

文章编号: 0258-7025(2006)07-0865-08

(续 2006, No. 6)

超强固体激光及其在前沿学科中的应用(2)

彭翰生

(中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

Ultraintense Solid-State Lasers and Applications to the Frontiers of Sciences

PENG Han-sheng

(China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

3 超强激光开辟了崭新的物理学领域和交叉学科

激光强度在超强超短脉冲激光与物质作用物理中起主导作用。与激光强度相关的几个常用物理量可由下面公式算出

$$\text{电场: } E[\text{V/cm}] = 27.5 I^{1/2} [\text{W/cm}^2], \quad (1)$$

$$\text{磁场: } B[\text{T}] = E[\text{V/m}] / c [\text{m/s}], \quad (2)$$

$$\text{压强: } P[\text{Pa}] = 10^{-6} I [\text{W/cm}^2] / c [\text{m/s}], \quad (3)$$

激光聚焦功率密度已达到 $10^{20} \sim 10^{22} \text{ W/cm}^2$, 这样高的功率密度能够在实验室中产生前所未有的强电场、强磁场、高压强等极端物态条件。电场已达到 10^{12} V/cm , 相当于二百多倍氢原子第一玻尔半径库伦场 ($1 \text{ a. e. u.} = 5.1 \times 10^9 \text{ V/cm}$), 磁场达到 10^6 T , 光压达到 10^{17} Pa 。

强激光场与物质相互作用的主要物理特征是相对论效应。当光强达到 10^{18} W/cm^2 量级, 电子在光场中的颤动 (quiver) 动量 P_0 就已等于光速与电子静止质量的乘积 $m_0 c$ 。这二者之比 α_0 定义为归一化矢量位, $\alpha_0 = P_0 / m_0 c = eE / m_0 \omega_0 c$, 其中 E 为激光电场, ω_0 为激光角频率。可由后式算出, $\alpha_0 = 0.85 \times 10^{-9} I^{1/2} \lambda$, I 为激光强度 (W/cm^2), λ 为激光波长 (μm)。由于电子速度接近光速, 洛伦兹 (Lorentz) 力变得非常重要, 电子将在电磁场作用下呈 8 字形运动, 并且辐射出高次谐波。

相对论效应同时会改变等离子体介质特性。电子质量增加, 会降低等离子体的频率 ω_p , $\omega_p = \omega_{p0} / \gamma^{1/2} = (4\pi n_e e^2 / \gamma m_0)^{1/2}$, 其中 ω_{p0} 为非相对论等

离子体频率, n_e 为电子密度, $\gamma = (1 + \alpha_0^2)^{1/2}$ 为洛伦兹因子。可以看出, 相对论效应使等离子体的临界密度提高, 激光能够进入电子密度更高的区域, 这就是相对论等离子体的透明效应。等离子体频率变化会导致折射率 $n = [1 - (\omega_p / \omega_0)^2]^{1/2}$ 变化, 光越强折射率越大。如果一束激光空间分布在轴上最强, 如高斯分布, 就会使波面内凹, 出现自聚焦。当自聚焦和衍射达到平衡时, 便形成光导效应。

这些极端物态条件为强场物理和高能量密度物理等许多领域的研究提供了机遇, 出现了与超强激光相融合的交叉学科和倍受科学界关注的前沿领域, 如电子加速、质子加速、脉冲中子源、先进光源、阿秒物理、快点火聚变、超热物质、非线性量子电动力学 (QED)、激光天体物理、激光核物理等^[1~3]。超强超短脉冲激光与其他学科交叉融合, 以及在不同领域中的应用, 尚处在起步初期和探索阶段, 还没有能形成完整的理论和成熟的研究方法, 需要科学家们创造性地劳动和坚持不懈的努力。本文仅就部分领域的研究情况予以概述。图 3 给出了激光聚焦功率密度发展过程和相对应的物理学范畴^[1]。

3.1 电子加速

激光加速电子是现在国际学术界十分关注的前沿课题。射频加速器即使用超导腔, 加速梯度也只有 50 MeV/m 。而超强激光脉冲激发的等离子体波加速梯度可达 200 GeV/m , 是很有发展潜力的加速原理。光波是横波, 电子加速是通过激光脉冲与等离子体作用激发出等离子体纵波实现的。强激光脉冲照射一定密度的气体, 强电场将气体电离, 有质动

收稿日期: 2006-01-05; 收到修改稿日期: 2006-03-05

作者简介: 彭翰生 (1937—), 男, 山东济南人, 中国工程物理研究院研究员, 主要从事高功率激光技术和等离子体物理研究。E-mail: penghsh@caep.ac.cn

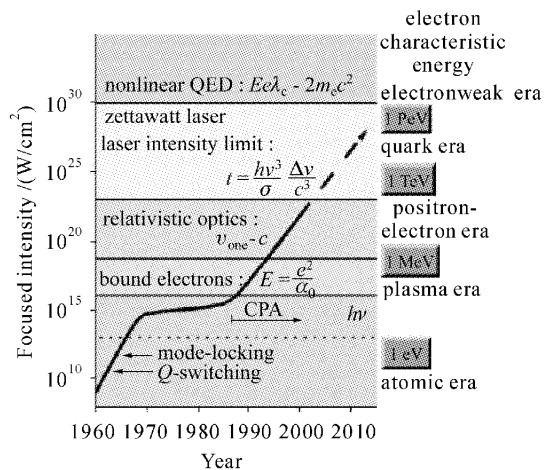


图3 聚焦激光强度发展时间史和对应的物理学范畴

Fig. 3 Historical development of focused laser intensities and related physics fields

力把电子沿轴向向前和径向推出。而离子质量大,来不及响应,产生空间电荷场,随即把电子拉回,形成等离子体波。等离子体波跟随激光脉冲以接近光脉冲在等离子体中的群速度传播,俘获并加速电子。由于超强激光可以产生很强电场,电子能够立即加速到相对论速度,在相位上与尾场匹配,持续从尾场获得能量。已经提出多种激发等离子体波的方案,如激光尾场(LWF—Laser Wake Field)^[4]加速,强激光脉冲有质动力把电子推开,在其身后形成纵向相对论等离子体波;激光拍频(LBW—Laser Beat Wave)^[5~7]加速,不同频率的两束光拍频,如果拍频与等离子体频率共振,则会激发纵向等离子体波;此外,还有自调制激光尾场(SMLWF—Self Modulated Laser Wake Field)^[8]加速,通过拉曼散射^[9]激发纵向等离子体波等。

飞秒脉冲超强激光的快速发展,推进了低能散高能电子加速研究。当激光脉宽小于等离子体的半波长时,电子注入尾场的相位一致,加速后获得的能量分散度小。对应常用的 $10^{18} \sim 10^{19}/\text{cm}^3$ 电子密度,激光脉宽应小于 $30 \sim 50$ fs。最近几年,英国^[10]、美国^[11]、法国^[12]、日本^[13,14]等国都相继利用 $10 \sim 40$ TW, $23 \sim 55$ fs的钛宝石激光打超声速喷气靶,得到了数十至170 MeV的单能电子。中国工程物理研究院与清华大学和日本原子能研究所合作于2005年在SILEX-I装置上进行了电子加速的初步研究,激光输出100 TW的30 fs脉冲,获得了很大的加速电荷量6 nC,假设电子束脉宽与激光束脉宽近似,脉冲电流可达200 kA。利用更高功率(数百太

瓦)的激光脉冲,得到 GeV 的单能电子束是国际上下一步追求的目标。

获得更高能量的电子,需要有足够的加速距离。利用喷气靶很难产生长而稳定的等离子体通道,而采用毛细管放电则可以建立长且稳定的等离子体通道。美国柏克莱实验室最近用30 TW的激光脉冲和3 cm长毛细管等离子体通道已经把电子加速到800 MeV。

3.2 质子加速

质子加速也是拥有超强超短脉冲激光装置的实验室都在探索的前沿课题。紧凑型强脉冲质子源具有非常诱人的应用前景,如质子照像、等离子体诊断、癌症治疗、聚变快点火、强流加速器注入器等。质子加速的主要机制是强激光脉冲与固体靶作用所产生的超热电子导致电荷分离,形成静电壳层。由于电子束团电荷量很大,过程非常短,电场可高达 10^{12} V/m,这种加速机制称作TNSA(target normal sheath acceleration)^[15]。实验用靶大多是金属靶,质子是由金属靶面残留的有机溶剂或水分电离产生的。在所产生的离子中,质子质量最小,荷质比最高,是主要加速离子成分。LLNL最早在PW激光装置上进行了质子加速实验^[16,17],使用 $50 \sim 125$ μm厚的Au和CH薄膜靶,激光脉宽 $0.5 \sim 5$ ps,功率 3×10^{20} W/cm²,获得55 MeV的质子束能量。质子发射沿靶背法线方向而与激光入射方向无关。同时对加速机制进行了数值模拟,认为是激光脉冲首先在靶前产生超热电子,穿入靶内,部分很高能量的电子飞离靶子,大部分电子在前后两表面间来回振荡,趋于玻尔兹曼(Boltzmann)平衡分布,在表面形成静电壳层,壳层厚度由超热电子德拜(Debye)长度 λ_d 给出,当前典型的电子温度和密度条件下, λ_d 尺度约2 μm。英国RAL实验室在Vulcan装置上做了大量实验^[18~20],靶子为125 μm Al膜,激光脉宽 $0.9 \sim 1.2$ ps,50 J,得到18 MeV的质子能量,质子空间呈环形分布。由此推算出超热电子产生的磁场为30 MG。他们认为,质子产生于靶子前表面,然后穿过靶子时受到环形磁场作用导致环形分布。日本ILE利用0.45 ps,25 J激光打 $5 \sim 100$ μm CH靶,也得到环形分布的3 MeV质子,认为是环形磁场影响了质子分布^[21]。德国MPQ的A. Pukhov^[22]进行了数值模拟,比较靶前和靶后产生质子的能量和分布。结果表明,靶后产生质子的模拟结果更符合实验数据。法国LULI实验室的实验仔细比较了从靶前和靶后发射的质子,靶后发射的质

子能量更高、发散角更小、效率更高^[23]。LLNL 实验室在 10 J/100 fs 的 JanUSP 进行的质子实验^[24]，直接证明了质子主要是在靶后产生的。所用靶子是 15 μm 的金膜，被加速的质子数大于 10^{11} ，能量大于 9 MeV。用氩离子去除前表面含氢物质后，获得了同样的质子参数，而对靶背处理后，质子产额不到原来的 1%。被加速的质子究竟来自何处，是仍在进一步研究的问题，有多种加速机制和物理模型^[25]，多数认为 TNSA 为主。也有研究认为质子首先在靶前表面受到冲击波加速，穿过靶体到靶背又从 TNSA 进一步获得能量。中国科学院物理所打低密度泡沫靶，发现靶体内微表面形成的局部电场也能加速质子^[26]。美国 LLNL^[27] 和密歇根大学 (CUOS)^[28]，法国 LOA^[29]，日本电力工业中心研究所 (CRIEPI)^[30,31] 等在数十拍瓦的飞秒激光装置上还进行了大量实验，研究脉冲宽度、激光强度、预脉冲、靶厚度等对质子加速的影响，并探索可能的应用。

迄今大部分实验产生的离子能量都是麦克斯韦分布，能散达到 100%，不利于实际应用。2006 年，美国 洛斯阿拉莫斯 等研究机构^[32] 利用 20 TW/0.8 ps 的 Trident 激光器打表面吸附极薄石墨层的 20 μm 厚靶基底靶，靶子经过去除有机物处理后，获得 30 MeV 的 C^{5+} 离子。由于炭层空间尺度很小，所有炭离子都在峰值电场加速，所以能散达到 17%。德国耶拿大学^[33] 在 600 mJ/80 fs 的 JETI 激光器上，采用在 5 μm 厚的钛膜底衬附上 20 μm \times 20 μm 厚 0.5 μm 的炭氢材料靶，得到 1.2 MeV 的质子，能散为 25%。降低离子能散的基本思路是被加速的离子在空间上与激光焦斑相比要足够小，可以在相同的时间和空间被加速，因而获得相近的能量。

激光预脉冲对质子加速有很大影响，因为预脉冲在靶面产生一层稀薄等离子体，主脉冲会首先与其作用，产生超热电子，改变靶的状态。德国 MPQ 在 850 mJ/150 fs ATLAS 激光器上打铝箔靶，研究预脉冲宽度 (0.5~6 ns) 和靶厚 (0.75~86 μm) 与质子能量的关系^[34]。结果表明，对于一定的激光主脉冲参数，为得到尽可能高的质子能量，靶厚度与预脉冲的长度有对应关系，需要进行优化。对于较厚的靶，预脉冲对质子能量影响较小，而很薄的靶则较敏感。

在目前的激光功率密度水平下，主要是 TNSA 加速机制。同时也在探索别的质子加速机制，如库仑 (Coulomb) 爆炸加速^[35] 和光压直接加速。随着

激光强度进一步提高，数值模拟表明光压会加速出很高能量的质子，预计光强到达 10^{23} W/cm² 时，质子能量可达数十吉电子伏^[36]。

3.3 超短脉冲中子源

超强超短脉冲激光与等离子体相互作用会加速出很高能量的电子和离子，继而诱发核过程^[37]。超强飞秒脉冲激光与含 D 原子团簇作用会发生库仑爆炸，产生聚变中子，是另一种很典型的核物理应用。这种脉冲中子源脉宽很短，只发生在百微米空间尺度内，可以进行高时空分辨中子照像和材料 (如聚变堆内壁) 的破坏研究。

超短超强激光脉冲照射团簇时，原子立刻被电离，电子在强电场中获得很大能量，迅速飞离团簇。这一过程异常之快，离子还来不及运动，离子的空间电荷使团簇产生库仑爆炸，有效地把激光能量转换成离子动能。如果是 D 离子，则会通过 D-D 反应产生聚变中子。有几个实验室进行了实验研究^[38~47]，大多是在较小的飞秒激光装置上进行的。LLNL 实验室利用 JanUSP 装置和 D 团簇所做的实验中，研究了 35 fs, 100 fs, 1 ps 不同脉宽时，中子产额与能量的关系。在 100 fs, 5 J 时，得到最高产额 10^6 中子。根据此定标关系，预计 100 J 的飞秒激光能量可以产生 10^9 中子，这样的中子通量会造成材料的破坏，有望用于时间分辨的材料破坏研究。

除团簇实验外，英国 RAL 利用 Vulcan 拍瓦激光脉冲打薄膜靶产生数十兆电子伏的质子，然后去打不同材料的靶，通过核反应产生中子。打锂靶时，每发激光获得了中子 10^9 /sr^[48,49]。

3.4 超短脉冲 X 射线辐射

产生 X 射线超短脉冲有不同机制，如高次谐波和 X 射线激光相干辐射，或高强度激光打靶产生非相干 X 射线辐射。本节着重介绍高功率超短脉冲激光与电子束相互作用，通过汤姆逊 (Thomson) 散射获得高亮度、短脉冲、短波长、准单色、方向性好、可调谐的 X 射线光源。这种光源在化学反应控制和诊断、生物样品 (如蛋白质) 成像、材料特性，尤其是强冲击下的材料动态特性研究，以及激光等离子体诊断等方面都有很好的应用前景。汤姆逊散射物理过程与自由电子激光 (FEL) 相似，都是电子束在周期场中摇摆运动辐射出光子。对于线性汤姆逊散射，当激光脉冲与电子束对撞散射时，输出光的波长与电子的能量和激光波长的定标关系为

$$\lambda \approx \lambda_0 / 4\gamma^2, \quad (4)$$

其中 λ_0 为激光波长， $\gamma = 1/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ 为电子能

量洛伦兹因子。在 FEL 装置中磁铁波荡器周期多为厘米级,而激光波长一般为 $1\ \mu\text{m}$ 左右,二者波长差 4 个量级。根据(4)式波长定标关系可知,产生同样波长的散射光,用激光场替代磁铁波荡器,加速器电子束的能量可以低 2 个量级。如产生 30 keV (0.05 nm) 的 X 射线,前者需要 12 GeV 的电子束,而后者仅需 40 MeV 的电子束,整个装置可以小很多,有利于应用。

利用汤姆逊散射获得短波长 X 射线研究多年前就已开始,随着飞秒激光的强度不断提高,这方面的研究日益受到重视,已有大量的理论和实验研究论文发表^[50~59]。研制实用的装置,则需要加速器和超强激光两方面的技术支持。美国 LLNL 启动了先进 X 光源项目,计划用光阴极 S 波段射频直线加速器产生 100 MeV, 1.5 ps, 横向尺寸 $30\ \mu\text{m}$ 的电子束与 100 TW, 35 fs 激光脉冲相互作用,预期可以得到 $10^9 \sim 10^{11}$ 个散射光子,脉宽在 $10^2 \sim 10^4$ fs 间,光子能量在 5~300 keV 间可调。日本 JAERI 和美国 Berkeley 大学等也在开展这方面的工作。

近年来,利用超强激光脉冲与同步辐射加速器高能电子进行康普顿(Compton)散射产生 γ 射线的研究也受到重视,希望利用所产生的 γ 射线进行核嬗变处理核废料。

3.5 阿秒物理

超强超短脉冲激光与物质相互作用,最显著的特点是强相对论效应,由此也引发了相对论非线性光学效应。这里所涉及的就是电子相对论速度运动引起的阿秒物理问题。

超强超短激光脉冲聚焦打靶产生稠密等离子体,电子以相对论速度在光场中振荡,犹如以相对论速度振荡的镜子,激光入射到这种振荡的稠密等离子体,就会反射出分离的脉冲串。由于电子以相对论速度运动,在每半周期中建立的反射条件又不尽相同,被反射的激光脉冲由于多普勒(Doppler)时间变换,被压缩到阿秒宽度,而且出现在不同方向上^[60,61]。同时,相对论电子在光场中密度被调制,形成分离的片状电子阿秒脉冲串,与激光脉冲串同步产生^[62]。稠密的阿秒电子脉冲可以用来散射对碰的电磁辐射,通过频移产生高亮度 X 射线脉冲,美国密歇根大学超快光科学中心在这方面做了许多模拟研究。

俄罗斯 Bulanov 等^[63,64]研究了稀薄等离子体中激光脉冲尾场内的情况,相对论效应使尾场中电子密度调制和陡化,在波破碎点上,电子密度趋于无

穷大。如果有电磁脉冲与其对碰,则会反射,并且频移。模拟表明这样会产生阿秒脉冲,甚至是单周期脉冲。

韩国原子能研究所^[65,66]利用相对论非线性汤姆逊散射理论模拟了一个实验设想。激光脉宽 20 fs,强度 $4 \times 10^{19}\ \text{W}/\text{cm}^2$,以 76.5° 角斜入射到 7 nm 厚的靶面上,首先产生相对论电子,后续激光受到散射,可以获得 7.7 as, 100 eV 的 X 射线脉冲。利用超短脉冲激光与加速器输出的电子束进行汤姆逊散射,是获得阿秒甚至更短电磁脉冲辐射更有效手段。华中科技大学激光技术和光电子国家实验室模拟表明,100 fs 的激光脉冲与 10 MeV 电子束对碰就可得到亚阿秒脉冲,如果电子束能量提高到 250 MeV,甚至可以得到 10^{-21} s 的电磁脉冲^[67]。

美国巴尔迪摩大学等校研究人员还提出将超强超短脉冲激光聚焦到亚波长尺度固体微粒或细丝上可以产生原子核时间尺度 ($10^{-21} \sim 10^{-22}$ s) 脉冲电磁辐射的设想^[68]。

上述研究基本都是概念研究和数值模拟,对于如此尺度时间过程进行实验研究,还未找到可行的实验途径和诊断手段。

3.6 聚变快点火

长期以来,物理学家一直在研究利用中心点火方式实现激光聚变。这种方式是将含氘氚的微粒进行内爆等熵压缩,在燃料中心低密度区形成高温热斑,在那里首先开始热核反应,释放出的 α 粒子将能量沉积在周围低温高密度区,实现燃烧。这种模型对驱动器的能量、辐照均匀性、脉冲波形和微粒加工精度等要求十分苛刻,在科学技术和费用上都是严峻的挑战。超短脉冲激光技术的发展启发物理学家们提出了快点火概念^[69],将靶丸内爆压缩与点火分成两个阶段,压缩激光只需对微粒进行适度压缩。然后高功率超短脉冲激光束入射至被压缩的靶燃料边缘,产生超热电子或质子,去点燃热核材料,这样有望缓解或转移技术困难和降低装置造价。

快点火是当前激光聚变研究的热点,有很多科学和技术问题尚待解决。实验研究多集中于高功率超短脉冲激光与等离子体相互作用、激光产生等离子体通道、超热电子和质子的产生、传输、沉积等基础物理问题上。由于激光装置的制约,靶丸压缩与快点火加热的综合实验仅在日本 ILE 进行过。ILE 利用 Gekko-VII 装置内爆压缩含氘聚乙烯靶丸, PW 的亚皮秒脉冲通过镶在靶丸上的空心金锥加热预压缩的靶物质,中子产额比无加热脉冲时提高了 3 个

量级^[70,71]。这一重大进展是近几年国际上快点火实验研究的标志性成果,促使各有关国家惯性约束聚变(ICF)计划把建造超强点火激光装置纳入日程。更多的研究工作是理论探索和数值模拟。已经提出了多种点火途径设想,如超热电子点火、质子点火、冲量点火、射流点火等。总体看,快点火物理模型、定量参数和对激光装置的要求都还需要进行大量研究才能逐步明确^[72~77]。

3.7 超热物质

飞秒激光脉冲可以把能量迅速沉积到很小的靶物质体积内,形成高温高压物质状态。在 ICF 等领域所涉及的纳秒脉冲激光与物质相互作用中,等离子体以流体力学运动速度(约 10^7 cm/s)向外膨胀,激光与等离子体耦合发生在临界密度面以外,能量不可能直接沉积到固体密度区域内。飞秒激光脉冲打靶,如果信噪比高,不产生预等离子体,能够把能量直接沉积到很薄的固态密度靶中。在数十飞秒内,靶物质来不及膨胀,被等容加热。现在超强飞秒激光有能力把物质加热到 10^9 J/cm³的能量密度,这对应每个原子获得了10 keV的能量,压力超过 10^{15} Pa,远高于地球上任何自然状态存在的温度和压力。

这是一个很陌生的领域,只在美国 LLNL 和为数不多的实验室中进行了一些探索性研究^[78~83]。首先进行了超短脉冲激光直接加热研究。激光直接加热有很大困难,加热深度很浅,局限于趋肤深度内(<100 nm),并且加热不均匀,不易实现等容加热,需使用非常薄的靶。为了精确给出被加热物质的总量,对这样薄的靶的面形精度和抛光要求将十分苛刻。因此,考虑采用更适宜的加热方式。首先将激光转换成射程较长的 X 射线或质子,然后均匀沉积到靶物质中。LLNL 的科学家们设想,利用 JanUSP 激光束照射500 nm厚铝箔或金箔靶,可以产生速度达8000 km/s的质子,约为光速的3%,将这些质子沉积到铀之类的重金属中,射程仅5~10 μ m,会在该薄层内产生1 keV的热动平衡高温等离子体。他们也进行了质子加热的初步实验研究,希望测量出材料的基本参数,如状态方程(EOS)和不透明度(Opaicity)等,以建立和标定超热物质理论模型。这种等离子体与星体中或核爆炸条件下的物态类似,对核武器库存材料研究及天体物理研究都很有意义。

3.8 超强电场和相关物理前沿

激光强度进一步提高,会把超强激光与更多的

物理学领域关联起来。 10^{18} W/cm² 光强是电子在电磁场中达到相对论的阈值,当光强 $I = (m_i/m_e) \times 10^{18}$ W/cm², 质子运动也进入相对论状态。在 $I = 10^{23} \sim 10^{24}$ W/cm² 的强度,辐射过程在稠密等离子体中将起主导作用。超过 $I = 10^{25}$ W/cm², 需要引入量子电动力学描述。 $I \cong 10^{29}$ W/cm² 时,达到量子电动力学临界电场(Schwinger limit),电子在一个康普顿长度($\lambda_c = h/m_e c$)就可获得 $2m_0 c^2$ 能量,在真空中产生正负电子对。达到如此高的激光强度后,强场物理将和高能物理以及核物理实现更深刻的交叉融合。

现在的超强激光最大聚焦光强为 $10^{20} \sim 10^{22}$ W/cm², 未来的激光技术发展会把光强再进一步提高,但是多量级的提高在工程技术和费用上难度都很大。因此利用物理学方法来增强激光强度的探索受到重视。基本思想是利用多普勒频移和脉冲压缩使功率放大。这些概念已经用不同的方式进行了演示,如激光束与相对论电子束背向汤姆逊散射、与以相对论速度运动的等离子体波面背向散射等^[84~97]。在日本 JAERI 工作的 S. V. Bulanov 等^[98] 提出利用强激光束在等离子体中激发出尾场作为散射体,尾场相速度等于光脉冲群速度, $v_{ph} = \beta_{ph} c$, 对应的洛仑兹因子 $\gamma_{ph} = (1 - \beta_{ph}^2)^{-1/2} \approx \omega_d / \omega_{pe}$, 其中 ω_d 和 ω_{pe} 分别为驱动激光的频率和朗缪尔(Langmuir)波频率。如果有一束激光与该尾场对碰,反射的激光频率将增加 $4\gamma_{ph}^2$ 倍。在驱动激光强度很大时,由于等离子体的折射率相对论效应,理论上可以使尾场形成一个内凹的等离子体抛物面镜,将背散射的激光聚焦。根据这一思想进行的数值模拟表明,适当选择激光和等离子体参数,在理想的情况下,用17 J的驱动激光脉冲和0.1 J的对碰脉冲,有望得到 10^{29} W/cm²的激光强度。现在的激光技术已具有这样的输出能力,当然在实验上会有很大难度。

4 结 论

CPA 技术在激光技术中的成功应用,把激光强度革命性地提高了5~6个量级,破天荒地在实验室中创造出前所未有的极端物态条件。这一跨越式的创新发展,迅速吸引了相关学科甚至许多看似不相干领域的科学家的目光,促生了诸多交叉前沿学科。在这里,超强激光在各领域中的应用,实际是超强激光技术与各领域融合并不断再创造的过程。这一过程会不断对激光器性能提出新要求,是激光技术持

续发展的需求牵引和不竭动力。而激光性能、特别是强度的提高又会产生新的物理学领域。上面所列举的应用,只是诸多应用中的一瞥,有更多领域已经引起或即将引起更为广泛的关注。可以期待,超强激光及所推动的科学领域研究将会对科学开拓、技术创新、经济发展和社会进步发挥难以估量的影响。

参 考 文 献

- 1 T. Tajima, G. Mourou. Zettawatt-exawatt lasers and their applications in ultrastrong-field physics [J]. *Phys. Rev., ST-accelerators and Beams*, 2002, **5**(3):031301-1~031301-9
- 2 D. Umstadter. Review of physics and applications of relativistic plasmas driven by ultra-intense lasers [J]. *Phys. Plasmas*, 2001, **8**(5):1774~1785
- 3 T. Ditmire, S. Bless, G. Dyer *et al.*. Overview of future directions in high energy-density and high-field science using ultra-intense lasers [J]. *Rad. Phys. and Chem.*, 2004, **70**:535~552
- 4 T. Tajima, J. M. Dawson. Laser electron acceleration [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1979, **43**(4):267~270
- 5 C. E. Clayton, C. Joshi, C. Darrow *et al.*. Relativistic plasma-wave excitation by collinear optical mixing [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **53**(21):2343~2346
- 6 Y. Kitagawa, T. Matsumoto, T. Minamihata *et al.*. Beat wave excitation of plasma wave and observation of accelerated electrons [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(1):48~51
- 7 C. E. Clayton, K. A. Marsh, A. Dyson *et al.*. Ultrahigh-gradient acceleration of injected electrons by laser-excited relativistic electron plasma waves [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **70**(1):37~40
- 8 P. Sprangle, E. Esarey, J. Krall *et al.*. Propagation and guiding of intense laser pulses in plasmas [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **69**(15):2200~2203
- 9 T. M. Antonsen, Jr, P. Mora. Self-focusing and Raman scattering of laser pulses in tenuous plasmas [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **69**(15):2204~2207
- 10 S. P. D. Mangles, C. D. Murphy, Z. Najmudin *et al.*. Monoenergetic beams of relativistic electrons from intense laser-plasma interaction [J]. *Nature*, 2004, **431**(7008):535~538
- 11 C. G. R. Geddes, Cs. Toth, J. van Tilborg *et al.*. High-quality electron beams from a laser wakefield accelerator using plasma-channel guiding [J]. *Nature*, 2004, **431**(7008):538~541
- 12 J. Faure, Y. Glinec, A. Pukhov *et al.*. A laser-plasma accelerator producing monoenergetic electron beams [J]. *Nature*, 2004, **431**(7008):541~544
- 13 T. Hosokai, K. Kenoshita, A. Zhidkov *et al.*. Refraction effects of the cavity formation and interaction of an intense ultra-short pulse with a gas jet [J]. *Phys. Plasmas*, 2004, **11**(10):L57~L60
- 14 M. Kando, S. Masuda, A. Zhidkov *et al.*. Electron acceleration by a nonlinear wakefield generated by ultrashort (23-fs) high-peak-power laser pulses in plasma [J]. *Phys. Rev. E*, 2005, **71**(1):015403-1~015403-4
- 15 S. C. Wilks, A. B. Langdon, T. E. Cowan *et al.*. Energetic protons generation in ultra-intense laser-solid interactions [J]. *Phys. Plasmas*, 2001, **8**(2):542~549
- 16 R. A. Anavey, M. H. Key, S. P. Hatchett *et al.*. Intense high-energy proton beams from petawatt-laser irradiation of solids [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(14):2945~2948
- 17 S. P. Hatchett, C. G. Brown, T. C. Cowan *et al.*. Electron, photon, and ion beams from the relativistic interaction of petawatt laser pulses with solid targets [J]. *Phys. Plasmas*, 2000, **7**(5):2076~2082
- 18 E. L. Clark, K. Krushelnick, J. R. Davies *et al.*. Measurements of energetic proton transport through magnetized plasma from intense laser interactions with solids [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(4):670~673
- 19 F. N. Beg, M. S. Wei, A. E. Dangor *et al.*. Target charging effects on proton acceleration during high-intensity short-pulse laser-solid interactions [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(15):2766~2768
- 20 F. N. Beg, M. S. Wei, E. L. Clark *et al.*. Return current and proton emission from short pulse laser interactions with wire targets [J]. *Phys. Plasmas*, 2004, **11**(5):2806~2813
- 21 Y. Murakami, Y. Kitagawa, Y. Sentoku *et al.*. Observation of protons rear emission and possible gigagauss scale magnetic fields from ultra-intense laser illuminated plastic target [J]. *Phys. Plasmas*, 2001, **8**(9):4138~4143
- 22 A. Pukhov. Three-dimensional simulations of ion acceleration from a foil irradiated by a short-pulse laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**(16):3562~3565
- 23 J. Fuchs, Y. Sentoku, S. Karsch *et al.*. Comparison of laser ion acceleration from front and rear surfaces of thin foils [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(4):045004-1~045004-4
- 24 M. Allen, P. K. Patel, A. Mackinnon *et al.*. Direct experimental evidence of back-surface ion acceleration from laser-irradiated gold foils [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(26):265004-1~265004-4
- 25 E. d'Humieres, E. Lefebvre, L. Gremillet *et al.*. Proton acceleration mechanisms in high-intensity laser interaction with thin foils [J]. *Phys. Plasmas*, 2005, **12**(6):062704-1~062704-13
- 26 Y. T. Li, Z. M. Sheng, Y. Y. Ma *et al.*. Demonstration of bulk acceleration of ions in ultraintense laser interactions with low-density foams [J]. *Phys. Rev. E*, 2005, **72**(6):066404-1~066404-7
- 27 A. J. Mackinnon, Y. Sentoku, P. K. Patel *et al.*. Enhancement of proton acceleration by hot-electron recirculation in thin foils irradiated by ultraintense laser pulses [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(21):215006-1~215006-4
- 28 A. Maksimchuk, S. Gu, K. Flippo *et al.*. Forward ion acceleration in thin films driven by a high-intensity laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(18):4108~4111
- 29 S. Fritzler, V. Malka, G. Grillon *et al.*. Proton beams generated with high-intensity lasers; applications to medical isotope production [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(15):3039~3041
- 30 X. F. Wang, K. Nemoto, T. Nayuki *et al.*. Effect of plasma peak density on energetic proton emission in ultrashort high-intensity laser-foil interactions [J]. *Phys. Plasmas*, 2005, **12**(11):113101-1~113101-6
- 31 Y. Oishi, T. Nayuki, T. Fujii *et al.*. Dependence on laser intensity and pulse duration in proton acceleration by irradiation of ultrashort laser pulses on a Cu foil target [J]. *Phys. Plasmas*, 2005, **12**:073102-1~073102-5
- 32 B. M. Hegelich, B. J. Albright, J. Cobble *et al.*. Laser acceleration of quasi-monoenergetic MeV ion beams [J]. *Nature*, 2006, **439**(7075):441~444
- 33 H. Schwoerer, S. Pfoth, O. Jackel *et al.*. Laser-plasma acceleration of quasi-monoenergetic protons from microstructured targets [J]. *Nature*, 2006, **439**(7075):445~448
- 34 M. Kaluza, J. Schreiber, M. I. K. Santala *et al.*. Influence of the laser prepulse on proton acceleration in thin-foil experiments [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(4):045003-1~045003-4

- 35 E. Fourkal, I. Velchev, C. M. Ma. Coulomb explosion effect and the maximum energy of protons accelerated by high-power lasers [J]. *Phys. Rev. E*, 2005, **71**(3-2B):036412-1~036412-11
- 36 T. Esirkepov, M. Borghesi, S. V. Bulanov *et al.*. Highly efficient relativistic-ion generation in the laser-piston regime [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(17):175003-1~175003-4
- 37 K. W. D. Ledingham, P. McKenna, R. P. Singhal. Applications for nuclear phenomena generated by ultra-intense lasers [J]. *Science*, 2003, **300**(5622):1107~1111
- 38 T. Ditmire, J. Zweiback, V. D. Yanovsky *et al.*. Nuclear fusion from explosions of femtosecond laser-heated deuterium clusters [J]. *Nature*, 1999, **398**(6727):489~491
- 39 J. Zweiback, R. A. Smith, T. E. Cowan *et al.*. Nuclear fusion driven by Coulomb explosion of large deuterium clusters [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(12):2634~2637
- 40 J. Zweiback, T. E. Cowan, J. H. Hartley *et al.*. Detailed study on nuclear fusion from femtosecond laser-drive explosions of deuterium clusters [J]. *Phys. Plasmas*, 2002, **9**(7):3108~3120
- 41 Y. Kishimoto, T. Masaki, T. Tajima. High energy ions and nuclear fusion in laser-clustre interaction [J]. *Phys. Plasmas*, 2002, **9**(2):589~601
- 42 G. Grillon, Ph. Balcou, J. P. Chambaret *et al.*. Deuterium-deuterium fusion dynamics in low-density molecular-cluster jets irradiated by intense ultrafast laser pulses [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(6):065005-1~065005-4
- 43 K. W. Madison, P. K. Patel, M. Allen *et al.*. Investigation of fusion yield from exploding deuterium-cluster plasmas produced by 100-TW laser pulses [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(1):113~117
- 44 M. Hohenberger, D. R. Symes, K. W. Madison *et al.*. Dynamic acceleration effects in explosions of laser-irradiated heteronuclear clusters [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **95**(19):195003-1~195003-4
- 45 I. Last, J. Jortner. Ultrafast high-energy dynamics of thin spherical shell of light ions in the Coulomb explosion of heteroclusters [J]. *Phys. Rev. A*, 2005, **71**(6):063204-1~063204-10
- 46 K. Y. Kim, I. Alexeev, H. M. Milchberg. Measurement of ultrafast dynamics in the interaction of intense laser pulses with gases, clusters, plasma waveguides [J]. *Phys. Plasmas*, 2005, **12**(5):056712-1~056712-7
- 47 I. Last, J. Jortner. Electron and nuclear dynamics of molecular clusters in ultraintense laser fields. IV. Coulomb explosion of molecular heteroclusters [J]. *J. Chem. Phys.*, 2004, **121**(17):8329~8342
- 48 J. M. Yang, P. McKenna, K. W. D. Ledingham *et al.*. Neutron production by fast protons from ultraintense laser-plasma interactions [J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **96**(11):6912~6918
- 49 J. M. Yang, K. W. D. Ledingham, P. McKenna *et al.*. Nuclear reactions in copper induced by protons from a petawatt laser-foil interactions [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(5):675~677
- 50 R. W. Schoenlein, W. P. Leemans, A. H. Chin *et al.*. Femtosecond X-ray pulses at 0.4 Å generated by 900 Thomson scattering; a tool for producing the structural dynamics of materials [J]. *Science*, 1996, **274**(5285):236~238
- 51 F. V. Hartemann. High-intensity scattering processes of relativistic electrons in vacuum [J]. *Phys. Plasmas*, 1998, **5**(5):2037~2047
- 52 F. He, Y. Y. Lau, D. P. Umstadter *et al.*. Phase dependence of Thomson scattering in an ultraintense laser field [J]. *Phys. Plasmas*, 2002, **9**(10):4325~4329
- 53 F. He, Y. Y. Lau, D. P. Umstadter *et al.*. Backscattering of an intense laser beam by an electron [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(5):005002-1~005002-4
- 54 Y. Y. Lau, F. He, D. P. Umstadter *et al.*. Nonlinear Thomson scattering; a tutorial [J]. *Phys. Plasmas*, 2003, **10**(5):2155~2162
- 55 G. A. Krafft. Spectral distribution of Thomson-scattering photons from high-intensity pulsed lasers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(20):204802-1~204802-4
- 56 J. Gao. Thomson scattering from ultrashort and ultraintense laser pulses [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(24):243001-1~243001-4
- 57 G. A. Krafft, A. Doyuran, J. B. Rosenzweig. Pulsed-laser nonlinear scattering for general scattering geometries [J]. *Phys. Rev. E*, 2005, **72**(5):056502-1~056502-10
- 58 K. T. Phuoc, F. Burgy, J.-P. Rousseau *et al.*. Laser based synchrotron radiation [J]. *Phys. Plasmas*, 2005, **12**(2):023101-1~023101-8
- 59 T. Cowan, T. Ditmire, G. L. Sage. Intense laser-electron interaction [R]. LLNL, UCRL-MI-135159
- 60 N. M. Naumova, J. A. Nees, I. V. Sokolov *et al.*. Relativistic generation of isolated attosecond pulses in a λ^3 focal volume [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(6):063902-1~063902-4
- 61 N. M. Naumova, J. A. Nees, A. Mourou. Relativistic attosecond physics [J]. *Phys. Plasmas*, 2005, **12**(5):056707-1~056707-5
- 62 N. Naumova, I. Sokolov, J. Nees *et al.*. Attosecond electron bunches [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(19):195003-1~195003-4
- 63 A. V. Isanin, S. S. Bulanov, F. F. Kamenets *et al.*. Attosecond electromagnetic pulse generation due to the interaction of a relativistic soliton with a breaking-wave plasma wave [J]. *Phys. Rev. E*, 2005, **71**(3):036401-1~036401-6
- 64 S. S. Bulanov, T. Zh. Esirkepov, F. F. Kamenets *et al.*. Single-cycle high-intensity electromagnetic pulse generation in the interaction of a wakefield with regular nonlinear structures [J]. *Phys. Rev. E*, 2006, **73**(3):036408-1~036408-10
- 65 K. Lee, Y. H. Cha, M. S. Shin *et al.*. Relativistic nonlinear Thomson scattering as attosecond x-ray source [J]. *Phys. Rev. E*, 2003, **67**(2):026502-1~026502-7
- 66 K. Lee, B. H. Kim, D. Kim. Coherent radiation of relativistic nonlinear Thomson scattering [J]. *Phys. Plasmas*, 2005, **12**(4):043107-1~043107-8
- 67 P. F. Lan, P. X. Lu, W. Cao *et al.*. Attosecond and zeptosecond x-ray pulses via nonlinear Thomson backscattering [J]. *Phys. Rev. E*, 2005, **72**(6):066501-1~066501-7
- 68 A. E. Kaplan, P. L. Shkolnikov. Lasatron; a proposed source of powerful nuclear-time-scale electromagnetic bursts [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(7):074801-1~074801-4
- 69 M. Tabak, J. Hammer, M. E. Glinsky *et al.*. Ignition and high gain with ultrapowerful lasers [J]. *Phys. Plasmas*, 1994, **1**(5):1626~1634
- 70 R. Kodama, P. A. Norreys, K. Mima *et al.*. Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step towards laser fusion ignition [J]. *Nature*, 2001, **412**(6849):798~802
- 71 R. Kodama, H. Shiraga, K. Shigemori *et al.*. Fast heating scalable to laser fusion ignition [J]. *Nature*, 2002, **418**(6901):933~934
- 72 S. Atzeni. Inertial fusion fast ignitor; igniting pulse parameter window vs the penetrating depth of the heating particles and the density of the precompressed fuel [J]. *Phys. Plasmas*, 1999, **6**(8):3316~3326
- 73 M. Roth, T. E. Cowan, M. H. Key *et al.*. Fast ignition by intense laser-accelerated proton beams [J]. *Phys. Rev. Lett.*,

- 2001, **86**(3):436~439
- 74 M. H. Key. Fast track to fusion energy [J]. *Nature*, 2001, **412**(6849):775~776
- 75 A. Macchi, A. Antonicci, S. Atzeni *et al.*. Fundamental issues in fast ignition physics; from relativistic electron generation to proton driven ignition [C]. 19th IAEA Fusion Energy Conference, Oct. 2002; IAEA-CN-94/IF-5
- 76 J. H. Nockolls, L. L. Wood. Future of inertial fusion energy [R]. LLNL, UCRL-JC-149860
- 77 M. Takab, D. S. Clark, S. P. Hatchett *et al.*. Review of progress in fast ignition [J]. *Phys. Plasmas*, 2005, **12**(5):057305-1~057305-8
- 78 A. Heller. JanUSP opens new world of physics research [J]. *Sci. & Technol. Rev.*, 2000, **5**:25~27
- 79 R. W. Lee, S. J. Moon, H. K. Chung *et al.*. Finite temperature dense matter studies on next-generation light sources [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2003, **20**(4):770~778
- 80 K. Widmann, G. Guethlein, M. E. Foord *et al.*. Interferometric investigation of femtosecond laser-heated expanded states [J]. *Phys. Plasmas*, 2001, **8**(9):3869~3872
- 81 P. Audebert, R. Shepherd, K. B. Fournier *et al.*. Heating of thin foils with a relativistic-intensity short-pulse laser [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(26):265001-1~265001-4
- 82 P. K. Patel, A. J. Makinnon, M. H. Key *et al.*. Isochoric heating of solid-density matter with an ultrafast proton beam [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(12):125004-1~125004-4
- 83 M. E. Foord, D. B. Reisman, P. T. Springer. Determining the equation-of-state isentrope in an isochoric heated plasma [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(8):2586~2589
- 84 A. Zhidkov, J. Koga, A. Sasaki *et al.*. Radiation damping effects on the interaction of ultraintense laser pulses with an overdense plasma [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(18):185002-1~185002-4
- 85 S. S. Bulanov, A. M. Fedotov, F. Pegorara. Damping of electromagnetic waves due to electron-positron pair production [J]. *Phys. Rev. E*, 2005, **71**(1):016404-1~016404-11
- 86 S. V. Bulanov, T. Zh. Esirkepov, J. Koga *et al.*. Interaction of electromagnetic waves with plasma in the radiation-dominated regime [J]. *Plasma Phys. Rep.*, 2004, **30**(3):196~213
- 87 C. Bula, K. T. McDonald, E. J. Prebye. Observation of nonlinear effects in Compton scattering [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**(17):3116~3119
- 88 B. F. Shen, M. Y. Yu. High-intensity laser-field amplification between two foils [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(27):275004-1~275004-4
- 89 K. Landecker. Possibility of frequency multiplication and wave amplification by means of some relativistic effects [J]. *Phys. Rev.*, 1952, **86**(6):852~855
- 90 F. R. Arutyunian, V. A. Tumanian. The Compton effect on relativistic electrons and the possibility of obtaining high energy beams [J]. *Phys. Lett.*, 1963, **4**(3):176~178
- 91 Y. L. Li, Z. R. Huang, M. D. Borland *et al.*. Small-angle Thomson scattering of ultrafast laser pulses for bright, sub-100-fs x-ray radiation [J]. *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, 2002, **5**(4):044701-1~044701-9
- 92 W. B. Mori. Generation of tunable radiation using an underdense ionization front [J]. *Phys. Rev. A*, 1991, **44**(8):5118~5121
- 93 R. L. Savage, Jr., C. Joshi, Mori. Frequency upconversion of electromagnetic radiation transmission into an ionization front [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(7):946~949
- 94 S. C. Wilks, J. M. Dawson, W. B. Mori *et al.*. Photon accelerator [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **62**(22):2600~2603
- 95 C. W. Siders, S. P. Le Blanc, D. Fisher *et al.*. Laser wakefield excitation and measurement by femtosecond longitudinal interferometry [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**(19):3570~3573
- 96 Z. M. Sheng, Y. Sentoku, K. Mima *et al.*. Generation of one-cycle laser pulses by use of high-amplitude plasma waves [J]. *Phys. Rev. E*, 2000, **62**(5):7258~7265
- 97 J. Faure, Y. Glinec, J. J. Santos *et al.*. Observation of laser-pulse shortening in nonlinear plasma waves [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **95**(20):205003-1~205003-4
- 98 S. V. Bulanov, T. Esirkepov, and T. Tajima. Light intensification towards the Schwinger limit [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **91**(8):085001-1~085001-4