

# 等离子体光学的研究现状与发展前景\*

李 平, 张 君, 魏晓峰

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 等离子体介质由于具有极高的储能密度、无光致损伤阈值和丰富的光学特性, 利用它改善光束输出性能是发展高功率激光技术的一条重要技术路线。系统介绍了近年来等离子体光学的研究现状, 并论述了今后等离子体光学的发展趋势。

**关键词:** 高功率激光; 等离子体光学; 等离子体放大; 等离子体光子晶体

中图分类号: O532<sup>·</sup>13

文献标志码: A

doi: 10.11884/hplpb202032.190466

## Plasma optics technologies: State of the art and future perspective

Li Ping, Zhang Jun, Wei Xiaofeng

(Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Plasma optics is an important way for the development of high power laser technology because plasma medium has high energy storage density, no laser-induced damage threshold and rich optical properties. The research status of plasma optics in recent years is introduced, and the development trend of plasma optics in the future is discussed.

**Key words:** high power lasers; plasma optics; plasma amplification; plasma photonic crystal

在激光惯性约束聚变(ICF)研究<sup>[1-3]</sup>的推动下, 依赖固体光学材料(钨玻璃、K9 玻璃、非线性晶体、熔石英等)的发展<sup>[4]</sup>, 高功率激光技术在近几十年得到了飞速发展<sup>[5]</sup>, 诞生了以实现 ICF 为目标的兆焦耳纳秒脉冲和以强场物理研究为目标的超强超短脉冲等近乎极限的大型激光装置<sup>[6-8]</sup>, 如美国国家点火装置(NIF)<sup>[9]</sup>、中国星光-III 激光装置<sup>[5]</sup>。2012 年美国点火攻关(NIC)计划受挫<sup>[10]</sup>, 美国能源部核安全委员会在《2015 惯性约束聚变与高能密度科学评估》中指出, 除非出现重大技术突破, 否则 NIF 目前输出性能无法实现点火, 而提升激光装置输出能力和调控性能可大幅提升点火的概率<sup>[11]</sup>, 这对未来激光装置的研制提出了巨大挑战。受固体介质储能密度和损伤阈值的限制, 现阶段高功率激光技术的发展出现了功率受限、负载受限和光束调控受限等多方面约束<sup>[12]</sup>, 迫切需要在技术上开辟新途径, 以满足高功率激光科学发展与应用的需求。

等离子体密度跨度达 30 个量级, 温度跨度 7 个量级, 如图 1 所示, 这种巨大的跨度使得它与激光相互作用中蕴含了非常丰富的物理效应<sup>[13]</sup>, 挖掘这些物理效应并利用它改善光束性能是突破高功率固体激光技术的一条重要研究路线。与传统固体介质相比, 等离子体介质具有多项显著的优点, 首先它无光致损伤阈值, 可在激光装置任何位置使用; 其次等离子体作为一种动态演化的流体介质, 在动态光束调控方面有巨大的价值; 第三, 等离子体有着优良的导热、导电等性能, 在激光光电器件方面有一定的应用价值。如何用等离子体介质提升高功率激光的输出性能已经发展成了独立的学科——等离子体光学。本文系统介绍了近年来等离子体光学研究的进展, 并论述了其发展趋势。

### 1 等离子体光学的内涵简述

等离子体光学是指基于等离子体光学元器件, 产生以及操控高功率激光脉冲, 支撑高功率激光科学的发展与应用。等离子体光学的研究内涵包含三方面。

首先, 研究等离子体的光学性质, 建立可定量描述的物理模型。激光与物质相互作用, 物质的性质主要通过介电常数(relative electric permittivity  $\epsilon$ )和磁导率(relative magnetic permeability  $\mu$ )等参数影响光束传输特性。固体光学

\* 收稿日期: 2019-11-16; 修订日期: 2019-12-25

基金项目: 中国工程物理研究院院长基金项目(YZ1602); 国家自然科学基金项目(11404306)

作者简介: 李 平(1984—), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要从事高功率激光装置光束调控及等离子体光学技术研究; liping1984@caep.cn。

材料 $\varepsilon > 1$ ,  $\mu > 0$ , 如图 2 所示, 而等离子体的介电常数为<sup>[13]</sup>

$$\varepsilon_p = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2(1 + j\nu_m/\omega)} = 1 - \frac{e^2 n_e}{\varepsilon_0 m_e \omega^2(1 + j\nu_m/\omega)} \quad (1)$$

式(1)反映了等离子体介质中的一般规律: 电子密度( $n_e$ )决定了折射率, 碰撞频率( $\nu_m$ )决定了等离子体的吸收; 因此针对特定频率的光束, 选择不同的等离子体的参数(电子密度、压强和温度), 可主动设计等离子体的介电常数。基于介电常数和磁导率的差异可将等离子体分为三种类型, 如图 2 所示。 $(\omega > \omega_{pe}, \mu > 0)$ 的区域为常规等离子体, 激光可以在介质内传输, 等离子体的折射率介于(0, 1)之间, 该区域的等离子体介质特性与固体介质最相近, 且有更丰富的物理特性, 包括导电性、动态特性、频率色散特性、磁效应、偏振色散特性、非线性特性、透光性等, 是本文所界定等离子体光学范畴的主体; $(\omega < \omega_{pe}, \mu > 0)$ 的区域为等离子体激元材料<sup>[14]</sup>, 它一般存在于金属表面, 光场在界面的法线方向表现为消逝波, 因此只能约束在金属/介质界面传输, 且光束波长比相邻介质中的光波短, 该特性为微纳尺度上约束光场、调控光场提供了强大的手段, 使其在纳米光子学方面展现了巨大的应用潜力, 并形成了研究热点——表面等离子体激元; $(\mu < 0)$ 的区域是一种特殊的等离子体<sup>[15]</sup>, 需特别设计而构建, 由 $n = \sqrt{\varepsilon} \sqrt{\mu}$ 可知, 此等离子体中 $\varepsilon$ 的实部和虚部发生反转, 它表明传统消逝波的光束可在此等离子体内传输, 且波前和能量传输方向相反, 此等离子体还可实现超大折射率和可控吸收等特殊性能, 同样有着很广阔的前景。

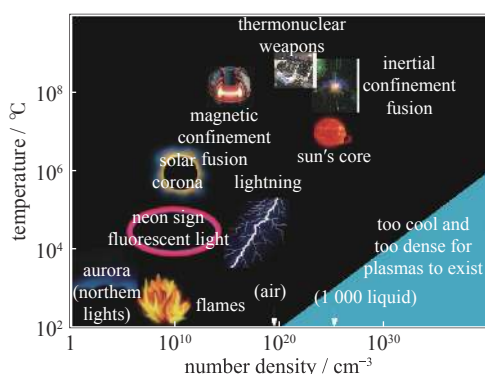


Fig. 1 Temperature and density range of typical plasma

图 1 典型等离子体的温度与密度区间

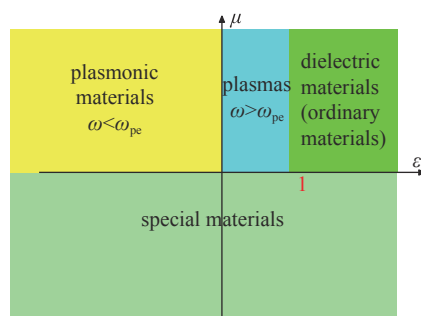


Fig. 2 Area division of distribution of permittivity and permeability of materials

图 2 材料介电常数和磁导率的区域分布

其次, 需利用等离子体光学性质的特点构建光学应用的物理图像, 结合需求牵引探索等离子体光学器件的应用。目前已构建光学应用的物理图像, 包含利用等离子体的导电性和透光性提出了等离子体电极光电光开关<sup>[16]</sup>; 利用频率色散特性(临界等离子密度的概念)提出了等离子体镜, 用于提升超短脉冲的信噪比<sup>[17]</sup>; 利用等离子体在界面处的色散和吸收特性, 提出了表面等离子体激元, 可作为等离子体波导实现光束传输<sup>[18]</sup>; 利用等离子体的非线性效应, 提出了基于等离子体介质的高阶谐波<sup>[19]</sup>; 利用等离子体中的受激拉曼散射, 提出了超短脉冲的背向拉曼放大技术<sup>[20]</sup>; 利用光束驻波诱发的等离子体创造周期性准中性的密度分布, 提出了可用来操作高能量、高强度飞秒脉冲的等离子体布拉格光栅<sup>[21]</sup>等, 它们已经在激光领域上得到了重要发展, 并基于应用方向的不同, 在电光开关、激光放大、光束调控等多方面实现了等离子体光学的应用, 极大地丰富了激光技术体系。

## 2 基于等离子体光学的应用研究进展

### 2.1 等离子体电极电光开关

电光开关是激光领域一项必不可少的单元技术, 在激光控制方面发挥了极为重要作用。例如在调 Q 激光器中, 它被用作抑制自发辐射的自激振荡, 从而获得调 Q 激光脉冲<sup>[22]</sup>; 在再生放大器中, 通过开关的时序控制实现注入脉冲锁定和导出<sup>[23]</sup>; 另外, 电光开关还被广泛地用于脉冲切片以及脉冲选单等。

在大型高功率激光装置中, 电光开关被用作自激振荡抑制、多程放大控制以及反激光隔离等<sup>[24-25]</sup>。由于光学元件光致损伤阈值的限制, 需扩大通光口径以降低激光功率密度。如用于 ICF 研究的大型激光装置, 光束口径达到数百 mm。这就要求电光开关能够定标到大口径, 并具有高损伤阈值以及 ns 量级的响应速度。目前, 只有等离子体光电光开关(PEPC)技术才能同时满足上述需求。PEPC 的概念于 20 世纪 80 年代由 Goldhar 等人提出, 在迅速发展后已广泛应用于高功率激光装置中<sup>[16]</sup>。它采用光学透明的等离子体作为施加开关电压脉冲的电极, 使用纵向电场激励的方式, 从而其半波电压与通光口径和晶体厚度无关, 因此可以定标到大口径。

PEPC的基本结构由两个放电腔夹着一块电光晶体组成,如图3所示。其工作过程为:开关电压脉冲传输至放电电极,随着电压的增加,放电腔内惰性气体电离形成充满通光口径的等离子体;然后开关电压脉冲通过等离子体电极将电光晶体充电至半波电压;极化的电光晶体使得激光脉冲偏振方向旋转 $90^\circ$ ,配合检偏器即可实现光开关的功能。等离子体密度约为 $10^{12}\text{ cm}^{-3}$ ,具有横向分布均匀、电导率高、无光致损伤阈值等优良特性,可很好满足通光口径内光学特性均匀、快响应以及高阈值要求<sup>[26]</sup>。等离子体作为电极介质,完美地匹配了光开关的功能要求:等离子体透过率取决于等离子体密度,稀薄等离子体可实现较高透过率,可实现开关效率超过99.5%;介质阻挡、低气压下放电可获得良好的静电场分布,可实现横向均匀的光学需求;等离子体电极电导率取决于等离子体密度,达到额定电导率的时间远小于电路形成电压的时间,可实现开关ns级的响应速度。

随着高功率激光技术的发展,PEPC在应用上也提出了新的优化方向。针对大型激光装置低损耗的需求,中物院张君等人提出了可变分压驱动的等离子体电极电光开关技术,解决了等离子体稳定放电所需电压与DKDP晶体低的半波电压之间矛盾,如图4所示,研制成功了低损耗等离子体电极电光开关<sup>[27]</sup>,保障了高功率激光装置在功率受限和能量受限的双重约束下输出能力的进一步提升。

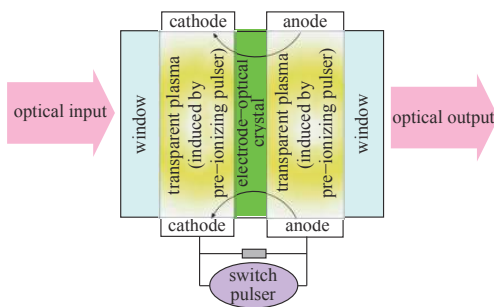


Fig. 3 Schematic diagram of PEPC

图3 等离子体光电开关(PEPC)原理示意图

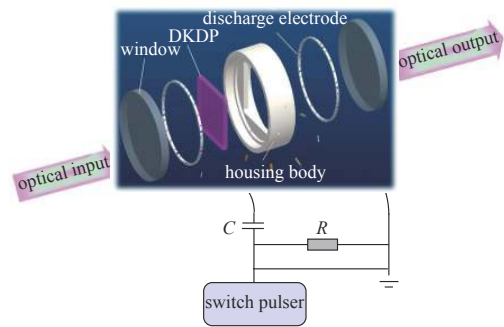


Fig. 4 Schematic diagram of low loss PEPC based on DKDP crystal

图4 基于DKDP晶体的低损耗PEPC的原理示意图

针对重频运转的大口径电光开关需求,中物院张君等人创新性地提出了混合电极电光开关技术。如图5所示,该开关采用反射式设计,入射侧为等离子体电极、背侧为金膜电极,纵向应用、纵向传导冷却,口径可定标放大、可承受 $35\text{ W/cm}^2$ 的激光平均功率密度<sup>[28-29]</sup>,为提升大型激光装置的重复频率提供了支撑。

## 2.2 等离子体放大技术研究进展

20世纪80年代中期发展起来的啁啾脉冲放大(CPA)技术是超短脉冲激光技术的里程碑<sup>[30]</sup>,基于该技术的研究与应用,超短脉冲激光装置得到了迅速发展并在世界范围内诞生了多个PW激光装置<sup>[31]</sup>,推动了诸如电子加速、质子照相等多个前沿领域的发展<sup>[20]</sup>。随着利用超高超强激光研究量子电动力学、激光核物理、实验室天体物理等概念的提出,超短脉冲激光的输出需求达到了EW量级,但由于晶体材料、口径和光栅阈值等方面的限制,基于CPA构型的超短脉冲激光装置的输出能力基本限制在PW量级,相干组束的方式虽然能继续提升激光功率,但工程控制难度极大。等离子体介质由于无光致损伤阈值、高储能密度等特点,可作为激光介质实现超功率的激光脉冲放大<sup>[32-33]</sup>。其基本原理如图6所示,泵浦光作为一种电磁波进入等离子体中,引起电子/离子密度的扰动,在微观上体现为电子/离子的横向运动,并通过等离子体的电子/离子声波与种子光发生三波耦合,实现泵浦光向信号光的能量转移。基于电子声波的三波耦合过程称为受激拉曼散射(SRS)放大,其特点是泵浦光与散射光(信号光)的频差大,等离子体密度和温度影响大,散射光发散角度大;基于离子声波的三波耦合过程称为受激布里渊(SBS)放大,其特点是泵浦光与散射光频差小,等离子体材料和泵浦光强度对散射光的影响较大。

1999年普林斯顿(Princeton)大学的Malkin等人深入研究了等离子体放大的过程,指出了等离子体放大机制可分为线性和非线性两种,在线性机制中,整个种子脉冲被线性放大,种子脉冲由于线性不稳定性被展宽;在非线性的机制中,种子光后沿由于泵浦耗尽可同时实现脉冲压缩。理论计算表明SRS放大速度较快,可同时达到“脉冲压缩”的功能,它允许激光在成丝不稳定性发展起来以前完成压缩和放大,并由此提出了非线性泵浦耗尽机制下的等离子体后向拉曼散射放大技术(BRA)<sup>[32]</sup>,模拟计算表明,在优化设计等离子体的温度、密度和口径等参数下,BRA的理论转换效率可达90%。该技术自提出以来便认为可以作为下一代EW级短脉冲激光装置的技术路线,获得了各国学者的广泛关注。

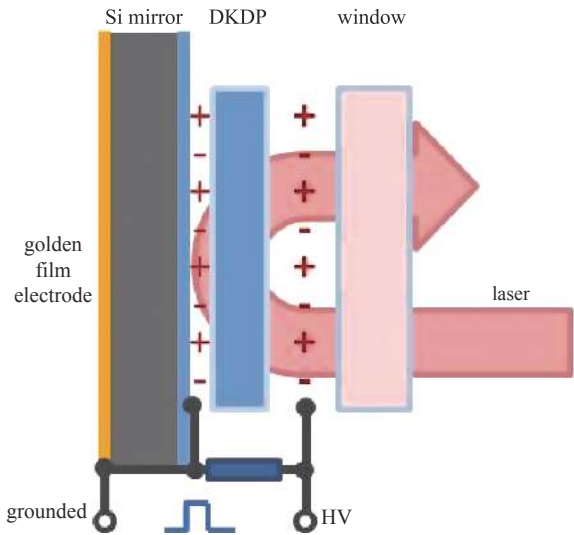


Fig. 5 Design diagram of reflective PEPC  
图 5 反射式 PEPC 的设计示意图

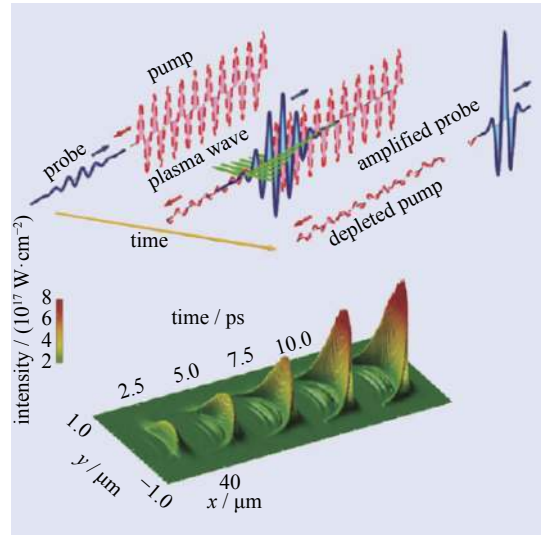


Fig. 6 Basic principle of laser amplification based on plasma medium  
图 6 基于等离子体介质实现激光放大的基本原理

包括普林斯顿大学在内,美国的利弗摩尔实验室(LLNL)、英国卢瑟福实验室(RAL)、俄罗斯的应用物理研究所(IAP)、中国台湾的原子分子科学研究所(IAMS)和中国工程物理研究院(CAEP)等大量实验室均进行了基于等离子体放大的理论或实验方面的研究,已经在实验上确认了 BRA 机理的可行性,获得了超过  $10^4$  的放大增益,放大的激光强度可达  $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup>,但能量转换效率均未突破 10%,远低于理论预期,未达到泵浦耗尽的目标。近些年,相关学者从等离子体中的激光非线性效应和动力学过程中去探索可能的原因,譬如自相位调制、等离子体波破、朗道阻尼、粒子俘获等 BRA 的影响,也尝试研究了基于 SBS 机制的短脉冲放大,获得了大量有意义的结论,大大推进了等离子体放大技术的发展,但整体而言,目前国际上该领域的研究尚处于起步阶段,理论上介于流体机制和动力学机制之间的等离子体的状态没有相应的模型描述,实验上标志性的泵浦耗尽机制也还没有实现<sup>[34-41]</sup>。

在纳秒脉冲的高功率激光系统中,单束激光能量的提升在先进 X 光源、极端密度物理等方面的研究中有重要需求,但受限于固体光学元件损伤阈值的限制,输出能力已趋于极限。利用三波耦合作用机制,等离子体介质可实现交叉光束的能量转移(CBET),它有望将多束激光合并成一束激光来提升单束激光输出能力。但由于等离子体很难精密控制,它与激光作用的实际效果一般是直接产生多种不稳定性将激光能量随机散射掉。在深入认识激光等离子体作用的物理规律下,2017年,LLNL 实验室 Kirkwood 等人在 NIF 装置上基于气袋靶产生的等离子体介质,通过精确控制泵浦光束和信号光束的参数以满足 CBET 的条件,完成了 8 束激光合一的演示实验,实验产生了一超级光束,它是目前世界上最大单束输出能量的 4 倍。

实验较好地控制了等离子体中的光学不稳定性并按照所设想的物理过程进行,如图 7 所示,以基准脉冲(绿色)作为强度参考,信号光(红色)在通过特殊设计的充气靶后,泵浦光束(黄色)将能量按照预先设计有效地传递给了信号光<sup>[42-44]</sup>。LLNL 研究团队在该实验的基础上提出了超级脉冲计划,并开展了基于超级脉冲的多种物理实

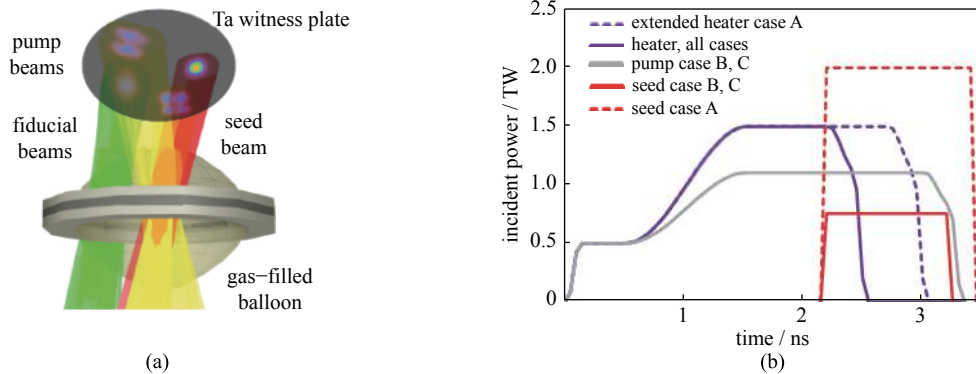


Fig. 7 (a) The gas-filled balloon target is used to create a uniform plasma to amplify a single seed beam (red) by combination of eight pumping beams (yellow), (b) the incident power of all the beams

图 7 (a) 基于气袋靶形成均匀等离子体并通过 8 束泵浦光(黄色)的 CBET 效应实现对种子光(红色)的放大, (b) 实验中各光束的输入功率

验研究设想的探索。该技术对高能激光跨越式的发展奠定了基础。

### 2.3 等离子体调控光束研究进展

基于固体介质发展起来的传统光束调控技术由于光致损伤阈值的限制,一般只能应用于高功率激光装置的前级,在光束传输放大等物理过程约束下,末级可输出的调控性能有限。等离子体介质较好地克服了固体介质在光束调控方面的弊端,近年来已提出并发展了包含反射镜、偏振器件、光调制器及光栅等多种等离子体光学器件,并逐渐在高功率激光装置上形成了应用。

#### 2.3.1 等离子体镜技术及其研究进展

等离子体镜是基于等离子体的频率色散特性而提出的,当足够强的脉冲照射在透明光学介质材料的表面上时,激光脉冲前沿会在透明光学介质材料表面产生多光子电离,形成高密度等离子体。等离子体的密度分布决定了其反射率,反射率可从较低值到1之间动态变化,从而构建多种调控光束的应用。

1993年LLNL实验室S. Backus和Gold等人提出了利用等离子体镜提升超短脉冲对比度的技术<sup>[17]</sup>,它通过合适地选择激光强度和介质材料,使得预脉冲强度低于介质材料的电离阈值,主脉冲前沿形成致密等离子体实现较高的反射率,从而提高超短脉冲激光的对比度。1994年Gold等人立即开展了提升脉冲信噪比的实验,脉冲对比度提升了500倍,展示了该技术的巨大潜力<sup>[45]</sup>。此后十年间,各研究机构全面开展了等离子体镜的技术研究,测量了不同入射角下的反射率变化情况,分析了等离子体共振吸收等机制对激光能量损耗的影响,等离子体膨胀对波前畸变的影响,获得了等离子体镜应用的边界条件<sup>[46-48]</sup>。2004年G. Doumy等人首次在10 TW的激光装置上实现了等离子体镜的工程应用:在保障脉冲强度和轮廓没有影响的情况下,将脉冲对比度提高了2个数量级<sup>[49]</sup>。2006年,法国激光应用(LULI)实验室T. Wittmann等人进一步扩展了等离子体镜的应用范围,他们在100 TW激光器上应用了双等离子体镜改善脉冲信噪比,两块反射镜分别用于近场和远场反射,在光束质量没有明显下降的情况下,对比度改善达到了4个量级,强度衰减仅50%<sup>[50]</sup>。2007年法国核能研究中心(CEA)实验室C. Thaury等人同样基于双等离子体镜实现了提升4个量级的信噪比的10 TW脉冲,如图8和图9所示,在提升信噪比的同时还利用等离子体产生了高次谐波,拓展了等离子体镜的用途<sup>[51-52]</sup>。

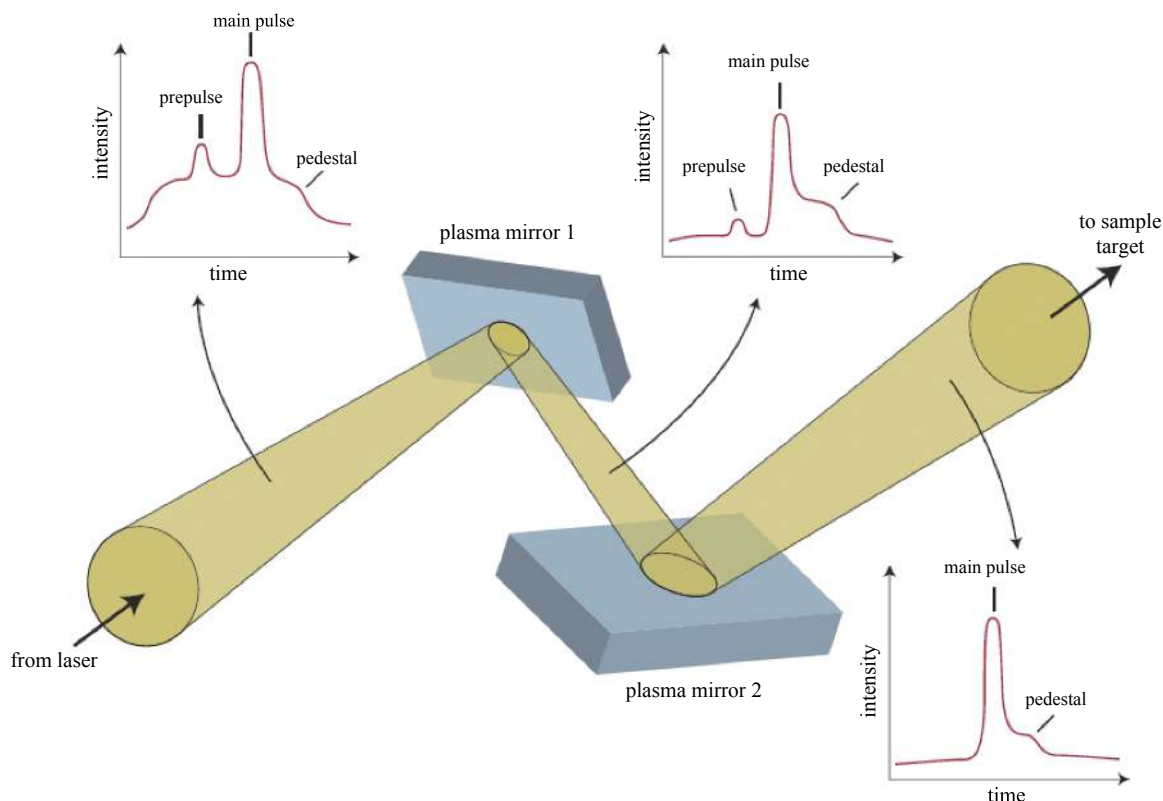


Fig. 8 Laser pulse-shape conditioning with a double plasma-mirror (DPM)

图8 双等离子体镜用于超短脉冲信噪比的提升

2010年,日本科学家M. Nakatsutsumi提出了利用等离子体镜提升光束在空间上的可聚焦能力,将平面等离子体镜拓展至曲面等离子体镜。在超峰值功率密度的物理研究中,焦斑尺寸是强场物理的重要参数,它直接影响

冲可达到的峰值功率密度,受靶室尺寸及相关光路排布的影响,激光装置的光束焦距一般不能过小,从而限制了光束的可聚焦功率密度。等离子体镜的提出为脉冲的空域控制提供了条件,利用离轴凹面镜形成的等离子体反射光束,可减小光束  $F$  数进而减小焦斑尺寸。如图 10 所示的实验设计, M. Nakatsutsumi 成功地将  $F/2.7$  的光束转换为  $F/0.4$  的光束,聚焦尺寸从  $4.4 \mu\text{m}$  减小至  $0.9 \mu\text{m}$ <sup>[53]</sup>。虽然实验中损失了一些激光能量和光束质量,但仍然获得了至少 8 倍的激光功率密度。

近年来,中国、日本、美国、法国等在多个激光装置中已经将利用等离子体镜提升脉冲信噪比和改善焦斑尺寸作为一种常规的手段,并持续探索它在高功率激光装置上的更多应用。

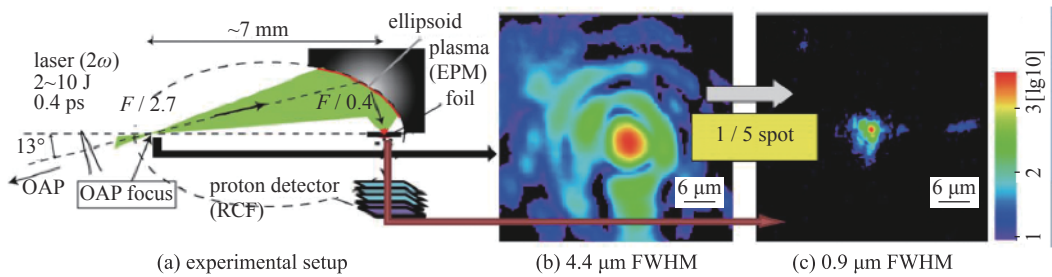


Fig. 10 (a) Experimental setup for tight focusing of ultrahigh-intensity laser pulses by low  $F$ -number confocal EPM. (b) Focal spot provided by the conventional  $F/2.7$  output. (c) Focal spot in the output of the  $F/0.4$ , images are in common logarithm scale

图 10 (a) 利用凹面等离子体镜改善光束  $F$  数的实验示意图 (b) 激光器自身输出  $F/2.7$  的光束焦斑 (c) 利用等离子体凹面镜实现  $F/0.4$  的光束焦斑

### 2.3.2 等离子体偏振器件技术及其研究进展

随着高功率激光输出能力的增强,光束偏振特性作为一种调控手段的应用需求愈发强烈。在激光聚变研究方面,人们发现随机动态偏振的束匀滑技术在改善 LPI 性能上有巨大的潜力<sup>[54-55]</sup>,在强场物理研究方面,人们发现偏振涡旋光具有稳定的角动量,它在粒子加速、超分辨成像等应用上是一种更优质光源<sup>[56-57]</sup>。但强激光中的光束偏振调控并不容易,原因在于传统调控器件的阈值限制它只能用在装置前级,极大限制了光束偏振调控性能,需要在装置末级借助无光致损伤阈值的等离子体实现光束偏振调控。

2014 年, LLNL 实验室的 P. Michel 等人深入研究光波混频在等离子体中传输中的相互作用规律,获得了新的认识:交叉光束在等离子体介质中相互作用,除会发生 CBET 外,还可引起与光束偏振相关的相移。CBET 对交叉光的频率差提出了严格的要求,而引起相移的条件则相对较为宽松,如图 11 所示,其中  $K$  是关联两混频光波的宏观参数,其虚部与 CBET 特性紧密相关,实部则体现的是泵浦光束对信号光同偏振部分提供的附加相移<sup>[58-59]</sup>,实部曲线在频差为零的中心区域变化较为平缓,反映了实现条件的相对宽松。

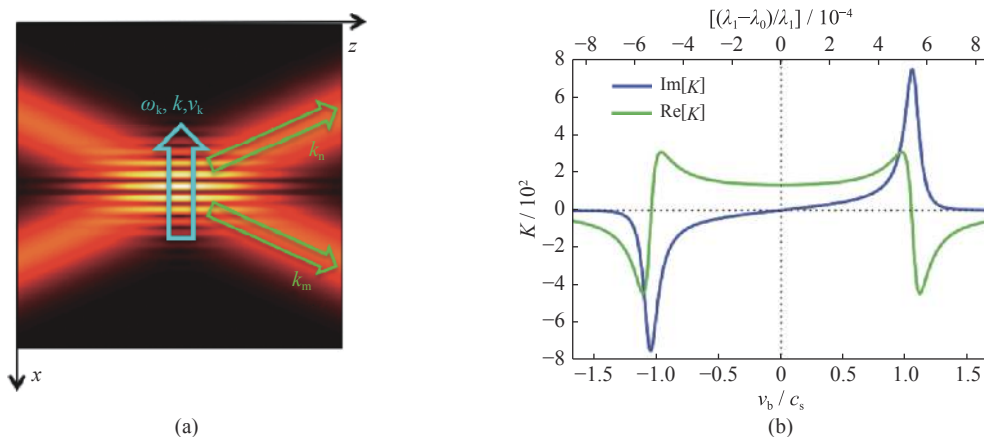


Fig. 11 (a) Schematic diagram of cross beam interaction in plasma. (b) Excitation characteristics of cross beam energy transfer and phase shift

图 11 (a) 交叉光束在等离子体中相互作用的示意图 (b) 交叉光束能量转移和相移的激发特性

P. Michel 的理论研究指出, 选择激光和等离子体参数, 可通过一束光的强度来调控另一束光的偏振态。2016 年 D. Turnbull 等人基于该思想, 提出了如图 12 所示的等离子体偏振片和等离子体波片概念设计, 并随后在激光装置上成功地进行了实验验证<sup>[60-61]</sup>。图 12(a) 是等离子体偏振片, 它利用了交叉光束在等离子体中的能量转移特性, 其选偏方向与泵浦光的偏振方向垂直, 在控制合适的光束参数下, 与选偏平行的主激光部分不受泵浦光的影响高效通过, 而与选偏垂直的主激光部分会将其能量全部转移到泵浦光, 从而实现了选偏功能。图 12(b) 是等离子体波片, 它利用了交叉光束在等离子体中的相移特性, 波片的光轴与泵浦光的偏振方向垂直, 在控制合适的光束参数下, 主激光与泵浦光无能量转移, 但偏振态与波片光轴平行的主激光会因泵浦光的存在而引入附加相移, 通过控制等离子体的长度, 可以将附加相移设计为  $\lambda/4$  或  $\lambda/2$ , 达到了  $1/4$  波片或半波片的功能。优化交叉光束的控制参数, 还可拓展等离子体偏振器件的功能, 实现更全面的光束综合控制, 譬如由于等离子体的超快响应特性, 采用具有时空调制的泵浦光可以实现具有时空分布的光束动态偏振分布, 它可在高功率密度的涡旋光束、动态偏振光束等光源的产生与调控上发挥作用。

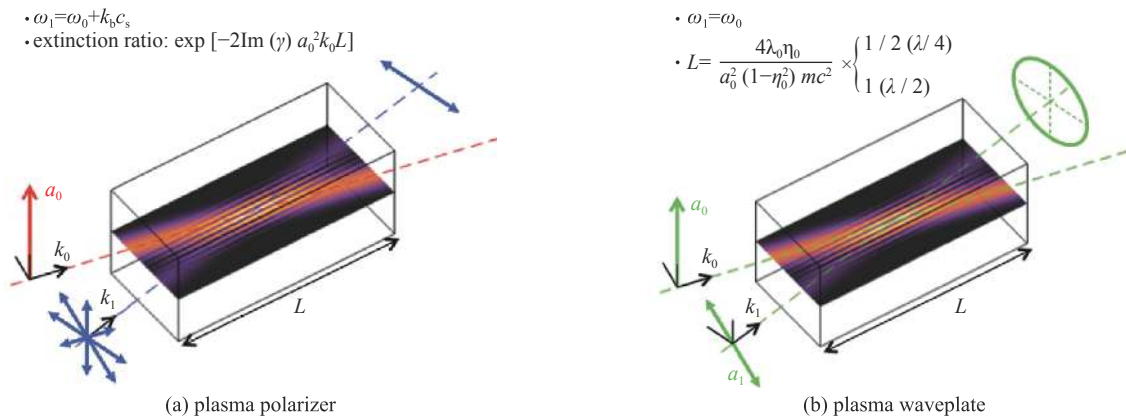


Fig. 12 Conceptual design of plasma polarizer and plasma wave plate

图 12 等离子体偏振片和等离子体波片的概念设计

磁场是一种非接触式的外驱动源, 对固体介质的影响有限, 但可显著改变等离子体的光学特性。等离子体的介电常数在磁场作用下将从标量变为张量, 使左旋和右旋偏振光在磁化等离子体中的色散方程发生变化, 即展现了不同的相速度; 进一步, 2017 年上海交通大学翁苏明等人还发现了强磁化等离子体中存在极端法拉第效应<sup>[62]</sup>, 如图 13 所示, 除相速度外, 左旋和右旋激光在等离子体中的群速度也会表现出差异。等离子体的磁化性质提供了一个全新的自由度来产生各种具有特殊性质的磁化等离子体, 进而通过它来灵活调控光束。基于该机制近年来发展了包含磁化等离子体双折射棱镜、磁化等离子体旋光片等光学器件<sup>[63]</sup>, 它们在等离子体的高次谐波、光束偏振控制、粒子加速和抑制 LPI 的研究上发挥了重要作用。

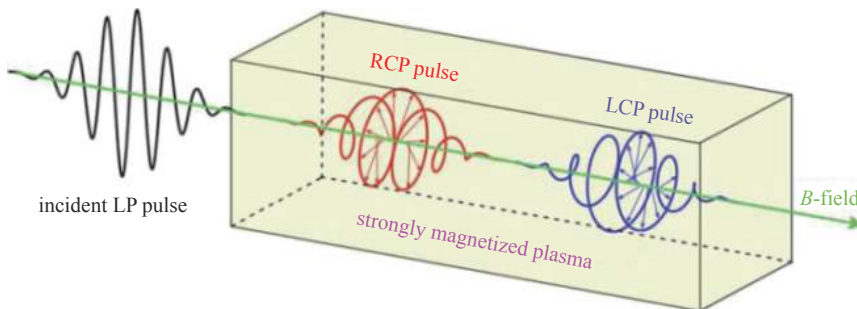


Fig. 13 The extreme Faraday effect of strongly magnetized plasma

图 13 强磁化等离子体形成的极端法拉第效应

### 2.3.3 等离子体光谱调制器及其研究进展

激光光谱特性影响着高功率激光的辐照与辐射品质<sup>[64]</sup>。传统光谱产生的方式是在弱光条件下通过电光调制器等固体器件实现, 由于光束传输放大和频率转换等物理过程的限制, 高功率激光装置输出光谱带宽非常有限<sup>[65]</sup>, 无法满足各种激光大带宽光谱的控制要求。

美国和法国学者在 LPI 的研究中发现, 等离子体的周期性密度扰动或准稳态密度扰动会给激光附加一个随时

间变化的相位,与电光晶体调制光束产生宽带光类似,等离子体这种调制也可以将激光的频谱展宽,且其调制频率可达到 THz<sup>[66-69]</sup>。2006 年,法国 CEA 实验室 M. Grech 发现了等离子体对激光光谱的展宽可缓解激光在等离子体中的成丝<sup>[70]</sup>,并形成了等离子体束匀滑的模型;2015 年,法国 CEA 实验室 V. Yahia 等人在激光聚变点火受挫的情况下,提出了基于等离子体束匀滑来降低 LPI 中的 SBS 散射<sup>[71]</sup>,如图 14 所示,在强激光达到驱动的靶丸前通过一道预设的等离子体,利用等离子体密度扰动实现光谱展宽,频谱展宽及改善 LPI 性能均已在实验中得到了验证,这是等离子体光调制器的雏形。

2016 年上海交通大学於陆勒、盛政明等人首次完整提出了一种基于等离子体介质主动控制的超快全光调制器,它能够快速地调制强光的频谱和时空特性,使得光束的频谱调制范围得到了极大的补充<sup>[72]</sup>。等离子体光谱调制器的原理如图 15 所示,先用一束具有弱相对论光强的超短脉冲在亚毫米尺度的稀薄气体中激发起电子等离子体波,该等离子体波跟随激光脉冲以接近真空中光速的相速度传播,特征振荡频率在 THz 量级。当另外一束同向传播的皮秒信号脉冲,在一定时间延迟下传输到等离子体波区域时,它的振幅和频率能够同时被等离子体波所调制,由此产生具有较大频谱带宽的脉冲列。相比等离子体束匀滑技术,这种等离子体调制器可通过商品化激光器获得,有望成为一种新型的等离子体光子器件,在强 THz 辐射产生、超亮 X 射线产生和激光聚变领域获得应用。

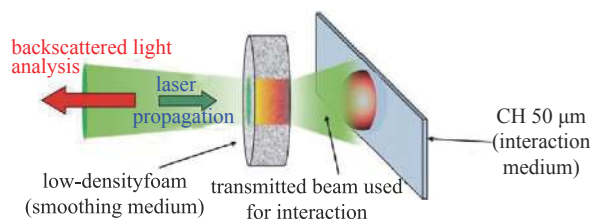


Fig. 14 Schematic of the target arrangement to study the interaction of the PII-beam with a solid target

图 14 基于等离子体束匀滑的靶设计示意图

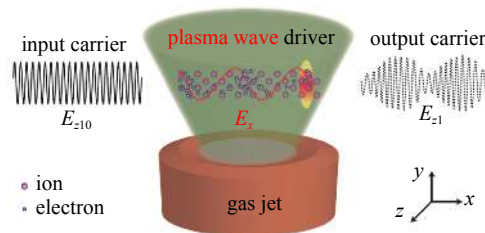


Fig. 15 Schematic of a plasma optical modulator

图 15 等离子体光谱调制器示意图

### 2.3.4 等离子体全息技术及其研究进展

等离子体全息的概念是 2017 年由法国 CEA 实验室 A. Leblanc 等人率先提出<sup>[73]</sup>,它是基于等离子体光栅技术<sup>[74-75]</sup>而发展起来的,已在超短脉冲的控制中得到了初步应用<sup>[76]</sup>。由于等离子体的折射率与等离子体密度紧密相关,通过对等离子体密度的调控,可产生用于调控光束的全息结构。其应用的基本过程如下:如图 16 所示,目标光束与参考光交叠后产生的具有干涉图案的强激光辐照固体平面靶,它所激发的等离子体既包含靶平面内的空间调制,又包含靶面法线方向的空间分布(由于等离子体扩散速度与辐照激光强度有关),从而建立了等离子体全息;在所设定的延迟时间下,主激光辐照等离子体全息结构,其衍射光可完全重现入射目标光,实现等离子体光束全息的功能。针对涡旋光束的需求,A. Leblanc 设计了一种叉型等离子体光栅全息图<sup>[73]</sup>并经过了实验验证,成功地通过调控高功率飞秒脉冲的位相分布实现了光束涡旋。

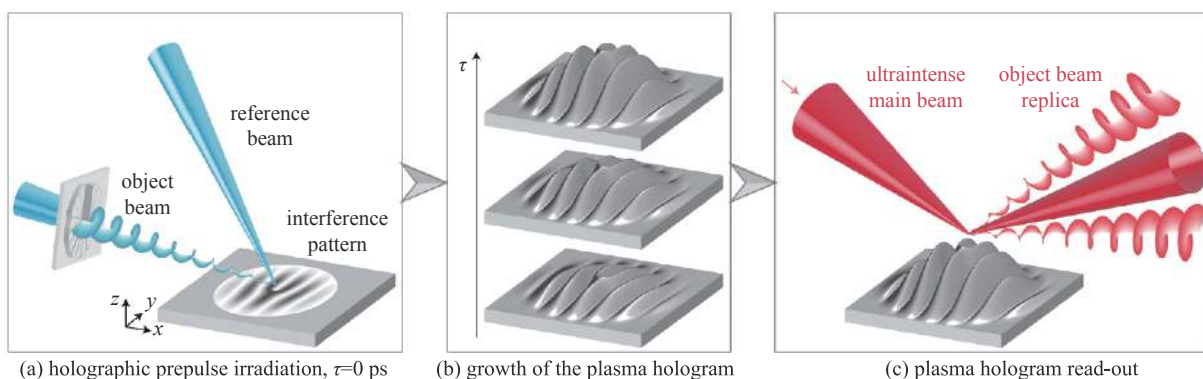


Fig. 16 Schematic diagram of plasma holographic formation process

图 16 等离子体全息的形成过程示意图

在等离子体全息技术的基础上,2017 年,普林斯顿大学 Kenan Qu 等人提出了利用外部磁场来进一步拓展等离子体全息的功能<sup>[78]</sup>,提出了等离子体可变涡旋波片(Q-plate)的概念。它将等离子体磁光技术和全息技术结合起来从光束位相和偏振两方面来同时调控光束,如图 17 所示,光束经过等离子体时,通过等离子体全息特性的设计,使



得不同偏振特性的激光分别引入了与激光方位角相关的相移,激光在传输过程中渐渐形成螺旋结构的波前,实现了预期的光束调控功能。

等离子体的全息技术进一步开拓了光束可调控的空间,它可通过等离子体二元光学、等离子体光子晶体、等离子体动态相位板等光学器件的构建,实现光束位相、聚焦、时域演化等方面的精密控制。

### 3 等离子体光学的发展前景展望

等离子体作为一种特殊介质用于调控激光本身较为古老,受限于等离子体的稳定性较差,在精密控制的传统激光装置中,它的主动应用并不多见。但近些年一方面随着超短强激光技术发展,激光等离子体物理的研究和应用得到极大的拓展,譬如相对论非线性光学(强场物理)、基于相对论强激光与等离子体作用的新型粒子加速和辐射源是目前非线性光学的重要研究前沿之一,它们需要输出能力更强,性能更优异的激光;另一方面,固体介质在光致损伤阈值等性能上存在瓶颈,等离子体作为介质又引起了人们的高度关注并得到了蓬勃发展。现阶段等离子体光学已经在光束全方位的控制上均有所发展,包括激光脉冲的能量/功率、时域、频域、空域、偏振和光束指向都有采用等离子体控制的相关报道。

等离子体光学虽然在理论和应用领域有着蓬勃的发展态势,也正逐渐成为高功率激光领域的一个热点。但在具体问题研究中,其相关理论和技术仍较薄弱。近几年的理论和实验研究结果仍存在一些矛盾,例如在等离子体放大实验中,理论预期的泵浦耗尽,仍未在实验中发现;等离子体的控制虽然得到了长足的进展,但基于等离子体器件的光学实验的重复性精度仍然不高,甚至边界条件稍有变化时,表现出的现象仍千差万别。因此迫切需要健全等离子体光学的理论体系,特别是认识跨度极大的各类等离子体与光束(含位相、振幅、偏振等)的相互作用关系,它可进一步指导等离子体光学的应用;迫切需要探索新型的等离子体器件并发展相关技术,它可更大程度地发挥激光的性能以及激光在应用领域的巨大作用;迫切需要发展等离子体的控制技术,使得等离子体光学从研究探索层面真正地服务于激光工程,并推动激光技术的发展。

尽管现阶段等离子体光学器件还未在大型激光装置上形成全面应用,但由于其极高的储能密度、无光致损伤阈值和丰富的光学特性,等离子体光学仍是高功率激光技术向前发展的必然选择。正如美国国家安全应用主管 Brent Blue 说道,“一般而言,等离子体对激光是一种严重的危害,但我们可以将这种趋势扭转,并主动利用它来推动激光技术的发展,将目光转到比以往任何材料的阈值都高得多的新型光学材料(等离子体光学材料)为高能/高功率激光打开了一扇门。”

#### 参考文献:

- [1] Basov N G, Krohkin O H. The conditions of plasma heating by optical generation of radiation[C]//Proceedings of the 3rd International Congress on Quantum Electronics. New York: Columbia University Press, 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] 邵建达, 戴亚平, 许乔. 惯性约束聚变激光驱动装置用光学元器件的研究进展[J]. 光学精密工程, 2016, 24(12): 2889-2895. (Shao Jianda, Dai Yaping, Xu Qiao. Progress on optical components for ICF laser facility[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(12): 2889-2895)
- [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] 郑万国, 魏晓峰, 朱启华, 等. 神光-III 主机装置成功实现 60 TW/180 kJ 三倍频激光输出[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 019901. (Zheng Wanguo, Wei Xiaofeng, Zhu Qihua, et al. SG-III laser facility has successfully achieved 60 TW/180 kJ ultraviolet laser (351 nm) output[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 019901)
- [7] Maywar D N, Kelly J H, Waxer L J, et al. OMEGA EP high-energy petawatt laser: progress and prospects[J]. J Phys: Conf Ser, 2008, 112: 032007.
- [8] André M L. The French Megajoule Laser Project (LMJ)[J]. Fusion Engineering and Design, 1999, 44(1/4): 43-49.
- [9] Moses, E I. The National Ignition Facility (NIF): A path to fusion energy[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49: 1795-1802.

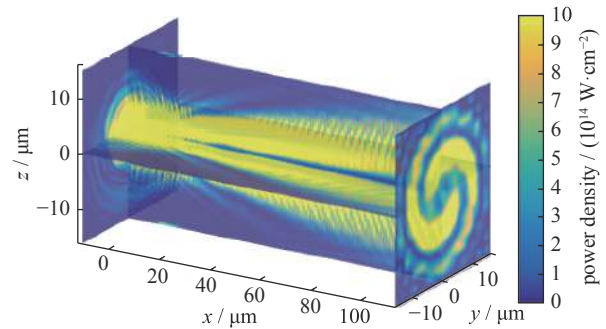


Fig. 17 Characteristics of Q-plate based on magnetized plasma

图 17 基于磁化等离子体的 Q-plate 对光束的调控特性

- [10] Daniel C. Ignition facility misses goal, ponders new course[J]. *Science*, 2012, 337(9): 1444.
- [11] Hurricane O A, Kline J L, Meezan N, et al. Deep dive topic: Approach to ignition[R]. LLNL-TR-674445, 2015.
- [12] 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: 146-249.
- [13] 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)
- [14] Maier S A. Plasmonics: Fundamentals and applications[M]. Berlin: Springer, 2017.
- [15] Sakai O, Tachibana K. Plasmas as metamaterials: a review[J]. *Plasma Sources Sci Technol*, 2012, 21: 013001.
- [16] Boley C D, Rhodes M A. Modeling of plasma behavior in a plasma electrode Pockels cell[J]. *IEEE Trans Plasma Science*, 1999, 27(3): 713-726.
- [17] Backus S, Kapteyn H C, Murnane M M, et al. Prepulse suppression for high-energy ultrashort pulses using self-induced plasma shuttering from a fluid target[J]. *Opt Express*, 1993, 18(2): 134-136.
- [18] Ehrlich Y, Cohen C, Zigler A, et al. Guiding of high intensity laser pulses in straight and curved plasma channel experiments[J]. *Phys Rev Lett*, 1996, 77(20): 4186-4189.
- [19] Kuo C C, Pai C H, Lin M W, et al. Enhancement of relativistic harmonic generation by an optically preformed periodic plasma waveguide[J]. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 033901.
- [20] Litos M, Adli E, An W, et al. High-efficiency acceleration of an electron beam in a plasma wakefield accelerator[J]. *Nature*, 2014, 515(7525): 92-95.
- [21] 於陆勒, 盛政明, 张杰. 均匀等离子体光栅的色散特性研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(10): 6457-6464. (Yu Lule, Sheng Zhengming, Zhang Jie. Investigation on the dispersion characteristics of a uniform plasma grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(10): 6457-6464)
- [22] 陈伟, 叶艾, 任竞骁. 高功率激光器电光调Q技术研究[J]. *光学与光电技术*, 2007, 5(1): 27-300. (Chen Wei, Ye Ai, Ren Jingxiao. Electro-optic Q-switched technology of high power and high efficiency laser[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2007, 5(1): 27-300)
- [23] 王小发, 樊仲维, 余锦, 等. 高能量高效率钕玻璃再生放大器[J]. *中国激光*, 2012, 39: 0802002. (Wang Xiaofa, Fan Zhongwei, Yu Jin, et al. High energy and high efficiency Nd glass regenerative amplifier[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39: 0802002)
- [24] 范滇元, 余文炎. 高功率多程放大器[J]. *中国激光*, 1980, 7(9): 1-6. (Fan Dianyuan, Yu Wenyan. High power multi-pass amplifier[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1980, 7(9): 1-6)
- [25] 张雄军, 郑建刚, 郑奎兴, 等. 用于多程放大系统光束反转器的等离子体电极电光开关[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(2): 150-154. (Zhang Xiongjun, Zheng Jiangang, Zheng Kuixing, et al. PEPC electro-optical switch used in beam reverser of multipass amplifier[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(2): 150-154)
- [26] Zhang Jun, Wu Dengsheng, Zheng Jiangang, et al. Single-pulse driven, large-aperture,  $2 \times 1$  array plasma-electrodes optical switch for SG-II upgrading facility[C]//Proc of SPIE. 2014: 929425.
- [27] Zhang Xiongjun, Wu Dengsheng, Zhang Jun, et al. One-pulse driven plasma Pockels cell with DKDP crystal for repetition-rate application[J]. *Opt Express*, 2009, 17: 17164.
- [28] Zhang Jun, Zhang Xiongjun, Wu Dengsheng, et al. A reflecting Pockels cell with aperture scalable for high average power multipass amplifier systems[J]. *Opt Express*, 2010, 18: A185.
- [29] Zhang Jun, Zhang Xiongjun, Zheng Jiangang, et al. Aperture scalable, high average power capable, hybrid-electrode Pockels cell[J]. *Opt Lett*, 2017, 42(9): 1676.
- [30] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Opt Commun*, 1985, 56: 219.
- [31] Gomez C H, Blake S P, Chekhlov O, et al. The Vulcan 10 PW project[J]. *J of Physics: Conf Series*, 2010, 244: 032006.
- [32] Malkin V M, Shvets G, Fisch N J. Fast compression of laser beams to highly overcritical powers[J]. *Phys Rev Lett*, 1999, 82(22): 4448-4451.
- [33] Shvets G, Fisch N J, Pukhov A, et al. Super radiant amplification of an ultrashort laser pulse in a plasma by a counter propagating pump[J]. *Phys Rev Lett*, 1998, 81(22): 4879-4882.
- [34] Ping Y, Cheng W, Suckewer S, et al. Amplification of ultrashort laser pulses by a resonant Raman scheme in a gas-jet plasma[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 92: 175007.
- [35] Pai C H, Lin M W, Ha L C, et al. Backward Raman amplification in a plasma waveguide[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 101: 065005.
- [36] Cheng W, Avitour Y, Ping Y, et al. Reaching the nonlinear regime of Raman amplification of ultrashort laser pulses[J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 045003.
- [37] Kirkwood R K, Ping Y, Wilks S C, et al. Observation of amplification of light by Langmuir waves and its saturation on the electron kinetic timescale[J]. *J Plasma Phys*, 2011, 77: 521-528.
- [38] Weber S, Riconda C, Lancia L, et al. Amplification of ultrashort laser pulses by Brillouin backscattering in plasmas[J]. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 055004.
- [39] Edwards M R, Jia Q, Mikhailova J M, et al. Short-pulse amplification by strongly coupled stimulated Brillouin scattering[J]. *Phys Plasmas*, 2016, 23: 083122.
- [40] Zuo Y L, Wei X F, Zhou K N, et al. Enhanced laser-induced plasma channels in air[J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(3): 256-261.
- [41] Wu Z H, Wei X F, Zuo Y L, et al. Backward Raman amplification in plasmas with chirped wideband pump and seed pulses[J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(1): 298-302.
- [42] Lehmann G, Spatschek K-H. Transient plasma photonic crystals for high-power lasers[J]. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 225002.
- [43] Turnbull D P, Michel P, Ralph J, et al. Multibeam seeded Brillouin sidescatter in inertial confinement fusion experiments[J]. *Phys Rev Lett*, 2015, 114: 125001.

- [44] Kirkwood R K, Turnbull D P, Chapman T, et al. Plasma-based beam combiner for very high fluence and energy[J]. *Nature Physics*, 2018, 14: 80-84.
- [45] Gold D M. Direct measurement of prepulse suppression by use of a plasma shutter[J]. *Opt Lett*, 1994, 19(24): 2006-2008.
- [46] Price D F, More R M, Walling R S, et al. Absorption of ultrashort laser pulses by solid targets heated rapidly to temperatures 1-1000 eV[J]. *Phys Rev Lett*, 1995, 75(2): 252-255.
- [47] Ziener Ch, Foster P S, Divall E J, et al. Specular reflectivity of plasma mirrors as a function of intensity, pulse duration, and angle of incidence[J]. *J of Appl Phys*, 2003, 93(1): 768-770.
- [48] Bulanov S S, Macchi A, Maksimchuk A, et al. Electromagnetic pulse reflection at self-generated plasma mirrors: Laser pulse shaping and high order harmonic generation[J]. *Phys Plasma*, 2007, 14: 093105.
- [49] Doumy G, Quéré F, Gobert O, et al. Complete characterization of a plasma mirror for the production of high-contrast ultraintense laser pulses[J]. *Phys Rev E*, 2004, 69: 026402.
- [50] Wittmann T, Geindre J P, Audebert P, et al. Towards ultrahigh-contrast ultraintense laser pulses—Complete characterization of a double plasma-mirror pulse cleaner[J]. *Rev Sci Instrum*, 2006, 77: 083019.
- [51] Thaury C, Quere F, Geindre J P, et al. Plasma mirrors for ultrahigh-intensity optics[J]. *Nature Physics*, 2007, 3: 424-429.
- [52] Gibbon P. Plasma physics: Cleaner petawatts with plasma optics[J]. *Nature Physics*, 2007, 3: 369-370.
- [53] Nakatsutsumi M, Kon A, Buffechoux S, et al. Fast focusing of short-pulse lasers by innovative plasma optics toward extreme intensity[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(13): 2314-2316.
- [54] 李平, 王伟, 赵润昌, 等. 基于焦斑空间频率全域优化的偏振平滑设计[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)
- [55] Liu Z J, Zheng C Y, Cao L H, et al. Decreasing Brillouin and Raman scattering by alternating-polarization light[J]. *Phys Plasmas*, 2017, 24(3): 032701.
- [56] Arita Y, Mazilu M, Dholakia K. Laser-induced rotation and cooling of a trapped microgyroscope in vacuum[J]. *Nat Commun*, 2013, 4: 2374.
- [57] Zhang L, Shen B, Zhang X, et al. Deflection of a reflected intense vortex laser beam[J]. *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 113904.
- [58] Michel P, Rozmus W, Williams E A, et al. Saturation of multi-laser beams laser-plasma instabilities from stochastic ion heating[J]. *Phys Plasmas*, 2013, 20: 056308.
- [59] Michel P, Divol L, Turnbull D, et al. , Dynamic control of the polarization of intense laser beams via optical wave mixing in plasma[J]. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 205001.
- [60] Turnbull D, Michel P, Chapman T, et al. High power dynamic polarization control using plasma photonics[J]. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 205001.
- [61] Turnbull D, Goyon C, Kemp G E, et al. Refractive index seen by a probe beam interacting with a laser-plasma system[J]. *Phys Rev Lett*, 2017, 118: 015001.
- [62] Weng Suming, Zhao Qian, Sheng Zhengming, et al. Extreme case of Faraday effect: magnetic splitting of ultrashort laser pulses in plasmas[J]. *Optica*, 2017, 4(9): 1086.
- [63] Liu Ming, Zhang Xiang. Nano-optics: plasmon-boosted magneto-optics[J]. *Nat Photonics*, 2013, 7: 429-430.
- [64] Skupsky S, Short R W, Kessler T, et al. Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light[J]. *J Appl Phys*, 1989, 66(8): 3456-3462.
- [65] 钱列加. 宽频带激光的啁啾匹配型三次谐波转换[J]. *光学学报*, 1995, 15(6): 662-664. (Qian Liejia. Chirp matched third harmonic conversion for broadband lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(6): 662-664)
- [66] Loiseau P, Morice O, Teychenné D, et al. Laser-beam smoothing induced by stimulated Brillouin scattering in an inhomogeneous plasma[J]. *Phys Rev Lett*, 2006, 97: 205001.
- [67] Maximov A V, Ourdev I G, Pesme D, et al. Plasma induced smoothing of a spatially incoherent laser beam and reduction of backward stimulated Brillouin scattering[J]. *Phys Plasma*, 2001, 8(4): 1319.
- [68] Grech M, Riazuelo G, Pesme D, et al. Coherent forward stimulated-Brillouin scattering of a spatially incoherent laser beam in a plasma and its effect on beam spray[J]. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 155001.
- [69] Fuchs J, Labaune C, Bandulet H, et al. Reduction of the coherence time of an intense laser pulse propagating through a plasma[J]. *Phys Rev Lett*, 2002, 88: 195003.
- [70] Yahia V, Masson-Laborde P E, Depierreux S, et al. Reduction of stimulated Brillouin backscattering with plasma beam smoothing[J]. *Phys Plasma*, 2015, 22: 042707.
- [71] Grech M, Tikhonchuk V T, Riazuelo G, et al. Plasma induced laser beam smoothing below the filamentation threshold[J]. *Phys Plasma*, 2006, 13: 093104.
- [72] Yu L L, Zhao Y, Qian L J, et al. Plasma optical modulators for intense lasers[J]. *Nat Commun*, 2016(6): 11893.
- [73] Leblanc A, Denoeud A, Chopineau L, et al. Plasma holograms for ultrahigh-intensity optics[J]. *Nature Phys*, 2017, 13: 440-443.
- [74] Monchocé S, Kahaly S, Leblanc A, et al. Optically controlled solid-density transient plasma gratings[J]. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 145008.
- [75] Peng H, Marqués J R, Lancia L, et al. Plasma optics in the context of high intensity lasers[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2019, 4: 065401.
- [76] Qu K, Jia Q, Fisch N J. Plasma Q-plate for generation and manipulation of intense optical vortices[J]. *Phys Rev E*, 2017, 96(5): 053207.