镜将其光束进行准直,一个阵列经过 $\lambda/2$ 波片改变其偏振方向,与另一个阵列的光束在偏振滤波器处进行合成,光束沿同一个光路进行传播,这样可以增加激光光束的功率密度。由于光束的偏振态只有两个,因此偏振合成技术限制了其对多个光源进行合束的能力。此合成技术可以跟波长合成技术、空间交叉合成技术一块使用,可以进一步提高输出光功率密度。国外 Laserline Inc 公司已经通过偏振耦合技术将半导体激光器直接应用于工业加工,并提供相关的产品。国内在半导体激光器偏振合束方面,科研院所和高校都进行了研究,突破了百瓦级的合成技术。该技术特别适合半导体激光器的直接应用或用于抽运固体激光器、光纤激光器等^[8~10]。

4 空间交叉合成技术

空间交叉合成技术是利用光学元件或其组合,对多个光束进行合成,进而增加光输出功率密度,还可以提高输出光的光束质量。该光学元件包括棱镜、光学直角立方体、细缝条形镜面等。

4.1 利用棱镜

图 3 是用两个棱镜将三个堆栈的激光光束进行合成的示意图,堆栈 1 的光束通过两个棱镜直接输出,而堆栈 2 经过 1 号棱镜反射,堆栈 3 经过 2 号棱镜反射与堆栈 1 的激光光束在同一光路上输出。此结构可以在不改变每个组件光束质量的情况下,将输出光功率密度提高 3 倍,同时增加了组件的总输出功率。可用于抽运固体激光器、光纤激光器。

4.2 光学矩形板和切缝条形镜面

Xin Gao 等^[11]报道了利用光学矩形板和切缝镜面,将 10 个阵列慢轴方向上的光束进行压缩。工作原理如图 4 所示,激光光束经过光学平板后,光束发生水平偏移。每个阵列的准直光束宽度为 10 mm,用两个不

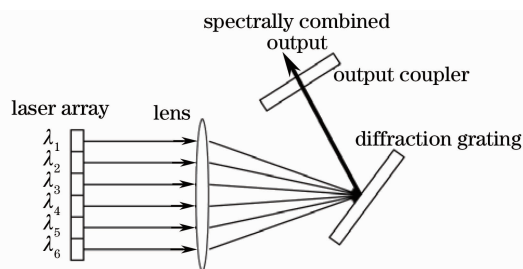


图 1 波长合束示意图

Fig. 1 Schematic of wavelength combining

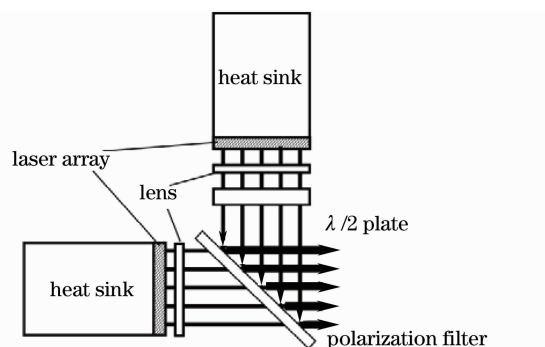


图 2 偏振合束示意图

Fig. 2 Schematic of polarization combining

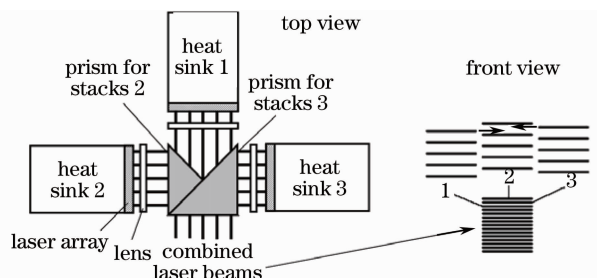


图 3 利用棱镜实现空间交叉合束示意图

Fig. 3 Space cross combining using prism

同倾斜方向的光学矩形板将慢轴方向上的光束偏移成3段(每段宽度3.33 mm),垂直方向的偏移0.58 mm为阵列垂直间距的1/3。偏移的精度由光学矩形管的厚度和倾斜角度决定。慢轴方向上分割的光束由两个镀有膜的切缝条形镜面反射到同一个光路上,可以使慢轴方向的功率密度提高3倍。报道的输出功率近300 W,效率为94%,如文献[11]中的图1所示。此项技术的难点在于矩形板的加工,要求两个面严格平行,在高功率下要考虑激光对光学矩形板的热影响。

4.3 利用切缝条形镜面

切缝条形镜面的基本思想是利用空间交叉和镜面反馈使来自不同方向的激光束合成到同一个发射方向。此技术最好对半导体激光器的快轴和慢轴进行光束整形,压缩发散角。叠层的方式有多种组合,其中有个是如图5所示的水平分布方式。在2004年有文献[12]报道了将两个组件(每个30 Bar)的输出功率叠加并将其聚集成单个光束。实现了连续波长(CW)输出功率3 kW,转化效率92%。该文献利用一个45°放置的高反射镜面和切缝条形镜面实现了垂直方向的合束,工作电流为40 A时的输出功率为768 W,光束尺寸为10 mm×21 mm,对应平均光功率密度为365 W/cm²,合成前光功率密度194 W/cm²,增加了88%。合束后快轴方向上的光学参量乘积由29400 mm·mrad降低到了168 mm·mrad,而慢轴方向与准直后的没有改变,为1200 mm·mrad,可见大大提高了组件的光束质量。同年文献[13]报道了利用三个互成65°角的堆栈和两个交叉的切缝条形镜面,实现了千瓦级的光束合成,当工作电流为60 A时的输出功率达到1516 W,功率密度从原来的291 W/cm²增加到722 W/cm²,用焦距为40 mm,数值孔径为0.33的透镜进行聚焦,功率密度可以达到250 kW/cm²,合成效率可以达到87.6%。

空间交叉合成技术可以实现同一波长的光束在空间进行交叉合成,提高输出功率密度,经过光学元件还可以提高组件的光束质量。该合成技术可以用来抽运全固态激光器和光纤激光器,同时该合成技术还可以与偏振合成技术、波长合成技术复合使用,进一步增加光功率密度。此技术对堆栈Bar条的间距以及输出光平行度提出了更高的要求,同时对切缝条形镜面的机械尺寸控制和镀膜都有较高的要求。国外尤其是日本在该项技术方面处于领先地位^[11~14],未见国内在此方面的实验报道。

5 复合技术

Miyajima等^[14]报道了用切缝条形镜面和偏振合束技术相结合,首先用切缝条形镜面将两个组件(每个30 Bars)的输出光束进行合成,将其聚集成单个光束。实现了CW输出功率3 kW,转化效率92%。再进一步用偏振分束器将两组经空间交叉合成的光束进行合成,实现了CW 5.6 kW输出。用焦距为100 mm透镜聚焦后的光斑尺寸为2.4 mm×0.5 mm(功率密度467 kW/cm²)。

德国利用偏振合成技术与波长合成技术进行复合,实现了6000 W的激光输出功率,输出光束质量为60×400 mm·mrad,根据需要,聚焦光斑可以是线性的也可以是矩形或正方形的。该激光头经聚焦后可以直接用来表面处理。

6 结 论

介绍了提高半导体激光器输出光功率密度的几种常见非相干合束方法,即波长合成技术、偏振合成技术以及空间交叉合成技术。波长合成技术可以对较多个光束进行合成,但此合成技术不能在要求单波长或较窄波长的情况下使用,可以用于表面处理、焊接等只对功率密度有要求的场合。由于光束只有两个偏振态,

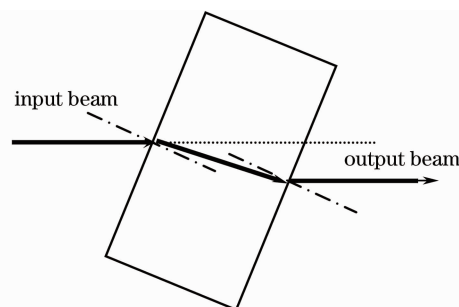


图4 光学矩形板实现光束偏移

Fig. 4 Beam shifting using optical rectangular cubes

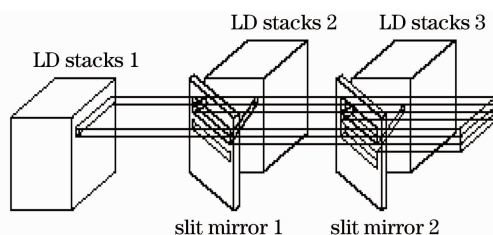


图5 切缝条形镜面合束示意图

Fig. 5 Beam combining using slit mirror

用偏振合成技术只能对两个偏振态相互垂直的光束进行合成。空间交叉合成技术可以实现单一波长光束的合成,同时可以对两个以上光束进行空间交叉合成,此技术利用光学元件不但可以提高输出功率密度,还可以提高光束质量,因此,用该项技术合成的光源可以用来作为全固态激光器或光纤激光器的抽运源。三种合成技术不是完全独立的,它们之间可以进行复合使用,从而进一步提高输出光功率密度,这些技术可以提高半导体激光器功率密度、拓展其进一步应用,是目前国内外研究的热点。

参 考 文 献

- 1 Chuck Hamilton, Steve Tidwell, Dawn Meekhof. High-power laser source with spectrally beam-combined diode laser bars [C]. *SPIE*, 2004, **5336**: 0277~786X
- 2 Oleksiy Andrusyak, Vadim Smirnov, George Venus *et al.*. Beam combining of lasers with high spectral density using volume Bragg gratings[J]. *Opt. Commun.*, 2009, **282**(13): 2560~2563
- 3 Yu Yi, Wang Weimin, Lu Yanhua *et al.*. Simulation of spectrally beam combined diode laser based on grating-cavity[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(2): 189~192
于 益, 王卫民, 鲁燕华 等. 二极管激光光栅外腔光谱合成技术模拟研究[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(2): 189~192
- 4 Liu Bo, Zhang Xue, Han Junting *et al.*. Wavelength beam combining of laser diode array by wavelength2chirped volume Bragg grating external cavity[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(7): 1057~1062
刘 波, 张 雪, 韩军婷 等. 波长啁啾体布拉格光栅外腔实现激光二极管阵列的波长光束组合[J]. *强激光与粒子束*, 2008, **20**(7): 1057~1062
- 5 Liu Bo, Li Qiang, Zhang Xue *et al.*. Wavelength beam combining of laser diode array to get 20 W CW circle spot emission [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(11): 1633~1637
刘 波, 李 强, 张 雪 等. 808 nm 激光二极管阵列波长光束组合 20 W 输出[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(11): 1633~1637
- 6 Li Yongzhong, Fan Dianyan. Beam combining of fiber laser[J]. *Lasers & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(9): 26~29
李永忠, 范滇元. 光纤激光器光束的叠加技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(9): 26~29
- 7 Li Libo, Lou Qihong. Spectral combining techniques of fiber lasers[J]. *Lasers & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(10): 37~41
李立波, 楼祺洪. 光纤激光器的谱叠加技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(10): 37~41
- 8 Gu Yuanyuan, Feng Guangzhi, Shan Xiaonan *et al.*. 808 nm quasi-CW laser diode stack with polarization coupling[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2009, **30**(1): 146~149
顾媛媛, 冯广智, 单肖楠 等. 808 nm 准连续半导体激光迭阵偏振耦合技术[J]. *半导体光电*, 2009, **30**(1): 146~149
- 9 Ding Peng, Cao Yinhua, Su Guoqiang *et al.*. 1 kW high power diode laser with polarization coupled by Gran-Taylor prism [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 290~293
丁 鹏, 曹银花, 苏国强 等. 使用格兰-泰勒棱镜偏振耦合的 1 kW 大功率半导体激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 290~293
- 10 Cao Yinhua, Liu Youqiang, Qin Wenbin *et al.*. Kilowatt diode laser with beam quality better than all solid state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2282~2285
曹银花, 刘友强, 秦文斌 等. 光束质量超过全固态激光器的千瓦直接半导体激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2282~2285
- 11 Xin Gao, Hiroyuki Ohashi, Hiroshi Okamoto *et al.*. Beam-shaping technique for improving the beam quality of a high-power laser-diode stack[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(11): 1654~1656
- 12 Miyajima, Kanh, Gao X. *et al.*. Single-wavelength 5.6 kW direct diode laser with a high-efficiency beam combination[J]. *Jpn. J. Appl. Phys. Part 1*, 2004, **43**(8A): 5269~5272
- 13 Hiroyuki Ohashi, Xin Gao, Hiroshi Okamoto *et al.*. Enhancement of emitting power density with a beam-shaping technique for a high-power laser-diode array stack[J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(10): 2206~2207
- 14 Xin Gao, Hiroyuki Ohashi, Masayuki Saitoh *et al.*. Beam combining for three high-power laser-diode stacks with a stripe mirror technique[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2004, **43**(8B): L1097~L1098