

文章编号: 1001-3806(2005)06-0657-05

## 光纤组束研究的新进展

王双义, 林殿阳, 王 超, 吕志伟\*

(哈尔滨工业大学 光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 介绍了当前光纤组束研究中的几种主流方法, 即利用受激布里渊散射的光纤组束; 利用衍射光学元件的光纤组束; 全光纤组束等。对这些方法作了对比和分析。并对光纤组束的应用前景进行了展望。

关键词: 非线性光学; 衍射光学; 光纤组束; 受激布里渊散射

中图分类号: TN249.0437 文献标识码: A

### Recent progress of fiber beam combination

WANG Shuang-yi, LIN Dian-yang, WANG Chao, LÜ Zhì-wěi

(Institute of Optoelectronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract** Several mainstream laser beam combination methods, including stimulated Brillouin scattering, diffraction optics units and all fiber beam combination, are introduced. Comparison and analyses of these methods are presented. Finally, an overview about the application of laser beam combination is made.

**Key words** nonlinear optics; diffraction optics; beam combination of fiber; stimulated Brillouin scattering

### 引 言

随着激光应用技术的发展, 在很多领域对激光的特性提出了要求。例如, 激光武器、材料加工、空间光通讯、遥感、激光雷达和光电对抗等。因此, 如何把多束小功率激光高效地组合在一起, 已经成了当前人们很感兴趣的一个研究方向。近些年来, 国内外的许多科研机构在这方面做了大量的研究工作, 提出了多种组束的方法, 如受激布里渊散射光纤组束、利用衍射光学元件激光组束、全光纤组束等。下面将阐述近些年光纤组束的研究现状, 然后对各种方法的适用性和优缺点作分析讨论。并对其应用前景进行展望。

### 1 光纤组束的研究现状

#### 1.1 利用受激布里渊散射的光纤组束

利用块状材料中的受激布里渊散射 (SBS) 可将多束激光合成一束相干的 Stokes 光<sup>[1]</sup>。但是研究表明, 光束必须被准直在  $1\text{mrad}$  之内。这同块状材料产生 SBS 需要的高功率一样阻止了其在激光组束方面的实际应用。光纤的波导本质提供了长的相互作用长度, 因此, 利用光纤取代块状材料可以大大地降低 SBS 的阈值并大大消除对准直的敏感性。在短光纤 (几个厘

米或更短) 中, Stokes 光束作为抽运光的相位共轭光产生, 如同在块状材料中一样。但是在长光纤中, Stokes 光的产生对应于光纤的基模 ( $LP_{01}$  模), 呈现出近高斯分布的线型, 与抽运光的线型无关。这种现象是由于低衰减的多模抽运耦合进长光纤时, 相对于高阶模, 基模具有更高的 SBS 增益。将此 SBS 在长光纤中的这些特性进行扩展, 证实了可以在长多模光纤中利用 SBS 对畸变光束进行整形。

美国俄亥俄州 Air Force Institute of Technology 工程物理系的 BLAKE 等人详细研究了 SBS 在长多模光纤中对单纵模激光进行组束的情况<sup>[1-3]</sup>。他们分别讨论了相干光和不相干光的光束组合 (见图 1<sup>[2]</sup>)。在利

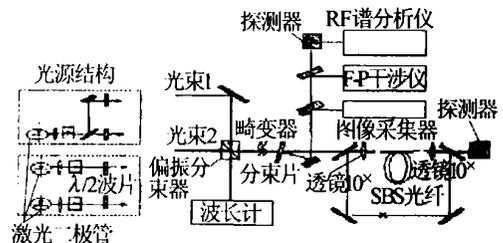


图 1 利用 SBS 进行光纤组束的实验装置图

用相干光组束时, 分别研究了单程和环形 SBS 结构, 从激光器输出单束激光利用分束片分成两束, 且每束光的能量都小于 SBS 阈值 (对应于单程和环形分别为  $19.7\text{mW}$  和  $26.5\text{mW}$ <sup>[1]</sup>)。研究发现, 当两束光的能量和小于 SBS 阈值时, 没有 SBS 产生; 当两束光的能量和超过 SBS 阈值, 且每束光的能量又小于 SBS 阈值时, 有 SBS 产生。在考虑菲涅耳反射损耗和纤芯尺寸

作者简介: 王双义 (1979-), 男, 博士研究生, 现从事非线性光学方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: zhiveit@yeah.net

收稿日期: 2004-09-15; 收到修改稿日期: 2004-11-09

数值孔径限制的情况下,单程 SBS得到了 67% 的组束效率,而环形 SBS的组束效率达到 83%。

由于利用相干光组束要求被组合的两束光之间的频率差小于布里渊增益线宽,这在很大程度上限制了它的应用。因此,他们又研究了非相干光的组束,此时每束抽运光独立地产生 SBS 由于它们仅仅在物理上利用相同的 SBS 介质,因此,产生的两束 Stokes 光之间没有干涉。但两束 Stokes 光有相同的空间光强分布,所以具有非常好的空间重叠和空间相干性。实验上研究了波长为 853nm 和 832nm 的两束光的组束情况,获得了与单束激光具有相当光束质量的输出光。利用对空间光强分布的分析<sup>[3]</sup>获得了此种方法组束的可行性。并指出,利用 SBS 对不相干光进行组束可以扩展到多束激光的情况下,具有广泛的应用。

## 1.2 利用衍射光学元件的光纤组束

利用衍射和色散光学元件进行光纤组束也是一种非常有效的方法,1999年,MIT 林肯实验室的 COOK 等人<sup>[4]</sup>提出频谱组束 (spectral beam combining) 的方法后,很多人进行了这方面的研究<sup>[5-9]</sup>。其原理如图 2<sup>[6]</sup>所示。

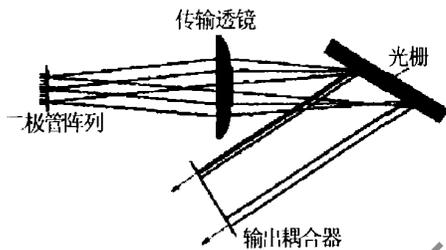


图 2 频谱组束原理图

图 2 中的二极管激光阵列的前端是增透的,所以在镀有高反膜的后端和部分反射输出耦合器 ( $R = 10\%$ ) 之间对每个阵元都形成了激光谐振腔。传输透镜 ( $f = 12\text{cm}$ )、光栅和外腔形成了所有输出线的公用光学元件。传输透镜把一个阵元的位置按角度定位到的光栅上,为确保从每个阵元输出光的空间重叠,把光栅放在距传输透镜 1 倍焦距处。因为输出光束的传播方向都是镜子的法线方向,所以,由输出耦合器控制各光束的共向传播。从而得到共向重叠传播的输出光。由于从阵列元输出的每束光进入光栅的角度不同,对应每个阵元外腔选择不同的波长来作为需要控制的同轴传播。可以从光栅光谱仪的逆向运转来理解此方法的原理。进行了 11 阵元的激光二极管阵列的组束实验,获得了总效率 50% 和近 20 倍衍射限的输出。也进行了光纤激光阵列的实验。美国空军实验室的 BOCHOVE 等人<sup>[7,8]</sup>在利用 FAN<sup>[6]</sup>等人实验数据的基础上,对此方法进行了详细的理论分析,并于 2002 年<sup>[9,10]</sup>建立了完整的理论模型。

为了得到更高的输出功率,2002 年,MIT 林肯实

验室的 AUGST<sup>[11-13]</sup>等人将频谱组束扩展到 MOPA 结构下的波长组束 (wavelength beam combining),如图 3<sup>[11]</sup>所示。结构中的每个光纤激光器运转在由光栅确

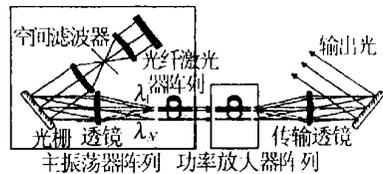


图 3 MOPA 结构波长组束装置图

定的波长下,从每个光纤振荡器出来的光都耦合进对应的放大器中。利用同一个光栅对放大器的输出光进行组合。在此结构中,振荡器的效率不再是主要问题,因为主要的功率放大产生在放大器中。此结构将确定激光的频率时间特性的部件与功率产生部件分离开,允许在低功率水平下确定每个激发元的频率和时间特性,在低功率水平下解决了掺镜光纤激光器的脉冲产生问题,同时也向功率放大器提供了近连续波信号,使功率放大器仅仅放大功率。在 MOPA 结构下,组合了 5 个掺镜光纤激光器,每个脉冲峰的宽度为 0.05mm,峰值间距为 3.2mm,测得组束光的  $M^2$  因子为 1.14 相当于单束激光的  $M^2$  因子。利用效率为 72% 的偏振平均光栅,在总功率为 8.4W、ASE 为 1% 的情况下,获得远场输出功率为 6W。

提高此系统输出功率的方法包括增加阵元数和提高每个光纤激光器的功率。在具体操作中,增加光纤数目将很快超过传输透镜的视场域。对于从光纤阵列出射的光的发散角是相当大的 ( $NA = 0.1$ ),对于传输透镜的这种性能需求相当严重。如果能够降低发散角,对传输透镜的需求就降低了,可以运转在更大的  $f$  数下。另外,为了进一步增加光纤阵元的数目,可以考虑使用微透镜阵列。微透镜阵列运转在小的  $f$  数下,但是每个都是离轴的。替代微透镜的一种方法是利用大模式直径的光纤。根据这些研究,预计很容易增加到数十到数百个阵元。

此外,美国 Aculight 公司的 STEVE 等<sup>[14]</sup>将 SBC 应用在对二极管激光棒的组束上,证实了在大约 400 个单横模的半导体激光器上,可以将  $M^2$  因子从 1000 降到小于 1.5 输出带宽 10nm。在利用高质量的光学元件时,获得的效率大于 70% (效率定义为利用 SBC 后的输出功率比上没有利用 SBC 的激光输出功率)。

2003 年,美国佛罗里达大学的 CAPURN 等人<sup>[15]</sup>利用 PTR 布喇格光栅设计了对两束或多束激光进行非相干组束的高效方法,并进行了数值模拟。PTR 布喇格光栅具有窄的谱选择性和高达 95% 的衍射效率,不存在激光注入破坏、热聚焦和布喇格角移的问题。对两束 100W 的掺镜光纤激光器的组合效率超过了

75%。材料的损耗不超过 2% ~ 4%。限制组束效率的主要因素是掺镜光纤激光器的激发谱宽度。在高功率下, 激发谱宽度超过了光栅的谱选择, 引起了衍射效率下降。方案中的几个基本要素: (1) 组合的光束之间要有一定的波长差, 为了确保没有谱的重叠, 以及将各个光束的衍射级次分开; (2) PTR 布喇格光栅的角选择要比光束发散角大; (3) PTR 布喇格光栅要具有长期稳定性。

### 1.3 全光纤组束

1999年, 美国布朗大学的 KOZLOV 等<sup>[16]</sup>首次报道了单模光纤激光器的全光纤相干组束技术。利用由活性光纤制备的 2 × 2 单模光纤熔锥耦合器 (single-mode fiber fused taper couplers) 的一半来对激光进行相干耦合, 这种原理可以方便地应用到大量光纤激光的组束中。单模光纤熔锥耦合器是低损耗元件, 输入端口的基模经过绝热传输进入耦合区的基模。如果耦合区的横截面制备成径向对称 (在这种情况下, 得到高重叠耦合的耦合器), 耦合器输入端的两个基模在耦合区中心将有相同的空间分布。若耦合区中心是分开的, 耦合器可以作为几个光纤激光腔的共用部分, 可在分开部分使用一个所有光纤激光器共用的镜子。在实验中, 利用单模光纤熔锥耦合器的一半作为输出镜——两光纤激光的光束组合器。不仅可以在同样的空间模式上组合两束激光的输出, 通过调节两光纤激光器中一个的布喇格光栅镜, 还可观察到使两束激光耦合输出与单一激光具有同线宽的注入锁定现象, 这种现象可以用来保持激光组束的谱亮度。如果耦合区的中心是分开的, 可以利用 N × N 熔锥耦合器对 N 个光纤激光进行组束。该方案首次证明了两束光纤激光的空间和频谱组合。

2001年, 美国的 SMPSON 等人<sup>[17]</sup>提出了对上述方法的改进 (见图 4)。图中, 1 是激光二极管, 2, 3 是

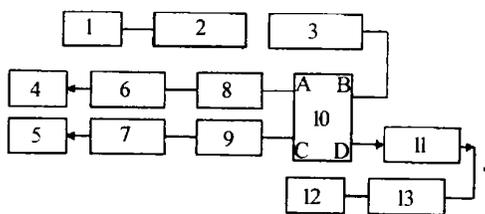


图 4 改进的全光纤组束原理图

不镀膜光纤准直器, 4, 5, 11 是光学振荡器, 6, 7 是光纤布喇格光栅, 8, 9 是光纤放大器, 10 是 50:50 耦合器, 12 是激光二极管, 13 是可变衰减器。他们证实了 2 × 2 光纤耦合器中的分开 (cleaving) 是不必要的。如果在耦合器的一个输出端加上腔反馈, 光纤激光将对它们的光学输出自组织, 从而使耦合进另一个输出端的功率最小。这样, 使光纤激光在激光腔中的循环光场

最大, 增益介质的反转最小。利用标准的 2 × 2 50:50 的光纤耦合器对两束激光进行腔内耦合。两束激光都利用掺铒光纤放大器和光纤布喇格光栅进行控制。端口 B 与一个不镀膜的光纤准直仪耦合在一起, 准直仪的平面作为激光输出耦合器, 为两个放大器提供反馈。另外的输出端口 D 是损耗腔。从光纤准直仪和损耗端口的输出被调制, 确保外反馈进入腔内是不必要的。由于腔的模间隔大约是 6MHz 并且激光运转在低功率水平, 因此, 诸如受激布里渊散射和自相位调制等非线性效应是不重要的。装置中使用的光纤都是单模、非偏模光纤。在两束激光相似的情况下, 几乎所有的功率耦合进了端口 B 获得大约 4 倍单激光的输出功率。本方案允许多束激光耦合方案的级联, 以获得高相干的输出功率。

针对 KOZLOV 等人<sup>[16]</sup>的方法, AKRA 等人利用 N × N 光纤耦合器实现了 N 束光的相干叠加<sup>[18]</sup>。在 N = 2 和 N = 4 的情况下, 成功地获得了约相当于单束激光 N 倍的输出功率。其实验原理如图 5 所示。利

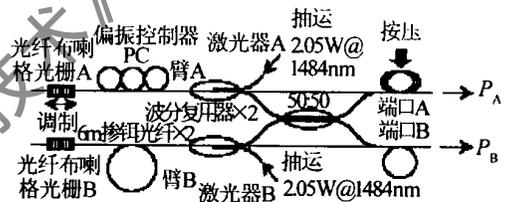


图 5 实验装置

用 1484nm / 1557nm 的波分复用耦合器将波长为 1484nm、功率为 4.7W 的抽运光按 50:50 分成两束。具有 2.05W 功率的每束光抽运一个光纤激光器 (A / B)。增益光纤为 6m 长的掺铒光纤, 激光器 A 的光纤环形进入偏振控制器, 每个激光腔由光纤布喇格光栅 (FBG) 和 3.4% 菲涅耳反射率的输出切面构成, FBG 具有 99% 的反射率, 且在每个 FBG 的布喇格波长中心具有 0.6m 的 FWHM。通过拉伸光纤, 可以将激光器 A 的布喇格波长调得更长。在分别独立的情况下 (图中虚线), 激光器 A 和 B 的最大输出分别为  $P_A = 1.36W$ ,  $P_B = 1.47W$ 。功率的不平衡是由于波分复用耦合器的内在损耗。当用 50:50 的光纤耦合器把两个激光器联接起来, 两个端口的输出不等, 一个向另一个传输。功率的分布对两个端口的切面和弯曲特别敏感。研究发现, 高功率输出总是从低损耗的端口中激发出来。通过调节偏振控制器得到的最不平衡的输出是  $P_A = 2.57W$ ,  $P_B = 0.17W$ , 叠加效率超过了 90%。在此过程中, 没有进行腔长控制。通过拉伸光纤调节激光器 A 的布喇格波长从 1556.95nm 到 1558.20nm, 并且保持两激光器的布喇格波长差小于 0.5nm (约等于 FBG 线宽), 发现叠加效率在此范围保持不变, 但是大于 0.5nm 时, 两个在布喇格波长处明显得分开, 功

率几乎相等地分布在两个端口,意味着几乎没有任何耦合。他们还成功获得了4束激光的相干叠加,利用每束1W的抽运分别获得0.68W,0.65W,0.62W,0.61W的4束激光,最终获得2.45W的输出,叠加效率达到95%。

#### 1.4 其它光纤组束

法国的DAVID等<sup>[19]</sup>首次证实了波长可调的激光相干组束。对2束激光和4束激光进行组束,分别获得了99%和95%的组束效率。这种方法是基于在干涉结构内使用的多臂谐振腔,利用迈克尔逊和马赫-泽德型的谐振腔在对两束激光进行组束,都获得了几乎100%的组合效率。本文中主要研究了后者。实验装置如图6<sup>[19]</sup>所示,利用两个具有100mW功率,在980nm

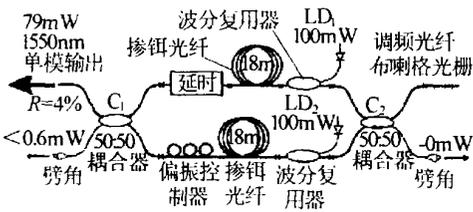


图6 M ZFL实验装置

激光发的综合激光二极管抽运两个独立的掺铒光纤放大器。掺铒光纤长17m,干涉仪的两臂分别连接到两个50:50的耦合器上。耦合器C<sub>2</sub>的1个输出端口与调频光纤布喇格光栅(CFBG)连在一起,CFBG在1550nm具有98%的反射率和2nm的带宽。另一个输出端口具有切角,避免光反馈入激光腔。耦合器C<sub>1</sub>的一个输入端口具有4%的反射率作为MZFL(Mach-Zehnder fiber laser)的输出耦合器,第2个输入端口具有切角防止光反馈进入激光腔,通过机械延迟线(DL)来控制干涉仪的光程差。图中,LD<sub>1</sub>,LD<sub>2</sub>为980nm抽运激光二极管。

将上图实验方案稍加改进,就得到了波长可调的相干组束方案<sup>[19]</sup>。波长可以调谐的范围为1520nm~1580nm。

2002年,美国空军实验室的MARK<sup>[20]</sup>实验研究了连续波、1547nm、窄线宽、单模光纤激光器的自由空间光束的相干组合。并指出,由于在重叠区的一些点相干光比非相干光具有高很多的能流密度(对于n束光来说,相干光的能流密度可以达到单束光的n<sup>2</sup>倍,而非相干光只能达到单束光的n倍)。利用主动振荡器和光纤放大器进行了实验研究。如果主振荡器具有足够窄的线宽,并且所有的光束具有近似一样的偏振态。在重叠区将产生强相干。在重叠点的波前相位改变会影响相干结果,相位的改变一般是由以下两点造成的:(1)主振荡器波长的偏移;(2)光纤内光程的浮动。实验室条件下,相干条纹的改变与上述两种影响相关。经过观察,输出光束的偏振浮动相对于上两种影响是可以忽略的。利用两束光的相干叠加验证了本理论(见图7)。在实验中,由一个数字反馈方案来控制相

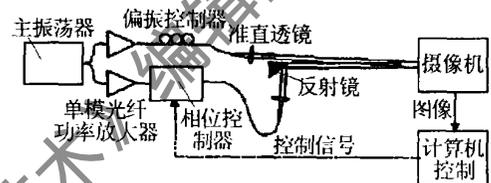


图7 自由空间光束相干组合原理图

干系统的偏移,也即用光纤拉伸机来调整其中一束光的波前相位。相干条纹和峰值也已调整在光纤中的一个理想位置。控制器的频率响应局限于摄像机的数据捕获和处理的速度,因此,通过使用更快的相机、数字信号处理机和相位调制机,可以得高频响应。本方案只在相干叠加区的一些点出现光场的极大与极小,并非真正合成一束光。

## 2 分析与讨论

在表1中对上述光纤组束方法进行了对比。利用SBS在光纤中对相干光进行组束,得到的合成光在物理性能上是真正的一束光,与单一激光器产生的激光没有区别。但是要求进行组束的激光之间的频率差要

表1 光纤组束方法对比

组束方法	适用激光器	功率水平	组束效率	特性	
SBS光纤组束	相干光 光纤激光器 半导体激光器	几十毫瓦	单程 67% 环形 83%	物理上的一束光,束间频差小,不易扩展	
	非相干光 光纤激光器 半导体激光器	-	-	空间重叠和相干性好,质量高,易扩展	
衍射光学元件 光纤组束	波长组束 / 频谱组束	光纤激光器 半导体激光器	几百瓦	> 75%	功率高,谱带宽,光栅破坏阈值高,易扩展
	全光纤组束	光纤激光器	几瓦	> 90%	效率高,相位控制复杂,易扩展
其它光纤组束	基于谐振腔原理	光纤激光器	几百毫瓦	> 95%	波长可调,效率高,易扩展
	自由空间光束 相干组合	光纤激光器	-	-	点上光强的极大与极小,受波前相位改变的制约,易扩展

绝对小于布里渊增益线宽,极大地限制了它的实用性,且难于扩展到多束激光的组束上去。利用 SBS 对非相干光进行组束,由于 SBS 的特性,每束抽运光所产生的 Stokes 之间有非常好的空间重叠和空间相干性,也可以得到高质量的合成激光,并且可以扩展到多束激光的情况下。但是,利用 SBS 对激光进行组束,总是要在一束光纤内进行,因此受限于光纤的功率承受能力,这在很大程度上限制了它的实用性。相比较而言,利用衍射光学元件对光纤激光进行组束,可以很方便地扩展到多束激光的情况,而且功率水平也相对高得多,现在已经达到了 100W 的量级。但是对光学设计的要求很高,同时需要具有高破坏阈值的光栅。全光纤组束可以获得高达 90% 的组束效率,而且功率水平也在几瓦的量级上,在两束激光进行组合的情况下,还可以获得大约 4 倍单束激光的输出功率。但是由于腔长失调,相位失配的控制是复杂的。在其它的光纤组束中,其中基于谐振腔原理的可以实现波长可调,且具有很宽的调谐范围,组束效率几乎可达 100%,功率水平也可以达到几百毫瓦,比较容易扩展到多束;而自由空间相干组合仅仅是在叠加区的一些点上出现光强的极大与极小,并非是合成一束光,且受波前相位改变的制约较大。

### 3 结束语

利用光纤组束的办法对低功率的半导体激光或者光纤激光进行合成,已经得到了广泛的研究。在激光武器、材料加工、空间光通讯、遥感、激光雷达和光电对抗等方面具有非常可观的应用前景。光纤激光器在体积、效率、重量方面具有明显的优势,已被广泛应用于汽车、医疗、半导体、通信等工业上。在激光武器上也有很好的应用前景,美国已经打算在 2007 年利用相干组束的方法获得功率水平在 100kW 的高能光纤激光武器<sup>[21]</sup>。除了利用 SBS 对相干光进行组束的光在物理上真正是一束光之外,利用其它方法所获得的合成光从物理上来看,都不能认为真正是一束光。在实际的应用中,应该根据需求选择不同的组束方案。随着各种相关技术的发展,利用光纤组束的办法对激光进行合成,将会更加趋于成熟和实用。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] RODGERS B C, RUSSELL T H, ROH W B Laser beam combining and cleanup by stimulated Brillouin scattering in a multimode optical fiber [ J ]. *Opt Lett* 1999, 24 ( 16 ): 1124~ 1126.
- [ 2 ] RODGERS B C, RUSSELL T H, ROH W B Coherent and incoherent beam combining and cleanup via stimulated Brillouin scattering in multimode optical fiber [ J ]. *CLEO*, 1999, 3: 1026~ 1027.
- [ 3 ] RUSSELL T H, ROH W B. Incoherent laser beam combining via stimulated Brillouin scattering in multimode fibers [ J ]. *LEOS*, 2000, 2: 593~ 594.
- [ 4 ] COOK C C, FAN T Y, FEJER M M *et al*. Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers in an external cavity [ J ]. *OSA Trends in Optics and Photonics*, 1999, 26: 163~ 166.
- [ 5 ] DANEU V, SANCHEZ A, FAN T Y *et al*. Spectral beam combining of a broad-stripe diode laser [ J ]. *Opt Lett* 2000, 25 ( 6 ): 405~ 407.
- [ 6 ] FAN T Y, SANCHEZ A, DANEU V *et al*. Laser beam combining for power and brightness scaling [ J ]. *IEEE Aerospace Confer Proc* 2000, 3: 49~ 54.
- [ 7 ] BOCHOVE E J, DENMAN C A. Analytical and numerical resonator analysis of spectral beam combining of Yb fiber lasers [ J ]. *Proc SPIE*, 2000, 3930: 222~ 233.
- [ 8 ] BOCHOVE E J. Spectral beam combining model for fiber lasers [ J ]. *Proc SPIE*, 2001, 4270: 95~ 104.
- [ 9 ] BOCHOVE E J. Theory of spectral beam combining of fiber lasers [ J ]. *IEEE J Q E*, 2002, 38 ( 5 ): 432~ 445.
- [ 10 ] BOCHOVE E J. Spectral beam combining of fiber lasers: tolerances, lens design, and in-lens array inclusion [ J ]. *Proc SPIE*, 2002, 4629: 31~ 38.
- [ 11 ] AUGUST S J, GOYAL A K, AGGARWAL R L *et al*. Wavelength beam combining of ytterbium fiber lasers in a MOPA configuration [ J ]. *Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics CLEO-Technical Digest* [ C ]. C A: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002: 594~ 595.
- [ 12 ] AUGUST S J, GOYAL A K, AGGARWAL R L *et al*. Wavelength beam combining of laser arrays [ J ]. *LEOS*, 2003, 2: 869~ 870.
- [ 13 ] AUGUST S J, GOYAL A K, AGGARWAL R L *et al*. Wavelength beam combining of ytterbium fiber lasers [ J ]. *Opt Lett* 2003, 28 ( 5 ): 331~ 333.
- [ 14 ] TIDWELL S, ROMAN S, JANDER D. Spectral beam combining of diode laser bars to achieve efficient near diffraction limited output power [ J ]. *Proc SPIE*, 2003, 4973: 42~ 46.
- [ 15 ] CIAPUR N I V, GLEVOV L B, GLEBOVA L N *et al*. Incoherent combining of 100W Yb fiber laser beam s by PTR Bragg grating [ J ]. *Proc SPIE*, 2003, 4974: 209~ 219.
- [ 16 ] KOZLOV V A, HERNANDEZ-CORDERO J, MORSE T F. A fiber coherent beam combining of fiber lasers [ J ]. *Opt Lett* 1999, 24 ( 24 ): 1814~ 1816.
- [ 17 ] SMPSON T B, GAVRILIDES A, PETERSON P. Coherent intracavity coupling of fiber lasers [ J ]. *LEOS*, 2001, 1: 62~ 63.
- [ 18 ] SHIRAKAWA A, SAITOU T, SEKIGUCHI T *et al*. Coherent addition of fiber lasers by use of a fiber coupler [ J ]. *Optics Express* 2002, 10 ( 21 ): 1167~ 1172.
- [ 19 ] SABOURDY D, KERMÈNE V, DESFARGES A *et al*. Efficient coherent combining of widely tunable fiber lasers [ J ]. *Optics Express* 2003, 11 ( 2 ): 87~ 97.
- [ 20 ] CULPEPPER M A. Coherent combination of fiber laser beams [ J ]. *Proc SPIE*, 2002, 4629: 99~ 108.
- [ 21 ] 楼祺洪, 周 军, 王之江. 光纤激光作为激光武器的能力分析 [ J ]. *激光技术*, 2003, 27 ( 3 ): 161~ 165.