

高亮度半导体激光器无输出耦合镜光栅外腔光谱合束

孙舒娟^{1,2,3}, 谭昊^{1,2*}, 孟慧成^{1,2}, 郭林辉^{1,2}, 高松信^{1,2}, 武德勇^{1,2}, 许放^{1,2,3}

- (1. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;
2. 中国工程物理研究院高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900;
3. 中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088)

摘要: 宽面发射半导体激光器的光谱合束技术对发展高功率直接半导体激光光源具有重要意义。光栅外腔光谱合束基于光栅的波长选择特性和外腔半导体激光技术, 实现单个合束单元的光谱锁定和所有合束单元的合束输出, 输出光束质量与单个合束单元相当, 而亮度和功率得到很大的提高。基于无输出耦合镜光栅外腔光谱合束结构, 实现了单个半导体激光短阵列的光谱合束, 分析了光谱合束的输出光谱、输出功率和光束质量的特性, 获得了 70 A 工作电流下 40.8 W 的连续输出功率, 快轴和慢轴方向的光束质量分别为 0.41 mm·mrad 和 9.16 mm·mrad(包含 95% 能量), 相应的电光转换效率为 38.4%, 亮度高达 67.90 MW/(cm²·sr)。

关键词: 半导体激光器; 光谱合束; 无输出耦合镜; 光栅外腔

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0306006

High brightness diode laser by coupler free grating external cavity spectral beam combining

Sun Shujuan^{1,2,3}, Tan Hao^{1,2*}, Meng Huicheng^{1,2}, Guo Linhui^{1,2}, Gao Songxin^{1,2}, Wu Deyong^{1,2}, Xu Fang^{1,2,3}

- (1. Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;
2. Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;
3. Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

Abstract: Spectral beam combining of a broad area diode laser is a promising technique for direct diode laser applications. Grating external cavity spectral beam combination bases on wavelength selection characteristics of the grating and external cavity diode laser technology to achieve the lock of the single emitter spectrum and the combination of all the sub beam combining elements into one output. The beam quality of the output is equivalent to a single beam combining element, and the brightness and power are greatly improved, simultaneously. Based on the coupler free grating external cavity structure, spectral beam combination of a single diode laser short array stripe was realized. The characteristics of spectrum, power and beam quality of the output beam were analyzed. At the pump current of 70 A, a continuous output power of 40.8 W was obtained. The fast and slow axis beam quality were 0.41 mm·mrad

收稿日期: 2018-10-11; 修订日期: 2018-11-13

基金项目: 微/纳结构材料热物性表征仪器的开发和应用(2013YQ120355); 中国工程物理研究院高能激光科学与重点实验室基金课题 (HEL2018-03)

作者简介: 孙舒娟(1991-), 女, 硕士生, 主要从事半导体激光器合束技术方面的研究。Email: shujuan0807@163.com

导师简介: 武德勇(1968-), 男, 硕士生导师, 主要从事高功率半导体激光技术方面的研究。Email: wudeyong@caep.com.cn

and 9.16 mm·mrad (including 95% energy) respectively, the corresponding electro-optic conversion efficiency was 38.4% and the brightness was up to 67.90 MW/(cm²·sr).

Key words: diode laser; spectral beam combining; coupler free; grating external cavity

0 引言

大功率半导体激光器(High Power Diode Laser, HPDL)常被用作固体激光器(如薄片,光纤和板条激光器)的泵浦源,因此其效率、激光发射的空间和光谱特性决定了固体激光器的性能。HPDL 也被直接用于照明技术和材料加工(如表面处理,焊接,增材制造,切割)等工业领域,并且显示了替代固体和光纤激光器的潜力。输出功率和亮度的增加是直接 HPDL 应用范围扩大的主要驱动力,具有高光束质量和高功率的单元器件不断发展,如宽面发射垂直发射半导体激光器(Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL)、锥形半导体激光器(Tapered Diode Laser, Tapered-DL)、板条耦合光波导激光器(Slab-Coupled Optical Waveguide Laser, SCOWL)等,并且正在被不同的合束结构来实现直接 HPDL 输出^[1-2]。

美国麻省理工学院于 2000 年提出光谱合束(Spectral Beam Combination, SBC)的概念并将其应用于半导体激光器的合束,在不降低光束质量的情况下,实现了半导体激光器输出功率和空间亮度的提高^[3]。与相干合束相比,SBC 不需要对发光点的相位、光程等进行精确控制,是一种更容易实施的合束方法。与其他常规非相干合束方法相比,如空间或偏振光合束,SBC 技术可以保持光束质量并大大增加空间亮度。自 2000 年以来,国内外许多研究机构对光谱合束展开了深入的研究并取得了许多重要进展。美国 TeraDiode 公司推出了运用光谱合束技术的 2 kW 直接半导体激光光源,并且利用其 2 kW 技术展示了 4、6、8 kW 高亮度尾纤输出光源产品,例如其 4 kW 光纤(100 μm/~0.08 NA)耦合输出产品可获得 2 500 MW/(cm²·sr)的亮度,电光效率为 44%^[4]。美国 TRUMPF Laser GmbH 公司在 2015 年采用超窄带 TFF 外腔进行波长锁定、透射式衍射光栅进行合束的结构进行半导体激光器的光谱合束,获得功率为 550 W、光谱带宽 37 nm 的激光输出^[5]。德国夫朗和费实验室的 Stefan Hengesbach 等在 2013 年提

出了一种基于 VBG 的光谱合束结构,采用 VBG 外腔波长锁定阵列条并利用 VBG 作为波长复用元件,在电流 120 A 时得到功率大于 200 W,亮度大于 70 GW/(cm²·sr) 的输出,输出光束 M^2 因子约为 45^[6]。国内北京工业大学^[7]、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所^[8]、上海光学精密机械研究所^[9]、四川大学^[10]、中国工程物理研究院应用电子学研究所^[11]等也展开了相关研究,其中四川大学对光谱合束相关理论模型进行了数值模拟和详细分析^[12],中国工程物理研究院应用电子学研究所在 2017 年采用输出耦合镜光栅外腔结构进行三个叠阵的光谱合束,获得了 70 A 电流下 579 W 的连续输出,快慢轴 M^2 因子分别为 14.7 和 18.4,亮度达到 232 MW/(cm²·sr)^[13]。

在以上不同 SBC 构架中,关于输出耦合镜光栅外腔结构的研究已经很多。TeraDiode 于 2016 年提出无输出耦合镜光栅外腔光谱合束结构,并利用 12 个阵列条合束获得了大于 600 W 的输出功率^[4,14]。国内关于无输出耦合镜光栅外腔结构研究较少,文中基于半导体激光器短阵列,进行了无输出耦合镜光栅外腔光谱合束的研究。在输出耦合镜 SBC 中,变换柱透镜将光源发射的光束重叠到光栅上,产生两个 0 级和一个 1 级光束,1 级光束是输出光束,输出耦合镜将部分 1 级光束反射回发光单元用于锁定波长,而两个 0 级光束通常需要光束转储。而在无输出耦合镜 SBC 中,使用 0 级光束作为反馈光,其一个最大的优点是大部分光被重新循环和利用,而不需光束转储,克服了 1 级反馈锁定腔存在的多种问题,例如大量的 0 级光功率被浪费,输出光束被望远镜系统拦截等。该研究实现了单个半导体激光短阵列的光谱合束,获得了 70 A 工作电流下 40.8 W 的连续输出功率,快慢轴光束质量分别为 0.41 mm·mrad 和 9.16 mm·mrad(包含 95% 能量),相应的电光转换效率为 38.4%,亮度达 67.90 MW/(cm²·sr)。

1 理论分析及实验装置

1.1 理论分析

图 1 为输出耦合镜光栅外腔 SBC 结构示意图,

图 2 是无输出耦合镜光栅外腔 SBC 结构示意图。与图 1 所示结构相比,无输出耦合镜光栅外腔结构包括快轴准直镜(Fast Axis Collimator,FAC)、慢轴准直镜(Fast Axis Collimator,FAC)、变换柱透镜 A,衍射光栅,变换柱透镜 B,0°反射镜 A,滤波元件和 0°反射镜 B。半导体激光光源在变换柱透镜 A 的焦平面上,反射镜 A 在变换柱透镜 B 的焦平面上,两变换柱透镜形成远焦望远镜系统,光栅到两个透镜的距离为透镜焦距。从半导体激光阵列条发出的各单元光束通过变换柱透镜 A 叠加到衍射光栅上,1 级衍射光作为输出光束,0 级光束(图示为透射通过光栅)被变换透镜 B 截取,在反射镜 A 处成光源的实像。光源实像被反射镜 A 反射沿原光路反向传播,此时变换柱透镜 B 充当反馈光(光源的实像)的变换透镜并且将光束叠加到衍射光栅上。反馈光的一部分经光栅透射回到半导体激光器腔内用于锁定波长,而另一部分被衍射到达 0°反射镜 B,经过反射镜 B 反射后其中多数再次经过光栅衍射被重新投射到反射镜 A,另一部分透过光栅作为输出。因此输出光束由两部分组成:从反射镜 B 出发经过光栅的透射光和从光源出发经过光栅的 1 级衍射光组成。反馈光束

由两部分组成:从反射镜 A 出发经过光栅的透射光束和由反射镜 B 出发经光栅衍射到达反射镜 A 再次被反射经过光栅的透射光束。

根据 Lang-Kobayashi 理论模型^[15],在不考虑半导体激光单元之间串扰的情况下,其等效谐振腔如图 3 所示。图中 R_1 和 R_2 分别为半导体激光器后腔面和前腔面反射率, ηG 为光栅 1 级衍射效率, R_{ex1} 和 R_{ex2} 分别为反馈光束中两部分的等效反射效率。反馈光束一部分为从反射镜 A 出发经过光栅的透射光束,因此 $R_{ex1}=(1-\eta G)^2$,另一部分为由反射镜 B 出发经光栅衍射到达反射镜 A 再次被反射到光栅的透射光束,因此 $R_{ex2}=(1-\eta G)^2\eta G^2$ 。

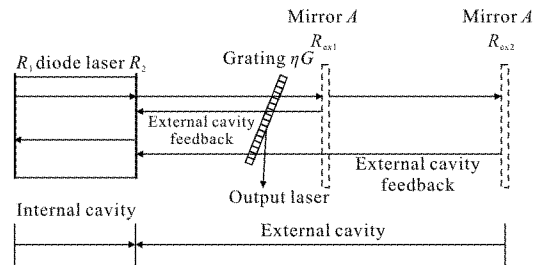


图 3 无输出耦合镜光栅外腔光谱合束结构等效谐振腔

Fig.3 Schematic of the equivalent cavity of the coupler free SBC

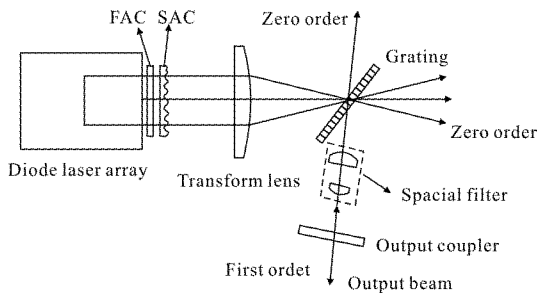


图 1 输出耦合镜光栅外腔结构光谱合束原理示意图

Fig.1 Schematic of output coupler grating external cavity SBC

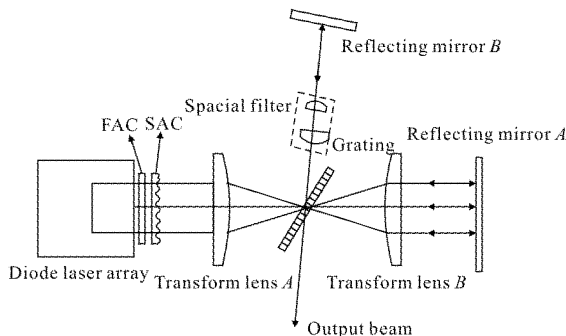


图 2 无输出耦合镜光栅外腔结构光谱合成原理示意图

Fig.2 Schematic of coupler free grating external cavity SBC

实验采用光栅衍射效率为 94%，外腔反馈效率 R_{ex} 约为 0.7%，芯片使用前腔面镀增透膜半导体激光光源,前腔面反射率 $R_2 < 0.1%$,外腔反馈强度大于前腔反馈,足以抑制内腔模式实现波长锁定。波长锁定后的残余光谱线宽由其内腔模式特性与外腔模式强度和频谱共同决定。光源的前腔反射率 R_2 越低,等效外腔反射效率 R_{ex1} 和 R_{ex2} 越高,系统的稳频能力就越强,但外腔反射率超过一定值之后,线宽窄化效果趋于稳定,无论是进一步增加反射效率还是降低激光器前端面的反射率,均难以使线宽进一步窄化。S. Donati 等详细阐述了单模半导体激光器中反馈强度和腔长对残余线宽的影响^[16],外腔耦合带宽描述了在谐振腔往返之后能够完全重新映射到起始发光点中的光学反馈的最大谱线宽度,可以被视为无源的外腔滤波器,无论半导体激光器为何种类型,发光单元的残余谱线宽度 $\delta\lambda$ 都可以通过外腔耦合带宽 $\delta\lambda_{cb}$ 来进行估算,在忽略透镜像差和光束畸变的理想情况下^[17]:

$$\delta\lambda \leq \delta\lambda_{cb} = 2D_a^{-1} \cdot \theta_{em,SA} \cdot f_{SAC} \cdot f_{TL}^{-1} \quad (1)$$

式中： $\delta\lambda$ 为发光单元的残余谱线宽度； $\delta\lambda_{cb}$ 为外腔耦合带宽； $D_\alpha=1/d\cos\alpha$ 为光栅角色散光栅的角色散， d 为光栅周期， α 为光束入射角； $\theta_{em,SA}$ 表示由发光点发出未经准直的光束慢轴发散角； f_{SAC} 为慢轴准直镜焦距。

光谱合束中半导体激光阵列条上不同发光点被锁定在不同波长，相邻发光点中心波长间隔 $\Delta\lambda(n)$ 表示为：

$$\Delta\lambda(n)=\frac{d\cdot p}{f_{TL}}\cos\left(\alpha_{Littrow}+\frac{n\cdot p}{f_{TL}}\right), n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2)$$

式中： n 为阵列条上发光点的编号； p 为阵列条上发光点间的间距； $\alpha_{Littrow}$ 为光栅 Littrow 角。由公式(2)可以看出，在选定光栅之后，相邻合束单元波长间隔由变换柱透镜的有效焦距 f_{TL} 和光源发光点间间隔 p 来共同决定，且随着发光点位置不同，相邻发光单元间的波长间隔不同。当所选光栅的 Littrow 角较小，即 $\alpha_{Littrow}$ 与 $n\cdot p/f_{TL}$ 可比拟时，波长间隔 $\Delta\lambda(n)$ 随发光点位置变化明显，在输出光谱中波峰分布呈不均匀状态，在光谱上表现为随着 n 的增大从中心波长向两侧，光谱间隔逐渐减小。实验所选光栅的 Littrow 角较大，满足 $\alpha_{Littrow} \gg n\cdot p/f_{TL}$ ，此时公式(2)简化为：

$$\Delta\lambda=\frac{d\cdot p}{f_{TL}}\cos\alpha_{Littrow} \quad (3)$$

公式(3)表明，在一般情况下，合束输出光束的波长间隔近似相等，且实验所用的变换柱透镜有效焦距越长，波长间隔越小。可以得出在光谱合束方向上有 N 个发光点的光谱合束输出光谱展宽 $\Delta\Lambda$ 为：

$$\Delta\Lambda=(N-1)\frac{d\cdot p}{f_{TL}}\cos\alpha_{Littrow} \quad (4)$$

1.2 实验装置

实验装置如图 4 所示。实验采用微通道(MCC)冷却方式，冷却水温度是 20℃。半导体激光短阵列有 9 个发光点，发光点条宽为 100 μm，相邻发光点间隔为 500 μm，中心波长为 976 nm，准直前快轴(Fast Axis, FA)和慢轴(Slow Axis, SA)发散全角分别为 10°和 50°(包含 90%能量)，使用有效焦距 $f_{FAC}=1$ mm 的快轴准直镜对阵列条出射光束进行快轴方向准直，有效焦距 $f_{SAC}=3$ mm 的慢轴准直镜对慢轴方向准直。两变换柱透镜焦距 $f_{TL}=330$ mm，为了减小耦合腔效应的影响，变换柱透镜也采用增透处理。柱

面望远镜系统放置在光学反馈路径中，由于其横向压缩光束，表现出较大衍射角的串扰光束被进一步偏转而不能垂直入射到 0°反射镜 B，因此而无法从外腔反馈回到内腔，起到充当空间频率滤波器抑制串扰的作用。选用高效率透射式衍射光栅，光栅刻线 1 600 lines/mm，Littrow 角 $\alpha_{Littrow}=51.33^\circ@ \lambda_0=976$ nm，在波长 966~989 nm 范围内衍射效率约为 94%。光栅放置在合束单元中心光线以 Littrow 角入射的角度下。

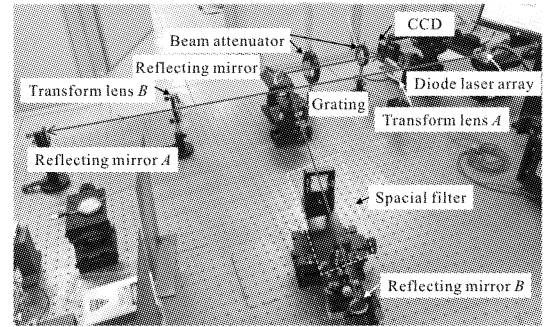
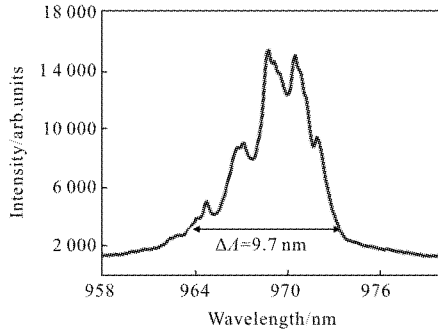


图 4 半导体激光短阵列无输出耦合镜光谱合束实验装置
Fig.4 Experimental setup of the coupler free SBC based on diode laser short array

基于以上实验装置的结构参数，由公式(1)可得理想情况下外腔耦合带宽为 $\delta\lambda_{cb}=0.62$ nm，使用耦合带对稳频发光单元残余线宽的上限进行估算，该实验发光点残余线宽 $\delta\lambda \leq 0.62$ nm，由公式(3)可以算出相邻发光点间波长间隔 $\Delta\lambda$ 为 0.59 nm，由公式(4)可以算出输出光谱展宽 $\Delta\Lambda$ 为 4.74 nm。

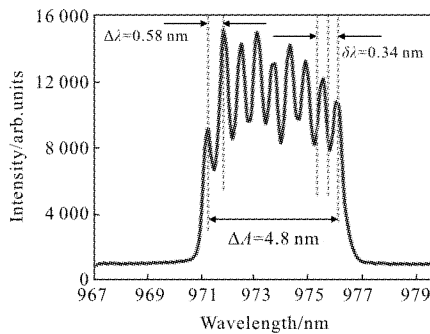
2 实验结果及讨论分析

图 5(a)为前腔增透半导体激光短阵列在自由运转、驱动电流为 70 A 时的光谱图，其线宽为 9 nm (包含 95%能量)。图 5(b)~(d)为光谱合束输出光谱，整个光谱有 9 个明显的谱峰。在工作电流为 70 A 时，如图 5(d)所示，半导体激光阵列的 9 个发光点稳定在谱宽为 $\Delta\Lambda=6.1$ nm 的光谱带宽内，中心波长 $\lambda_c=974.3$ nm，相邻光谱间隔平均约为 $\Delta\lambda=0.7$ nm，发光点的剩余谱线宽度平均约为 $\delta\lambda=0.42$ nm。残余线宽小于理论算得的外腔耦合带宽，而光谱间隔和输出谱宽与理论值之间存在偏差，其原因之一是实验中的中心光束到光栅上的入射角与 Littrow 角 $\alpha_{Littrow}$ 有所偏差，导致光栅的角色散更高。考虑串扰、像差和实验装调误差等因素，实验结果与理论相符合。



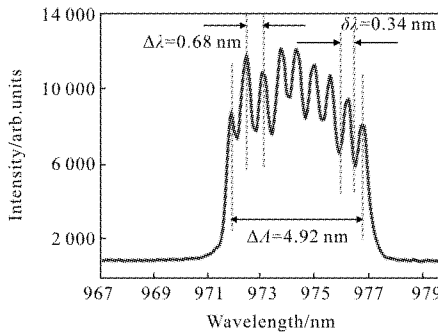
(a) 驱动电流 70 A 时自由运转光谱

(a) Spectrum of the free running short array at pumping current 70 A



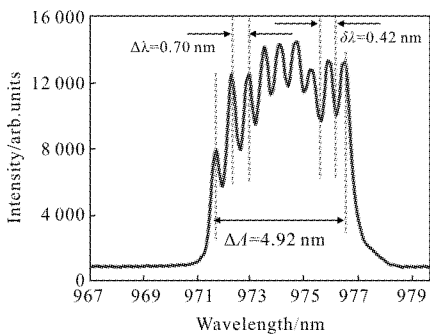
(b) 驱动电流 30 A 时光谱合成锁定的光谱

(b) Spectrum of the short array by SBC at pumping current 30 A



(c) 驱动电流 50 A 时光谱合成锁定的光谱

(c) Spectrum of the short array by SBC at pumping current 50 A



(d) 驱动电流 70 A 时光谱合成锁定的光谱

(d) Spectrum of the short array by SBC at pumping current 70 A

图 5 半导体激光短阵列输出光谱

Fig.5 Spectrum of the diode laser short array

由图 5 可以看到,从低电流值开始到最大工作电流 70 A,锁频发光单元的残余线宽由 0.34 nm 增加到 0.42 nm。为排除线宽展宽的热性质,实验在脉冲工作状态下,由热效应带来的影响如微透镜中的热透镜效应或 FAC 的热引起的准直误差可以忽略,仍可以观察到线宽变宽现象,因此,线宽展宽效应不具有热性质。那么这种锁频发光单元残余线宽与工作电流相关的一种原因是随着电流的增加,慢轴方向辐射电场的高阶横模限制了激光器谱宽的窄化^[15]。半导体激光光源发光单元线宽随着电流的增加而线性变化,低电流时残余线宽小于耦合带宽,随着电流的增加,残余线宽显著增加,高电流时接近相应耦合带宽的值。

该光谱显示出较低的谱峰间隔深度,稳定发光点的谱线并未完全分立,这说明外腔中存在串扰现象。串扰是由于反馈光束与其光轴存在角度偏差,一个发光单元的反馈子束经过外腔反馈和光栅衍射后,部分耦合到相邻发光单元,导致相邻发光单元产生额外的寄生波长。虽然在反馈光路中加入柱面望远镜系统进行串扰抑制,但光谱锁定效果与输出耦合镜光栅外腔光谱合束得到的效果还有一定差距^[11],串扰强度随着电流的增大而增强,分析因为在输出耦合镜光栅外腔结构中,除望远镜系统对反馈光进行一次滤波之外,柱面外腔镜能够对反馈光束进行二次准直。另外,在无输出耦合镜结构中,由反射镜 A 反射透过光栅的光束未经滤波直接作为反馈回到发光单元,产生该结构本身难以避免的固有串扰。串扰强度表现出电流依赖性的则是因为未经滤波的这部分反馈光随电流的增大而快速增大。进一步串扰抑制的方法:一是在变换柱透镜 B 和反射镜 A 之间加入串扰抑制望远镜系统,将表现出较大发散角的串扰光束过滤;二是增加光栅到反射镜 B 之间的距离从而加大光栅和反射镜 B 之间的反馈光束的等效光程,使得离轴发散反馈光无法回到发光点内腔。

图 6 给出了在 SBC 模式和自由运转模式下,短阵列的功率和电光特性。自由运转 70 A 电流下,输出功率为 60.6 W,电光效率为 57%。经过无输出耦合镜光栅外腔光谱合束在 70 A 的电流下实现了 40.8 W 的输出功率,相应的电光转换效率为 38.4%。

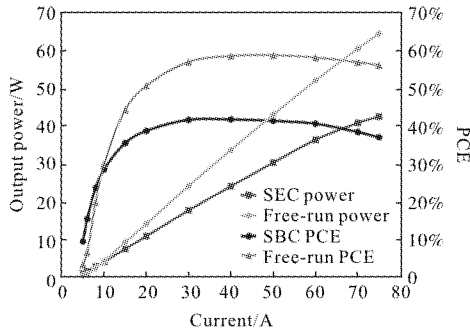


图 6 半导体激光短阵列自由运转和光谱合成的 $P-I$ 特性和电光转换效率曲线

Fig.6 $P-I$ and electro-optic conversion efficiency curves of the short array in free running and coupler free SBC model

与半导体激光器自由运转的值相比,在 70 A 驱动电流下,合束输出光束的电光转换效率降低了约 19%,原因为:

(1) 光束到光栅上的入射角与光栅 Littrow 角有所偏差,导致光栅 1 级衍射效率下降,光栅衍射前后损失大量光功率;

(2) 光束通过变换柱透镜 A 叠加到光栅时,由于存在像差导致合束单元在光栅处的光斑并不能完全重合,使得 0 级光束(透射光束)所携带的光源位置信息出现偏差,被变换透镜 B(同样存在像差)截取成像在反射镜 A 上的实像与光源本身有较大出入,当光源实像被反射离开反射镜 A 第二次经过光栅,所产生的衍射光束不能垂直入射到反射镜 B 上,因此该部分光束经过多次反射和衍射,发散角不断增大而溢出腔外导致输出光束功率下降,此外因像差引起的光斑不完全重合,会导致反馈光束不能很好地回到原发光单元而产生发光单元的串扰,这也是图 5 所示谱峰间隔深度较差的原因之一;

(3) 谐振腔内的光学器件也将吸收部分光功率引起附加吸收损耗;

(4) 实验所用 9 个发光点的半导体激光器短阵列,由封装等因素引入了“smile”效应,“smile”效应是指阵列条上的发光点在光学近场质心位置彼此之间具有偏移,阵列条“smile”的原因与芯片的安装和封装应力有关,相应参数被定义为最高和最低发光点之间的高度差。阵列条“smile”使得各个合束单元接收到的反馈强度不同,从而造成个别合束单元的输出功率下降,并同时产生不完全锁定和快慢轴光

束质量退化的现象。

利用一焦距为 100 mm 的聚焦镜和 CCD 测量合束光束的远场光斑,光斑形状近似椭圆,如图 7 所示,图 7(a)~(d)分别是驱动电流为 20、30、50、70 A 时的远场光斑图样。

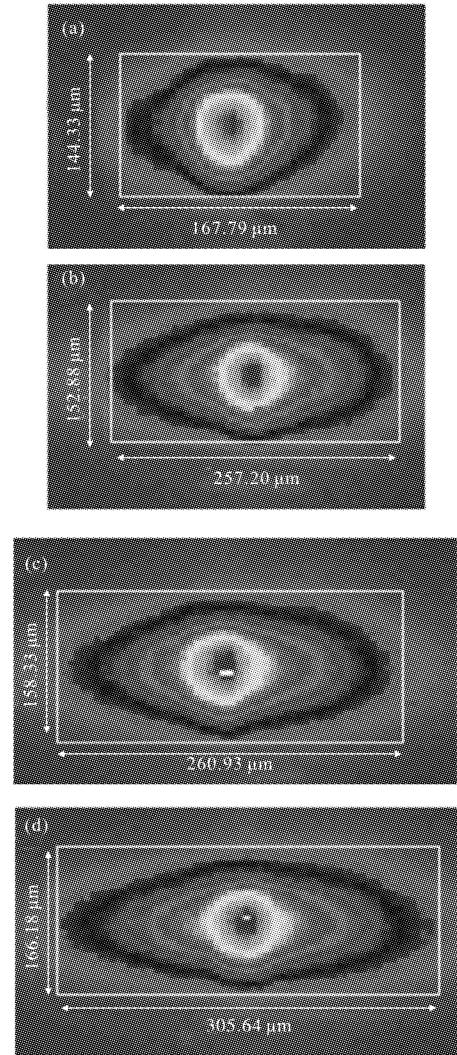


图 7 工作电流分别为 20、30、50、70 A 时合束光束远场光斑
Fig.7 Far field spot of spectral combined beam at pumping current 20,30,50,70 A

在注入电流为 70 A 时,如图 7(d)所示,快轴和慢轴方向光斑尺寸 $H=166.18 \mu\text{m}$ 和 $W=305.64 \mu\text{m}$ (包含 95% 能量),则可以计算出快轴方向发散角 $\theta_{\text{ou,FA}} = 0.83 \text{ mrad}$,慢轴方向发散角 $\theta_{\text{ou,SA}} = 1.52 \text{ mrad}$,根据光参数积计算公式

$$Q_{\text{BPP}} = \theta \cdot \omega \quad (5)$$

式中: Q_{BPP} 为光参数积; θ 为光束远场发散角; ω 为光

束束腰半径。

结合实验测得光束束腰半径,计算出快慢轴光参数积分别为 $Q_{BPP,FA}=0.41 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 、 $Q_{BPP,SA}=9.16 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 。同理可计算出驱动电流分别为 20、30、50 A 时的光参数积,如图 8 所示。

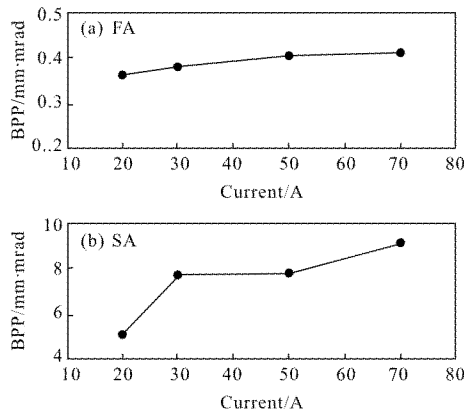


图 8 合束输出光束的 $Q_{BPP,FA}$ 和 $Q_{BPP,SA}$ 随电流的变化趋势

Fig.8 Trend of $Q_{BPP,FA}$, $Q_{BPP,SA}$ with current in combined beams

图 8 给出了合束输出光束的 $Q_{BPP,FA}$ 和 $Q_{BPP,SA}$ 随电流的变化趋势。快轴方向 FA 上,随着电流的变化, $Q_{BPP,SA}$ 值保持在 $0.36\sim 0.41 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 的范围内,基本保持近衍射极限 ($Q_{BPP} \approx 0.3 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$)。在合束方向,即 SA 方向上,光参数积在低电流下约为 $5.03 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 。随着半导体激光器电流的增加, $Q_{BPP,SA}$ 不断增加并在阵列条最大工作电流下达到 $9.16 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 的值。

通常,外腔合束输出光束的空间亮度由频谱锁定的半导体激光阵列的输出功率与腔体输出光束的光参数积之比来定义,理想情况下该光参数积等于单个发光单元输出光的光束质量。图 7 结果表明,与单个未锁定发光单元的光束质量 ($Q_{BPP,em,SA} \approx 4.4 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$) 相比,合束方向 SA 方向的输出光束质量明显更大。导致光束质量恶化的主要机制除了阵列条“smile”外还有:

(1) 发光点间光谱串扰。存在串扰现象的发光单元被部分稳定在寄生波长处,这部分光不满足光栅的 1 级衍射,将不会被合束元件定向地合成到输出光束中,因此导致输出光光束质量的恶化。

(2) 稳频发光单元的残余谱线宽度。由于光栅的角色散作用,与单色光束 ($\delta\lambda=0$) 相比,存在一定谱宽的光束经光栅衍射后输出光束发散角将增加,大角

度发散光将导致光束质量的严重恶化。因此残余线宽通过影响合束输出光束的发散角 $\theta_{ou,SA}$ 影响光束质量,随着电流的增加,残余线宽增加,最终导致 SA 方向 $Q_{BPP,SA}$ 增大,这与图 6 所示残余线宽的增加相一致。

SBC 输出光束的辐射亮度通过下面的公式进行计算^[11]:

$$B = \frac{P}{16 \cdot Q_{BPP,FA} \cdot Q_{BPP,SA}} \quad (7)$$

式中: B 为光束空间亮度; P 为光束功率。所以 70 A 工作电流下输出激光亮度为 $67.90 \text{ MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$, 达到了输出耦合镜单阵列条光谱合束研究结果的 2 倍左右^[11]。

3 结论

基于无输出耦合镜光栅-外腔光谱合束技术,实现了单个半导体激光短阵列的光谱合束,获得了 70 A 工作电流下 40.8 W 的连续输出功率,快慢轴光束质量分别为 $0.41 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 和 $9.16 \text{ mm}\cdot\text{mrad}$ (包含 95% 能量),电光转换效率为 38.4%,亮度达到了 $67.90 \text{ MW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 。光谱合束输出光谱和光束质量表现出明显的电流依赖性,输出光谱特性与理论计算值相吻合,其中发光点的残余线宽可以通过外腔耦合带宽进行估算,随着电流的增大残余线宽增大并接近外腔耦合带宽,这也是合束方向上光束质量随电流增大而增大的原因之一。相比于输出耦合镜光栅外腔结构,利用光栅 0 级光束实现了发光单元的有效反馈锁定,避免了 0 级光束的转储和浪费。另外,单阵列条输出功率有限,在高功率半导体激光光源的研制中,可以采用多个阵列条快轴方向堆栈而成的半导体激光器叠阵来实施光谱合束。以光谱合束技术为核心,将空间合束、偏振合束、密集光谱合束、粗谱合束、光纤耦合输出多路复用合束等多技术相结合,来增加合束叠阵的数量,能够很大程度改善直接输出半导体激光器的光束质量和亮度,实现千瓦级输出,是扩大半导体激光器应用范围的最有效途径之一。

参考文献:

- [1] Hengesbach S, Poprawe R, Hoffmann D, et al. Brightness

- and average power as driver for advancements in diode lasers and their applications [C]//High-Power Diode Laser Technology and Applications XIII. International Society for Optics and Photonics, 2015, 9348: 93480B.
- [2] Heinrich A, Hagen C, Harlander M, et al. Aplanatic beam shaping for diffraction limited beam circularization of tapered laser diodes [C]//High-Power Diode Laser Technology and Applications XII, International Society for Optics and Photonics, 2014, 8965: 89650W.
- [3] Fan T Y, Sanchez A, Daneu V, et al. Laser beam combining for power and brightness scaling [C]//Aerospace Conference Proceedings, 2000 IEEE, 2000, 3: 49-54.
- [4] Huang R K, Chann B, Burgess J, et al. Teradiode's high brightness semiconductor lasers [C]//Components and Packaging for Laser Systems II, International Society for Optics and Photonics, 2016, 9730: 97300C.
- [5] Zimer H, Haas M, Nagel S, et al. Spectrally stabilized and combined diode lasers [C]//High Power Diode Lasers and Systems Conference (HPD), 2015 IEEE, 2015: 31-32.
- [6] Hengesbach S, Krauch N, Holly C, et al. High-power dense wavelength division multiplexing of multimode diode laser radiation based on volume Bragg gratings [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(16): 3154-3157.
- [7] Zhu Zhanda, Gou Long, Jiang Menghua, et al. High beam quality in two directions and high efficiency output of a diode laser array by spectral-beam-combining [J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 17804-17809.
- [8] Wang Lijun, Peng Hangyu, Zhang Jun, et al. Development of beam combining of high power high brightness diode lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0401001. (in Chinese)
王立军, 彭航宇, 张俊, 等. 高功率高亮度半导体激光器合束进展[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(4): 0401001.
- [9] Zhou Q, Zhou C, Wei C, et al. Diode laser array by spectral beam combing with a transmission grating [C]//Holography, Diffractive Optics, and Applications VII, International Society for Optics and Photonics, 2016, 10022: 1002217.
- [10] Zhang Yan, Zhang Bin. Analysis of the spectral beam combining efficiency of diode laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 864-872. (in Chinese)
张艳, 张彬. 半导体激光器光束谱合成效率的分析 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 864-872.
- [11] Meng Huicheng, Wu Deyong, Tan Hao, et al. Experimental study on high brightness and narrow band of diode laser by spectral beam combining of grating-external cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(3): 22-28. (in Chinese)
孟慧成, 武德勇, 谭昊, 等. 窄光谱高亮度半导体激光器光栅-外腔光谱合束实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 22-28.
- [12] Yang L, Wu Z, Zhong Z, et al. Effect of crosstalk on combined beam characteristics in spectral beam combining systems[J]. *Optics Communications*, 2017, 384: 30-35.
- [13] Meng H, Ruan X, Du W, et al. Scaling the spectral beam combining channel by multiple diode laser stacks in an external cavity [J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(4): 045811.
- [14] Tayebati P, Chann B. Two-dimensional multi-beam stabilizer and combining systems and methods: US, US9325144B2[P]. 2016-04-26.
- [15] Roy L, Kohroh K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. *IEEE J Quantum*, 1980, 16(3): 347-355.
- [16] Donati S, Horng R H. The diagram of feedback regimes revisited [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(4): 1500309.
- [17] Haas M, Rauch S, Nagel S, et al. Beam quality deterioration in dense wavelength beam-combined broad-area diode lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2017, 53(3): 1-11.