

激光等离子体 X 光谱的高精度测量

冯贤平 徐至展 张正泉 陈时胜 郑丹青

(中国科学院上海光机所)

High accuracy measurement of laser induced X-ray spectrum from GaAs Plasma

Feng Xianping, Xu Zhishan, Zhang Zhengquan, Chen Shisheng, Zheng Danqing

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

摘要: 通过比较各种光谱实验数据的处理方法, 本文得到了高精度的砷化镓激光等离子体 X 射线光谱, 与理论值相比, 最大相对误差不超过 0.03%。

关键词: X 射线光谱, 数据处理

激光等离子体发射的 X 射线(LPX)光谱的高精度测量是 LPX 光谱学中一项极为重要的工作, 这是因为 LPX 光谱极为复杂, 它不仅有着丰富的共振软 X 射线谱, 而且还存在着大量的各电离级离子的伴线和禁戒跃迁等, 光谱极为密集。故不进行严格的波长测定, 一般很难辨认出各线谱对应的能级跃迁和电离离子。其次在进行 LPX 射线诊断研究中, 由于光谱波长的不精确性也会给等离子体参数的测量带来误差, 所以提高光谱的测量精度很重要。

但是, 根据目前常规的 LPX 拍摄、辨认和波长测量结果, 发现软 X 射线波长精度一般都是在 0.8% 左右^[1], 精度不高。部分原因是软 X 射线的位置测量不够精确, 另一部分原因是采用的数据处理方法不适当。为此, 考虑到数据处理一般都是以光谱黑度曲线为基础的情况, 本文先对 LPX 谱的黑度扫描曲线放大 30 倍后精测它们的相对位置, 放大的目的是为了提

高相对位置的测量精度。在此

基础上, 通过各种数据处理方法的比较, 获得了高精度的砷化镓 LPX 谱线。实验是在千兆瓦钨玻璃激光装置上进行的, 其输出功率为 $(2\sim 4)\times 10^9$ W (能量 5~8 J, 脉宽 2 ns), 用口径 $\phi 60$ mm、焦距 60 mm 的非球面透镜直接聚焦在真空度为 5×10^{-2} Torr 内的砷化镓平面靶上, 靶厚 1 mm, 靶面功率密度约为 4×10^{13} W/cm² 量级, LPX 射线光谱用 TIAP 晶体谱仪拍摄。

图 1 就是砷化镓的 LPX 射线光谱, 图 2 是其相应的黑度扫描曲线。

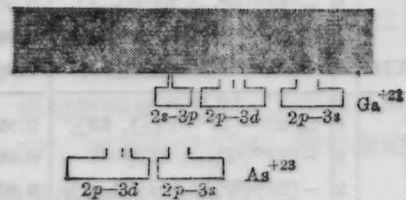


图 1 砷化镓 LPX 射线谱

收稿日期: 1988 年 2 月 24 日。

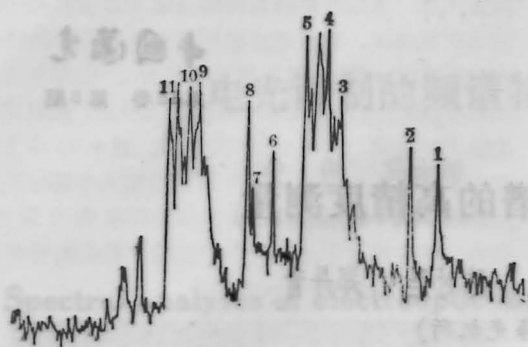


图2 砷化镓 LPX 谱黑度扫描曲线

根据等电子序数原子 LPX 射线光谱相似性特点,可估计出线 1,2,6 号可能是由镓的类氩离子和砷的类氩离子 $1S^2 2P^6 - 1S^2 2P^5 3S$ 能级间电子跃迁产生的,假设上述推测是正确的,则以这些线为特征线,由此根据文献 [2] 的常规方法先求出特征值 f :

$$f = \overline{P_1 P_2} \left[\operatorname{ctg} \left(\alpha + \sin^{-1} \frac{\lambda_1}{2d} \right) - \operatorname{ctg} \left(\alpha + \sin^{-1} \frac{\lambda_2}{2d} \right) \right]^{-1}$$

其中 $\overline{P_1 P_2}$ 是波长为 λ_2 和 λ_1 的相对位置, α 是晶面与底片的夹角, $2d$ 是晶格常数。然后取特征值的平均值 $\sum_i^n f_i / n$, 作为常数重新代入上式,即可得到不同位置上的波长,一般称

这种方法为常规法或一步法。表 1 例出了利用上方法得到的结果。

比较实验和理论结果^[3], 可看出上述假设是正确的,但从得到的结果又发现波长精度并不高,整个光谱域中最大绝对误差为 $\pm 0.004 \text{ nm}$,最大相对误差为 0.4% 左右。

为了提高光谱数据处理的精度,本文采用二步法,第一步类似上方法求各线波长,寻找出更多的,特别是远离原特征线位置的,可确定的波长为特征线,在这基础上,重复上述求波长与位置的关系。用此方法得到的砷化镓光谱精度有较大的提高(见表 1),其光谱的最大绝对误差在 $\pm 0.0006 \text{ nm}$ 左右,最大相对误差不超过 0.07%。

不过在这里须指出的是以上所进行的 LPX 光谱数据处理都是采用先求参数 f 平均值后再作外推的方法。但是,仔细分析不难发现上面都是在假定 X 光底片与晶面夹角 $\alpha = 68^\circ$ 度不变为前提的。而事实上,可能由于暗盒内的底片不平或暗盒本身在晶体谱仪上没有放好,这就会使参数 α 值或者说参数 f 成为一个位置函数 $f(x)$ 。为此,采用拟合法来处理比较适合。先用牛顿幂级数函数^[4]来拟合不同区域或位置上的 f_i 。由此再

表 1 不同数据处理法对应下的砷化镓 LPX 光谱波长(单位 nm)

离子	编号	光谱项	理论值 ^[3]	常规法 (一步法)	二步法	拟合法 (幂次数 $n=2$)	一步法加拟合法 (幂次数 $n=2$)	一步法加拟合法 (幂次数等于 4)
镓的类氩离子 GaXXII	1	$2S^2 2P^6 - [2P^5(^2P_{3/2}), 3S]_{11}$	1.0835	1.0835	1.0832	1.0835	1.0835	1.0835
	2	$-[2P^5(^2P_{1/2}), 3S]_{11}$	1.0584	1.0583	1.0586	1.0583	1.0586	1.0583
	3	$-[2P^5(^2P_{3/2}), 3d(^2D_{3/2})]_{11}$	0.9963	0.9935	0.9970	0.9965	0.9960	0.9965
	4	$-[2P^5(^2P_{3/2}), 3d(^2D_{5/2})]_{11}$	0.9842	0.9847	0.9848	0.9843	0.9831	0.8842
	5	$-[2P^5(^2P_{1/2}), 3d(^2D_{3/2})]_{11}$	0.9642	0.9636	0.9641	0.9638	0.9628	0.9639
	7	$2S^2 2P^6 - [2S^2 2P^6 3P(^2P_{1/2})]_{11}$	0.9078	0.9100	0.9079	0.9080	0.9101	0.9073
	8	$-[2S^2 2P^6 3P(^2P_{3/2})]_{11}$	0.9025	0.9080	0.9030	0.9034	0.9061	0.9030
砷的类氩离子 AsXXIV	6	$2S^2 2P^6 - [2P^5(^2P_{3/2}), 3S]_{11}$	0.9273	0.9324	0.9272	0.9300	0.9303	0.9273
	8	$-[2P^5(^2P_{1/2}), 3S]_{11}$	0.9031	0.9031	0.9030	0.9034	0.9061	0.9030
	9	$-[2P^5(^2P_{3/2}), 3d(^2D_{3/2})]_{11}$	0.8563	0.8563	0.8562	0.8425	0.8561	0.8558
	10	$-[2P^5(^2P_{3/2}), 3d(^2D_{5/2})]_{11}$	0.8461	0.8431	0.8467	0.8293	0.8462	0.8463
	11	$-[2P^5(^2P_{1/2}), 3d(^2D_{3/2})]_{11}$	0.8269	0.8342	0.8271	0.7993	0.8251	0.8267

(下转第 134 页)

作为比较,我们测量了序列脉冲的最大倍频和三倍频效率。忽略反射损耗,最大倍频效率($\theta_p=45^\circ$)达65%,最大三倍频效率($\theta_p=36^\circ$)达到40%以上(图11)。0.3547 μm 紫外激光的输出能量高达30 mJ,这与理论计算值接近。

图12是条纹相机记录下的光脉冲形状,倍频光与三倍频光的脉宽相等,都是45 ps。

图9中,上曲线是没有考虑调整误差时的理论效率曲线,下曲线是考虑了调整误差以后的曲线,大部分实验测量值都在两曲线之间,这说明理论预测是成功的。除去图9,其余8、10、11三图的理论曲线都是采用最大位相失配角计算的。

重复实验的测量误差主要来自激光器的波动和晶体的调整误差。理论上和实验中都

证明,和频晶体的调整误差对效率的影响最大,约为倍频晶体的1倍(图6)。其余调整误差的影响依次为晶体的转动误差(由于调整架旋转调节误差最大)、偏振角的调整误差以及倍频晶体的调节误差,实验表明,表4精度下的调整架调节和频晶体是比较困难的。

衷心感谢董景元、陆雨田在脉冲测量以及其它方面给予的大力帮助;衷心感谢钱林兴、赵隆兴在激光电源上给予的大力帮助。

参 考 文 献

- 1 W. Seka *et al.*, *Opt. Commun.*, **34**, 474 (1980)
- 2 许伟民,何慧娟,三倍频效率的模拟计算,待发表
- 3 天津大学精仪系,“精密机械零件”,下册(人民教育出版社,1979), p. 121

(上接第152页)

对整个砷化镓 LPX 光谱进行处理(见表1)。这里我们已取牛顿最高幂级数 $n=2$ 。结果分析发现,在谱特征线之间可得到与理论极为一致的谱线,它们的绝对误差一般在 $\pm 0.0004 \text{ nm}$,而一旦超出所选用的特征线外推其它 LPX 光谱线时,误差明显上升,如对砷的类氮离子 9 号线误差是 0.014 nm ,而到了 11 号线最大误差已是 0.026 nm 了。为了改进拟合法这种缺点,本文也采用了常规法与拟合法合成的方法,这时会有更多更广的特征线;由此得到的光谱参数可看出它已避免了单用拟合而引起的那种误差发散情况。整个 LPX 光谱的误差是在 0.001 nm 上下浮动。这结果与二步法比较是不够理想的,且工作量大。实际上采用上述方法没有提高精度的原因在于先用了最高幂指数 $n=2$ 。如果提高函数 $f(x) = \sum_1^n a_i x^i$ 的幂指数 n 值并使其与特征线条数相同,则在常规法的基础上

采用牛顿拟合函数 $f(x)$ 来推断整个砷化镓 LPX 的光谱波长与位置的关系,所得到的光谱精度大大提高。如当 n 值取 4 时,光谱的最大绝对误差在 $\pm 0.0003 \text{ nm}$ 之间,最大相对误差是 0.03% 。

综合上述各种方法的分析和比较,可得出一步法比较简单易算,但得到的光谱精度不高。拟合法虽然在处理上比较繁琐,但只要幂指数取得适当,精度相当之高。而所谓二步法是介于上述二种方法之间。因此,在具体的光谱数据处理中,根据具体的实验要求可采用不同的方法。

参 考 文 献

- 1 卢仁祥 *et al.*, *科学通报*, **24**, 1071 (1979)
- 2 张正泉 *et al.*, *原子与分子物理学报*, **4**, 377 (1987)
- 3 V. A. Bockio *et al.*, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*, **19**, 11 (1978)
- 4 易大义 *et al.*, “数值方法”(浙江科学技术出版社,1984), p. 113