

超短超强激光等离子体相互作用研究的进展及其潜在的应用

王光昶^{1,2}, 郑志坚², 杨向东¹, 吴云波³, 张双根^{1,2}

(1. 四川大学 原子分子物理研究所, 四川 成都 610065; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 3. 四川大学 计算机学院, 四川 成都 610065)

摘要: 从激光技术的发展、超短超强激光等离子体相互作用研究的特点、方法、内容及其潜在的应用等5个方面对强场物理在国内外的情况作了论述, 进一步指出强场物理的实验研究及其应用依赖于激光装置的发展, 而超短超强激光技术的发展又使得强场物理的研究变得更具前景、更具挑战性。

关键词: 超短超强激光; 等离子体; 强场物理; 激光技术

中图分类号: TN29 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8395(2005)04-0484-05

0 引言

爱因斯坦在光量子论的基础上发展了自发辐射和受激辐射理论, 预言了原子产生受激辐射放大的可能性。经过人们的艰苦探索, 直到20世纪50年代初才知道通过粒子数反转状态的原子、分子系统产生受激辐射放大的原理。1951年首先提出了微波受激辐射的概念, 1954年研制出微波量子放大器(Maser)。1954年提出将微波量子放大器(Maser)推广到光学波段(Laser)的建议。1960年研制成世界第一台红宝石激光器, 从此人们对光的利用及其相应的科学技术进入了一个崭新的阶段。激光等离子体相互作用和数值模拟随着激光技术、激光聚变、X-光激光的发展而不断丰富并逐步形成新兴的应用等离子体学科——强场物理^[1~4]。

1 激光技术的发展

自从1964年第一台激光器建成后, 由于激光在强度、单色性等方面的优势, 使它在各个领域都得到了广泛的应用。追求高功率输出一直是激光技术的目标之一。早期提高输出功率的主要手段是缩短脉冲宽度, 20世纪60年代调Q技术(Q-switched)和自锁模(Self-mode-locking)技术的发展将激光脉冲宽度缩短到ns和ps($1\text{ ps} = 10^{-12}\text{ s}$)。峰值功率提高了6个数量级, 达到GW($1\text{ GW} = 10^9\text{ W}$)水平。在这样高的功率密度下, 光学材料的非线性折射效应引起的自聚焦(Self-focusing)和成丝(Filamen-

tation), 造成材料破坏并降低光束质量。在其后20年时间内提高峰值功率的技术手段没有重大突破, 主要靠增加光学口径和束数来提高总峰值功率。

直到20世纪80年代中后期, 引入掺钛蓝宝石(Ti:sapphire)和啁啾放大(Chirped Pulse Amplification)技术^[5], 二者结合给超短脉冲激光技术发展带来了一次革命。掺钛蓝宝石晶体具有宽带高增益和良好的热性能等优点, 是非常理想的超短脉冲激光工作介质^[5]。啁啾放大技术(CPA)的基本原理如图1。

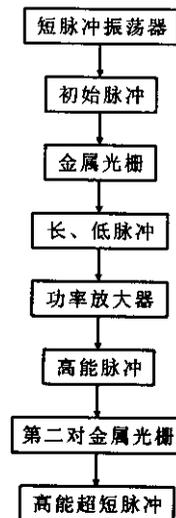


图1 CPA激光器的基本原理
Fig.1 Basic elements of CPA laser apparatus

从宽带超短脉冲($< 10^{-12}\text{ s}$)振荡器发出的超短激光脉冲先通过一个色散延迟光学元件(例如

光栅)使其脉冲宽度得到 $10^3 \sim 10^5$ 倍的展宽,然后注入激光放大器中进行放大,以得到尽可能大的能量.由于此时的激光脉冲很宽,所以放大后的激光脉冲光强仍低于激光介质的破坏阈值.在激光放大器之后,再通过一个共轭色散补偿光学元件,把放大后的激光脉冲再压缩回到原来的脉冲宽度.这样既可以保证有高的通量以实现高的抽取效率,又避免了非线性效应.

20世纪90年代以后,世界上许多大学和实验室相继建立了小型装置,脉冲宽度多为亚 ps 至数十 fs,输出能量多小于几百 mJ,输出功率大多不超过 10 TW,聚焦功率密度一般低于 10^{18} W/cm^2 ($1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$).这些装置的建立给物理学带来了新的机遇.科学家纷纷探索新现象、新规律和潜在的应用^[6].在激光聚变研究的需求下,从事激光聚变的各大实验室纷纷投入力量将 CPA 技术与已有的大型激光器相耦合.美国利弗莫尔实验室(LLNL)、日本大板大学激光工程研究所(ILE)、英国卢瑟福实验室(RAL)、法国里梅尔实验室(Limeil)^[7-12]等把这一技术与用于激光聚变研究的高功率固体激光器相耦合,形成了全新的一代高功率超短脉冲固体激光器,这些激光器脉冲宽度一般为数百 fs ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$),输出能量数十至数百 J,输出功率大都高于 50 TW,甚至超过 1 PW,聚焦功率密度高达 $10^{19} \sim 10^{21} \text{ W/cm}^2$.

这种新型超短脉冲激光不仅可产生远大于原子内电场的超强电场,而且可以产生大于 10^{11} bar 的超高压和 10^4 T 的超强磁场,可以产生温度高达 10^9 K (远大于太阳的温度)的黑体辐射.在这样强的电场中,电子的振荡速度接近光速.这将给天体物理、材料科学、等离子体物理、激光核聚变、原子物理、非线性光学、相对论物理、凝聚态物理、激光物理、加速器物理、高能物理及其它许多应用学科带来巨大冲击和机遇.

几年前我国有几所大学和研究所购置或建立了台式超短脉冲激光装置,它们的输出功率多为 10 TW 以下,聚焦功率一般不超过 10^{15} W/cm^2 .现在,具有用于研究激光聚变等离子体物理大型激光装置的研究所已经把 CPA 技术与大型激光器相耦合进行了研制.例如,中国工程物理研究院激光聚变研究中心于 2000 年建造了 3 TW 掺钛蓝宝石超短脉冲激光装置,聚焦功率为 10^{15} W/cm^2 .2002 年底,在 3 TW 激光装置

的基础上,采用 CPA 技术,使超短脉冲激光装置升级到 20 TW,聚焦功率为 10^{18} W/cm^2 .到了 2004 年已升级到 100 TW,输出功率多达 200 TW,聚焦功率可达到 10^{21} W/cm^2 ,很好地开展了强场物理实验研究.

2 超短超强激光等离子体相互作用的特点和研究进展

由于啁啾脉冲放大技术(CPA)引入,超短脉冲激光技术得到飞速发展.激光脉宽进入到 ps 和 fs 范围,能量从几个 J 到几百 J,输出功率从几个 TW 到几个 PW ($1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$),聚焦功率密度从原来的 10^9 W/cm^2 提高到 10^{15} W/cm^2 ,再达到 10^{21} W/cm^2 .

当功率密度大于 10^{18} W/cm^2 时,具有强的相对论效应.此时,靶面激光电场 $E = \sqrt{\frac{2I}{\epsilon_0 c}}$,其中 ϵ_0 是真空介电常数, c 为光速.将数据代入,则 $E = 3.14 \times 10^{12} \text{ V/m}$,这个电场已超过氢原子第一玻尔半径轨道上电子的库仑场 ($5.14 \times 10^{11} \text{ V/m}$).功率密度达到 $10^{20} \sim 10^{21} \text{ W/cm}^2$,这样强的功率密度带来了实验室中前所未有的强电场、强磁场、高压强和高温度的极端物理条件.这样强的光场下激光与物质(或等离子体)相互作用属强场(或极端)物理范畴.此时电场已达数十至数百倍于氢原子第一玻尔半径库仑场,电子的颤动(Quiver)能将达到 10 MeV 量级,远大于其静止能量 $m_0 c^2 = 0.5 \text{ MeV}$.光压 $P = I/c$,则达到 10 ~ 50 PPa,即约 10^{11} 大气压.这和激光聚变所涉及的激光 ($I = 10^{15} \text{ W/cm}^2$) 等离子体相互作用有显著的不同.比如激光吸收机制,激光等离子体不稳定性,它的应用范围,实验诊断仪器和方法,处理问题的方法都有差异甚至截然不同.激光功率密度从 $10^{16} \sim 10^{21} \text{ W/cm}^2$ 是一个很大的跨度,所能产生的物理现象和所能研究的物理问题不尽相同.许多科学家在众多领域中已经或正在努力探索.这些领域如 ICF(Inertial Confinement Fusion)快点火,高能量密度物理,高强度 X 射线辐照源,离子加速,产生 X 射线激光,产生激光高次谐波,产生中子,天体物理等.

LLNL 等激光聚变研究单位建造大型激光装置的目的是为研究 ICF 快点火.ICF 是利用激光(直接驱动)或激光照射高 Z 材料转换成的亚千电子伏的 X 光(间接驱动)去加热装有聚变燃料的微球靶丸表面,表面物质形成等离子体,高速外喷,如火箭原

理一样,靶内的燃料被压缩.按 ICF 常规概念,燃料必须压缩到铅密度的 20 倍,温度达到 1×10^9 °C 才能实现点火.这样,要求非常多的能量和极高的对称性与均匀性.而设想中的 ICF 快点火概念,是当燃料压缩至密度最大时,利用一束激光在等离子体中建立一条通道,并沿此通道将另一束短脉冲高强度激光束注入至被压缩的燃料区边缘,高强度激光产生大量超热电子,由这些超热电子加热燃料,使其点火并燃烧.理论上认为,快点火方式会较多的降低所需总激光能量及精密化要求.

新建成的 JanUSP 装置因其无与伦比的 2×10^{21} W/cm² 功率密度和 10^{10} 的主脉冲对比度正吸引着科学家去探索新的高温和高密度等离子体物理学领域^[9].他们设想利用 JanUSP 激光束照射铝箔或金箔(5×10^{-7} m 厚)靶,异乎寻常的高压(100 PPa 量级)会使大量电子前向飞出,从而拉出质子.这些离子的速度可达 8 000 km/s,约光速的 3%.将这些离子沉积到铀之类的重金属中,射程仅 $5 \sim 10$ μm,会在该薄层内产生 1 keV 的高温等离子体而且是热

平衡的.这种等离子体与星体中心和核爆炸中的类似.产生如此高能量密度等离子体在以往的激光等离子体实验中都不具备条件,预脉冲会首先产生低密度等离子体,主脉冲能量需通过低密度等离子体中的电子加热靶物质.JanUSP 的高强度和小预脉冲能量使其可将激光能量直接耦合给离子从而产生高密度等离子体.在实验室中首次建立起这种条件,这将加深对极端物态条件下物质特性的理解.

因此,超短脉冲激光的独特性能使其具有重要的科学价值,同时又具有广阔的应用前景^[8].

3 超短超强激光等离子体相互作用研究内容和方法

目前国际上一些主要国家建立的高能密度物理研究室特别重要的研究内容之一就是激光等离子体相互作用.随着惯性约束聚变(ICF)快点火(Fast Ignition)概念的提出,超短超强激光脉冲同物质(等离子体)的相互作用变成一个重要方面^[13].超短超强激光脉冲同物质相互作用的典型参数如表 1.

表 1 超短超强激光脉冲同物质相互作用的典型参数

Table 1 Representative parameter of ultrashort ultraintense laser-plasma interactions

参数	激光强度 I	激光脉冲 τ	电场强度 E	磁场强度 B	温度 T	辐射场 E_γ	光压 P_γ	速度 v	加速度 a	粒子耦合
量级	I 大于 10^{18} W/cm ² , 可高达 10^{21} W/cm ²	ps 级或 fs 级	大于 10^{12} V/cm, 比原子内电场高 3 个量级	10^5 T 基态氢原子 ($B_0 = 2.35 \times 10^5$ T)	10^9 K (太阳中心为 1.5×10^7 K)	2.75×10^{15} W/cm ² , 比一般高几个量级	10^9 bar	电子速度可接近光速 c	10^{21} G, 可作引力波研究	电子和离子之间超强耦合

这些物理条件是以前从未达到过的,这必然伴随着产生一些新的特点:(1)以往常用的微扰理论不适用于在超强激光等离子体相互作用研究中使用,需要发展新的非微扰理论;(2)由于速度很高,电子速度可接近光速,超相对论效应尤为重要;(3)由于超强的光压,很高的有质动力效应必然产生新的物理现象,例如穿孔效应;(4)由于激光脉冲足够短,靶物质在超强激光作用下的高电离率和离子惯性.

超强超短激光等离子体相互作用研究内容十分广泛,主要有以下几个方面:超强超短激光与固态物质、原子或团簇的相互作用及电离机制,超强超短激光在等离子体中的传播、吸收,超强超短激光等离子体不稳定性,超热电子产生机理和份额,超强超短激光等离子体中的自生磁场及其影响,快点火机理及其粒子模拟,高次谐波的产生及其应

用,超强超短激光等离子体的其它应用研究,如 X 射线激光、离子加速等.

超强超短激光等离子体相互作用的研究方法有以下 3 种:

(1) 实验研究.首先通过实验探测超强超短激光的吸收机制和份额,设计实验研究 X 射线激光的机理.X 射线激光可应用于全息生物照相,超强激光的穿孔效应等,需要用实验去探索、去发现新现象.

(2) 理论研究.微扰理论不再适用,需要建立新的理论,创立新的理论模型,粗略估计可能发生的现象,实验探测的量级范围,分析可能的机制,在已有实验数据的基础上,加强分析对比,进一步完善理论、修正理论模型,指导更进一步的实验.

(3) 计算机模拟和仿真研究.这是超强超短激光等离子体相互作用研究的最重要的手段.根据已

有的经典定律和经过验证的基本方程和可靠参数,编制计算机程序,计算出所需要的数据和发展的细致过程,这也是在计算机上进行的一种实验,它便于把某些分立过程研究清楚.粒子模拟方法和磁流体力学模拟方法是超强激光等离子体相互作用的基本数值模拟方法.

这3种研究方法紧密结合、互相补充、相互支持,一定会使这门崭新的学科不断取得新的进展.

4 激光等离子体相互作用的潜在应用

惯性约束聚变快点火物理、高能量密度物理、激光天体物理、先进光源、强辐射源等领域,均与超短超强激光等离子体相互作用(强场物理)密切相关,并具有潜在的应用价值^[4,15].

(1)在惯性约束聚变(ICF)中,ICF的快点火系将其物理过程分为独立的两步进行:靶丸的内爆压缩,外源加热高密度芯部.这种点火方式的优越性在于可降低压缩所需主激光之驱动能量 $1/5 \sim 1/10$,且降低驱动压缩对称性要求 10% .但超强激光产生相对论等离子体的物理过程复杂,对超短、超强激光装置的建立和超强激光点火物理研究无疑将提出新的挑战.

(2)在高能量密度物理方面,当靶面功率密度 $2 \times 10^{21} \text{ W/cm}^2$ 时,形成 100 PPa 高压,并产生约为光速 3% 的快质子.将这些质子沉积到铀中,射程 $5 \sim 10 \mu\text{m}$.在此薄层内产生 1 keV 的热平衡等离子体,其物态与星体和核爆物态相似.

(3)在强辐射源和先进光源方面,产生 55 MeV 、 10 MA 的强质子束,可与世界上最强的加速器相比;大剂量的高能X光(γ 射线)亦可与FXR(18 MeV 、 2.8 kA)相比,且可产生能量高达 100 MeV 的高能电子,观测到比 γ 射线引起的光核反应产额高得多的正电子.在先进光源方面,其原理是基于超强激光的光子与相对论电子束 Thomson 散射,可产

生几十 keV 的 X 光束,特点有高亮度(胜于同步辐射光源)、高时间分辨(f_s)、发散角小、X 光能量可调等.由于此先进光源能量为几十 keV,与核材料原子壳层结合能相当,因此是研究库存材料的有利手段.而有其高时间分辨(f_s),将为高压物态实验提供理想的探针光.

(4)在天体物理方面,能突破传统天体物理仅限于观察和记录的状态,可在实验室内定标再现天体系统,如 γ 射线爆发,黑洞和中子星附近的场($B = 4 \times 10^{13} \text{ G}$).当然,这要求 I_L 达到 $10^{22} \sim 10^{24} \text{ W/cm}^2$.

(5)在快点火实验物理研究方面,热核聚变点火,其燃料是核武器物理重要的研究领域,且可利用点火产生的能量更好地研究点火前的问题或点火后的问题.快点火途径研究无疑是有前途、有潜力的项目.当然,其前景取决于“相对论超强激光等离子体相互作用物理”的研究结论.在我国发展型的神光 III 实现快点火的目标,其可行性还有待证明.

5 结语

以上是超强超短激光等离子体相互作用(强场物理)研究现状极其潜在的应用情况.对这门崭新的具有远大发展前途的新兴学科——强场物理已经引起了人们的极大兴趣并给予高度重视,许多国家都投入了大量的人力、物力、财力进行广泛深入的研究.但是,强场物理实验目前尚缺少足够的超强激光装置($I_{L\text{max}}$ 达到 $3 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$)以证明多种物理设想.国内近年仅有数 10 TW 的激光器(I_L 达到 $5 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$),因而,只能停留在实验方法的探索上.发展相应的理论研究和数值模拟研究是当务之急.然而,强场物理研究又依赖于激光装置的发展,特别是超强超短激光技术的发展.只有发展超强超短的激光技术,才能使得这门学科发展更快更深入,才更具前景.

参考文献

- [1] Cairns R A, Sanderson J J. Laser-Plasma Interaction[M]. Edinburgh: SUSSR Publication, 1980.
- [2] Kruer W L. The Physics of Laser Plasma Interaction[M]. California: Addison-Wesley Publishing Company, 1987.
- [3] 常铁强, 张钧, 张家泰, 等. 激光等离子体相互作用与激光聚变[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1991.
- [4] 张家泰. 激光等离子体相互作用物理与模拟[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1999.
- [5] Koechner W. Solid-State Laser Engineering[M]. New York: Springer, 1996. 548 ~ 551.
- [6] Mourou G A, Barry C P J, Perry M D. Ultrahigh-intensity lasers: physics of the extreme on a tabletop[J]. Physics Today, 1998, 22: 126.

~ 132.

- [7] Perry M D. Crossing the petawatt threshold[J]. Science & Technology Review ,1996 (4) 47 ~ 49.
- [8] Perry M D. The amazing power of the petawat[J]. Science & Technology Review 2000 (4) 36 ~ 41.
- [9] Heller A. JanUSP opens new world of physics research[J]. Science & Technology Review 2000 (25) 89 ~ 93.
- [10] Kitagawa Y. GEKKO XII petawatt module projec[J]. Annual Progress Report ,1998 ,17 :11 ~ 17.
- [11] Danson C N , Allott R M , Angood S , et al. Focused Intensities of 10^{20} W/cm² with the Upgraded Vulcan CPA Interaction Facility[A]. Proceedings of SPIE[C]. Monterey SPIE ,1998 ,3492 :82 ~ 86.
- [12] Zou J P , Descamps D , Audebert P , et al. The LULI 100-TW Ti Sapphire/Nd :Glass Laser : a First Step Towards a High Performance Petawatt Facility[A]. Proceedings of SPIE[C]. Monterey SPIE ,1998 ,3492 :94 ~ 97.
- [13] 张家泰. 超强超短激光脉冲与物质相互作用[D]. 北京 :中国工程物理研究院北京研究生部 ,2000.
- [14] 贺贤土. 快点火物理研究进展[D]. 北京 :应用物理与计算数学研究所 ,2001.
- [15] Hideaki T. Astrophysics with Intense and ultra-intense lasers “ laser astrophysics ” [J]. Prog Theor Phys Suppl 2002 ,143 :202 ~ 265.

The Development and Potential Applications of Ultra-short Ultraintense Laser Plasma Interactions

WANG Guang-chang^{1 2} , ZHENG Zhi-jian² , YANG Xiang-dong¹ ,
WU Yun-bo³ , ZHANG Shuang-gen^{1 2}

- (1. *Institute of Atomic and Molecular Physics , Sichuan University , Chengdu 610065 , Sichuan ;*
2. *Research Center of Laser Fusion , China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 , Sichuan ;*
3. *School of Computer Science , Sichuan University , Chengdu 610065 , Sichuan*)

Abstract : In this paper , five aspects of strong-field physics are discussed in detail , which are the development of laser technology , the features , methods , contents and potential applications of ultra-short ultraintense laser plasma interactions. The results show that the study of experiments and applications of strong-field physics depends on the development of laser apparatus , and with the development of ultra-short ultraintense laser technology , there will be a bright future in the research of strong-field physics.

Key words : Ultra-short Ultraintense laser ; Plasma ; Strong-field physics ; Laser technology

(编辑 刘 刚)

作者: [王光昶](#), [郑志坚](#), [杨向东](#), [吴云波](#), [张双根](#), [WANG Guang-chang](#), [ZHENG Zhi-jian](#),
[YANG Xiang-dong](#), [WU Yun-bo](#), [ZHANG Shuang-gen](#)

作者单位: [王光昶,张双根,WANG Guang-chang,ZHANG Shuang-gen\(四川大学,原子分子物理研究所,四川,成都,610065;中国工程物理研究院,激光聚变研究中心,四川,绵阳,621900\)](#), [郑志坚,ZHENG Zhi-jian\(中国工程物理研究院,激光聚变研究中心,四川,绵阳,621900\)](#), [杨向东,YANG Xiang-dong\(四川大学,原子分子物理研究所,四川,成都,610065\)](#), [吴云波,WU Yun-bo\(四川大学,计算机学院,四川,成都,610065\)](#)

刊名: [四川师范大学学报\(自然科学版\)](#) **ISTIC** **PKU**

英文刊名: [JOURNAL OF SICHUAN NORMAL UNIVERSITY\(NATURAL SCIENCE\)](#)

年,卷(期): 2005, 28(4)

引用次数: 1次

参考文献(15条)

1. Cairns R A. Sanderson J J [Laser-Plasma Interaction](#) 1980
2. Kruer W L [The Physics of Laser Plasma Interaction](#) 1987
3. 常铁强,张钧,张家泰 [激光等离子体相互作用与激光聚变](#) 1991
4. 张家泰 [激光等离子体相互作用物理与模拟](#) 1999
5. Koechner W [Solid-State Laser Engineering](#) 1996
6. Mourou G A. Barty C P J. Perry M D [Ultrahigh-intensity lasers:physics of the extreme on a tabletop](#) 1998
7. Perry M D [Crossing the petawatt threshold](#) 1996(04)
8. Perry M D [The amazing power of the petawatt](#) 2000(04)
9. Heller A [JanUSP opens new world of physics research](#) 2000(25)
10. Kitagawa Y [GEKKO XII petawatt module project](#) 1998
11. Danson C N. Allott R M. Angood S [Focused Intensities of 1020 W/cm² with the Upgraded Vulcan CPA Interaction Facility](#) 1998
12. Zou J P. Descamps D. Audebert P [The LULI 100-TW Ti:Sapphire/Nd: Glass Laser: a First Step Towards a High Performance Petawatt Facility](#) 1998
13. 张家泰 [超强超短激光脉冲与物质相互作用](#) 2000
14. 贺贤土 [快点火物理研究进展](#) 2001
15. Hideaki T [Astrophysics with Intense and ultra-intense lasers:"laser astrophysics"](#) 2002

相似文献(10条)

1. 学位论文 [蔡达锋](#) [超短超强激光-等离子体中高能粒子的实验研究](#) 2003

该论文研究了超短超强(US-UI)激光与等离子体相互作用中高能粒子发射的角分布和能谱. 国内我们首次在激光功率密度约 10^{18} W/cm^2 的条件下, 研究了超短超强激光与等离子体相互作用产生的高能粒子发射, 获得一些国内外未见报道的新的物理结果. 这些结果不仅对于理解超短超强激光与等离子体相互作用的物理机制有益, 而且对即将进行的惯性约束聚变(ICF)中“快点火”(Fast ignition)研究也是非常重要的基础工作之一.

2. 期刊论文 [王剑](#), [蔡达锋](#), [谷渝秋](#), [杨向东](#), [唐翠明](#), [WANG Jian](#), [CAI Da-feng](#), [GU Yu-qiu](#), [YANG Xiang-dong](#), [TANG](#)

[Cui-ming](#) [超短超强激光与稀薄等离子体相互作用背向受激Raman谱特性模拟-强激光与粒子束](#)2008, 20(1)

利用LPIC++程序模拟了超短超强脉冲与稀薄等离子体相互作用产生的背向受激Raman谱. 结果证明:在极端相对论条件下,背向受激Raman谱不再是通常所指的弱耦合模式,而进入强耦合模式. 频谱加宽,并融合在一起:各谱峰之间的频移不再以等离子体波的频率为间隔,而是小于电子等离子体波的频率. 模拟了各种条件下的背向散射Raman谱特性,结果显示:随着密度的提高,背向受激Raman谱的强度也将提高,这与理论结果符合得较好.

3. 学位论文 [周维民](#) [超短超强激光与等离子体相互作用中质子发射的实验研究](#) 2004

超短超强激光脉冲与等离子体相互作用过程中,会以脉冲形式向外发射高能质子束. 尤其是在靶背法线方向以较小锥角发射的质子束,具有束源空间尺

度小、脉宽窄、方向性好等特点.这些特点使得超短超强激光等离子体相互作用中产生的质子束具有极为广泛的应用前景.并且,质子束的产生与相互作用过程中产生的超热电子密切相关.通过对质子束的研究可以获得超热电子在等离子体内产生和输运等过程的信息,而超热电子的产生和输运又是超短超强激光等离子体相互作用的核心内容之一,也是惯性约束聚变快点火物理关心的核心问题之一.因此,为了了解超短超强激光等离子体相互作用中产生的高能质子的性质,并为未来可能的应用作预研,该论文开展了对超短超强激光等离子体相互作用中质子发射的实验研究,重点研究了靶背法线方向发射的质子束的产额、空间分布、能量分布与靶物质厚度的关系.文章首先从惯性约束聚变入手,简单介绍了快点火模型及其意义,以及对超短超强激光等离子体相互作用中质子束的研究现状和进展.在理论基础部分,就激光等离子体相互作用过程,超短超强激光等离子体相互作用过程,以及质子加速机制作了较为详细的阐述.文章的重点是对实验研究的介绍和对实验结果的分析与讨论.实验是在中国工程物理研究院聚变研究中心的超短脉冲激光装置上进行的.实验中利用CR39和Thomson离子谱仪测量了在相同激光功率密度(约 $5 \times 10^{17} \text{Wcm}^{-2}$)条件下,超短超强激光与不同厚度(5~30 μm)铜靶相互作用中产生的质子束的产额、角分布和能谱.实验中观测到超短超强激光等离子体相互作用过程中有高能质子的产生.质子束产额约为 $10^6 \sim 10^7 \text{a.u.}$ /发,发射方向严格沿着靶背法线方向,与入射激光方向无关.质子束存在着较小的发射张角,这有利于该机制下产生的质子束的应用.从质子束的能量分布可以看出,质子束在一定的能量处出现截止,截止能量的大小与靶厚度密切相关.这些实验结果均与质子加速理论吻合得很好.

4. 期刊论文 [陈晓旭,唐翠明, CHEN Xiao-xu, TANG Cui-ming 超短超强激光与等离子体相互作用中质子发射一些研究进展 -四川理工学院学报\(自然科学版\)2006, 19\(5\)](#)

超短超强激光与等离子体相互作用中得到的高能质子在质子成像、粒子加速、诊断超短超强激光与等离子体相互作用的物理过程、“快点火”和治疗癌症等方面有一定的应用.使得对超短超强激光与等离子体相互作用得到的高能质子的研究成为目前的研究热点.文章综述了产生质子的两种主要加速机制以及在不同实验条件下超短超强激光与等离子体相互作用过程中得到质子的能量、角分布、产额以及相关的原理.

5. 学位论文 [程亚 超短超强激光与稀薄等离子体及自由电子的相互作用 1998](#)

该论文研究了超短超强激光脉冲与欠稠密等离子体或单个电子的非线性相互作用.其主要内容如下:首先,重点研究了超短激光脉冲在线性介质以及真空中的传播,包括一维和三维的结果.给出了传输距离在瑞利长度之内时,光脉冲波包随时间的传播、演化,并给出了一阶近似条件下的解析表达式,以便于计算脉冲的演化?该论文的另一重点是首次研究了利用两束交叉的超短超强激光脉冲实现在真空中加速电子的问题.该论文首次指出了利用具有快速上升前沿的强场激光脉冲可以在真空中对自由电子的加速,哪怕该激光脉冲的总体宽度远大于一个光周期.此外,论文还研究了强激光场中电子速度分布函数随时间的演化问题.最后,论文首次给出了弱相对论条件下,强场激光脉冲在等离子体中传播的一个孤子解.

6. 期刊论文 [焦春晔,谷渝秋,吴玉迟,刘红杰,王剑,温天舒,温贤伦,何颖玲,洪伟,黄文忠, JIAO Chun-ye, GU Yu-qiu,](#)

[WU Yu-chi, LIU Hong-jie, WANG Jian, WEN Tian-shu, WEN Xian-lun, HE Ying-ling, HONG Wei, HUANG Wen-zhong 超短超强激光与气体靶相互作用中的背向受激Raman散射 -强激光与粒子束2008, 20\(10\)](#)

实验诊断测量了超短超强激光与气体靶相互作用产生的背向受激Raman散射.在实验条件下呈现强耦合模式,背向受激Raman散射出现非线性Stokes多峰线结构,峰值的频率间隔小于等离子体波的频率,可以大致地推断出激光打靶过程中产生的等离子体密度偏低,其结果与等离子体强耦合理论计算结果一致.

7. 学位论文 [李昆 超短超强激光与等离子体相互作用中的超热电子和超连续辐射 2005](#)

本论文涉及到如下领域:超短超强激光与固体靶相互作用产生超热电子,超短超强激光在大气中传输产生相干超连续辐射,晶体中THz辐射的产生和探测,超短超强激光与固体靶相互作用产生的高次谐波,分别简述如下.

测量了线偏振(P偏振和S偏振)和圆偏振的亚相对论飞秒激光脉冲45度入射到铝靶上产生的超热电子能谱和超热电子在靶背向的角分布.引人注意的是,S偏振和圆偏振激光产生的超热电子具有特殊的角分布.S偏振激光产生的超热电子的角分布可以通过考虑表面磁场的影响给以定性的解释,而圆偏振激光产生的超热电子的角分布则需要进一步的三维粒子模拟来解释.

超短超强激光在大气中传播时形成等离子体通道并产生相干超连续辐射.实验中测量了超连续辐射的光谱、脉宽、锥角辐射和相干特性,并测量了通道内的分子发射谱.本论文也进一步分析了超连续辐射的空间相干性和时间相干性的来源,并指出了对其它论文中关于互干性概念的疑义.本论文还分析了超连续辐射谱调制的来源.

超短超强激光与固体密度等离子体相互作用时会辐射出高次谐波.通过对高次谐波的测量,可以对相互作用过程进行更深入的了解,因此它是对超短超强激光与固体靶相互作用的一种有效诊断手段.本论文通过简单的振荡镜面模型模拟了高次谐波的产生,并分析了它的特性,例如转化效率与入射光强度、入射角、偏振态的关系.

THz辐射可以用来对超短超强激光与大气相互作用的过程进行诊断.通过独立搭建的THz时域光谱系统,利用国内新生长的高效有机晶体DAST产生并探测了THz辐射,证明了DAST是一种高转化效率的THz晶体.这样也建立了利用THz辐射对激光等离子体通道进行诊断的实验设备和实验方法.

8. 期刊论文 [于全芝,李玉同,张杰 超短超强激光与液体的相互作用研究 -物理2003, 32\(9\)](#)

超短超强激光与液体靶相互作用时表现出许多有趣的特点,这明显区别于激光脉冲与固体或气体靶的相互作用情况.文章分别介绍了激光诱发等离子体所产生的高压冲击波、激光空泡、X射线、高能超热电子以及白光,对它们的产生机制及其各自的显著特征进行了综合描述.文章最后对超短超强激光脉冲与各种不同形态的液体靶相互作用的应用前景作了简单介绍.

9. 学位论文 [朱频频 超短超强激光与团簇相互作用的某些实验和理论研究 2004](#)

该论文对超短超强激光与团簇相互作用进行了若干实验和理论上的研究.主要进行的工作如下:1.对惰性气体团簇的制备和尺寸诊断开展了实验研究.实验中使用高背压惰性气体经conical喷嘴向真空靶室超声绝热膨胀来产生团簇.利用Rayleigh散射法对Ar、Kr、Xe团簇的尺寸进行了诊断.2.对团簇的形成和演化过程进行了时间分辨的检测,结果在Kr、Xe团簇的Rayleigh散射信号的时间分辨谱上发现了“双峰”结构,并分析了产生此现象的可能原因.3.参与建立和发展了超短超强激光和团簇相互作用的靶室系统.我们重点对超短超强激光和不同种类的惰性气体团簇喷流的相互作用中产生的高能离子以及对激光能量的强吸收现象作了比较系统的研究.在相互作用过程中探测到了非常高能量的离子.另外还实验研究了团簇尺寸和激光参数对相互作用机制的影响.4.利用简单的“库仑爆炸”模型分析较小尺寸团簇与强激光的相互作用过程,认为离子的能量主要来自于库仑爆炸,成功地解释了相互作用中产生的离子能谱高能端的特征.5.对于较大尺寸的团簇,采用改进的“微等离子体球”模型对相互作用过程进行了分析.该模型提出了“有效介电常数”的概念,对团簇等离子体在共振吸收附近场强极高的增强行为作了弱化,使其结果更为合理.利用该模型我们计算了Ar、Kr、Xe团簇中不同电荷态离子随时间的运动过程,计算了离子平均动能和平均电荷态,并对离子平均动能、平均电荷态与团簇尺寸、激光参数的之间的变化关系作了半定量研究.

10. 期刊论文 [蔡达锋,王利娟,王剑,郑志坚, CAI Da-Feng, WANG Li-Juan, WANG Jian, ZHENG Zhi-Jian 超短超强激光 -等离子体中自生磁场的研究 -原子与分子物理学报2009, 26\(3\)](#)

本文回顾了激光-等离子体相互作用中自生磁场的产生以及提出的各种产生机制和诊断方法;比较全面地介绍了超短超强激光与等离子体相互作用中产生自生磁场的理论、数值模拟以及实验研究的状况;重点阐述了超短超强激光-等离子体相互作用中自生磁场对谐波发射影响的理论以及根据该理论完成的实验测定.

1. 马春生, 王光昶, 陈涛, 张婷, 郑志坚 超热电子渡越辐射与高能质子发射的比较研究[期刊论文]-四川师范大学学报(自然科学版) 2008(3)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_scsfdxxb200504029.aspx

下载时间: 2010年6月14日