



·固体激光器·

激光聚变驱动器的光束相干性及其控制：回顾与展望

魏晓峰, 李 平

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 高功率强激光与物质相互作用蕴藏着丰富的非线性效应, 激光聚变驱动器的光束具有高度相干性, 它在光束传输过程中极大地凸显了这种效应, 并不可避免地制约着激光功率的提升和激光能量的有效利用。回顾激光聚变驱动器的发展史, 在提升激光输出能力的主线外, 还存在一条与光束相干性做斗争的暗线贯穿其中。以激光与物质相互作用为牵引, 从高功率强激光传输中非线性效应抑制和激光等离子体相互作用的抑制两方面回顾了激光聚变驱动器光束相干性的控制现状, 并针对潜在需求, 展望了未来高功率激光发展的创新技术。

关键词: 高功率激光; 光束相干性; 激光聚变驱动器; 强激光传输动力学; 光束匀滑

中图分类号: O532

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202032.200203

Beam coherence and control of laser fusion driver: Retrospect and prospect

Wei Xiaofeng, Li Ping

(Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: There are many kinds of nonlinear effects in the interaction between high power laser and matter. The beam of laser fusion driver is highly coherent, which greatly enhances the nonlinear effects, and inevitably limits the laser power and efficient utilization. Looking back on the development history of laser fusion driver, there is a dark line running through the main line of improving laser output capability, which is struggling with beam coherence. The control status of beam coherence in laser fusion driver is reviewed from two aspects: restraining the nonlinear transmission effect of high power laser and suppressing the interaction between laser and plasma. In view of the potential demand, innovative technologies for the future development of high power lasers are proposed.

Key words: high power laser; beam coherence; laser fusion driver; dynamics of intense laser transmission; beam smoothing

1960 年激光发明之后, 国际上几位科学大家如前苏联巴索夫院士^[1]、我国王淦昌教授^[2]等, 便敏锐地意识到激光作为一种高度有序的辐射, 具有在空间和时间上高度集中的能力, 能够提供非常高的功率密度, 产生高温高压, 诱发核聚变。1972 年, 美国 Nuckolls 等人^[3]提出了利用强激光束对充有氘氟气体的微球靶进行内爆压缩实现热核燃烧的概念, 并发展了一套较完备的激光驱动惯性约束聚变理论模型, 指明了激光聚变的研究方向和技术途径, 在国际上掀起了激光聚变的研究热潮。1985 年至 1988 年间, 美国利用地下核爆辐射的 X 射线作为驱动源, 成功地实现了具有 10~100 倍能量增益的聚变反应, 证实了惯性约束聚变的科学可行性, 也明确了激光聚变驱动器的基本要求为 ns 脉宽百万 J 级的驱动能量^[4], 即本文所关注的单次大能量纳秒激光脉冲。

聚变物理的发展强力地牵引着高功率激光技术的发展, 使高功率激光技术走过了辉煌的发展历程。从 20 世纪 70 年代起, 美、日、英、法、中、俄等国相继建造了多台 ns 脉冲宽度的钨玻璃激光装置, 能量从百 J 级至数十 kJ 耳级^[5-8]。进入 21 世纪, 各核大国纷纷着手建造更大规模的装置^[9-11], 高功率激光技术发展跨入了新的历史时期。伴随着激光功率的提升, 人们逐渐在实验中认识到了激光与介质(固体、气体、液体或等离子体)相互作用还蕴藏着丰富的非线性效应, 强激光高度相干性极大地加强了这种效应, 并不可避免地制约着激光的高效利用和输

* 收稿日期: 2020-07-14; 修订日期: 2020-09-14

基金项目: 中国工程物理研究院院长基金项目(YZ1602)

作者简介: 魏晓峰(1960—), 男, 研究员, 主要从事高功率激光技术研究; xfw@caep.cn。

出能力提升。于物理应用而言,强激光造成的激光等离子体相互作用不稳定性(LPI)严重制约着束靶耦合性能^[12],它甚至可能是美国点火攻关计划(NIC)失败的主要原因^[13];于高功率激光技术自身发展提高而言,强激光受激散射、自聚焦等效应严重制约着激光功率的提升^[14-16]。

回顾激光聚变驱动器的发展史,在提升激光输出能力的主线外,还存在一条暗线贯穿其中,那就是与激光相干性的斗争。激光产生、传输、放大和频率转换的物理本质决定了激光的高度相干性^[17-18],因此高功率激光领域科学家们只能针对具体问题分级分段地控制各种非线性效应,并由此发明了多种巧妙的技术方案。每种方案的推出,都是对激光聚变领域的一次大的推进,目前已形成了具有鲜明特点的光束相干性控制方案保障激光聚变驱动器的性能^[19-20]。

本文从激光聚变驱动器的发展历程出发,以激光与物质相互作用为牵引,从高功率激光传输中的非线性效应的抑制和束靶耦合中LPI的抑制两方面回顾了高功率激光发展中的相干性控制技术,并展望了潜在提升的技术与途径,以推动高功率激光技术的发展。

1 高功率激光传输动力学的基本模型

早在激光聚变驱动器概念形成之前,人们已基于麦克斯韦方程建立了以介质极化和耦合波方程为基础的非线性光学理论^[21],形成了处理光场与物质相互作用的半经典方法,该方法至今仍普适于一般的高功率光学系统。其内涵是光场按经典电动力学处理,用麦克斯韦方程描述;物质视为量子系统,用量子力学描述。电极化强度矢量 \mathbf{P} 用于联系光场和物质,即

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}^L + \mathbf{P}^{\text{NL}} = \chi^{(1)}\mathbf{E} + \chi^{(2)}\mathbf{E}\mathbf{E} + \chi^{(3)}\mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots \quad (1)$$

激光器发明之前,通常认为 \mathbf{P} 仅包含与光场 \mathbf{E} 相关的线性项 $\mathbf{P}^L = \chi^{(1)}\mathbf{E}$,它成功地解释了光波的折射、散射和双折射等现象。激光器发明之后,光场得到了显著增强,人们发现了 \mathbf{P} 还包含与 \mathbf{E} 相关的非线性项 $\mathbf{P}^{\text{NL}} = \chi^{(2)}\mathbf{E}\mathbf{E} + \chi^{(3)}\mathbf{E}\mathbf{E}\mathbf{E} + \dots$,它是光学非线性效应的来源。

非线性光学的研究内容宏观上包含两方面,首先是求解介质感应的非线性极化强度 \mathbf{P}^{NL} 。特定介质的极化率 χ 与光场分布紧密相关,即与通常所说的光束相干性紧密相关,它具有频率色散、空间色散和偏振色散的特性。频率色散指的是介质内某时刻的极化强度与光电场历史有关;空间色散指的是介质内某位置的极化强度与邻近空间点的光电场有关;偏振色散指的是介质极化强度与光电场的振动方向有关。激光高度相干性体现在它具有极窄的光谱、统一的指向和单一的偏振态,正是如此,激光才容易使介质极化达到共振增强的效果,凸显非线性效应。

然后,将非线性极化项 \mathbf{P}^{NL} 作为次波源代入麦克斯韦方程,可获得光场的非线性方程

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial^2 \varepsilon \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}^{\text{NL}}}{\partial t^2} \quad (2)$$

式(2)是一个二阶微分方程,可用于求解介质内的激光光场。方程求解难度较大,一般无显性表达式,需要根据应用实例的边界条件进行近似,导出容易求解的各种形式耦合波方程。

利用半经典方法建立的光束传输模型在激光聚变驱动器发挥了重要作用,其相关理论在近些年也得到了进一步的加强^[22-23]。它不仅预测了大量新型的物理现象,指导了非线性光学在激光技术中的应用,还催生了多项抑制激光非线性效应的光束控制技术。

2 基于非线性传输的光束相干性控制

高功率强激光在放大和频率转换的过程中,光束相干性不断增强,它因此会与介质相互作用形成譬如受激散射、自聚焦效应等非线性效应,并反过来制约激光功率的提升。光束相干性控制为激光有效传输提供了基本保障,确保了激光聚变驱动器功率输出的需求。

2.1 强激光在介质中传输的受激散射及控制

在激光聚变驱动器的研究初期,人们便发现了介质中的入射光增强到一定程度时可以由自发散射转变成受激散射。根据介质感应的非线性极化特性不同,存在与声波激发有关的受激布里渊散射,与分子取向激发有关的受激拉曼散射。受激散射会耗散激光能量,破坏光束质量,严重时甚至会直接损伤光学元件。受激散射的电极化强度矢量 \mathbf{P} 为

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}^L + \mathbf{P}^{\text{NL}} = \varepsilon_0 \chi^{(1)} \mathbf{E} + \varepsilon_0 \chi_s^{(0)} |\mathbf{E}_p|^2 \mathbf{E}_s \quad (3)$$

式(3)显示极化强度是与入射光和散射光均相关的三阶非线性过程,只有光场极化 \mathbf{P}^{NL} 发射的光波在介质中具有同一相速度,即通常所说的相位匹配,才能满足指数增长的受激放大($I_s = I_{s0}e^G$),满足该条件要求入射光和散射光具有满足受激散射所需的相干性。激光聚变驱动器的介质包含激光玻璃、激光晶体和空气三类,在其发展过程中逐步明确了对装置形成危害的受激散射主要包含:熔石英元件内横向受激布里渊散射(TSBS)^[24]、空气中长程传输的受激旋转拉曼散射(SRRS)^[25]和晶体元件内横向受激拉曼散射(TSRS)^[26]三种。由于光束聚焦和频率转换对光束指向和偏振的强约束,光束相干控制只能局限于频率色散,即利用介质极化的弛豫时间,该时间内相干的入射光场才是受激放大的有效泵浦光场。在该机理的牵引下,基于激光聚变驱动器的特点,逐渐发展了三种截然不同的抑制措施,具体发展历程如下。

TSBS效应于1985年在Nova装置上首次引起了高度的重视,它源于其封真空的透镜元件在高通量运行下出现了巨大的裂纹损伤,如图1所示,这很容易造成真空爆炸并产生不可估量的损失。分析表明熔石英元件的TSBS效应是其成因。多个科研小组因此迅速开展了研究^[24, 27-30],并在短期内获得了在351 nm激光的辐照下,熔石英元件TSBS增益系数 g 约为7 cm/GW,离子声波弛豫时间 τ 约为1.1 ns。该参数为光束相干控制抑制TSBS效应提供了依据:离子声波弛豫时间和激光纳秒脉宽决定了激光有效频带间隔应设计在GHz量级,而TSBS增益系数和增益长度决定了边频带的最大强度和数目。庆幸的是,总带宽约为40 GHz的正弦调频脉冲可满足上述要求,它并未突破高功率激光放大和频率转换的带宽约束^[31]。基于主激光相干控制抑制TSBS效应也因此作为高功率激光装置设计的基本原则,并在激光聚变驱动器中成功地保护了包含真空窗口、三倍频取样光栅等激光聚变驱动器的关键元件^[32-34]。

受研究TSBS效应的启示,从1985年开始,各大装置开始研判强激光SRRS效应所限制的光程能否满足激光聚变驱动器的传输光路排布需求,并在各自的原型装置上开展了强激光SRRS效应的实验研究,获得了较为一致的散射光谱和增益特性,如图2所示,明确了必须采取有效措施才能保障光束传输距离的要求^[35-40]。研究同时获得了氮气介质SRRS的弛豫时间 τ 约为0.12 ns,这表明基于激光相干控制的光束有效频带间隔需达到约10 GHz,再考虑达到安全阈值的条件所需的边带数目为8~10条,总带宽需达到数nm,这超出了高功率激光放大和频率转换的带宽约束。因此人们只能另辟蹊径,提出了采用增益系数极低的惰性气体作为介质材料抑制SRRS的技术方案,综合性价比等因素最终确定了氙气介质的技术方案并获得了成功^[41]。基于介质材料优化的方案目前已成了保障ICF中光束长程传输性能的标准方法,支撑了具有长程传输要求的激光聚变驱动器的设计。

KDP晶体由于良好的制造与加工性能在实现激光频率转换方面具有巨大的优势。但早在1982年,美国学者已经认识到三倍频晶体的TSRS效应会限制激光功率的输出^[42],如图3所示,TSRS效应造成的三倍频晶体双肺模式



Fig. 1 Damage and crack of fused silica optics caused by transverse stimulated Raman scattering (TSBS) effect

图1 TSBS效应造成的熔石英元件的损伤裂纹

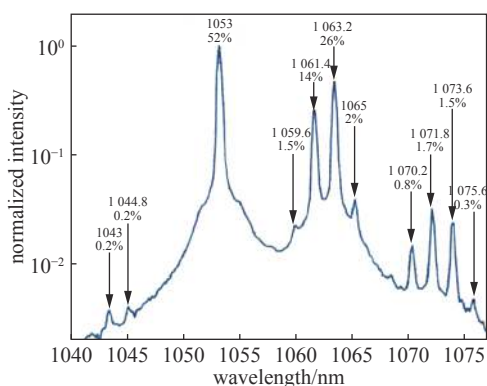


Fig. 2 Typical scattering spectra by stimulated rotational Raman scattering (SRRS) effect of intense laser

图2 强激光SRRS效应形成的典型散射光谱

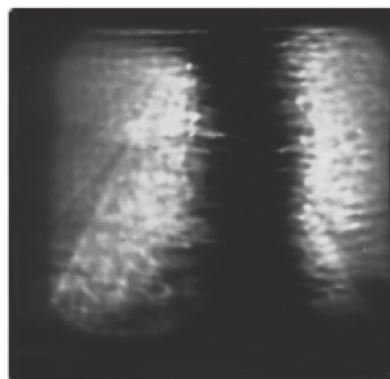


Fig. 3 Damage of crystal optics in dual lung mode caused by TSRS effect

图3 TSRS效应造成的三倍频晶体元件双肺模式的体损伤

式的体损伤。KDP 晶体 SRS 效应的弛豫时间为 ps 量级, 基于激光相干控制来抑制该效应的主激光带宽需几十 nm, 这显然不现实^[43-44]。Nova 装置因此采用了晶体阵列结构来减小 TSRS 的增益口径, 以达到降低 TSRS 效应的目标, 但该方案会同时限制光学元件的通光口径并降低装置的输出能力^[45]。直到 20 世纪 90 年代, 人们提出了通过散射光相干性(不是泵浦光)抑制 TSRS 效应并初步确定了晶体掺氙是一种潜在的技术方案, 并由此开展了各种掺氙量 DKDP 的 TSRS 增益系数测量^[46-47]。1999 年, DKDP 晶体 TSRS 效应的理论模型在 Beamlet 上得到了验证, 明确了 DKDP 的拉曼光谱可分裂为两部分, TSRS 增益系数因此可得到 2 倍的改善, 基本可以满足激光聚变驱动器的输出功率需求^[48]。随后各国科研人员对 DKDP 晶体的性能进行了全面的研究, 快速推动了 DKDP 晶体的工程应用^[49-51], 同时也积极探索了新的技术方案以求功率的进一步突破^[52]。TSRS 效应的抑制从散射光相干性控制的角度出发, 在不影响主激光性能的条件下, 巧妙地解决了散射强度问题, 保障了高功率激光装置的功率输出需求。

2.2 强激光传输的自聚焦效应及其控制

强激光自聚焦是非线性光学中另一个经典问题, 它会使人射光束的波面发生畸变, 破坏光束的聚焦性能, 严重时还会造成介质的丝状破坏^[53-54]。激光聚变驱动器在研制过程中发生了多次与自聚焦效应相关的光学损伤, 图 4 为原型装置上发现的自聚焦损伤。自聚焦效应是一种三阶非线性光学效应, 其电极化强度表达式为

$$P = P^L + P^{NL} = \epsilon_0 \chi^{(1)} E + \epsilon_0 \chi_s^{(3)} |E|^2 E \quad (4)$$

由式(40)可见, 介质中光强大的位置引入的位相延迟大, 光场因此在局部汇聚形成自聚焦, 它原则上给通过介质的激光功率密度设置了一个上限, 但量化演化规律在激光聚变驱动器的研究初期并不清楚。

1966 年, 自聚焦理论的研究取得了突破, Bespalov 和 Talanov 在耦合波方程的基础上, 采用弱调制近似, 并基于介质极化率在空间上的色散建立了 B-T 理论^[55], 它对高功率激光器中出现的成丝现象有了比较简单而清晰的解释。B-T 理论为人们研究强激光非线性传输规律提供了非常重要的工具^[56-60]。随后多个科研小组面向不同应用, 发展了独特的分析方法: 基于自聚焦的光束口径, 发展了小尺度自聚焦和全口径自聚焦理论^[53,61-62]; 基于介质极化的响应时间不同, 发展了纳秒光束的稳态自聚焦和超短脉冲的瞬态自聚焦理论^[63-64]; 基于光束衍射差异, 发展了平面光波自聚焦和发散光波自聚焦理论^[65-68]; 基于多波长的相互作用, 发展了单波长自聚焦和复合波长自聚焦理论^[60,69-70]; 基于噪声来源不同, 发展了起源于白噪声的自聚焦和起源于特定缺陷的“热像”理论^[71-74]。

自聚焦效应的弛豫时间为 ps 量级, 且具有局域特点, 因此采用光束相干控制用于抑制自聚焦效应则需要光束近场在任何区域的相干时间均为 ps 量级(对应光谱带宽为几十 nm), 这对激光聚变驱动器而言并不现实。因此抑制自聚焦效应只能以理论研究为牵引, 优化设计激光传输放大链。1996 年, 利弗莫尔实验室(LLNL)的研究人员提取出 B 积分作为高功率固体激光装置的设计判据, 并采用逐级滤波的方式消除级间小尺度自聚焦效应, 初步确定了分级分段控制的思路和多程放大构型^[75-76], 由此发展了包含空间滤波器级间 B 积分受限($\Delta B \leq 1.8$)、系统 B 积分受限($\Sigma B \leq 3.5$)、三倍频 B 积分受限($IL \leq 25 \text{ GW/cm}$)和“热像”分析与控制等多项判据^[77-82], 同时从噪声的控制方面确立了分空间频段控制的光学元件指标体系^[83-85]。为进一步提升激光输出功率, 近年来还通过泵浦放大技术的研究持续提升装置增益能力以降低自聚焦效应的影响^[86], 通过高精度位相缺陷检测与修复设备的开发降低了热像效应对装置的危害^[87-88], 并最终形成了具有鲜明特点的第二代激光聚变驱动器^[89]。在某种意义上, 如果说钨玻璃材料在尺寸和储能密度方面无与伦比的优势奠定了激光聚变驱动器的材料基础, 那么小尺度自聚焦的理论奠定了激光器的光路构型和元件体系。

3 基于抑制 LPI 效应的光束相干性控制

在束靶耦合中, 高功率强激光需在等离子体中沉积能量, 这不可避免会激发 LPI, 诸如激光成丝、SBS, SRS 等。LPI 效应会降低靶的吸收激光效率, 重新改变光束功率的分配, 产生超热电子预热靶丸进而影响激光聚变的性能^[90-92]。通过半经典理论可知, 降低激光功率密度和控制光束相干性可抑制 LPI 效应, 它们也因此成为了激光聚变驱动器的主要措施^[93-94]。在控制激光相干性方面, 不同于光束传输必须保障近场各区域的相干性, LPI 效应

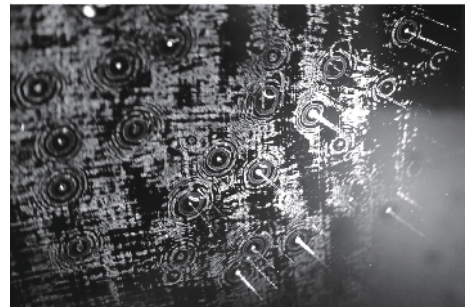


Fig. 4 Filament damage of lens caused by self-focusing effect

图 4 自聚焦效应造成打靶透镜元件成丝损伤

所关注的光束远场可通过光束近场区域差异提供更丰富的相干性调控。

3.1 基于空间色散的光束相干性控制

基于空间色散的光束相干性控制指的是通过光束指向 k 的随机分布破坏位相匹配关系。它是在二元光学实现焦斑空间整形的研究中而逐渐确立的技术路线。最初, 1984 年 Y. Kato 等提出了随机相位板(RPP)用于改善靶面辐照均匀性^[95]。RPP 是一种简单的二元光学器件, 它在光束近场中引入随机分布的 0 或 π 的位相, 光束因此被分离成步调并不完全统一的子束, 它们聚焦于靶点, 达到了改善靶面辐照均匀性的目标。RPP 概念提出之初, 人们仅认识到了 RPP 起作用的原因是降低了激光功率密度; 随着研究的深入, 人们逐渐发现了零相关的 RPP 相位元可实现更优的 LPI 抑制效果, 才意识到了介质的空间相干性也在抑制 LPI 效应上起到了重要作用^[96-97]。

RPP 虽然实现了激光整形和空间去相干, 但其引入的位相跃变不仅造成了较大的能量损耗, 还由于光束传输约束而只能应用于装置末级的三倍频段, 限制了元件的使用寿命。因此在坚持近场随机位相的基础上, 多个研究团队大力发展了焦斑整形技术, 并形成了三方面的进步: 在焦斑整形措施方面, 从基于阵列元形态整形发展成基于近场位相梯度分布整形; 在位相分布设计方面, 从随机生成的设计技术发展成了基于 G-S 方法的迭代技术; 在位相分布方式方面, 从分立跃变的台阶结构发展至完全连续面形; 在历经 KPP, DPP 等技术后, 最终形成了目前基于磁流变工艺的 CPP 技术^[98-103], 如图 5 所示。CPP 完全克服了 RPP 的弊端, 在光路上可前移至基频段应用, 且保持着理论上 100% 的能量利用率, 在实验效果上, CPP 的应用大幅降低了 SBS 和 SRS 效应, 高效提升了束靶耦合能力^[104-105]; 目前 CPP 元件已经成为了各大激光装置的标准配置。

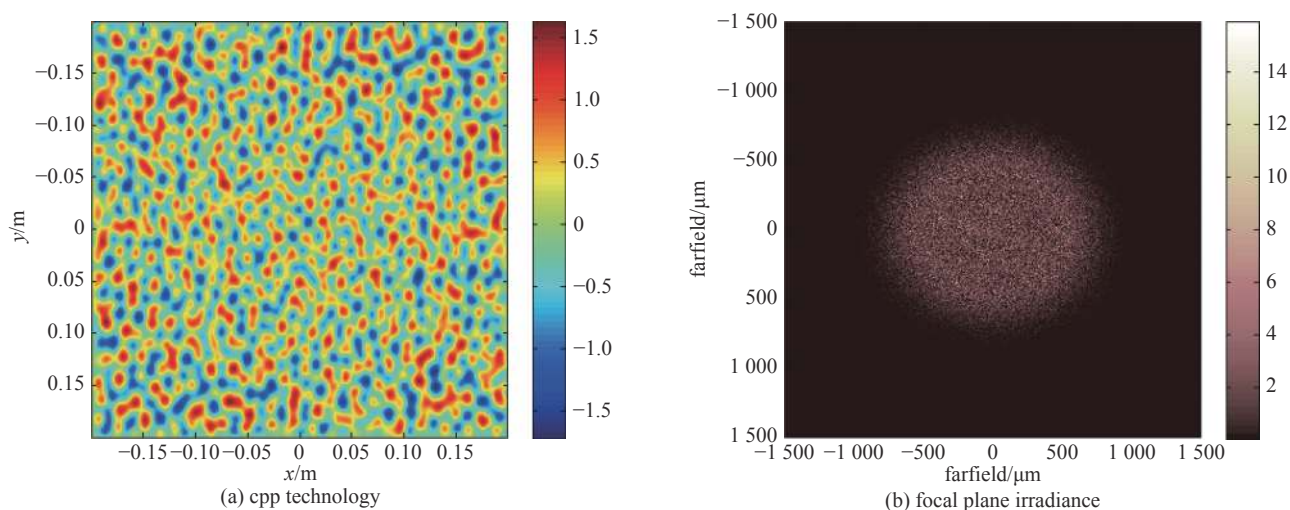


Fig. 5 Schematic diagram of CPP technology and its corresponding focal plane irradiance

图 5 CPP 面形设计及对应的焦斑分布

3.2 基于频率色散的光束相干性控制

基于频率色散的光束相干性控制指的是在通过光束相干时间(相对介质的极化弛豫时间)的减小破坏位相匹配关系。1983 年, R. H. Lehmberg 基于分子激光器提出的空间诱导非相干(ISI)匀滑方法是该思想的最初应用^[106]。宽带激光束入射到阶梯光栅上, 被分割成大量的子光束, 相邻的子束存在一定的时间延迟并聚焦于靶点, 在靶上进行非相干叠加。该方法充分发挥了光束相干性的性能, 它要求激光具有较大的带宽使光束相干时间小于子束间延迟时间, 从而使得分割的各子束对等离子体独立极化, 相当于降低了激光功率密度, 从而可降低 LPI 效应^[107-108]。

由于不规则频带产生时间上强度尖峰的损伤风险, 以及较窄带宽的限制, 以 ISI 技术为代表的基于频率色散去相干的方法迟迟无法在固体激光装置上形成应用。直到 1989 年, S. Skupsky 创新性地提出了光谱色散匀滑方法(SSD)^[109-110], 其思想非常巧妙, 如图 6 所示, 它采用光栅将正弦调频的宽带光色散后再聚焦于靶点, 该方式充分发挥了光束近场和远场的全域对应关系, 于光束近场而言, 在任意时刻任意空间位置, 光束仍是具有高度相干性的窄带光, 它可以避免强度尖峰并保障高效频率转换, 于光束远场而言, 在任意时刻任意空间位置, 其光场信息涵盖了光束近场全区域, 它包含了光束近场的全部光谱成分, 从而可最大程度地降低光束的相干性。SSD 技术巧妙地解决了光束近场窄带传输和远场去相干的矛盾, 迅速成为了新一代高功率激光装置的基本配置^[111-113]。三倍频的谐波转换所接受的总带宽为 0.3 nm, 它决定了远场的相干时间只能控制在 10 ps 的量级, 因此 SSD 技术只能对弛豫时

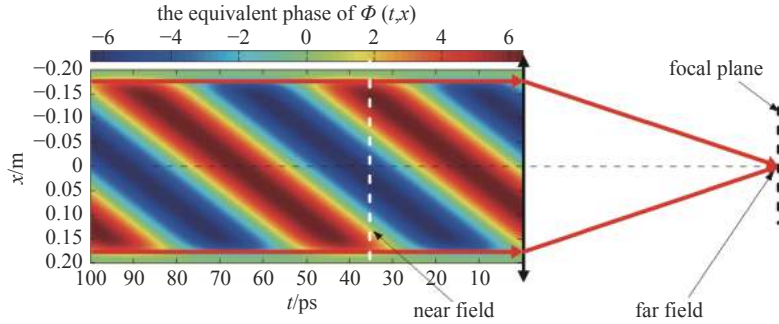


Fig. 6 Schematic diagram of far field and near field global correspondence based on SSD technology
图 6 基于光束近场和远场全域对应关系的 SSD 技术

间较长的成丝效应进行直接抑制而间接改善整体的 LPI 效应。

在色散控制上, SSD 的色散方式对激光辐照均匀性有所差异, 具体体现在随时演化的远场强度分布与 SSD 的色散维度和方向有关。因此人们通过研究逐渐从初始线性色散的一维 SSD 发展出异型色散 SSD、二维 SSD 和三维 SSD 等技术, 它们在一定程度上进一步改善了激光烧蚀的均匀性^[114-116]。在光谱控制上, 尽管单一子束的频谱范围有限, 但子束间可以有较大频差。而随着激光装置规模的增加, 装置采用集束打靶的模式, 集束作为整体与等离子体相互作用, 这为拓宽光谱范围, 降低集束焦斑整体相干性提供了条件。中国工程物理研究院激光聚变研究中心由此提出了基于子束独立调控多色多频技术方案, 模拟显示它可以在 SSD 的基础上进一步大幅降低激光的相干性, 目前多色多频集束焦斑的相干控制性能已得到了实验验证^[117-120]。

SSD 技术在改善光束远场相干性的同时, 深化了人们对宽带激光的认识, 在该技术的牵引下已发展并构建了以宽带激光脉冲产生、传输、放大倍频和控制为基础的体系, 完善了固体激光装置中的激光传输动力学理论^[121-123]。

3.3 基于偏振色散的光束相干性控制

基于偏振色散的光束相干性控制指的是通过偏振控制改变等离子体介质极化模式以达到抑制 LPI 效应的效果。由于激光自身具有单一偏振态的特点, 人们起初并不容易注意到光束偏振还可用于焦斑控制。直到 1992 年, 日本 K. Tsubakimoto 等人才提出了光束偏振改善激光均匀性的思路^[124], 但并没有找到无损耗的技术方案。1998 年, 美国 T. R. Boehly 等人提出了在激光末级增加偏振器件实现偏振匀滑的方法^[125-126]。该方法将单偏的三倍频光分解成两束正交的偏振态, 通过对它们引入不同的相移使得两者在靶面上错位, 其非相干的叠加特性降低了激光在靶点的功率密度。随后集束设计则采用了更为简洁的方案: 各子束采用正交的线偏振实现激光焦斑功率密度的降低, 而无需对频率转换后的光束增加额外的器件。上述设计思想仍是降低激光功率密度抑制 LPI 效应, 最大可降低焦斑对比度为原来的 $1/\sqrt{2}$ 。

2008 年, 美国 D. H. Froula 等人在 LPI 实验研究中发现, 偏振匀滑抑制 LPI 的实际效果优于仅考虑偏振匀滑对激光功率密度降低所带来的改善预期, 并初步判断等离子体随机极化的影响是降低 LPI 效应的主要因素^[127], 实际上指出了基于偏振优化的光束相干性控制可实现具有混合偏振的丝斑分布, 如图 7 所示, 美国 P. Michel 等人在随后的 LPI 研究中, 发现了黑腔中光束偏振混合的重要影响。2012 年, NIF 研究人员意识到了具有近场空间分布的偏振控制可有更好的匀滑效果, 并以光束均匀性控制更为严格的直驱作为目标, 开展了子束偏振匀滑的技术攻关

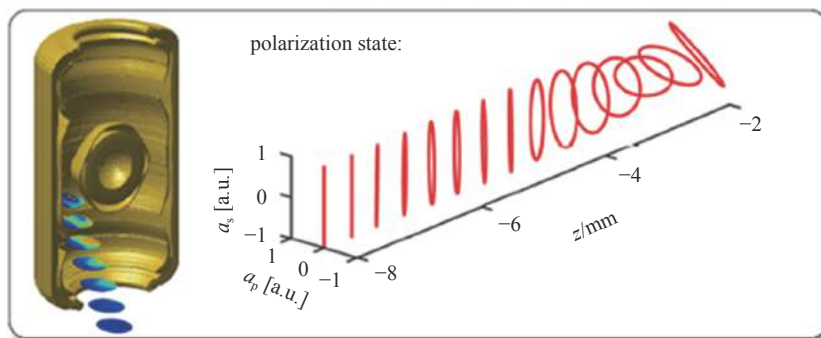


Fig. 7 Schematic diagram of mixed polarization state in the far field based on polarization optimization control
图 7 基于偏振优化控制实现具有混合偏振的丝斑分布示意图

[128]。2014年,中国工程物理研究院李平等提出了随机偏振分布的偏振匀滑设计,通过响应函数的引入,从理论上阐明了偏振匀滑的本征优化目标,并提出了一种耦合随机相位板的指向构造偏振随机分布的新思路[129]。2017年,北京应用物理与计算数学研究所刘占军等人提出了高速动态偏振匀滑的概念,它实际上是将偏振色散和频率色散结合,可进一步退化光束相干性,研究表明,该方案有望从量级上降低LPI效应,为高功率激光焦斑的相干性控制提供了更广阔的前景[130]。

4 激光聚变驱动器光束相干性的发展展望

在功率提升方面,尽管从光束相干控制、介质选择、能流优化等方面同时采取了措施保障了激光聚变驱动器的可行性,但由于强激光传输小尺度自聚焦效应的瓶颈,单束最大输出功率在近十余年间并没有显著变化,而新型点火方式已经对激光提出了更高的功率需求。在束靶耦合方面,LPI问题仍然是ICF能否成功的关键因素,激光相干控制是抑制LPI效应的重要途径,美国E. M. Campbell等人甚至将超大宽带的三倍频光界定为ICF的第四代激光装置。因此未来的激光聚变驱动器,非常迫切需要探索新的技术路线提升激光输出功率、改善激光远场相干性。

“高增益、低非线性系数”的增益材料研发可从本征上提升激光输出功率,除此之外,激光相干控制也为突破功率瓶颈提供了一个方向:高功率脉冲传输动力学的物理规律指出,强激光传输的小尺度自聚焦是一个动态过程,结合介质极化的响应特性,如果能对光束相干性进行控制,就有可能使强激光在传输中的极化匹配这个动态过程,从而突破传统光束的非线性传输的约束,提升装置的输出功率。

改善激光远场相干性则可通过以下创新性研究工作突破现有激光技术体系:

(1)研究等离子体介质极化特性,由此构建光束高速动态变化的束匀滑技术体系,获得光束相干性与LPI效应的纽带,为新型光束的探索提供目标牵引。

(2)研究并构建成为超大宽带激光脉冲产生、传输、放大倍频和控制为基础的理论体系;目前主流激光技术路线中的脉冲放大和频率转换过程对带宽存在强约束,因此需要打破传统激光传输放大链的思想,探索新型激光技术,譬如随机激光或基于CPA放大的超连续谱基频光和窄带光形成超宽带三倍频光等技术。

(3)研究构建(近)非相干光的技术理论,发展具有高功能的高阈值单元器件;该思想则是在依托现有激光聚变驱动器的输出能力,通过在末级增加光束退相干器件产生(近)非相干光,譬如利用气体盒的SRRS效应展宽三倍频激光光谱、利用等离子体介质的FSBS效应降低光束的时间和空间的相干性等技术。

5 结 论

激光聚变驱动器中激光产生、传输、放大和频率转换的本质决定了输出光束的高度相干性,它因此会对介质(固体或等离子体)产生较强的非线性极化,进而形成多种影响激光性能的非线性效应。回顾激光聚变驱动器的发展史,在提升高功率激光输出能力的主线外,还存在一条与激光相干性做斗争的暗线。针对高功率强激光传输控制要求,通过对受激散射和自聚焦效应等限制因素分析,阐述了激光聚变驱动器在激光相干控制、介质选择、能流优化等方面的发展历程。针对抑制LPI效应的光束远场控制要求,总结回顾了激光聚变驱动器在空间、频率和偏振色散方面所发展的光束相干性控制技术,分析了固体激光装置的相干控制方式及其显著特点。针对激光聚变驱动器在提升激光输出功率、改善激光远场相干性等潜在需求,从激光传输动力学方面展望了可能的创新技术路线。

在激光聚变点火即将迈向成功的今天,纵观激光技术发展的60年,我们清晰地看到,激光与物质相互作用是激光技术发展的重要推手,对激光与物质相互作用的规律认识越清楚,就越有潜力去提升激光输出功率,改善光束输出性能,并为激光聚变驱动器的跨代提升奠定强有力的基础。

参考文献:

- [1] Basov N G, Krohkin O H. The conditions of plasma heating by optical generation of radiation[C]//Proceeding of the 3rd International Congress on Quantum Electronics. 1964: 1373.
- [2] 王淦昌. 利用大能量大功率的光激光器产生中子的建议[J]. 中国激光, 1987, 14(11): 641-645. (Wang Ganchang. Suggestion of neutron generation with powerful lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 1987, 14(11): 641-645)
- [3] Nuckolls J, Wood L, Thiessen A, et al. Laser compression of matter to super-high densities: Thermonuclear (CTR) applications[J]. Nature, 1972, 239(5368): 139-142.
- [4] Storm E, Lindl, J D, Campbell E M, et al. Progress in laboratory high gain ICF (Inertial Confinement Fusion): Prospects for the future[C]//International

Seminar on Nuclear War. 1988: 1-30.

- [5] 魏晓峰, 郑万国, 张小民. 中国高功率固体激光技术发展中的两次突破[J]. *物理*, 2018, 47(2): 73-83. (Wei Xiaofeng, Zheng Wanguo, Zhang Xiaomin. Two breakthroughs in the development of high power solid-state laser technology in China[J]. *Physics*, 2018, 47(2): 73-83)
- [6] Hunt J T, Speck D R. Present and future performance of the Nova laser system[J]. *Optical Engineering*, 1989, 28(4): 461.
- [7] Manes K R. Review of upconverted Nd-Glass laser plasma experiments at Lawrence Livermore National Laboratory[J]. *AIP Conference Proceedings*, 1982, 90(1): 196.
- [8] Kidder R E. *Inertial Confinement Nuclear Fusion: A historical approach by its pioneers*[M]. London : Scientific Publishers, 2007.
- [9] Moses E I, Wuest C R. The National Ignition Facility: Status and plans for laser fusion and high-energy-density experimental studies[J]. *Fusion Science and Technology*, 2003, 43(3): 420-427.
- [10] André M L. The French Megajoule Laser Project (LMJ)[J]. *Fusion Engineering & Design*, 1999, 44(1/4): 43-49.
- [11] Belkov S A. Numerical modeling of the optical system of UFL-2M laser facility[C]//16th International Conference Laser Optics. 2014.
- [12] Norreys P A, Farhat N B, Sentoku Y, et al. Intense laser-plasma interactions: New frontiers in high energy density physics[J]. *Physics of Plasmas*, 2009, 16: 041002.
- [13] Clery D. Ignition facility misses goal, ponders new course[J]. *Science*, 2012, 337(15): 1444-1445.
- [14] Bliss E, Hunt J, Renard P, et al. Effects of nonlinear propagation on laser focusing properties[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1976, 12(7): 402-406.
- [15] Simmons W, Hunt J, Warren W. Light propagation through large laser systems[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1981, 17(9): 1727-1744.
- [16] Gross H. Numerical propagation of partially coherent laser beams through optical systems[J]. *Optics & Laser Technology*, 1997, 29(5): 257-260.
- [17] Sawicki R H. The National Ignition Facility: laser system, beam line design and construction[C]//Proc of SPIE. 2004, 5341: 43.
- [18] Puell H, Scheingraber H, Vidal C R. Saturation of resonant third-harmonic generation in phase-matched systems[J]. *Physical Review A*, 1980, 22(3): 1165-1178.
- [19] Paisner J A, Boyes J D, Kumpan S A, et al. Conceptual design of the National Ignition Facility[C]//Proc of SPIE. 1995, 2633:2-13.
- [20] 范滇元, 张小民. 激光核聚变与高功率激光: 历史与进展[J]. *物理*, 2010, 39(9): 589-596. (Fan Dianyuan, Zhang Xiaomin. Laser fusion and high power laser: History and progress[J]. *Physics*, 2010, 39(9): 589-596)
- [21] Shen Y R. *The principles of nonlinear optics*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- [22] Wang Huan, Ji Xiaoling, Deng, Yu, et al. Theory of the quasi-steady-state self-focusing of partially coherent light pulses in nonlinear media[J]. *Optics Letters*, 2020, 45: 710-713.
- [23] Wang Huan, Ji Xiaoling, Zhang Hao, et al. Propagation formulae and characteristics of partially coherent laser beams in nonlinear media[J]. *Optics Letters*, 2019, 44: 743-746.
- [24] Eggleston J M, Kushner M J. Stimulated Brillouin scattering parasitics in large optical windows[J]. *Optics Letters*, 1987, 12(6): 410-412.
- [25] Hennesian M A, Swift C D, Murray J R. Stimulated rotational Raman scattering in nitrogen in long air paths[J]. *Optics Letters*, 1985, 10(11): 565-571.
- [26] She C Y. Analysis of the stimulated Raman effects in an anisotropic crystal KDP[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1967, 3(2): 73-78.
- [27] Murray J R, Smith J R, Ehrlich R B, et al. Experimental observation and suppression of transverse stimulated Brillouin scattering in large optical components[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1989, 6(12): 2402-2411.
- [28] Valley G C. A review of stimulated Brillouin scattering excited with a broad-band pump laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1986, 22(5): 704-712.
- [29] Ziming G, Zhiwei L, Dianyang L. The research and development of the stimulated Brillouin scattering in the optical component[J]. *Laser Technology*, 2002, 26(5): 375-378.
- [30] Faris G W, Jusinski L E, Hickman A P. High-resolution stimulated Brillouin gain spectroscopy in glasses and crystals[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1993, 10(4): 587-599.
- [31] Dixit S N. Numerical modeling of suppression of stimulated Brillouin scattering due to finite laser bandwidth[C]// Proc of SPIE. 1992, 1626: 254-265.
- [32] Sarah M, Luc B, Stefan S. Controlling the stimulated Brillouin scattering of self-focusing nanosecond laser pulses in silica glasses[J]. *Physical Review A*, 2011, 83: 063829.
- [33] Ge Ziming, Lü Zhiwei, Cai Junwei, et al. The damage of the optical components induced by the stimulated Brillouin scattering[J]. *Chinese Physics*, 2006, 15(10): 2343-2346.
- [34] Thompson C E, Browning D F, Padilla E H, et al. "Fail-safe" system for suppressing stimulated Brillouin scattering in large optics on the Nova laser[R]. UCRL-JC-107974, 1992.
- [35] Joiner J, Bhartia P K, Cebula R P. Rotational Raman scattering (Ring effect) in satellite backscatter ultraviolet measurements[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(21): 4513-4525.
- [36] Hennesian M, Swift C D, Murray J R. Summary of stimulated Raman scattering experiments in the Nova air-path and projected Nova and Nova II system performance limits[R]. UCRL-TR-23411, 2007.
- [37] Lin Y, Kessler T J, Lawrence G N. Raman scattering in air: four-dimensional analysis[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(21): 4781-4791.
- [38] Thiell G, Grailot H, Joly P, et al. Laser physics studies with Phebus as part of the megajoule laser project[J]. *Fusion Engineering & Design*, 1999, 44(1/4): 157-162.

- [39] Deng X W, Wang F, Jia H T, et al. Temporal, spectral and spatial characterization of high-energy laser pulse with small bandwidth propagating through long path[J]. Chinese Physics Letters, 2012, 29: 124211.
- [40] Wang J, Zhang X M, Han W, et al. Experimental observation of near-field deterioration induced by stimulated rotational Raman scattering in long air paths[J]. Chinese Physics Letters, 2011, 28: 084211.
- [41] Manes K R, Spaeth M L, Adams J J, et al. Damage mechanisms avoided or managed for NIF large optics[J]. Fusion Science and Technology, 2016, 69(1): 146-249.
- [42] Raymer M G, Mostowski J, Carlsten J L. Theory of stimulated Raman scattering with broad-band lasers[J]. Physical Review A, 1979, 19(6): 2304-2316.
- [43] Georges A T. Theory of stimulated Raman scattering in a chaotic incoherent pump field[J]. Optics Communications, 1982, 41(1): 61-66.
- [44] Raymer M G, Mostowski J. Stimulated Raman scattering: Unified treatment of spontaneous initiation and spatial propagation[J]. Physical Review A, 1981, 24(4): 1980-1993.
- [45] Barker C E, Sacks R A, Wouterghem B M V, et al. Transverse stimulated Raman scattering in KDP[C]//Proc of SPIE.1995, 2633: 501.
- [46] Demos S G, Raman R N, Negres R A. Estimation of the transverse stimulated Raman scattering gain coefficient in KDP and DKDP at $2-\omega$, $3-\omega$, and $4-\omega$ [C]//Proc of SPIE. 2015: 81900S.
- [47] Demos S G, Raman R N, Yang S T, et al. Measurement of the Raman scattering cross section of the breathing mode in KDP and DKDP crystals[J]. Optics Express, 2011, 19: 21050.
- [48] Novikov V N, Belkov S A, Buiko S A, et al. Transverse SRS in KDP and KD*P crystals[C]//Proc of SPIE. 1999, 3492: 1009-1018.
- [49] Han W, Wang F, Zhou L, et al. Suppression of transverse stimulated Raman scattering with laser-induced damage array in a large-aperture potassium dihydrogen phosphate crystal[J]. Optics Express, 2013, 21(25): 30481-30491.
- [50] Han W, Zhou L D, Li F Q, et al. Laser-induced damage of a large-aperture potassium dihydrogen phosphate crystal due to transverse stimulated Raman scattering[J]. Laser Physics, 2013, 23: 116001.
- [51] Kaminskii A A. Laser crystals and ceramics: recent advances[J]. Laser & Photonics Reviews, 2007, 1(2): 93-177.
- [52] Fan X, Li S, Huang X, et al. Using polarization control plate to suppress transverse stimulated Raman scattering in large-aperture KDP crystal[J]. Laser and Particle Beams, 2018, 36(4): 1-4.
- [53] Suydam B R. Self-focusing of very powerful laser beams II [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1974, 10(11): 837-843.
- [54] Marburger J M. Self-focusing theory[J]. Prog Quantum Electron, 1975, 4: 35-110.
- [55] Bespalov V I, Talanov V I. Filamentary structure of light beams in nonlinear liquids[J]. JETP Lett, 1966, 3(12): 307-310.
- [56] Campillo A J, Shapiro S L, Suydam B R. Periodic breakup of optical beams due to self-focusing[J]. Applied Physics Letters, 1974, 23(11): 628-630.
- [57] Vaseva I A, Fedoruk M P, Rubenchik A M, et al. Light self-focusing in the atmosphere: thin window model[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 30697.
- [58] Wen Shuangchun, Fan Dianyuan. Filamentation instability of laser beams in nonlocal nonlinear media[J]. Chinese Physics, 2001, 10(11): 1032-1036.
- [59] Wen Shuangchun, Fan Dianyuan. Small-scale self-focusing of intense laser beams in the presence of vector effect[J]. Chinese Physics Letters, 2000, 17(10): 731-733.
- [60] Williams W, Renard P A, Manes K R, et al. Modeling of self-focusing experiments by beam propagation codes[J]. UCRL-LR-105821-96-1.
- [61] Coe S E, Afshar-Rad T, Willi O. Experimental observations of thermal whole beam self-focusing[J]. Europhysics Letters, 1990, 13(3): 251-256.
- [62] Beckwitt K, Wise F W, Qian L, et al. Compensation for self-focusing by use of cascade quadratic nonlinearity[J]. Optics Letters, 2001, 26(21): 1696-1698.
- [63] Reintjes J, Carman R L, Shimizu F. Study of self-focusing and self-phase-modulation in the picosecond-time regime[J]. Physical Review A, 1973, 8(3): 1486-1503.
- [64] Feng Zehu, Fu Xiquan, Zhang Lifu, et al. Experimental research of small-scale self-focusing of ultrashort pulse with spatial modulation[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(4): 2253-2259.
- [65] 张艳丽, 李小燕, 朱健强. 增益介质中发散光束的小尺度自聚焦[J]. 光学学报, 2009, 29(3): 786-793. (Zhang Yanli, Li Xiaoyan, Zhu Jianqiang. Small-scale self-focusing of divergent beams in gain medium[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(3): 786-793)
- [66] Jia H, Xu B, Wang F, et al. Small-scale self-focusing in a tapered optical beam[J]. Applied Optics, 2012, 51(25): 6089-6094.
- [67] 文双春, 范滇元. 非傍轴光束的小尺度自聚焦研究[J]. 物理学报, 2000, 49(3): 460-462. (Wen Shuangchun, Fan Dianyuan. Small-scale self-focusing of nonparaxial laser beams[J]. Acta Physica Sinica, 2000, 49(3): 460-462)
- [68] 顾亚龙, 朱健强. 发散光束小尺度自聚焦特性的研究[J]. 光学学报, 2006, 26(11): 1734-1738. (Gu Yalong, Zhu Jianqiang. Small-scale self-focusing of divergent beams[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(11): 1734-1738)
- [69] Parham T G, Azevedo S, Chang J, et al. Large aperture optics performance[R]. LLNL-TR-410955, 2009.
- [70] Tanaka K A, Hashimoto H, Kodama R, et al. Performance comparison of self-focusing with 1053- and 351-nm laser pulses[J]. Physical Review E, 1999, 60(3): 3283-3288.
- [71] Jia H, Zhou L, Wang F. Dark spot downstream from nonlinear hot image[J]. Applied Optics, 2012, 51: 4285-4290.
- [72] Hunt J T, Manes K R, Renard P A. Hot images from obscurations[J]. Applied Optics, 1993, 32: 5973-5982.
- [73] Wang Y W, Wen S C, Zhang L F, et al. Obscuration size dependence of hot image in laser beam through a Kerr medium slab with gain and loss[J]. Appl Opt, 2008, 47(8): 1152-1163.
- [74] Ye Z, Zhao J, Peng T, et al. Evolution of the hot image effect in high-power laser system with cascaded Kerr medium[J]. Optics & Lasers in Engineering,

- 2009, 47(11): 1199-1204.
- [75] Roth U, Loewenthal F, Tommasini R, et al. Compensation of nonlinear self-focusing in high-power lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(6): 687-691.
- [76] Hunt J T, Glaze J A, Simmons W W, et al. Suppression of self-focusing through low-pass spatial filtering and relay imaging[J]. Applied Optics, 1978, 17(13): 2053-2057.
- [77] Jokipii J R. Homogeneity requirements for minimizing self-focusing damage by strong electromagnetic waves[J]. Applied Physics Letters, 1973, 23(12): 696-698.
- [78] Williams W, Trenholme J, Orth C, et al. NIF design optimization[R]. UCRL-LR-105821-96-4, 1996.
- [79] Murray J, Sacks R, Auerbach J, et al. Laser requirements and performance[R]. UCRL-LR-105821-97-3, 1996.
- [80] Spaeth M, Henesian M. Simulations of 3ω beam filamentation in the beamlet focus lens and general comments on filamentation theory[R]. LLNL-TR-661757.
- [81] 黄晚晴, 张颖, 孙喜博, 等. 高功率固体激光装置的B积分判据探究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56: 121403. (Huang Wanqing, Zhang Ying, Sun Xibo, et al. B-integral criteria for high power solid-state laser facility[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56: 121403)
- [82] Li D, Zhao J L, Peng T, et al. Theoretical analysis of the image with a local intensity minimum during hot image formation in high-power laser systems[J]. Applied Optics, 2009, 48(32): 6229-6233.
- [83] 周丽丹, 粟敬钦, 李平, 等. 高功率固体激光装置光学元件"缺陷"分布与光束近场质量的定量关系研究[J]. 物理学报, 2011, 60: 024202. (Zhou Lidan, Su Jingqin, Li Ping, et al. Quantitative relation between "defects" distribution on optics and near-field quality in high power solid-state laser system[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60: 024202)
- [84] Lawson J K, Auerbach J M, English R E, et al. NIF optical specifications: the importance of the RMS gradient[C]//Proc of SPIE. 1999, 3492: 336-344.
- [85] Campbell J H, Hawley-Fedder R A, Stolz C J, et al. NIF optical materials and fabrication technologies: An overview[C]//Proc of SPIE. 2004, 5341: 84-102.
- [86] 温磊, 陈林, 陈伟, 等. 大口径N41型激光钽玻璃的小信号增益[J]. 光学精密工程, 2016, 24(12): 2925-2930. (Wen Lei, Chen Lin, Chen Wei, et al. Small signal gain of glass N41 in large aperture Nd: laser[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(12): 2925-2930)
- [87] Ravizza F L, Nostrand M C, Kegelmeyer L M, et al. Process for rapid detection of fratricidal defects on optics using linescan phase differential imaging[R]. LLNL-PROC-420837, 2009.
- [88] 李平, 韩伟, 王伟, 等. 关联"热像"特性的缺陷带通成像检测技术[J]. 光学学报, 2017, 37: 0914004. (Li Ping, Han Wei, Wang Wei, et al. Defect inspection by band-pass imaging related to hot image property[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37: 0914004)
- [89] Adams J J, Arnold P A, Wegner P J, et al. Description of the NIF Laser[J]. Fusion Science & Technology, 2016, 69(1): 25-145.
- [90] 马腾才. 等离子体物理原理[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1988. (Ma Tengcai. Principles of plasma physics[M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 1988)
- [91] 杨冬, 李志超, 李三伟, 等. 间接驱动惯性约束聚变中的激光等离子体不稳定性[J]. 中国科学, 2018, 48: 065203. (Yang Dong, Li Zhichao, Li Sanwei, et al. Laser plasma instability in indirect-drive inertial confinement fusion[J]. Scientia Sinica, 2018, 48: 065203)
- [92] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility[J]. Physics of Plasmas, 2004, 11(2): 339-491.
- [93] Lindl J, Landen O, Edwards J, et al. Review of the National Ignition Campaign 2009-2012[J]. Physics of Plasmas, 2014, 21(2): 339-566.
- [94] Moody J D, MacGowan B J, Rothenberg J E, et al. Backscatter reduction using combined spatial, temporal, and polarization beam smoothing in a long-scale-length laser plasma[J]. Physical Review Letters, 2001, 86: 2810-2813.
- [95] Kato Y, Mima K, Miyanaga N, et al. Random phasing of high-power lasers for uniform target acceleration and plasma-instability suppression[J]. Physical Review Letters, 1984, 53(11): 1057-1060.
- [96] 肖峻, 吕百达. 用零相关相位板匀滑散斑的理论研究[J]. 光学学报, 2000, 20(10): 1341-1346. (Xiao Jun, Lv Baida. Theoretic study of smoothing speckles using zero-correlation phase plate[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(10): 1341-1346)
- [97] Lehmberg R H, Rothenberg J E. Comparison of optical beam smoothing techniques for inertial confinement fusion and improvement of smoothing by the use of zero-correlation masks[J]. Journal of Applied Physics, 2000, 87(3): 1012-1022.
- [98] Dixit S N, Lawson J K, Manes K R, et al. Kinoform phase plates for focal plane irradiance profile control[J]. Optics Letters, 1994, 19(6): 417-419.
- [99] Lin Y, Kessler T J, Lawrence G N. Distributed phase plates for super-Gaussian focal-plane irradiance profiles[J]. Optics Letters, 1995, 20(7): 764-766.
- [100] Yang C, Zhang R, Xu Q, et al. Continuous phase plate for laser beam smoothing[J]. Applied Optics, 2008, 47(10): 1465-1469.
- [101] Lin Y, Kessler T J, Lawrence G N. Design of continuous surface-relief phase plates by surface-based simulated annealing to achieve control of focal-plane irradiance[J]. Optics Letters, 1996, 21(20): 1703-1705.
- [102] Li Ping, Jin Sai, Zhao Runchang, et al. The special shaped laser spot for driving indirect-drive hohlraum with multi-beam incidence[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2017, 5(3): 49-54.
- [103] 李平, 马驰, 粟敬钦, 等. 基于焦斑空间频谱控制的连续相位板设计[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(7): 1114-1118. (Li Ping, Ma Chi, Su Jingqin, et al. Design of continuous phase plates for controlling spatial spectrum of focal spot[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(7): 1114-1118)
- [104] 李平, 贾怀庭, 王芳, 等. 神光Ⅲ原型装置中连续相位板的应用位置分析[J]. 中国激光, 2009, 36(2): 318-323. (Li Ping, Jia Huaiting, Wang Fang, et al. Analysis of continuous phase plates applying position for TIL facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(2): 318-323)
- [105] Moody J D, Baldis H A, Montgomery D S, et al. Beam smoothing effects on the stimulated Brillouin scattering (SBS) instability in Nova exploding foil

- plasmas[J]. *Physics of Plasmas*, 1995, 2(11): 4285-4296.
- [106] Lehmborg R H, Obenschain S P. Use of induced spatial incoherence for uniform illumination of laser fusion targets[J]. *Optics Communications*, 1983, 46(1): 27-31.
- [107] Schmitt A J, Gardner J H. Illumination uniformity of laser-fusion pellets using induced spatial incoherence[J]. *Journal of Applied Physics*, 1986, 60(1): 6-13.
- [108] Obenschain S P, Grun J, Herbst M J, et al. Laser-target interaction with induced spatial incoherence[J]. *Physical Review Letters*, 1986, 56(26): 2807-2810.
- [109] Skupsky S, Short R W, Kessler T, et al. Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency modulated light[J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 66(8): 3456-3462.
- [110] Zhang R, Su J, Wang J, et al. Experimental research on the influences of smoothing by spectral dispersion on the Technical Integration Line[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(5): 687-695.
- [111] Regan S P, Marozas J A, Craxton R S, et al. Performance of 1-THz-bandwidth, two-dimensional smoothing by spectral dispersion and polarization smoothing of high-power, solid-state laser beams[J]. *Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics*, 2005, 22(5): 998-1002.
- [112] Zhang Rui, Su Jingqin, Yuan Haoyu, et al. Research of beam conditioning technologies on SG-III laser facility[C]//Proc of SPIE. 2014: 92930E.
- [113] Hohenberger M, Shvydky A, Marozas J A, et al. Optical smoothing of laser imprinting in planar-target experiments on OMEGA EP using multi-FM 1-D smoothing by spectral dispersion[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23: 092702.
- [114] Joshua E R. Two-dimensional beam smoothing by spectral dispersion for direct-drive inertial confinement fusion[C]//Proc of SPIE. 1995, 2633: 634-644.
- [115] Miyaji G, Miyana N, Urushihara S, et al. Three-directional spectral dispersion for smoothing of a laser irradiance profile[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(9): 725-727.
- [116] Zhang R, Zhang X, Sui Z, et al. Research on beam smoothing characteristics using linearly modulated light[J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(8): 1018-1024.
- [117] 李平, 粟敬钦, 马驰, 等. 光谱色散匀滑对聚焦光强频谱的影响[J]. *物理学报*, 2009, 58(9): 6210-6215. (Li Ping, Su Jingqin, Ma Chi, et al. Effect of smoothing by spectral dispersion on the spatial spectrum of focal spot[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(9): 6210-6215)
- [118] 郑天然, 张颖, 耿远超, 等. 基于集束多频调制的光谱色散匀滑技术[J]. *中国激光*, 2017, 44: 1205003. (Zheng Tianran, Zhang Ying, Geng Yuanchao, et al. Smoothing by spectral dispersion technology based on bundle multiple-frequency modulation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44: 1205003)
- [119] 王健, 钟哲强, 张彬, 等. 基于复合型光栅组合的多色集束匀滑方案[J]. *光学学报*, 2018, 38: 0814001. (Wang Jian, Zhong Zheqiang, Zhang Bin, et al. Beam smoothing scheme for multi-color laser quad based on a combination of hybrid gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38: 0814001)
- [120] 钟哲强, 周冰洁, 叶荣, 等. 多频多色光谱角色散束匀滑新方案[J]. *物理学报*, 2014, 63: 035201. (Zhong Zheqiang, Zhou Bingjie, Ye Rong, et al. A novel scheme of beam smoothing using multi-central frequency and multi-color smoothing by spectral dispersion[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 035201)
- [121] 刘兰琴, 张颖, 耿远超, 等. 小宽带光谱色散匀滑光束传输特性研究[J]. *物理学报*, 2014, 63: 164201. (Liu Lanqin, Zhang Ying, Geng Yuanchao, et al. Propagation characteristics of small-bandwidth pulsed beams with smoothing by spectral dispersion in high power laser system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 164201)
- [122] Hocquet S, Penninckx D, Gleyze J F, et al. Nonsinusoidal phase modulations for high-power laser performance control: stimulated Brillouin scattering and FM-to-AM conversion[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(7): 1104-1115.
- [123] Short R W, Skupsky S. Frequency conversion of broad-bandwidth laser light[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1990, 26(3): 580-588.
- [124] Tsubakimoto K, Nakatsuka M, Nakano H, et al. Suppression of interference speckles produced by a random phase plate, using a polarization control plate[J]. *Optics Communications*, 1992, 91(1/2): 9-12.
- [125] Boehly T R, Smalyuk V A, Meyerhofer D D, et al. Reduction of laser imprinting using polarization smoothing on a solid-state fusion laser[J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 85(7): 3444-3447.
- [126] Rothenberg J E. Polarization beam smoothing for inertial confinement fusion[J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 87(8): 3654-3662.
- [127] Froula D H, Divol L, Berger R L, et al. Direct measurements of an increased threshold for stimulated Brillouin scattering with polarization smoothing in ignition hohlraum plasmas[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(11): 100-103.
- [128] Collins T J B, Marozas J A, Anderson K S, et al. A polar-drive-ignition design for the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2012, 19(5): 2841.
- [129] 李平, 王伟, 赵润昌, 等. 基于聚焦空间频率全域优化的偏振匀滑设计[J]. *物理学报*, 2014, 63: 215202. (Li Ping, Wang Wei, Zhao Runchang, et al. Polarization smoothing design for improving the whole spatial frequency at focal spot[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 215202)
- [130] Liu Z J, Zheng C Y, Cao L H, et al. Decreasing Brillouin and Raman scattering by alternating-polarization light[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24: 032701.