

飞秒激光氘团簇聚变*

雷安乐 黎忠 倪国权 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所 上海 201800)

摘要 简要介绍了原子团簇的产生方法和特点以及激光惯性约束核聚变的基本原理.氘团簇在飞秒激光的作用下,大量吸收激光能量,产生了高离化态高能离子,从而实现了氘团簇桌面台式聚变.

关键词 激光惯性约束聚变,飞秒激光,氘团簇

NUCLEAR FUSION FROM FEMTOSECOND LASER-HEATED DEUTERIUM CLUSTERS

LEI An-Le LI Zhong NI Guo-Quan XU Zhi-Zhan

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

Abstract The method to generate atomic clusters as femtosecond laser targets and their characteristic are described, together with a brief overview of inertial confinement fusion. Deuterium clusters irradiated by fs lasers absorb laser energy efficiently and produce highly charged ions with substantial kinetic energy, which would make table-top laser fusion realizable.

Key words inertial confinement fusion, femtosecond laser, deuterium cluster

1 引言

目前人类使用的所有能源中,除了约5%的铀能源外,其余都是从太阳能转变而来的,主要是石化资源,如石油、煤和天然气等.这些石化资源是不可再生的.按照今天的能源消耗估计,地球上的石化资源将在今后几百年内消耗殆尽.因而必须找到其他能源来补偿和替代石化资源.人们预测石化资源、核电和太阳能将是解决21世纪能源问题的三大支柱.太阳能的“储量”极大,可以说是永不枯竭的.地球上储存的煤能量,如果按100%的转换效率计算,只相当于不到一个星期内地球上所得到的太阳能,而石油和天然气中的能量只相当于在几个小时内照射到地球上的太阳能.如果能将照到地球上的太阳能的很小一部分(例如1%)直接“拿到”手,则能源问题就彻底地解决了.但目前太阳能转换成电能的效率非常低,还谈不上供能,这方面的工作会一直继续下去.

核能是重核裂变和轻核聚变时所释放的能量.目前核电站产生的核能主要来自核裂变反应.今天已有31个国家和地区利用核电站,核电占世界总

发电量的17%,世界总能耗的5%.不过,这种原子能裂变反应堆电站的安全性、核废料的处理和资源枯竭等问题已经开始困扰人们.

2 激光惯性约束聚变的基本原理

核聚变反应是将氢的同位素氘和氚核聚合在一起.太阳能就是核聚变能.核聚变能洁净,而且资源永不枯竭.聚变反应可以释放出极大的能量.1个氘核和1个氚核聚合可以释放出17.6 MeV的能量,1 kg聚变燃料释放出的能量相当于3500t煤的能量.

要将带正电荷的氘和氚核聚合在一起,必须使氘和氚核具有极大的动能来克服静电斥力.为了提高聚合效率,氘和氚核应具有一定的密度,并把它们在一定区域内约束一定的时间.要利用核能,这种聚合反应不应像氢弹爆炸那样而应加以控制.目前主要有两种实验室聚变方式,即磁约束聚变和惯性约束聚变.磁约束聚变是依靠强磁场将高温低密度的

* 国家自然科学基金资助项目,国家“九五”攀登计划资助项目
1999-09-06收到初稿,1999-11-15修回

等离子体约束足够长的时间以使氘氚等离子体达到核聚变反应所需要的条件.惯性约束聚变是用激光束或粒子束来轰击核燃料,即靶丸,在很短的时间内产生高温高密度等离子体,这些等离子体依靠惯性约束在一起,从而达到核聚变反应的条件.惯性约束聚变中研究得最多的是激光惯性约束聚变.

在1999年以前,用于惯性约束聚变的激光器的造价和运行费用昂贵,设备庞大,占地数百平方米,激光能量输出可高达100kJ,脉宽约1ns,激光功率密度大约为 $10^{13} \sim 10^{15} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$.这种大型激光装置只有在国家级的实验室才有,世界上也只有少数几个国家和地区才有.实验所用的靶丸尺寸是毫米或亚毫米量级的.氘氚燃料是以气体方式密封于靶壳中.氘氚气体背压通常为几个到几十个大气压.多路激光束通过均匀直接照射靶壳表面(直接驱动方式),或激光束先照射某种材料,使之产生X射线,这些X射线再照射靶壳表面(辐射驱动或间接驱动方式),靶壳吸收激光或X射线能量产生包围核燃料的高温高密度等离子体,等离子体向外爆炸的反作用力会产生极大的向心聚爆的压力,这个压力相当于地球上的大气压力的10亿倍.氘氚燃料被压缩到极高的密度和极高的温度,从而引起核聚变反应.

3 飞秒激光氘团簇聚变

今年,人们利用一种小型化的台式激光装置也实现了核聚变反应,这就是飞秒激光照射氘原子团簇使之发生聚变反应^[1].飞秒激光氘团簇聚变的原理与大型激光装置聚变的原理一样,都是利用激光使核燃料在很短的时间内产生高温高密度等离子体,等离子体靠惯性约束在一起而发生核聚变反应.飞秒激光装置占地仅几个平方米,激光能量输出很小,一般为几个到几百个mJ,但由于激光脉宽很窄,因而激光的功率密度很高,可以达到 $10^{19} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$,甚至更高.原子团簇是当高压气体经喷气管道进入真空靶室,由于是绝热膨胀,气体温度降低经冷凝而成核于团簇.团簇束的平均原子密度较低,是气体密度,大约为 10^{19} cm^{-3} ,但是团簇本身原子密度很高,是固体密度,大约为 10^{22} cm^{-3} .团簇的尺寸与气体种类、气体背压和温度,以及喷嘴形状有关.Hagena发现了一个经验参数 r^* ,可以预测团簇的形成和尺寸.Hagena参数 r^* 为^[2]

$$r^* = k \frac{(d/\tan \alpha)^{0.85} p_0}{T_0^{2.29}}, \quad (1)$$

式中 p_0 和 T_0 分别是气体的背压和温度,单位是mbar和K, k 是依赖于气体种类的常数(对氘、氚、氦、氖和氩气, k 分别约等于3.85,185,1650,2890和5500), d 是喷嘴的直径, α 是喷嘴的半张角.一个Hagena参数 r^* 对应一个团簇中的平均原子数 \bar{N} . r^* 越大,则 \bar{N} 越大,即团簇直径越大,对于大尺寸原子团簇, r^* 和 \bar{N} 的关系近似为^[3]

$$\bar{N} \approx 10^{-4} \times (r^*)^{2.0}. \quad (2)$$

由(1)式可知,较重的原子,如氘、氚和氦,容易形成大尺寸团簇,而较轻的原子,如氦、氖包括氢,都不易形成团簇.一般通过选用 α 较小的锥形喷嘴,增加气体背压和降低温度来产生大尺寸原子团簇.我们在常温下实验所用喷嘴的 $\alpha = 5^\circ$, $d = 0.20, 0.24, 0.30, 0.36$ 和 0.48 mm , $p_0 \leq 50 \text{ atm}$,工作气体是氦和氩气.在这个参数下,氘氚气体不能形成团簇,必须用液氮冷却氘氚气体,才能形成团簇.能形成氘团簇的喷气阀必须能承受很高的气体背压,而且要耐低温.一般形成的团簇直径在几Å到几百Å之间.这个尺寸,相对于原子或分子而言很大,相对于固体而言很小.所以说团簇是原子分子和固体之间的桥梁.团簇与激光的相互作用,可以兼具二者的性质.一方面,团簇在激光的作用下,可以像分子一样发生库仑爆炸;另一方面,团簇可以像固体一样发生流体动力膨胀.团簇与激光相互作用要求激光的脉宽是飞秒量级^[4].因为几百Å大小的团簇从固体密度膨胀到气体密度所需要的时间不到1ps,而气体等离子体对激光的能量吸收非常小(约1%),如果激光的脉宽大于1ps,则在激光脉冲上升沿,团簇就已经变成气体了.

在飞秒激光的作用下,首先团簇中的原子在强激光场中发生隧道电离,产生“种子”电子^[4].这些“种子”电子在激光场的驱动下在接近固体密度的团簇里与其他原子和电子发生碰撞,快速地产生了高离化态的离子.这种碰撞机制在气体中是缺乏的.团簇等离子体中的电子运动甚至被认为是相干的,即若干个电子像一个准粒子,带有Ne电荷和 Nm_e 质量,从而增强了团簇中的电离^[5].团簇等离子体通过逆韧致吸收、共振吸收和其他吸收机制吸收激光能量产生高温高密度团簇等离子体.团簇对激光能量的吸收特别高,可达95%.图1是几种不同原子团簇对激光能量的吸收率曲线^[6].这里激光波长为532nm,功率密度为 $7 \times 10^{16} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$.由图1可看出,在常温下,当氘和氩气的背压较低时,氘和氩气不能形成团簇,这时对激光能量的吸收比较低.当气

压升高到 1 bar 时,氙气开始形成团簇,这时氙团簇对激光的吸收显著增加.团簇的尺寸可由团簇对光的瑞利散射实验给出^[4].随着氙气背压的增加,形成的团簇尺寸越来越大,同时也对激光的吸收也越来越强.当氙气背压达到 20 bar 时,形成的氙团簇对激光的吸收率达到 95%.氙气的情况与氙气类似.只是氙气形成团簇时所需的气体背压比氙气高,为 5 bar.在 65 bar 时,形成的氙团簇对激光能量的吸收超过 80%.在常温下,氖气和氢气不能形成团簇,即使在 65 bar 的背压下,它们对激光的吸收也非常低.当氢气被冷却到 100 K 时,氢在 1 bar 的背压下就开始形成团簇.在背压为 55 bar 时,形成的氢团簇对激光的吸收超过了 90%.

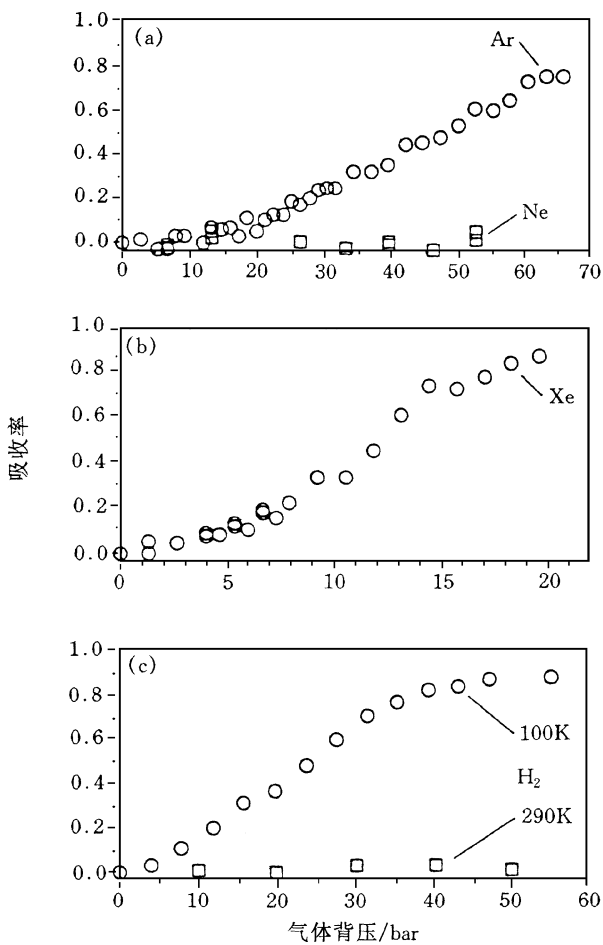


图 1 原子团簇在不同的气体背压下对激光能量的吸收率曲线 (激光波长为 532 nm, 功率密度为 $7 \times 10^{16} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$)

团簇对激光的吸收效率远比气体原子高,甚至比固体物质高.团簇吸收的激光能量绝大部分通过团簇的库仑爆炸和流体动力膨胀方式转交给了团簇中的离子^[7-9].一方面,由于动能较大的电子可以克服团簇中离子的静电吸引力而逃逸,使得团簇等

离子体球带正电,随着正电荷的积累,团簇等离子体球会像带正电的分子一样由于静电斥力而发生库仑爆炸;另一方面,团簇等离子体球会像固体一样由于热压力而流体动力膨胀.

团簇中的离子经过团簇库仑爆炸和流体动力膨胀而获得的能量很高.图 2 是 65 Å 的氙团簇在 $2 \times 10^{16} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的激光的作用下产生的离子动能谱^[7].可以看出产生了能量高达 1 MeV 氙离子,离子的平均能量为 50 KeV.团簇离子所具有的动能接近固体物质等离子体产生的离子的动能.由于氢团簇对激光的吸收可与氙团簇相比较,可以预计,在同样的激光条件下,氢团簇也能产生这样高能量的离子.如此高能量的氢离子,可以克服库仑静电斥力而发生聚变反应.

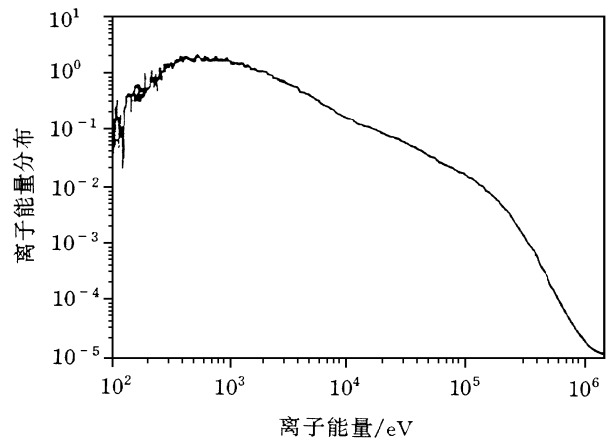


图 2 65 Å 的氙团簇在 $2 \times 10^{16} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的激光的作用下产生的离子动能谱 (离子平均能量为 50 keV)

实验所用的激光源是钛宝石激光器,激光波长 820 nm, 能量输出 120 mJ, 脉冲宽度 45 fs, 焦斑直径 $200 \mu\text{m}$, 工作频率 10 Hz. 激光峰值功率密度估计为 $2 \times 10^{16} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. 氙气经液氮冷却到 100 K, 经喷气管道形成约 50 Å 的氙团簇. 实验原理如图 3 所示^[1]. 首先, 激光束经透镜聚焦到喷嘴出口下方 1-2 mm 处, 在这里与氙团簇相遇, 产生氙的等离子体. 等离子体在激光传输方向上形成一个 2 mm 长的通道, 通道的截面就是激光焦斑. 从一个爆炸氙团簇中产生的高能氙离子与从另一个团簇中飞出的氙离子碰撞, 由于离子动能很大, 因而可以克服静电斥力而发生聚变反应 $\text{D} + \text{D} \rightarrow \text{He}^3 + \text{n}$. 产生的中子的能量为 2.45 MeV. 飞秒激光团簇聚变的中子产生效率与大型激光器照射靶丸的效率相当, 大约为 10^5 J^{-1} .

需要说明的是, 在飞秒激光团簇聚变中, 氙团簇是裸的, 激光直接打在核燃料上, 而在大型激光装置

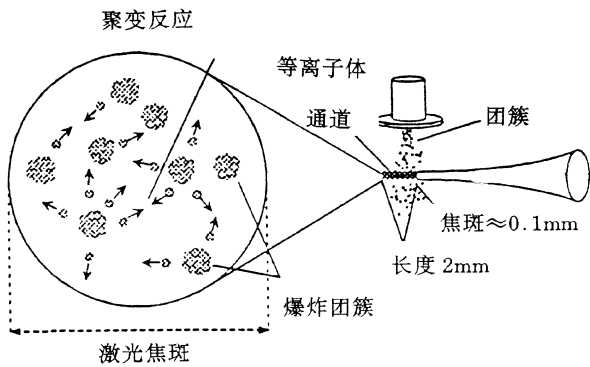


图3 氘团簇激光聚变原理图

聚变中,核燃料以气体方式密封于靶壳中,激光是打在靶壳上.团簇初始密度是固体密度,可能更利于激光高密度压缩,而密封于靶丸中的燃料是气体密度.另外,在氘团簇聚变中,如果由多路激光同时照射团簇,则有可能进一步提高聚变中子产额.

4 展望

相对于大型激光装置聚变而言,飞秒激光氘团簇聚变的研究才刚刚开始.但是由于这种聚变可以在一些较小的实验室进行,而且激光的利用效率很高(飞秒激光的工作频率可以是10 Hz,而大型激光

的工作周期为数小时打靶一次).可以相信在不远的将来,飞秒激光氘团簇聚变的研究必然会获得很大的进展.国内现在上海光学精密机械研究所已经开展了这方面的研究工作.我们用飞行时间谱仪测量了氘和氦团簇的离子能谱,离子的最大动能超过0.2 MeV.我们准备改进自行设计的喷气阀以便可以在低温下工作,产生氘团簇.

参 考 文 献

- [1] Ditmire T, Zweiback J, Yanovsky V P *et al.* Nature, 1999, 398:489—492
- [2] Hagena F, Obert W. J. Chem. Phys., 1972, 56:1793—1802
- [3] Farges J, Feraudy M F de, Raoult B *et al.* J. Chem. Phys., 1986, 84:3491—3501
- [4] Ditmire T, Donnelly T, Rubenchik A M *et al.* Phys. Rev. A, 1996, 53:3379—3402
- [5] Snyder E M, Buzza S A, Castleman A W. Phys. Rev. Lett., 1996, 77:3347—3350
- [6] Ditmire T, Smith R A, Tisch J W G *et al.* Phys. Rev. Lett., 1997, 78:3121—3124
- [7] Ditmire T, Tisch J W G, Springate E *et al.* Nature, 1997, 386:54—56
- [8] Lezius M, Dobosz S, Normand D *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 80:261—264
- [9] Hutchison H. Science, 1998, 280:693—694

(上接第318页)

圆满成功.

会上,有86篇学术论文作者分别在4个分会场上作了报告,论文内容涉及激光科学技术、惯性约束聚变和高功率微波技术三大研究领域的很多方面.青年代表们主要报告了在上述领域近两年来取得的新成果和新进展,这些报告反映出青年人的研究工作越来越有深度和广度,研究水平也越来越高,取得的成果也更为丰硕,论文撰写的水平、报告的质量和报告的形式比前几次会议有较大的改进和提高.专家评委在认真听取报告的基础上,经过认真的讨论、评审,共评选出20篇优秀论文.另外还有9篇论文受到大会表扬.

本次会议特别邀请了杜祥琬、贺贤土两位院士和张杰、周建英两位出色的青年专家,做了十分精彩、高水平的学术报告,这些报告综合介绍了激光技

术和惯性约束聚变技术领域的最新进展情况、应用前景和发展趋势,具有很大的启发性,使大家受益匪浅.

跨世纪的高技术项目需要跨世纪的人才,激光技术主题和惯性约束聚变技术主题专家组一直把培养跨世纪的学科带头人和科研骨干作为一项重要的战略任务,定期举办青年激光会是两主题专家组加快青年科技人才培养的重要措施之一.通过几届青年激光会的举办,已收到了明显的成效.从这次青年会上可以看出,在老一辈科学家们的亲切关怀下,在各级专家组、各部门和各单位的大力支持下,青年科技人员已逐渐成为高技术项目攻关的中坚力量,为激光技术和惯性约束聚变技术在21世纪的持续发展打下了坚实的人才基础.

(北京应用物理与计算数学研究所 马寅国)