高对比度飞秒激光产生的超强极短 X 射线源

陈黎明† 张 杰

（中国科学院物理研究所 北京 100190）

同步辐射光源已经被证明是可以进行广泛应用研究的有力工具.然而由于其设备巨大,相对长的脉冲时间和多色性等,使其在实际应用中有较大的局限性.飞秒脉冲强激光与靶物质相互作用时,产生的超热电子通过 K 壳层电离辐射和韧致辐射产生硬 X 射线. 由于此种 X 射线源在理论上具有超快的特点,非常适合对物质进行飞秒时间分辨的动力学探测,加上其微小的 X 射线发射源尺寸,极低的建造成本,以及高于同步辐射源的源峰值亮度,成为同步辐射光源之外的最具应用价值的补充光源,在医学、生物学和材料学等方面具有极大的应用前景,因此成为国际上相关领域研究热点之一[1].

然而在目前,激光驱动的硬 X 射线源在成像应用领域还存在着诸多限制.一方面是有限的 K_α 射线转换效率($\sim10^{-5}$)和很低的 K_α 辐射与连续本底的信噪比等[2].高强度激光与固体相互作用产生的硬 X 射线,依赖于超热电子注入到固体靶中通过 K 壳层电离和韧致辐射产生.一般来说,X 射线的连续谱很强,并且通常情况下包含了整个光子能量大于 1keV 的能谱中总能量的 90%.而最坏的情况是,我们的模拟显示,这些高能的 X 射线会极大地降低成像的对比度,使成像清晰度甚至比使用常规的 X 射线管得到的还要差;微液滴靶是另一种能够产生 X 射线源的材料,与固体靶有相似的转换效率,然而,也因为很强的 X 射线高能本底而限制了其成像应用;激光与团簇相互作用产生的 X 射线源,常用普通对比度的激光和大尺寸团簇相互作用,能量转换效率很低,对于 Ar 和 Kr 团簇来说,其能量转换效率仅为 10^{-7};另外,它产生的谱同样包含了一个很强的韧致辐射本底,降低了 K 壳层发射谱的信噪比.因此,激光驱动的更强通量和更高信噪比的硬 X 射线源的研究对于成像应用非常必要.另一方面,由于电子在靶材料中反复振荡或长程输运和碰撞,使产生的 X 射线辐射的时间宽度都在皮秒甚至纳秒量级,造成这些激光 X 射线源在原子分子物理学和材料科学中的应用受到极大限制,使基于激光的硬 X 射线源的实际应用价值大打折扣.因此,如何有效地控制和优化激光硬 X 射线的产生效率、单色性和脉冲宽度,是一个值得研究和亟待突破的课题.

我们在激光硬 X 射线源研究方面取得重要进展.继利用高对比度激光与固体靶相互作用产生了低本底、高转换效率的 K_α 射线源[3]之后,为了进一步提高上述各种参数,以产生更强、单色性更好的 X 射线源,我们采用了高对比度的飞秒激光脉冲与小尺寸气体团簇相互作用[4].目前国际上利用团簇的研究均普遍采用普通对比度的激光,由于这类激光脉冲有强的预脉冲,为保持团簇在主脉冲到来时依然具有能引起线性共振的临界密度,往往采用大尺度的团簇.这样,团簇中产生的超热电子在团簇中多次碰撞,产生大量的连续本底,并且由于大尺度团簇膨胀的整体不均匀性,使 K 壳层 X 射线的能量转换效率很低.在我们的实验中,利用高对比度的激光防止了团簇的先期膨胀,再利用激光强电场激发了纳米级尺寸的团簇在相互作用中的非线性共振机制.这种机制的特点是团簇电子只在激光电场和电荷分离场的共同作用下运动,这些电子的共振将只在脉冲的前几个周期内激发,激光脉冲过后,电子能量迅速消失,所产生的 X 射线源具有 10fs 量级的时间分辨;同时,共振加热的电子和纳米尺度的团簇碰撞,不会产生高能韧致辐射本底;另外,我们还在实验中成功地实现了团簇的非线性共振和线性共振加热之间的相互转换,得到清晰的相互作用物理图像.

实验中采用脉宽为 28fs 的激光脉冲,聚焦区域激光平均强度为 1.6×10^{16} W/cm^2,激光脉冲对比度为 10^9.我们使用了出口直径为 3mm 的气体喷嘴,当背压为 4MPa 时,团簇的平均尺寸约为 8nm.

图 1 显示 Ar 的 X 射线光谱.与固体 Cu 靶在相同条件下与激光相互作用产生的 X 射线谱相比较,Ar 的 K 壳层光谱具有更高的信噪比.光谱的连续谱部分幅值约为 K 辐射谱线峰值的 1%.K 壳层光子总数占光谱中的总光子数的 95%以上,而固体靶

2010－06－21 收到

† 通讯联系人.Email:lmchen@aphy.iphy.ac.cn

在普通对比度下的激光脉冲作用情况下只有 10%. K 壳层 X 射线的转换效率约为激光能量的 10^{-4}，是其他实验室观测结果的 100 倍以上. 这里需要强调的一点是，X 射线流强是由激光对比度决定的. 当激光脉冲对比度从 10^9 减小为 10^7 时，X 射线流强将减小两个量级.

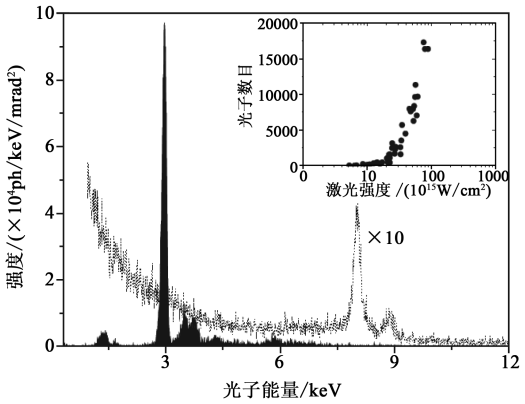

图 1　团簇照射后产生的准单色 X 射线谱

通过改变激光和团簇相互作用的条件，Ar 的 K 壳层 X 射线的辐射可以被优化. 当气体背压增大的时候，X 射线辐射线性增加. 当背压大于 4MPa 时，X 射线辐射达到饱和，同时团簇尺寸继续增大. 在激光脉冲强度与光子数目关系曲线中，我们不难发现有阈值存在，见图 1 之插图. 当激光脉冲的平均强度大于 10^{16} W/cm^2 时，X 射线流强将陡然增大. 更加有趣的现象是，探测到的光子强度随着喷嘴相对于激光焦点位置的改变而改变：当激光聚焦在等离子体边缘时，高能电子将会产生，且 K 壳层 X 射线流强非常不稳定；当喷嘴从激光焦点处移开时，光子流强先是减小到一个最小值，接着开始增加；当喷嘴远离光学焦斑约 6mm 时，X 射线光子流强达到最大值. 在这种情况下，K 壳层 X 射线产生非常稳定. 在这种离焦情况下，等离子体通道比最佳聚焦时更长，为产生更多的 X 射线光子数提供了更大的作用体积.

二维全电磁场的模拟反映了相互作用的微观时间过程. 图 2 展示了不同时间的电子分布轮廓快照. 图 2(a)为不同时间的电子密度分布. 图 2(b)为在激光脉冲早期，不同时间下外层电子的能量谱和相位谱(p_x，p_y)，图 2(c)为脉冲峰值后，不同时间下外层电子的能量谱与相位谱(p_x，p_y). 在激光脉冲初期，电子被激光电场驱动，在每个激光脉冲周期中沿着激光偏振方向抖动，见图 3(b). 当这些电子的能量大于 Ar 的电离阈值时，在它们回到团簇时，将会激发 K 壳层电离产生 X 射线. 但是此振动现象在激光脉冲后期会变得模糊，因为逃逸在团簇周围的电子会形成电子云，它将会抵消激光电场的作用. 因此，K 壳层 X 射线光子只产生于强激光脉冲前沿所激发的电子振动. 对 Ar 团簇而言，当 $I=1\times10^{17}$ W/cm^2 时，振动能量约为 6keV，这个能量已经足够激发能量为 3keV 的 Ar 的 K 壳层光子. 同时考虑到 Ar 的电离截面，只有能量大于 5 keV 的电子才能有效激发 Ar 的 K 壳层X 射线，所以电子的抖动能量只在激光的几个周期内满足条件，产生辐射时间宽度为 10fs 量级的超快源. 另一方面，团簇内壳层电子得到的能量远远低于K 壳层电离阈值，这就排除了在普通对比度下，激光与大尺寸团簇相互作用的长时间电离机制的可能性.

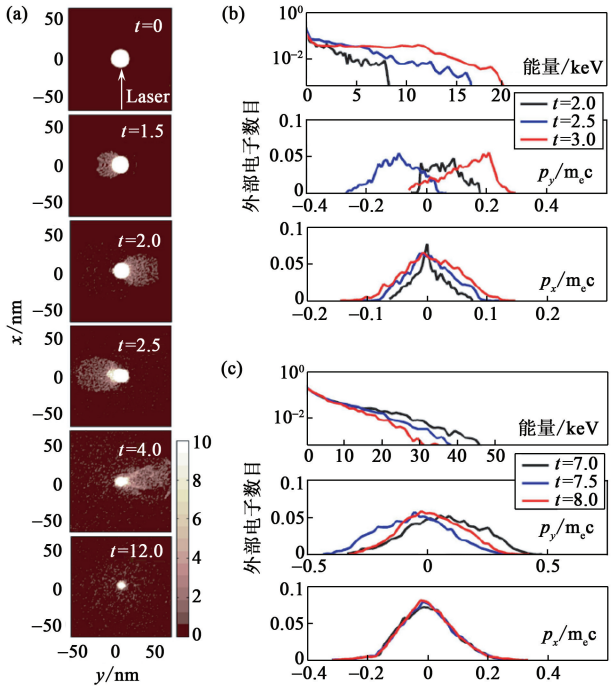

图 2　团簇的非线性共振过程

综上所述，利用超强飞秒激光与团簇靶相互作用产生强的 Ar K 壳层准单色 X 射线源的研究最近取得重要进展，比较彻底地消除了上述激光 X 射线源的不利因素. 经测量，Ar 的 X 射线发射强度提高到可以用于激光单发相衬成像的程度. 非线性共振成为高对比度飞秒激光与纳米尺度团簇相互作用的主要机制. 在这种相互作用过程中，电子在大约 10fs 极短的时间尺度内被有效驱动，产生脉宽比同步辐射源低 3 个量级的 X 射线辐射. 峰值亮度约为 2×10^{21} 光子/(s/mm^2/mrad^2)，可以与第三代同步辐射源的峰值亮度相比拟. 此超强飞秒时间尺度的

单色硬 X 射线源为单发激光驱动的 X 射线的应用提供了可能,这将极大地推动此领域的发展并确立了基于激光的 X 射线源在超快研究中的实际应用价值和地位.

参考文献

[1] Krol A *et al*. Med. Phys., 1997, 24:725

[2] Yu J *et al*. Phys. Plasmas,1999, 6: 1318

[3] Chen L M *et al*. Phys. Rev. Lett., 2008,100:045004

[4] Chen L M *et al*. Phys. Rev. Lett., 2010,104:215004