

文章编号: 1001—4322(2000)05—0597—04

## 利用多项式展开法对软 X 光点光源 透射光栅测量谱解谱

曹磊峰, 成金秀, 杨家敏, 江少恩, 温天舒

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川绵阳919-986信箱, 621900)

**摘 要:** 针对软 X 光点光源的通过透射衍射光栅获得的测量谱, 提出一种新的解谱方法进行解谱。与以往的解谱方法不同, 该方法无需选择截止波长。使用该方法对 ICF 实验中的典型软 X 光源的透射光栅测量谱进行了解谱, 并与以往的解谱方法获得的结果进行比较, 取得了满意的结果。

**关键词:** 透射光栅; 谱; 软 X 光

**中图分类号:** O433.1 **文献标识码:** A

在 ICF 实验中, X 光能谱测量是一种重要的等离子体物理诊断手段<sup>[1]</sup>。准确的测量激光诱导等离子体 X 射线发射能谱, 对推断等离子体的温度、等离子体的运动状态以及了解 X 光本身的辐射输运过程, 都有重要的意义。

由于自身的许多优点, 透射光栅在 X 光能谱的测量当中得到了广泛的应用<sup>[2-5]</sup>。但是透射光栅的测量谱一般不能直接反映 X 光源的发射能谱, 这是由于: 透射光栅对 X 光的高级衍射的影响; 记录介质(本文中取 X 光 CCD 作记录介质)响应函数的影响; 透射光栅对不同 X 光有不同的衍射效率。所以要获得“真正”意义上的 X 光谱, 综合考虑以上各因素的解谱的过程就是必须的。

透射光栅测量谱的解谱过去一般采用迭代的办法<sup>[5]</sup>。首先通过一定的方法确定一个 X 光波长的下限, 认为更短波长的 X 光不会有衍射, 从该波长到二倍该波长的 X 光只有一级衍射, 二倍波长到四倍波长的 X 光有一级和二级衍射, 四倍波长到八倍波长的 X 光有一级、二级和三级衍射, ……以上各种波长 X 光的不同级次的衍射依光栅方程分布并叠加在一起。这种情况下, 原则上, 只要准确知道 X 光波长下限到二倍波长范围内 X 光的衍射强度谱, 在以后各波长范围内的测量谱中依光栅方程合理扣除相对较短波长段的高级衍射, 步步迭代即可求出所有波长范围内的衍射强度谱, 进而考虑记录介质谱响应、光栅衍射效率等因素求得 X 光源的真实发射谱。

迭代的办法有其物理方面的合理因素, 但在数学上又有其武断性。波长下限的选取需要非常小心, 否则会获得不合理的结果。事实上, 有些时候, 我们得到的测量谱的零级和一级谱并不能完全分开。这种情况下, 选择下限波长有一定难度。

迭代办法解谱的另一个问题在于其迭代过程。从前面的讨论我们可以知道, 通过测量谱求任一波长范围 X 光的衍射谱的时候, 人们不得不依赖于它的前面的一个乃至数个波长范围的衍射谱。而我们知道, 实验过程是一个不可避免误差的过程, 那么, 迭代法解谱就不可避免地存在着误差的传递的问题。尤其是, 在我们采用胶片作为记录介质时, 我们需要在迭代的每一步都要考虑记录介质的响应函数和光栅的衍射效率, 这些通过其它实验过程获得的数据的引入, 也会引起误差的传递。

本文提出一种新的解谱方法, 这种方法: 1、无需给定 X 光的波长下限, 确保解谱过程的数学合理性, 同时扩大数据处理的自由度, 降低难度; 2、不使较长波长 X 光谱的求解绝对地依赖短波长范围 X 光的光谱, 不采用迭代的办法, 不过早引入记录介质的响应函数和光栅的衍射效率, 以期某种程度上抑制误差传递。解谱过程更具说服力。

收稿日期: 1999-04-02; 修订日期: 2000-09-13

基金项目: 中国工程物理研究院预研基金资助课题(990218)

作者简介: 曹磊峰, 男, 1967年6月出生, 博士生, 助理研究员, 从事有关惯性约束核聚变与等离子体物理研究工作。

## 1 透射光栅测谱原理的简单描述

透射光栅是一种很好的色散元件,由多条平行的狭缝构成。光栅的特征参数包括光栅的线空比、光栅的厚度和光栅材料的光学参数。光栅的特征参数决定了光栅的色散能力。谱测量过程当中我们将光栅置于光源和记录介质之间,这时光源到光栅的距离和光栅到记录介质的距离也将影响光栅的衍射效果。一般来说光源本身是有一定大小的,光源到光栅的距离以及光栅到记录介质距离不是无穷大,光栅本身也有一定宽度,从菲涅耳衍射公式解析地推导光栅的衍射规律有一定困难。但是某些情况下,比如ICF实验中的等离子体光源,以典型的实验布局用透射光栅测量其软X光谱时<sup>[5]</sup>,相比较而言,光源尺寸是如此之小,光源到光栅的距离以及光栅到记录介质的距离是如此之大,光源可以看成点光源,光源到光栅的距离以及光栅到记录介质的距离也都可以近似作无穷大,光栅的宽度也可以近似无穷小。这些情况下,光栅的衍射可以看作夫琅和费衍射,满足光栅方程。光栅的衍射效率可以用矩形栅线模型来计算。

## 2 软 X 光源透射光栅测量谱解谱的多项式展开法

在测谱过程中,我们使用X光CCD作记录元件。因为CCD具有良好的线性、较大的动态范围、数字化、直接连接计算机等优点,最重要的是CCD具有谱的加和性。CCD的这些特征,满足了我们下面数学推导的物理合理性。

光源为点光源,光源到光栅的距离和光栅到CCD的距离足够大,光栅的宽度足够小时,光栅对光源的衍射满足光栅方程

$$m \frac{\lambda}{d} = \sin \theta = \frac{x}{l_2} \quad (1)$$

这里 $\lambda$ 为X光波长, $d$ 为光栅周期, $x$ 为色散距离, $l_2$ 为光栅到CCD的距离, $m$ 代表光栅的第 $m$ 级衍射。方程(1)中,光栅平面与CCD平面平行且垂直于光轴,光源位于光轴上,色散方向垂直于光栅栅线的方向。 $x$ 轴的原点位于光轴与CCD的交点,沿色散方向。

从光栅方程我们可以看出, $\lambda$ 和 $x$ 是多对一的对应关系。也就是说,在 $x$ 轴上某一点对应记录了波长为 $\lambda, \lambda/2, \lambda/3, \dots, \lambda/m$ 的X光的衍射,这些衍射的线性叠加就是该点衍射强度。利用光栅方程 $m=1$ 时 $x$ 和 $\lambda$ 的关系,CCD记录到的测量谱 $I'(x)$ 可以写成 $I'(\lambda)$ 。于是由光栅方程我们可以得到

$$I'(\lambda) = \frac{1}{m} I\left(\frac{\lambda}{m}\right) \eta_m\left(\frac{\lambda}{m}\right) \eta_{\text{CCD}}\left(\frac{\lambda}{m}\right) \quad (2)$$

由光栅的矩形栅线模型,考虑光栅的第 $m$ 级衍射与一级衍射的关系<sup>[5]</sup>, (2)式可以进一步写为

$$I'(\lambda) = \frac{1}{m} \frac{1}{m^3} \left[ \frac{\sin\left(\frac{am\pi}{d}\right)}{\sin\left(\frac{a\pi}{d}\right)} \right]^2 I\left(\frac{\lambda}{m}\right) \eta_1\left(\frac{\lambda}{m}\right) \eta_{\text{CCD}}\left(\frac{\lambda}{m}\right) \quad (3)$$

其中 $I(\lambda)$ 为光源的原始发射谱, $\eta_m(\lambda/m)$ 为光栅对波长为 $\lambda/m$ 的X光的衍射效率, $\eta_{\text{CCD}}(\lambda/m)$ 为CCD对波长为 $\lambda/m$ 的X光的响应。 $a$ 是光栅一个周期内透光部分的宽度。

注意到CCD响应函数的线性,上式可进一步写为

$$I'(\lambda) = \frac{1}{m} \frac{1}{m^3} \left[ \frac{\sin\left(\frac{am\pi}{d}\right)}{\sin\left(\frac{a\pi}{d}\right)} \right]^2 y\left(\frac{\lambda}{m}\right) \quad (4)$$

其中

$$y(\lambda) = I(\lambda) \eta_1(\lambda) \eta_{\text{CCD}}(\lambda) \quad (5)$$

观察(4)式可以看到,方程的左边为测量谱,系已知函数;方程的右边仅有一个未知函数。对于这样一个方程我们可以采用正交多项式展开的办法来求解。

将 $y(\lambda)$ 写成按某正交多项式展开的形式

$$y(\lambda) = \sum_{n=0}^N a_n G_n(\lambda) \tag{6}$$

(4) 式即可写为

$$I'(\lambda) = \frac{1}{m} \frac{\sin(\frac{am\pi}{d})}{\sin(\frac{a\pi}{d})} \sum_{n=0}^N a_n G_n(\frac{\lambda}{m}) \tag{7}$$

(7) 式为一个线性方程组, 可以简单求解得到系数序列  $a_n$ , 从而由 (6) 式就可以求出  $y(\lambda)$ , 进一步再由 (5) 式即可最终获得软 X 光源的原始发射谱。

本节介绍的解谱方法未人为给定 X 光的波长下限, 未进行迭代过程, 将光栅的衍射效率和 CCD 响应函数的引入放到了数据处理的最后环节, 因而避免了迭代方法解谱有可能带来的种种问题, 解谱结果更具有说服力。

### 3 对 CF 实验中典型软 X 光透射光栅测量谱的解谱

在星光-II 激光实验装置上, 我们利用标定过的透射光栅配 X 光 CCD 获得了激光诱导等离子体光源的软 X 光能谱测量谱。利用本文的解谱方法和以往采用的迭代的办法分别了解谱 (图1), 采用标定得到的光栅的衍射效率和标称的 CCD 的响应函数分别获得了光源的原始发射谱 (图2)。利用本文提到的方法解谱时, 我们选用了切比雪夫多项式, 分别取到 5, 10, 15, 30 阶进行计算, 发现取到 10 阶以后计算结果基本不再变化。作者认为, 本文采用的方法实质上是一种级数展开的方法, 只要取了足够多阶的级数, 理论上计算结果可以达到任意精度。实验中我们采用的参数满足夫琅和费衍射条件。我们获得的测量谱以及我们的解谱结果与预期结果及国外同行的结果符合得很好。研究结果表明: 本文提供的一种解谱方法是一种切实可行的解谱方法, 它无需选择下限波长, 扩大了解谱过程的自由度, 同时也充分满足数学上的合理性。采用以往迭代的办法解谱时, 如果能选择合适的下限波长, 两种解谱办法可以获得近乎一致的结果。

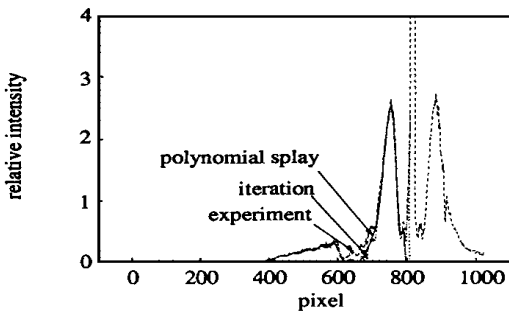


Fig 1 Experiment spectrum and unfolding in two different ways (removing high order diffraction)

图1 测量谱以及两种不同的方法解谱结果(去高级)

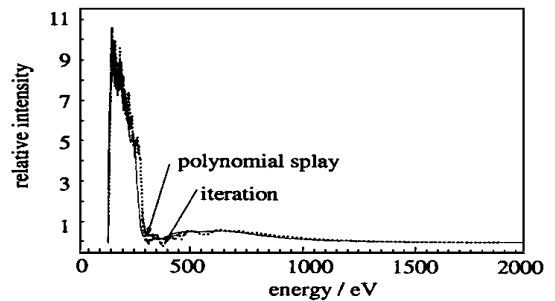


Fig 2 Comparison of the two final unfolded spectra obtained by two different ways

图2 两种不同方法解谱最终结果

### 4 结果与讨论

本文提供了一种与以往迭代的办法不同的软 X 光源透射光栅测量谱的解谱方法。本方法增加了数据处理过程的数学合理性, 降低了数据处理的难度。

对某一物理问题发展不同的数据处理方法是有意义的。通过不同的方法获得相同的结果, 可以证明数据处理过程可靠性; 当人们由不同的方法获得有差异的结果时, 这些方法可以互相对比, 益于发现问题。

#### 参考文献:

[1] 孙可照, 杨建国, 郑志坚 亚千 X 光谱诊断技术[A]. 惯性约束聚变与强激光技术论文集[C], 1990 90

- [2] Nishimura H, Kato Y, Takabe H, et al. X-ray confinement in a gold cavity heated by 351nm laser[J]. *Phys Rev A*, 1991, **44**: 8328 ~ 8333
- [3] Leeper R J, Chandler G A, Cooper G W, et al. Target diagnostic system for the national ignition facility[J]. *Rev Sci Instrum*, 1997, **68**: 868~ 879.
- [4] 成金秀, 杨存榜, 温天舒. 皮秒分幅X射线针孔透射光栅谱仪[A]. 惯性约束聚变·靶物理实验·诊断与制靶学术研讨会文集[C], 1998. 239.
- [5] 杨家敏. 低Z材料辐射烧蚀特性研究[D]. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 1998.

## Use Polynomial Splay Way Do Inversion from Experiment Spectrum Obtained by Transmission Grating to the Emission Spectrum of a Soft X-Ray Source

CAO Lei-feng, CHENG Jin-xiu, YANG Jiamin, JIANG Sao-en, WEN Tian-shu

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, P. O. Box 919-987, Mianyang, 621900 China)

**ABSTRACT:** A new way to deconvolve the emission spectrum of a soft X-ray source from the experiment spectrum obtained by transmission grating was provided. Compared with the conventional method, the new way need not a cut-off wavelength. Theoretically, it seems more convinced. A classical data obtained from spectrum measured in experiment of CF was processed with different way, content result was obtained.

**KEY WORDS:** transmission grating; spectrum; soft X-ray