

## 中心波长及脉宽对能量叠加光束远场的影响

石会财, 张蓉竹, 孙年春

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

**摘要:** 多束激光的远场叠加对于提高远场靶面能量是一种有效的方法, 单元光束的参数变化对于远场合成光束都会产生影响。为了分析脉冲激光参数控制对远场能量分布的影响, 利用夫琅禾费衍射积分公式导出了 4 束普通脉冲高斯光束合成的远场光强的解析式, 并整理了激光中心波长和脉宽的改变对远场叠加后能量分布的影响之间的具体关系。通过 MATLAB 的数值模拟, 结果表明: 当光束的中心波长减小或者脉冲宽度减小时, 远场能量向中心轴上汇聚, 远场轴上光强增加。当轴上光强相对于理想中心波长和脉宽的远场轴上光强的变化率小于 5%, 中心波长变化率最大不能超过 7.89%, 或者脉宽变化率最大不能超过 91%, 因此, 中心波长的变化对于远场光强分布的影响比脉宽更大。

**关键词:** 能量叠加; 高斯脉冲; 脉宽; 中心波长

**中图分类号:** O436.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0118005

## Effects of center wavelength and pulse width on superposed energy beams in far field

Shi Huicai, Zhang Rongzhu, Sun Nianchun

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract:** Laser beam far-field superposition is an effective method for improving the far-field target surface energy. Changes of the parameters for unit beam will influence the far-field combined beam. In order to analyze the impact of pulsed laser parameter's control on the far-field energy distribution, the Fraunhofer diffraction integral formula was used and the analytic formula of far field intensity for four beams of ordinary pulsed Gauss beam synthesis was deduced and the specific relationship about laser center wavelength and pulse width change with the far-field stack power were proposed. Through the numerical simulation of MATLAB, the results show, when the center wavelength of beam decreases or pulse width decreases, the far field energy converges to the center axis and the far-field on axis intensity will increase. When the on axis intensity relative to the ideal center wavelength and pulse width in the far field intensity on axis changes rate is less than 5%, the center wavelength maximum rate of change should not exceed 7.89%, or pulse width maximum rate of change should not exceed 91%. Therefore, the center wavelength will have a greater impact on far-field intensity distribution compared with pulse width.

**Key words:** energy superposition; Gauss pulse; pulse width; center wavelength

收稿日期: 2015-05-11; 修订日期: 2015-06-20

基金项目: 国家高技术发展计划(2012AA8042038); 四川省教育厅创新团队资助(13TD0048)

作者简介: 石会财(1990-), 男, 硕士生, 主要从事激光传输方面的研究。Email: shcsdau@163.com

导师简介: 孙年春(1961-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事高功率固体激光技术等方面的研究。Email: 8178137@163.com

## 0 引言

在诸如 ICF 等高功率激光系统中,对辐照到靶面的激光能量要求越来越高,目前采用的方案是利用多路大口径激光<sup>[1]</sup>。由于增益介质的断裂极限<sup>[2]</sup>和各种热效应<sup>[3-5]</sup>的束缚、冷却系统高指标的要求<sup>[6]</sup>、高性能增益介质生长<sup>[7]</sup>困难等问题限制了固体激光器向更高功率发展的速度,并使高输出功率下很难保证良好的光束质量。由此出现了将一路光束分割为多个小口径激光组成的阵列,通过增加小口径激光的数量来提高最终靶面光照能量的方法<sup>[8-10]</sup>。

远场靶面的能量叠加避免了大口径激光系统目前的困难,但是由于激光数量增大,要求每一个子光束的参数尽可能一致,这又给激光系统控制提出了难题。

为了给激光控制系统提供理论参考,需要具体分析激光参数出现控制误差时,远场能量分布的变化情况。以夫琅和费衍射理论为基础,通过 4 束普通高斯脉冲光束的远场合成为例,讨论了在其他参数不变的情况下,当一束单元子光束的中心波长或脉宽产生误差以及两束单元光束的中心波长或脉宽同时产生误差时远场能量分布的变化,并对中心波长和脉宽的影响进行了对比。通过具体的数据分析,希望对于实际的工程项目给予一定的理论指导。

## 1 物理模型与基本理论

根据非相干合成的基本原理可知,远场焦斑的光强和光束的数量成正比。为了更加精确地分析单元光束的参数产生误差时对远场合成光束的影响,笔者通过对 4 束普通高斯脉冲光束的合成为基础模型分析 4 束普通高斯脉冲光束入射在透镜上的分布,如图 1 所示,总体侧面光路图如图 2 所示,4 束

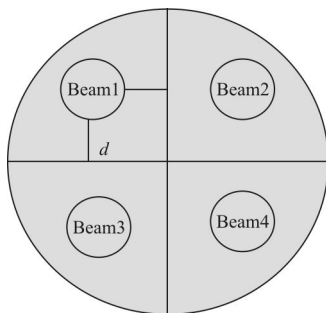


图 1 单元光束的正面分布图  
Fig.1 Distribution map of the front unit beam

子光束经过透镜后聚焦在一起。设单元光束的束腰宽度均为  $w_0$ ,与坐标轴的距离均为  $d$ ,透镜所在的位置为  $z=0$  平面。远场距离为  $z$ 。

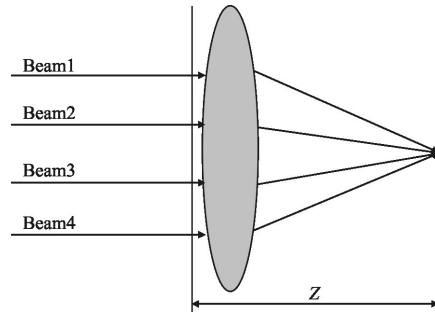


图 2 4 束普通脉冲光束的合成示意图  
Fig.2 Four beams of ordinary pulsed beam synthesis diagram

在  $z=0$  平面上,以光轴为中心轴的高斯光束的光场分布<sup>[11]</sup>为:

$$E_1(x_1, y_1, w) = A(w) \exp\left(-\frac{x_1^2 + y_1^2}{w_0^2}\right) \quad (1)$$

式中:  $A(w)$  为初始轴上的脉冲光谱;  $w_0$  为光束束宽。

由公式(1)可得到光束 1 在  $z=0$  面上的光场分布

$$E_1(x_1, y_1, w) = A(w) \exp\left(-\frac{(x_1-d)^2 + (y_1-d)^2}{w_0^2}\right) \quad (2)$$

根据夫琅禾费衍射积分公式

$$E_1(x_1, y_1, w) = -\frac{iw}{2\pi cz} \exp\left(i\frac{w}{c}z\right) \exp\left[i\frac{x_2+y_2}{2cz}w\right] \cdot \iint_{\Sigma} E_1(x_1, y_1, w) \exp\left[i\frac{xx_1+yy_1}{cz}w\right] dx_1 dy_1 \quad (3)$$

可以计算在远场  $z$  平面上的光场分布:

$$E_1(x, y, w) = -\frac{iw}{2\pi cz} w_0^2 \exp\left[-\frac{w^2 w_0^2 (x_2+y_2)}{4c^2 z^2}\right] \cdot \exp\left[i\frac{x_2+y_2}{2cz}w\right] \exp\left(i\frac{w}{c}z\right) \exp\left(-iw\frac{d(x+y)}{cz}\right) \cdot A(w) \quad (4)$$

在  $z=0$  的初始平面上普通高斯脉冲的表达式为:

$$A(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\tau}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t}{\tau}\right)^2\right] \exp(-w_0 t) \quad (5)$$

式中:中心波长  $w_c = 2\pi c/\lambda_c$ ,  $\lambda_c$  为中心波长;  $\tau$  为脉宽,代表脉冲  $1/e$  强度点的半宽度。

普通高斯脉冲的傅里叶谱  $A(w)$  为:

$$A(w) = \sqrt{\frac{\tau}{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\tau^2(w-w_c)^2\right] \quad (6)$$

将公式(6)代入公式(4)得出光束 1 的远场衍射

光强表达式为:

$$E_1(r, w) = -\frac{i\sqrt{\tau} w w_0^2}{2\sqrt{2\pi} cz} \exp\left(i\frac{w}{c} z\right) \exp\left(-i w \frac{d(x+y)}{cz}\right) \cdot \exp\left[-\frac{w^2 w_0^2 r^2}{4c^2 z^2}\right] \cdot \exp\left[i\frac{r^2}{2cz} w\right] \exp\left[-\frac{1}{2} \tau^2 (w-w_c)^2\right] \quad (7)$$

式中: 径向距离  $r=(x^2+y^2)^{1/2}$ 。

高斯光束 1 的功率谱为:

$$|E_1(r, w)|^2 = \frac{w^2 \tau w_0^2}{8\pi c^2 z^2} \exp\left[-\frac{w^2 w_0^2 r^2}{2c^2 z^2}\right] \cdot \exp[-\tau^2 (w-w_c)^2] \quad (8)$$

根据巴塞伐尔定理, 普通高斯脉冲光束的光强为:

$$I(r) = \int_{-\infty}^{\infty} |E(r, w)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |E(r, w)|^2 dw \quad (9)$$

将公式(8)代入(9), 得出普通光高斯光束 1 的远场光强为:

$$I_1(r) = \frac{w_0^2 \tau_1}{8\pi c^2 z^2} (A + \tau_1^2 + 2\tau_1^2 w_{c1}^2) \cdot \exp\left(-\frac{\tau_1^2 w_{c1}^2}{A + \tau_1^2}\right) \cdot \exp\left(-\tau_1^2 w_{c1}^2\right) \frac{\sqrt{\pi}}{2(A + \tau_1^2)^{5/2}} \quad (10)$$

式中:  $A = w_0^2 r^2 / (2c^2 z^2)$ ;  $w_0$  为束腰宽度;  $w_{c1}$  和  $\tau_1$  分别为脉冲 1 的中心角频率和脉冲宽度。

根据波长与角频率的关系式  $w_c = 2\pi c / \lambda_c$ , 可以得出有关远场光强与中心波长及脉宽的关系为:

$$I_1(r) = \frac{w_0^2 \tau_1}{8\pi c^2 z^2} \exp\left(-\frac{8\pi^2 c^2 \tau_1^2}{\lambda_{c1}^2}\right) \frac{\sqrt{\pi}}{2(A + \tau_1^2)^{5/2}} \cdot \exp\left(-\frac{4\pi^2 c^2 \tau_1^4}{\lambda_{c1}^2 (A + \tau_1^2)}\right) \left(A + \tau_1^2 + \frac{8\pi^2 c^2 \tau_1^4}{\lambda_{c1}^2}\right) \quad (11)$$

从上式可以看出: 普通高斯脉冲的远场光强与中心波长  $\lambda_{ci}$ 、脉宽  $\tau_i$ 、远场距离  $z$  以及光束束宽  $w_0$  有关。根据非相干合成的原理, 4 束光合成的光强的表达式为:

$$I_{\text{incoh}} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \quad (12)$$

从而得出 4 束普通高斯光束的远场合成光强表达式为:

$$I_{\text{incoh}}(r) = \sum_{i=1}^4 \frac{w_0^2 \tau_i}{16\pi c^2 z^2} \frac{\sqrt{\pi}}{2(A + \tau_i^2)^{5/2}} \exp\left(-\frac{4\pi^2 c^2 \tau_i^2}{\lambda_{ci}^2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{4\pi^2 c^2 \tau_i^4}{\lambda_{ci}^2 (A + \tau_i^2)}\right) \left(A + \tau_i^2 + \frac{8\pi^2 c^2 \tau_i^4}{\lambda_{ci}^2}\right) \quad (13)$$

式中:  $\tau_i, \lambda_{ci}$  分别为 4 束光的脉宽和中心波长,  $i=$

1, 2, 3, 4。

为了分析远场合成光束轴上光强随中心波长和脉宽的变化情况, 对公式(13), 取  $r=0$  得出:

$$I_{\text{incoh}}(0) = \sum_{i=1}^4 \frac{w_0^4}{16\sqrt{\pi} c^2 z^2 \tau_i^2} \left(1 + \frac{8\pi^2 c^2 \tau_i^2}{\lambda_{ci}^2}\right) \quad (14)$$

## 2 数值模拟与计算

### 2.1 4 束中心波长和脉宽相同的子光束的远场合成

为了分析光束的远场合成的光强分布, 首先选取 4 束中心波长和脉宽完全相同的子光束进行远场合成。因此, 设子光束的束腰宽度  $w_0=0.03 \text{ mm}$ , 远场距离  $z=1 \text{ m}$ , 脉冲时间  $\tau=10 \text{ fs}$ , 中心波长  $\lambda_{ci}=1064 \text{ nm}$ ,  $i=1, 2, 3, 4$ 。通过对公式(11)和公式(13)进行仿真如图 3 所示。

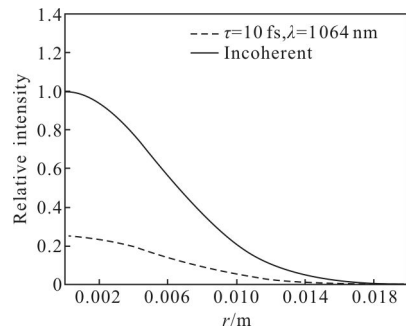


图 3 4 束理想光束的远场合成示意图

Fig.3 Schematic illustration of far field combination for four ideal beams

图 3 中的纵轴为远场焦斑的相对光强, 横轴为焦斑离光轴的相对距离, 0 为焦斑中心。可以看出: 普通高斯脉冲在远场衍射光斑的光强呈高斯分布, 中心光轴上的光斑最强, 合成光束的远场光强和单束光的远场光强分布一样也呈高斯分布。

### 2.2 中心波长对合成光束远场光强的影响

#### 2.2.1 单束光中心波长变化对远场合成光束光强的影响

取理想中心波长  $\lambda_{ci}=1064 \text{ nm}$ ,  $i=1, 2, 3, 4$ 。为了观察单束光中心波长变化对合成光束远场光强的影响, 取  $\lambda_{ci}$  与理想中心波长的差值依次为  $5 \text{ nm}$ ,  $0 \text{ nm}$ ,  $-3 \text{ nm}$ ,  $-7 \text{ nm}$ , 通过公式(1)和(6)可以算得入射光束的光强和中心波长无关, 因此, 改变中心波长后入射光束的光强不变。根据公式(13)进行模拟, 得到中心波长不同的 4 束子光的合成光强的分布, 如图 4 所示。

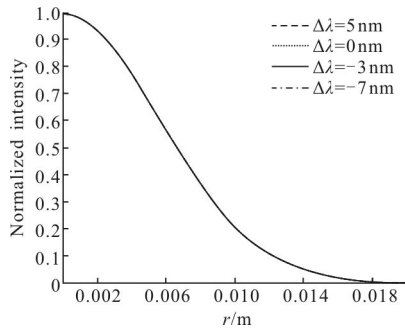


图 4 一个光束中心波长变化的合成光束远场相对光强分布  
Fig.4 Composite beams far field relative intensity distribution with one central wavelength changes

表 1 为一个光束中心波长变化的合成光束轴上相对光强变化率。

表 1 中,  $\Delta\lambda$  为当前中心波长相对于理想中心波长的偏离值,  $A$  为远场轴上光强相对于理想中心波长在远场轴上光强的变化量。

表 1 一个光束中心波长变化的合成光束轴上相对光强变化率

Tab.1 Far field composite beam relative intensity in axis of one wavelength changes

$\Delta\lambda/\text{nm}$	5	2	-3	-7
$A$	-0.23%	-0.09%	0.14%	0.331%

从图 4 中可以看出, 随着子光束 4 的中心波长的减小, 合成光束的远场轴上光强增强, 光束越来越向光轴处聚集。图 5 为合成光束轴上相对光强与一个中心波长变化的关系曲线。可以看出: 合成光束的远场轴上光强随中心波长的增加而减小, 并且减小速度越来越慢。

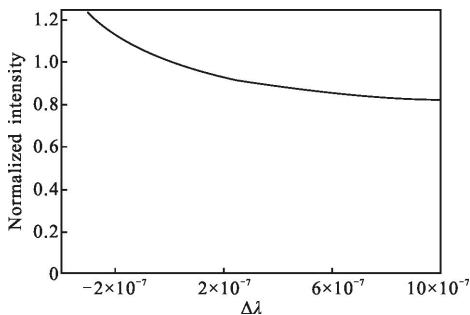


图 5 合成光束轴上相对光强与一个中心波长变化的关系曲线  
Fig.5 Composite beam axial relative intensity varies with one central wavelength

对于单色光的高斯光束, 设初始的腰斑半径为  $w_0$ , 中心波长为  $\lambda$ , 独自传输距离  $z$  后, 强度横向分布

仍满足高斯型分布, 在横截面上形成尺寸为  $w(z)^{[12]}$ 。

大小为  $w(z) = \sqrt{1 + (z^2 \lambda^2) / (\pi^2 \omega_0^4)}$ , 从中可以看出: 当中心波长  $\lambda$  增加时, 束腰半径增大, 即焦斑半径增大, 根据能量守恒原理, 中心轴上的光强减小。

### 2.2.2 两束光中心波长变化对合成光束远场光强的影响

假设在其他参数不变的情况下, 取理想中心波长  $\lambda_{c1} = \lambda_{c2} = 1064 \text{ nm}$ 。并且  $\lambda_{c3} = \lambda_{c4}$  与理想中心波长的差值依次取 5 nm, 0 nm, -3 nm, -7 nm。根据公式(13)进行模拟得到中心波长不同的 4 束子光的合成光强的分布, 如图 6 所示。

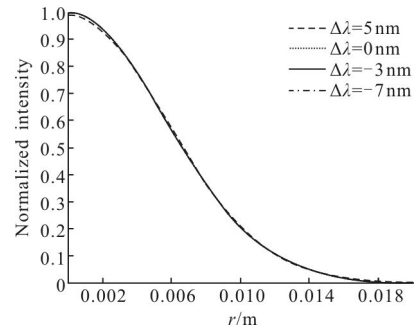


图 6 两个光束中心波长变化的合成光束远场相对光强分布  
Fig.6 Composite beams far field relative intensity distribution with two central wavelengths

表 2 为两个光束中心波长变化的合成光束轴上相对光强变化率。表 2 中,  $\Delta\lambda$  为当前中心波长  $\Delta\lambda_3$  和  $\Delta\lambda_4$  相对于理想中心波长的偏离值,  $A$  为当前远场轴上光强相对于理想中心波长在远场轴上光强的变化量。

表 2 两个光束中心波长变化的合成光束轴上相对光强变化率

Tab.2 Far field composite beam relative intensity in axis of two center wavelength changes

$\Delta\lambda/\text{nm}$	5	2	-3	-7
$A$	-0.463%	-0.181%	0.282%	0.664%

通过图 6 可以看出当两束光的中心波长同时减小时, 合成光束远场光强向中心轴处聚集。图 7 为合成光束轴上相对光强与两个中心波长变化的关系曲线。随着两束光的中心波长的增加, 合成光束远场轴上光强减小。可以看出: 合成光束远场光强随两个中

心波长同时变化的分布与随一个中心波长变化的情况类似。但同时通过对表 1 和表 2 进行对比发现:两个中心波长变化对合成光束远场光强分布的影响明显比一个波长变化对合成光束远场光强的影响大。

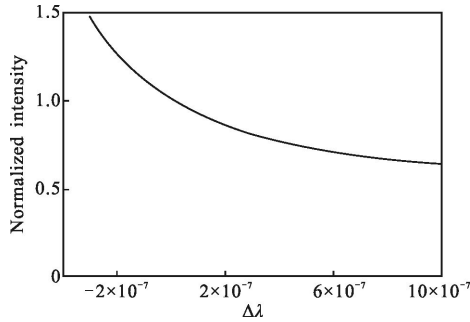


图 7 合成光束轴上相对光强与两个中心波长变化的关系曲线  
Fig.7 Composite beam axial relative intensity varies with two central wavelengths

如果光束为连续激光, 通过与脉冲激光相同的分析方式, 经计算可以得出: 随着中心波长的减小, 远场光强向中心轴上汇聚。

### 2.3 脉宽变化对合成光束远场光强的影响

#### 2.3.1 单束光脉宽变化对合成光束远场光强的影响

取子光束的束腰宽度  $w_0=0.03\text{ mm}$ , 远场距离  $z=1\text{ m}$ , 中心波长  $\lambda_c=1\ 064\text{ nm}$ 。理想脉冲宽度取为  $\tau_i=10\text{ fs}$ ,  $i=1, 2, 3$ 。脉冲 4 的脉宽取相对于理想脉冲变化量差值为  $2\text{ fs}, 0\text{ fs}, -1\text{ fs}, -3\text{ fs}$ 。虽然光束 4 的脉宽在不断变化, 但是通过公式(1)可得入射光强与脉宽无关, 即脉宽变化不会影响入射光强的大小, 从而保证了各个子光束自检入射光强相等。进而对公式(13)进行仿真得出: 4 束合成光束远场光强分布随单束光脉宽变化的情况如图 8 所示。

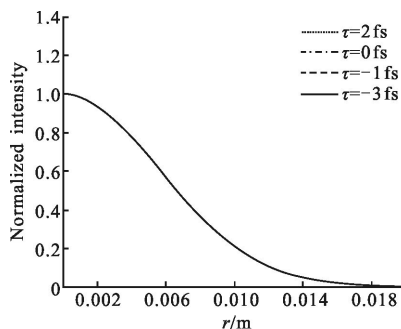


图 8 一个光束脉宽变化的合成光束远场相对光强分布  
Fig.8 Composite beams far field relative intensity distribution with one pulse width changes

表 3 为一个光束脉宽变化的合成光束轴上相对光强变化率。表 3 中,  $\Delta\tau$  为当前脉宽  $\tau_i$  相对于理想脉宽的偏离值,  $A$  为当前远场轴上光强相对于理想脉宽在远场轴上光强的变化量。

表 3 一个光束脉宽变化的合成光束轴上相对光强变化率

Tab.3 Rate of far field composite beam relative intensity in axis with one pulse width changes

$\Delta\tau/\text{fs}$	2	-1	-3	-4
A	-0.013%	0.013%	-0.033%	0.075%

从图 8 中可以看出: 随着子光束 4 的脉宽的减小, 合成光束的远场轴上光强增强, 光束越来越向光轴处聚集。从图 9 可以看出: 合成光束的远场轴上光强随脉宽的增加而减小, 并且减小速度越来越慢。这是因为当脉宽减小时, 入射单元光束的瞬时功率增加。因此远场衍射轴上光强也相应地增加。

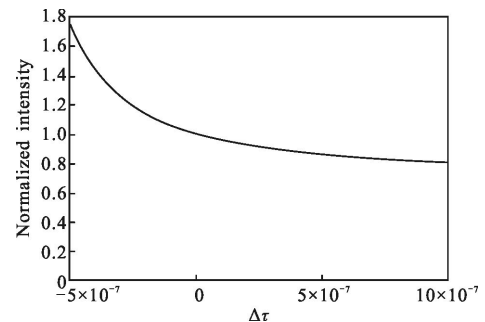


图 9 合成光束轴上相对光强与一个脉宽变化的关系曲线  
Fig.9 Composite beam axial relative intensity vary with one pulse width

#### 2.3.2 两束光脉宽变化对合成光束远场光强的影响

表 4 为两个光束脉宽变化的合成光束轴上相对光强变化率。表 4 中,  $\Delta\tau$  为当前脉宽  $\tau_3$  和  $\tau_4$  相对于理想脉宽的偏离值,  $A$  为当前远场轴上光强相对于理想脉宽在远场轴上光强的变化量。

表 4 两个光束脉宽变化的合成光束轴上相对光强变化率

Tab.4 Rate of far field composite beam relative intensity in axis with two pulse width changes

$\Delta\tau/\text{fs}$	2	-1	-3	-4
A	-0.013%	0.013%	-0.033%	0.075%

图 10 为两个光束脉宽变化的合成光束远场相对光强分布。可以看出：当两束光的脉宽同时减小时，合成光束远场光强向中心轴处聚集。图 11 为合成光束远场轴上光强随着两束光的脉宽同时增大而减小。可以看出：合成光束远场光强随两个脉宽同时变化的分布与随一个脉宽变化的情况类似。但同时通过对表 3 和表 4 进行对比发现：两个脉宽变化对合成光束远场光强分布的影响比一个脉宽变化所产生的影响更强。

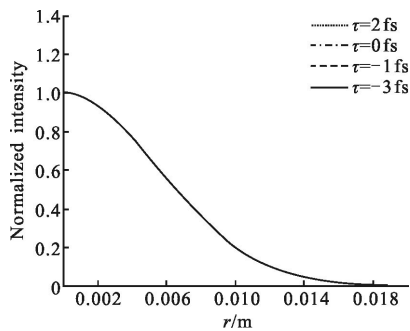


图 10 两个光束脉宽变化的合成光束远场相对光强分布

Fig.10 Composite beams far field relative intensity distribution with two pulse widths change

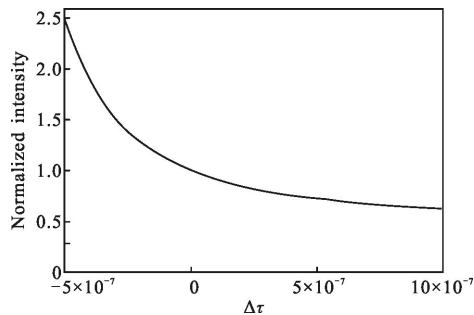


图 11 合成光束轴上相对光强与两个脉宽变化的关系曲线

Fig.11 Composite beam axial relative intensity varies with two pulse widths

通过理论推导和数值分析可知：光脉冲在靶面的能量叠加过程是一个典型的非相干叠加过程。在明确了参与叠加光束的复振幅分布后，远场能量叠加可以按照文中介绍的方法进行靶面光强分布的研究。因此这种分析过程可以用于连续激光、啁啾脉冲等不同类型光束的远场能量叠加研究。

### 3 结论

利用多个光束在远场进行合成是获得高功率光

束的一种有效方法。普通高斯光束的远场光强分布主要与中心波长和脉宽有关。文中利用夫琅禾费衍射积分公式导出了 4 束普通高斯光束远场合成光的解析式，从理论上说明了脉冲参数与远场光强之间的关系。其中重点讨论了中心波长和脉宽对合成光束远场光强分布的影响，结果表明：随着中心波长和脉宽的减小，合成光束远场轴上光强向光轴处聚集，中心光轴上的光强增加。当同时有两束子光束的参数改变时，中心光轴上的光强变化率比一个参数变化相同大小对应变率大很多。

另外通过计算得知：如果使合成光束轴上光强相对于理想中心波长和脉宽的远场轴上光强的变化率小于 5%，那么在其他参数不变的情况下，中心波长变化率最大不能超过 7.89%，或者脉宽变化率最大不能超过 91%。因此得出中心波长的变化对于远场光强分布的影响比脉宽更大。

除此之外，在脉冲总能量保持不变的前提下，随着脉宽减小，远场峰值功率增加。由于能量叠加是非相干的，所以叠加过程会导致靶面总辐照功率的线性增加。

时域误差对于远场能量分布也会产生重要的影响。时域误差即为各路脉冲在时域上的不一致对合成光产生的影响。随着时域误差的增加，远场合成光束的峰值功率会减小，能量逐渐向中心轴两边分散。关于时域误差影响的定量分析将在后续工作中给予重点关注。

### 参考文献：

[1] Zhang Baoan, Chen Heming, Zhu Jianqiang. Quality control in large-aperture laser glass Optical processing [J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(1): 96–100. (in Chinese)  
张宝安, 陈鹤明, 朱健强. 大口径激光玻璃光学加工的质量控制[J]. *应用光学*, 2009, 30(1): 96–100.

[2] Wang Mingzhe, Ma Wen, Zhang Yongliang, et al. Thermal fracture and pump limit of Nd:glass [J]. *High Power Laser and Partical Beam*, 2011, 23(5): 1167–1172. (in Chinese)  
王明哲, 马文, 张永亮, 等. 钕玻璃的热致断裂及泵浦极限[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(5): 1167–1172.

[3] Dong Fenli. The research on thermal effect of LD pumped rod and thin-disk laser crystal [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. (in Chinese)  
董粉丽. LD 泵浦的棒状和薄片状激光介质热效应研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.

- [4] Cao Dingxiang. Study on thermal effects & thermal management in high power solid state lasers [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)  
曹丁象. 高功率固体激光系统的热效应及热管理研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- [5] Wang Hui. Influence of the thermal effect on the output performance of diode pumped solid state laser [D]. Xi'an: Xidian University, 2010. (in Chinese)  
王慧. 热效应对二极管泵浦激光器输出性能的影响 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [6] Tao Yujia. Study on the cooling of high-power solid-State lasers [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Thermophysics), 2010. (in Chinese)  
陶毓伽. 大功率固体激光器冷却研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2010.
- [7] Xu Honghao. Growth and characterization of Neodymium Doped  $\text{La,Rn}_{1-x}\text{VO}_4$  Series Mixed Crystals [D]. Ji'nan: Shandong University, 2014. (in Chinese)  
徐洪浩. 钕掺杂含镧钒酸盐晶体的生长和性质表征 [D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [8] Su Rongtao, Wang Xiaolin, Zhou Pu, et al. Resent research and development of beam combination of high power pulse fiber laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48: 101401. (in Chinese)  
粟荣涛, 王小林, 周朴, 等. 高功率脉冲光纤激光光束合成的最新研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48: 101401.
- [9] Liu Zejin, Zhou Pu, Tao Rumao, et al. Analysis of beam combination technology of high-power LD pumped laser array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011(9): 109-118. (in Chinese)  
刘泽金, 周朴, 陶汝茂, 等. 高能固态激光阵列光束合成技术浅析 [J]. 光学学报, 2011(9): 109-118.
- [10] Li Hongyan, Ren Xiangjun. Research and application of light beam combination [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2002, 39(7): 22-25. (in Chinese)  
李红艳, 任向军. 光束合成技术研究及其应用 [J]. 激光与光电子学进展, 2002, 39(7): 22-25.
- [11] Sun Ling, Zhao Hong, Yang Wenshi, et al. Study on coherent combination theory of multibeam laser [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(2): 111-113. (in Chinese)  
孙玲, 赵鸿, 杨文是, 等. 多光束激光相干合成技术研究 [J]. 激光与红外, 2007, 37(2): 111-113.
- [12] Wang Long, Shen Xueju, Zhang Weian, et al. [J]. *Laser Technology*, 2012(5): 700-703. (in Chinese)  
王龙, 沈学举, 张维安, 等. 高斯光束的光谱传输特性分析 [J]. 激光技术, 2012(5): 700-703.