

ICF 实验诊断探测器标定研究 30 年回顾

崔明启

(中国科学院高能物理研究所 100049)

国际上全面禁止核试验以后,大多数有核国家均转入实验室开展受控核聚变研究,激光等离子体惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)是实现受控聚变热核反应的最有希望的途径之一。该项研究对能源和国防均具有重要的科学意义和应用前景,已迅速发展成为当今世界最重要的前沿科学之一。

惯性约束聚变是基于氢弹原理,即利用高能驱动器在极短时间内将聚变靶丸加热压缩到高温、高密度状态,使之在中心“点火”,实现受控聚变。通常氢弹的爆炸是靠原子弹点燃的,即使利用小型原子弹也会引发大规模的爆炸,实现受控是不可能的。后来人们想到用激光等离子体(或带电粒子束)代替氢弹中的原子弹引爆热核反应,它释放的能量要比真正的氢弹小了几百万倍,可真正实现控制的热核反应。

激光等离子体诊断是 ICF 实验研究的一个重要组成部分,在激光惯性约束聚变过程中,高温、高密度等离子体能产生大量的连续辐射和特征辐射的软 X 射线,通过测量这些软 X 射线谱及其时间和空间分布,就可获得高温、高密度等离子体的各种基本参数。在惯性约束聚变实验中,各种探测元器件,如 CCD、X 射线条纹相机和分幅相机等诊断设备是重要的测试工具,实验数据的精度直接依赖于诊断设备的精度,其诊断结果一直依赖复杂的理论计算。由于探测设备的原因,理论计算与实验结果一直存在偏差。因此,探测器的精密标定是诊断技术发展的重要一环,能谱响应及效率标定是其重点,可大大减少所测物理量的误差。图 1 给出 ICF 激光打靶及诊断示意图。由于当前同步辐射光源

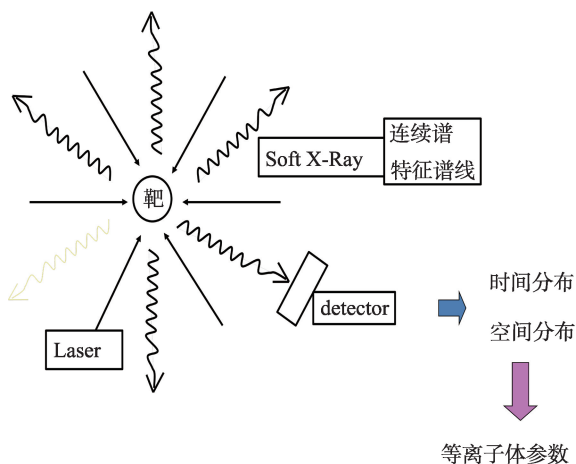


图 1 ICF 激光打靶及诊断示意图

具有无与伦比的优越特性,X 射线能区的绝大部分探测元器件及探测系统精密标定工作均在同步辐射射上完成。

近日有报道称,美国劳伦斯利弗莫尔实验室(LLNL),于 2023 年 7 月 30 日使用 ICF 方法,在美国国家点火设施(NIF)中,重复了去年 12 月聚变点火的突破性实验,实现了更高的能量增益。美国能源部称此为“数十年来的重大科学突破,将为国防和清洁能源的未来发展开辟新的道路”。

利用激光压缩氘氚产生内爆聚变实现可控热核聚变的原理是上世纪 60 年代前苏联科学家提出的,我国老科学家王淦昌院士也在同时期独立提出这一划时代的科学原理。我国的 ICF 研究是从上世纪 90 年代开始的,被纳入国家高技术 863 专项。主要承担单位是中国工程物理研究院激光聚变研究中心(九院八所),北京同步辐射装置软 X 射线光学站是该项目的合作伙伴,承担 ICF 实验研究中激光等离子体诊断用探测元器件标定光源建设及绝对标定工作,双方从 1993 年开始合作,至今已有 30 年了。

一、同步辐射软 X 射线多层膜反射率计装置及其应用

同步辐射光源可以产生从红外至 X 射线能区的连续谱,包括红外(IR)、可见光(VIS)、紫外(UV)、真空紫外(VUV)、极紫外(EUV)、软 X 射线(Soft X-ray)及硬 X 射线(Hard X-ray)能区。图 2 给出同步辐射光源涵盖的电磁辐射谱,如图所示:极紫外和软 X 射线所对应的光子能量范围从 30~10000 eV,相应波长为 0.1~40 nm。图中还可以看出,对于真空紫外和极紫外的边界,以及软 X 射线和硬 X 射线的边界缺乏准确的界定。根据我们实际情况和国内同行的认可,我们把能量范围简化为:50~2000 eV 为软 X 射线范围,2000~6000 eV 则称为中能 X 射线,6000 eV 以上称为硬 X 射线。在这段电磁辐射谱中,VUV 到软 X 射线能区的辐射的相关研究是最晚的,主要是由于在该能区所有物质均有很强吸收,必须在真空环境中完成各类实验,其光学系统及光学元件的制造按当时的条件具有较大难度。

1991 年年初基于北京正负电子对撞机(BEPC)的北京同步辐射装置(BSRF)已建成的 3 个实验站运行开放,开始为用户提供机时。在当年金秋 10 月召开了 BSRF 第一次同步辐射用户年会,在高新所报告厅二楼的一个小会议室里,来自中国工程物理研究院核物理与化学所(九院二所,当时八所尚未成立)的孙可煦正在介绍他们的 ICF 研究工作,并表示他们急需亚千能区(即软 X 射线能区)的光源,开展该能区 ICF 用探测元器件的绝对标定,他已去了国内很多研究所和高校,没有任何一家单位能够满

足他们的需求。本人自 1990 年年底从德国汉堡同步辐射实验室(HASYLAB, DESY)学习同步辐射软 X 射线技术回国后,一直忙于在 BSRF 筹建软 X 射线技术及应用实验站和课题组,并深入开展了多层膜软 X 射线光学元件研究。第一步准备在 BSRF 3B1 光束线光刻实验站前真空管道上,利用多层膜元件作为色散元件搭建一套软 X 射线测试分析装置,用以开展软 X 射线光学特性及应用研究,我们也在积极寻求国内的重要用户。两家一拍即合,会后我们二人进行了详尽的讨论,并答应两年内提供满足他们开展初步实验的条件及设备。

1992 年 2 月,软 X 射线测试分析装置在完善了物理设计的基础上,与中国科学院长春光机所(当时和长春物理所未合并)邵景鸿、薛松等合作完成了光机电设计,签订了加工合同,8 月底完成加工,运抵高能所。多层膜光学元件使用的是长春光机所曹建林研制的和我们自行研制的样品,最终该装置定名为“同步辐射软 X 射线多层膜反射率计装置”。

“同步辐射软 X 射线多层膜反射率计装置”是一套集精密机械、软 X 射线光学、纳米级多层膜及滤光片薄膜制备技术、软 X 射线弱信号测量技术、超高真空技术、电子学及计算机控制等专业技术为一体的高精度光学仪器设备。它主要由入射光强监测系统、滤光片、入射和出射狭缝、多层膜单色器、随动摇臂、样品台、探测器、超高真空系统、电控及数据获取系统等组成。装置主体由两台 Bragg 衍射仪构成统一体的双重二倍角复合机构,单色器和随动摇臂构成第一个衍射仪,为样品提供单色光;样品和探测器构成第二衍射仪,用于样品测量。图 3

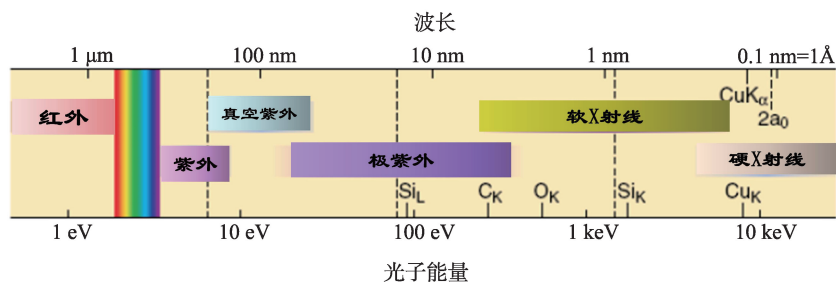


图 2 同步辐射产生的电磁辐射谱

给出实物照片。该装置具有五维高精度转动机构,在满足单色器二倍转角要求的同时,还必须满足反射率计样品测量的二倍角关系,机构的精度对物理测量精度有很大的影响,因此对装置的各维转角、光束与光轴垂直夹角、单色器与反射样品平行度、各镜面与转轴夹角等的精度都要求很高,因此该装置的设计、加工、安装、离线和在线调试均具有很大的难度。

经过近10个月的安装调试,装置的各项光学输出特性基本满足设计指标和用户需求。1993年5月初九院二所赵永宽、郑志坚、温树槐等来我所讨论合作事宜,他们代表中国工程物理研究院高温高密度国家实验室提出有意向在BSRF上开展惯性约束聚变软X射线探测装置灵敏度标定工作,为此两家(我们为甲方、对方为乙方)共同提出联合建立软X射线光学实验研究小组,并签订了“联合建立软X射线光学标定实验研究小组”的意向书。意向书主要内容:(1)乙方希望在多层膜反射率计上进行软X射线探测器标定条件实验,甲方同意1993年6月底前安排时间进行该项工作。(2)甲乙双方共同出资在同步辐射3W1光束线联合建造高精度软X射线光学综合实验装置(该项工作下一节介绍)。1993年6月下旬孙可煦、易荣清等三同志来到高能所,和我们一块儿对连接在BSRF-3B1光束线的多层膜反射

率计装置的光源输出特性(能量范围、通量密度、能量分辨、光斑大小等)进行了详尽的测量分析,并对他们带来的X射线二极管(XRD)、X射线胶片等进行了条件摸索实验,取得了较为满意的结果。1993年11月正式开展标定实验,取得第一批ICF用探测元器件的同步辐射标定结果,为早期的国内ICF实验提供了参考数据。为了更好地参与ICF合作,1994年4月聘请本人为中物院高温高密度国防重点实验室客座研究员,1995年我们申请的国家高技术863-416-3定向课题“X光强度绝对测量方法研究”获批,从此高能所同步辐射软X射线课题组正式纳入我国ICF实验研究正轨。一直延续到后续的国家高技术863-804和国家重大专项的各项课题至今。

同步辐射多层膜反射率计装置自1993年年底正式对全国用户开放至1999年3W1B光束线正式运行,为全国十余家单位十余个研究课题提供了3000多小时的使用机时。在该装置上开展的主要工作有:ICF用软X射线探测元器件灵敏度标定、强激光用软X射线多层膜反射镜和多层膜光栅、同步辐射软X射线光学多层膜;薄膜透过率及质量吸收系数的测定、全反射方法研究纳米级超光滑表面粗糙度、软X射线辐照效应研究等。装置的研制成功,解决了国内软X射线能谱、光强及材料的软X射线光学特性等重要参数的定量测量,促进了我国

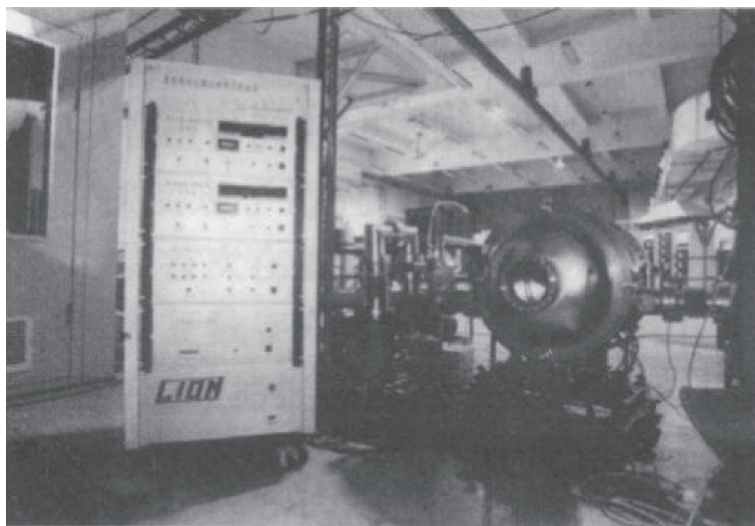


图3 同步辐射软X射线多层膜反射率计装置实物照片

软X射线光学技术、激光等离子体诊断及同步辐射应用等多项技术的发展。研究项目涉及国防、科研及农业等领域,均取得了有重要价值科研成果。该装置曾获国家技术发明二等奖和中国科学院科技进步二等奖。

二、同步辐射软X射线光学实验平台建设

遵循“从无到有,从小到大,系统集成”的原则,利用同步辐射光源的优异特性,从1996年至今,BSRF软X射线光学课题组与中国工程物理研究院激光聚变研究中心联合,在BSRF建立了国内唯一开展软X射线光学技术基础及综合应用研究的实验平台。硬件方面主要包括三条不同能区的单色聚焦X射线光束线、高精度X射线综合测试分析装置、X射线绝对光强监测系统、低温辐射计及若干探测器标定装置等大型设备。在基于同步辐射光源的软X射线探测技术与标定方法方面开展系统性的研究,以满足国内大科学工程项目的需求和国内软X射线光学技术发展的需要。本文重点介绍与ICF实验研究相关的内容。

1. 光束线建设(标定光源)

1.1 3W1B软X射线光束线

自1993年5月双方签订意向书后,经过双方的努力,3W1B软X射线光束线于1996年建成并投入使用,能量范围为0.05~1.5 keV。3W1B光束线由BEPC第III区的编号为3W1的扭摆磁铁(Wiggler)旁轴5.3 mrad处引出,3W1B光束线主要光学元件包括前置球面镜(SM),平面镜(PM)和变线距光栅(VSPG)。前置镜的作用是使光束线的水平偏转,使光束线有足够的机械装配空间,并使光斑在水平方向聚焦到样品,同时吸收高能辐射,减低单色仪的热负荷。单色器系统由平面镜和变线距光栅组成,作用是实现同步光的单色化,提供实验所需要的能量范围,消除像差影响,使光斑在垂直方向上聚焦到出射狭缝,并且使出射光方向与入射光方向

一致。光阑主要用来俘获零级光和其他方向的衍射光,其目的也是为了进一步减少杂散光,以提高单色器效率。图4为3W1B软X射线光束线光路原理图(Wiggler光源,AP1入射狭缝,SM柱面镜,PM平面镜,VSPG变间距平面光栅,AP2出射狭缝,Slit样品入射狭缝,Sample样品)。

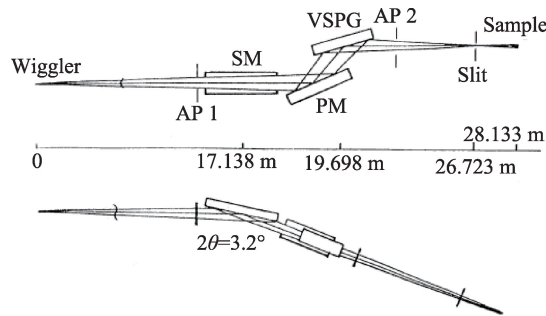


图4 3W1B软X射线光束线光路图

经过5年多的精密调试和使用,3W1B软X射线光束线于2001年10月通过中国工程物理研究院组织的由范滇元院士主持的科技成果鉴定。鉴定意见:“在北京同步辐射源上建立了软X射线标定源,完成了一项集软X射线光学、精密机械、电子学及控制、弱信号测量、超高真空获取等技术为一体的综合性大型标定装置。国内首次应用变间距光栅代替传统的三光栅系统。精确、全面测量了光束线的性能指标,是目前国内唯一利用同步辐射光源开展软X射线光学及探测器性能研究的实验基地,填补了国内在软X射线绝对标定源方面的空白。”

1.2 3B3中能X射线光束线

3B3光束线为中能X射线光束线,能量范围为1.5~6 keV,是由中国科学院高能物理研究所和中国工程物理研究院激光聚变研究中心共同出资、联合共建的第二条光束线。光束线由前置镜、双向聚焦镜、双晶单色器系统、超高真空及控制系统等组成,全长29米。图5给出3B3光束线光路原理图。该光束线采用了前置镜能量截取、压弯柱面镜双向聚焦、两对平面分光晶体覆盖全部能量范围及有效抑制高次谐波等新技术,其中前置镜分区镀膜和KTP晶体分光为主要创新。是我国大陆建造的第

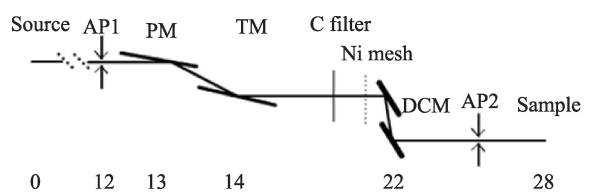


图5 3B3中能X射线光束线光路原理图
(Source光源, AP1入射狭缝, PM平面镜, TM超环面镜,
C filter 碳滤光片, Ni mesh 镍网(入射光强监测),
DCM双晶单色器, AP2出射狭缝, Sample样品)

一条同步辐射中能X射线光束线站。它主要用于中能X射线范围ICF相关探测器的谱响应及灵敏度标定,并开展中低X射线谱学方面的研究。该光束线利用前置镜进行能量截取、压弯柱面镜实现双向聚焦、两对平面分光晶体覆盖全部能量范围、采用有效方法抑制高次谐波,在国内同步辐射源上首次使用前置镜分区镀膜和KTP晶体分光等先进技术。其能量扫描范围、能量分辨率、聚焦光斑尺寸、光通量、高次谐波份额等主要技术指标均达到或超过设计技术指标,在国内首次利用同步辐射源实现了2.1~6 keV能区对ICF部分探测元器件的标定。2005年4月5日3B3光束线通过了中物院激光聚变研究中心和中科院高能所组织的验收专家组的验收。

1.3 4B7A(中能)& 4B7B(软X射线)光束线

2005年,借北京正负电子对撞机二期(BEPCII)

工程改造之机,X射线标定源实验平台得到了进一步的完善和提升。由于BEPCII建成后13#厅外环为正电子环,无法引出兼用光。为充分利用BEPCII兼用模式(同步辐射专用光每年仅2~3个月用光时间,而兼用光可常年使用。),3B3中能光束线没做任何更改,搬迁至BEPCII储存环IV区4B7弯转磁铁,又新建了一条软X射线光束线,与中能X射线光束线共用12#厅4B7前端区。中能光束线命名为4B7A,新软X光束线为4B7B。图6给出4B7A和4B7B光束线实景图。

4B7B软X射线光束线是我们两家联合共建的第3条光束线,其物理目标有两个方面:中国工程物理研究院作为ICF诊断用软X射线光源,要求光谱纯度足够好,光束线在设计时需侧重于高次谐波抑制和对杂散光的处理。高能物理研究所方面希望这条光束线能够用于轻元素吸收谱学研究,要求光束线的分辨本领足够高,聚焦光斑尽量小一些,以提高样品处的通量密度。设计时充分考虑到了上述两方面要求,提出了两种工作模式,一种是高次谐波抑制模式,用于探测器标定;另一种是高分辨模式,用于吸收谱学实验。4B7B软X射线光束线光路由前置聚焦镜、入射狭缝、球面镜、平面镜、变线距平面光栅、出射狭缝和后聚焦镜构成,样品距

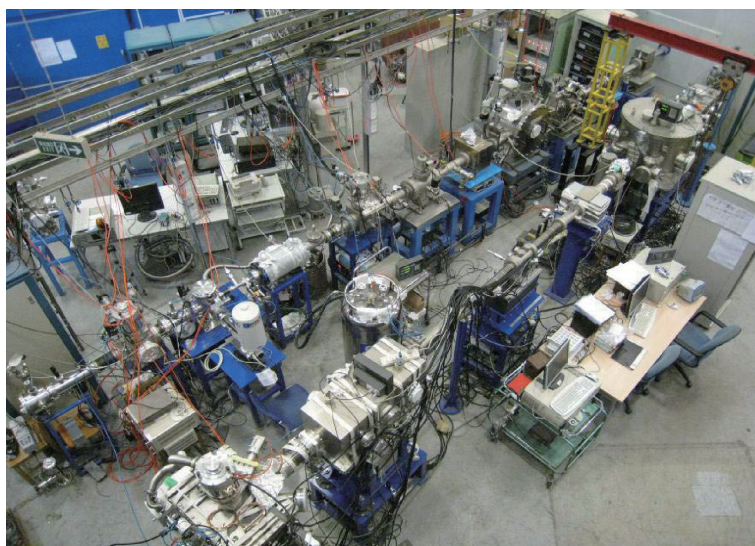


图6 4B7A和4B7B光束线实景图

光源点约 30 m。为满足 ICF 标定工作高光谱纯度的要求,在出射狭缝和样品之间设置了高次谐波抑制单元。表 1 给出专用光模式下 4B7B 光束线实现的性能指标。

表 1 专用光模式下 4B7B 光束线实现的性能指标

	高次谐波抑制模式	高分辨模式
能量范围	0.05~1.55 keV	0.05~1.50 keV
能量分辨率	820 @ Ar 的 L 边	3600 @ Ar 的 L 边
光子通量 (250mA, 2.5GeV)	$> 1 \times 10^9$ phs/·s	$> 8.7 \times 10^8$ phs/·s ($E/\Delta E > 3600$)
二次谐波成分比例	< 2.5%	

2. 实验站建设(高精度测试分析装置)

2.1 高精度软 X 射线综合测试分析装置

高精度软 X 射线综合测试分析装置是实验站的主要测试设备,也是当时国内第一套此类装置。由入射狭缝、滤光片系统、入射光强监测器、样品台、探测器、步进电机控制系统及弱信号测量系统等组成。样品台和探测器具有高精度的旋转和平移功能,可开展反射(衍射)、透射、散射等物理工作,可进行软 X 射线光学特性、光学元件测量、探测元器件性能标定等工作。其特点是采用超高真空差分的高精度双馈入系统,该系统确保了高精度的测量和高水平的研究工作。图 7 给出软 X 射线综合测试分析装置实物图片。

2.2 软 X 射线绝对光强监测系统

软 X 射线绝对光强监测系统是以大型电离室

为主的同步辐射绝对光强测量装置,由流气式低压强薄窗稀有气体电离室与硅光电二极管联合构成。电离室作为一级标准,硅光电二极管安装在电离室中心位置的末端,可在真空中前后移动。绝对光强监测系统的作用有四个:一是可以实时在线监测入射 X 光强度,以克服入射光的不稳定性,便于修正;二是可以与电离室结果相互对比;三是可以实时在线监测电离室内轴线上各点气体压强的均匀性;四是可以标定能量。装置主要包括电离室主体、带传动装置的光电二极管系统、高真空系统、质量流量控制给排气系统,多路弱信号测量及数据获取系统等。图 8 是软 X 射线绝对光强监测系统结构原理图。

2003 年,利用毛细管将该装置发展为无窗电离室,很好地克服了软 X 光的吸收问题。随着 3B3 中能 X 射线的投入使用,标定范围拓展到 6 keV。图 9 给出在 3B3 光束线(2.1~6 keV)和德国 PTB 的标定结果(2 keV 以下)。虽然两次标定能区不同,但实验结果非常自洽。

三、先进测量技术、实验方法及探测器标定

实验平台的优异性能仅靠硬件的建立是远远不能满足需要的,更需要先进技术和实验方法的支持,在光束线输出特性诊断、软 X 射线绝对光强测量、探测器精密标定技术与实验方法研究等方面开

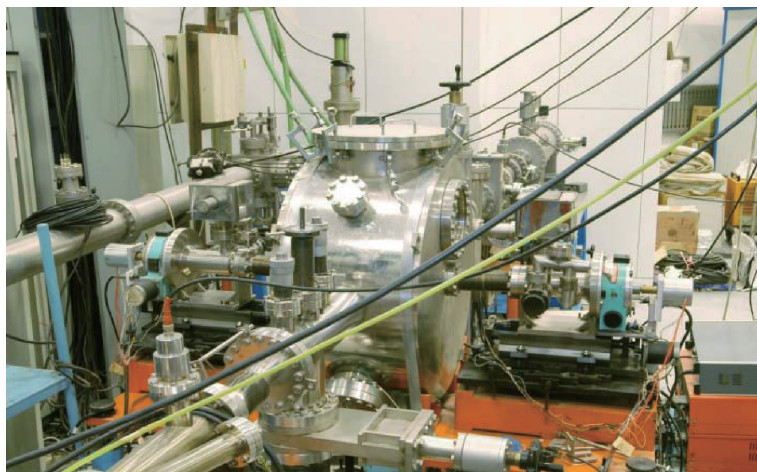


图 7 软 X 射线综合测试分析装置实物图片

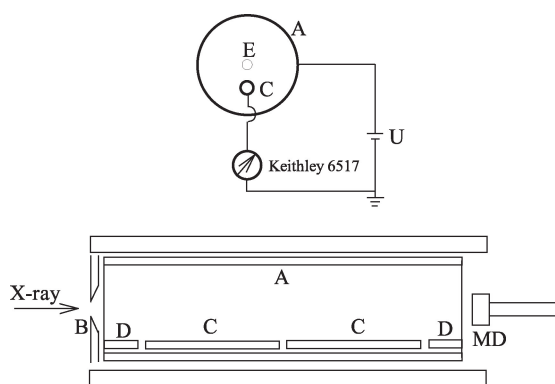


图8 软X射线绝对光强监测系统结构原理图
A: 阳极; B: 光阑; C: 收集极; D: 保护极; U: 电源;
MD: 监测/待标定探测器; E: 电离区

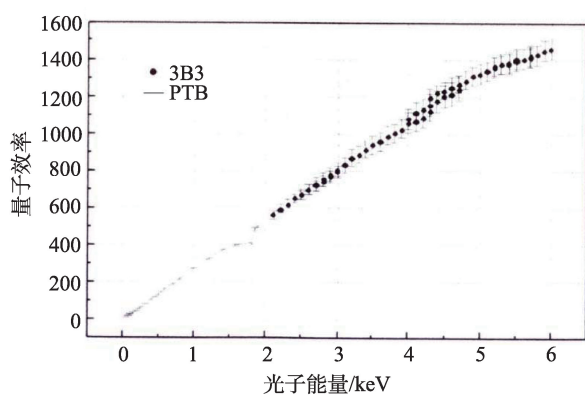


图9 软X射线绝对光强监测系统标定结果

展了大量的研究工作。

1. 光束线输出特性诊断

随着ICF诊断工作的深入,诊断精密化对探测元器件的标定精度有了更高的要求。光束线性能直接影响标定精度,所以精确的测量及改善光束线本身的输出特性是一项非常重要的工作。我们利用大型电离室、硅光电二极管标准探测器、透射光栅加CCD相机及分析晶体等探测元器件,结合不同

的测量设备和标定装置,运用反射、衍射、散射、透射、吸收等不同的方法,对各条光束线的输出特性都进行了系统的测量与标定。主要包括能量标定、光谱能量范围、能量分辨本领、光子通量、高次谐波、光斑大小及光斑均匀性等。由于透射光栅具有谱分辨较好、衍射效率较高、容易与测量系统匹配等优点;CCD相机作为读出设备具有实时在线、快速读出等优点,为此我们用透射光栅和CCD构成透射光栅谱仪。利用该方法进行了光束线的能量标定、能量分辨及高次谐波等性能测量。图10给出同步辐射光束线测试设备示意图。

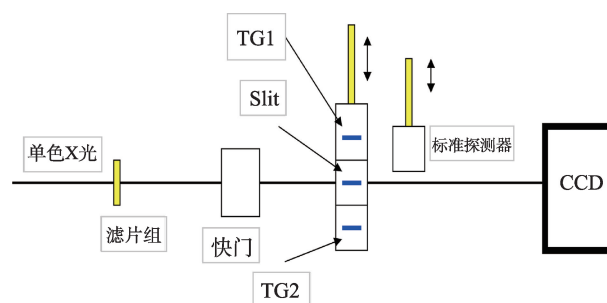


图10 同步辐射光束线测试设备示意图

美国布鲁克海文国家实验室国家同步辐射光源(NSLS, BNL)有2条与4B7A、4B7B相似的光束线,也主要是用于探测器标定。表2给出了4条束线的性能指标,经我们的精细调试和系统测量,BSRF的2条光束线输出性能均优于他们。

2. 软X射线条纹相机静态标定

软X射线条纹相机(SXRSC)具有高时间分辨、高空间分辨、大动态范围和宽能谱响应等优异特性,是ICF实验中最主要的大型测量设备。几乎每一台相机都要对它的时间分辨率、空间分辨率及扫描速度

表2 4B7A&4B7B光束线与BNL-NSNL相对应两条光束线的输出特性比较

光束线	BNL-NSNL X8A	BSRF 4B7A	BNL-NSNL U3C	BSRF 4B7B
能量范围/ keV	0.8 ~ 5.9	1.2~6.0	0.05 ~ 1.6	0.05 ~ 1.5
能量分辨率	2060 @ 3.1 keV	5000 @ 3.2 keV	300 @ 0.45 keV	3600 @ 0.25 keV
输出通量 phs/s	1.7×10^{10} Si(111)	7×10^{10} Si(111)	5×10^9 @ 0.15 keV	8.7×10^8 @ 0.15 keV
光斑尺寸/mm ²	2 (H) × 3 (V)	1.7(H) × 0.7(V)	10 (H) × 0.7 (V)	6 (H) × 2 (V)

进行标定,以满足ICF动态测量的需要,但对能谱响应灵敏度及光阴极量子效率的绝对标定国内外却完全处于空白。图11给出软X射线条纹相机的结构图。

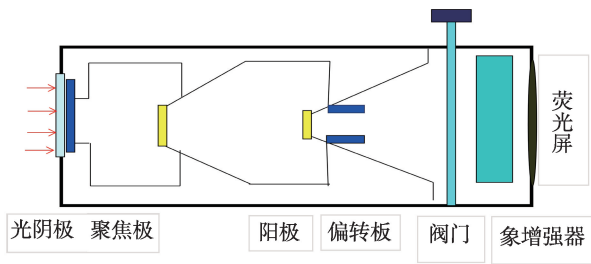


图11 软X射线条纹相机的结构图

根据软X射线条纹相机的结构和工作原理可知: X射线光子与光阴极材料相互作用产生光电子的过程存在着能量响应问题,即不同能量的X射线光子产生的光电子的数目是不相同的。光电子产额不仅与入射光子的能量有关,而且与阴极的材料,厚度以及衬底的材料和厚度都有密切的关系。一旦光电子经过强加速电场作用后,每个光电子获得的能量及最后的动能都基本上完全一致,各光电子之间都是相互等价的,聚焦,偏转,放大和接收均与能量响应无关,因此, X射线条纹相机的能量响应曲线与光阴极的能量响应仅相差一个系数,这个系数与相机本身特性有关。由于条纹相机荧光屏输出的光都是荧光,都只有一个频率,与入射X射线光子的能量无关,所以,我们可以进行相对静态标定。若入射光强为 I_0 的不同能量的单色光,在标准探测器上的输出信号电流为 I_1 ,当它进入条纹相机后,产生的荧光信号被可见光二极管收集产生的电流为 I_2 ,我们已经知道标准探测器的能量响应为 $\eta_1(E)$,可见光二极管的能量响应 $\eta_2(E)$,那么,条纹相机的能量响应可以表示为: $S=\eta_1(E) \cdot (I_2/\eta_2 I_1)$ 。由于条纹相机终端输出的荧光信号只有一种波长,所以 η_2 为一常数,与能量无关。改变入射光子的能量,就可以给出条纹相机的能量响应曲线。保持入射光子的能量和强度不变,改变条纹相机的增益系数,可以获得光子能量为 E 时的条纹相机的增益曲线。在静态性能研究中若不涉及整个系统的绝对

效率,完全可以用对荧光灵敏的普通光电二极管来记录。与CCD和胶片相比,光电二极管具有灵活方便,动态范围大,在上升时间要求不高的情况下,能够做到实时响应。为此,我们提出用光电二极管和弱电流放大器构成读出系统,运用测平均电流的方法,实现了在线读出,获得了大量的实验数据。实践证明,这个方法灵活、方便,尤其是在能量响应连续扫描中表现得尤为突出,以前用CCD记录根本无法进行能量连续扫描测量。条纹相机为我国西安光机所研制的长狭缝软X射线扫描相机,图12和图13分别给出在3W1B光束线上标定的能量响应和条纹相机增益的标定结果。条纹相机增益曲线的标定在ICF研究中有非常重要的应用前景,这些数据对激光打靶非常有用,可以根据标定结果调节量程,避免饱和,提高打靶的有效性。过去由于国内没有稳定连续的X光光源,一直无法开展该项研

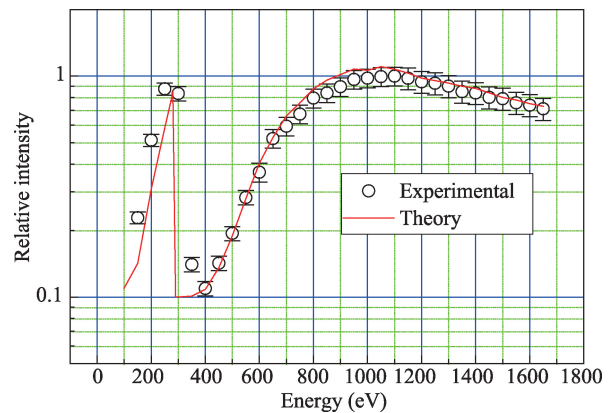


图12 SXRSC 能量响应静态标定结果

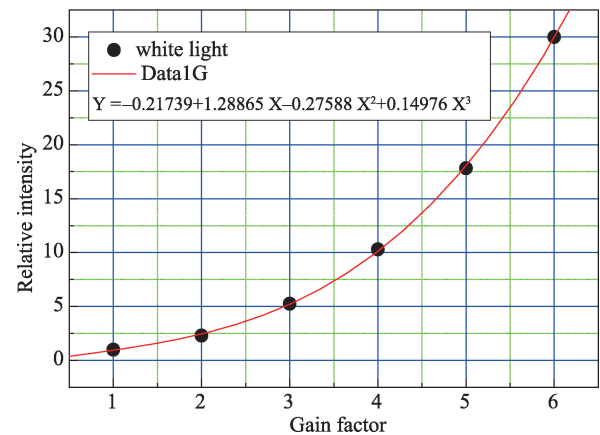


图13 SXRSC 增益曲线标定结果

究,主要得益于同步辐射软X射线实验平台的稳定光源,才使这一研究得以实现。

3. ICF 探测元器件标定研究

间接驱动惯性约束聚变(ICF)实验研究之中,需要大量的诊断测试设备,实验数据的精度直接依赖于诊断设备的精度,诊断设备的精度取决于诊断设备的精确标定,诊断设备中各种探测元器件标定是该项研究发展的重要课题。研究内容主要包括:

- 各种光阴极XRD灵敏度的标定
- 透射光栅衍射效率的实验标定
- X射线CCD系统的能量响应标定
- 多层镜反射率的实验标定
- 平面反射镜反射率的实验标定
- X射线胶片标定
- 光电导探测器动态标定
- 滤光片透射比测量
- 晶体衍射效率测量
- 成像板能响标定
- 软X射线条纹相机和分幅相机
- 各探测元器件构成的谱仪系统

两家历经30年时间的精诚合作,获得的大量实验数据大部分被用到ICF实验研究之中,取得了大量的研究结果。为ICF实验提供了一批性能可靠的探测器,实现了半定量到定量的转变,改写了中能X射线无探测器标定的历史,推动了ICF精密化进程。下面给出部分探测器的标定结果:

3.1 各种阴极X射线二极管探测器(XRD)灵敏度标定

XRD在ICF辐射场的研究中是最重要的探测器,也是在ICF研究中最先进行定量测量X射线强度、辐射能谱、辐射温度和X射线角分布的探测器。由于XRD的灵敏度随光阴极加工精度、光阴极表面纯度的不同而有差异,并随时间的变化而变化,辐照对它也有损伤,所以每轮实验前都必须进行标定。图14给出4B7A和4B7B光束线测量得到的Al阴极XRD灵敏度的标定结果,图中可见两段

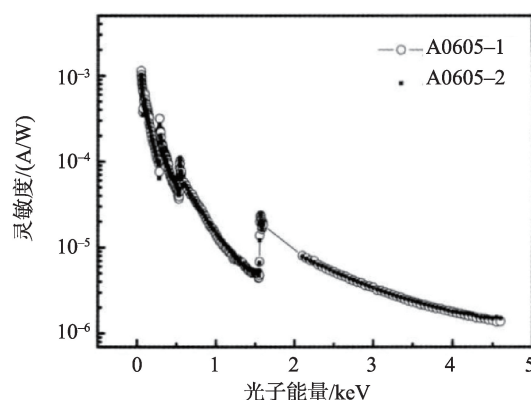


图14 Al阴极XRD灵敏度的标定结果

能区(中能X射线和软X射线)标定结果能够很好衔接,两次标定结果重复性很好。

3.2 透射光栅衍射效率的标定

透射光栅在软X射线能谱测量中作为一种重要的色散元件得到了广泛的应用,但要用透射光栅进行软X射线能谱的定量测量,必须准确知道各级绝对衍射效率。对光栅的衍射效率的确定有两种方法:一是通过每个能点的标定来实现;二是利用有限的能点确定光栅的结构参数、周期、线空比、栅线厚度和栅线的形状,用理论方法进行计算,我们采用的是第二种方法。在国外发展的矩形和梯形栅线截面模型的基础上,假设透射光栅栅线截面为准梯形,建立了透射光栅衍射效率的准梯形截面计算模型,进行了编程计算。图15是标定实验与理论计算结果的比较。

3.3 软X射线CCD相机能量响应效率标定

X射线CCD系统是一个光电转换系统,它可将

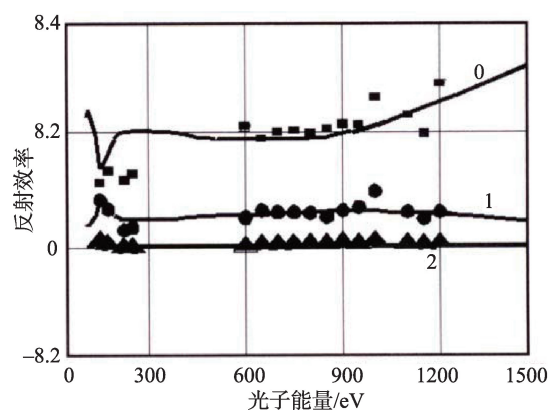


图15 透射光栅各级衍射效率实验与理论结果

X射线信号变成电信号,由计算机记录,灵敏度高,动态范围宽,它常配合透射光栅用于测量X射线能谱或配合针孔相机测量光斑的空间分布,它具有X射线胶片的各种功能,但胶片只能半定量,而CCD可以定量,目前已在ICF实验中基本替代X射线胶片。图16给出CCD的标定结果。

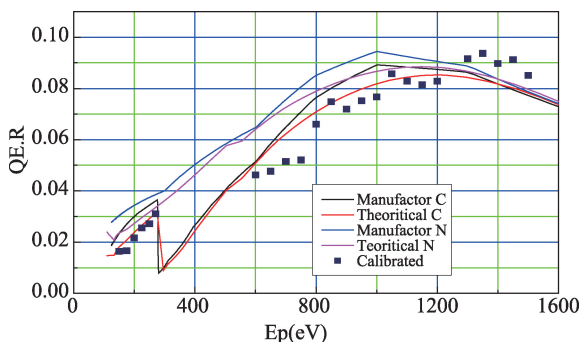


图16 软X射线CCD能量响应灵敏度标定结果

3.4 软X射线光学多层膜的反射率测量

软X射线光学多层膜在ICF实验研究中是一个很重要的分光元件,尤其是在X射线激光研究中应用很广泛。利用同步辐射软X射线实验平台高精度综合测量分析装置进行了各种多层膜反射率的测量。典型的结果如图17所示。

3.5 中能X射线光束线的标定

在ICF实验研究中使用了多种中能X射线探测系统,主要包括:晶体谱仪、X射线成像板系统、X射线能谱仪,透射光栅谱仪和X射线CCD系统等,它们都要应用于1.5~6.0 keV能区的绝对测量,急需开展这些系统在此能区的能量响应灵敏度的精密标

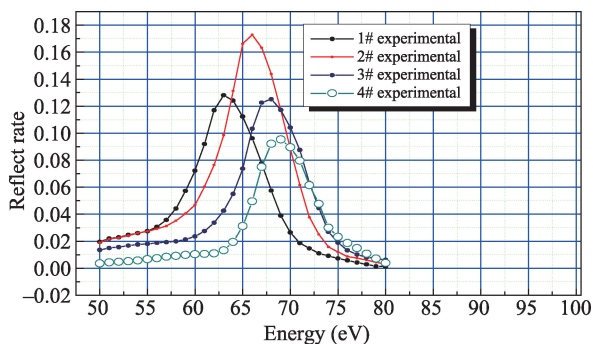


图17 多层膜反射率测量结果

定,但由于当时国内没有中能X射线光束线,一直未能在该能区进行标定。在2005年上半年的专用光期间,在3B3中能X射线光束线上对多种探测元器件与设备进行了标定,主要包括:金属阴极XRD的灵敏度标定、晶体衍射效率标定、成像板能量响应标定、滤光片膜厚标定、透射光栅谱仪衍射效率标定及X射线CCD能量响应标定,取得很好结果,改写了国内探测设备在中能X射线无标定的历史。表3给出PET晶体衍射效率标定结果,图18给出X射线成像板响应曲线测量结果。

表3 PET晶体衍射效率标定结果

能点(eV)	半宽(rad)	峰值衍射	积分衍射效率
2190	0.0033	10.34%	4.9×10^{-4}
3446	0.0026	10.55%	5.0×10^{-4}
4034	0.0028	11.69%	5.4×10^{-4}
4875	0.0027	14.25%	6.3×10^{-4}
5580	0.0023	15.75%	6.6×10^{-4}

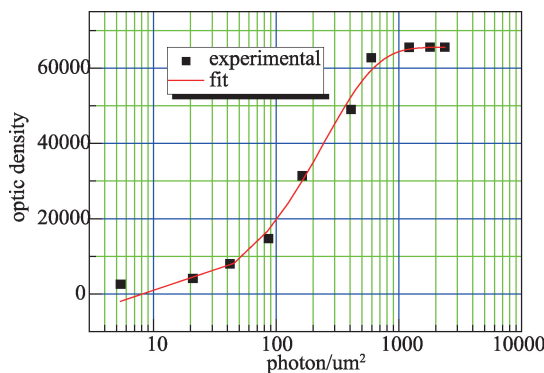


图18 X射线成像板响应曲线(4.6 keV)

四、展望

BSRF 将于2026年转战北京高能同步辐射光源(High Energy Photon Source, HEPS),中国工程物理研究院激光聚变研究中心提出进一步合作的需求,准备在HEPS建造一个计量扇区,向更高能量发展,专门用于ICF诊断用探测元器件的标定。

愿我国ICF早日实现“点火”。

衷心感谢与我共同奋斗的我的学生、同事和合作者们。