

文章编号: 0253-2239(2009)02-0529-04

# 不同微场分布函数对 Stark 线型的影响

冉俊霞<sup>1</sup> 张少朋<sup>2</sup> 李红莲<sup>3</sup> 郝晓辉<sup>1</sup> 庞学霞<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 河北大学物理科学与技术学院, 河北 保定 071002; <sup>2</sup> 河北大学体育教研部, 河北 保定 071002)  
<sup>3</sup> 河北大学质量技术监督学院, 河北 保定 071002)

**摘要** 利用不同的微场分布函数研究了其对 Stark 加宽光谱线型的影响。根据 Stark 加宽理论, 考虑到等离子体中的离子碰撞, Stark 加宽本质上是一种非对称的光谱线型, 其中微场分布函数对光谱线型起着非常关键的作用。研究结果表明, 总体上 Holtsmark 分布和 Nearest-Neighbor 场分布下的 Stark 光谱线型差别不太大, 但是 Mayer 模型对 Stark 加宽光谱线型影响较大。并且随着离子加宽参数的减小, 三种不同的微场分布函数对 Stark 光谱线型的影响逐渐减小; 随着电子加宽参数的减小, 不同的微场分布函数对 Stark 光谱线型的影响也逐渐减小; 同时发现, 当离子加宽参数减小到一定程度时, 不同微场分布函数对整个光谱线型的影响基本相似, 这也正说明离子间碰撞剧烈时对光谱线型的影响很大。

**关键词** 光谱学; Stark 加宽; 微场分布函数; 光谱诊断

中图分类号 O53 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092902.0529

## Stark Broadening Spectral Line Profile at Different Electric Microfield Distribution Functions

Ran Junxia<sup>1</sup> Zhang Shaopeng<sup>2</sup> Li Honglian<sup>3</sup> Hao Xiaohui<sup>1</sup> Pang Xuexia<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China  
<sup>2</sup> Department of physical education, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China  
<sup>3</sup> College of Quality and Technical Supervision, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China

**Abstract** The Stark broadening spectral line profile is described at different electric microfield distribution functions. According to Stark broadening theory, Stark broadening spectral line profile is asymmetry in essence considering plasma ions impact. The electric microfield distribution function is very important for the spectral line profile. The results show that the Stark broadening spectral line profile is similar at the Holtsmark distribution and Nearest-Neighbor field distribution and it is diversification at Mayer model. With the decreasing of the electrons impact broadening parameter, the influences of different electric microfield distribution functions are diminished. With the decreasing of the plasma ions impact parameter, the influences of different electric microfield distribution functions are trailing off. The results also show that the action of electric microfield distribution functions is similar when the plasma ions impact parameter is very small. It is illuminated that the plasma ions intense impact has great influence on the spectral line profile.

**Key words** spectroscopy; Stark broadening; microfield distribution function; spectral diagnosis

## 1 引言

原子谱线的线型和线宽是大量物理条件的信息源<sup>[1~13]</sup>, 通过比较理论的和实验的光谱线型可以研究等离子体中的一些重要参量。例如在等离子体中满足热力学平衡条件时, 通过谱线的相对强度可以测量等离子体中的电子温度; 辐射原子和离子在周

围电子和离子的扰动下而引起的谱线 Stark 展宽和频移又是测定等离子体电子密度的一种灵敏方法<sup>[5~13]</sup>, 当 Stark 加宽较 Doppler 加宽占优势时, 谱线的线型便不再严格依赖于电子或离子的速度分布, 因而不需要精确知道等离子体温度, 也不一定必须满足热力学平衡, 就可以从谱线的线型而确定等

**基金项目:** 国家自然科学基金(10575027)、河北省自然科学基金(A2004000086, 2006000950)和河北大学青年基金(2006Q10)资助课题。

**作者简介:** 冉俊霞(1978—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事等离子体光谱诊断方面的研究。E-mail: rjxhbu@hbu.cn

离子体的电子密度。但是,在 Stark 效应中,随机的微电场影响着等离子体的光学和热力学特性。微电场的存在影响着谱线线型,并且有效地降低了原子或离子侵入等离子体中的阈值。因此,在利用谱线线型诊断等离子体参数的过程中,微场的作用不容忽视,恰当的微场函数可以使诊断结果更加精确。因此,寻找匹配被诊断等离子体的、描述更加精确的微场分布函数成为光谱诊断等离子体参数的一个重要内容<sup>[14~16]</sup>。本文主要研究利用氩原子谱线进行光谱诊断的过程中,不同的微场分布函数对 Stark 加宽光谱线型的影响,其结果对等离子体的参数诊断有一定的参考价值。

## 2 微场分布函数

等离子体加宽和频移已经作为一种非干扰的测量方法应用了好多年。在等离子体中,电子与辐射原子和离子的碰撞是导致非氢原子谱线加宽和频移的一个主要因素,还有一小部分是由静态等离子体中的离子产生的微电场引起的,根据 Stark 加宽理论,Stark 加宽是由等离子体中的电子碰撞和离子碰撞决定的,在高密度等离子体中,孤立的原子谱线的 Stark 加宽主要是由电子碰撞引起的,电子碰撞加宽产生的谱线线型是对称的洛伦兹线型,此外由于谱线的加宽一部分来自于等离子体中的离子碰撞,它在本质上是非对称的,但在一般的研究中都是将 Stark 加宽近似为标准的洛伦兹线型进行计算,或者把整个光谱线型近似为 Voigt( $x$ )函数,也就是标准洛伦兹和标准高斯线型的卷积结果,因而对诊断带来一定的误差。为了避免了这方面的误差,把等离子体中的离子碰撞也考虑进去,因此总的 Stark 加宽应该是二者之和,所以实质上非氢原子的 Stark 加宽是一种非对称光谱线型  $j(\lambda)$ <sup>[7~9]</sup>

$$j(\lambda) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{W(\beta) d\beta}{1 + [(\lambda - \lambda_0 - d_e)/\omega_e - A^{4/3} \beta^2]^2}, \quad (1)$$

式中  $\omega_e$  为电子碰撞加宽参数,  $A$  为离子碰撞加宽参数,它们都是电子温度的函数。 $\lambda_0$  为中心波长,  $d_e$  为电子碰撞 Stark 频移,  $W(\beta)$  为等离子体的微场分布函数<sup>[14~18]</sup>, 其对 Stark 线型起着非常关键的作用,并且对谱线的非对称性贡献很大。许多学者对等离子体的微场分布函数进行了研究<sup>[14~18]</sup>, 目的是使其描述更加精确,更加符合不同条件下的等离子体中的实际情况。比如, Holtsmark 微场分布函数假设离子之间不相关并且电子屏蔽可以忽略,适用于极热和稀薄

等离子体环境中,其库仑耦合参数接近于零。再比如 Hooper 等人研究了低频和高频等离子体中微场分布函数的表示方法。通过使用 Holtsmark 分布、Nearest-Neighbor 场和 Mayer 模型微场分布函数来研究不同情况下三种微场分布函数对 Stark 线型的影响<sup>[14]</sup>。(2)式列出了 Holtsmark 微场分布函数

$$W_H(\beta) = \left(\frac{2\beta}{\pi}\right) \int_0^{\infty} \exp(-y^{3/2}) y \sin(\beta y) dy, \quad (2)$$

式中  $\beta = E/E_0$  为归一化场强,  $E_0$  为 Holtsmark 场强。

Nearest-Neighbor(以后简称 NN)微场分布函数:

$$W_{NN}(\beta) = 1.5\beta^{-5/2} \exp(-\beta^{3/2}), \quad (3)$$

Mayer 模型微场分布函数:

$$W_M(\beta) = \sqrt{2/\pi} \Gamma^{3/2} \beta^2 \exp(-\Gamma\beta^2/2), \quad (4)$$

式中  $\Gamma = (Ze)^2/(ak_B T)$  为库仑耦合参数,其中  $Ze$  为离子电荷,  $T$  为温度,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $a = \left(\frac{4\pi}{3}n_i\right)^{-1/3}$  是离子球体半径,  $n_i$  是离子数密度。图 1 给出了这三种微场分布函数的函数曲线。

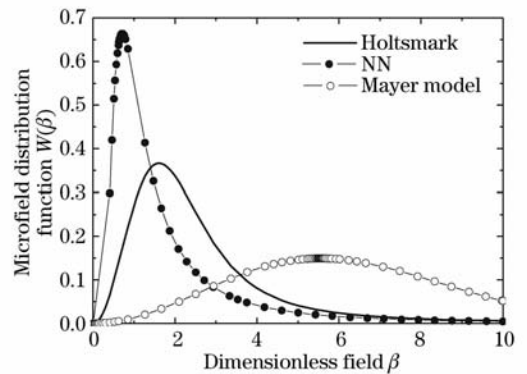


图 1 Holtsmark, NN 和 Mayer 模型微场分布函数

Fig. 1 Microfield distributions by Holtsmark, Nearest-Neighbor and Mayer model

从图 1 中可以看出,不同的微场分布函数其函数曲线有很大差别,特别是其峰值和尾部下降程度都不同。

## 3 结果与讨论

本文选取波长为 696.54 nm( $2P_2 \rightarrow 1S_5$ )的谱线进行计算,来获得理论下的 Stark 光谱线型。但是将不同的微场函数引入到 Stark 线型中后,  $j(\lambda)$  函数的图形描述和理论计算都比较困难,通过自编程实现了  $j(\lambda)$  函数的描绘,从而可以从图形中直观的看出 Stark 线型的变化,研究结果如图 2。图 2 列出了 (a)  $\omega_e = 0.01$ , (b)  $\omega_e = 0.001$  时,不同  $A$  值下  $j(\lambda)$  函数的函数图像。

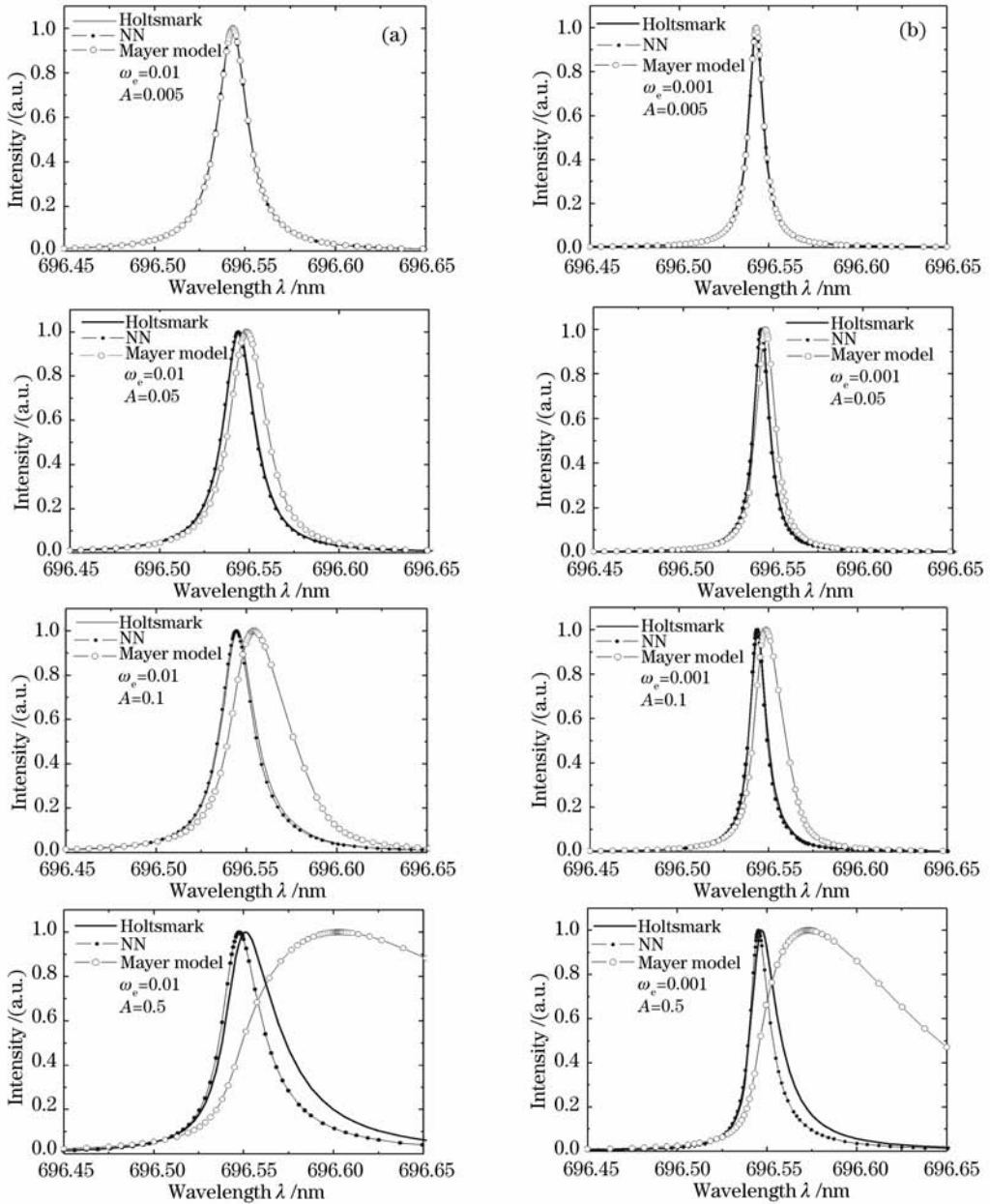


图 2 不同参数、微场下的 Stark 线型

Fig. 2 Stark spectral profile at different broadening parameter and different microfield distribution functions

从图 2 可以看出,总体上 Holtsmark 分布和 NN 场分布下的 Stark 光谱线型差别不太大,特别是当离子加宽参数  $A$  不是很大时, Holtsmark 分布和 NN 场分布下的 Stark 光谱线型几乎重合,但是 Mayer 模型对 Stark 加宽光谱线型影响较大,特别是对谱线的右翼和频移影响非常大。当离子加宽参数  $A$  越大时,三种微场函数对 Stark 光谱线型的影响逐渐趋于明显。特别地,当  $A$  达到一个极限值 0.5 时(一般在曲线拟合时都认为  $A \leq 0.5$ ),从图中可以看出三种微场函数对 Stark 光谱线型的影响已经非常明显,特别是 Mayer 模型下的谱线的加宽和

频移程度都相当大。随着离子加宽参数的减小,三种不同的微场分布函数对 Stark 光谱线型的影响逐渐减小,这说明离子间碰撞剧烈时对光谱线型的影响很大;同时还发现随着电子加宽参数的减小,不同的微场分布函数对 Stark 光谱线型的影响也逐渐减小。当电子加宽参数和离子加宽参数减小到一定程度时,三种微场函数对光谱线型的影响基本相似,这时谱线的加宽和频移都不明显,三种微场函数作用下的光谱线型趋于重合。

以上是从 Stark 线型中看到的直观结果,对 Stark 半宽进行分析可知,只有在  $A$  值很大时,

Holtmark 微场分布下的半宽和 NN 场分布下的半宽相差才较大;在  $A$  值很大时 Mayer 模型微场下的半宽与上述两个微场分布函数下半宽差别很大,甚至达到 500%。这说明,微场函数对光谱线型的影响在电子与电子碰撞、离子与离子碰撞剧烈的等离子体环境中尤其显著,在这种等离子体环境下,选择与被测等离子体匹配的微场函数,可以使测量结果更加精确。如果微场函数选择不当,其结果用于等离子体参数诊断中,误差可想而知。而在实际的测量中,都是通过使用理论的光谱线型拟合实验的光谱线型进行诊断,在拟合、计算过程中往往还要用到拟合参数  $\omega_e$  和  $A$ ,这时候选择恰当的微场函数就显得更加重要了,如果选择不当,会使拟合参数  $\omega_e$  和  $A$  不准确,并使最终结果不确信,使测量结果失去意义。

## 4 结 论

从大量描述微场分布的函数中选出三个具有代表意义的微场分布函数进行分析,结果发现不同微场分布函数确实对光谱线型产生了影响。选择不匹配被测等离子体源的微场分布函数会给测量结果带来很大的误差,甚至使测量结果不令人信服。因此,在使用 Stark 展宽测量等离子体参数的过程中,选择匹配的微场函数成为一项重要的内容。本结果为利用 Stark 光谱线型测量等离子体参数提供了参考。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Zhiyong, Luo Lan, Chen Wei. Spectral analyses of rare-earth ions in solid luminescent materials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 598~602  
杨志勇,罗 澜,陈 玮. 稀土掺杂固体发光材料的光谱分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 598~602
- 2 Yang Changhu, Zeng Xiaoying, Yuan Jianhui *et al.*. Application of Raman spectrum in water quality analysis [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1169~1172  
杨昌虎,曾晓英,袁剑辉 等. 激光拉曼光谱在水质分析中的应用[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1169~1172
- 3 Hu Wenbo, Wang Jianqi, Cao Yan *et al.*. Infrared radiation spectrum of alternating current plasma display panels[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1285~1289  
胡文波,王建琪,曾 艳 等. 交流等离子体显示器的红外辐射光

- 谱[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1285~1289
- 5 Wang Jian, Huang Wei, Gu Haitao *et al.*. Gas temperature measurement with tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1639~1642  
王 健,黄 伟,顾海涛 等. 可调谐二极管激光吸收光谱法测量气体温度[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1639~1642
- 5 V. Milosavljević, S. Djenize. The He I 706.52 nm line shape characteristics in the plasma diagnostics[J]. *Eur. Phys. J. D.*, 2003, **23**(10): 385~390
- 6 N Konjević. On the use of non-hydrogenic spectral line profiles for plasma electron density diagnostics[J]. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2001, **10**(2): 356~363
- 7 D. Nikolić, Z. Mijatović, S. Djurović *et al.*. Deconvolution of plasma broadened non-hydrogenic neutral atom lines[J]. *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfe*, 2001, **70**: 67~74
- 8 Dong Lifang, Ran Junxia, Mao Zhiguo. Direct measurement of electron density in microdischarge at atmospheric pressure by Stark broadening[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(161501): 1~3
- 9 D. Nikolić, S. Djurović, Z. Mijatović *et al.*. Quasi-static Stark profile as a model of the spectral line shape of heavy neutral non-hydrogen emitters[J]. *J. Research in Physics*, 1999, **28**(3): 185~198
- 10 C. Stehlé, D. Gilles, A. V. Demura. Asymmetry of Stark profile—he microfield point of view[J]. *Eur. Phys. J. D.*, 2000, **12**: 355~367
- 11 Lu Tongxing, Cui Zhifeng, Zhao Xianzhang. Measurement and calculation of Stark broadening of Mg spectral lines in laser plasma[J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **21**(2): 114~120  
陆同兴,崔执凤,赵献章. 激光等离子体镁光谱线 Stark 展宽的测量与计算[J]. *中国激光*, 1994, **21**(2): 114~120
- 12 Yang Baiqian, Zhang Jiyan, Han Shensheng *et al.*. Space-resolved diagnosis for the electron density of laser-produced aluminum plasma[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(5): 703~706  
杨柏谦,张继彦,韩申生 等. Al 激光等离子体电子密度的空间分辨诊断[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(5): 703~706
- 13 C. Penache, M. Miclea, A. Bräuning-Demian *et al.*. Characterization of a high-pressure microdischarge using diode laser atomic absorption spectroscopy[J]. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2002, **11**(4): 476~483
- 14 Alexander Y. Potekhin, Gilles Chabrier, Dominique Gilles. Electric microfield distributions in electron-ion plasmas [J]. *Phys. Rev. E*, 2002, **65**(12): 1~6
- 15 C. F. Hooper, JR. Electric microfield distributions in plasmas [J]. *Phys. Rev.*, 1966, **149**(1): 77~91
- 16 C. F. Hooper, JR. Low-frequency component electric microfield distributions in plasmas[J]. *Phys. Rev.*, 1968, **165**(1): 215~222
- 17 C. Mossé, A. Calisti, R. Stamm *et al.*. A universal approach to Rydberg spectral line shapes in plasmas[J]. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 2004, **37**(6): 1343~1352
- 18 Evgeny Stambulchik, Yitzhak Maron. Stark effect of high-n hydrogen-like transitions: quasi-contiguous approximation[J]. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 2008, **41**(095703): 1~9