

文章编号 1004-924X(2009)08-1819-06

## 氩气 Z 箍缩内爆等离子体温度诊断

施 军<sup>1</sup>, 肖沙里<sup>1</sup>, 王洪建<sup>1</sup>, 黄显宾<sup>2</sup>, 杨礼兵<sup>2</sup>, 蔡红春<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030;

2. 中国工程物理研究院 流体物理研究中心, 四川绵阳 621900)

**摘要:** 为了诊断 Z 箍缩等离子体电子温度, 研究了氩的双电子伴线与类氦共振线的强度比和等离子体电子温度的关系。利用椭圆弯曲晶体谱仪在“阳”加速器上探测 X 射线光谱, 采用 X 射线胶片接收信号。针对谱仪获取的氩的类氦谱线及类锂伴线, 计算了伴线  $k$  与共振线  $\omega$  的强度比以及伴线  $j$  与禁戒谱线  $z$  之和与共振线强度比, 利用伴线与共振线强度比值和等离子体电子温度的关系诊断出电子温度为 960~1 060 keV, 实验结果证明谱线强度比值法是一种探测电子温度很有效的诊断方法。

**关键词:** Z 箍缩; X 射线光谱; 等离子体; 电子温度

**中图分类号:** O434.13; TL65 **文献标识码:** A

## Argon-puff Z-pinch implosion plasma temperature diagnosis

SHI Jun<sup>1</sup>, XIAO Sha-li<sup>1</sup>, WANG Hong-jian<sup>1</sup>, HUANG Xian-bin<sup>2</sup>, YANG Li-bing<sup>2</sup>, CAI Hong-chun<sup>2</sup>

(1. *Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of the*

*Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China;*

*2. Institute of Fluid Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)*

**Abstract:** To diagnose the electron temperature of a Z-pinch plasma, the ratio between the dielectronic recombination satellite line for argon to the  $\omega$ -resonance line for lithium-like as a function of the plasma temperature is analyzed. The spectral emission pattern of helium-like argon together with the associated satellite line from lithium-like argon have been measured with an X-ray elliptical curved crystal spectrometer on a Yang accelerator. The spectrum of argon-puff Z-pinch plasma is described by a curved mica crystal analyzer and the helium-like resonance line  $\omega$ , satellites  $j$ ,  $k$ ,  $q$ , magnetic quadrupole  $M_2$  line, intercombination line  $y$ , forbidden line  $z$  and the cold  $K_\alpha$  line of argon are recorded with an X-ray film. Then, the line ratios between the dielectronic recombination satellites ( $j+z$ ,  $k$ ) to the  $\omega$ -resonance line are calculated, obtained results show that the electron-temperatures of the plasma are 960~1 060 keV. The theoretical models are in agreement with the experimental results well, which supports the conclusion that proposed method can be used in a temperature diagnostic method for plasma.

**Key words:** Z-pinch; X-ray spectrum; plasma; electron temperature

收稿日期: 2008-07-08; 修订日期: 2008-11-04.

基金项目: 国家自然科学基金 NSAF 联合基金资助项目 (No. 10576041)

## 1 引言

等离子体的电子温度、电子密度和平均离化度等特征状态参数对于深入理解惯性约束聚变中的能量耦合和不稳定性增长等物理过程具有重要意义, X 射线光谱学诊断为获得这些特征参数提供了一种重要途径<sup>[1-4]</sup>。与一般的激光光学成像及 Thomson 散射等光学探针方法相比, X 射线光谱学诊断方法可以获得更高密度区的等离子体状态参数<sup>[5-7]</sup>, 并且由于采用等离子体自身发射的 X 射线作为诊断工具, 可以避免对等离子体产生干扰, 同时诊断结果更精确。Z 箍缩内爆实验形成高温等离子体, 辐射出大量类 H 及类 He 离子 X 射线, 包括共振线及其伴线, 伴线强度与等离子体电子温度密切相关, 故可用伴线与共振线强度之比来诊断等离子体温度。由于类 He 共振线与伴线均来自于相同的初始态  $1s^2\ ^1S_0$ , 可以减弱等离子体非等温性造成的影响, 同时两条谱线波长很接近, 可使弯晶谱仪的测量误差减至最小。

本文对氩等离子体中的双电子复合过程进行研究, 确定伴线与共振线比值和等离子体电子温度的理论关系。实验采用云母椭圆弯晶谱仪, 检测以氩气为负载的 Z 箍缩内爆实验产生的 X 射线光谱, 利用 X 射线胶片接收到氩的 L 层至 K 层跃迁辐射的类 He 谱线及伴线。测量得到了氩气 Z 箍缩等离子体辐射 X 射线能谱强度分布, 依据伴线  $k(1s2p^{22}D_{3/2} - 1s^22p^2P_{1/2})$  与共振线  $w(1s2p^1P_1 - 1s^2\ ^1S_0)$  强度比以及伴线  $j(1s2p^{22}D_{5/2} - 1s^22p^2P_{3/2})$  与禁戒谱线  $z(1s2p^3S_1 - 1s^2\ ^1S_0)$  之和与  $w$  线强度比和温度的变化关系来确定等离子体电子温度。

## 2 理论分析

离子跃迁几率, 包括从类 Li、类 He 至类 H 离子, 以及直接电离、碰撞电离和辐射复合率系数都可以用下式表示<sup>[8]</sup>,

$$\frac{dn_j}{dt} = \sum_i n_i X_{i \rightarrow j} - n_j \sum_i X_{j \rightarrow i}, \quad (1)$$

上式中  $n_j$  是  $j$  态能级布居数,  $X_{i \rightarrow j}$  是从  $i$  态至  $j$  态的跃迁几率。在一定稳态条件下, 每一电离化过程的转换, 如双电子复合, 三体复合等都能够探

测到, 甚至碰撞电离至  $Ar^{18+}$  裸核及其辐射复合也包含在内。从 Ar 的裸核至类 Li 这 4 种离子的相对布居及每种离子的各能级布居数都可以在稳态条件下得到。在一特定密度、温度及跃迁波长  $\lambda_0$  条件下, 类 He 及 Li 离子碰撞激发线辐射量  $\epsilon_{ij}$  由下式给出,

$$\epsilon_{ij}(\lambda_0) = n_i A_{ij}, \quad (2)$$

这里  $n_i$  是上能级布居数,  $A_{ij}$  是从  $i$  态至  $j$  态的辐射跃迁几率, 可以据此计算 Ar 的类 Li 伴线与类 He 共振线的谱线强度比。

来自于  $j$  态由电子碰撞激发产生的  $q$  电荷粒子发射率可用下式表示,

$$\epsilon_{IE} = n_e n_q C(T_e) \beta_{j,f}, \quad (3)$$

上式中  $n_e$  及  $n_q$  为电子、粒子密度,  $C(T_e)$  为碰撞激发率系数,  $\beta_{j,f}$  是上层能级跃迁辐射分支比,

$$\beta_{j,f} = \frac{A_{j,f}^{\text{rad}}}{\sum_i A_{j,i}^{\text{auto}} + \sum_f A_{j,f}^{\text{rad}}}, \quad (4)$$

上式中分母第一项表示通过自离化从  $j$  态至可达到更高能级的所有  $i$  态辐射跃迁几率之和, 第二项则表示通过辐射从  $j$  态至可达到的更低能级的所有  $f$  态辐射跃迁几率之和。

由双电子复合激发产生的类 Li 伴线发射率由下式表示

$$\epsilon_{\text{DR}} = n_e n_{16+} F_1(T_e) F_1(j, f), \quad (5)$$

其中  $F_1(T_e)$  只与温度有关, 表达式如下

$$F_1(T_e) = \frac{1}{2} \left( \frac{4\pi a_0^2 R}{T_e} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{\Delta E_{i,j}}{T_e}\right), \quad (6)$$

这里  $a_0$  为 Bohr 半径,  $R$  为 Rydberg 能量常数,  $\Delta E_{i,j}$  为自由电子俘获能。

$F_2(T_e)$  只与伴线有关, 表达式如下

$$F_2(j, f) = \frac{g_j}{g_i} A_{j,i}^{\text{auto}} \beta_{j,f}, \quad (7)$$

上式中  $g_i$  为基态统计权重,  $g_j$  为上能级  $j$  态统计权重,  $A_{j,i}^{\text{auto}}$  是从  $j$  态到  $i$  态的自电离率。

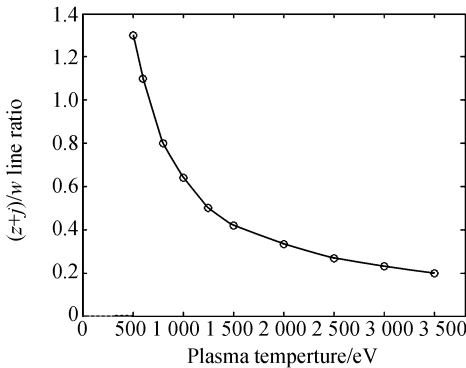
因此, 利用(3)式与(5)式的比值, 即来自于类 He 基态  $^1S_2$  激发产生的双电子伴线与类 He 共振线( $w$ )的比值可诊断等离子体电子温度

$$\frac{\epsilon_{\text{DR}}^j}{\epsilon_{IE}^w} = \frac{F_1(T_e) F_2(j, f)}{C_w(T_e)}. \quad (8)$$

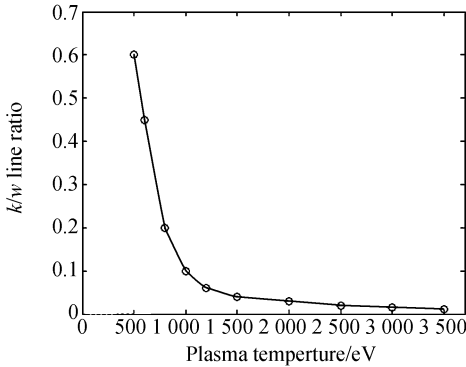
在这里共振线的分支比可假定为 1, 式(8)比值不依赖于类 He 及 Li 离子电离平衡, 同时与电子密度无关, 只与电子温度相关。

根据上面的探讨及参考文献[9-11]可以得到

Ar 的双电子伴线与共振线强度比和电子温度的关系,见图 1。由于 Ar 的  $z$  线与  $j$  线波长差别很小,低于 0.001 nm,谱线难以分辨开,故在图 1(a) 中将两线合并处理。



(a)  $(j+z)/w$  line ratio



(b)  $k/w$  line ratio

图 1 伴线与共振线强度比与等离子体温度的关系

Fig. 1 Line ratios of dielectronic satellites to  $w$ -resonance line of argon as function of the plasma temperature

## 3 实 验

### 3.1 实验设置

Z 箍缩等离子体诊断实验在中国工程物理研究院“阳”脉冲功率加速器上进行,实验方法及过程在参考文献[12]中有详细描述。“阳”加速器产生的负载电流峰值约为 520 kA,上升时间(10%~90%)约 80 ns,真空度不低于  $1.2 \times 10^{-2}$  Pa。实验采用椭圆弯晶谱仪探测 X 射线光谱<sup>[13-14]</sup>,该谱仪安装在“阳”加速器垂直上方(见图 2),靶点位于椭圆弯晶椭圆的第一个焦点位置,距离弯晶分析器约 1.35 m。X 射线经弯晶聚焦后在 X 射

线胶片上成像,胶片盒设计成以弯晶椭圆的第二个焦点为圆心,半径为 50 mm 的半圆形,以满足等光程的条件。氩的类 He 谱线波长主要在 0.39~0.4 nm 范围,弯晶谱仪实验针对该范围谱线进行探测,谱线波长  $\lambda$  取中间值 0.395 nm。晶体分析器材料为云母,其晶格常数  $2d$  值为 1.984 nm。晶体布拉格衍射定律为

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad (9)$$

上式中  $\lambda$  为 X 射线波长; $d$  为晶面间距; $n$  为衍射阶次; $\theta$  为布拉格衍射角,即入射 X 射线与晶体反射面之间的夹角。根据式(9)计算出布拉格角  $\theta = 36.7^\circ$  ( $n$  取 3),而弯晶谱仪的椭圆分析器包含的布拉格角为  $30 \sim 60^\circ$ <sup>[15]</sup>,能够满足本次探测实验布拉格衍射角度要求。



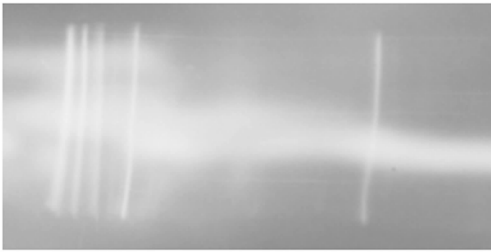
图 2 晶体谱仪在阳加速器上的配置图

Fig. 2 Spectrometer system on Yang accelerator target chamber

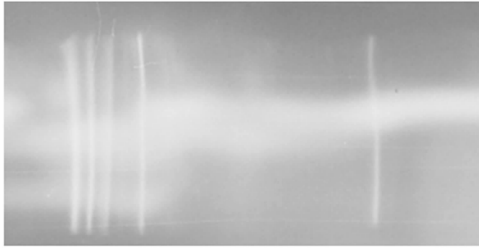
### 3.2 实验结果分析

氩气 Z 箍缩内爆实验共进行了两发次,负载电流分别为 542、523 kA。获取的谱线如图 3 所示,X 射线胶片上的类氩共振线  $w$ 、磁四级  $M_2$  跃迁( $1s2p^3 P_2 - 1s^2^1 S_0$ ) $x$  线、互组合跃迁( $1s2p^3 P_1 - 1s^2^1 S_0$ ) $y$  线、禁戒谱线  $z$  线以及  $K_\alpha$  线的光谱很清晰,而伴线则不太明显,需要用软件对图像进行处理后才可分辨。

利用 WinView32 软件对图 3 的谱图进行数据处理,然后用一自编的 MATLAB 程序对谱线波长进行校准,得到谱线波长与强度之间的关系(见图 4),图中标出了部分氩的类 He 谱线及类 Li 双电子伴线,各谱线对应波长数据及跃迁状态见表 1:



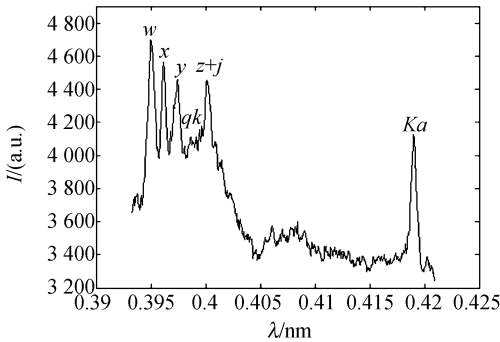
(a) shot 1



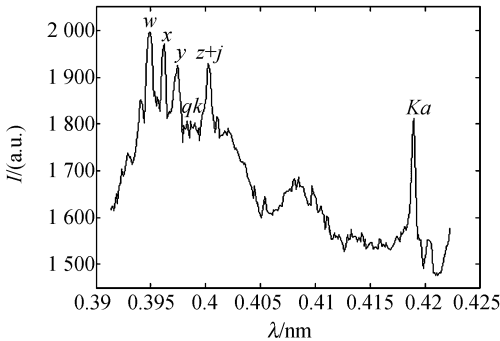
(b) shot 2

图 3 激发氩气获取的光谱

Fig. 3 Spectra of argon target ions



(a) shot 1



(b) shot 2

图 4 云母晶体获取的谱线强度分布图

Fig. 4 Spectrum intensity of curved mica crystal

表 1 氩的类 He 及类 Li 双电子伴线波长数据及跃迁状态

Tab. 1 Dielectronic satellite transitions and wavelengths for He-like and Li-like of Ar

label	transition	$\lambda$ (nm)
w	$1s2p^1P_1-1s^2S_0$	0.394 9
x	$1s2p^3P_2-1s^2S_0$	0.396 6
y	$1s2p^3P_1-1s^2S_0$	0.397 0
z	$1s2p^3S_1-1s^2S_0$	0.399 4
q	$1s2s2p^2P_{3/2}-1s^22s^1S_{1/2}$	0.398 0
k	$1s2p^2D_{3/2}-1s^22p^2P_{1/2}$	0.398 9
j	$1s2p^2D_{5/2}-1s^22p^2P_{3/2}$	0.399 3

### 3.3 温度诊断

依据图 4 能够得到氩的双电子伴线与类 He 共振线强度比,利用该比值对照图 1 诊断出氩气 Z 箍缩等离子体电子温度。谱线强度比及对应电子温度数据见表 2:

表 2 氩的类 Li 伴线与类 He 共振线强度比及对应等离子体温度

Tab. 2 Line ratios between  $k, j+z$  satellites and  $w$ -resonance and plasma temperatures

Shot	Load current (kA)	Line ratio	Data of line ratio	Temperature (eV)
1	542	$k/w$	0.09	1 060
		$(z+j)/w$	0.59	990
2	523	$k/w$	0.095	1040
		$(z+j)/w$	0.63	960

根据两种诊断方法,即伴线  $k$  与类 He 共振线强度比,禁戒谱线  $z$  与伴线  $j$  强度之和与共振线强度比诊断 Z 箍缩等离子体电子温度,实验结果有一定差别 (70~80 eV)。因为伴线  $j$  与禁戒谱线  $z$  强度之和与共振线  $w$  强度接近,对应的温度曲线斜率较大,而伴线  $k$  相对于共振线强度太弱,容易受高能带信号干扰,从图 3 的光谱图样中可以发现,伴线光谱不明显,而且谱线强度比对应的温度曲线斜率相对较小,故伴线与禁戒谱线  $z$  之和与共振线  $w$  强度比值法精确度更高。实验共进行了两发次,发次之间等离子体电子温度测试结果差别不大 (20~30 eV),而且负载电流越大,电子温度相应越高,表明伴线与共振线强度比值法诊断结论与实验结果相符合。

## 4 结 论

研究了氩的双电子伴线与共振线强度比和等离子体电子温度理论关系,在“阳”加速器上进行了氩气 Z 箍缩内爆实验,对 Z 箍缩过程中产生的热点辐射高能量的 X 射线,采用椭圆弯晶谱仪获取了氩的类 He 谱线及类 Li 伴线信息,利用辅

助软件得到伴线与共振线的强度比,对照伴线与共振线强度比和电子温度关系测得等离子体电子温度为 960~1 060 eV。两种方法测试得到的数值比较接近,证明伴线与共振线强度比值法是诊断等离子体电子温度的有效途径,可以为进一步研究 Z 箍缩及激光聚变等离子体状态提供极大的帮助。

### 参考文献:

- [1] KIM J H, YOU S J, SEONG D J, *et al.*. Electron temperature measurements in plasmas with surface wave absorption and wave cutoff frequency[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91 (20): 201502-1-201502-3.
- [2] SNYDER S C, REYNOLDS L D, FINCKE J R, *et al.*. Electron-temperature and electron-density profiles in an atmospheric-pressure argon plasma jet [J]. *Physical Review E*, 1994, 50(1): 519-525.
- [3] GLENZER S H, FOURNIER K B, DECKER C, *et al.*. Accuracy of K-shell spectra modeling in high-density plasmas[J]. *Physical Review E*, 2000, 62 (2): 2728-2738.
- [4] KALLNE E, KALLNE J, PRADHAN A K. X-ray line intensities for ions of the helium isoelectronic sequence in high-temperature plasmas[J]. *Physical Review A*, 1983, 28(1): 467-470.
- [5] GREGORI G, SCHEIN J, SCHWENDINGER P, *et al.*. Thomson scattering measurements in atmospheric plasma jets[J]. *Physical Review E*, 1999, 59 (2): 2286-2291.
- [6] SHIGA N, ANDEREGG F, DUBIN D H E, *et al.*. Thermally excited fluctuations as a pure electron plasma temperature diagnostic[J]. *Physics of Plasmas*, 2006, 13(2): 022109-1-022109-12.
- [7] BAILEY J E, ROCHAU G A, IGLESIAS C A, *et al.*. Iron-plasma transmission measurements at temperatures above 150 eV[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(26): 265002-1-265002-4.
- [8] BIEDERMANN C, RADTKE R, FOURNIER K B. Spectroscopy of heliumlike argon resonance and satellite lines for plasma temperature diagnostics [J]. *Physical Review E*, 2002, 66 (6): 066404-1-066404-9.
- [9] SAVIN D W, BEIERSDORFER P, KAHN S M, *et al.*. Simulating a Maxwellian plasma using an electron beam ion trap[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(9): 3362-3372.
- [10] BOMBARDA F, BELY-DUBAU F, FAUCHER P, *et al.*. Dielectronic satellite spectrum of heliumlike argon: a contribution to the physics of highly charged ions and plasma impurity transport [J]. *Physical Review E*, 1985, 32 (4): 2374-2383.
- [11] BOMBARDA F, GIANNELLA R, KALLNE E, *et al.*. Observations and comparisons with theory of the heliumlike and hydrogenlike resonance lines and satellites of nickel from the JET tokamak[J]. *Physical Review A*, 1988, 37(2): 504-522.
- [12] 施军,肖沙里,王洪建,等. 用云母弯晶谱仪探测 Z 箍缩等离子体 X 射线光谱[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(6): 969-972.  
SHI J, XIAO SH L, WANG H J, *et al.*. Diagnosis of X-ray spectrum of Z-pinch plasma with mica curved crystal spectrometer [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20 (6): 969-972. (in Chinese)
- [13] 熊先才,钟先信,肖沙里,等. 双通道椭圆弯晶谱仪的传递效率分析[J]. *光学精密工程*, 2002, 10 (6): 592-596.  
XIONG X C, ZHONG X X, XIAO SH L, *et al.*. Analysis of the transmission efficiency of a two-channel elliptical crystal spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10 (6): 592-596. (in Chinese)
- [14] XIONG X C, ZHONG X X, XIAO SH L, *et al.*. Elliptically bent crystal spectrometer for measuring laser-produced plasma x-ray [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14 (5): 754-758.
- [15] 肖沙里,施军,雷小明,等. 氟化锂椭圆弯晶分析器的特性及应用[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(6): 824-828.

XIAO SH L, SHI J, LEI X M, *et al.*. Characteristic and application of elliptical curved LiF crystal

analyzer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 824-828. (in Chinese)

#### 作者简介:



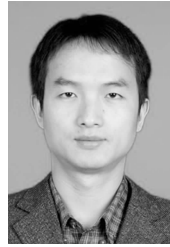
**施 军**(1972—),男,四川广安人,重庆大学光电工程学院博士研究生,主要从事光学工程及 X 射线光谱学研究。E-mail: gysj\_ctbu@ctbu.edu.cn



**杨礼兵**(1968—),男,湖南娄底人,中国工程物理研究院流体物理研究所硕士,副研究员,主要从事电磁内爆技术和 Z 箍缩物理研究。E-mail: ifp1081@caep.ac.cn



**王洪建**(1976),男,重庆市人,重庆大学光电工程学院博士研究生,主要从事信息获取与处理、光电检测方面的研究。E-mail: whj\_001234@163.com



**蔡红春**(1973—),男,湖北武汉人,中国工程物理研究院流体物理研究所博士,主要从事 Z 箍缩理论及实验研究。E-mail: caihc@list.ru



**黄显宾**(1977—),男,四川富顺人,中国工程物理研究院流体物理研究所硕士,主要从事 Z 箍缩等离子体理论及实验研究。E-mail: caephxb2003@yahoo.com.cn



#### 导师简介:

**肖沙里**(1953—),男,重庆人,重庆大学光电工程学院工学博士,教授,博士生导师,主要从事光学精密仪器测试及控制的研究。E-mail: xiaoshali@cqu.edu.cn

#### ● 下期预告

## 人眼波前像差测量中的照明系统设计

张培茗<sup>1</sup>, 陈家璧<sup>1</sup>, 杨 雪<sup>1</sup>, 谢海明<sup>2</sup>

(1. 上海理工大学 光学与电子信息工程学院, 上海 200093;

2. 上海理工大学 医学光学与视光学研究所, 上海 200093)

为了解决人眼像差测量中细平行光照明测量大像差人眼时精度下降的问题,设计并实现一种自动的可调照明系统。照明光路中加入了一个位置可以自动调整的准直透镜,调整这个透镜的位置可以准确地改变照明光的屈光度,精密电控平移台可以对准直透镜的位置进行快速准确扫描定位。实验中对模拟眼像差进行了测量,分别用细平行光照明和自动可调照明系统的实验结果进行了对比。使用自动可调照明使传感器获得图像的峰值信噪比由 5.72 dB 提高到 19.89 dB,对  $-5 \text{ m}^{-1}$  模拟眼测量的结果也由  $(-4.285 \pm 0.208) \text{ m}^{-1}$  提高到  $(-5.041 \pm 0.157) \text{ m}^{-1}$ 。使用自动可调照明系统提高了 Hartmann-Shack 传感器图像的信噪比,使测量结果更加准确。