

doi: 10.3788/lop47.093201

高能量密度下激光粒子加速等研究的最新进展和展望

沈百飞 张晓梅

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 高能量密度物理(HEDP)是研究能量密度超过 10^{11} J/m³ 的极端条件下物质结构与特性及变化规律的科学,开展此方面的研究对惯性约束聚变、材料物理、天体物理、加速器物理、国防等具有极其重要的意义。主要介绍了我们在利用飞秒相对论性超强激光进行高能量密度物理研究方面所取得的一些进展,包括电子加速、离子加速(包括质子和重离子)以及其他一些有意义的结果。

关键词 高能量密度;激光;电子加速;离子加速

中图分类号 O437

OCIS 320.2250 320.7710

文献标识码 A

Latest Progress and Prospect of Laser Induced Particle Acceleration under High Energy Density Conditions

Shen Baifei Zhang Xiaomei

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800 China)

Abstract In the field of high energy density physics (HEDP), the structures, characteristics and evolutions of the matter with the energy density of 10^{11} J/m³ are researched. HEDP plays an important role in inertial confinement fusion, material physics, astrophysics, accelerator physics and national defense. Some developments on HEDP by using femtosecond relativistic laser have been shown, including electron acceleration, ion acceleration (proton and heavy ions) and others interesting results.

Key words high energy density; laser; electron acceleration; ion acceleration

1 引言

高能量密度,是指物质的能量密度超过 10^{11} J/m³ (或等价于压力超过 10^6 Pa)的极端物理条件。产生高能量密度物质的一个有效工具是高功率激光。目前所常用的高功率激光有三大类。第一类是纳秒级的高功率固体激光装置,如美国利弗莫尔实验室(LLNL)的 Nova 装置、英国卢瑟福实验室(RAL)的 Vulcan 装置、日本大阪大学激光核聚变研究所的 Gekko XII 装置以及美国的国家点火装置(NIF)等。国内,中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室在神光 I 激光装置的基础上,于 2000 年左右建成神光 II 高功率激光装置;中国工程物理研究院正在建造神光 III 装置。这类高功率纳秒激光主要用于惯性约束聚变(ICF)研究。预计,美国的国家点火装置将在 2010 年实现首次可控的惯性约束聚变点火。在惯性约束聚变的研究中,涉及大量的高能量密度问题,这些问题的解决对内爆压缩、中心点火等都起着至关重要的作用。第二类重要的激光系统为皮秒(10^{-12} s)拍瓦(10^{15} W)激光,目前其最大的牵引目标是惯性约束聚变的快点火方案。当纳秒激光实现了靶丸核燃料的压缩之后,皮秒级点火激光将其能量转换成高能电子或质子的能量,再加热高密度压缩核的一部分,并实现局部小体积的等容点火,最后点燃全部燃料。第三类重要的激光系统为飞秒(10^{-15} s)太瓦(10^{12} W)或拍瓦激光。由于总的输出能量较小,规模通常较小,常为桌面系统。这使得大量的实验室高能量密度物理(HEDP)研究成为可能。超强超短激光的持续迅猛发展,能为人类提供前所未有的实验手段与极端的物理条件。激光聚焦达到的超高光强,在过去的 10 多年里已提高了 7~8 个

收稿日期: 2009-12-15; 收到修改稿日期: 2010-05-17

作者简介: 沈百飞(1967—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光聚变、快点火等方面的研究。

E-mail: bfshen@mail.shcnc.ac.cn

量级,达到了 10^{21} W/cm² 乃至创记录的 10^{22} W/cm² 量级。中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室也建成了目前国际较高功率的飞秒激光装置,激光功率达到 890 TW^[1]。最近,匈牙利、捷克和罗马尼亚一起赢得了欧盟超强激光(ELI)基础设施建设项目,其目标光强大于 10^{24} W/cm²,其规模也不再是桌面系统。ELI 总造价约 4 亿欧元,年运行费用大约 5000 万欧元,预计 2015 年投入运行。匈牙利南部城市赛格德将主要负责 ELI 项目的阿秒级(10^{-18} s)激光科学部分,在阿秒尺度上对原子、分子、等离子体和固态物质进行电子动力学研究。捷克布拉格主要负责高能粒子束部分的研究。而对高能激光和物质相互作用的研究将在罗马尼亚布加勒斯特进行。同时,激光脉冲的超快时间尺度也已小于 10 fs,最短仅几个飞秒,接近于光场的单个振荡周期(如波长 800 nm 对应的周期为 2.7 fs),我们最近提出了实现准单周期相对论激光脉冲的方案,在同时实现更强和更快方面取得了新的进展。这种在实验室就可能创造的极端物理条件,过去只能在核爆中心、恒星内部或黑洞边缘找到。

从物理上说,当激光场的归一化矢势 $a = eA/(mc^2) \geq 1$ (也即光强 $I > 10^{18}$ W/cm²,其中 A 为矢势, c 为真空中光速, e 与 m_e 分别为电子电荷和质量),超强超短激光与物质的相互作用进入相对论性的全新范畴。当 $a = (m_i/m_e)^{1/2} = 43$ ($2 \sim 10^{21}$ W/cm²),等离子体中电子和质子对静电场的影响可比,离子的影响将变得非常重要。当 $a = 1836$,质子将在激光场中作相对论运动,质子振荡运动的相对论效应必须加以考虑。当激光强度达到 Schwinger 临界电场,也即激光强度达到 2×10^{29} W/cm²,强激光的量子电动力学效应将凸现出来。这些全新的物理效应有很多的应用,其中目前得到广泛重视的一个应用就是产生强辐射源。这包括强激光加速电子、质子和重离子,强激光产生中子、正电子、X 射线、 γ 光等。有关物理也是惯性聚变快点火方案的基础。本文主要介绍我们在利用飞秒超短相对论性超强激光进行高能量密度物理研究方面所取得的一些进展。

2 电子加速

传统粒子加速器都是庞然大物,受限于加速器内微波共振腔的崩溃电场,每米能加速的电子能量有限(小于 100 MeV/m)。使用环形加速器虽然能节省空间,但向心加速度会使带电粒子发出辐射而损失能量。因此,这种基于微波技术的加速器,很可能已接近技术和经济可行性的极限,如图 1(b)所示^[2]。以产生 X 光或医学应用为目的的加速器,也同样因为费用的问题,难以普及化。法国和瑞士边界的欧洲核子研究中心(CERN)的大型强子对撞机(LHC),其周长达 27 km。LHC 能够把两束质子加速到 7 TeV 的能量。

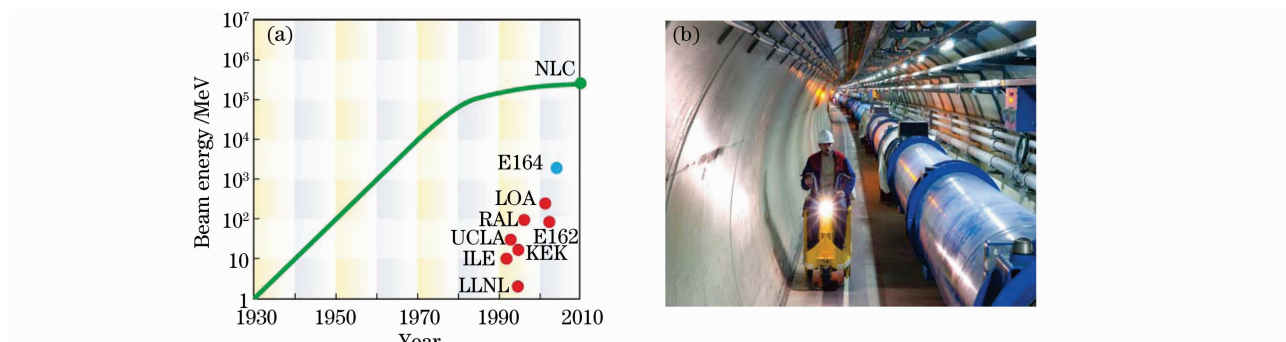


图 1 (a)Livingston 曲线;(b)大型强子对撞机,图片来自 CERN 网站

Fig. 1 (a)Exponential growth of accelerator beam energy, traditionally depicted by the Livingston curve;
(b) CERN's Large Hadron Collider

超短脉冲超强激光的发展为紧凑而高效的电子加速问题的解决提供了一个全新的思路,等离子体中尾波场的加速梯度峰值可以在 1 TV/m 以上,比传统大型加速器的加速梯度大 4~5 个量级以上,这一加速机制使得建造台式化加速器成为可能,并大幅度降低费用。2004 年,美国、英国、法国的实验同时实现了背景等离子体中电子的自注入,得到了单能电子束。以 V. Malka 等^[3]的实验为例,电子束的能量发散降到了 10%,电子数也达到了 10^9 个,角度的发散也比先前的实验结果小得多,这种结果达到了传统微波线性加速器的水平。2006 年,激光加速电子的能量得到进一步提高。Leemans 等^[4]用 40 TW 的超短激光脉冲在

3.3 cm长的等离子体中获得了能量达到 1 GeV 的高性能高能电子束。激光加速电子的稳定性也大大提高。

我们详细研究了空泡中高能电子的细微结构^[5],发现“空泡”机制加速电子时,电子束在“空泡”中的正弦形微结构,如图 2 所示。这一结构的周期初始为 660 nm,后逐渐变为 800 nm(激光波长为 820 nm)。该微结构来源于激光场驱动的相干电子回旋加速(betatron)振荡,它导致“空泡”机制固有的高能电子发散度的不对称性,即高能电子在激光极化方向上的发散度要远大于垂直激光极化方向。研究表明,激光脉冲整形可以抑制上述振荡的形成,从而改进电子束性能。这一周期性结构在实现台式化自由电子激光方面可能会有其应用。

在激光电子加速实验中,有效控制高能电子的注入是其中的关键技术。通过控制电子注入的电量以及注入的空间位置,可获得所需的高能电子参数,如最终能量、能散度、电子束总电量等。Faure 等^[6]利用外加来自相反方向的较弱的控制激光的方法,成功实现了电子注入的控制,但其总的高能电子电荷数比较小,大约为 20 pC。我们也提出了一种控制电子注入的方法,即利用纳米丝来控制电子的注入。在用于电子加速实验的气体中放入一根纳米丝^[7],同时降低驱动激光的功率,这样激光能激发起一个稳定的三维尾场结构(即空泡),但还不足以引起电子的自注入。当驱动激光遇到纳米丝时,激光将纳米丝电离,使得除了激光激发的尾场外又有一个新的电场,从而导致标势也有变化。当标势的变化达到一定值时,背景等离子体中的电子就可以被尾场捕获,进而不断被加速,最后得到很高的电子能量,利用这一方法得到的高能电子和反向激光法相比,使用的激光稍弱,得到的电子能量和能散度基本相同,但总电荷量达到 90 pC。

评价高能电子束的性能,除了电子能量外,能量发散度、准直性、电荷电量等都非常重要。当高能电子束的电量较大时,这团电子束本身的电荷分离场就比较大,它会使电子束前段的电子跑得更快、后端跑得更慢,从而影响能散度。另一方面尾场中静电场的结构则是空泡尾部最大,其他地方较小。如果这两个场的斜率大小刚好相同,则所有电子都能得到相同的加速,这样就有很小的能散度。但是空泡中尾场的斜率是变化的,靠近空泡尾部的地方,斜率比较大,空泡中间则斜率比较小。因此我们的方法就是选定一个合适的位置,即加速相位,然后希望电子一直在这个位置得到不断的加速。具体办法是使等离子体密度在激光前进的方向上不断增加。我们认为电子束的速度近似为光速,而空泡前端的速度略小于光速,因此电子束相对于空泡前端的距离在不断减小。由于等离子体密度在不断增加,等离子体波长不断减小。空泡的大小约为等离子体波长,因此空泡也不断减小。这样电子在空泡尾场中的加速相位可以保持在一个稳定的值,如图 3 所示。用这种方法可以有效地减小高能电子束的能散度。

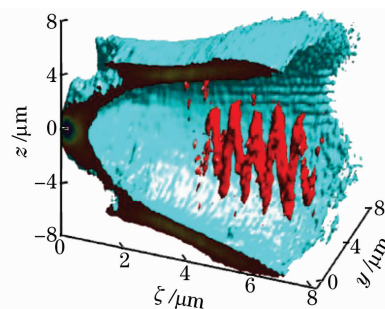


图 2 等离子体空泡中,高能电子束的微观结构,周围为空泡的壁,中间正弦装结构为高能电子

Fig. 2 Micro-structure of energetic electron beam in the bubble regime. The bubble shell and the electron beam are noted by the blue and red colors

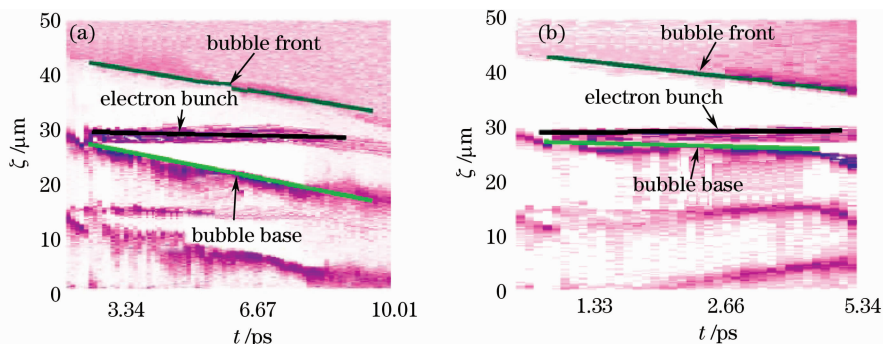


图 3 有密度变化(a)和无密度变化(b)时电子密度的时空演化

Fig. 3 Spatial-temporal evolutions of electron density with (a) and without (b) density change

为了增加高能电子束的总电量,我们采用的方法是使用大焦斑激光和等离子体相互作用。利用空泡机制加速电子,加速电子的最大数量通常为空泡排开电子的30%。优化的激光焦斑尺寸近似为等离子体波长,这时因为空泡的尺寸为等离子体波长,空泡所排开的总电子数和等离子体密度的平方根成反比,即密度越低,排开的电子越多,从而加速的电子数量也越多。但是低密度是用来获得更高的电子能量的,这和我们希望获得较低能量但数量很多的高能电子束的目标相背离。

现在我们采用大焦斑激光脉冲、激光和等离子体相互作用时,可形成一个比较复杂的空泡结构,如图4所示。除了原来的小空泡外,外面还有一个更大的空泡。如果激光焦斑更大,则会形成更大、更复杂的空泡结构。总体上这个大空泡的横向尺寸大约就是激光焦斑。这时空泡中总共排开的电子数和等离子体密度的平方根成正比,从而有可能获得能量相对较低、但数量比较大的高能电子束,数值模拟表明,利用1.5 PW, 30 fs, 焦斑尺寸为60 μm 的超强激光脉冲可产生大约45 nC, 平均能量约100 MeV 的高能电子束。

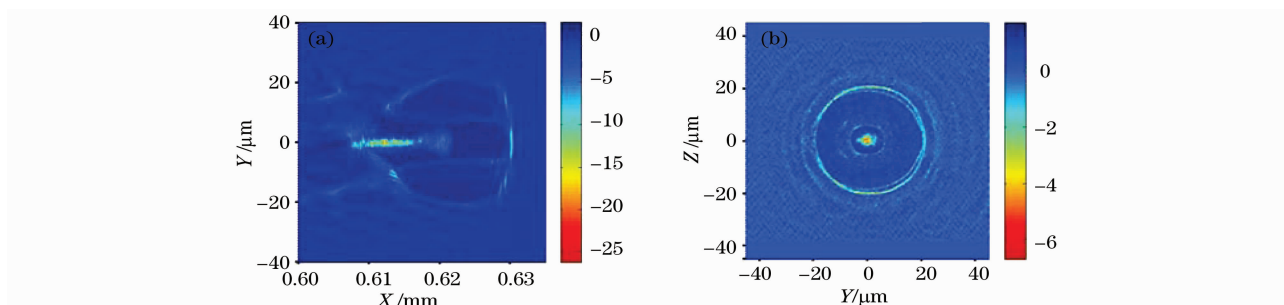


图4 (a) X-Y平面和(b)Y-Z平面空泡电子密度图。激光沿X方向传播

Fig. 4 Density distribution of the electron bubble in X-Y space (a) and Y-Z space (b). The laser pulse propagates in X direction

3 离子加速

激光加速粒子的另一重要方面则是质子和离子加速。利用靶后鞘层加速,美国LLNL于2000年获得了约60 MeV的高能质子^[8],使得激光加速质子这一研究领域开始得到国际上的广泛关注,靶后鞘层加速目前仍是国际上最受关注的激光加速质子机制,2009年洛斯阿拉莫斯国际实验室利用锥结构靶^[9]在实验中用80 J的激光能量便能获得67.5 MeV的质子,但质子能量发散度很大。2006年,Toncian等^[10]利用受皮秒激光脉冲辐照的空心毛细管产生的径向静电场,对激光薄膜靶相互作用产生的宽能谱质子源进行聚焦,在选定的空间位置得到了窄能宽的聚焦质子束。Schwoerer等^[11]和Hegelish等^[12]分别利用微结构靶(20 $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m} \times 0.5 \mu\text{m}$ 的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)或1 nm左右厚度的碳层)获得了准单能的离子束[1.2 MeV能量的质子,能散约20%和3 MeV/u(u为原子质量单位)的碳离子,能散度约17%]。另外,由于激光光压直接加速机制以及静电激波加速机制在实现单能加速以及吉电子伏特(GeV)质子加速方面的优点,也正得到国际上广泛的关注。在空泡机制加速质子的新方案下,利用混杂重离子来增加加速梯度,可将质子加速到几十吉电子伏特的能量^[13~15]。

针对靶后壳层加速机制加速效率比较低的特点,我们系统研究了静电激波机制加速离子。长久以来,人们研究离子加速大多选用线偏振激光,线偏振激光脉冲作用下有质动力的振荡项产生的热电子对以往的几种加速机制起主要作用。而当圆偏振激光作用时,由于有质动力只包含稳定项,没有能够有效加热电子的振荡项,因此等离子体靶的加热效应较弱,从而使得光压的效应凸显出来。

2007年至今,我们利用粒子模拟和理论解析详细研究了这种圆偏振激光脉冲与固体靶相互作用下对离子的加速机制,并得到一系列非常有意义的结果。我们发现当中等强度(10^{18} W/cm^2)的圆偏振激光脉冲作用在相对较厚的固体靶上时,激光光压首先推动质量较轻的电子,与离子间产生的静电分离场非常稳定,可以较长时间加速离子,离子在加速场内呈现出不断被反射的过程,类比传统静电激波加速理论,我们提出这种加速机制即为光压驱动的静电激波加速机制^[16]。当所有的离子都被加速到具有相同速度的单能态时便得到了单能离子源。如果激光脉冲持续,靶前仍形成相同的静电场对离子进行二次加速到更高单能态。参数合适时,离子会受到更多次加速。因而,利用这种多次加速机制,可以在某些特定时刻(可求)获得单能性

较好的离子源^[17]。在此基础上,我们详细研究了圆偏振激光作用下等离子体背景温度对静电激波产生及离子加速的影响。结果表明,较低的初始离子温度对应于更加单能的离子源,而较高的初始离子温度对应于被反射离子的较高能量^[18]。当此种超强圆偏振激光与薄膜靶相互作用时,在较短的时间内薄膜靶即被加速多次,宏观上呈现整体加速,产生吉电子伏特的准单能离子,且激光能量转换成离子能量效率远大于50%,质子产额在 10^{10} 量级^[19,20]。最近我们还研究了圆偏振激光强度对靶前电子离子推拉(push and pull)运动机制的影响,通过对产生的静电分离场和离子运动特点的研究,发现靶前静电场和粒子密度的周期性变化是激光激发出来的等离子体本征特性,这为实验上实现靶前离子加速提供了理论参考^[21]。通过研究圆偏振激光脉冲与混合固体靶相互作用过程中轻离子和重离子的加速过程以及激光和靶参数对这种加速机制的影响,发现这种加速机制对混合靶中的重离子加速更有效,并提出了实验上较容易实施的准单能重离子束产生方案^[22,23]。即通过三维粒子模拟,采用脉宽为22个激光周期,归一化峰值振幅为 $a=4$ 的激光作用在嵌有混杂小靶的微结构靶上时,获得能散度约为5%能量为58 MeV的碳离子,产额约为 3.36×10^8 个,如图5所示。因此光压驱动薄膜靶整体加速是目前获得高性能离子束最有潜力的方案。近两年来,国内外其他研究小组对此加速机制也产生了浓厚的兴趣,Klimo等^[24]和Robinson等^[25,26]分别对圆偏振激光脉冲与超薄混合靶的相互作用和超高强度的圆偏振激光脉冲与混合靶的相互作用等进行了研究,均得到了很有意义的结果。其他各种参数例如初始等离子体靶的密度及厚度^[27~31]对这种加速机制的影响也得到了初步研究。在有效抑制多维效应方面,对激光的横向分布及靶的结构设计都获得较好的效果^[32~36]。Chen等^[32~35]采用横向上与激光强度匹配的薄靶厚度分布减弱激光与薄膜靶相互作用烧孔(hole boring)过程引起的靶变形影响。另一方面,Qiao等^[36]提出更有效的稳定光压加速过程分为烧孔(hole boring)和光帆(light sail)两个阶段。

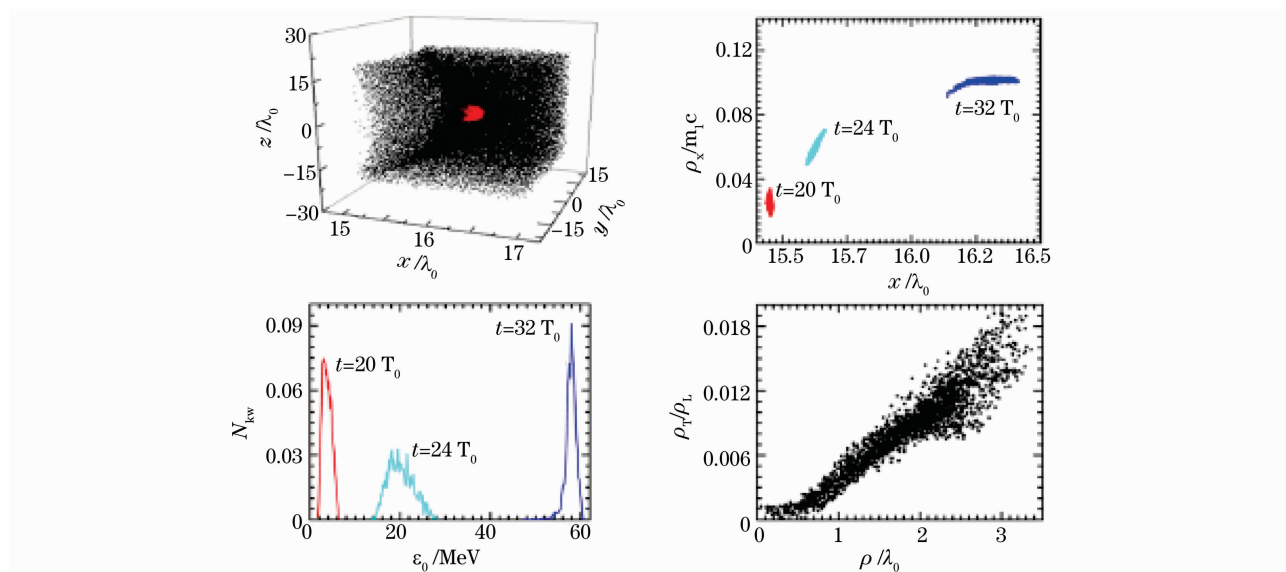


图5 准单能碳离子的产生

Fig. 5 Quasi-monoenergetic carbon ions generation

4 其他研究

利用超短超强激光还可以进行其他一些高能量密度物理研究。中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室利用飞秒拍瓦级激光装置,开展了高强度、大能量的超强超短激光与高密度、更大尺寸异核氙代甲烷团簇的相互作用实验研究,获得因激发强烈库仑爆炸而产生的极高能量的氙离子,每焦耳激光能量产生 2.1×10^6 个中子,利用氙、氙聚变反应还可产生更多的中子^[36~38]。利用固体中的聚变反应及束聚变,有可能获得更高的中子,并可能使产生的中子具有一定的方向性,从而可以利用这样的中子源进行诊断研究。

相对论激光和固体作用,可以很容易地将电子能量加速到 $3mc^2$ ($mc^2=511$ keV)以上。这时可以通过两种途径产生正负电子对。一是电子的轫致辐射产生 γ 光子,再产生正负电子对^[39]。另一种高能电子在高Z

物质中,通过虚光子交换直接产生正负电子对^[40]。目前实验上已经可以产生大量的正负电子对^[41]。

超短超强激光还可以产生强 X 光源。利用飞秒或皮秒拍瓦激光产生大电荷量的超热电子可产生高亮度的 $K\alpha$ X 射线(20~100 keV)。强激光加速产生的几十兆电子伏特的电子可产生兆电子伏特量级的 γ 光。比如利用 4 束激光建立高能 2000 J/(1-50) ps 帕瓦束,用于产生高亮度(20~100 keV)X 射线用于 ICF 靶的多分幅闪光照相。利用超短超强激光产生 X 光甚至 γ 光的另一种办法是相对论高次谐波。当相对论强激光和固体表面相互作用时,表面电子由于相对论效应在激光场中作非线性振荡,由此产生的非线性汤姆逊散射就可以产生极强的高次谐波。利用等离子体飞镜来获得强 X 光的方案近来也得到重视。强激光和薄膜靶相互作用可以使靶中的电子或者靶作为一个整体推到很高的速度。反向传来的激光被这个快速运动的等离子体飞镜反射,由于多普勒效应的存在,反射激光的频率上移(蓝移)而变成 X 光。另外等离子体对超短超强激光的调制也非常有趣。我们曾经研究过相对论激光在两个薄膜靶之间的放大,激光强度可放大 100 倍。最近我们又研究了圆偏振激光入射到高密度薄膜靶时,如果参数满足一定条件,靶的透过率就会受到入射激光的非线性调制,即激光强度越大,对应的靶透过率越高,如此则激光强度较大的部分得以透过,而较小的部分被靶反射或吸收,最后产生一个脉宽远小于入射激光脉冲的透射脉冲。当入射激光的脉宽减小到一定程度时,就会产生一个准单周期的透射脉冲,如图 6 所示。由于仅仅涉及激光与等离子体作用,与传统光学途径产生超短脉冲相比,不存在光学器件的损伤阈值问题,因此可以得到极高的、相对论强度的准单周期激光脉冲。我们采用波长为 $1 \mu\text{m}$,峰值功率为 10^{21} W/cm^2 ,脉宽为 $4T_0$ 的圆偏振激光脉冲,密度为 $8n_c$ 的薄膜靶(T_0 为激光周期, n_c 为临界密度),通过计算与模拟,得出最佳靶厚为 $d=0.7 \mu\text{m}$,一维粒子模拟显示,可以产生一个 $4.3 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$, $1.1T_0$ 的准单周期相对论脉冲^[42]。这种激光对产生高强度的阿秒激光脉冲等具有重要意义。

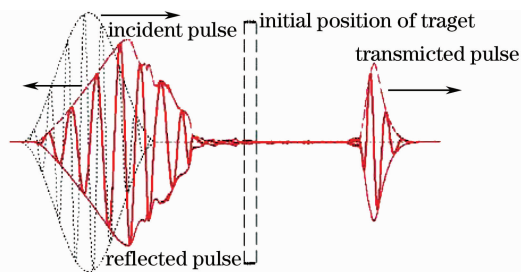


图 6 透射脉冲产生示意图

Fig. 6 Scheme for generating a near-single cycle laser pulse

5 应用及展望

超短超强激光产生的强辐射源具有广泛的应用。质子束由于其很好的穿透性和方向性,在测量高密度物质的密度、电磁场方面具有重要应用。能量约为 20 MeV 的质子束(可通过聚变反应或激光加速产生),可用于惯性约束聚变压缩靶丸密度、电磁场的测量。激光加速产生的质子束在产额、方向性、脉宽、能量可调等方面都具有很大优势。能量为吉电子伏特量级的质子束由于其极大的穿透性,可用于大尺寸稠密物质的无损探测。同时,兆电子伏特的质子(非单能)可用于临床正电子断层扫描所需放射性药物制备,200 MeV 质子可用于癌症治疗。

超短超强激光所涉及的高能量密度物理和以能源为目标的惯性聚变密切相关,特别是和快点火方案研究直接相关。超短超强激光产生高能电子及其传输和沉积是快点火方案中的关键问题。聚变新方案的提出也有赖于高能量密度物理研究的深入。比如最近提出的利用静电激波加速产生的质子束来进行点火的方案就和前面所讨论的研究内容直接相关。

同时随着激光技术的飞速发展,高能量密度物理也将不断进入新的极端物理条件。例如当归一化的激光振幅达到 $a=1836$,需要考虑质子在激光场中振荡产生的相对论效应,这时激光对质子加速等将作全新考虑。当激光强度达到 Schwinger 临界电场,也即激光强度达到 $2 \times 10^{29} \text{ W/cm}^2$,强激光的量子电动力学效应将凸现出来。激光在真空中就能产生正负电子对,这被称为真空沸腾。另外像光光散射、真空极化等电子电动力学效应的研究将得以展开。

参 考 文 献

- 1 X. Liang, Y. Leng, C. Wang *et al.*. Parasitic lasing suppression in high gain femtosecond petawatt Ti: sapphire amplifier [1]. *Opt. Express*, 2007, **15**(23): 15335~15341

- 2 C. Joshi, T. Katsouleas. Plasma accelerators at the energy frontier and on tabletops [J]. *Physics Today*, 2003, **56**(6): 47~53
- 3 V. Malka, J. Faure, Y. Glinec *et al.*. Monoenergetic electron beam optimization in the bubble regime [J]. *Physics of Plasmas*, 2005, **12**(5): 056702
- 4 W. P. Leemans, B. Nagler, A. J. Gonsalves *et al.*. GeV electron beams from a centimetre-scale accelerator [J]. *Nature Physics*, 2006, **2**(10): 696~699
- 5 K. Nemeth, B. G. Shen, Y. L. Li *et al.*. Laser-driven coherent betatron oscillation in a laser-wakefield cavity [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **100**(9): 095002
- 6 J. Faure, C. Rechatin, A. Norlin *et al.*. Controlled injection and acceleration of electrons in plasma wakefields by colliding laser pulses [J]. *Nature*, 2006, **444**(7120): 737~739
- 7 B. F. Shen, Y. L. Li, K. Nemeth *et al.*. Electron injection by a nanowire in the bubble regime [J]. *Physics of Plasmas*, 2007, **14**(5): 053115
- 8 R. A. Snavely, 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
- 9 Edwin Cartledge. Laser creates record-breaking protons [J]. *Physicsworld*, 2009, 9
- 10 T. Toncian, M. Borghesi, J. Fuchs *et al.*. Ultrafast laser-driven microlens to focus and energy-select mega-electron volt protons [J]. *Science*, 2006, **312**(5772): 410~413
- 11 H. Schworer, S. Pfotenhauer, O. Jackel *et al.*. Laser-plasma acceleration of quasi-monoenergetic protons from microstructured targets [J]. *Nature*, 2006, **439**(7075): 445~448
- 12 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
- 13 B. F. Shen, Y. L. Li, M. Y. Yu *et al.*. Bubble regime for ion acceleration in a laser-driven plasma [J]. *Phys. Rev. E*, 2007, **76**(5): 055402
- 14 B. F. Shen, X. M. Zhang, Z. M. Sheng *et al.*. High-quality monoenergetic proton generation by sequential radiation pressure and bubble acceleration [J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2009, **12**(12): 121301
- 15 X. M. Zhang, B. F. Shen, M. Wen *et al.*. in preparation (2009)
- 16 X. M. Zhang, B. F. Shen, Y. Cang *et al.*. Steady state ion acceleration by a circularly polarized laser pulse [J]. *Phys. Lett. A*, 2007, **369**(4): 339~344
- 17 X. M. Zhang, B. F. Shen, X. M. Li *et al.*. Efficient GeV ion generation by ultraintense circularly polarized laser pulse [J]. *Physics of Plasmas*, 2007, **14**(12): 073101
- 18 X. M. Zhang, B. F. Shen, M. Y. Yu *et al.*. Effect of plasma temperature on electrostatic shock generation and ion acceleration by laser [J]. *Physics of Plasmas*, 2007, **14**(11): 113108
- 19 B. F. Shen, Z. Z. Xu. Transparency of an overdense plasma layer [J]. *Phys. Rev. E*, 2001, **64**(5): 056406
- 20 X. M. Zhang, B. F. Shen, X. M. Li *et al.*. Efficient GeV ion generation by ultraintense circularly polarized laser pulse [J]. *Physics of Plasmas*, 2007, **14**(12): 123108
- 21 X. M. Zhang, B. F. Shen, Z. Y. Jin *et al.*. Generation of plasma intrinsic oscillation at the front surface of a target irradiated by a circularly polarized laser pulse [J]. *Physics of Plasmas*, 2009, **16**(3): 033102
- 22 L. L. Ji, B. F. Shen, X. M. Zhang *et al.*. Generating monoenergetic heavy-ion bunches with laser-induced electrostatic shocks [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **101**(16): 164802
- 23 X. M. Zhang, B. F. Shen, L. L. Ji *et al.*. Ion acceleration with mixed solid targets interacting with circularly polarized lasers [J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2009, **12**(2): 021301
- 24 O. Klimo, J. Psikal, J. Limpouch *et al.*. Monoenergetic ion beams from ultrathin foils irradiated by ultrahigh-contrast circularly polarized laser pulses [J]. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2008, **11**(3): 031301
- 25 A. P. L. Robinson, M. Zepf, S. Kar *et al.*. Radiation pressure acceleration of thin foils with circularly polarized laser pulses [J]. *New Journal of Physics*, 2008, **10**(01): 013021
- 26 A. P. L. Robinson, P. Gibbon, M. Zepf *et al.*. Relativistically correct hole-boring and ion acceleration by circularly polarized laser pulses [J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2009, **51**(2): 024004
- 27 A. R. Holkundkar, N. K. Gupta. Effect of initial plasma density on laser induced ion acceleration [J]. *Physics of Plasmas*, 2008, **15**(12): 123104
- 28 Y. Yin, W. Yu, M. Y. Yu *et al.*. Influence of target thickness on the generation of high-density ion bunches by ultrashort circularly polarized laser pulses [J]. *Physics of Plasmas*, 2008, **15**(9): 093106

- 29 X. Q. Yan, C. Lin, Z. M. Sheng *et al.*. Generating high-current monoenergetic proton beams by a circularly polarized laser pulse in the phase-stable acceleration regime [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **100**(13): 135003
- 30 X. Q. Yan, T. Tajima, M. Hegelich *et al.*. Theory of laser ion acceleration from a foil target of nanometer thickness [J]. *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 2010, **98**(4): 711~721
- 31 L. L. Ji, B. F. Shen, X. M. Zhang *et al.*. Comment on "generating high-current monoenergetic proton beams by a circularly polarized laser pulse in the phase-stable acceleration regime" [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **102**(23): 239501
- 32 M. Chen, A. Pukhov, T. P. Yu *et al.*. Enhanced collimated GeV monoenergetic ion acceleration from a shaped foil target irradiated by a circularly polarized laser pulse [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **103**(2): 024801
- 33 For detailed information, see the website: <http://arxiv.org/abs/0906.2321v1>
- 34 M. Chen, A. Pukhov, Z. M. Sheng *et al.*. Laser mode effects on the ion acceleration during circularly polarized laser pulse interaction with foil targets [J]. *Physics of Plasmas*, 2008, **15**(11): 113103
- 35 For detailed information, see the website: <http://arxiv.org/abs/0906.2455v1>
- 36 B. Qiao, M. Zepf, M. Borghesi *et al.*. Stable GeV ion-beam acceleration from thin foils by circularly polarized laser pulses [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **102**(14): 145002
- 37 H. Y. Lu, J. S. Liu, C. Wang *et al.*. Temporal optimization of neutron generation from the exploding deuterated methane jet of clusters subjected to an intense laser pulse [J]. *Physics of Plasmas*, 2009, **16**(8): 083107
- 38 H. Y. Lu, J. S. Liu, C. Wang *et al.*. Efficient fusion neutron generation from heteronuclear clusters in intense femtosecond laser fields [J]. *Phys. Rev. A*, 2009, **80**(5): 051201
- 39 B. F. Shen, J. Meyer-ter-Vehn. Pair and γ -photon production from a thin foil confined by two laser pulses [J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **65**(1): 016405
- 40 E. P. Liang, S. C. Wilks, M. Tabak. Pair production by ultraintense lasers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**(22): 4887~4890
- 41 H. Chen, S. C. Wilks, J. D. Bonlie *et al.*. Relativistic positron creation using ultraintense short pulse lasers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **102**(10): 105001
- 42 L. L. Ji, B. F. Shen, X. M. Zhang *et al.*. Generating quasi-single-cycle relativistic laser pulses by laser-foil interaction [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **103**(21): 215005