

# 双脉冲驱动锗薄膜靶高增益 X 射线激光实验\*

张启仁 蔡玉琴 淳于书泰 黄文忠  
洪 伟 杨上金 杜凤英 尤永禄  
孙永良 何 安 庄秀群 武德勇

(西南核物理与化学研究所, 成都 610003)

(1994年4月5日收到)

利用窄脉宽,低能量并具有一定时间间隔的两束激光脉冲驱动薄膜锗靶,获得高增益X射线激光的实验方法和结果。每束入射激光能量仅几十焦耳,脉宽100—160ps,两脉冲时间间隔350ps,所用的靶为锗薄膜靶,其长为10mm,厚为34.0nm。实验中利用掠入射光栅谱仪观测到类氪锗 $3s-3p$   $J=0-1$ 和 $J=2-1$ 两条激光线。它们的波长分别为19.61nm和23.63nm,折射角均为12mrad,发散角分别小于10.8mrad和17.8mrad。

PACC: 4225V;0765;4225B

## 1 引 言

自1984年美国LLNL实验室<sup>[1]</sup>利用电子碰撞激发机制首次成功地观测到X射线激光以来,经世界各国科学家的努力,在这个领域内取得了令人瞩目的成果,利用多种机制产生了X射线激光<sup>[1-7,9]</sup>,激光波长已缩短至水窗<sup>[8]</sup>,GL值超过饱和值。尽管没有象其它先进国家那样大型激光器,我国科研人员也已用几种机制产生了X射线激光<sup>[3,4,6]</sup>,利用对接靶使类氪锗X射线激光达到饱和<sup>[4]</sup>。

尽管如此,距X射线激光在各领域内的实际应用还有相当距离。其主要原因是,电子碰撞激发机制的效率很低。要产生高光束质量的X射线激光,对类氪锗X射线激光来说所需驱动源能量为数千焦耳,而对类镍钨等则需上万焦耳的能量,只有以大型激光器作为驱动源才有可能。为此,科学家们正努力开发和研制高效、低耗、小型化“Table-Top”激光器。只有这样才会使X射线激光的实际应用成为可能。近年来,这项研究工作已有很大进展,提出一些方案<sup>[5,9]</sup>。张国平等<sup>[8]</sup>提出利用窄脉宽、低能量并具有一定时间间隔的两束激光脉冲驱动锗靶的新设想方案。我们根据“神光”装置的实际条件,确定了具体的实验方案,进行实验并一次取得成功。

\* 国家“863”高技术项目资助的课题。

## 2 基本原理

### 2.1 理论设想

不论用厚靶还是用薄膜靶,对于电子碰撞激发机制,都需要在一定的空间(约几十微米)内,产生具有合适的电子密度( $1 \times 10^{20} - 2.5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ )、电子温度(0.6—1.5keV)、离子温度、离子丰度(约大于 20%),且有一定持续时间的均匀等离子体,才能产生 X 射线激光。过去,我们用单脉冲驱动厚锗靶产生了符合上述条件的等离子体,成功地获取了 X 射线激光<sup>[9]</sup>,但代价是巨大的,所用脉冲的宽度长达 $\sim 1\text{ns}$ ,能量高达 500J 以上。可见,效率是很低的。通过对国外所提各种设想的分析和比较,张国平等<sup>[1,2]</sup>提出用两束不同频率激光作驱动源,利用类氦离子(或类镍离子)产生 X 射线激光的新设想方案。基本物理设想是:利用第一束激光脉冲将薄膜靶烧穿(倍频激光比较合适),产生有合适离子丰度的等离子体。然后让它自由膨胀一段时间,在形成电子密度和离子丰度都适合于 X 射线激光产生且有一定均匀空间的等离子体后,第二束激光脉冲(选脉宽窄的基频光)打到已形成的等离子体上。此时,等离子体的电子密度已低于基频激光的临界密度,第二束激光脉冲不再将其能量消耗在靶烧蚀上,而是迅速将等离子体的电子温度提高。由于电子密度低,第二束激光脉冲不会造成等离子体过电离、此时离子同电子能量交换也很少,所以等离子体中离子温度仍保持比较低的值。可见,利用双脉冲可在具有较低能量输出激光器条件下获得上述产生 X 射线激光的等离子体条件。与单脉冲驱动相比,理论计算预估,电子温度大约可提高 3 倍,离子温度基本不变,增益系数  $G$  值提高 3 倍左右。

### 2.2 理论预估的实验参数<sup>[9]</sup>

通过对若干套参数和模型的计算,理论上提供如下的实验参数:第一束激光波长  $0.53\mu\text{m}$ ,脉宽 $\sim 150\text{ps}$ (理论上希望窄些,如取 $\sim 40\text{ps}$ ),靶面功率密度  $(2-4) \times 10^{13} \text{W}/\text{cm}^2$ 。第二束激光波长  $1.053\mu\text{m}$ ,脉宽 $\sim 150\text{ps}$ (理论上希望窄些,如取 $\sim 20\text{ps}$ ),靶面功率密度  $2 \times 10^{14} \text{W}/\text{cm}^2$ 。两束激光脉冲的时间间隔 200—600ps。靶结构如图 1 所示。靶材为纯锗,厚  $d = 30.0-50.0\text{nm}$ 。靶衬为 Formvar,厚  $D \cong 100.0\text{nm}$ 。

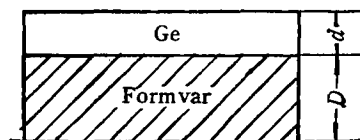


图1 靶结构

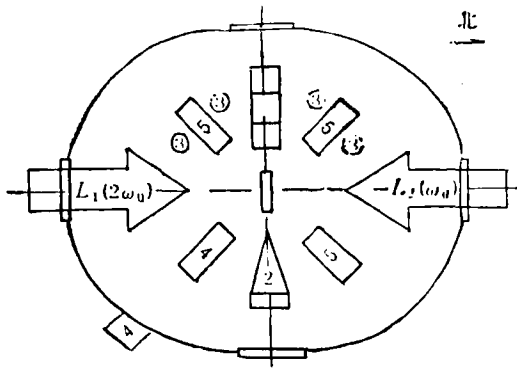
## 3 实验安排

实验是在上海“神光”装置上完成的。具体布局如图 2 所示。实验中采用两路对打薄

1) 张国平私人通信。

2) 叶春福私人通信。

膜锗靶(锗材料面向南)方式。第一束激光(南路)波长  $0.53\mu\text{m}$ , 脉宽 $\sim 115\text{ps}$ , 输出能量



1 为掠入射光栅谱仪; 2 为针孔相机; 3 为能量卡计;  
4 为晶体谱仪配条纹相机; 5 为晶体谱仪; 6 为靶

图 2 实验布局

35—40J, 焦斑 $\sim 12 \times 0.12\text{mm}^2$ , 靶面功率密度 $\sim 2 \times 10^{13}\text{W}/\text{cm}^2$ 。第二束激光(北路)波长  $1.053\mu\text{m}$ , 脉冲宽度 $\sim 160\text{ps}$ , 输出能量75—85J, 焦斑 $\sim 12 \times 0.12\text{mm}^2$ , 靶面功率密度 $\sim 2.8 \times 10^{13}\text{W}/\text{cm}^2$ 。两束激光脉冲的时间间隔为  $350\text{ps}$ 。靶由图 1 所示结构的层膜贴在缝宽 $\sim 1\text{mm}$ , 缝长 $> 12\text{mm}$ 的靶架上构成。锗层厚  $34.0\text{nm}$ , 底衬 Formvar 厚  $90.0\text{nm}$ , 靶长  $10\text{mm}$ 。实验中使用了 5 种探测器。其中晶体谱仪、晶体谱仪配条纹相机用来监测等离子体的电子密度和电子温度; 能量卡计监测等离子体均匀

性; 针孔相机测量驱动激光焦斑; 掠入射光栅谱仪用来监测是否有 X 射线激光产生, 如有 X 射线激光产生则可测出 X 射线激光线的波长、发散角、折射角等参数。实验中使用 3 台晶体谱仪(其中一台用于底片在位标定), 晶体均为 TAP 晶体 ( $2d = 2.576\text{nm}$ ), 用 Kodak AA5X 射线底片记录谱线, 可测波长范围为  $0.8\text{—}1.0\text{nm}$ 。晶体谱仪配条纹相机置于靶室的东南部, 也使用 TAP 晶体, 所测波长范围为  $0.83\text{—}0.93\text{nm}$ 。在靶室东侧和正下方各放一台针孔相机, 从两个方向测量激光焦斑。掠入射光栅谱仪置于靶室西部, 它的光轴与靶面法线方向垂直。谱仪入口缝距靶心  $70\text{mm}$ , 入口缝宽  $15\mu\text{m}$ 。光栅为表面镀铂的凹面反射光栅, 光栅常数为  $1200\text{线}/\text{mm}$ , 可测波长范围为  $2.5\text{—}30.0\text{nm}$ 。谱仪用 Kodak SWR 底片记录谱线。

## 4 实验结果及分析

### 1) 等离子体参数的监测

a) 等离子体的电子温度和电子密度(时间积分测量结果) 晶体谱仪测量到的类氦锗离子 L 带谱线底片, 经数字化数据处理(识谱、扣除本底、光学密度转换成谱线强度, 滤片吸收修正、计算线强比等)后, 得到谱线径迹如图 3 所示。利用谱线强度比  $(I_{3A} + I_{3B} + I_{3F} + I_{3G}) / (I_{3C} + I_{3D})$ , 确定产生 X 射线激光等离子体的电子温度  $> 1\text{keV}$ ; 利用谱线强度比  $(I_{3F} + I_{3G}) / (I_{3A} + I_{3B})$ , 确定产生 X 射线激光等离子体的电子密度  $\sim 1 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 。

b) 等离子体电子温度随时间的变化 晶体谱仪配条纹相机测量到的结果经图象—数据转换、识谱、解谱、计算线强化等处理后, 由双电子复合伴线与共振线相对强度比得到等离子体电子温度, 其结果列在表 1 中。由表 1 可以看出等离子体电子温度随时间的变化过程。第一束激光脉冲打到靶上后, 形成电子密度比较高(因激光频率为  $2\omega_0$ )、电子温度比较低(最高为  $0.75\text{keV}$ )的等离子体。经一段时间的自由膨胀, 在等离子体电子密度下降的同时电子温度也有所下降(低达约  $0.41\text{keV}$ )。第二束激光脉冲作用后, 电子温度有

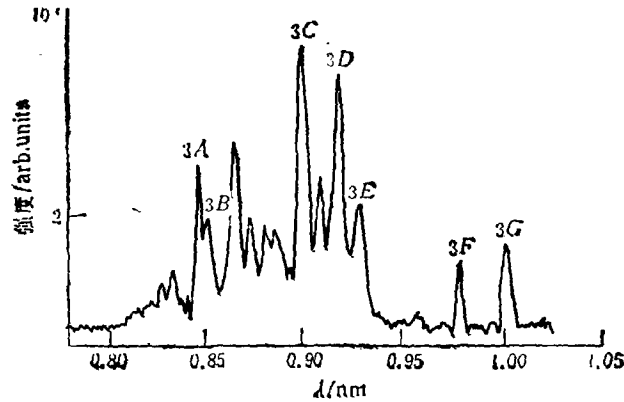


图 3 类氦锗离子 L 带谱线

表 1 电子温度随时间的变化

$t^*/ps$	-190	-95	0	96	223	350	414
$T/eV$	483	539	750	414	483	>1000	>1000

\* 取第一束激光脉冲作用后,电子温度达最大值时刻为时间 0 点。

较大幅度的提高 ( $>1keV$ )。

c) 等离子体均匀性的监测 表 2 给出了由位于锗靶两侧(南侧和北侧)能量卡计测量的等离子体总辐射能量、散射能量和吸收能量。由表 2 可见,等离子体总辐射能量,散射能量和吸收能量分布有较好的对称性。由此可推断等离子体分布比较均匀。

表 2 等离子体总辐射能量,散射能量和吸收能量

	辐射总能量/J	散射能量/J	吸收能量/J
北 侧	34.1	20.8	13.4
南 侧	36.8	20.9	16.4

等离子体状态参数监测表明: 在所选取的激光器参数和靶参数条件下, 获得了适合 X 射线激光产生的等离子体状态。

2) 图 4 为掠入射光栅谱仪测到的软 X 射线谱的微密度计扫描图。经分析和识谱后, 确定所测到的两条激光线是类氦锗离子  $3s-3p$  跃迁产生的, 其波长分别为 19.61nm 和 23.63nm。经数据处理后得出, 它们的折射角均为 12mrad, 发散角分别小于 10.8mrad 和 17.8mrad。

3) 过去用大能量、宽脉宽的单脉冲驱动锗靶产生 X 射线激光, 在约 12mm 靶长时, 薄膜靶未观测到激光线, 厚靶也只能看到很弱的激光线<sup>[3]</sup>。这次实验用 10mm 的靶就观测到比较强的谱线, 由此可见这次实验获得了比以前大的增益系数。

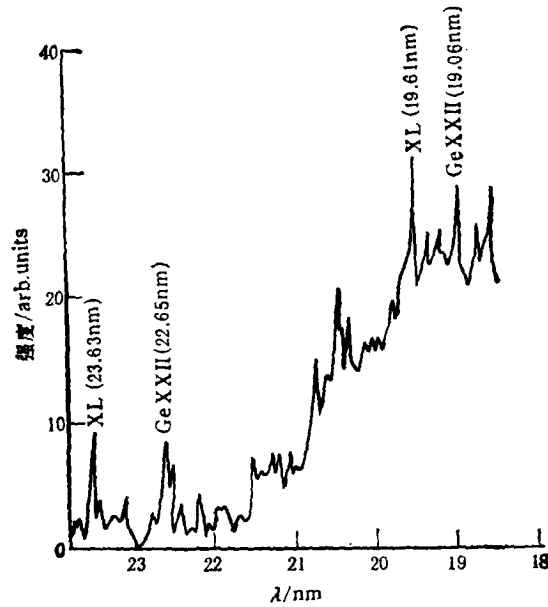


图4 包含两条激光线的微密计扫描图

## 5 结 论

本实验利用具有一定时间间隔的双脉冲驱动锗薄膜靶,在窄脉宽、低能量条件下,获得适合X射线激光产生的等离子体条件,成功地观测到了类氩锗离子 $3s-3p J=0-1$ 及 $J=2-1$ 两条X射线激光线,两条激光线的波长分别为19.61nm和23.63nm,激光出射方向与靶面均成12mrad角(折射角),两条激光线的发散角分别小于10.8mrad和17.8mrad,19.61nm线强度比23.63nm强。实验结果表明:双脉冲驱动比单脉冲驱动,不仅所形成的等离子体电子温度有较大幅度提高,而且等离子体均匀性更好。因而提高了X射线激光增益系数,提高了泵浦效率。为X射线激光向高效、低耗、小型化发展,开辟了一条新路。

由于激光驱动器现有条件的限制,使实验遗留下一一些问题,有待于激光器升级后开展更多的物理实验和更多的理论探讨解决。

本实验得到了领导的关心和支持,上海“神光”装置工作人员,上海激光等离子体研究所,中国工程物理研究院核物理与化学研究所207室,209室有关人员的大力支持,中国工程物理研究院核物理与化学研究所203室陈冠宇副研究员的热情帮助,在此一并表示感谢。

- [1] D. L. Matthews *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **54**(1985), 110.
- [2] Y. Kato *et al.*, *Appl. Phys.*, **B50**(1990), 47.
- [3] 淳于书泰等,强激光与粒子束,**2**(1990),404.
- [4] 王世绩等,强激光与粒子束,**4**(1992),165.
- [5] S. Maxon *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **70**(1993), 2285.

- [6] 沈华忠等, 强激光与粒子束, 1(1989), 87.  
[7] A. Corillon *et al.*, RAL Annual Report, Vol. RAL-87, (1987), 13.  
[8] B. J. Macgowan *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 65(1990), 420.  
[9] Yvonne A. Carta, *Laser Focus World*, Jan. (1993), p. 108.

## EXPERIMENT OF HIGH GAIN X-RAY LASER FROM DOUBLE-PULSE DRIVEN Ge FOIL TARGET

ZHANG QI-REN    CAI YU-QIN    CHUNYU SHU-TAI    HUANG WEN-ZHONG  
HONG WEI    YANG SHANG-JIN    DU FENG-YING    YOU YONG-LU  
SUN YONG-LIANG    HE AN    ZHUANG XIU-QUN    WU DE-YONG

(Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu, 610003)

(Received 5 April 1994)

### ABSTRACT

An experimental method that obtained high gain X-ray laser by lower energy double-pulse with a time separation driven Ge foil targets, and experimental results are described. The experiment was performed at "Shengguang" laser facility in Shanghai. Energy of two pulses amounts to about 100J the FWHM of the pulses is 100—160ps, the time separation between two pulses is 350ps. The material of target is pure germanium, its thickness is about 34.0nm. Two laser lines of 3s-3p transition from Ne-like Ge ions are experimentally measured with a grazing incidence grating spectrograph. Their wavelength is 19.61nm and 23.63nm, respectively. Both of the deflection angles are equal to 12mrad, their divergence angle is less than 10.8mrad and 17.8mrad, respectively.

**PACC:** 4225V; 0765; 4225B