

CNIC-01445
CAEP-0049

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY REPORT

缝靶X光辐射特性诊断技术研究

**Investigation on Diagnostic Techniques of X-Ray
Radiation Characteristic From Slit Target**
(In Chinese)



中国核情报中心
原子能出版社

China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press

图书在版编目 (CIP) 数据

中国核科技报告CNIC-01445, CAEP-0049: 缝靶X光辐射特性诊断技术研究/成金秀等著. —北京: 原子能出版社, 2000. 3

ISBN 7-5022-2146-8

I. 中... II. 张... III. 核技术-研究报告-中国 IV. TL-2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 14040 号

原子能出版社出版 发行

责任编辑: 李曼莉

社址 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

开本 787×1092 mm 1/16 印张 1/2 字数 12 千字

2000 年 3 月北京第一版 2000 年 3 月北京第一次印刷

印数: 1—150

定价 5.00 元



成金秀：中国工程物理研究院副研究员，
1976年12月毕业于四川大学物理系。

CHENG Jinxiu: Associate researcher of
the Institute of Chinese Academy of
Engineering Physics. Graduated from
Physics Department of Sichuan
University in 1976.

CNIC-01445

CAEP-0049

缝靶X光辐射特性诊断技术研究

成金秀 缪文勇 孙可煦 王红斌

曹磊峰 杨家敏 陈正林

(中国工程物理研究院, 成都, 610003)

摘 要

在“星光Ⅱ”激光装置上,采用长柱缝靶模拟 X 光在柱腔内的输运过程,研究腔壁 X 光的辐射特性。实验中利用高时空分辨的 X 射线皮秒分幅相机和软 X 射线条纹相机从缝口观测腔内壁 X 光辐射时空分布,得到 X 光在腔中的输运速率、X 光发射时间和轴向强度衰减量。利用 X 射线 CCD 针孔透射光栅谱仪观测到腔内 X 光辐射光谱随空间位置的变化,得到 X 光在输运过程中被多次吸收和发射后谱的变化特征。用 XRD 和 Dante 谱仪分别得到缝口、源和输运末端 X 光辐射总量和辐射温度。给出了实验中获得的典型结果,并对获得的结果进行了简要的分析讨论。

Investigation on Diagnostic Techniques of X-Ray Radiation Characteristic From Slit Target (*In Chinese*)

CHENG Jinxiu MIAO Wenyong SUN Kexu WANG Hongbin
CAO Leifeng YANG Jiamin CHEN Zhenglin

(China Academy of Engineering Physics, Chengdu, 610003)

ABSTRACT

On the Xingguang-II facility, X-ray transport process in a cavity target was simulated in a long cylindrical cavity with slits. High temporally and spatially resolved Microchannel Plate (MCP) gated X-ray picosecond frame camera and soft X-ray streak camera were used to investigate the temporal and spatial distribution of the soft X-ray emitted from the cavity wall through the slit. X-ray transport velocity, X-ray emission time and amount of intensity decay was obtained. X-ray CCD pinhole transmission grating spectrometer was used to investigate the spectrum change of the emitted X-ray versus its location. The change characteristic of the spectrum of X-ray absorbed and emitted again and again in transport was obtained. X-ray diodes and Dante spectrometer were used to measure X-ray flux and radiation temperature in the slit, the source and the transport end, respectively. The typical results in the experiment were given. A brief and essential analysis and discussion were made

引言

X 光辐射输运研究首先需要在实验上认真研究辐射源特性,了解 X 光输运的初始条件,包括输运能流、辐射温度、等离子体运动状态、初级次级辐射光谱时空特性和 X 光辐射弛豫过程,并用适当构型的柱腔靶和异型靶产生 X 光输运的低温条件(辐射温度为 $100\sim 200$ eV),建立 X 光辐射输运研究的实验方法,观测 X 光在输运过程中强度随时间和空间的变化规律以及等离子体运动对输运造成的影响,研究 X 光在输运过程中产生的各种物理机制以及输运效率与辐射特性之间的关系。

利用双缝靶进行 X 光辐射特性研究实际上是研究 X 光在输运腔中的再辐射特性,这是 X 光辐射输运研究中的一项重要研究内容。要提高腔内辐射温度和增大 X 光输运效率,必须提供一定的能量给予腔壁再辐射。通常腔壁不同位置将有不同的温度和不同的谱特征,而温度和谱结构又与辐射时间紧密相关^[1~3]。采用柱腔开缝的方法,利用时空能谱组合诊断技术观测柱腔壁辐射细致结构,理论和实验相结合,可以得到 X 光弛豫过程,温度空间梯度以及 X 光再辐射效率。

在“星光 II”激光装置上,采用长柱缝靶模拟 X 光在腔内的输运过程,进行了 X 光辐射特性实验研究。实验中利用高时空分辨的 X 射线皮秒分幅相机和软 X 射线条纹相机从缝口观测腔内壁 X 光辐射时空分布, X 射线 CCD 针孔透射光栅谱仪观测腔内 X 光辐射光谱随空间位置的变化, XRD 和亚千 X 光能谱仪分别获取源、缝口和输运末端 X 光辐射总量和辐射温度,获得了较好的实验结果。

1 实验条件和靶型

实验采用 $3\omega_0$ 激光打靶,入射激光能量 $70\sim 100$ J,脉宽 $600\sim 800$ ps,激光 0° 入射,聚焦注入,靶室真空度好于 7×10^{-3} Pa。

靶结构见图 1(a), 1(b) 和 1(c) 为 (a) 的分解靶。柱腔缝靶 (a) 实验的主要目的是为观测柱腔内 X 光辐射细致结构,寻求 X 光辐射时间、空间、能谱相互关系,进而建立相应的诊断技术和实验方法。分解靶 (b) 和 (c) 是为测量 X 光辐射角分布和辐射总量以及 X 光辐射温度进而探索输运效率测试方法而设置的。

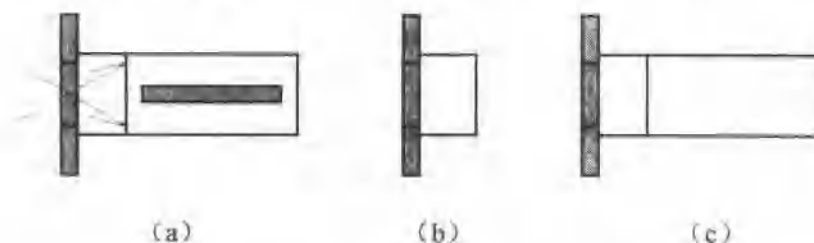


图 1 柱腔输运靶结构示意图

(a) 为双缝结构,双缝的缝中心偏离水平线约 20° ,以确保对称安装的探测器能观测到对面腔壁发射的 X 射线。柱腔直径为 $400\text{ }\mu\text{m}$,长度为 1.5 mm 。采用 $300\text{ }\mu\text{m}$ 直径的注入孔,其目的是提高激光能量注入率,增大腔内 X 光辐射能流。在离注入孔 $300\text{ }\mu\text{m}$ 的柱腔内,用 $0.17\text{ }\mu\text{m}$ 厚度的 Au 箔将柱腔分为源区和输运区,Au 箔的厚度大于

0.35 μm 激光对 Au 的烧穿深度,可以有效地阻止激光进入输运区,确保输运区为纯 X 光辐射输运。在 Au 箔后加 0.2 μm 厚度的 CH 膜来抑制高 Z 等离子体膨胀喷射造成输运通道和缝口的堵塞。输运腔长 1.2 mm,柱腔上的双缝长度为 1 mm,宽度为 0.1 mm,是观测腔内 X 光辐射细致结构的窗口,X 射线皮秒分幅相机、X 射线条纹相机以及 X 光 CCD 针孔透射光栅谱仪等诊断设备,通过窗口获取腔内 X 光辐射光谱时空信息,寻求 X 光时间、空间、能量间的相互关系。部分发次采用 20 μm 厚度的 Au 箔将柱腔底封住,方便缝口 X 光泄漏量的测量

图 1(b) 是 (a) 去掉带缝输运腔的源靶,(c) 是 (a) 去掉双缝后的输运靶。用 XRD 分别观测两种靶 X 光辐射角分布,给出 X 光辐射总量。用亚千 X 光能谱仪分别观测源和输运终端 X 光辐射谱,并由此推算 X 光辐射温度。

2 实验布局

实验布局见图 2,靶被置于靶室中心,缝位于南北方向。

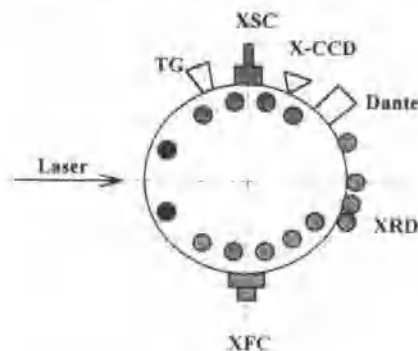


图 2 探测器布局示意图

X 射线皮秒分幅相机(XFC)被安置在正北 ϕ 200 mm 的水平法兰孔上,相机空间分辨 15 μm ,时间分辨 60 ps,用来观测缝口 X 光辐射强度随时间和二维空间的变化特征。

X 射线条纹相机(XSC)被安置在正南 ϕ 200 mm 的水平法兰孔上,相机时间分辨 6 ps,空间分辨 25 μm ,用来获取缝口 X 光辐射时空分布。

X 射线 CCD 透射光栅谱仪与入射激光束夹角 112.5° ,用来获取缝口 X 光辐射光谱空间分布。该谱仪空间分辨 20 μm ,光谱分辨 0.2 nm,具有很高的灵敏度,特别适合对低能弱光强的辐射光谱进行成像测量。

平响应 XRD 为分离探头,主要布置在靶室内的支撑架上,在靶室外的法兰孔上只安装了 4 个探测器,用来获取缝口、源和输运靶末端 X 光辐射角分布和辐射总量。亚千 X 光能谱仪与入射激光束夹角 135° 测量源和输运靶末端发射的软 X 光谱。

3 实验结果

3.1 腔壁 X 光辐射时空特性

用 MCP 选通 X 射线皮秒分幅相机获得的封底双缝靶腔壁 X 光辐射 12 幅时空分辨像见图 3(a)。同一微带相邻两幅像之间的时间间隔是 57 ps，每一条微带的测量时间为 205 ps。各微带间的时间间隔分别为 0, 345 ps, 1070 ps, 1950 ps，总的测量时间为 2.15 ns。图 3(b) 为不同时刻腔壁 X 光轴向空间分布。从图 3(a) 和 3(b) 中可观测到在第一条微带上 (0~205 ps)，X 光轴向强度随时间的增加明显增强，而辐射主要集中在缝对应的前半部腔壁。在第二和第三条微带上 (345~1275 ps)，后半部腔壁辐射强度逐渐增强，表明后半部腔壁已被 X 射线加热并产生再辐射。同时观测到腔壁 X 射线辐射的峰值位置有向腔后移动趋势。在第四条微带上 (1950~2155 ps)，腔壁已开始冷却，辐射强度已明显减弱，而减弱程度与缝的前后两端对应的腔壁更明显。从图中还可观测到腔壁轴向强度分布梯度很大，封底双缝靶从缝的始端到末端强度衰减约 50%~70%，未封底的双缝靶，由于靶底部 X 光泄漏严重，强度衰减达 70%~90%。

另外从图 3(b) 中未观测到由等离子体喷射汇聚形成的强辐射区^[5]，表明在 Au 后加 CH 膜对等离子体的膨胀喷射有一定的抑制作用。

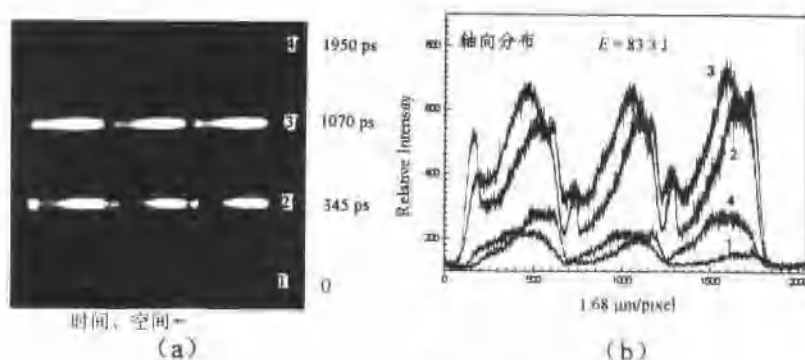


图 3 腔壁 X 光辐射 12 幅时空分辨像

图 4(a) 是利用 X 射线条纹相机获得的腔壁 X 光辐射时空分辨像，水平方向为时间方向，垂直方向为空间方向。图 4(b) 是时间分别为 200 ps 和 350 ps 时缝口 X 光辐射空间分布。当 $t = 200$ ps 时，末端腔壁还未完全被运输的 X 光加热，再辐射的 X 光强度太弱，从缝的始端到末端强度衰减约 100%。当 $t = 350$ ps 时，末端腔壁逐渐被运输的 X 光加热，从缝的始端到末端强度衰减约 70%，和分幅相机获得的结果基本一致。图 4(c) 是在缝长分别为 190 μm 和 460 μm 位置上 X 光发射的时间分布，从图中可见，在缝的中部，X 射线发射时间最长，达 3.25 ns。另外从图 4(a) 中得到 X 光在腔中的运输速度为 $2.4 \sim 2.6 \times 10^8$ cm/s，同时观测到 X 光的发射区域随时间的增加有向缝中部收缩的现象。

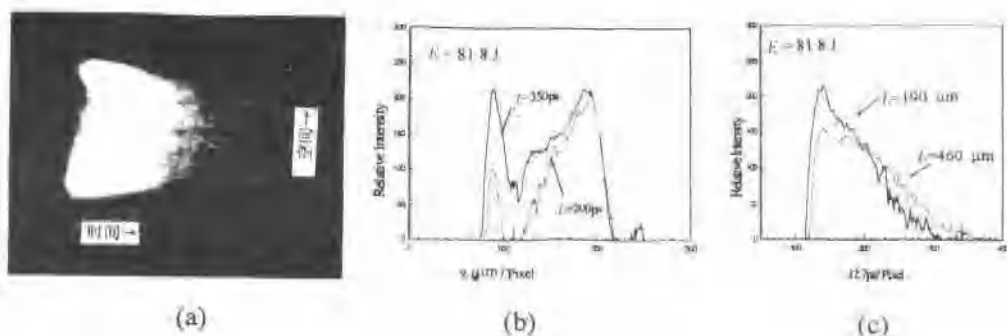


图4 腔壁 X 光辐射时空分布

3.2 腔壁辐射光谱空间特性

用 X 光 CCD 配透射光栅谱仪获得的双缝封底缝口 X 光辐射光谱轴向分布见图 5(a)，水平方向为空间分辨方向，垂直方向为光谱分辨方向，中间为光谱零级分布。从图中可明显观测到在缝的前 1/4 区域内的光谱高能成分居多，带状结构较明显，在缝的后半段，X 光被多次吸收和发射，能谱变软，发射强度较弱。

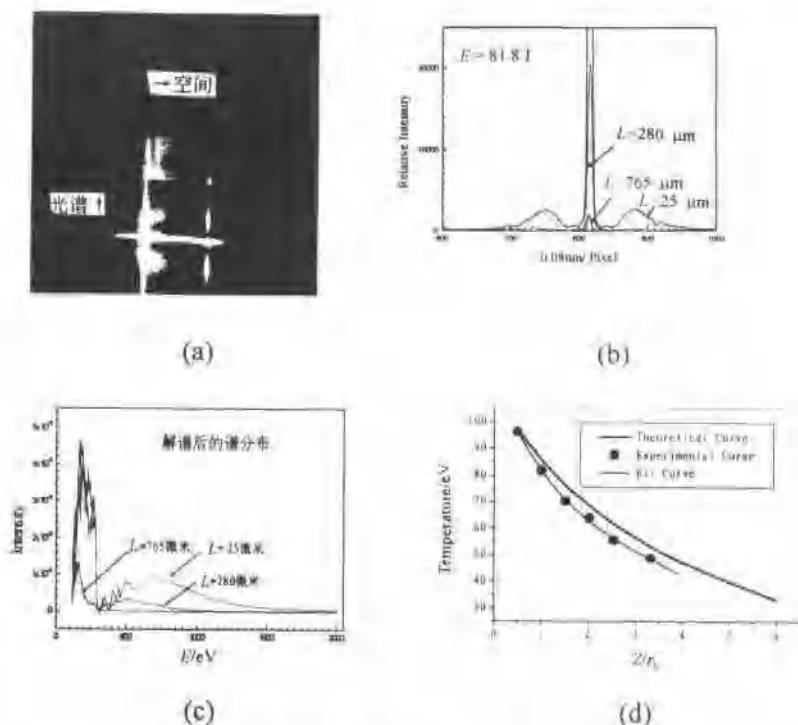


图 5 缝口 X 光辐射光谱和温度空间分布

图 5(b) 是在缝的不同空间位置上 X 光辐射光谱分布，在 $L = 25 \mu\text{m}$ 附近（缝的始端），出现 M 带辐射（峰值波长约 0.48 nm ），但强度较弱，发射较强的峰值波长在 1.4 nm 附近。当 $L = 765 \mu\text{m}$ 时，X 光辐射的高能成分很少，主要能量集中在大于 4 nm 的波长范围。图 5(c) 是利用迭代法将获得的测量谱图 5(b) 进行解谱得到的在缝的不同

空间位置上 X 光发射光谱分布, 图 5 (d) 是利用解谱得到的结果计算的腔内辐射温度空间分布。

3.3 X 光辐射角分布和辐射总量

用 XRD 观测到源靶、缝靶和输运靶 X 光辐射角分布见图 6, 图 6 (a) 是源靶 X 光辐射角分布, 将角分布数据按余弦分布积分, 得到源靶 X 光辐射总量为 13.8~16.1 J。加 1.2 mm 长度的输运管道后, 受管道的约束, X 光辐射角分布在小角度强度明显增强 (见图 5(b)), 由于腔壁对 X 射线的多次吸收和发射, 使辐射总量下降到 0.8~1 J, 通量减少约 20 倍, 用同样的方法观测到双缝 X 光泄漏量为 3.0~3.6 J。

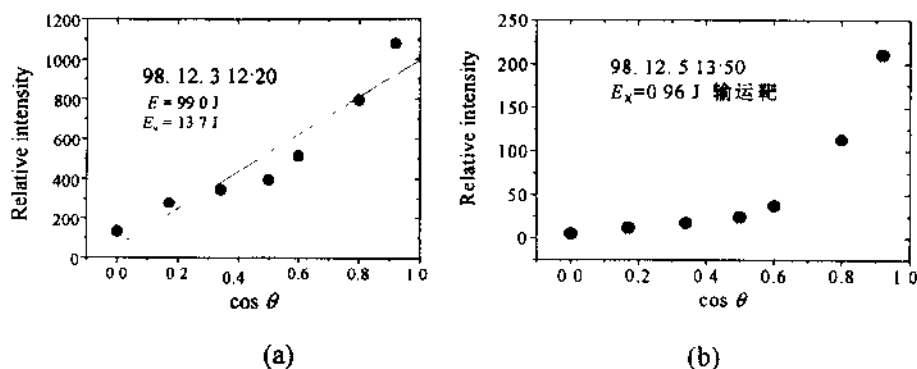


图 6 源靶和输运靶 X 光辐射角分布

3.4 X 光辐射温度

图 7 是用亚千 X 光能谱仪获得的源靶 (a) 和输运靶 (b) X 光辐射能谱分布和对应的辐射总量, 由测量的 X 光总量可计算出平均辐射温度 T_R 。由于 X 光谱可能偏离普朗克谱, 所以 T_R 为等效温度。所得到的源靶和输运靶的 T_R 分别为 118 eV, 37 eV。比较源靶与输运靶的辐射温度对 X 光输运研究很有意义, 由此可以得出 X 光输运效率。输运靶出口处的温度与源靶的辐射温度之比为 0.31。

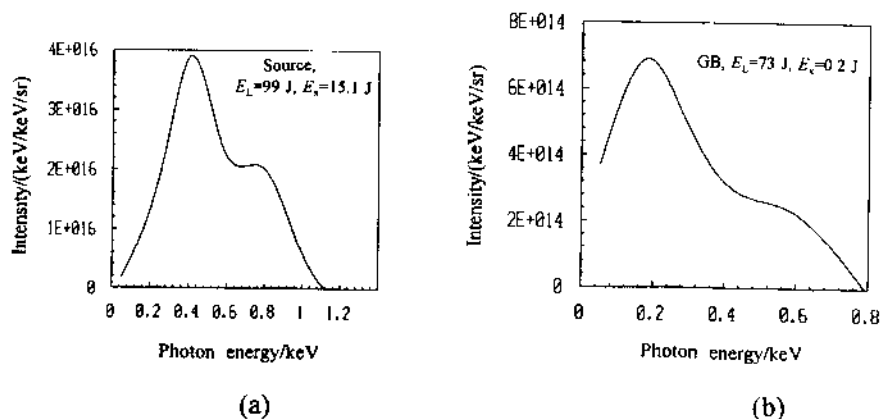


图 7 X 光辐射能谱分布

4 结论

为了得到更好的实验结果,在 1998 年实验基础上,对斜口缝靶进行了改进,采用双缝结构,垂直入射方式,简化了数据分析,并提供了多种诊断设备同时观测输运通道 X 光辐射细致结构的机会,X 射线条纹相机和 X 射线皮秒分幅相机都成功地获得了腔壁 X 光辐射时空分辨象,得到了 X 光输运速率和强度衰减量,获得的数据能相互自洽。X 射线 CCD 配透射光栅谱仪也获得了较好的实验结果,并首次对测量谱进行解谱,得到了辐射温度空间分布的初步结果。该谱仪将被发展为测量腔内温度梯度分布的一种有效工具。

项目首次将 XRD 和亚千 X 光能谱仪用于 X 光辐射总量和辐射温度测量,其目的是为测量 X 光输运效率建立诊断技术和实验方法。XRD 和亚千 X 光能谱仪中的平面镜 1999 年均利用北京同步辐射源进行了绝对标定,加上实验靶型的改进,使测到的 X 光辐射通量、辐射温度精度均已得到相应提高。

该项目采用多种诊断设备进行综合性诊断,获取的图像清晰,数据直观,可信度高,获得的实验结果有利于了解 X 光在腔内的输运机制,在实验中建立起来的诊断技术和实验方法对于 ICF 实验研究具有较大的推动作用。

参考文献

- 1 Stockl C, Tsakiris G D. *Laser and Particle Beams*, 1991, 9(3): 725~747
- 2 Nishimura H, Takabe H, Kondo K. *Physical Review*, 1991, 43(6): 3073~3085
- 3 Tsakiris G D. *Phys. Fluids B*, Vol 4, 1992, 4(4): 992~1005
- 4 Nishimura H, Shiraga H. *Laser and Particle Beams* 1993, 11(1): 89~96
- 5 Richard W. Lee. *Scientific Applications for High-Energy Lasers*. UCRL-ID-116335 p12~18

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

This report is subject to copyright. All rights are reserved. Submission of a report for publication implies the transfer of the exclusive publication right from the author(s) to the publisher. No part of this publication, except abstract, may be reproduced, stored in data banks or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior written permission of the publisher, China Nuclear Information Centre, and/or Atomic Energy Press. Violations fall under the prosecution act of the Copyright Law of China. The China Nuclear Information Centre and Atomic Energy Press do not accept any responsibility for loss or damage arising from the use of information contained in any of its reports or in any communication about its test or investigations.

ISBN 7-5022-2146-8



9 787502 221461 >