

双爆炸膜内壳层光电离 X 射线激光实验研究

何绍堂 淳于书泰 沈华忠 尤永碌 张启仁
杜凤英 顾元元 杨上金 黄文忠 蔡玉琴
孔令华 谷渝秋 孙永良 何 安 刘素萍

西南核物理与化学研究所, 成都 610003

1993 年 3 月 3 日收到

报道了 Pd-NaF, Pd-Cu, Ag-NaF 和 Ag-Cu 耦合双爆炸膜内壳层光电离 X 射线激光的实验方法和一些实验结果. 结果表明, 在本实验条件下, 激光加热 NaF 或 Cu 靶产生的 1 keV 区的光子, 可以增强 Pd 或 Ag 等离子体中类-Cu 离子的 $3d^{10}4p-3d^94s^2$ 软 X 射线发射的强度, 但不足以形成 X 射线激光的输出.

PACC: 4255V; 3280F

一、引 言

自从 LLNL 实验室证实电子碰撞机制的类-NeSe 软 X 射线自发辐射放大^[1]以来, 很多实验室都在努力寻求实现短波长 X 射线激光的途径, 为了研制出波长在“水窗”(2.3—4.4 nm)区域的 X 射线激光, 实现对活生物体大分子的三维全息摄影. 两种最成功的抽运方式——电子碰撞和复合抽运, 都在不断取得进展. 电子碰撞抽运方式的类-Ni W 的 X 射线激光的输出达到了增益长度乘积为 7 的水平, 波长为 4.32 nm, 已经进入水窗. 但是电子碰撞抽运方式的类-Ni 的 X 射线激光, 只能用功率非常高的脉冲激光装置作为抽运源, 要求线聚焦功率密度 $\geq 10^{14} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. 目前, 只有 LLNL(美国利弗莫尔国家实验室)实验室的 Nova 装置才能开展此类实验研究. 为此, 人们还在探索新的抽运方式, 设法利用中等功率水平(线聚焦功率密度约为 $10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$)实现所希望的短波长 X 射线激光. Morley 和 Sugar^[3]提出用双爆炸膜靶的内壳层光电离来获得短波长 X 射线激光的方案, 并预言用中等规模的激光强度(约 $10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$)可以实现水窗区域的 X 射线激光. Morley 等人^[4]用激光加热 NaF 靶作光电离的 X 射线抽运源, 用激光加热 Pd 作激光工作介质, 进行了双靶耦合实验, 观察到了类-Cu Pd 的 $3d^{10}4p-3d^94s^2$ 的 4.6 nm 跃迁线.

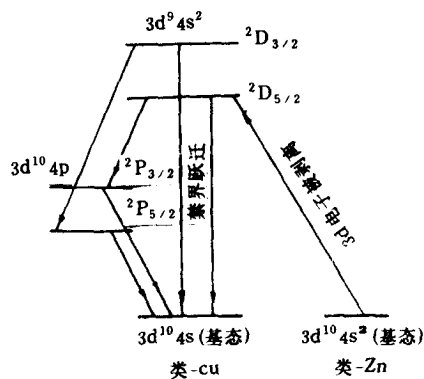


图 1 类-Zn 的 3d 电子的剥离

他们认为类-Cu Pd 可以作为短于 5 nm 的 X 射线激光研究的后备者。

光电离类-Zn 离子的 3d 电子到 $3d^9 4s^2$ 的能级图见图 1. 用功率密度约为 $10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的激光加热 Pd 薄膜靶作为工作介质, 使 Pd 等离子体处于类-Zn 基态的离子有较高的丰度. 同时, 用激光加热 NaF 靶产生强的 0.9—1.5 nm 波段的 X 射线作为抽运光源. Pd 靶和 NaF 靶相距 $500 \mu\text{m}$, 当 NaF 等离子体发射的 X 射线进入 Pd 等离子体时, 剥离类-Zn 离子的一个 3d 电子使处于 $3d^9 4s^2$ (类-Cu) 的激发态. 由于类-Cu 激发态 $3d^9 4s^2$ 到类-Cu 基态 $3d^{10} 4s$ 是禁戒跃迁, 而 $3d^{10} 4p$ 到类-Cu 基态 $3d^{10} 4s$ 之间有较高的跃迁概率, 有可能形成 $3d^9 4s^2$ 与 $3d^{10} 4p$ 之间的粒子数反转, 引起 $3d^{10} 4p \rightarrow 3d^9 4s^2$ 的软 X 射线激光跃迁.

本工作是在 Morley 等人^[4]的实验基础上, 进行的内壳层光电离抽运方式 X 射线激光实验研究的进一步探索, 以求对这种机制产生 X 射线激光的可能性获得更进一步的了解.

二、实验方法

选用了两种材料, Pd 和 Ag, 作为 X 射线激光工作介质用靶; 也选用了两种材料, NaF 和 Cu, 作为产生 X 射线的光电离抽运源用靶. 这样, 进行了 Pd-NaF, Pd-Cu, Ag-NaF 和 Ag-Cu 耦合的内壳层光电离 X 射线激光可能性的实验研究.

靶的结构有两种方式. 第一类靶, 在同一张 Formvar 膜的两侧分别蒸镀激光工作介质和抽运源材料, 称为复合靶. Formvar 膜厚度约 250 nm, Pd 的厚度约 100 nm, NaF 的厚度约 $1.4 \mu\text{m}$. 第二类靶, 激光工作介质和抽运源材料, 各自蒸镀在自己的底衬 (约 250 nm 的 Formvar 膜) 上, 两种镀好的膜相距 $250 \mu\text{m}$, 构成双爆炸膜靶. 激光工作介质的厚度, Pd 为 100 nm, Ag 为 60—90 nm; 抽运材料的厚度, Cu 为 130 nm, NaF 为 $1.4 \mu\text{m}$. 双爆炸膜靶的耦合状态见图 2.

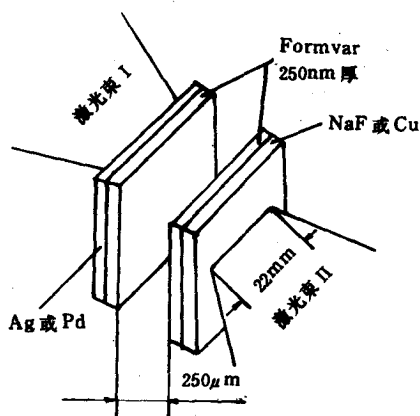


图 2 双靶耦合状态

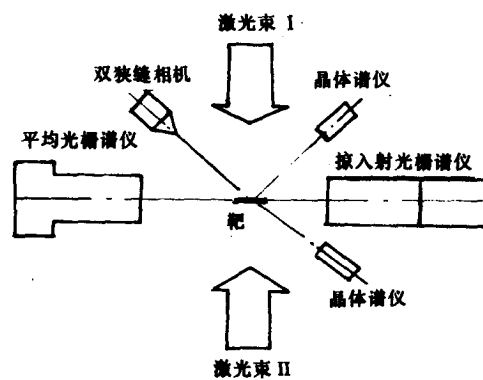


图 3 实验装置

实验是在中国科学院上海光学精密机械研究所的神光装置上进行的. 神光装置是一台钕玻璃激光装置, 它能同时输出南、北两路脉冲激光, 也可以单束输出进行打靶. 南路已

经倍频,波长为 $0.53\ \mu\text{m}$,每发能量约为 $200\ \text{J}$,脉冲宽度约为 $900\ \text{ps}$,线聚焦长度为 $22\ \text{mm}$,宽度约为 $120\ \mu\text{m}$;北路波长为 $1.06\ \mu\text{m}$,能量约为 $600\ \text{J}$,脉冲宽度约为 $900\ \text{ps}$,线聚焦长为 $22\ \text{mm}$,宽度约为 $250\ \mu\text{m}$. 两束时间同步偏差 $<40\ \text{ps}$.

实验装置见图 3. 一台平场光栅谱仪和一台罗兰圆式的掠入射光栅谱仪分别安排在线聚焦等离子体的轴线的两端. 在单靶实验中,用于观察激光介质的等离子体状态;在双靶耦合和复合靶实验中,用于观察类-Cu 离子的 $3d^{10}4p-3d^94s^2$ 软 X 射线跃迁的线强度. 平场光栅谱仪的光栅刻痕平均值为 $1200\ \text{条/mm}$,曲率半径为 $5649\ \text{mm}$,谱分辨为 $0.01\ \text{nm}$;掠入射光栅谱仪的光栅刻痕为 $1200\ \text{条/mm}$,曲率半径为 $1\ \text{m}$,谱分率为 $0.005\ \text{nm}$. 两台谱仪均用 Kodak SWR 进行记录. 两台晶体谱仪(TAP 晶体, $2d=2.576\ \text{nm}$),用于测量单靶实验中 Cu 和 NaF 等离子体发射的 X 射线在 $1\ \text{keV}$ 附近的能谱. 一台双狭缝相机用于测量线聚焦的焦斑.

为了确定激光工作介质的状态和 X 射线抽运源的强度,首先分别用 $0.53\ \mu\text{m}$ 或 $1.06\ \mu\text{m}$ 的激光加热 Pd, Ag, NaF 和 Cu 进行了单束实验,然后进行双靶耦合复合靶的实验. 本次实验共打靶 53 发,其中双靶耦合实验 10 发.

三、实验结果

用 $1.06\ \mu\text{m}$ 的激光加热 Pd 或 Ag 靶时,激光功率密度在 $4\times 10^{12}-1.2\times 10^{13}\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 条件下,观察到了一定强度的类-Cu 和类-Zn 离子发射的谱线,但在功率密度低于 $3\times 10^{12}\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,类-Cu 和类-Zn 离子发射的谱线很弱;当用 $0.53\ \mu\text{m}$ 的激光加热这些靶时,激光功率密度在 $4\times 10^{12}-7\times 10^{12}\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,类-Cu 和类-Zn 离子发射的谱线较强,但当功率密度低至 $2.7\times 10^{12}\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,类-Cu 和类-Zn 离子发射的谱线非常弱. 以上事实说明,激光功率密度低于 $3\times 10^{12}\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,此时的 Pd 和 Ag 等离子体已经不适合于作光电离机制的 X 射线激光工作介质.

在双靶耦合和复合靶实验中,进行了类-Cu Pd 和类-Cu Ag 的 $3d^{10}4p-3d^94s^2$ 软 X 射线发射的强度观测. 为防止激光加热 Cu 或 NaF 产生的 X 射线对光栅谱仪的本底的干扰,在 NaF 或 Cu 等离子体的轴线上加了挡光物质,此物质对 Pd 或 Ag 等离子体的轴向发射无阻挡. 类-Cu Pd 的 $3d^{10}4p^2D_{3/2}-3d^94s^2^2D_{5/2}$ 软 X 射线跃迁波长为 $4.64\ \text{nm}$ (Morley^[4] 的观测值为 $4.606\ \text{nm}$);类-Cu Ag 的 $3d^{10}4p^2D_{3/2}-3d^94s^2^2D_{5/2}$ 软 X 射线跃迁波长为 $4.247^{[5]}\ \text{nm}$. 这些谱线观测的结果如下:

1. 单束线聚焦激光加热 Pd 或 Ag 靶,在功率密度为 $4\times 10^{12}-1\times 10^{13}\ \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,观测到了很弱的 $4.6\ \text{nm}$ (对 Pd 靶)和 $4.24\ \text{nm}$ (对 Ag 靶)的线发射.

2. Ag-Cu 双爆膜耦合靶和 Pd-NaF

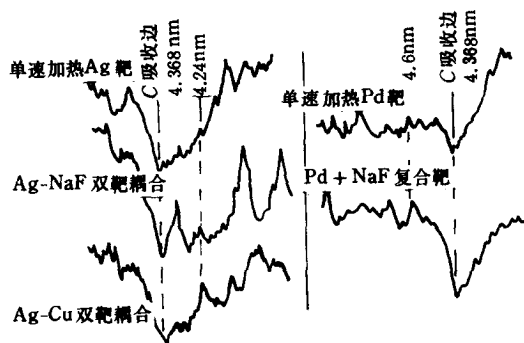


图 4 几发打靶的微密度计扫描的结果

复合靶发射 4.24 nm (Ag 的类-Cu) 和 4.6 nm (Pd 的类-Cu) 线比单束加热时稍有增强。

3. 在我们的实验条件下, 双靶耦合和复合靶均不能获得很强的 4.24 和 4.6 nm 线发射。

在图 4 中显示出部分实验结果。

四、讨 论

类-Cu Pd 和类-Cu Ag 双爆炸膜内壳层光电离 X 射线激光研究是一个难度很大的课题。它要求满足以下几个条件才能有明显的 X 射线激光产生:

1. 激光加热 Cu 或 NaF 靶产生的 0.9—1.5 nm 波段的 X 射线要足够强, 才能使类-Zn 离子剥离到类-Cu 激发态 $3d^9 4s^2$ 。

2. 激光加热 Ag 或 Pd 形成的等离子体要使类-Zn 基态粒子数丰度高, 电子温度和电子密度适中, 而且处于此状态的等离子体空间尺度较大, 维持时间较长。

3. X 射线抽运源同激光工作介质的匹配要好, 包括时间和空间的匹配。

本实验是一次探索性实验, 未能对上述三个条件作详细诊断, 很难确定偏离以上条件的程度, 只能讲本实验还未达到产生光电离 X 射线激光的条件。尽管如此, 本实验在以下几个方面取得了进展:

1. 单束线聚焦激光加热 Pd 或 Ag 靶, 观察到了弱的 $3d^{10} 4p \rightarrow 3d^9 4s^2$ 软 X 射线跃迁的 4.6 nm (对 Pd) 和 4.2 nm (对 Ag) 线。这是过去的点聚焦实验中未观察到的。这是等离子体中的电子碰撞激发引起的。电子碰撞激发能使一定数量的类-Cu 和类-Zn 离子跃迁到类-Cu 的激发态 $3d^9 4s^2$, 而 $3d^9 4s^2$ 至类-Cu 基态 $3d^{10} 4s$ 为禁界跃迁, 因而形成 $3d^9 4s^2$ 与 $3d^{10} 4p$ 能级间的少量粒子数反转。这种反转跃迁线强度很弱, 一般在点聚焦实验中很难观测到。本实验采用了 20 mm 长的线聚焦等离子体, 沿等离子体的轴向有增强作用, 因此被轴向向上的光谱谱仪所观测。

2. Ag-Cu 双爆炸膜耦合靶和 Pd-NaF 复合靶实验中, 观察到 $3d^{10} 4p \rightarrow 3d^9 4s^2$ 跃迁的软 X 射线的强度比单束线聚焦打靶实验的要强一些, 说明内壳层光电离起了一定的作用, 也说明本实验条件离产生内壳层光电离 X 射线激光的条件相差不太遥远。只要我们继续努力, 增加对等离子体参数的时间分辨和空间分辨的诊断, 改进打靶的激光参数和双靶耦合条件, 实现内壳层光电离 X 射线激光是有可能的。

3. 从图 4 的实验结果来看, 抽运源 (NaF 或 Cu 等离子体发射的 X 射线) 的强度显得不够强。Ag-NaF 双靶耦合实验未观测到对 4.24 nm 线有增强作用, 而 Ag-Cu 双靶耦合实验却有一定的增强作用。这是因为 Cu 等离子体发射的在 1 keV 区的 X 射线强度高于 NaF 等离子体的 4 倍左右 (该结果将另文发表)。另外, Pd+NaF 复合靶实验观测到了对 4.6 nm 线有弱的增强作用, 而 Pd-NaF 双靶耦合 (图 4 中未给出曲线) 实验却观测不到增强作用。这是因为复合靶与双靶耦合实验相比减少了抽运光子对激光工作介质之间的几何耦合损耗的结果。对于内壳层光电离机制的 X 抽运激光的产生, 要求很强的抽运源。从本实验结果来看, 即使用 Cu 等离子体作抽运源, 仍然不能获得 X 射线激光的输出。

五、结 论

本工作是一次内壳层光电离 X 射线激光研究的探索性实验. 实验证实了抽运源产生的光子对反转跃迁线的强度起加强作用. 要使光电离机制获得明显的 X 射线激光输出, 还需在实验中进一步增加时间和空间分辨的诊断, 把激光工作介质的状态和抽运源的参数诊断清楚, 加强理论分析, 改善打靶参数和靶结构. 这些都是我们在下一步的工作中准备要做的.

中国科学院上海光学精密机械研究所神光激光装置运行人员在实验中给予了大力帮助. 我所二〇九室和中国科学院西安光学精密机械研究所承担了制靶工作. 北京应用物理与计算数学研究所的张国平、盛家田等在理论上指导了本实验工作. 彭翰生、陈涵德、江文勉和温树槐等也进行了指导. 在此对他们一并表示感谢.

- [1] D. L. Matthews *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **54**(1985), 106.
- [2] D. L. Matthews *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **65**(1990), 420.
- [3] P. D. Morley and J. Sugar, *Phys. Rev.*, **A38**(1988), 3139.
- [4] P. D. Morley *et al.*, *Appl. Phys.*, **B50**(1990), 173.
- [5] J. Sugar *et al.*, *Physica Scripta.*, **43**(1991), 484.

INVESTIGATION OF DOUBLE EXPLODING FOIL EXPERIMENT ON INNER-SHELL PHOTOIONIZATION X-RAY LASER SCHEME

HE SHAO-TANG CHUNYU SHUTAI SHEN HUA-ZHONG
YOU YONG-LU ZHANG QI-REN DU FENG-YING
GU YUAN-YUAN YANG SHANG-JIN HUANG WEN-ZHONG
CAI YU-QIN KONG LING-HUA GU YU-QIU
SUN YONG-LIANG HE AN LIU SU-PING

Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003

(Received 3 March 1993)

ABSTRACT

This paper presents the methods and a part of measurement result about exploration of double exploding foil experiment on inner-shell photoionization X-ray laser scheme. The results show that the line intensities of transitions $3d^{10}4p-3d^94s^2$ for Cu-like Pd and Ag ions could be enhanced by the kilovolt pumping X-ray produced in laser-heated NaF and Cu plasmas, but still could not be amplified to form a laser output.

PACC: 4255V; 3280F