

OSA光学光谱分析仪用于激波管光谱的线性研究

李鸿德 涂永清 刘玉珍

王振一

中国科学院力学研究所, 100080, 北京

中国科学院紫金山天文台

本文对光学光谱分析仪OSA WP-4系统做了一般介绍, 对该系统用于研究激波管光谱的优点和特点做了分析。在激波管不同的状态下, 对研究气体(Ar + H₂), 用OSA WP-4系统在快门和直流累积光辐射条件下, 得到了H α 、H β 线的清晰光谱线轮廓; 对H β 线形进行了测量分析, 得到了半宽度 $\Delta\lambda_{1/2}$ 和峰峰间距 $\Delta\lambda_{pp}$ 及其它它们之间的关系; 也得到了 $\Delta\lambda_{pp}$ 与电子密度 n_e 之间的关系; 实验结果与国外结果做了对比, 并进行了分析讨论, 取得了一些基本看法。实验证明: OSA WP-4系统特别适宜于研究高速瞬态和弱光源的光谱辐射和动力学过程。

一、一般情况

激波管易于产生一定温度、密度范围的均匀高温气体。根据研究目的不同, 气体可为均相的纯气体, 如惰性气体、纯H₂等或混合气体, 如F₂ + H₂、CH₄ + Air等; 也可为两相的气体混合物。当激波加热被研究的气体混合物时, 可产生非平衡和平衡状态的高温气体, 其中含有原子、分子、离子和电子; 当温度高达几千度以上时, 可以产生相应波段的光辐射、不同的特征光谱线和特征光谱带; 这些特征谱线用于研究物质的成分、性质、物理的和化学动力学过程。激波管是研究原子分子光谱、特别是高激发态光谱的重要而又理想的实验设备。

八十年代以前, 激波管高温气体光谱的研究多用棱镜或光栅式光谱仪, 它们采用光谱干板记录光谱, 具有快速同时记录较宽范围波段光谱的优点, 但是灵敏度低, 对于几十微秒的激波管瞬态光谱, 在分辨率提高时, 记录困难, 而且使用不方便; 后来采用光量计或扫描光谱仪研究光谱, 其记录系统多采用光电倍增管, 及相应的高精度机械联动装置, 它们具有灵敏度高、响应速度快和使用方便等优点, 但记录的光谱范围小或不能同时。

随着光探测器和电子学的迅速发展, 在七十年代和八十年代初相继出现了各种类型的光学探测系统, 其中最典型的是普林斯顿应用研究公司的OMA系统(Optical Multichannel analyzer)和西德B/M公司的OSA系统(Optical Spectra analyzer)的多通道光学探测器, 这两套系统近年来不断更新换代, 它们兼有光谱干板和光电倍增管的优点。目前世界上已比较广泛地采用OMA或OSA系统研究天文光谱、原子分子、火焰、激光、化学发光、喇曼、等离子体和微微秒过程光谱, 特别适宜于高速瞬变过程、弱光和时间分辨的光谱[1][2]。我们采用OSA WP-4光学光谱分析仪, 在中心流场均匀和干净的 $\phi 800$ 低密度高温激波管上[3], 进行各种高温气体的非平衡和平衡辐射特性的研究, 不同元素的振子强度测量和光谱线形的研究等。OSA WP-4系统特点是用电脑、增强型光导硅靶摄像管和微电子学分析处理等系统取代了一般传统的光谱仪器。

本文对OSA WP-4测量系统做了一般介绍, 对该装置用于研究激波管光谱的优点和特点做了分析。在激波管不同的状态下, 用OSA WP-4系统在快门和直流累积光辐射的条件下, 得到了H α 和H β 的清晰光谱线

形;对 H_{β} 线形进行了测量分析,得到了半宽度 $\Delta\lambda_{1/2}$ 和峰-峰间距 $\Delta\lambda_p$,及其有关的规律;同时与国外结果进行了对比,并对有关问题进行了分析讨论,取得了一些初步看法。

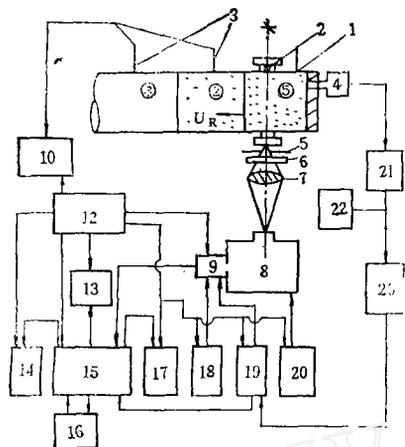


图1 激波管激光光谱仪流程图

1.反射段; 2.光学窗口; 3.电探针; 4.压力传感器; 5.光闸; 6.中阻滤光片; 7.透镜; 8.多色仪; 9.硅靶摄像机; 10.多通道计时器; 12.稳压电源; 13.显示屏; 14.x-y记录仪; 15.主机(OSA-WP-4); 16.键盘; 17.打印机; 18.致冷器; 19.驱动器; 20.驱动器; 21.电荷放大器; 22.数据采集系统; 23.放大器。

二、OSA WP-4装置及摄谱特点

OSA WP-4系统主要有三个部分:增强型光导硅靶摄像管,多色仪,主机和外围设备等。该系统把光学多道探测和微机结合起来,其特点是灵敏度甚高,响应速度很快,波长分辨率高,动态范围宽,能实时地对实验光谱信号做高速采集,立即进行自动存储、显示、打印,给出整个光谱线的轮廓,并可用数字给出光谱线的强度、积分值和平均值等重要参量,这是传统的光谱仪不能比拟的。

1.光导硅靶摄像管(见图2)

它包括像增强器、硅靶面、电子枪和扫描偏转线圈等。光信号经光学系统成像到光纤板的光电阴极上,光电阴极的发射电子在高压电场作用下,经聚焦加速后高速轰击到

二维的硅靶信号电极上,产生出大量的电子空穴对。(硅靶是长13.5mm,宽10mm的集成硅片,上面刻蚀了千百万个硅光电二极管。)在二维硅靶上形成对应于不同波长和不同光强信号的电荷分布,这些电子空穴对在p-n层耗尽区内引起二极管放电,其放电量与光强成正比。这是进行光谱测量研究的基本依据。硅靶再由扫描部分的电子束充电,取出靶面上各象素的信号,此视频信号经前置放大器入主机进行处理后,显示、打印和存

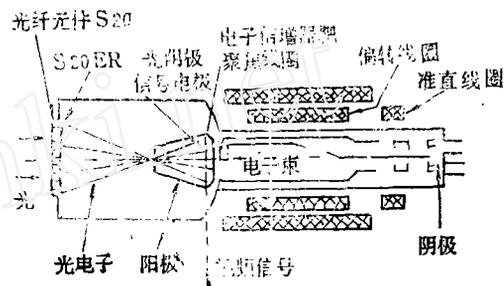


图2 硅靶摄像管摄像机

储。

为了得到入射或反射激波不同区域的分辨光谱,我们研制了高压闸门电源。在图2的阳极前有一个控制栅极,正常工作时对光阴极有近千伏的电位;当需要闸门控制时可以采用同步触发的不同脉宽高压方波来控制光阴极电子的发射和截止,即光信号的进入和截断,达到以闸门控制的方式控制高温气体光源发光时间的长短。闸门电源的高压脉宽从 $0.5\mu\text{s}$ — 100ms ,脉冲上升和下降时间小于 50ns 。对于入射和反射激波区域的光谱研究是足够的。为了得到二维光谱,我们研制了扫描转镜系统,通过光学系统和机械装置完成对多色仪狭缝的扫描,从而在硅靶上得到二维光谱信号,即时间分辨光谱。

由硅靶的信号衰落特性知道,为了延长读靶的时间或根据需要延时读靶,对硅靶采取冷却措施具有降低噪声等重要的实际意义。闸门电源和致冷器见图1。

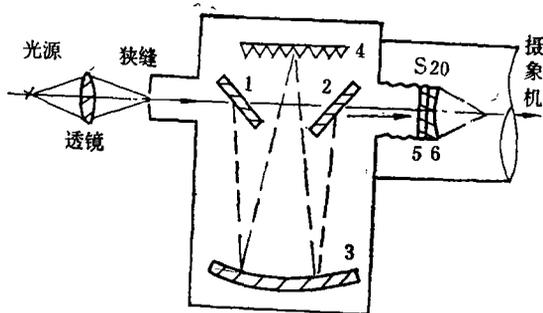


图3 多色仪

1. 2. 平面反射镜; 3. 球面反射镜; 4. 光栅;
5. S₂₀ 6. S₂₀ ER

2. 多色仪 (图3)

实际上, 它是一台光谱仪, 我们用的是
一米平面光栅摄谱仪, 光辐射不是投射到光
谱板上, 而是落到光导摄像管前的光导纤维
板上。应用多色仪时, 要仔细地估计光学分
辨率、线色散和光谱覆盖范围。我们研究光
谱线形, 为得到高的分辨率, 就要使光色散到
很宽的角度范围, 即很小部分的光谱 $\Delta\lambda$ 落到
靶上。我们应用的光谱仪线色散标称为 8 Å/
mm, 12.5mm的靶面的光谱覆盖范围
为100 Å, 整个靶面是 500 道, 相当于0.2 Å/
道; 在良好的调整条件下, 实际上得到0.17 Å/
道。

3. 主机与外围设备

OSA WP-4 的主机为 TMS9900 标准十
六位机; 它是为 OSA WP-4 系统的各种应
用而设计的微机控制系统; 内存 64K 字节,
双软盘存贮为 20K 节字的 420 条光谱; 分辨率
14bit A/D 为 1/16384; 有各种功能接口,
还有调用程序 74 个、软盘程序 44 个; 我们利
用 Learn 程序和 Basic 语言, 可用主机自动处
理光谱数据和过程控制。外围设备见图 1。

三、激波管设备和测量装置

我们用的激波管设备和配气系统见文
献[4]。用电探针或压力传感器和多通道计时
器测量激波速度; 用石英晶体压力传感器、电
荷放大器和高速数据采集系统测量反射激
波后的压力; 用一米平面光栅光谱仪和
OSA WP-4 测量 H_α、H_β 光谱线形和光辐射强

度, 整个测量装置、光路和仪表安置见图 1。

这里特别强调的是测量光谱线时, 信号
的触发同步要控制好, 根据所要研究反射激
波后的不同区域, 采用不同的延时; 另一点
是我们采用研制的高速闸门, 在反射激波后
的某个区域, 可以得到几个 μs 至 1 ms 内不
同时间间隔的快门光谱。我们利用 WP-4 主
机和自己编制的程序, 实时而迅速地获得高
温气体某一成分的光谱线形, 并及时对有关
光谱参数进行处理。

四、实验结果和分析讨论

这里主要给出在激波管上用 OSA WP-4
系统得到的 H_α 和 H_β 光谱线形及测量分析结
果; 至于光谱线形的理论工作, 虽然很复
杂, 但许多学者做了不少工作, 得到了在等
离子体中, 由于电子碰撞和离子的准静态作
用使氢原子光谱线形被加宽的计算公式[5]:

$$I_{\alpha\beta}(\omega) = \left(\frac{1}{\pi}\right) \int_0^{\infty} W_r(F) dF \cdot \text{Re} \sum_{\alpha'' = \alpha' + \beta''} \langle \alpha' | \mu_{\alpha} | \beta' \rangle \langle \beta'' | \mu_{\alpha} | \alpha'' \rangle \langle \alpha' | \langle \beta' | \left[i(\omega - \frac{H_{\alpha}(F) - H_{\beta}(F)}{\hbar} \phi_{\alpha\beta}) \right]^{-1} | \alpha'' \rangle | \beta'' \rangle \quad (1)$$

该式忽略了二次 Stark 效应和四极子修正,
它是许多学者详细计算和研究 Stark 线形
的基础。这里 ω 为角频率; $W_r(F)$ 是离子场强
 F 的分布, 它依赖于参数 $r = \rho_s / \rho_D$, ρ_s 是离
子球半径, ρ_D 是 Debye 半径, 它们分别为

$$\rho_s = \left(\frac{4}{3} \pi N_s\right)^{-1/3} \quad (2)$$

$$\rho_D = (kT / 4\pi N_s e^2)^{1/2} \quad (3)$$

于是得: $r = 2.2 e N_s^{1/3} (kT)^{-1/2}$ (3)
(1) 式中 $H_{\alpha}(F)$ 和 $H_{\beta}(F)$ 是与离子加宽有
关的哈密顿量, 它们描述了在给定的场强 F
影响下, 不同的上能级 α 和下能级 β 的位置,
通过量子力学的微扰理论可以得到。
 $\langle \alpha | \mu_{\alpha} | \beta \rangle$ 是上下态的 Stark 能级间的偶极矩

阵元Dirac算符,这里 $\alpha = 1, 2, 3$ 。(1)式中 ϕ_{α} 是一个与时间无关的算符,但与相互作用势能 V 有关,电子碰撞在光谱线形上的整个效应通过 ϕ_{α} 来描述,在一定的条件下可以导出相应的复杂表达式。

如果有自吸收时,由辐射输运方程也可以求出 H_{α} 、 H_{β} 的整个线形,并得到线心凹陷。关于这些理论在此不做讨论。下面把我们的主要实验结果做一介绍,并进行必要的讨论。

1. 静态标定结果

为得到整个仪器的实际色散和仪器宽度,我们在与实验测量相同的光路下,在双色仪狭缝为 2μ 时,用光谱Na灯进行了测量,其谱线见图4,Na的双线间隔 $\Delta\lambda = 5.97\text{ \AA}$,与 $\Delta\lambda$ 相对应的光谱道数可以得到,这样有 $0.171\text{ \AA}/\text{道}$ 。同样用光谱氢灯对 H_{α} 、 H_{β} 线进行了静标,求得仪器的分辨率为 0.3 \AA 左右,仪器宽度为 0.5 \AA 左右。对于目前的实验状态,精度满足要求。

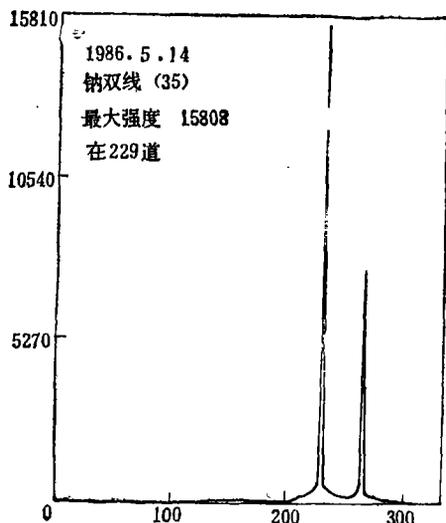


图4 光谱钠线

2. H_{α} 、 H_{β} 的光谱线形

利用图1的光路和光谱氢灯,标定了 H_{α} 、 H_{β} 线在显示屏上中心道的位置,然后在激波管不同状态下,获得了延时不同,快

门曝光时间不同和累积曝光条件下的 H_{α} 、 H_{β} 光谱线形。典型的 H_{β} 、 H_{α} 光谱线形分别见图5和图6。在图5中给出了双峰间距 $\Delta\lambda_{pp}$ 和半宽度 $\Delta\lambda_{1/2}$ 。

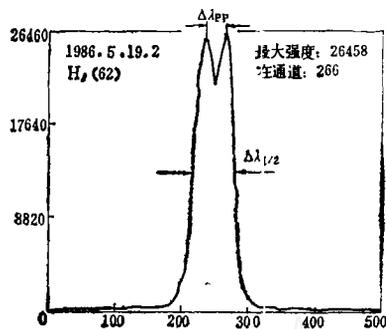


图5 典型的 H_{β} 光谱线形

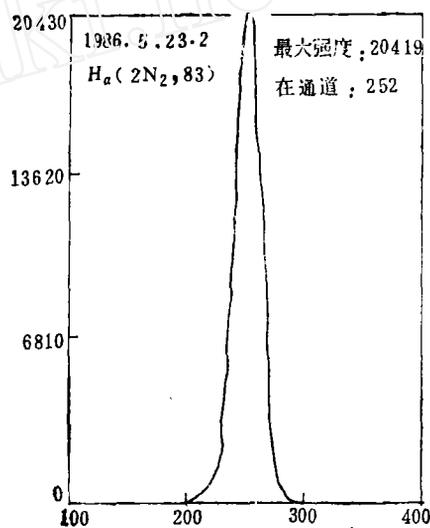


图6 典型的 H_{α} 光谱线形

3. H_{β} 线的双峰间距 $\Delta\lambda_{pp}$ 与电子密度的关系

由 H_{β} 光谱线形得到 $\Delta\lambda_{pp}$;由 H_{β} 光谱线的半宽度 $\Delta\lambda_{1/2}$ 结合有关的理论图表^[6],求出电子密度 $n_e(\text{cm}^{-3})$, $\Delta\lambda_{pp}$ 与 n_e 值见附表一,同时给出它们的相互关系曲线(图7)。

从图7中看出:当等离子体的 $n_e > 4 \times 10^{15}(\text{cm}^{-3})$ 时,离子动力学效应对 H_{β} 线形的影响可以忽略。我们的实验状态 n_e 在 $10^{15}(\text{cm}^{-3})$ 量级,这一影响也予忽略。我们的

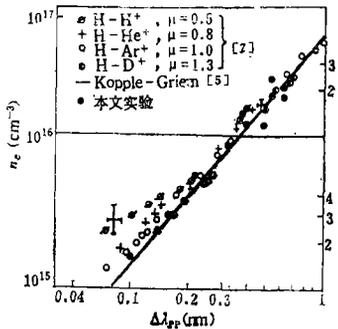


图7 H β 线的 $\Delta\lambda_{pp}$ 与 n_e 的关系及与其他作者结果的比较

实验结果与Fleurier^[7]的实验结果及KG^[5]的理论结果符合较好；初步分析我们得到的H β 光谱线形还属于Stark加宽；至于自吸收

型的光谱线形必须增大线的光学厚度才行。看来在一定的 n_e 下，用H β 线的 $\Delta\lambda_{pp}$ 结合KG理论曲线，可以求出等离子体的 n_e ，这为人们诊断等离子体的电子密度又增加了新的手段。

4. H β 光谱线的 $\Delta\lambda$ 与 $\Delta\lambda_{pp}$, $\lambda_{1/2}$ 的关系

由H β 光谱线形可以得到 $\Delta\lambda_{pp}$ 和 $\Delta\lambda_{1/2}$ （见表1）；它们的相互关系见图8。从图8中看出，我们的实验结果与Китаева等人的实验结果符合较好，也与Griem等人的理论一致。看来在我们的实验范围附近，H β 线的 $\Delta\lambda_{1/2}$ 和 $\Delta\lambda_{pp}$ 可以用于研究等离子体的状态。

表1 不同状态下，H β 光谱线的 $\Delta\lambda_{pp}$, $\Delta\lambda_{1/2}$ 和 n_e 。

序号	高压段 H ₂ :N ₂ :O ₂	实验段		入射激光 M _s	气体状态			$\Delta\lambda_{pp}$ (Å)	$\Delta\lambda_{1/2}$ (Å)	光谱 仪器
		P ₁ (τ)	气体成分		P ₂ (atm)	T ₃ (K)	n _e (cm ⁻³)			
1	19:0:1	1	1% H ₂ + 99% Ar	10.9	1.26	12647	2.51(16)	5.45	18.03	OSAWP-4
2	8:2:1	1	同上	9.12	0.861	1638	1.17(16)	4.92	16.70	同上
3	8:2:1	1	同上	9.22	0.880	10000	1.57(16)	5.61	13.38	同上
4	8:2:1	1	同上	9.27		10900	1.73(16)	5.95	14.45	RCH-51

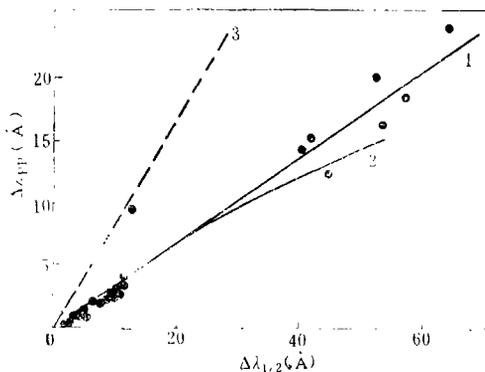


图8 H β 线的 $\Delta\lambda_{pp}$ 与 $\Delta\lambda_{1/2}$ 的关系

1. 本文实验^[8]；2. Griem et al^[9]；3. Holtsmark

五. 几点看法

1. 在我们的 $\phi 800$ 低密度激波管上，我们利用OSA WP-4系统，获得了不同的状态下，H α ，H β 清晰的光谱线形。看来OSA WP-4系统是测量研究激波管高温气体光谱的理

想设备仪器。它灵敏度很高；过去ИСП51光谱仪在色散为40 Å/mm的条件下能摄的光谱，现在用8 Å/mm的高色散光谱仪，还要加 $T=0.1$ （透过率）的中性滤光片两片；分辨率提高后，光谱强度仍很大；由估算得知，对研究 $T=4000$ K低密度条件下的太阳和其他天体光谱是没有问题的。

2. 我们的硅靶探测器加致冷器后，大大减小了噪声，背景影响很小，可以忽略；使用WP-4高温背景的扣除也很方便，所得的光谱线形清晰；数据处理迅速可靠。在高压快门和扫描装置的配合下，研究的内容更加广泛。

3. 由我们的实验结果看出，光谱线形的研究对于等离子体状态的诊断，光谱线形和辐射传输的理论皆有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Y.Arata et al., *J.Q.S.R.T.*, 32.(4)343 (1984).
 [2] J.Hernandez et al., *J.Q.S.R.T.*, 33(1)35 (1985).
 [3] 李鸿德、罗军、李思文、光学学报, 3(7)380 (1983).
 [4] 李鸿德等, 空气动力学学报, 4(3)326 (1986).
 [5] P.Kepple and H.R.Griem, *Phys.Rev.*, 173, 1, p317 (1968).
 [6] R.A.Hill, *J.Q.S.R.T.*, 1(4)2857 (1964).
 [7] C.Fleurier, et al., *Phys.Rev.*, 21(3), 854 (1980).
 [8] В.ф.Князева et al., *Оптика И Спектроскопия*, Том XII, Вып.2, 178 (1962).
 [6] H.R.Griem et al., *Phys.Rev.*, 116 (1960).

ON THE RESEARCH OF LINE PROFILE OF SHOCK TUBE SPECTRUM WITH OPTICAL SPECTRA ANALYZER (OSA)

Li Hongde, Tu Yongqing, Liu Yuezhen,

Institute of Mechanics, Academia Sinica

Wang Zhengyi

Zhijinshan Astronomical observatory, Academia Sinica

We have obtained the distinct line profile of H_α and H_β under Shutter and accumulation conditions at different states of shock tube. The relation of half Width ($\Delta\lambda_{1/2}$) and peak-peak interval ($\Delta\lambda_{pp}$) of H_β With electronic density and $\Delta\lambda_{1/2}-\Delta\lambda_{pp}$ relation have been obtained. Meantime Our results have been compared with foreign ones and were made a discussion.

(上接第78页)

是冷却氙灯电极的风扇停止工作, 会使电极材料温度反常升高, 并给氙灯灯泡内部施加压力, 引起氙灯爆炸。供电及仪器电气系统必须良好。使用中要注意冷却风扇的运转情况, 如有异常要立即关机排除故障。

(2) 仪器要安放在通风良好处, 以便排风散热。仪器亦不得在室温高于 35°C 情况下长时间工作。

3. 注意氙灯质量。氙灯内部平时有 9 个大气压, 一般的跌击即可造成炸裂, 要轻拿

稳放, 不得跌击碰撞。安装时要仔细检查, 如有异常不得使用。

4. 氙灯装上灯架时两端螺母不要拧得太紧, 以避免不必要的外力, 减少点亮后高温情况下对灯泡的压力。

5. 常见荧光仪器 M-850, MPF-4, RF-540, 所用氙灯互有差异, 规格不符, 不得互相混用, 以免发生问题。RF-540 用氙灯最长寿命为 400 小时, 超过太多会引起爆炸。