

基于紧聚焦方式的阵列光束相干合成特性分析*

钟哲强¹⁾ 母杰²⁾³⁾⁴⁾ 王逍²⁾³⁾⁴⁾ 张彬^{1)†}

1) (四川大学电子信息学院, 成都 610065)

2) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

3) (等离子体物理重点实验室, 绵阳 621900)

4) (上海交通大学 IFSA 协同创新中心, 上海 200240)

(2020年1月6日收到; 2020年2月9日收到修改稿)

为获得高功率、波长量级尺寸的聚焦光斑, 提出利用紧聚焦方式实现阵列光束相干合成的新方案. 通过建立阵列光束经紧聚焦方式相干合成的物理模型, 分析了阵列光束的排布方式、偏振态、束宽、间距和紧聚焦系统数值孔径等参数对合成光束特性的影响及规律. 结果表明, 阵列光束经紧聚焦方式合束时, 线偏振及圆偏振阵列光束均能获得较好的合成效果, 径向偏振阵列光束次之, 而角向偏振阵列光束则不能有效地合成. 通过优化阵列光束的排布方式、束宽和间距, 以及合理选择紧聚焦系统的数值孔径, 能在保持较好光束质量和较高合成效率的前提下获得能量集中度高的焦斑.

关键词: 紧聚焦, 阵列光束, 相干合成, 数值孔径

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Jf, 42.79.Bh

DOI: 10.7498/aps.69.20200034

1 引言

由于热效应和非线性效应的限制, 单一激光器的输出往往是有限的, 难以满足日益增长的应用需求. 激光相干合成技术通过精确控制各路光束的相位, 使具有相同波长、偏振态一致的光束阵列在远场以相互干涉的方式进行叠加, 从而实现高功率密度、高光束质量的激光输出, 已成为激光技术领域的研究热点之一. 以光纤激光相干合成为例, 主要合成方案有分块式能动镜^[1]、六棱台合束器^[2]、光波导自成像^[3]等. 然而, 上述方法均受限于合束和聚焦系统的大菲涅耳数, 难以在保持较好光束质量的前提下获得波长量级尺寸的聚焦光斑.

紧聚焦是指光束通过大数值孔径 (numerical

aperture, NA) 光学元件聚焦的过程, 如透镜、离轴抛物面镜^[4]、超表面器件^[5]和表面等离子体激元透镜^[6]等. 紧聚焦往往用于产生尺寸与波长相当的焦斑或多焦点阵列, 因而广泛应用于光存储、多点微成像、激光微加工和光学操纵与捕获^[7-9]. 紧聚焦一个非常重要的应用就是实现超衍射极限聚焦, 并进一步结合衍射光学元件或偏振元件来避免能量损失, 提高能量利用率, 在光存储和激光微加工领域获得了广泛的应用. 目前, 通过对入射光的调控以实现紧聚焦空间光场分布的控制受到广泛关注, 而紧聚焦未来重要的发展趋势仍然是如何进一步获得小尺度光场, 并实现与新物质、新材料相互作用等方面. 基于紧聚焦方式的阵列光束相干合成不仅能够有效地提升紧聚焦空间的光场功率密度, 甚至还可以通过阵列光束各个子束的调控来实现

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 61905167)、国家重大专项应用基础项目 (批准号: JG2017149, JG2019299, JG2019292) 和中国博士后科学基金 (批准号: 2018M643463) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangbinff@sohu.com

对紧聚焦光场的控制,从而可为小尺度光场与物质相互作用提供新的途径.此外,大数值孔径、大口径透镜近年来也得到了飞速发展^[10,11],为阵列光束的相干合成提供了条件.然而,在利用紧聚焦方式实现阵列光束相干合成中,阵列光束的排布方式、光束参数和 NA 等对相干合束特性的影响规律尚不明确,也鲜有相关报道.本文从矢量衍射理论出发,建立了阵列光束经紧聚焦方式相干合束的物理模型,进而分析了排布方式、偏振态、束宽、间距和数值孔径等参数对相干合成的影响及规律,从而为基于紧聚焦的阵列光束相干合成提供参考.

2 阵列光束紧聚焦合束的物理模型

图 1 给出了阵列光束经紧聚焦方式聚焦的光路示意图.对于一个紧聚焦 ($NA > 0.7$) 系统而言,标量衍射理论中的近似条件,如傍轴近似、菲涅耳或夫琅禾费衍射近似都不满足,因而必须采用矢量衍射积分法进行定量分析.在紧聚焦系统中, $NA = n \sin \alpha$ (n 为透镜后介质折射率, α 为最大出射角).在入射光束和透镜口径均不变的前提下,透镜焦距 f 与数值孔径 NA 满足 $f = D / \tan[\arcsin(NA)]$,其中 D 为透镜口径.

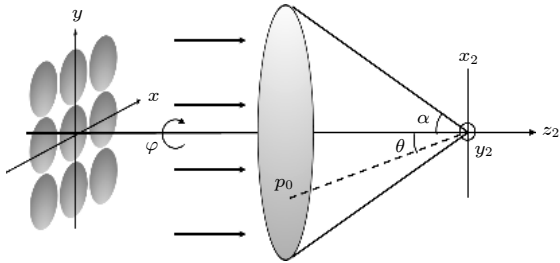


图 1 阵列光束经紧聚焦方式合成的光路图

Fig. 1. Light path of beam combination of beam array via tight focusing.

基于电磁场的矢量近似和 Debye 近似,紧聚焦衍射积分方程为^[12,13]

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(x_2, y_2, z_2) &= -\frac{ikf}{2\pi} \int_0^\alpha \int_0^{2\pi} \sin \theta A(\theta, \varphi) b(\theta, \varphi) \mathbf{P}(\theta, \varphi) \\ &\quad \times \exp[ikn(z_2 \cos \theta + x_2 \sin \theta \cos \varphi \\ &\quad + y_2 \sin \theta \sin \varphi)] d\varphi d\theta, \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $A(\theta, \varphi)$ 为入射光束的振幅, $B(\theta, \varphi) = (\cos \theta)^{1/2}$

为消球差透镜的切趾因子, $\mathbf{P}(\theta, \varphi)$ 表明聚焦光场的偏振态,通常表示为 $\mathbf{P}(\theta, \varphi) = \mathbf{T}(\theta, \varphi) \times \mathbf{P}_0(\theta, \varphi)$,其中 $\mathbf{P}_0(\theta, \varphi)$ 为入射光场的矢量矩阵, $\mathbf{T}(\theta, \varphi)$ 为透镜对偏振的变换矩阵. n 为透镜后传输介质折射率,比如 $n_{\text{air}} = 1$, $n_{\text{water}} = 1.33$, $n_{\text{oil}} = 1.51$. (x, y, z) 和 (x_2, y_2, z_2) 分别为入射光场和聚焦光场的坐标.

入射光场的矢量矩阵 $\mathbf{P}_0(\theta, \varphi)$ 可表示为

$$\mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} p_x(\theta, \varphi) \\ p_y(\theta, \varphi) \\ p_z(\theta, \varphi) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

透镜的变换矩阵由下式计算得到:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}(\theta, \varphi) &= \mathbf{R}^{-1} \mathbf{C} \mathbf{R}, \\ \mathbf{R} &= \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{C} &= \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

于是,聚焦光场的偏振态 $\mathbf{P}(\theta, \varphi)$ 可根据 (2) 式和 (3) 式求得.

假设阵列光束由高斯光束组成,子光束束宽定义为 w_0 ,以 (x_p, y_p) 为阵列中第 p 束光的中心坐标,则阵列光束在入瞳面的电场分布可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{input}}(x_p, y_p, z_0) &= \sum_p \mathbf{P}_0(\theta, \varphi) \exp \left[-\frac{(x - pw_d)^2 + (y - pw_d)^2}{w_0^2} \right] \\ &\quad \times \exp(i\omega t + i\varphi_p), \end{aligned} \quad (4)$$

式中 ω 为子光束中心角频率, φ_p 为子束 p 的初始相位, w_d 为各子束中心的间距.

基于建立的阵列光束紧聚焦物理模型,分析了关键参数,如光束排布方式、偏振态、束宽、间距和数值孔径等对相干合束特性的影响及规律.为便于讨论且不失一般性,假设中心波长为 850 nm,光束束宽 w_0 为 100 μm ,各子束间无相位差.本文仅针对 x 方向线偏振、左旋圆偏振、径向偏振和角向偏振偏振光入射情况进行讨论,表 1 列出了其偏振矩阵 $\mathbf{P}_0(\theta, \varphi)$ ^[14].

此外,采用桶中功率 (power in bucket, PIB) 曲线来对焦斑能量集中度进行评价. PIB 定义为在给定桶中的激光能量占激光束总能量的百分比^[15],即

$$PIB = \frac{\int_{-b}^b \int_{-b}^b \langle I \rangle dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \langle I \rangle dx dy}, \quad (5)$$

式中 b 为选定桶的宽度. PIB 值越大, 光束的聚焦能力越好, 能量集中度越高.

表 1 不同偏振态的矩阵 $P_0(\theta, \varphi)$ ^[14]

Table 1. Matrixes $P_0(\theta, \varphi)$ ^[14] of different polarization states.

偏振态	线偏振	左旋圆偏振	径向偏振	角向偏振
矩阵	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1i/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -\sin \varphi \\ \cos \varphi \\ 0 \end{bmatrix}$

3 合成光束特性

3.1 光束排布方式和偏振态对合束特性的影响

图 2 给出了阵列光束两种典型的光路排布方

式, 矩形排布和六边形排布. 相比于矩形排布方式, 六边形排布在同等口径内能容纳更多的光束. 图 3 和图 4 分别给出了不同排布方式且入射光束偏振态分别为线偏振、左旋圆偏振、径向偏振和角向偏振时, 聚焦光斑的总光强及其各个分量. 图 5 则进一步给出了对应的 PIB 曲线. 计算所采用的参数为: 束宽 $w_0 = 100 \mu\text{m}$, 间距 $w_d = 220 \mu\text{m}$, $NA = 0.95$, $n = 1$ (空气).

从图 3 可以看出, 对于矩形排布方式, 线偏振和圆偏振阵列光束入射后相干合成为一个焦斑, 而

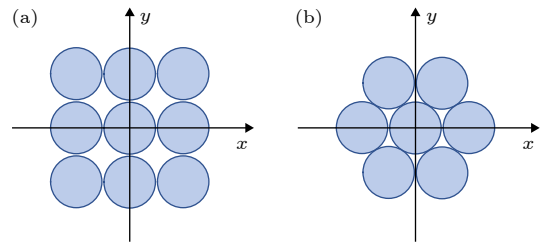


图 2 光束排布方式 (a) 矩形; (b) 六边形

Fig. 2. Beam configurations: (a) Rectangle; (b) hexagon.

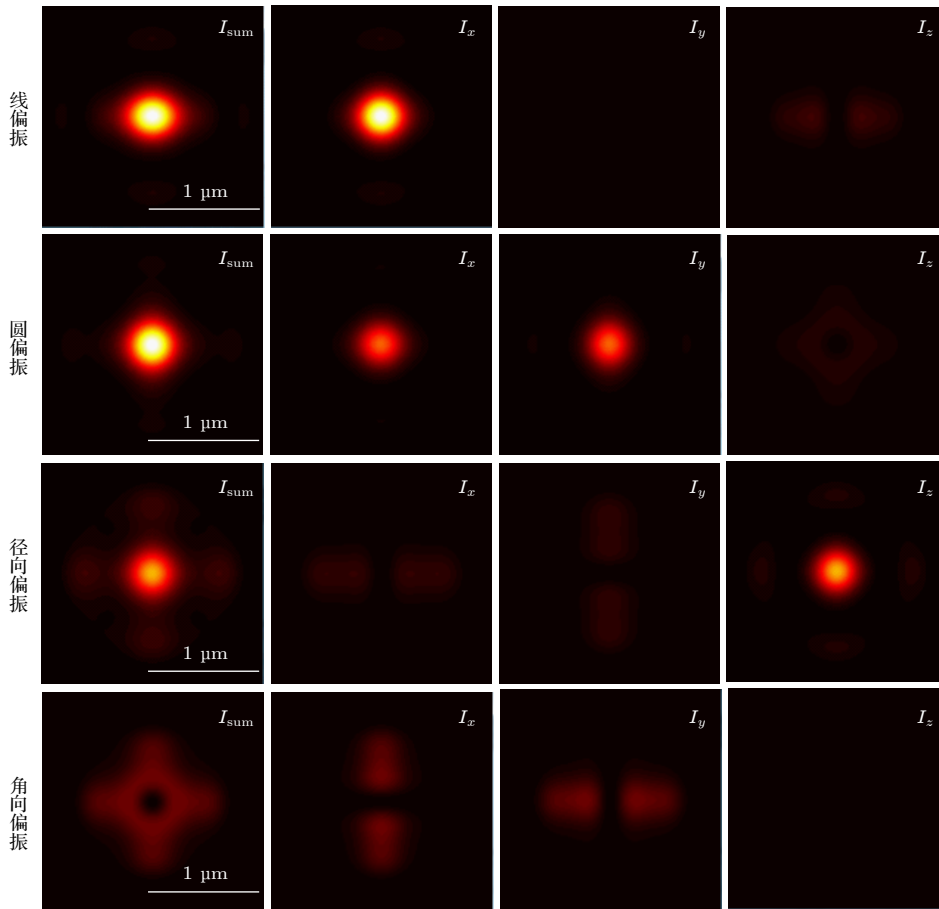


图 3 矩形排布方式下, 不同偏振态阵列光束的聚焦光斑

Fig. 3. Tight-focused spots of beam array with different polarization states under rectangle configuration.

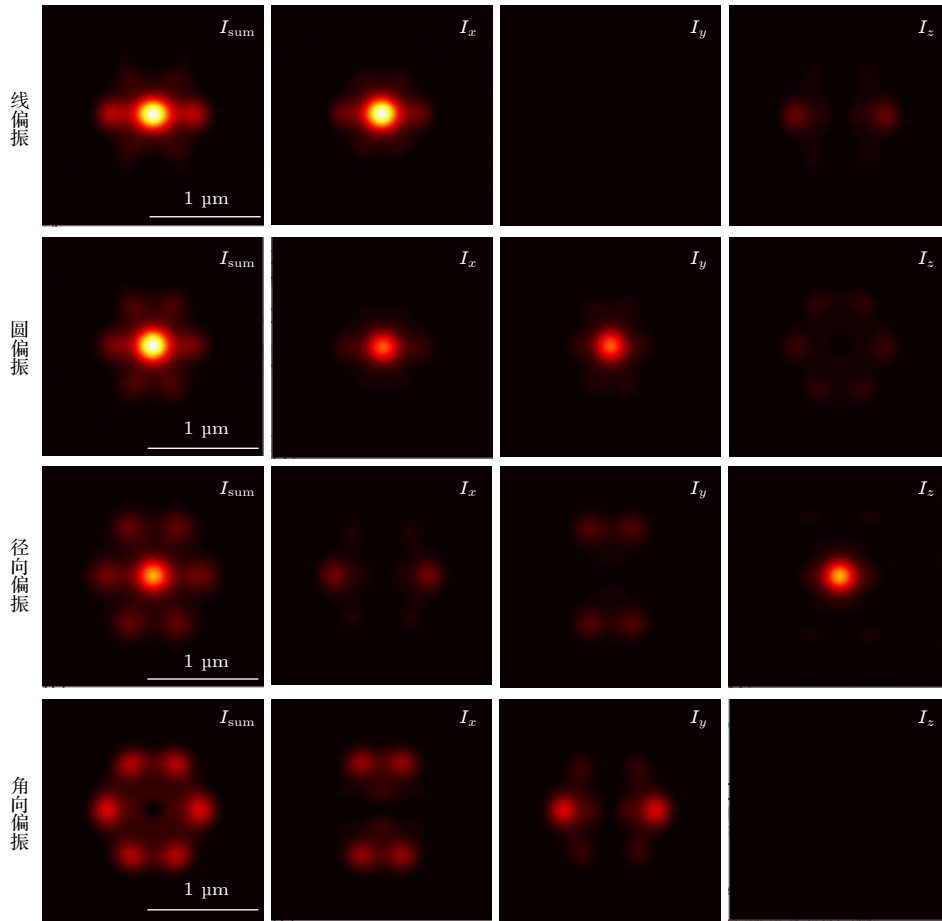


图 4 六边形排布方式下, 不同偏振态阵列光束的聚焦光斑

Fig. 4. Tight-focused spots of beam array with different polarization states under hexagon configuration.

径向偏振和角向偏振阵列光束的合成焦斑仍为阵列光束. 其中, 径向偏振阵列光束的焦斑中心呈现为亮斑, 相比于角向偏振阵列光束其能量有一定程度上的汇聚. 因此, 就偏振态对相干合成的影响而言, 线偏振、圆偏振的相干合成效果最佳, 径向偏振次之, 角向偏振最差. 此外, 径向偏振阵列光束的聚焦光斑以 z 方向分量 (纵向分量) 为主, 这是由径向偏振自身的矢量特性决定的^[16]. 在图 4 中, 正六边形排布方式下, 线偏振和圆偏振阵列光束经紧聚焦方式后的光强分布呈现一定的合束效果, 而径向偏振和角向偏振的合成焦斑均呈现花瓣形, 且花瓣数目相同. 进一步结合图 5 可以看出, 在入射光束偏振态相同的情况下, 正六边形排布阵列光束的焦斑能量集中度低于矩形排布阵列光束. 因此, 六边形排布这一方案在合成单一光斑的效果上稍差, 而更适用于产生多焦点阵列.

图 5 表明, 线偏振、圆偏振阵列光束的相干合成特性一致, 其区别在于圆偏振阵列光束的焦斑

的 x 和 y 两个分量相等, 而线偏振阵列光束以 x 分量为. 从聚焦程度上来说, 线偏振和圆偏振最佳, 与图 3 和图 4 所给出的结果一致.

由于角向偏振阵列光束入射情况下难以有效地合成为一个焦斑 (呈现中空光强分布), 因而后续

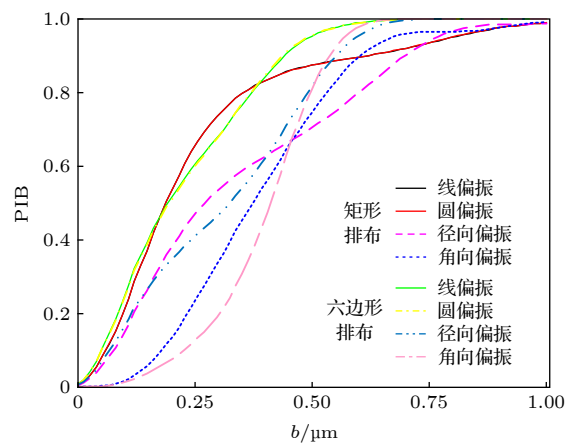


图 5 不同光束排布和偏振态时, 焦斑的 PIB 曲线

Fig. 5. PIB curves of the focal spots of beam array with different beam configurations and polarization states.

重点针对线偏振、圆偏振和径向偏振阵列光束经紧聚焦方式的相干合成特性进行分析. 为进一步比较偏振态对合成效率的影响, 定义合成效率为主瓣占焦斑总能量的百分比, 即:

$$\eta = \frac{P_0}{P_{\text{sum}}} = \frac{\int_0^a I_{\text{sum}} ds}{\int_0^\infty I_{\text{sum}} ds}, \quad (6)$$

式中 P_0 为中心主瓣功率, P_{sum} 为焦斑总功率, a 为中心主瓣尺寸.

图 6 给出了矩形排布方式下, 不同偏振态阵列光束的焦斑光强. 基于紧聚焦方式的阵列光束相干合成的本质是子光束传输至远场相遇产生相干叠

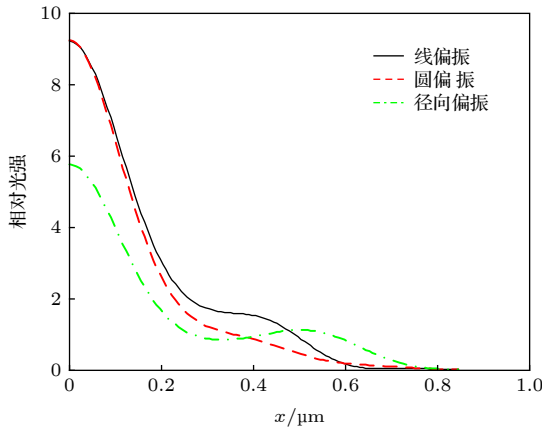


图 6 矩形排布方式下, 不同偏振态阵列光束的焦斑光强
Fig. 6. Focused intensity distribution of beam array with different polarization states under rectangle configuration.

加, 从而在中心主瓣处干涉相长, 而在旁瓣处干涉相消 [17,18]. 当阵列光束仅仅偏振态发生变化时, 焦斑光强相长和相消的位置并不会发生改变. 从图 6 可以明显看出, 在中心主瓣处光强快速下降, 而在旁瓣处光强呈现缓变的趋势, 进一步结合图 3 所给出的焦斑光强分布, 可以得出对线偏振、径向偏振阵列光束的中心主瓣与旁瓣的交点位于 $0.3 \mu\text{m}$ 附近. 因此, 我们以这一主瓣宽度为基准计算出线偏振、圆偏振和径向偏振阵列光束的合成效率分别为 75.3%, 75.2% 和 49%. 可以看出, 这一结果与图 5 的分析一致, 即线偏振和圆偏振阵列光束经紧聚焦方式合束时能获得较好的相干合成效果, 而径向偏振阵列光束则仅有约一半的能量集中在其紧聚焦焦斑的中心主瓣.

为方便讨论而不失一般性, 我们后面重点针对矩形排布、圆偏振阵列光束, 分析阵列光束束宽和间距比、紧聚焦系统 NA 和介质折射率对相干合成特性的影响.

3.2 束宽和间距比对合束特性的影响

在分析阵列光束束宽和间距对相干合成特性的影响时, 定义间距和束宽比 $\gamma = w_d/w_0$. 计算所采用的参数为: $NA = 0.95$, $n = 1$ (空气). 图 7 给出了矩形排布方式下、圆偏振阵列光束入射时, 不同束宽和 γ 时聚焦光斑的光强分布, 图 8 给出了与之对应的 PIB 曲线, 表 2 则列出了相应的合成效率.

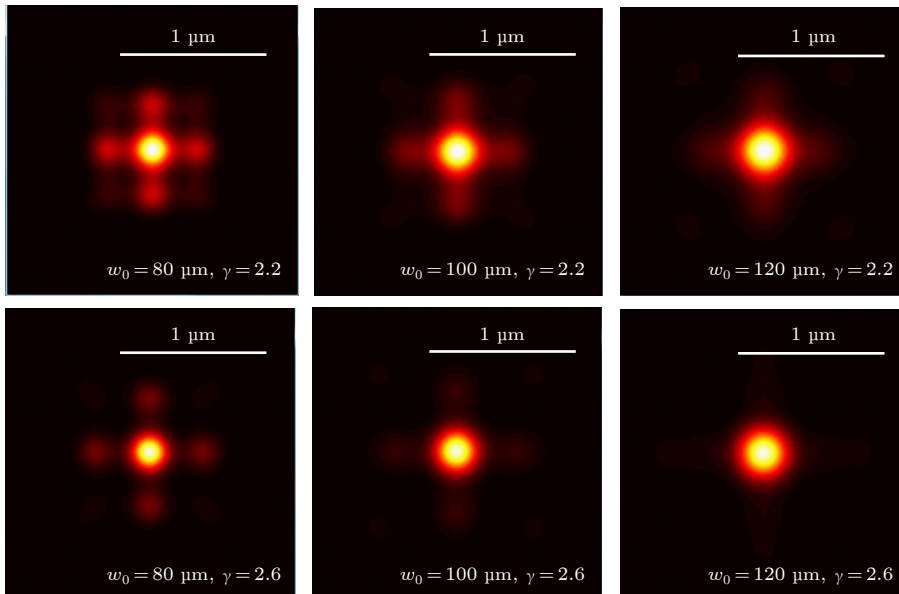


图 7 矩形排布方式下, 不同束宽及 γ 时的聚焦光斑

Fig. 7. Focused spots of beam array with different beam widths and γ under rectangle configuration.

从图 7 可知, 当束宽和间距比 γ 一定时, 随着子光束束宽的增大, 阵列光束的聚焦光斑逐步增大. 当子光束束宽不变时, 随着束宽和间距比 γ 的增大, 阵列光束的聚焦光斑也随之增大. 从图 8(a) 中不同间距比时焦斑的 PIB 曲线可知, 当追求中心焦斑能量占比高时, 可在保持入射光束束宽不变的前提下适当增大子束间间距; 而图 8(b) 则表明, 当追求小尺度的中心焦斑时, 宜采用束宽小的阵列光束入射. 根据表 2 的相干合成效率的计算结果, 合成效率随着子光束束宽的增大而显著提高, 这是

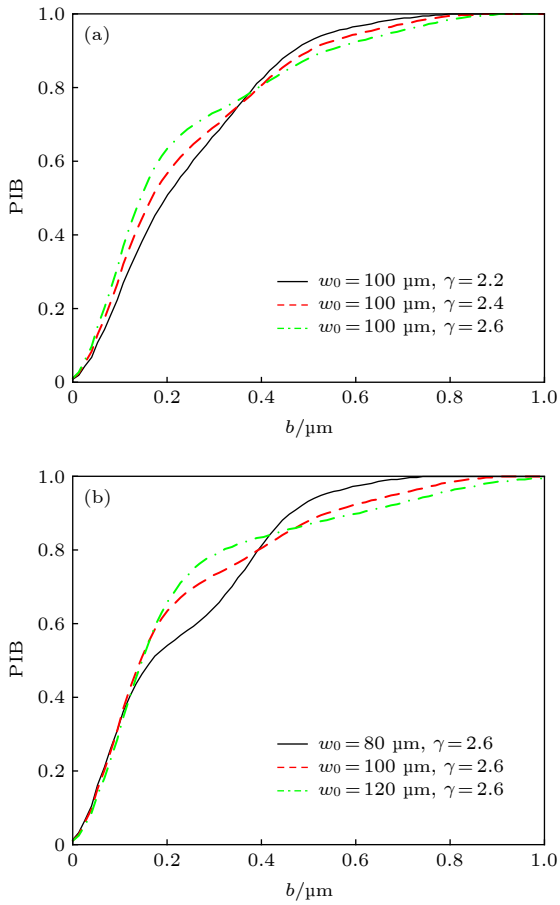


图 8 矩形排布方式下, (a) 不同间距比时聚焦光斑的 PIB 曲线, 以及 (b) 不同束宽时聚焦光斑的 PIB 曲线
Fig. 8. PIB curves of the focal spots of beam array with different (a) beam widths and (b) γ under rectangle configuration.

表 2 矩形排布方式下, 圆偏振阵列光束的合成效率
Table 2. Combining efficiency of beam array with circular polarization under rectangle configuration.

	束宽 / μm		
	80	100	120
$\gamma = 2.2$	63.5%	75.2%	88.4%
$\gamma = 2.6$	70.0%	79.4%	89.5%

因为在子光束束宽增大的过程中, 中心主瓣尺寸逐步增大, 而能量也更多地汇聚到中心主瓣. 此外, 合成效率也随着间距和束宽比的增大而略微增大, 而这是由于大数值孔径透镜使阵列光束各子束聚焦在中心导致的.

3.3 数值孔径和介质折射率对合束特性的影响

在分析数值孔径和介质折射率对阵列光束合成特性的影响时, 由于紧聚焦系统可浸入折射率不同的介质中, 如空气、水和油等, 因而聚焦光斑的尺寸也有所不同. 计算所采用参数为: 光束束宽 $w_0 = 100 \mu\text{m}$, 间距 $w_d = 220 \mu\text{m}$. 图 9 给出了矩形排布方式、圆偏振阵列光束入射时, 不同 NA 和介质折射率下聚焦光斑的 PIB 曲线. 表 3 则列出了 PIB 为 86.5% 所对应的焦斑尺寸.

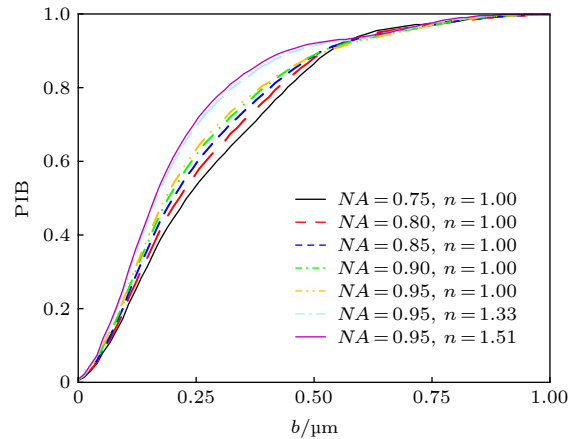


图 9 矩形排布方式下, 不同数值孔径和介质折射率下聚焦光斑的 PIB 曲线
Fig. 9. PIB curves of the focal spots of beam array with numerical apertures and refractive indices under rectangle configuration.

表 3 不同数值孔径和介质下, 阵列光束焦斑尺寸
Table 3. Focal-spot width of beam array with numerical apertures and refractive indices under rectangle configuration.

	介质						
	空气			水 油			
NA	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	0.95	0.95
阵列光束焦斑半径 / μm	0.50	0.49	0.47	0.46	0.45	0.40	0.35

从图 9 可以看出, 当紧聚焦系统的工作物质相同时, 焦斑半径随着 NA 的增大而逐步减小, 最终趋于某一固定值. 当紧聚焦系统浸入在水和油中,

由于折射率的增大, 焦斑半径显著减小 (表 3). 需要指出的, 阵列光束可包含更多的子光束, 以提高焦斑功率密度, 但其焦斑尺寸却要大于单光束的紧聚焦焦斑. 分析其原因在于: 矩形光路排布方式不能够获得更小的焦斑, 但矩形光路排布可看作对入射光强进行了调制, 从而改变了光束聚焦特性. 此外, 通过改变光路排布方式和偏振态, 既可产生具有不同花瓣的紧聚焦光斑, 也能产生多种偏振态的焦斑 [19,20]. 阵列光束的排布方式、光束质量、位置偏差和指向偏差等因素均会对相干合成特性产生影响, 也是值得深入研究的目标.

4 结 论

本文通过建立阵列光束经紧聚焦相干合成的物理模型, 分析了阵列光束排布方式、偏振态、束宽和间距以及紧聚焦系统数值孔径和介质折射率等因素对光束相干合成特性的影响. 其中, 矩形光路排布能获得单一、高功率焦斑, 而六边形光路排布能产生花瓣状焦斑. 线偏振、圆偏振阵列光束经紧聚焦方式的相干合成特性最佳, 径向偏振次之, 角向偏振则不能用于产生单个焦斑. 对阵列光束相干合成焦斑的 PIB 曲线和合成效率的分析表明, 线偏振、圆偏振阵列光束均能获得较好的紧聚焦相干合束效果, 而通过适当增大光束束宽和束间间距, 有利于阵列光束的能量汇聚到其中心主瓣.

参考文献

- [1] Yang R F, Yang P, Shen F 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8297 (in Chinese) [杨若夫, 杨平, 沈锋 2009 物理学报 **58** 8297]
- [2] Fang X Y 2010 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute Of Technology) (in Chinese) [范馨燕 2010 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [3] Christensen S, Koski O 2007 *Advanced Solid-State Photonics. Optical Society of America, Vancouver, Canada, January 28–31, 2007 WC1*
- [4] Liu Z Y, Li L, Hu B T 2012 *Laser Tech.* **5** 657 (in Chinese) [刘作业, 李露, 胡碧涛 2012 激光技术 **5** 657]
- [5] Zhang F, Yu H, Fang J, Zhang M, Chen S, Wang J, He A, Chen J 2016 *Opt. Express* **24** 6656
- [6] Lu Y Q, Hu S L, Lu Y, Xu J, Wang J 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 097301 (in Chinese) [陆云清, 呼斯楞, 陆懿, 许吉, 王瑾 2015 物理学报 **64** 097301]
- [7] Wang S C, Li X P 2016 *Chin. Opt.* **9** 185 (in Chinese) [王思聪, 李向平 2016 中国光学 **9** 185]
- [8] Zhang Z 2016 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: Anhui University) (in Chinese) [张洲 2016 博士学位论文 (合肥: 安徽大学)]
- [9] Zhao W Q, Tang F, Qiu L R, Liu D L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 054201 (in Chinese) [赵维, 唐芳, 邱丽荣, 刘大礼 2013 物理学报 **62** 054201]
- [10] Byrnes S J, Lenef A, Aieta F, Capasso F 2016 *Opt. Express* **24** 5110
- [11] Shen W, Hu C, Li S, Hu X T 2017 *Appl. Surf. Sci.* **421** 535
- [12] Wolf E 1959 *P. Roy. Soc. A Mat.* **253** 349
- [13] Richards B, Wolf E 1959 *P. Roy. Soc. A Mat.* **253** 358
- [14] Moh K J, Yuan X C, Bu J, Burge R E, Gao B Z 2007 *Appl. Opt.* **46** 7544
- [15] Tan T, Li X Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 094202 (in Chinese) [谭毅, 李新阳 2014 物理学报 **63** 094202]
- [16] Gilad M L, Uriel L 2008 *Opt. Express* **16** 4567
- [17] Uberna R, Bratcher A, Tiemann B G 2010 *IEEE J. Quantum. Electron.* **46** 1191
- [18] Liu Z J, Ma P F, Su R T, Tao R M, Ma Y X, Wang X L, Zhou P 2017 *J. Opt. Soc. Am. B* **34** A7
- [19] Tian B, Pu J X 2011 *Opt. Lett.* **36** 2014
- [20] Cheng Z, Zhou Y Y, Xia M, Li W, Yang K C, Zhou Y F 2015 *Opt. Laser Technol.* **73** 77

Analysis of coherent combination characteristics of beam array via tight focusing*

Zhong Zhe-Qiang¹⁾ Mu Jie²⁾³⁾⁴⁾ Wang Xiao²⁾³⁾⁴⁾ Zhang Bin^{1)†}

1) (*College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China*)

2) (*Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

3) (*Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Mianyang 621900, China*)

4) (*Collaborative Innovation Center of IFSA (CICIFSA), Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*)

(Received 6 January 2020; revised manuscript received 9 February 2020)

Abstract

In order to obtain focal spot with high power and spot size comparable to wavelength scale, a novel approach to achieving the coherent combination of beam array by tightly focusing is proposed. The physical model of coherent beam combination of beam array via tightly focusing is built up by the use of the vector diffraction integral. Therefore the influences of beam configuration, polarization state, beam width, beam interval and numerical aperture of the tight focusing system on the characteristics of the combined beam are discussed in detail. The results indicate that the coherent combination effect of beam array with linear and circular polarization via tight focusing is the first best, and that with the radial polarization is the second best but that with the azimuthal polarization is the worst. The beam array of linear and circular polarization with rectangle configuration can be tightly focused onto center point, and the beam array with hexagon is also focused onto center point but with lower efficiency. In addition, by enlarging the beam width and the beam interval to a certain extent, the combination efficiency can be increased. By optimizing the beam configuration, beam width and interval, and selecting rational numerical aperture of the tightly focusing geometry, the focal spot with high energy concentration can be obtained with high beam quality and combination efficiency.

Keywords: tight focusing, beam array, coherent combination, numerical aperture

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Jf, 42.79.Bh

DOI: 10.7498/aps.69.20200034

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61905167), the Basic Research Program of National Major Project of China (Grant Nos. JG2017149, JG2019299, JG2019292), and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2018M643463).

† Corresponding author. E-mail: zhangbinff@sohu.com