

# 激光与光电子学进展

## 基于达曼光栅耦合的光纤阵列能量传输系统

余日银<sup>1</sup>, 李德洪<sup>2</sup>, 陈东文<sup>1</sup>, 李勇<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240;

<sup>2</sup>中国直升机设计研究所, 天津 300308

**摘要** 利用光纤阵列传输高功率光能, 并针对基模高斯光, 提出了一种通用的满足达曼光栅分束耦合约束条件的参数设计方法。首先, 确定了系统组成元件并建立数学模型。然后, 利用 MATLAB 软件仿真  $1 \times 6$  达曼光栅分束, 得到的子光斑束腰半径为  $20.31 \mu\text{m}$ 、两两间距为  $127.7 \mu\text{m}$ , 其总衍射效率为  $84.50\%$ 、不均匀度为  $0.23\%$ 。由光栅衍射理论与远场发散角分别计算出子光斑半径, 对比仿真结果可知, 对于基模高斯光入射, 由平面波推导出的子光斑半径公式不适用, 子光斑半径与入射光半径成反比, 而光栅周期数对其无影响, 并通过了实验验证。为了满足耦合约束条件, 提出了一种通用的系统参数设计方法, 通过改变波长、束腰半径、准直倍率、光栅周期长度与聚焦透镜焦距等参数, 得到了精确耦合所需的子光斑半径与间距。

**关键词** 光栅; 达曼光栅; 耦合; 光纤阵列; 能量传输

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0105001

## Fiber Array Energy Transmission System Based on Dammann Grating Coupling

She Riyin<sup>1</sup>, Li Dehong<sup>2</sup>, Chen Dongwen<sup>1</sup>, Li Yong<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

<sup>2</sup>China Helicopter Research & Development Institute, Tianjin 300308, China

**Abstract** To transmit high power optical energy through optical fiber array and aiming at fundamental-mode Gaussian light, a general parameter design method to satisfy the Dammann grating constraint conditions of beam splitting coupling is proposed. First, the components of the system are determined and their mathematical models are given. Then,  $1 \times 6$  Dammann grating beam splitting is simulated by MATLAB, obtaining sub-spots with beam waist radius of  $20.31 \mu\text{m}$  and distance of pairwise spacing is  $127.7 \mu\text{m}$ , with a total diffraction efficiency of  $84.50\%$ , and an inhomogeneity of  $0.23\%$ . According to the optical grating diffraction theory and laser divergence angle, the sub-spots radius is calculated. Comparing the simulation results, for incident fundamental-mode Gaussian beam, the sub-spots radius formula derived from plane wave is not applicable. The radius of the sub-spots is inversely proportional to the radius of the incident light and the number of grating periods has no effect on it. And it is proved by experimental result. In order to satisfy the coupling constraint condition, a general system parameter design method is presented, which adjusts the spot radius, waist radius, collimation ratio, grating unit period length, and focal length of the focusing lens, the spot radius and spacing required by precise coupling are obtained.

**Key words** gratings; Dammann grating; coupling; fiber array; energy transmission

**OCIS codes** 050.1380; 140.3325; 260.2160

收稿日期: 2020-05-15; 修回日期: 2020-06-01; 录用日期: 2020-06-05

\*E-mail: liyo@sjtu.edu.cn

## 1 引言

光纤具有传输损耗低(最低损耗在 0.2 dB/km 以下<sup>[1]</sup>)、质量轻,且制造工艺成熟等优点,是光能传输的重要介质。传输的光能既可以用于工业切割、医学治疗等<sup>[2]</sup>,也可以转化为电能、热能后使用,其传输过程不受电磁干扰,不产生电火花<sup>[3]</sup>。光纤损伤阈值(单位:W/m<sup>2</sup>)和光纤有效面积决定了传输功率上限。为了提高传输功率,并防止损伤光纤,同时抑制非线性效应,目前传输大功率光能时通常使用大芯径光纤(芯径为 105~3000 μm)<sup>[4]</sup>,但大芯径光纤弯曲性能较差,传输距离较短<sup>[1]</sup>,成本较高。将单根大芯径光纤替换为小芯径光纤阵列(如芯径为 50 μm 或 62.5 μm 的多模光纤),不仅可以保证光纤良好的弯曲性能,降低成本,还能通过增加阵列内光纤数量来提高传输功率上限<sup>[5]</sup>,而光纤能量传输系统总是希望可以传输更高的功率。

光源与光纤的耦合是光纤能量传输中的重要环节,提高耦合效率是提高光能传输效率的关键。在光源与光纤阵列的耦合中,一一对应的激光器阵列——光纤阵列耦合较为常见<sup>[6-7]</sup>。可是,考虑到集成化的需求,并且激光器阵列出射的激光通常也需要合束整形,单束激光与光纤阵列的耦合具有较大的研究价值。由于光纤阵列中存在光纤之间的无效面积,直接耦合将导致大量光能泄露。激光分束耦合可以避免光能在无效面积上的损失。光纤要求的入射光斑尺寸较小,但是传统光学元件很难达到<sup>[8]</sup>。微透镜阵列可用于激光与光纤阵列的分束耦合,但对于非均匀入射光,各分束光功率差异大,阵列传输功率上限受其中功率密度最高的光纤制约<sup>[9]</sup>。针对上述问题,衍射光学元件是一种有效的分束器件,它具有结构简单、体积小、衍射效率高优点。其中,达曼光栅是一种二值相位型衍射光学元件,可以将入射光转换为等功率光斑阵列。

近年来,中国科学院上海光学精密机械研究所的周常河等相继设计并实现了 64×64 点阵达曼光栅、圆环形达曼光栅等,相关的理论设计与制造工艺取得

了较大进展<sup>[10-11]</sup>。孙盈<sup>[12]</sup>、王鹏鹏<sup>[13]</sup>、杨晓旦<sup>[14]</sup>将达曼光栅用于激光雷达点阵照明成像,其光束投射距离远、光斑尺寸大,不满足光纤阵列能量传输中耦合结构紧凑及光斑尺寸小的要求,且未能探究子光斑半径与间距随系统参数的变化规律。现有研究中缺乏针对达曼光栅及其他相关元件的参数设计,以满足光纤阵列耦合对光斑尺寸与排列的要求。为了实现利用光纤阵列传输高功率光能,基于达曼光栅耦合的光纤阵列能量传输系统亟需确立其理论模型与参数设计方法,以实现分束光斑与光纤阵列的精确耦合。

本文针对基模高斯光,建立了基于达曼光栅耦合的光纤阵列能量传输系统的数学模型,通过 MATLAB 仿真与实验,提出并验证了一种通用的满足耦合约束条件的系统参数设计方法,实现了分束光斑与光纤阵列的精确耦合。

## 2 系统模型

基于达曼光栅耦合的光纤阵列能量传输系统如图 1 所示,由激光器、准直透镜系统、达曼光栅、聚焦透镜与光纤阵列等构成(不考虑光能利用末端)。激光器发射光束经准直透镜系统准直后通过达曼光栅分束,由聚焦透镜耦合进入对应的光纤中传输。以下分别给出各元件的数学模型。

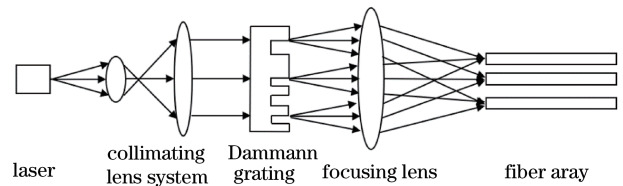


图 1 基于达曼光栅耦合的光纤阵列能量传输系统  
Fig. 1 Fiber array energy transmission system based on Damann grating coupling

### 2.1 激光器

实验中常用的是半导体泵浦固体激光器,如 Nd:YAG 激光器等。固体激光器出射功率大且发散角较小。以基模工作的固体激光器发射的激光是高斯光束,对应的光场分布为

$$E(r, z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{w^2(z)}\right] \cdot \exp\left\{i\left[k\left[z + \frac{r^2}{2\gamma(z)}\right] - \arctan\frac{z}{f}\right]\right\}, \quad (1)$$

式中: $r$ 和 $z$ 分别为光束截面径向和轴向坐标; $E(r, z)$ 为点 $(r, z)$ 处的电场(标量)大小; $E_0$ 为束腰中心电场峰值; $w_0$ 为束腰半径; $\lambda$ 为光波长; $k =$

$2\pi/\lambda$ 为波数; $f = \pi w_0^2/\lambda$ 为焦参数; $w(z) = w_0 [1 + (z/f)^2]^{1/2}$ 和 $\gamma(z) = z + f^2/z$ 分别为与光轴相交于 $z$ 处的高斯光束等相位面的光斑半径与曲率半径。

基模高斯光的发散角采用远场发散角表征为 (视光束质量因子  $M^2 = 1$ )

$$\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{2w(z)}{z} = \frac{2\lambda}{\pi w_0} \quad (2)$$

### 2.2 准直透镜系统

为了减小发散角,通常需要在光源后加入准直透镜系统,最常见的准直透镜系统如图 2 所示。该系统由两个聚焦透镜组成,先使用短焦距透镜  $L_1$  (焦距  $F_1$ ) 聚焦光束缩小束腰半径,然后利用长焦距透镜  $L_2$  (焦距  $F_2$ ) 准直光线减小发散角。该系统实际上是一个倒置的望远镜系统。

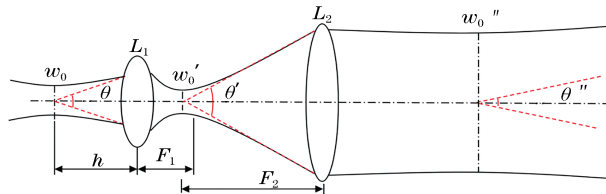


图 2 准直透镜系统

Fig. 2 Collimating lens system

当入射光束束腰距透镜  $L_1$  距离为  $h$  时,系统的准直倍率为

$$Q = \frac{\theta}{\theta''} = \frac{w_0''}{w_0} = \frac{F_2}{F_1} \sqrt{1 + \left(\frac{h - F_1}{f}\right)^2} \quad (3)$$

### 2.3 达曼光栅

达曼光栅是一种二值相位光栅,具有较高的衍射效率。入射光经达曼光栅衍射后可以得到  $N = 2M + 1$  个子光斑 ( $M = 0, 1, 2, \dots$ ),各子光斑等间距排列且光功率相同。

达曼光栅单位周期内复振幅透过率分布如图 3 所示。衍射光斑分布由光栅相位突变点坐标  $\{a_l, b_l\}$  决定,其中  $l = 1, 2, \dots, L$ 。复振幅透过率利用傅里叶变换可分解为

$$t_p(x) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} T_p(m) \exp(i2\pi mx), \quad (4)$$

式中:  $T_p(m)$  为傅里叶变换系数。设一个周期结构存在  $\pi/2 + \delta$  和  $\pi/2 - \delta$  两个相位值,则有

$$T_p(0) = \left[ 2 \sum_{l=1}^L (b_l - a_l) - 1 \right] \sin \delta - i \cos \delta, \quad (5)$$

$$T_p(m \neq 0) = \frac{i}{\pi m} \sin \delta \cdot$$

$$\sum_{l=1}^L \left[ \exp(-i2\pi m b_l) - \exp(-i2\pi m a_l) \right], \quad (6)$$

式中:  $\delta$  一般取  $\pi/2$ , 则二值相位分别是 0 与  $\pi$ 。上述达曼光栅共有奇数个子光斑,称为奇数型达曼光栅。若光栅后半周期的相位分布恰为前半周期的  $\pi$  相位反转,则包括 0 级在内的偶数级次衍射效率为 0, 光功率全部落于奇数级次光斑内,此种达曼光栅称为偶数型达曼光栅。

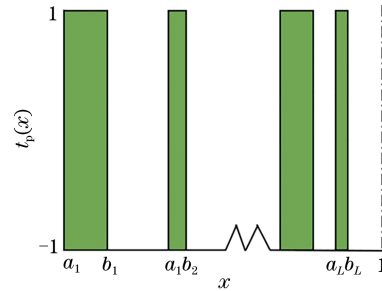


图 3 达曼光栅单位周期复振幅透过率分布

Fig. 3 Complex amplitude transmittance distribution over unit period of Damman grating

达曼光栅各级衍射效率为

$$P(m) = |T_p(m)|^2 \quad (7)$$

当取到第  $M$  级光斑时,总衍射效率为

$$P_E = \sum_{m=-M}^M P(m) \quad (8)$$

不均匀度<sup>[12]</sup>为

$$u = \frac{\sqrt{\sum_{m=-M}^M (P_m - \bar{P})^2}}{\bar{P}} \quad (9)$$

一维光栅在正交方向周期展开后成为二维光栅。设光栅的透过率函数为  $t_p(x, y)$ , 光场在光栅入射面的复振幅分布为  $E_{in}(x, y)$ , 则光栅出射面的复振幅分布为

$$E(x, y) = t_p(x, y) E_{in}(x, y) \quad (10)$$

达曼光栅远场复振幅分布为夫琅禾费衍射

$$E_z(x_z, y_z) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left(ik \frac{x_z^2 + y_z^2}{2z}\right) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y) \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda z} (xx_z + yy_z)\right] dx dy = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left(ik \frac{x_z^2 + y_z^2}{2z}\right) \mathcal{F}\left[E(x, y)\right]_{f_x = \frac{x_z}{\lambda z}, f_y = \frac{y_z}{\lambda z}} \quad (11)$$

### 2.4 聚焦透镜

紧靠衍射屏的聚焦透镜可以将远场的夫琅费衍射转移到透镜后,使衍射分布范围缩小,能量更加集中。由下式可见,与达曼光栅远场复振幅分布相比,衍射后通过聚焦透镜后的分布只是以焦距  $F$  替换了远场距离  $z$ 。

$$E_F(x_F, y_F) = \frac{\exp(ikF)}{i\lambda F} \exp\left(ik \frac{x_F^2 + y_F^2}{2F}\right) \cdot \mathcal{F}\left[E(x, y)\right]_{f_x = \frac{x_F}{\lambda F}, f_y = \frac{y_F}{\lambda F}} \quad (12)$$

### 2.5 光纤阵列

当入射光满足下式时,可以耦合进入光纤阵列内传输。

$$w < R, \quad (13)$$

$$\theta < 2NA, \quad (14)$$

$$s = s_f, \quad (15)$$

式中:  $w$ 、 $\theta$ 、 $s$  分别是入射光在光纤入射端面的光斑半径、发散角与光斑两两间距;  $R$ 、 $NA$ 、 $s_f$  分别是光纤纤芯半径、数值孔径与光纤两两间距。

利用  $N$  根光纤(纤芯半径  $R_2$ ) 组成的光纤阵列替代单根纤芯半径为  $R_1$  的光纤且保持纤芯总面积不变,即

$$R_1^2 = NR_2^2. \quad (16)$$

令入射光为高斯分布,入射面上光斑半径与纤芯半径相同,两种光纤的损伤阈值同为  $I_0$ ,则其可传输功率上限分别为

$$P_1 = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_1} I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{R_1^2}\right) r dr d\varphi, \quad (17)$$

$$P_2 = N \int_0^{2\pi} \int_0^{R_2} I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{R_2^2}\right) r dr d\varphi. \quad (18)$$

通过积分得到两种情况下的可传输功率上限相同。因此,将大芯径光纤替换为相同纤芯面积的小芯径光纤阵列后并未减弱其传输能力。

## 3 仿真分析

### 3.1 达曼光栅分束仿真

基于上述理论模型,利用 MATLAB 进行达曼光栅分束仿真。在文献[15]列举的 2~64 分束达曼光栅数值解中,6 分束达曼光栅具有最高的总衍射效率,因此本文分束数选择为 6。考虑到所需计算量,采用的突变点坐标相比原文献减少了 1 位有效位数。将计算所得衍射效率与原文献对比可知,简化对总衍射效率几乎没有影响,对不均匀度影响很小。突变点坐标如表 1 所示。

表 1 达曼光栅单位周期相位突变点坐标

Table 1 Phase jump points coordinate in unit period of Dammann grating

$l$	$a_l$	$b_l$
1	0	0.1144
2	0.2088	0.5000
3	0.6144	0.7088

由(5)~(7)式可得各级达曼光栅衍射效率,如表 2 所示。

表 2 各级达曼光栅衍射效率

Table 2 Diffraction efficiency of Dammann grating

Diffraction level	Diffraction efficiency
$\pm 1$	0.1412
$\pm 3$	0.1404
$\pm 5$	0.1409

由(8)式可知,达曼光栅总衍射效率为各级衍射效率之和  $P_E = 84.50\%$ 。由(9)式可知,达曼光栅衍射不均匀度  $u = 0.23\%$ 。可见,该达曼光栅具有较高的衍射效率和较均匀的光功率分布。

光纤阵列选用纤芯/包层直径为  $62.5/125 \mu\text{m}$  的多模光纤,其数值孔径  $NA = 0.22$ 。为提高与光纤阵列的耦合效率,达曼光栅产生的子光斑须满足(13)~(15)式的耦合条件。实际应用中,光纤入射端面的激光光斑直径一般不大于光纤纤芯直径的  $2/3$ [16]。光纤之间的间距由应用场景与加工工艺确定,但至少应大于光纤包层直径。所以,仿真中,子光斑与光纤阵列的耦合约束条件为

$$w \leq 20.83 \mu\text{m}, \quad (19)$$

$$\theta < 0.44 \text{ rad}, \quad (20)$$

$$s > 125 \mu\text{m}. \quad (21)$$

由衍射光学理论中的多缝干涉因子及光栅方程,可得子光斑半径  $w$  和间距  $s$ [8] 为

$$w = \frac{\lambda F}{nd}, \quad (22)$$

$$s = \frac{c\lambda F}{d}, \quad (23)$$

式中:  $d$  为光栅周期长度;  $n$  为光栅周期数。对于奇数型达曼光栅  $c = 1$ ; 对于偶数型达曼光栅  $c = 2$ 。

将(22)、(23)式代入(19)、(21)式中,两式相除,得  $n > 3$ , 试取  $n = 8$ 。确定激光器波长后,根据约束条件和常见器件参数选择合适的光栅周期长度与透镜焦距。确定的仿真参数如表 3 所示,其中  $w_0''$  为经过准直扩束后的激光束腰半径,结合实际取值为  $1 \text{ mm}$ 。

表 3 仿真参数

Table 3 Simulation parameters

Parameter	$\lambda/\mu\text{m}$	$w_0''/\text{mm}$	$d/\text{mm}$	$n$	$F/\text{mm}$
Value	0.532	1	1	8	120

仿真得到分束后聚焦于光纤入射端面的子光斑功率密度分布(归一化后,下同)如图 4 所示,在连接各光斑中心的轴( $y=0$ )上,光功率密度分布如图 5(a)所示。

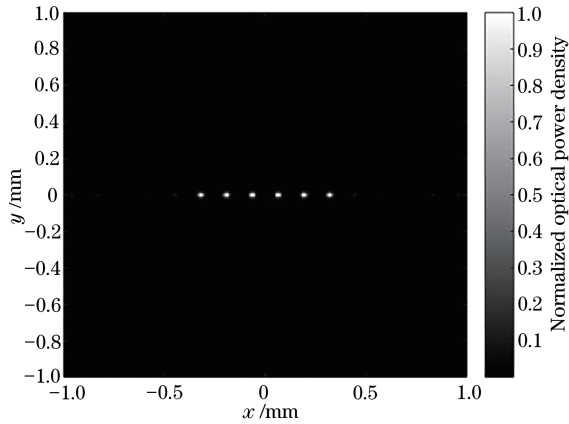


图 4 子光斑分布

Fig. 4 Distribution of sub-spot

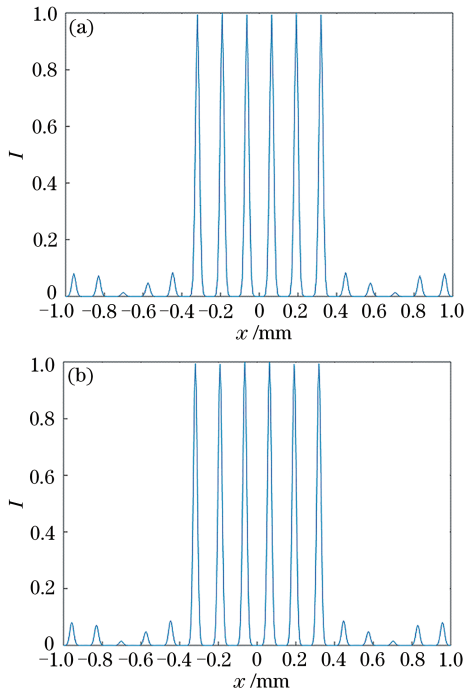


图 5 基模高斯光不同周期数达曼光栅光功率密度分布。

(a)8周期;(b)14周期

Fig. 5 Optical power density distribution of different period numbers Dammann grating with fundamental mode Gaussian beam. (a) 8 periods; (b) 14 periods

通过数值拟合可知,第 1 级子光斑的光功率密度分布满足下式,为高斯分布。

$$I = \exp\left[-\left(\frac{x - 0.0639}{0.01436}\right)^2\right], \quad (24)$$

由图 5(a)可知,其他子光斑光功率密度也为高斯分布。测得各子光斑半径为  $20.31 \mu\text{m}$ (以中心光功率密度的  $e^{-2}$  计),相邻光斑间距为  $127.7 \mu\text{m}$ 。由(2)式可得,光斑的半发散角  $\theta = 16.68 \text{ mrad}$ 。因此经该达曼光栅分束后的子光斑可耦合进入紧密排列的  $1 \times 6$  多模光纤阵列中。不考虑光纤入射端面的菲涅耳反射及透镜损耗,其耦合效率为达曼光栅总衍射效率,为  $84.50\%$ 。

通过(22)、(23)式计算得到子光斑半径为  $7.98 \mu\text{m}$ ,与仿真结果差距较大;间距为  $127.68 \mu\text{m}$ ,与仿真结果吻合。同时,根据(22)式,增加光栅周期数  $n$  可以缩小光斑。然而,令  $n = 14$ ,光斑大小几乎不变,如图 5(b)所示。

### 3.2 讨论分析

由衍射理论可知,经过达曼光栅后的各子光束其发散角与入射光相同,结合(2)式可得:

$$w = \frac{\theta}{2} F = \frac{\lambda F}{\pi w_0''}. \quad (25)$$

(25)式与(22)式相矛盾。将仿真参数代入(25)式,得  $w = 20.32 \mu\text{m}$ ,与仿真结果吻合。实际上,(22)式由平面光波推导得出,而本次仿真与实际中常用的入射光都是基模高斯光。文献[14]利用平面波与基模高斯光的频谱函数推论出,只要基模高斯光的空间范围宽度足够,那么它与平面波通过达曼光栅后的分束效果是相似的。反之,若基模高斯光束腰半径相比光栅尺寸较小,则由平面波推导出的结论并不适用于入射光为基模高斯光的情况。入射光束腰半径  $w_0''$  也是子光斑半径的影响因素。如图 6 所示,光栅周期数  $n = 14$ ,缩小入射光半径至原来的一半( $0.5 \text{ mm}$ ),出射子光斑半径扩大为原来的两倍( $40.57 \mu\text{m}$ )。

实际上,(11)式中有:

$$\mathcal{F}[E(x, y)] = \mathcal{F}[t_p(x, y) E_{in}(x, y)] = \frac{1}{2\pi} \mathcal{F}[t_p(x, y)] * \mathcal{F}[E_{in}(x, y)]. \quad (26)$$

由卷积的性质可知,对于达曼光栅远场光分布,光斑间距由(26)式第一项决定,但被卷积“复制”至各衍射级次的光斑其尺寸则由第二项——入射光的傅里叶变换项决定。一般根据平面波推导时,默认

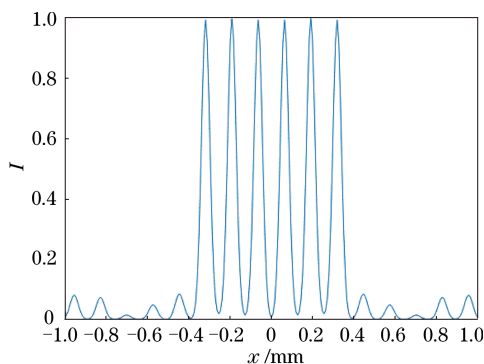


图 6 入射光束腰半径 0.5 mm 时 14 周期达曼光栅光功率密度分布

Fig. 6 Optical power density distribution of 14 periods Dammann grating when incident beam waist radius is 0.5 mm

入射光与光栅(通光孔径)等大,即  $2w_0'' = nd$ , 所以平面波子光斑半径与  $n, d$  成反比, 即与  $2w_0''$  成反比; 但对于基模高斯光, 由于其光功率密度分布自中心向边缘逐渐降低, 束腰半径以外的光功率很小, 此时, 即使增加光栅周期数, 落于光场大小几乎为 0 的区域的这部分光栅对于衍射也没有影响。默认  $\pi w_0'' < nd$ , 而子光斑半径仅与  $\pi w_0''$  成反比。并且, 由于发散角一般大于衍射极限角, 所以不必考虑衍射极限。

#### 4 实验验证

为验证上述分析, 搭建实验系统进行实验。实验系统如图 7 所示, 由激光器(聚焦光斑大小可调)、达曼光栅与 CCD 相机组成。其中激光器波长为 532 nm, 出射功率为 5 mW; 达曼光栅为  $7 \times 7$  分束, 周期长度为  $16.63 \mu\text{m}$ , 总衍射效率大于 75%, 不均匀度小于 30%; CCD 相机的感光面为  $4.8 \text{ mm} \times 3.8 \text{ mm}$ , 分辨率为  $720 \times 576$ 。

打开激光器, 前后调节 CCD 相机的位置至光斑最小, 利用自带软件得到聚焦光斑直径并记录。随

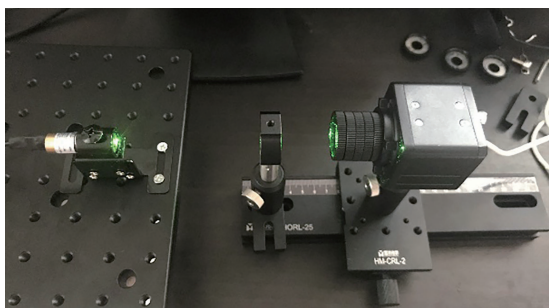


图 7 实验系统

Fig. 7 Experiment system

后, 保持激光器与 CCD 相机位置不变, 在二者中插入达曼光栅, 前后调节达曼光栅至合适的位置, 使若干个光斑照射到 CCD 相机的感光面, 并读取一个光斑的直径, 如图 8 所示。

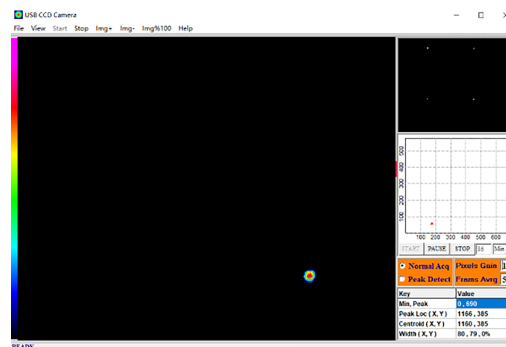


图 8 光斑直径测量

Fig. 8 Light spot radius measurement

调节激光器自带的透镜位置, 改变聚焦光斑大小, 重复几次实验, 得到表 4 中五组数据, 其中  $d_{f0}$  为激光器出射聚焦光斑直径(对测得  $x, y$  轴光斑宽度取均方根, 下同),  $d_{sp}$  为分束子光斑直径,  $\Delta$  为后者相对前者之差。表中数据分布如图 9 所示。可以看出, 在误差范围内, 插入达曼光栅后测得的分束子光斑直径与原聚焦光斑直径相同。

上述实验验证了达曼光栅分束前后光斑远场发散角不变, 因而当聚焦高斯光束腰照射在达曼光栅上时, 分束后的子光斑半径与入射光远场发散角成正比, 即与入射光束腰半径成反比, 即(25)式。另外, 通过软件读取子光斑间距  $s$ , 如表 5 所示, 并测量得到光栅至相机感光面距离  $z$ , 计算理论间距  $s_{ca}$ , 可以验证(23)式。

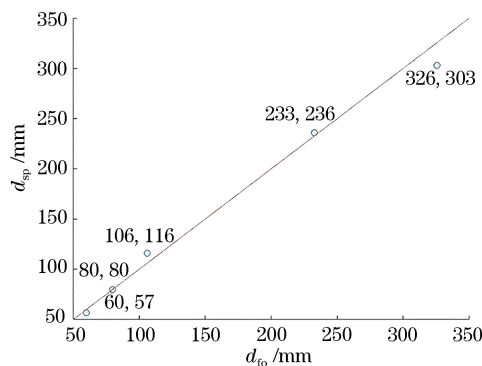


图 9 分束前后光斑大小

Fig. 9 Spot size before and after beam splitting

验证后的理论可以用于设计满足耦合约束条件的系统参数。令子光斑半径与间距分别为  $a, b$ , 联立(23)、(25)式可得:

表 4 分束前后光斑大小

Table 4 Spot size before and after beam splitting

No.	$d_{lo} / \mu\text{m}$	$d_{sp} / \mu\text{m}$	$\Delta / \%$
1	60	57	-5.0
2	80	80	0.0
3	106	116	9.4
4	233	236	1.3
5	326	303	-7.1

表 5 子光斑间距

Table 5 Sub-spots spacing

No.	$s / \text{mm}$	$z / \text{mm}$	$s_{ca} / \text{mm}$	$\Delta / \%$
1	1.72	53	1.70	-1.2
2	1.98	63	2.02	2.0
3	2.18	67	2.14	-1.8
4	2.66	75	2.40	-9.8
5	2.90	88	2.82	-2.6

$$\frac{\omega_0''}{d} = \frac{b}{c\pi a} \quad (27)$$

在确定需要的光波长  $\lambda$  后,如图 10 所示,可结合(25)式、(26)式及实际可得的器件参数依次确定光栅周期长度  $d$ 、入射光斑束腰半径  $\omega_0''$  与透镜焦距  $F$ ,其中  $\omega_0''$  可通过调整准直倍率  $Q$  改变。当周期长度  $d$  多次修正(可定义修正次数上限  $t_d$ ,并记录修正次数  $t$ )都不能满足耦合条件时,考虑修改光波长或光纤阵列结构。由此,利用系统参数设计满足光纤耦合约束条件,减少耦合损耗。

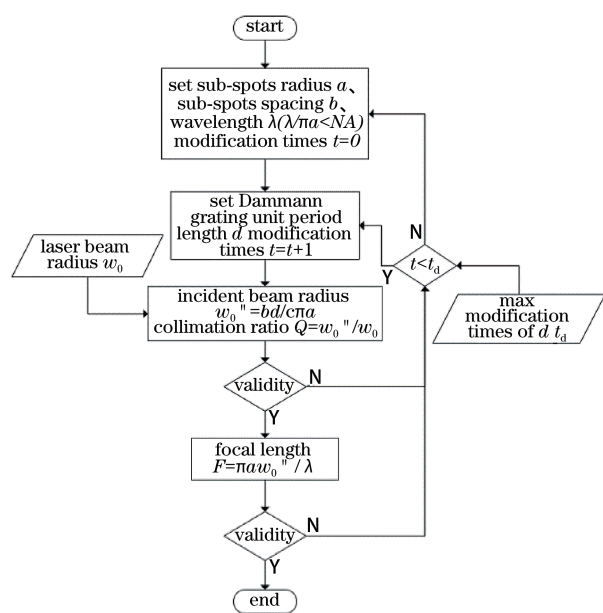


图 10 系统参数设计流程图

Fig. 10 Diagram of system parameters design

## 5 结 论

本文提出了基于达曼光栅耦合的光纤阵列能量传输系统方案,与等纤芯面积的单根光纤相比其传输功率上限相同,但弯曲性能更佳、成本更低,且可以通过增加光纤数量来增大传输功率。利用 MATLAB 搭建仿真系统,入射光为基模高斯光,研究发现,单束激光被达曼光栅分束成束腰半径为  $20.31 \mu\text{m}$ 、两两间距为  $127.7 \mu\text{m}$  的六个呈高斯分布的等功率光斑,其总衍射效率为  $84.50\%$ ,不均匀度为  $0.23\%$ ,可以与多模光纤阵列高效耦合。为了满足约束条件、减少耦合损耗,需要设计系统参数,但是由平面波推导出的子光斑半径公式并不适用于基模高斯光,即使增加光栅周期数也不能缩小子光斑尺寸。通过仿真与实验可知,子光斑半径与间距均与光波长  $\lambda$ 、透镜焦距  $F$  成正比,子光斑半径与入射光束腰半径  $\omega_0''$  成反比,间距与光栅周期长度  $d$  成反比。由此可以设计系统参数,得到合适的光斑半径与排列,实现单束激光经达曼光栅分束后与光纤阵列的精确耦合。

## 参 考 文 献

- [1] Chi Z Y. Fiber optics, theories and applications [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 88-89.  
迟泽英. 光纤光学与光纤应用技术 [M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2014: 88-89.
- [2] Li P, Shi H X, Fu C, et al. High power nanosecond pulsed ytterbium-doped fiber laser for laser cleaning [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55 (12): 121406.  
李磐, 师红星, 符聪, 等. 激光清洗用高功率纳秒脉冲掺镱光纤激光器 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(12): 121406.
- [3] Xiao B. Design and realization of low power consumption intelligent power-over-fiber system [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2017: 1.  
肖斌. 低功耗智能光纤传能系统的设计及实现 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2017: 1.
- [4] Wang S J, Zhang Z L, Cao C, et al. Nanosecond pulse laser output with average power of 761 W and pulse energy of 17.5 mJ based on domestic fiber [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1215002.  
王世杰, 张志伦, 曹驰, 等. 利用国产光纤实现平均功率 761 W、脉冲能量 17.5 mJ 纳秒脉冲激光输出

- [J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1215002.
- [5] Wang T L, Sun X P, Li Y, et al. Simulation of coherent propagation of nineteen-laser-beam array [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(11): 110601.  
王彤璐, 孙鑫鹏, 李晔, 等. 19束激光阵列光束相干传输的仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(11): 110601.
- [6] Zhao Y W. Study on the semiconductor laser fiber array coupler[D]. Xi'an: Xidian University, 2014: 19-22.  
赵炎武. 半导体激光器光纤阵列耦合器件研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014: 19-22.
- [7] Hao M M. Research on technologies of high power beam combination and fiber coupling for diode laser short arrays [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2012: 29-31.  
郝明明. 大功率半导体激光短阵列合束及光纤耦合技术的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012: 29-31.
- [8] Zheng Z P. Research and design of multi-beam device for HD slider bonding [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 2-3, 8-13.  
郑周坪. 磁头焊接激光分束器的研究与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 2-3, 8-13.
- [9] Wang Y H, Wang H W, Wang G. Design of high efficiency fiber coupling system based on microlens array [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 041401.  
王艳红, 王海伟, 王高. 基于微透镜阵列的高效率光纤耦合系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 041401.
- [10] Xi P, Zhou C H, Zhao S, et al. Design and fabrication of  $64 \times 64$  spot array dammann grating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(4): 369-371.  
席鹏, 周常河, 赵帅, 等.  $64 \times 64$ 点阵达曼光栅的设计与实现[J]. 中国激光, 2001, 28(4): 369-371.
- [11] Jia J, Zhou C H, Liu L R. Toroidal Dammann grating [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2003, 40(12): 41-45.  
贾佳, 周常河, 刘立人. 圆环形达曼光栅[J]. 激光与光电子学进展, 2003, 40(12): 41-45.
- [12] Sun Y. Research on Dammann grating array illumination performance of non-scanning imaging Ladar [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 13, 39-44.  
孙盈. 非扫描成像激光雷达达曼光栅阵列照明性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 13, 39-44.
- [13] Wang P P. Investigation on dot-array imaging lidar based on Dammann gratings [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013: 42-49.  
王鹏鹏. 基于达曼光栅的点阵照明成像激光雷达系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013: 42-49.
- [14] Yang X D. Investigation on linear array imaging lidar based on Dammann gratings [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016: 22-24, 39-40.  
杨晓旦. 基于达曼光栅的激光雷达线阵照明研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 22-24, 39-40.
- [15] Zhou C H. Principle & application of Dammann grating [M]. Beijing: Science Press, 2017: 1-12.  
周常河. 达曼光栅原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 1-12.
- [16] Li Y, Zhang K H, Li Q, et al. Research on fiber optic coupling for the high-power laser beam [J]. Applied Laser, 2004, 24(5): 276-278.  
李钰, 张阔海, 李强, 等. 大功率激光光纤耦合技术研究[J]. 应用激光, 2004, 24(5): 276-278.