文章编号:1001-5078(2012)10-1103-04

·激光应用技术·

占空比对激光相干合成的影响

蒋茂华[1,2],苏　毅[1],卢　飞[1]
(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研究生部,北京 100088)

摘　要: 占空比是影响相干合成的重要因素,通过对矩形光束的相干合成进行数值模拟,在同一功率总量、同一发光总面积下,改变近场光束的排布方式、子束光束数量,根据合成光束在远场的场强分布,分析其对合成后光束的光束质量、峰值功率的影响,得出合理的排布方式和数量。

关键词: 相干合成;占空比;矩形光束
中图分类号: TN243　　**文献标识码:** A　　**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.10.003

Influence of duty ratio on laser beam coherent combining

JIANG Mao-hua[1,2], SU Yi[1], LU Fei[1]
(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1015, Mianyang 621900, China;
2. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

Abstract: According to the far-field intensity distribution, by changing the position and the number of beams, simulation is made to analyze the influence of the peak intensity and beam quality on combined beam. And it is obtained the suitable position and optimal number of beams for coherent combining.

Key words: coherent combining; duration; rectangular beam

1　引　言

激光光束相干合成技术是达到高质量、高功率输出的有效途径。影响相干合成的因素很多,占空比是其中比较重要的一个,在现有的高能固体激光输出中,输出光束多为矩形束,且为饱和输出,即输出光束近似为一平面波[1-3]。因此,我们对矩形平面波在焦平面的合成效果进行模拟。

2　占空比计算方法

占空比,指的是光束出光面积与发光器件实际分布面积之比。在工程应用中,很难保证各光束之间的拼接是无缝的,所以占空比均小于 1。在激光合成的中,占空比主要由光束之间的距离决定。因此,通过模拟光束之间距离的变化,可以分析占空比对合成效果的影响。这里,主要针对理想矩形光束合成进行模拟,根据公式[4-5]:

$$U(x,y)=\frac{\exp(jkz)}{j\lambda z}\exp\left[j\frac{k}{2z}(x^2+y^2)\right]\cdot ab\,\mathrm{sinc}\left(\frac{ax}{\lambda z}\right)\mathrm{sinc}\left(\frac{by}{\lambda z}\right) \tag{1}$$

则光束合成中:

$$U_1(x,y)=\frac{\exp(jkz)}{j\lambda z}\exp\left[j\frac{k}{2z}(x^2+y^2)\right]\cdot ab\,\mathrm{sinc}\left(\frac{ax}{\lambda z}\right)\mathrm{sinc}\left(\frac{by}{\lambda z}\right)$$

……

$$Un(x,y)=\frac{\exp(jkz)}{j\lambda z}\exp\left[j\frac{k}{2z}(x^2+y^2)\right]\cdot ab\,\mathrm{sinc}\left(\frac{ax}{\lambda z}\right)\mathrm{sinc}\left(\frac{by}{\lambda z}\right)\varphi(\Delta x_n,\Delta y_n)$$

其中,Δx_n,Δy_n 为光束间距。

$$I=|U_1(x,y)+\cdots+U_n(x,y)|^2$$

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金课题(No. 2009A0401024)资助。

作者简介: 蒋茂华(1982 -),博士研究生,主要从事激光合成技术研究。E-mail:woshizuoluo007@163.com

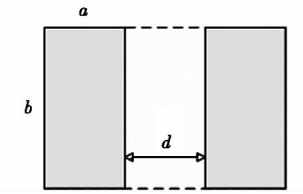
收稿日期: 2012-01-14;**修订日期:** 2012-02-20

$$= \left| \begin{array}{l} \dfrac{\exp(\mathrm{j}kz)}{\mathrm{j}\lambda z}\exp\left[\mathrm{j}\dfrac{k}{2z}(x^2+y^2)\right]\cdot \\ ab\mathrm{sinc}\left(\dfrac{ax}{\lambda z}\right)\mathrm{sinc}\left(\dfrac{by}{\lambda z}\right)+\cdots \\ \dfrac{\exp(\mathrm{j}kz)}{\mathrm{j}\lambda z}\exp\left[\mathrm{j}\dfrac{k}{2z}(x^2+y^2)\right]\cdot \\ ab\mathrm{sinc}\left(\dfrac{ax}{\lambda z}\right)\mathrm{sinc}\left(\dfrac{by}{\lambda z}\right)\varphi(\Delta x_n,\Delta y_n) \end{array} \right|^2 \quad (2)$$

由于矩形光的外形特殊性,分以下两种情况计算其占空比:

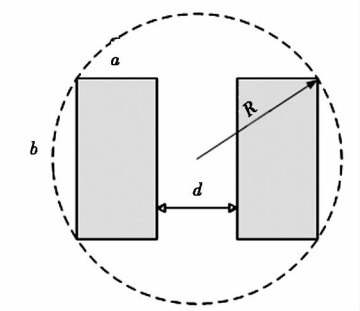
(1)外部轮廓法,如图 1(a)所示,占空比为 $2ab/(2a+d)b$;

(2)外接圆法,如图 1(b)所示,占空比为 $2ab/\pi R^2$,其中 $R=0.5(b^2+(2a+d)^2)^{1/2}$。



(a)外部轮廓

(a) outline method



(b)外接圆

(b) circumcircle method

图 1 两种占空比计算方法

Fig. 1 two calculation for filling factor

为方便描述,用占空比 A 代指外部轮廓法计算的结果,用占空比 B 代指外接圆法计算的结果。

3 光束一维排布合成

3.1 4 束矩形光束合成

设单束矩形光斑尺寸为 2 cm×8 cm,光束质量因子 $\beta=1$,单束激光功率 $P=0.5$ W,四束光束功率和为 2 W,近场排布如图 2 所示,透镜焦距 $f=1$ m,

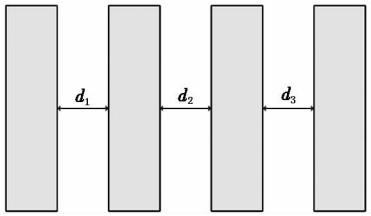


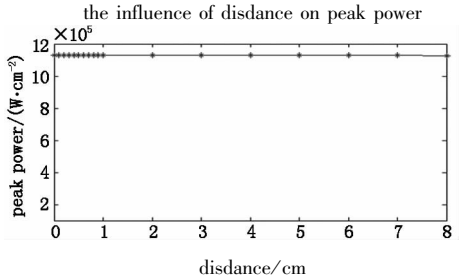
图 2 四束合成,d_1,d_2,d_3 分别为两个方向的束间距

Fig. 2 4 beams combing; d_1, d_2, d_3 distance

取光束间距 $d_1=d_2=d_3=d$,变化 d 的取值,做远场模拟。

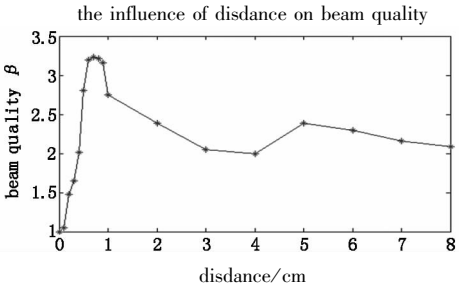
模拟结果如下,峰值功率变化不大,$d=8$ cm 时,即占空比 $A=0.250$,占空比 $B=0.049$,峰值功率衰减 1.06%。若需保证合成后的光束质量 $\beta<1.5$,则需满足束间距 $d<0.2$ cm,即占空比 $A>0.930$,占空比 $B>0.590$。同时,光束质量经过一个大的抖动,然后趋于一定值。综合几个计算看,均有此现象。经分析,是由于旁瓣的增加是先从远离主瓣位置升起,然后逐渐延伸到靠近主瓣的位置,且旁瓣越来越精细。由于计算光束质量 β 值时,是需要找出占总功率一定比列的功率范围,所以刚开始时会出现光束质量较大的现象,而后随着旁瓣越来越精细,逐渐趋于一定值。这同时说明用 β 值对相干合成光束质量进行衡量时,存在一定的缺陷。而关于衡量光束合成后的光束质量的标准,我们将另文给出。占空比对峰值功率和光束质量的影响如图 3 和图 4 所示。

由计算结果看出,当光束间距等于 0.45 cm 时,光束质量与后面的趋近值基本接近。此时,占空比 $A=0.8556$,占空比 $B=0.5381$。



(a)占空比对峰值功率的影响

(a) the affect of filling factor on peak power



(b)占空比对合成后光束质量的影响

(b) the affect of filling factor on coherent beam quality

图 3 占空比对 4 束矩形光束合成的影响

Fig. 3 the affect of filling factor on 4 rectangle beams coherent combining

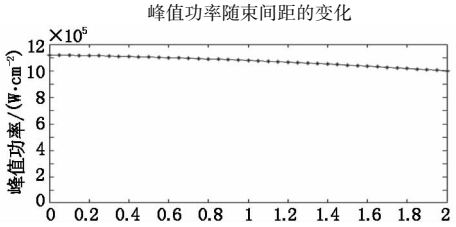
3.2 16 束矩形光束合成

模拟 16 束方形光合成,设单束方形光斑尺寸为 0.5 cm×16 cm,单束激光功率 $P=0.125$ W,16 束和仍为 2 W 透镜焦距 $f=1$ m,其排布方式按 1×16

一维排布。

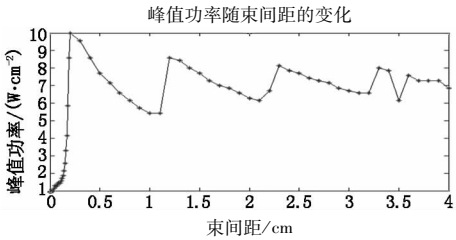
模拟结果显示，d = 2 cm 时，峰值功率衰减 10.7%，此时占空比 A = 0.211，占空比 B = 0.054。若要将光束质量因子控制在 β < 1.5 以内，两光束之间的距离需满足 d < 0.1 cm，即占空比 A > 0.842，占空比 B > 0.528。

当 d > 0.18 cm 后，即占空比 A < 0.748，占空比 B < 0.457 时，光束质量在[6,10]之间波动，此时，间距与光束质量将不再是单一的线性关系。



(a) 占空比对峰值功率的影响

(a) the affect of filling factor on peak power



(b) 占空比对合成后光束质量的影响

(b) the affect of filling factor on coherent beam quality

图 4　占空比对 8 束矩形光束合成的影响

Fig. 4　the affect of filling factor on 8 rectangle beams coherent combining

4　光束二维排布合成

4.1　4 束方形光束合成

设单束方形光斑尺寸为 4 cm × 4 cm，单束激光功率 P = 0.5 W，四束和仍为 2 W 透镜焦距 f = 1 m，光束间距分别为 d_1，d_2。如图 5 所示，取 $d = d_1 = d_2$，变化 d 的取值，做远场模拟。

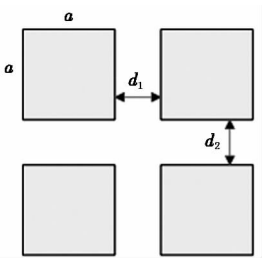
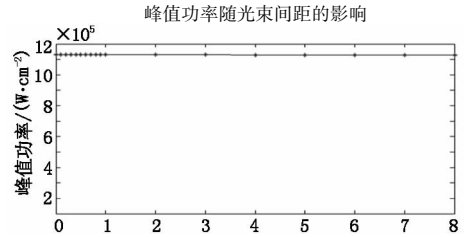


图 5　四束合成，d_1，d_2 分别为两个方向的束间距

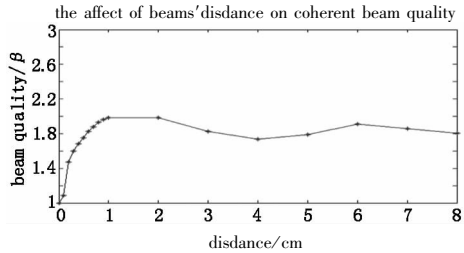
Fig. 5　4 beams combing: d_1, d_2 distance

模拟结果如图 6 所示，当 d = 8 cm 时，峰值功率衰减 0.2%，此时占空比 A = 0.250，占空比 B = 0.159。若要保证合成后光束质量 β < 1.5，则需满足 d < 0.2 cm，即占空比 A > 0.952，占空比 B > 0.606。且当光束间距 d > 0.8 cm 后，光束质量稳定在[1.8,2]的范围内。此时，占空比 A < 0.826，占空比 B < 0.526。



(a) 占空比对峰值功率的影响

(a) the affect of filling factor on peak power



(b) 占空比对合成后光束质量的影响

(b) the affect of filling factor on coherent beam quality

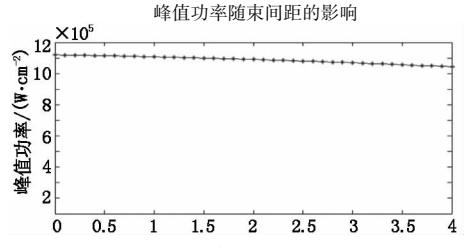
图 6　占空比对 4 束方形光束合成的影响

Fig. 6　the affect of filling factor on 4 squareness beams coherent combining

4.2　16 束方形光束合成

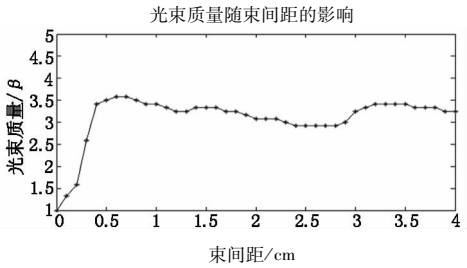
模拟 16 束方形光合成，设单束方形光斑尺寸为 2 cm × 2 cm，单束激光功率 P = 0.125 W，四束和仍为 2 W 透镜焦距 f = 1 m，其排布按 4 × 4 方式与四束方形光相同，其外部轮廓仍为一个方形。占空比对峰值功率和光束质量的影响如图 7 所示。

当 d = 4 cm 时，峰值功率衰减 6.8%，此时占空比 A = 0.160，占空比 B = 0.102。若要保证合成后光束质量 β < 1.5，则需满足 d < 0.15 cm，即占空比 A > 0.896，占空比 B > 0.571。且当光束间距 d > 0.4 cm 后，光束质量稳定在[3,3.5]的范围内。此时，占空比 A < 0.756，占空比 B < 0.481。



(a) 占空比对峰值功率的影响

(a) the affect of filling factor on peak power



(b) 占空比对合成后光束质量的影响

(b) the affect of filling factor on coherent beam quality

图 7 占空比对 4 束方形光束合成的影响

Fig. 7 the affect of filling factor on 4 squareness beams coherent combining

5 两种排布方式的比较

5.1 峰值功率

两种排布方式下,占空比对峰值功率的影响都非常小,只有当占空比小,即占空比 $A<0.5$,占空比 $B<0.3$ 时,占空比对峰值功率的影响才体现出来,此时峰值功率的衰减 $<10\%$。当占空比 $A<0.2$,占空比 $B<0.1$ 时,峰值功率衰减才趋近于 10%。不同的排布对峰值功率的影响不明显。

5.2 光束质量

说明,若要保持较好的光束质量,占空比必须保证在较大值,表 1 所示若需保证光束质量 $\beta<1.5$ 则占空比 A 需控制在 0.9 左右,占空比 B 需控制在 0.6 左右。同时可以看出,随着参与合成的光束数目的增加,对占空比的要求有略微的降低。这是因为,同样的发光面积和,同样的占空比下,参与数量多的激光束在空间分布的能量更均匀。

表 1 光束质量 $\beta=1.5$ 时各种情况下的占空比

Tab. 1 the different filling factors for beam quality $\beta=1.5$

	一维排布				二维排布	
光束数量	2	4	8	16	4	16
占空比 A	0.889	0.930	0.884	0.842	0.952	0.896
占空比 B	0.562	0.590	0.559	0.528	0.606	0.571

当占空比较大时,光束一维还是二维排布对其光束质量的影响并不明显。占空比较小时,对于一维分布的光束,改变占空比会使光束质量在较大范围内波动,而二维分布的光束会保持光束质量在一个较小的范围内,因此光束排布应尽量在二维范围内对称排布。

6 小 结

占空比在光束合成中,对峰值功率和光束质量都会产生影响。但对峰值功率的影响是很小的,只有在占空非常小(占空比 $A<0.2$,占空比 $B<0.1$)时才明显。但对光束质量有非常大的影响,若要保持光束质量因子 $\beta<1.5$,需满足占空比 A 接近 0.9,占空比 B 接近 0.6,且随着参与合成的光束增多,占空比的要求可略微降低。当占空比满足这个条件时,光束的空间排布对合成光束的光束质量并不影响。但当占空比较小时,即占空比 $A<0.8$,占空比 $B<0.5$ 时,光束二维排布合成的光束质量要远好于一维排布。即好的排布方式和子束数量,能让光束在近场分布更均匀,从而在远场取得较好的光束质量。

参考文献:

[1] Leo J Missaggia, Robin K Huang, High-power. Slab-coupled optical waveguide laser array packaging for beam combining[J]. Proc. of SPIE, 6478: 647806: 1 - 12.

[2] Liu Yang, Cheng Yong. Saptial coherence measeurement of multiple coherent laser combination[J]. Proc. of SPIE, 6723: 67232G - 1 - 5.

[3] Wu Guangcheng, Zhang Xiaohui, Rao Jionghui. Experimental study of spatial power distribution of underwater laser beam [J]. Laser & Infrared, 2009, 39 (2): 133 - 136. (in Chinese)
吴广成,张晓晖,饶炯辉. 水下激光光束空间分布特性的实验研究[J]. 激光与红外,2009,39(2):133 - 136.

[4] Yang Guanguang, Song Feijun. Advanced physical optics [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2008. (in Chinese)
羊国光,宋菲君. 高等物理光学[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2008.

[5] Born M, Wolf E. Principles of Optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. (in Chinese)
马科斯·波恩,埃米尔·沃尔夫. 光学原理[M]. 北京:电子工业出版社,2009.