



·激光合束技术·

基于衍射光学元件的激光相干合成研究进展*

何 兵¹, 李炳霖^{1,2}, 杨依枫¹, 刘美忠^{1,2}

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 从衍射光学元件的基本原理出发, 围绕连续波和脉冲波两大应用领域, 综述了国内外基于衍射光学元件实现共孔径相干合成的研究进展。在国内, 上海光学精密机械研究所分别实现了连续光和脉冲光的合成, 连续光实现了 206 W 的输出功率, 光束质量 1.38, 合束效率 29.6%; 脉冲光实现了峰值功率 1.02 kW, 重复频率 2.2 MHz 的 ns 级脉冲相干合成光束, 合束效率 61%。在国外, 连续光方面实现了 5 kW 量级的合成光输出, 合束效率 82%; 脉冲光方面实现了平均功率 150 mW, 重复频率 100 MHz 的 fs 级脉冲相干合成光束, 合束效率 83.4%。最后对基于衍射光学元件的激光相干合成技术的未来发展做出了展望, 相信在不久的将来, 基于衍射光学元件的相干合成技术会不断发展, 逐渐突破技术瓶颈, 从而为更多的应用领域奠定坚实基础。

关键词: 激光光学; 衍射光学元件; 相干合成; 光纤激光器; 相位锁定

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220282

Coherent beam combining of fiber laser array based on diffractive optical element

He Bing¹, Li Binglin^{1,2}, Yang Yifeng¹, Liu Meizhong^{1,2}

(1. Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This article summarizes the research progress of common aperture coherent beam combining based on diffraction optical elements domestically and abroad, starting from the basic principles of diffraction optical elements, and focusing on the two application fields of continuous waves and pulsed waves. Domestically, the Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics has achieved the synthesis of both continuous and pulsed light. Continuous light output of 206 W was achieved with a beam quality of 1.38 and a beam combining efficiency of 29.6%; pulsed light output of a nanosecond-level pulse coherent combining beam with a peak power of 1.02 kW and a repetition frequency of 2.2 MHz was achieved, beam combining efficiency is 61%. Abroad, 4.9 kW coherent beam combining output has been achieved in continuous light, with a beam coupling efficiency of 82%; in the case of pulsed light, a femtosecond-level pulsed coherent beam combining beam with an average power of 150 mW and a repetition frequency of 100 MHz has been achieved, with a beam coupling efficiency of 83.4%. Finally, the future development of laser coherent beam combining technology based on diffraction optical elements is discussed, and it is believed that in the near future, diffraction optical element-based coherent beam combining technology will continue to develop, gradually break through technical bottlenecks, and lay a solid foundation for more application fields.

Key words: laser optics, diffractive optical element, coherent beam combining, fiber laser, phase locking

随着工艺的改进和技术的革新, 光纤激光器的输出功率得到了极大提升, 这使其成为目前高能量激光光束的关键光源之一, 特别适用于国防、材料处理、机械加工等高功率应用领域^[1-4]。目前, 公开报道单链路光纤激光器的近衍射极限输出功率暂为 20 kW^[5]。然而, 窄线宽光纤激光受硅基光纤中热透镜效应、非线性效应、热损伤等因素的制约, 单模光纤激光器输出功率向更高功率提升十分困难, 因此, 如何将多束高功率光纤激光进行合成, 以保持光束的光束质量成为了人们研究的热点。

* 收稿日期: 2022-09-03; 修订日期: 2023-03-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFB0504500); 中国科学院青年创新促进项目 (2020252)

联系方式: 何 兵, bryanho@siom.ac.cn.

相干合成技术(CBC)是突破单链路光纤放大器亮度限制的一种有效技术。相干合成技术可将多个激光束经过相位控制在空间重叠处产生相干叠加,能够同时提高输出功率和远场光斑的亮度,近年来成为国内外研究热点^[6-10]。然而,在合成光束中,由于受到有限的子光束阵列空间孔径包络的限制,平铺填充方式的相干阵列在远场分布存在旁瓣,这些旁瓣中包含相当比例的激光能量,不能利用,造成了输出光能量的浪费。为了提高阵列光束的远场光斑能量集中度,常见的技术是利用合束器件来提升远场阵列光斑的占空比。共孔径合成技术通过使各路激光在空间上完全重合,使得多路光束实现零旁瓣的完全拼接。该技术的关键就是保证各路子光束在近场、远场都达到较高的孔径重合度,从而提高在合束过程中的效率,减少能量损失。实现共孔径合成的主要技术方案有:自成像光波导^[11]、M-Z干涉仪^[12-14]、相干偏振合成^[15-20]和衍射光学元件(DOE)等。

衍射光学元件DOE具有波前重构功能,正向使用可以用于衍射分束或反向可用于特定数量光束的合成,使各个子光束按照对应衍射级次入射,可以将已经相位锁定的子光束阵列波前通过衍射过程进行重新分配,从而实现单孔径平面波输出。其固有效率超过97%~99%,可以有效解决相干合成中远场旁瓣能量浪费的问题,大大提高相干合成输出光束质量与合成效率。同时DOE分束器具有精确的周期光学形状,能够实现一维和二维阵列设计的灵活性,并能够处理非常高的功率密度。基于DOE的光纤激光相干合成技术作为获得高光束质量的一种有效方法,因此成为近年来激光领域合成技术的研究热点。本文将围绕DOE合成技术在脉冲和连续(CW)激光相干合成上的发展,系统地介绍基于DOE相干合成的基本原理、关键技术和研究进展,分析其发展趋势。

1 衍射光学元件基本原理

衍射光学又称二元光学(Binary Optics),是20世纪80年代出现的一种基于光波衍射理论的新兴光学分支^[21-22]。二元光学的基本内涵为:采用玻璃基底,基于光波的衍射理论,利用计算机辅助设计技术,采用超大规模集成电路制作技术加工制造,在基底上刻蚀出多个台阶或连续形状的浮雕结构,从而形成具有高衍射效率的一类衍射光学元件^[23-27]。衍射光学元件具有体积小、质量轻、复制容易、造价较低,同时又具有较高的衍射效率、宽泛的设计自由度及独特的色散性能等特点,并且具有可阵列化、集成化、任意波面变换等传统光学元件很难具有的功能,因此在光学信息的捕获、提取、测量以及控制等方面有广泛的应用^[28-33]。得益于设计技术和刻蚀工艺的发展,DOE变得体积更小、质量更轻、结构更复杂和精细。DOE表面分布着周期性浮雕结构,实现对入射光场的调制,理论上可在远场得到任意形态的光场分布。这些光场形态能实现不同的功能,已在众多领域中得到应用。

DOE的色散特性与传统折射元件不同,在进行光场调制的同时可用于消除光学系统中的色差、球差等问题。此外,DOE体积小,质量轻,搭配折射器件使用能够实现大视场角、高分辨率,这些特性让DOE广泛应用于望远镜、夜视仪、光学观测装置等系统中^[34-35]。DOE能够灵活设计表面相位函数,在输出光场确定的情况下,可以实现特定光斑图样的输出,这一特性被应用于光束整形领域。例如,在惯性约束聚变、显微光刻、材料加工、医疗等领域中,光源系统的光斑形态期望是平顶,光束整形DOE可以实现将高斯光束整形为平顶光束^[36-37],如图1所示。根据需求,DOE还可以改变入射光束的焦斑形态、焦深,对轨道角动量光束实施动态整形^[38],其功能逐渐多样化。

在激光分束领域,DOE分束器拥有高衍射效率、高一一致性、任意分束比等优点,是各类系统中理想的光源调制元件。在三维传感器中,DOE将光源分束为两束相干光并形成干涉条纹,用于对物体表面扫描^[39]。在相干合成领域,DOE分束器被逆用为合束器,实现高效率合成。这类DOE分束器理论上能实现100%的衍射效率、任意分束比及二维输出^[40-41]。随着DOE镀膜工艺的进步,其吸收损耗逐渐降低,损伤阈值不断提升,这为DOE分束器应用

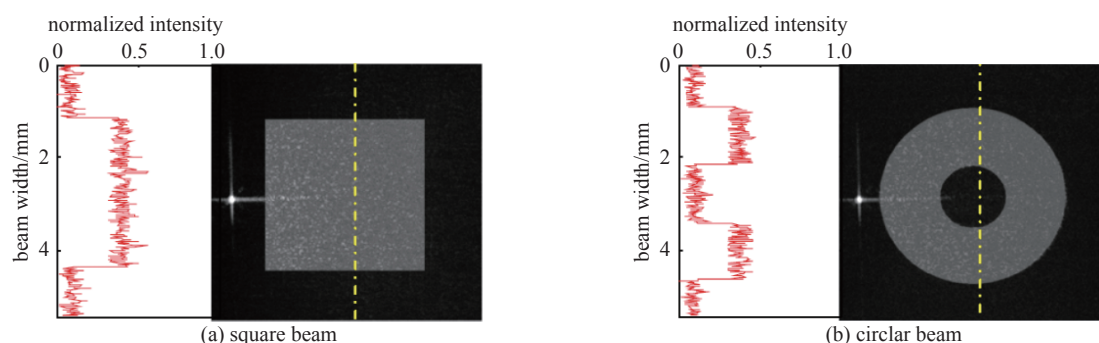


Fig. 1 Top-hatted beam with square and circular beam profile

图1 方形平顶光束和环形平顶光束

于高功率衍射相干合成奠定了基础。

DOE 分束器逆用可以实现对相干激光的合束,其合束效率等于分束效率。基于傅里叶变换理论,逆用 DOE,将相干激光阵列视为等光强光斑阵列,经傅里叶透镜变换后,对合束光场进行相位调制,可以消除相干合束光场相位分布的不均匀性,即可实现激光阵列相干合束,在远场得到单一主瓣的激光输出,此技术成为孔径填装技术。利用孔径填装技术可有效的将旁瓣能量转移到主瓣中,从而提高远场主瓣的能量。随着技术的发展,前述的孔径填装技术逐渐演变成基于衍射光学元件的相干激光阵列合成技术。

为了最大化衍射相干合成系统的合束效率,需要设计相应分束比的 DOE 透过率函数,最大化其衍射效率,同时保证良好的光束一致性。L.A.Romero^[41]等人给出了一维分束相位光栅的优化理论,将 DOE 的衍射效率提升至 90% 以上。最优相位函数的形式(使用无量纲坐标)为

$$\phi(x) = \tan^{-1} [2\mu \cos(x)] \quad (1)$$

式中:参数 μ 的取值需要使用适当的搜索算法来寻找,如此可将寻找最优 DOE 的无限维问题即寻找函数 $\phi(x)$ 的所有傅里叶系数,简化为一维优化问题即寻找 μ 的最优值。

从 DOE 中产生的各阶衍射光束其振幅和相位与 DOE 的傅里叶分量直接相关,傅里叶分量则可以通过夫琅和费近似计算衍射积分来获得,但是该近似的应用受限,因此 L.A.Romero^[42]的推导过程不使用菲涅耳近似或夫琅和费近似来获得傅里叶分量。假设一个一维 DOE 的空间周期为 d ,同时忽略损耗,为了简化计算,假设周期 $d=2\pi$ 。假设入射光束在 x 处的相位变化量为 $\phi(x)$,此时一维 DOE 可以用一个周期相位函数 $\phi(x)=\phi(x+2\pi)$ 来表征。根据标量衍射理论,一束平面光束通过 DOE 后会衍射为大量光束,这些光束的振幅和相位由傅里叶系数给出

$$a_k = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{i\phi(x)} e^{-ikx} dx, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2)$$

衍射理论表明,衍射光束的数量是有限的,因为高阶的衍射光束是传播几个波长后就会衰减的倏逝波。衍射光束的数量上限与比值 d/λ 相关, λ 是入射光波长。对于光束辐照的情况,输出光场是平面波与光束傅里叶变换的卷积。假设光束的空间尺寸远大于比光栅间距,这也是实际系统中常见的条件,则可以认为上述情况属于均匀光束的衍射过程。若以 E_C 表示分合成光束的远场归一化能量,则合束过程中的最优化问题就是寻找一个合适的相位函数 $\phi(x)$,使得 E_C 最大。具体而言,可以主要分为以下两种形式^[41]:一种是寻找使 $E_C(\phi)=|a_1|^2+|a_{-1}|^2$ 取最大值的相位函数 $\phi(x)$,约束条件为 $|a_1|=|a_{-1}|$;另一种是寻找使 $E_C(\phi)=|a_1|^2+|a_0|^2+|a_{-1}|^2$ 取最大值的相位函数 $\phi(x)$,此时约束条件为 $|a_1|=|a_0|=|a_{-1}|$ 。此外,还有一些应用对分束的要求并不是均匀的,而是有特定比例,例如约束条件为 $2|a_0|=|a_1|=|a_{-1}|$ 。这些问题都是约束优化问题,L.A.Romero 即考虑最普遍的一维 DOE 约束优化问题^[41]。

2 基于 DOE 的连续激光相干合成

为了获得多光束稳定干涉场,需要将参与合成的各子光束的相位差稳定控制在 $2n\pi$, n 为整数。根据 DOE 相干合成技术的锁相方式,主要可以分为被动锁相式和主动锁相式。

2.1 被动锁相式

被动锁相式无需外部主动干预控制环路,而是通过非线性相互作用,相互注入振荡选模,或某种能量耦合机制来实现各路激光相位差的实时自动补偿。基于 Dammann 二值相位光栅的相干合成技术最早由 W.B.Veldkamp、J.R.Leger 等人提出^[42-45],并被应用于半导体激光器光束合成中,基本装置如图 2(a)所示。使用单片线性 GaAlAs 阵列作为增益介质输出激光,而共腔结构的设计被用于建立各激光束之间的相干性,并通过公共的反射镜来获得各激光器的反馈光。6 束 AlGaAs 阵列光束经傅里叶透镜以光栅的 +1, +2, +3 衍射级次入射至二值光栅,最终可得到稳定的输出。随后用相位光栅进行“注入锁定”实现激光阵列相干合成的被动锁相方案被提出^[46],如图 2(b)所示,主振荡器的激光被注入到合成用的激光阵列腔中,使各路激光达到相位锁定而相干叠加。相位光栅把种子源分成 n 束且锁定它们的相位,最终经相位光栅合为一束激光输出。

1993 年,德国纳沙泰尔大学微技术学院利用复合腔内加相位光栅的方法实现了合成效率为 70% 的三路单模光纤激光器的相干合成^[47],其实验装置如图 3 所示。三路输出光经透镜准直后聚焦到相位光栅上,当三束光的幅度和相位匹配时,相位光栅可将三束光合成单个衍射级输出。输出镜为半透半反镜,可将输出光返回到对方的光路中,通过互注入过程实现锁相。

2010 年,法国 Charles Fabry 光学研究所实验室达曼光栅,用相位检索算法确定光栅的相位分布,DOE 置于激光

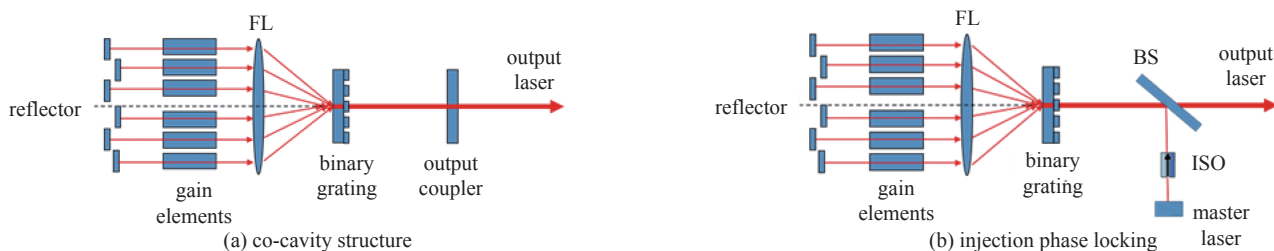


Fig. 2 Schematic diagram of injection locking structure of binary grating coherent beam combining (CBC) technology co-cavity structure

图 2 二值光栅相干合成技术共腔结构注入锁定结构示意图

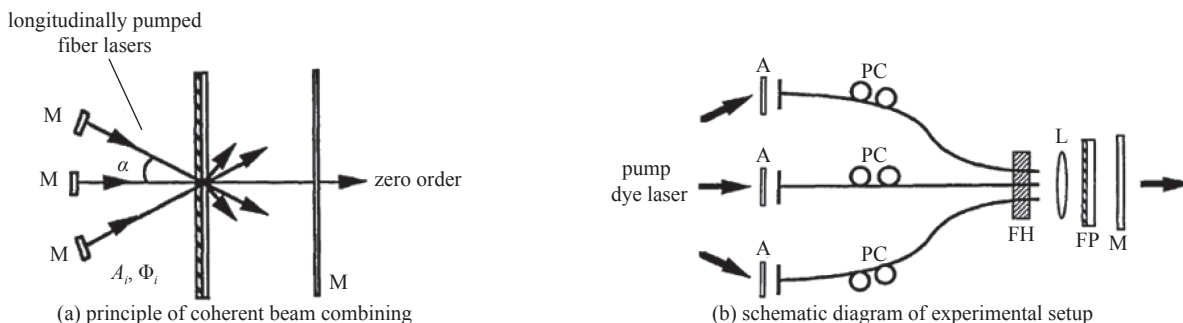


Fig. 3 Basic principle and experimental setup of coherent beam combining of three-channel single-mode fiber lasers

图 3 三路单模光纤激光的相干合成基本原理与实验装置

腔外部, 将 Talbot 腔锁相的 1×10 半导体激光阵列进行相干叠加, 使其转换为高斯光束, 输出功率为 365 mW, 光束质量为 $1.7^{[48]}$, 实验装置如图 4 所示。

2011 年, 法国泰利斯公司 G.Bloom 等人使用达曼光栅在外部腔中加入 5 个量子级联激光器(QCL)的被动相干光束的方法。获得了在室温(RT)连续状态下输出功率为 0.5 W, 合成效率为 66%, 光束质量 $M^2 < 1.6$ 的合成光束^[49]。其装置图与光谱图如图 5 所示。

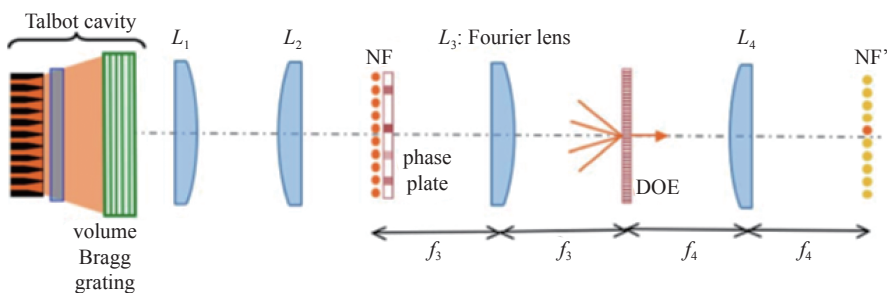


Fig. 4 Principle of coherent beam combining of semiconductor lasers based on Damman gratings

图 4 基于达曼光栅的半导体激光器相干合成原理

2014 年, 上海光学精密机械研究所采用全光反馈被动环形滤波腔结构实现 3 台光纤放大器阵列的相位锁定, 并在近场使用 1×3 达曼光栅实现了孔径填充, 实验装置如图 6(a)所示, 种子光经过一个 2×1 合束器和 1×3 分束器注入三级放大链路中, 将功率放大至 70 W, 末端熔接准直输出透镜组。准直后的三束光经过分束镜 1, 反射光经透镜 2 进入功率计, 透射光经透镜 1 和分束镜 2 反射耦合至单模光纤, 完成环形腔结构。分束镜 2 的透射光聚焦到 CCD 上用于记录远场图像。图(b)为输出单孔径光束在总输出功率 5.5 W 时中心衍射级光斑的强度分布, 光束质量 $M^2 = 1.26$, 图(c)为总输出功率 5.5 W 时某单链路光斑强度分

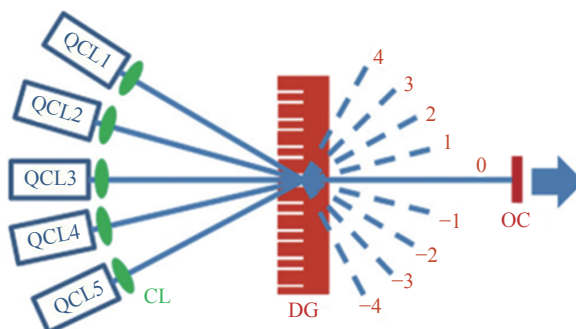


Fig. 5 Experimental setup and spectrogram of passive coherent beam combining based on quantum cascade lasers (QCLs) and Damann gratings

图 5 光栅的被动相干光束合成实验装置

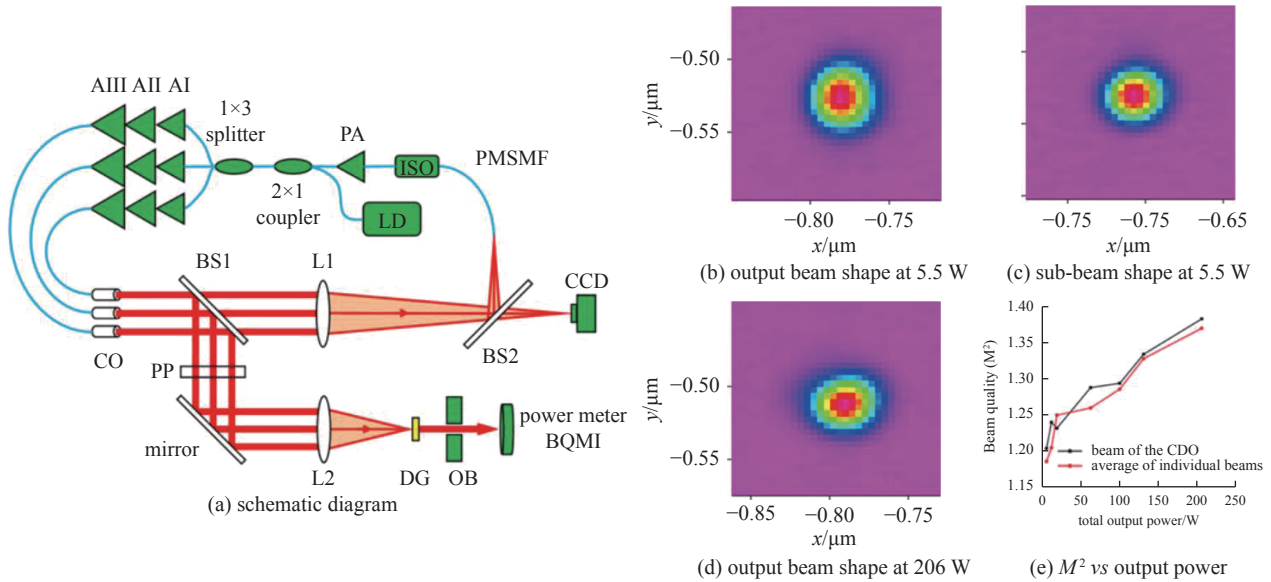


Fig. 6 All-optical feedback ring cavity experimental setup and experimental results

图 6 全光反馈环形腔实验装置与实验结果图

布,图(d)为 206 W 的功率时中心衍射级光斑的强度分布, M^2 达到 1.38, 依然保持着良好的光束质量, 但随入射功率的增加, 合成效率由 47.3% 下降至 29.6%。效率退化主要是源自于水平位移误差、旋转角度误差、剩余相位误差、操作波长误差、光束质量退化和制造误差等影响。图(e)为光束质量与总输出功率的关系图。该方法基于全光反馈环形腔被动相位锁定机制实现子光束阵列的相位锁定, 同相位的输出光在近场经相位调制板预先施加相位分布, 由透镜按照相应入射角入射至达曼光栅表面, 消相位起伏得到高光束质量、高能量的单光束输出^[50]。

2.2 主动锁相式

被动锁相式虽然实现简单, 无需复杂精密的控制环路, 但理论研究表明其合成效率存在极限, 会随着合成路数的增多而显著下降, 很难实现较高功率的输出^[51-52]。因此目前高亮度激光相干合成中更多使用的是主动相位控制方法, 主要包括外差法、频率抖动法、基于全局优化的算法等。

美国诺斯罗普·格鲁曼公司的 Goodno 研究小组在基于 DOE 的相干合成方面做了大量的研究工作。2008 年, 该研究小组在低功率下验证了基于 DOE 的 5 路外差法锁相的光纤激光阵列相干合成的可行性, 输出光束的光束质量因子 $M^2=1.04$, 合成效率为 91.4%^[53]。其系统装置如图 7 所示。参考光路中增加一个参考 DOE, 产生 N 束参考子光束阵列, 每一束参考子光束与信号束阵列的采样光产生干涉, 形成外差信号, 用以进行主动相位控制。

随后在 2012 年, 该研究小组与麻省理工学院的 Shawn M.Redmond 等人合作, 采用 1×5 DOE 将 5 路 500 W 的光束进行合成, 实现了 1.93 kW 的单模输出。当输入功率为 2.5 kW 时, 合成效率下降至 79%, 是由输出光的不完全相长干涉所致。同时, DOE 可以实现空间滤波, 消除不同光束之间的像差, 使得输出光束的光束质量 M^2 达到 1.1, 超过了入射光束的光束质量^[54]。根据图 8, 阵列中的五束相邻的光束以固定入射角入射至 DOE 上。每个光纤光束由

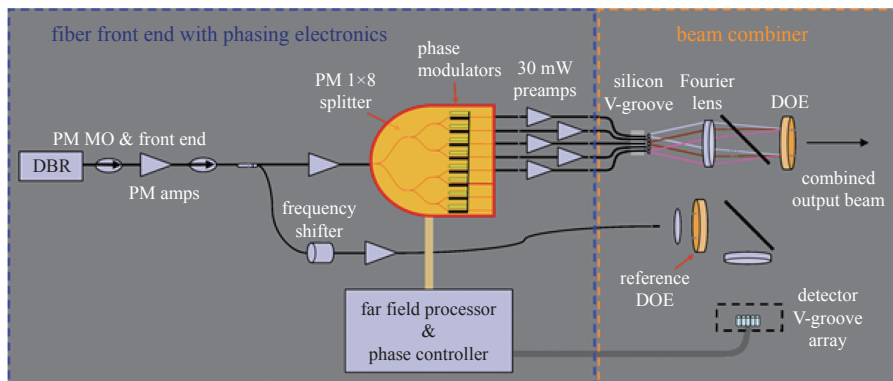


Fig. 7 DOE-based active coherent beam combining system

图 7 基于 DOE 的主动相干合成系统装置

单片微透镜阵列的一个单元部分准直,该单元允许在 DOE 上调节光束的大小。紧密耦合的透镜一方面作为复合傅里叶光学来完全准直每束光束,另一方面引导它们以与衍射级数相匹配的角度重叠在 DOE 上。衍射仪上的准直高斯光束直径约为 3.3 mm。该衍射装置将大部分入射功率衍射到 $m=0$ 衍射级,非衍射功率衍射到更高的 $|m|>0$ 阶。

同年,Goodno 小组采用一个二维 DOE 对 3×5 阵列的 15 路光纤激光器进行相干合成,得到了 600 W 的合成功率,合成效率为 68%,合成光束质量因子 $M^2=1.1$ ^[55],实验中使用多抖动技术对相位锁定,DOE 稍微倾斜,使合成光束从衍射平面反射出来,从而实现与输入光束的几何分离,同样的由于相干滤波效应,合成光的光束质量较输入光的光束质量得到改善。系统结构与实验结果如图 9 和图 10 所示。

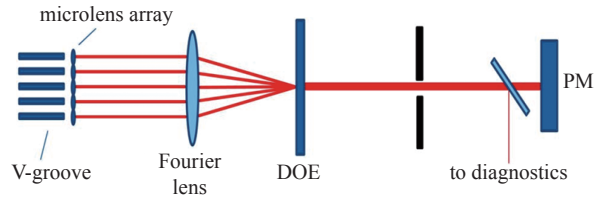


Fig. 8 Schematic diagram of DOE coherent beam combining

图 8 DOE 光束合成原理示意图

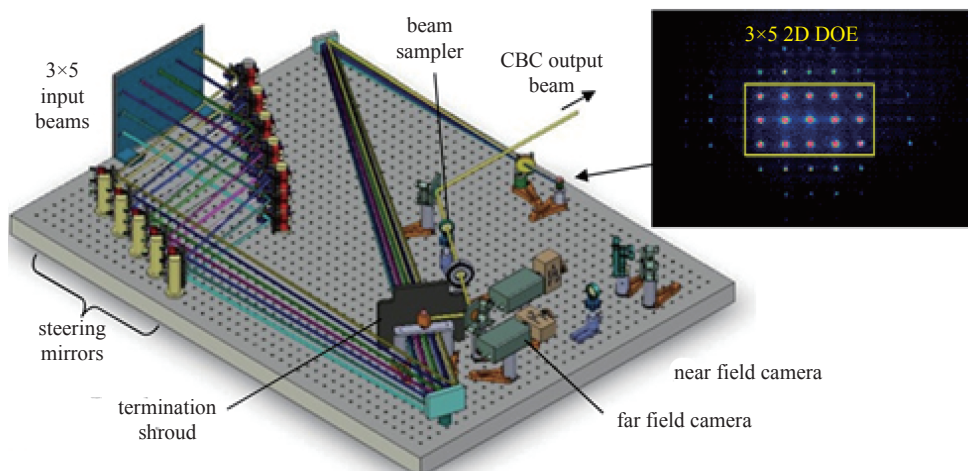


Fig. 9 Two-dimensional DOE coherent beam combining system

图 9 二维 DOE 相干合成系统结构

2014 年,该研究小组进一步使用白噪声调制光为种子源,通过将三路 1 kW 量级的非保偏光纤放大器与衍射光学元件(DOE)合成,将总的合成功率扩展至 2.4 kW,合成效率约 80%,输出光束质量因子 $M^2=1.2$ ^[56]。实验结构如图 11 所示。

随着窄线宽高功率光纤激光器功率的提升,基于 DOE 的相干合成系统的输出功率也得到了突破。2016 年,美国空军实验室的 Angel Flores 等人使用以伪随机二进制序列(PRBS)相位调制光为种子源,将 5 路 1.2 kW 量级的光纤放大器输出光通过 1×5 DOE 进行合成,得到了约 5 kW 的总合成功率,这是目前文献公开报道的基于 DOE 合成的最高输出功率,合成效率为 82%,输出光束质量因子 $M^2<1.1$ ^[57-58]。实验结构与输出光束质量如图 12 所示。

3 基于 DOE 的脉冲激光相干合成

近年来,DOE 在相干合成中的应用也在超快脉冲合成领域快速发展,如表 1 所示。2017 年,美国劳伦斯伯克利国家实验室 Zhou Tong 等人运用两个平行放置的 DOE 消除子光束之间的脉冲前倾,降低色散,实现了 4 路脉冲光纤激光的相干合成^[59],实验系统如图 13 所示。其重复频率 100 MHz,脉宽 120 fs,平均功率 150 mW。系统中 DOE1 是闪耀衍射光栅,负责将所有光束会聚到 DOE2 同一点,DOE2 是逆用的 1×4 分束器,负责将 4 路光束合成,系统的相对合束效率为 83.4%。

在此基础上,2018 年,Zhou Tong 等人将激光器阵列拓展为二维,实现了 8 路超短脉冲光纤激光的合成^[60],实验

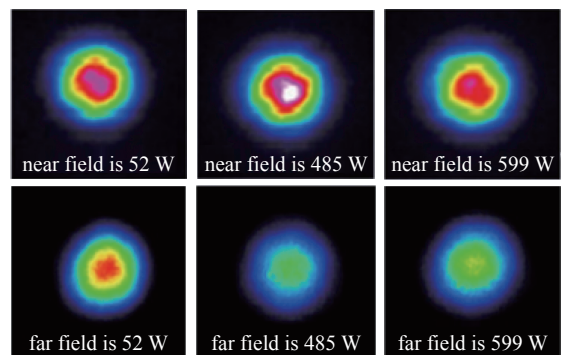


Fig. 10 Results of two-dimensional DOE coherent beam combining

图 10 二维 DOE 相干合成结果示意图

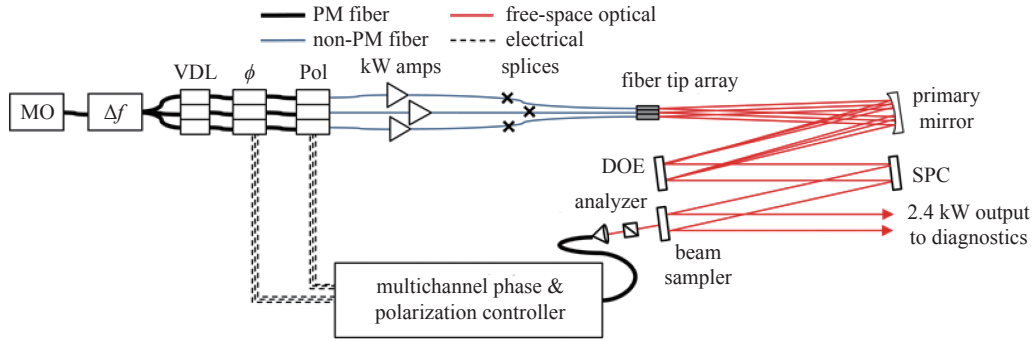


Fig. 11 2.4 kW DOE coherent beam combining experiment structure diagram

图 11 2.4 kW DOE 相干合成实验结构图

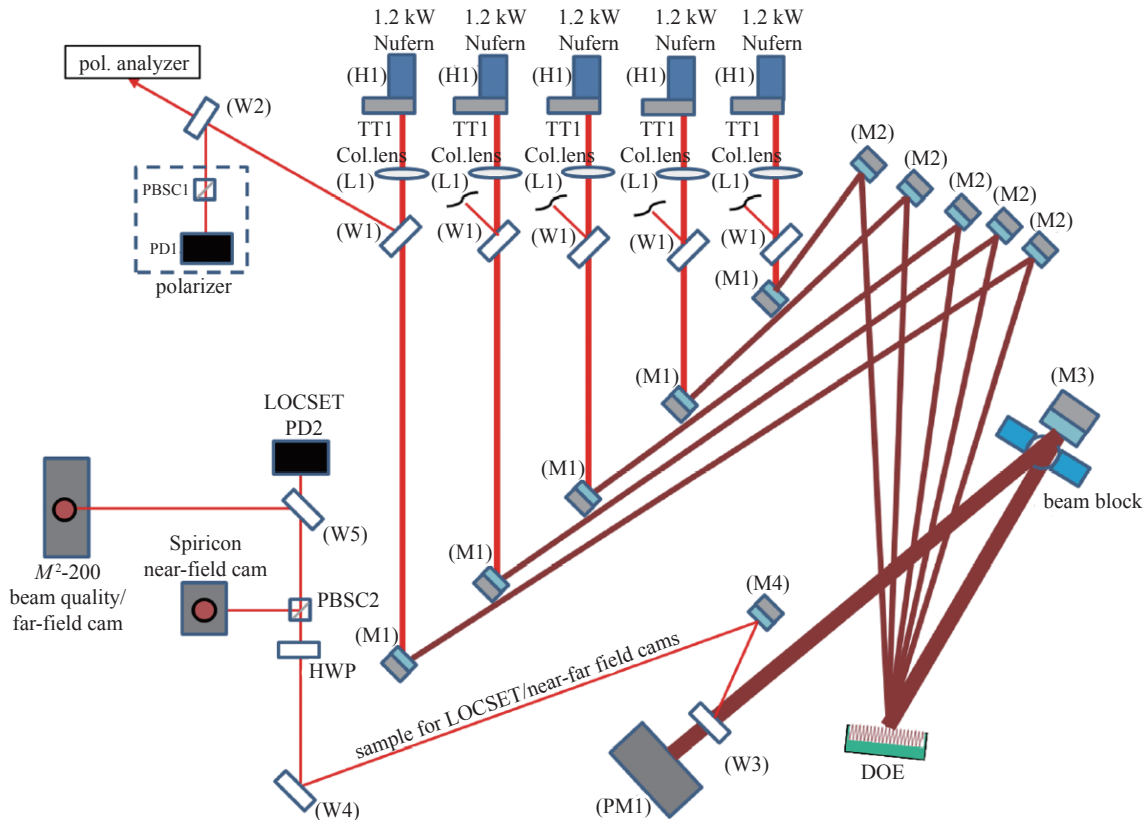


Fig. 12 Structure diagram of 4.9 kW DOE coherent beam combining system

图 12 4.9 kW DOE 相干合成实验结构

表 1 DOE 连续光相干合成代表性研究成果

Table 1 Representative research results of DOE CW CBC

| year | institution | result | reference |
|------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2008 | Northrop Grumman | 5 fiber lasers with 109 mW overall power, $M^2=1.04$, combination efficiency is 91.4% | [53] |
| 2012 | Massachusetts Institute of Technology | 5 fiber lasers with 1.93 kW overall power, $M^2=1.1$, combination efficiency is 79% | [54] |
| 2012 | Northrop Grumman | 15 fiber lasers with 600 W overall power, $M^2=1.1$, combination efficiency is 68% | [55] |
| 2014 | Northrop Grumman | 3 fiber lasers with 2.4 kW overall power, $M^2=1.2$, combination efficiency is 80% | [56] |
| 2016 | Air Force Research Laboratory | 5 fiber lasers with 4.9 kW overall power, $M^2=1.1$, combination efficiency is 82% | [57-58] |

装置如图 14 所示。振荡种子经过多级光纤分束后输入到 8 台 150 mW 量级的保偏光纤放大器，脉宽 120 fs。DOE1 是二维闪耀光栅，子光束分别入射到各自对应的区域，其中中心区域空缺，经过 DOE1 后以匹配 DOE2 的角

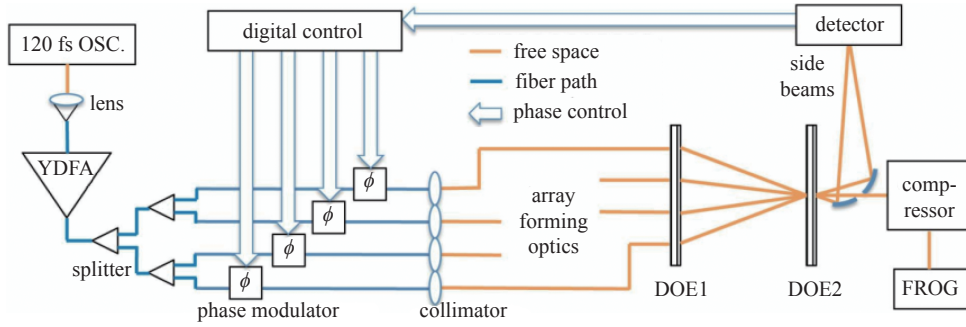


Fig. 13 Experimental setup of two-dimensional combination of four ultrashort pulsed beams using a diffractive optic pair

图 13 4 路超短脉冲衍射相干合成实验装置

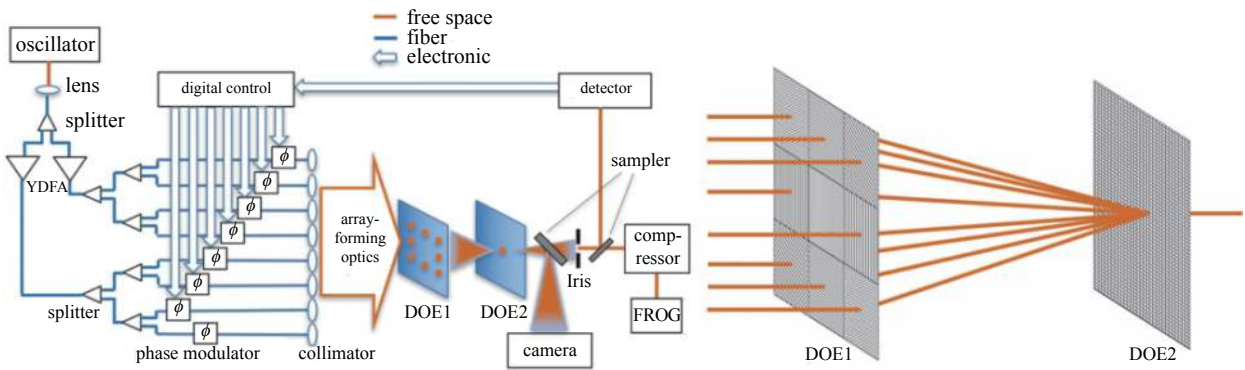


Fig. 14 Experimental setup of 8-array ultrashort pulse diffraction coherent beam combining

图 14 8 路超短脉冲衍射相干合成实验装置及原理图

度入射到同一点。DOE2 是对应的二维分束器，每个入射光束衍射后分束为 8 束光，如图 15 所示，由于入射光束角度不同，最终衍射光束形成 5×5 的子光束阵列。在相位锁定后，绝大部分能量集中到中心光斑，整体合成效率达到 85.4%。

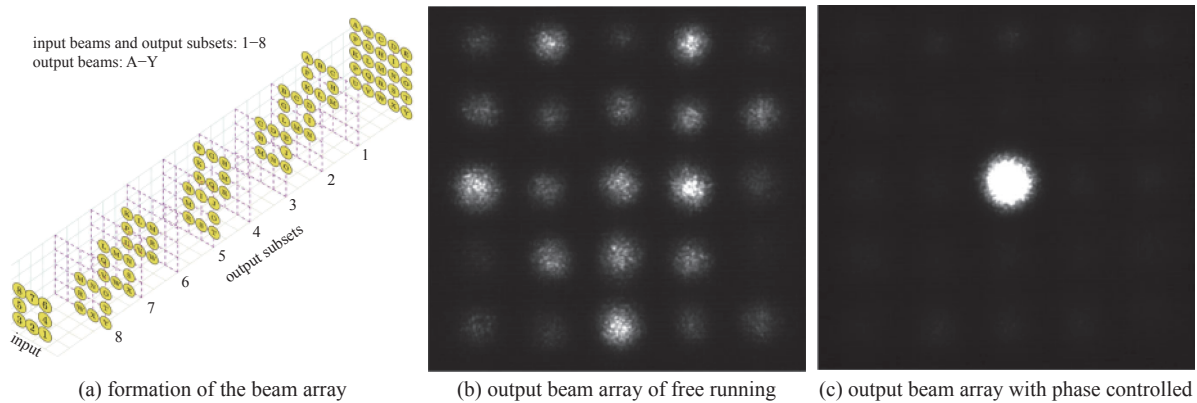


Fig. 15 Formation of the 5×5 uncombined beam array exiting DOE2, with a 3×3 incident beam array

图 15 DOE2 分束形成 5×5 子光束阵列，子光束在合成前后的光斑图样

2019 年，该研究机构的 Du 等人基于相同的合成原理运用单频连续保偏光纤激光器验证了合束系统的功率稳定性^[61]，实验装置如图 16 所示。光纤激光器直接通过光纤分束为 8 路功率为 $15 \mu\text{W}$ 的光束入射到 DOE1。需要注意的是，实验通过分析合成光束中旁瓣强度模式来实现相位误差的检测，8 路合成后功率稳定性 $< 0.3\%$ ，合束效率提升到 84.6%。该相位锁定方案不需要校准，可大幅度提升系统误差的容差，展示了实验系统进行大规模阵列合成的潜力。

此后，该研究机构持续推进衍射相干合成研究，在 2021 年，Du Qiang 和 Wang Dan 等人实验验证了 81 路合束，运用衍射效率为 72% 的 9×9 二维 DOE 实现合束，实验装置如图 17 所示，合束效率为 60.4%^[62-63]。

该系统将单频连续保偏激光器准直后入射到空间光调制器 (SLM)。SLM 的像素为 1272×1024 用来代替原先系统中的 DOE1，其能够生成 9×9 二维阵列光束，并主动控制子光束除偏振外的所有光束参数，包括位置、尺寸、强

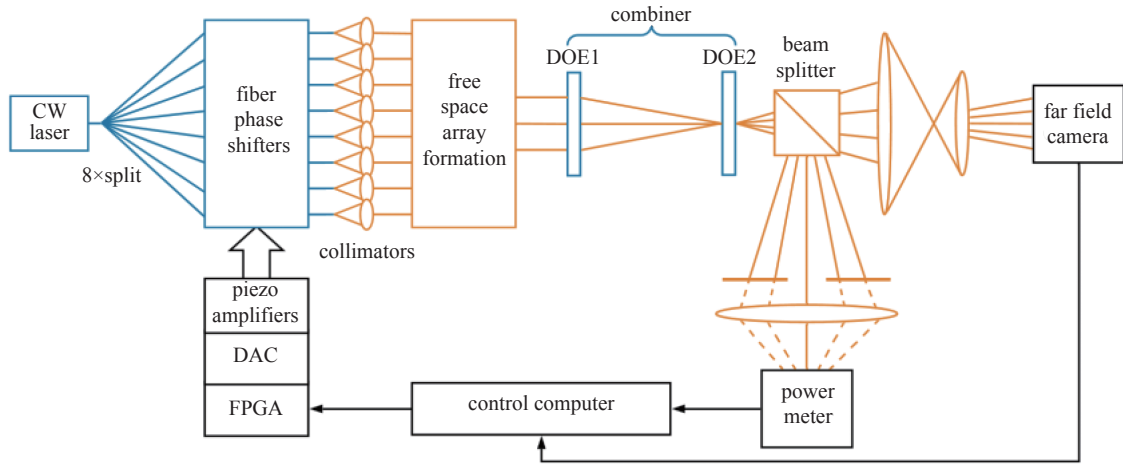


Fig. 16 Experimental setup of deterministic stabilization of eight-way 2D diffractive beam combining using pattern recognition

图 16 基于模式识别 8 路衍射相干合成实验装置

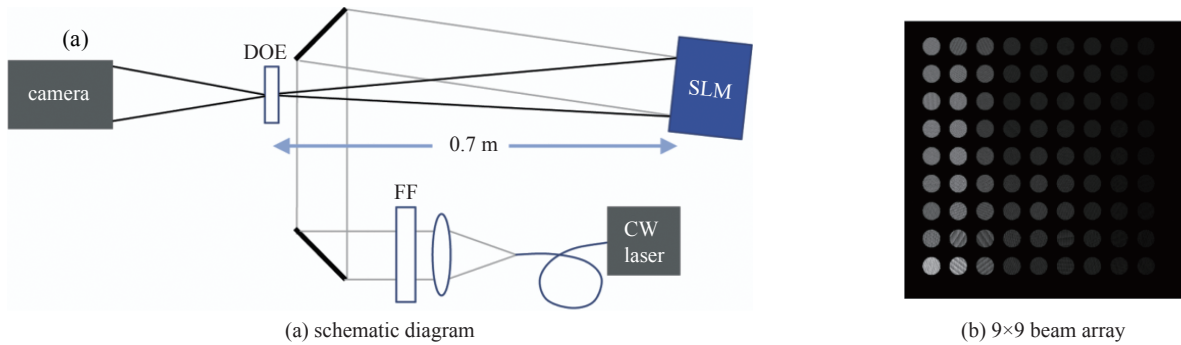


Fig. 17 SLM combiner experiment and hologram on SLM for generating 9×9 beams

图 17 81 路衍射相干合成验证系统和 SLM 产生 9×9 光束的全息图

度分布、角度、振幅和相位。通过分析合成光束中旁瓣强度模式并运用神经网络迭代方法，如图 18 所示，最终实现 81 路光束的稳定合束。其中 $m, n \in [-4, -3, \dots, 0, \dots, 3, 4]$ ，表示 9×9 二维阵列光束； $i, j \in [-8, -7, \dots, 0, \dots, 7, 8]$ ，表示由 9×9 二维阵列光束衍射形成的 17×17 的二维干涉模式。神经网络负责对输入的衍射强度模式进行分析，识别出当前的激光束阵列相位模式。

2014 年，中国科学院上海光学精密机械研究所采用达曼光栅作为空间滤波机制，实现了峰值功率千瓦级被动相干合成^[64]。实验采用的达曼光栅为石英基底，达曼光栅采用二进制相位表面结构线性阵列。有别于共孔径相干合成，此实验中达曼光栅仅用作空间滤波元件。此实验达曼光栅设计为 1×3 分束。相干合成后，CCD 相机测得与

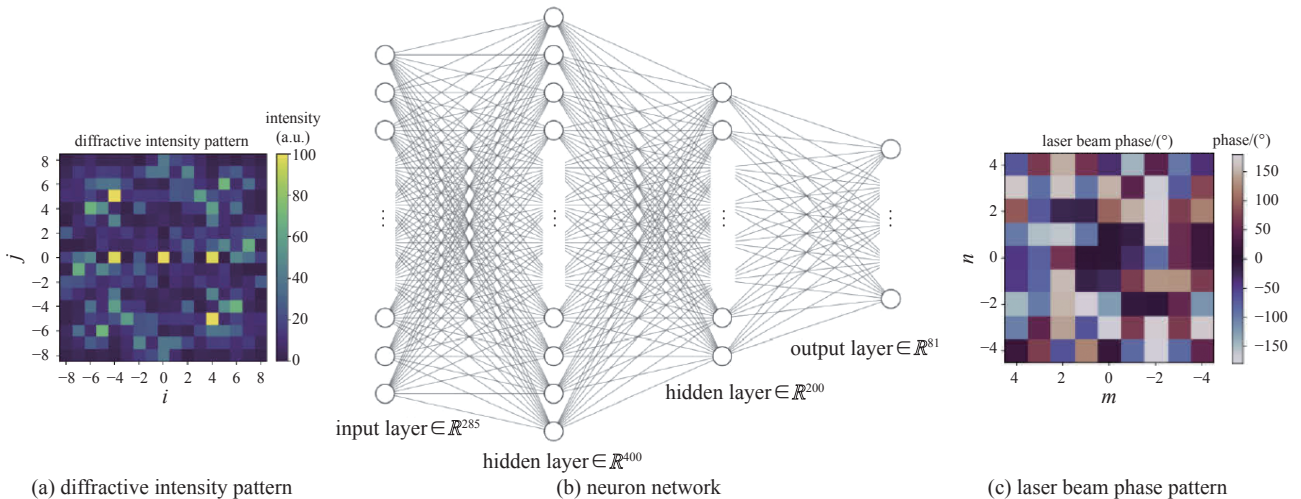


Fig. 18 Structure of the neural network, with interference patterns (17×17) as input and the corresponding 81-beam phases array (9×9) as the output

图 18 输出为 81 路光束的神经网络结构图、光束相位模式及衍射强度模式

理论计算得到的远场相干条纹图样如图 19 所示,其相干条纹对比度达到 82.9%。合成光脉冲宽度为 9.6 ns,合成脉冲序列的重复频率为 2.208 MHz,对应系统环形腔 94 m 的总腔长,峰值功率为 1.02 kW,输出光的时域特性如图 20 所示。由于真正投射在达曼光栅上的功率较低,因此达曼光栅表面的热积累可以被忽略,这在高功率脉冲激光合成应用中具有重大的优势。设计二维达曼光栅可以将阵列规模扩大,有可能将合成脉冲能量提升至 mJ 量级。

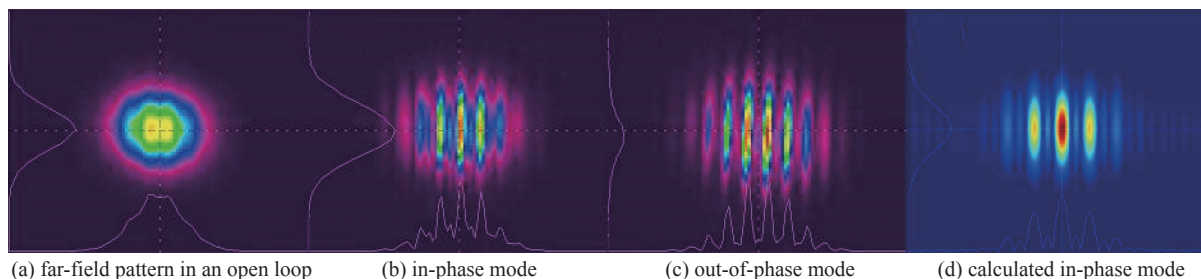


Fig. 19 Far-field interference pattern of three tiled aperture pulsed beamlets by an all-optical feedback loop

图 19 3 路平铺孔径阵列相干合成远场图样(23 W 平均输出功率)

最后我们将近几年基于 DOE 的脉冲光相干合成代表性研究成果总结在表 2 中,其中 channel 为合成路数, t_p 为脉冲宽度, f_p 为重复频率, P_p 为峰值功率, P_a 为平均功率, η 为合束效率。

4 结论

衍射相干合成经过数十年的发展,已经充分展现出其功率拓展能力,成为实现 ICAN 计划的另一有效方案。但是,目前衍射相干合成受限于 DOE 制备精度、激光器阵列的一致性、系统热效应、相位控制技术、系统失配等因素,存在合束效率低、装调难度大等问题,公开报道的功率量级与其他相干合成方案还有一定差距。因此研究激光器光源功率拓展、子光束相位控制、合成系统误差控制是衍射相干合成实现超高功率输出的关键。DOE 元件虽然可以实现紧凑的共孔径合成输出,但由于其衍射合成的特性,合成效率与各子光束之间的相位失配、光程失配、光束传输重叠失配等因素密切相关。基于被动相位控制的 DOE 相干合成方案,上海光学精密机械研究所在连续波方面实现了 206 W 的合成光束,光束质量 1.38,合束效率 29.6%;脉冲光方面实现了峰值功率 1.02 kW,重复频率 2.2 MHz 的 ns 级脉冲相干合成光束,合束效率 61%。这种基于被动相位控制方案的 DOE 相干合成系统整体结构较为精简,无需复杂的主动控制链路,但其合成效率受到环形腔损耗的制约难以提升。而主动相位控制通过施加外部控制链路对各路相位差进行补偿,从而获得较高的合束效率。基于公开报道的结果,目前连续光 DOE 相干合成实现了 4.9 kW 合成光输出,合束效率 82%;脉冲光 DOE 相干合成实现了平均功率 150 mW,重复频率 100 MHz 的飞秒脉冲相干合成光源,合束效率 83.4%。目前国内研究成果主要在主动控制链路的搭建上相较于国外还有一定差距,如何进一步提升 DOE 相干合成系统的各类主动控制能力,发展一套完备的大阵元、高精度、高带宽控制系统,将成为未来的研究热点与核心挑战。

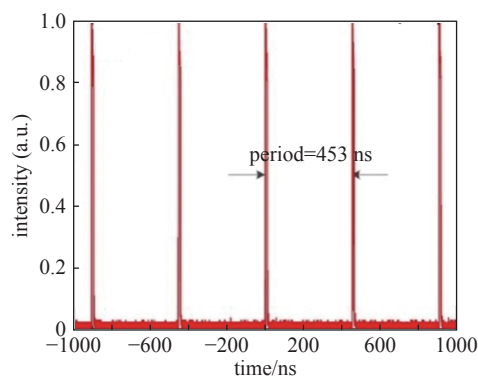


Fig. 20 Measured pulse shape of the combined beam in five cycles

图 20 相干合成光束 5 个脉冲的序列图

表 2 DOE 脉冲光相干合成代表性研究成果

Table 2 Representative research results of DOE pulse CBC

| Year | institution | result | reference |
|------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2014 | Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences | channel number is 2; $t_p=9.6$ ns; $f_p=2.2$ MHz; $P_p=1.02$ kW; $\eta=61\%$ | [64] |
| 2017 | Lawrence Berkeley National Laboratory | channel number is 4; $t_p=120$ fs; $f_p=100$ MHz; $P_a=150$ mW; $\eta=83.4\%$ | [59] |
| 2018 | Lawrence Berkeley National Laboratory | channel number is 8; $t_p=120$ fs; $f_p=100$ MHz; $\eta=85.4\%$ | [60] |
| 2019 | Lawrence Berkeley National Laboratory | channel number is 8; $t_p=100$ fs; $\eta=84.6\%$ | [61] |
| 2021 | Air Force Research Laboratory | channel number is 81; $\eta=60.4\%$ | [62] |

参考文献：

- [1] Anderegg J, Brosnan S, Cheung E, et al. Coherently coupled high-power fiber arrays[C]//Proceedings of SPIE 6102. 2006: 61020U.
- [2] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [Invited][J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2010, 27(11): B63-B92.
- [3] Nilsson J, Payne D N. High-power fiber lasers[J]. *Science*, 2011, 332(6032): 921-922.
- [4] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 219-241.
- [5] Shiner B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market[C]//Proceedings of the CLEO: 2013. AF2J. 1.
- [6] Augst S J, Fan T Y, Sanchez A. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(5): 474-476.
- [7] Yu C X, Augst S J, Redmond S M, et al. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2686-2688.
- [8] Xiao R, Hou J, Liu M, et al. Coherent combining technology of master oscillator power amplifier fiber arrays[J]. *Optics Express*, 2008, 16(3): 2015-2022.
- [9] Desfarges-Bertheleot A, Kermène V, Sabourdy D, et al. Coherent combining of fibre lasers[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2006, 7(2): 244-253.
- [10] Kozlov V A, Hernández-Cordero J, Morse T F. All-fiber coherent beam combining of fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 1999, 24(24): 1814-1816.
- [11] Uberna R, Bratcher A, Alley T G, et al. Coherent combination of high power fiber amplifiers in a two-dimensional re-imaging waveguide[J]. *Optics Express*, 2010, 18(13): 13547-13553.
- [12] Müller M, Klenke A, Steinkopf A, et al. 3.5 kW coherently combined ultrafast fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(24): 6037-6040.
- [13] Müller M, Aleshire C, Klenke A, et al. 10.4 kW coherently combined ultrafast fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(11): 3083-3086.
- [14] Wei Liwei, Cleva F, Man C N. Coherently combined master oscillator fiber power amplifiers for Advanced Virgo[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(24): 5817-5820.
- [15] Ma P F, Zhou P, Su R T, et al. Coherent polarization beam combining of eight fiber lasers using single-frequency dithering technique[J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(6): 456-458.
- [16] Klenke A, Breitkopf S, Kienel M, et al. 530 W, 1.3 mJ, four-channel coherently combined femtosecond fiber chirped-pulse amplification system[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(13): 2283-2285.
- [17] Ma Pengfei, Zhou Pu, Wang Xiaolin, et al. Coherent polarization beam combining of four 200-W-level fiber amplifiers[J]. *Applied Physics Express*, 2014, 7: 022703.
- [18] Müller M, Kienel M, Klenke A, et al. 1kW 1 mJ eight-channel ultrafast fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(15): 3439-3442.
- [19] Müller M, Klenke A, Stark H, et al. 16 channel coherently-combined ultrafast fiber laser[C]//Advanced Solid State Lasers 2017.
- [20] 刘泽金, 周朴, 马鹏飞, 等. 4路高功率窄线宽、线偏振光纤放大器相干偏振合成实现5 kW级高亮度激光输出[J]. *中国激光*, 2017, 44: 0415004. (Liu Zejin, Zhou Pu, Ma Pengfei, et al. 4channels of high-power narrow linewidth, linear polarization fiber amplifiers coherent polarization synthesis to achieve 5 kW high-brightness laser output[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44: 0415004)
- [21] 金国藩, 严瑛白, 邹敏贤. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. (Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian. Binary optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998)
- [22] 邹敏贤, 严瑛白, 金国藩, 等. 二元光学理论与基础技术研究[J]. *光电子-激光*, 1997, 8(5): 411. (Wu Minxian, Yan Yingbai, Jin Guofan, et al. Research on binary optics theory and basic technology[J]. *Optoelectronics-Laser*, 1997, 8(5): 411)
- [23] Dammann H, Klotz E. Coherent optical generation and inspection of two-dimensional periodic structures[J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1977, 24(4): 505-515.
- [24] Zhou Changhe, Liu Liren. Numerical study of Dammann array illuminators[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(26): 5961-5969.
- [25] Zhou Changhe, Xi Peng, Dai Enwen, et al. Phase gratings made with inductively coupled plasma technology[C]//Proceedings of SPIE. 2001.
- [26] Bi Qunyu, Zhou Changhe, Zheng Jiangjun, et al. Inverse symmetric Dammann gratings[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(5): 742-747.
- [27] Krackhardt U, Mait J N, Streibl N. Upper bound on the diffraction efficiency of phase-only fanout elements[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(1): 27-37.
- [28] Ehbets P, Herzig H P, Prongué D, et al. High-efficiency continuous surface-relief gratings for two-dimensional array generation[J]. *Optics Letters*, 1992, 17(13): 908-910.
- [29] 席鹏, 周常河, 赵帅, 等. 64×64点阵达曼光栅的设计与实现[J]. *中国激光*, 2001, 28(4): 369-371. (Xi Peng, Zhou Changhe, Zhao Shuai, et al. Design and fabrication of 64×64 spot array Dammann grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, 28(4): 369-371)
- [30] Prongué D, Herzig H P, Dändliker R, et al. Optimized kinoform structures for highly efficient fan-out elements[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(26): 5706-5711.
- [31] Hergenhan G, Lücke B, Brauch U. Coherent coupling of vertical-cavity surface-emitting laser arrays and efficient beam combining by diffractive optical elements: concept and experimental verification[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(9): 1667-1680.
- [32] Weingartner W, Schröder K, Schuöcker D. Active length control of two phase locked CO₂ lasers with a digital signal processor[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(9): 3298-3305.
- [33] Brignon A, Huignard J P. Phase conjugate laser optics[M]. Hoboken: Wiley, 2004.
- [34] Cox J A. Overview of diffractive optics at Honeywell[C]//Proceedings of SPIE 0884, Computer-Generated Holography II. 1988.
- [35] McHugh T J, Levenstein H A. An overview of binary optics at the Perkin-Elmer Corporation[C]//Proceedings of SPIE. 1988.
- [36] Zhao Tianzhuo, Yu Jin, Li Chaoyang, et al. Beam shaping and compensation for high-gain Nd: glass amplification[J]. *Journal of Modern Optics*, 2013, 60(2): 109-115.
- [37] Wang Dong, Zhang Jian, Wang Hao, et al. Variable shape or variable diameter flattop beam tailored by using an adaptive weight FFT-based iterative algorithm

- and a phase-only liquid crystal spatial light modulator[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(24): 5044-5050.
- [38] Hu Xinyao, Zhao Qian, Yu Panpan, et al. Dynamic shaping of orbital-angular-momentum beams for information encoding[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1796-1808.
- [39] Spagnolo G S, Ambrosini D. Diffractive optical element-based profilometer for surface inspection[J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(1): 44-52.
- [40] Romero L A, Dickey F M. Theory of optimal beam splitting by phase gratings. I. One-dimensional gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2007, 24(8): 2280-2295.
- [41] Romero L A, Dickey F M. Theory of optimal beam splitting by phase gratings. II. Square and hexagonal gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2007, 24(8): 2296-2312.
- [42] Leger J R, Swanson G J, Veldkamp W B. Coherent beam addition of GaAlAs lasers by binary phase gratings[J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 48(14): 888-890.
- [43] Veldkamp W B, Leger J R, Swanson G J. Coherent summation of laser beams using binary phase gratings[J]. *Optics Letters*, 1986, 11(5): 303-305.
- [44] Leger J R, Swanson G J, Veldkamp W B. Coherent laser addition using binary phase gratings[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(20): 4391-4399.
- [45] Harrison J, Leger J R, Rines G A, et al. Coherent summation of injection-locked, diode-pumped Nd: YAG ring lasers[J]. *Optics Letters*, 1988, 13(2): 111-113.
- [46] 闫爱民, 刘立人, 戴恩文, 等. 相干激光阵列的逆达曼光栅合束孔径装填实验研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(6): 1822-1826. (Yan Aimin, Liu Liren, Dai Enwen, et al. Experimental study on beam combination and aperture filling of coherent laser arrays using conjugate Damman grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6): 1822-1826)
- [47] Morel J, Woodtli A, Dändliker R. Coherent coupling of an array of Nd³⁺-doped single-mode fiber lasers by use of an intracavity phase grating[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(18): 1520-1522.
- [48] Pabœuf D, Emaury F, De Rossi S, et al. Coherent beam superposition of ten diode lasers with a Damman grating[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1515-1517.
- [49] Bloom G, Larat C, Lallier E, et al. Passive coherent beam combining of quantum-cascade lasers with a Damman grating[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(19): 3810-3812.
- [50] Liu Houkang, He Bing, Zhou Jun, et al. Experiments and perturbative analysis of Damman-grating-based aperture filling in a passive coherent beam combination[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(12): 2220-2227.
- [51] Glova A F. Phase locking of optically coupled lasers[J]. *Quantum Electronics*, 2003, 33(4): 283-306.
- [52] Glova A F, Lysikov A Y, Musena E I. Phase locking of 2D laser arrays by the spatial filter method[J]. *Quantum Electronics*, 2002, 32(3): 277-278.
- [53] Cheung E C, Ho J G, Goodno G D, et al. Diffractive-optics-based beam combination of a phase-locked fiber laser array[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(4): 354-356.
- [54] Redmond S M, Ripin D J, Yu C X, et al. Diffractive coherent combining of a 2.5 kW fiber laser array into a 1.9 kW Gaussian beam[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(14): 2832-2834.
- [55] Thielen P A, Ho J G, Burchman D A, et al. Two-dimensional diffractive coherent combining of 15 fiber amplifiers into a 600 W beam[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3741-3743.
- [56] McNaught S J, Thielen P A, Adams L N, et al. Scalable coherent combining of kilowatt fiber amplifiers into a 2.4-kW beam[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 174-181.
- [57] Flores A, Ehreich T, Holten R, et al. Multi-kW coherent combining of fiber lasers seeded with pseudo random phase modulated light[C]//Proceedings of SPIE. 2016: 97281Y.
- [58] Flores A, Dajani I, Holten R, et al. Multi-kilowatt diffractive coherent combining of pseudorandom-modulated fiber amplifiers[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55: 096101.
- [59] Zhou Tong, Sano T, Wilcox R. Coherent combination of ultrashort pulse beams using two diffractive optics[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(21): 4422-4425.
- [60] Zhou Tong, Du Qiang, Sano T, et al. Two-dimensional combination of eight ultrashort pulsed beams using a diffractive optic pair[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(14): 3269-3272.
- [61] Du Qiang, Zhou Tong, Doolittle L R, et al. Deterministic stabilization of eight-way 2D diffractive beam combining using pattern recognition[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(18): 4554-4557.
- [62] Du Qiang, Wang Dan, Zhou Tong, et al. 81-beam coherent combination using a programmable array generator[J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 5407-5418.
- [63] Wang Dan, Du Qiang, Zhou Tong, et al. Stabilization of the 81-channel coherent beam combination using machine learning[J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 5694-5709.
- [64] Yang Yifeng, Zheng Ye, He Bing, et al. Passive phase locking of three nanosecond fiber amplifiers using a Damman grating spatial filter[J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, 31: 084206.