

文章编号 1004-924X(2011)08-1743-07

## 全反射式无焦 ZH 系统的装调

何红星\*, 赵劲松, 潘顺臣

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘要:**介绍了一种新颖的共轴全反射式无焦光学系统—ZH 系统的装调技术。该系统由两块相对放置的抛物面反射镜和一块 45° 放置的双面反射镜组成, 其两抛物面反射镜可分别从两端安装, 从而使双向平面反射镜易于装配。对 ZH 系统进行了误差分析和装调分析, 讨论了元件位置失调带来的系统像差的变化, 给出了 ZH 系统的误差分析结果。由于光线经过 ZH 系统和分束镜后, 光轴在水平方向和垂直方向有平移, 平移后的出射光轴与入射光轴的平行需要精确的装调技术来保证。给出了 ZH 系统的装调方法, 采用可见光平行光管进行辅助装调, 采用水平偏移补偿镜和垂直偏移补偿镜对 ZH 系统出射光轴的偏移量进行补偿, 利用测微组件和测微目镜对装调中平晶、反射镜的调节量进行测量, 实现了 ZH 系统出射光轴与入射光轴的同轴。装调完成后, 去掉水平偏移补偿镜和垂直偏移补偿镜, 实现了 ZH 系统光轴的空间平行。

**关键词:**光学系统; 全反射无焦 ZH 系统; 装调; 光轴同轴

**中图分类号:** TN216 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111908.1743

## Optical alignment of all-reflective afocal ZH optical system

HE Hong-xing\*, ZHAO Jin-song, PAN Shun-chen

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

\* Corresponding author, E-mail: hxhe2000@163.com

**Abstract:** A co-axis and all-reflective afocal ZH optical system and its alignment method were introduced. The ZH optical system consists of a first paraboloid, a mirror with two operational faces and a 45° angle and a second paraboloid. The two paraboloids were installed from every end of the mirror, and the mirror with two operational faces was mounted easily. The tolerance and assembly of the ZH optical system were computed and analyzed, the effect of the position misadjustment of the element on the system was discussed, and the error analysis results were given. As there is an offset distance between the incidence optical axis and the shoot optical axis when the light propagates through the ZH system, a precision assembly method was proposed to ensure the parallel of the incidence optical axis and the shoot optical axis. In experiments, a visible collimator tube was used to align the ZH optical system, and the horizontal and vertical parallel offset lenses were taken to compensate the offsets. Moreover, a micro-displacement measuring module and a micrometer eyepiece were used to measure the adjusting size of the system. By the proposed method, the ZH system completes the co-axis of the incidence optical axis and the shoot optical axis. The parallel offset lenses were taken out after ZH optical

收稿日期: 2011-03-01; 修订日期: 2011-03-21.

基金项目: 总装备部重点基金资助项目 (No. 6140527)

was assembled, and the system can realize the space parallel of the optical axes.

**Key words:** optical system; all-reflective afocal ZH optical system; alignment; common optical axis

## 1 引言

双色偏振红外成像技术是双波段成像技术和偏振成像技术的结合,它实现了双波段成像和偏振成像优势互补,是一种新型的被动式红外成像技术,不仅能获得景物双波段的图像,还能获得景物两个波段的偏振附加信息,从而更大幅度地提高热像仪整机系统的性能。但双色偏振红外成像技术需要精确而又实用的双色偏振红外成像光学系统,且要求系统外形尺寸小、质量轻、体积小,能实现双波段共口径成像。

全反射式光学系统具有如下优势:(1)镜面反射率比透射率高,光能损失少;(2)反射镜不产生色差,无波长选择性,工作波段宽,共口径容易;(3)经光路折叠系统紧凑,容易实现扁平化、轻量化。因此,本文采用全反射式光学系统来实现中波红外/短波红外双波段共口径成像,并为此设计了一个新型的共轴全反射无焦系统——ZH 系统<sup>[1-2]</sup>。该系统的 3 块反射镜组成“Z”字形(或光线路径组成“Z”字形),入射轴上光线束、出射轴上光线束与主次镜光轴组成“H”形,故称作 ZH 系统。光线经过 ZH 系统和分束镜(分离中波红外和短波红外)后,光轴在水平方向和垂直方向有平移,相对于常用的光学系统,这种光轴在立体空间的平移不易装调,需要专门研究。

## 2 ZH 系统原理

ZH 系统在整机中的位置及原理如图 1 所示,其主镜与次镜是抛物面反射镜,它们共焦点,主镜与次镜的公共焦面位置有一个 45°放置的双面反射镜。整个中波/短波双色偏振红外成像光学系统包括中波红外光学系统和短波红外光学系统两支光路,两光路共用 ZH 系统作为前端望远接收部分来实现双波段共口径。

ZH 系统等效于一个开普勒望远系统,其详细设计见参考文献[1-4],ZH 系统的设计结果如表 1 所示。

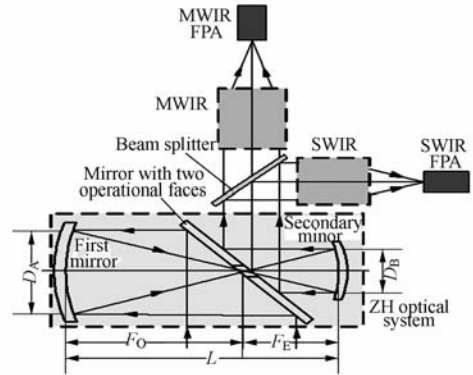


图 1 中波红外/短波红外成像系统

Fig. 1 MWIR/SWIR imaging optical system

表 1 ZH 系统数据

Tab. 1 ZH optical system data

Surf	Radius/mm	Thickness/mm	Glass	Conic
OBJ	Infinity	Infinity		
1	Infinity	100		
2	Infinity	-236	Mirror	0
STO	480	236	Mirror	-1
4	—	4		
5	Infinity	60		
6	—	60		
7	-120	-60	Mirror	-1
8	Infinity	70	Mirror	0
IMA	Infinity			

## 3 ZH 系统装调

### 3.1 ZH 系统特点

ZH 系统的特点是主次镜相对放置,主镜与次镜共焦点,一个 45°放置的双面反射镜放置在主镜与次镜的公共焦面位置。ZH 系统装调的难点包括:两抛物面反射镜共焦点;两抛物面反射镜、双向平面反射镜共轴;双向平面反射镜的通孔位于两抛物面反射镜的公共焦面上。

根据 ZH 系统设计结果,光线经过 ZH 系统后,光轴在水平方向(X 方向)有平移(如图 2),即入射到双面反射镜主反射面的主光线与双面反射镜次反射面出射的主光线之间在 X 方向有平移,

经过双面反射镜后的平移量:

$$\Delta X = \frac{t}{\sin 45^\circ} = 5.66 \text{ mm}, \quad (1)$$

$t$  为双面反射镜的厚度,  $t=4 \text{ mm}$ 。

经过分束镜的入射光线与出射光线之间在垂直方向( $Y$  方向)有平移,光轴经过分束镜后的平移量:

$$\Delta Y = \frac{t_{\text{beam}} \cdot \sin[45^\circ - \arcsin(\frac{\sin 45^\circ}{n})]}{\cos[\arcsin(\frac{\sin 45^\circ}{n})]} = 2.96 \text{ mm}, \quad (2)$$

式中  $t_{\text{beam}}=5.94 \text{ mm}$  为分束镜的厚度,  $n=1.425$  为分束镜材料的折射率。

要实现 ZH 系统两抛物面反射镜共焦点,两抛物面反射镜、双向平面反射镜共轴,双向平面反射镜的通孔位于两抛物面反射镜的公共焦面位置,平移后的出射光轴与入射光轴的空间平行,需要精确的装调技术来保证<sup>[5-9]</sup>。

### 3.2 ZH 系统装调分析

依据参考文献[10],同时由于双面反射镜不会引入像差,ZH 系统的初级像差可表示如下:

$$\text{球差 } A = \left( \frac{1-\Omega_1}{2d_1} \right) (\Delta\delta_1 - \Omega_1 \Delta\delta_2), \quad (3)$$

$$\text{彗差 } B = At_1 - \frac{(1-\Omega_1)^3}{8d_1^2} \Delta\delta_2, \quad (4)$$

$$\text{像散 } C = -2At_1 \left( t_1 + \frac{d_1}{\Omega_1} \right) + 2B \left( 2t_1 + \frac{d_1}{\Omega_1} \right), \quad (5)$$

$$\text{场曲 } D = \frac{1}{2}C + \frac{(1-\Omega_1)^2}{2d_1\Omega_1}, \quad (6)$$

$$\text{畸变 } E = At_1^2 \left( t_1 + \frac{d_1}{\Omega_1} \right) - Bt_1 \left( 3t_1 + 2 \frac{d_1}{\Omega_1} \right) +$$

$$C \left( t_1 + \frac{d_1}{2\Omega_1} \right) + Dt_1 - \frac{1-\Omega_1}{4\Omega_1} (1+3\Omega_1), \quad (7)$$

其中  $\Delta\delta_1 = \delta_1 + \epsilon_1^2$ ;  $\epsilon_1 = (v_1' - v_1)/(v_1' + v_1)$ ;  $v_1 = 1/s_1$ ;  $v_1' = 1/s_1'$ ;  $\Delta\delta_2 = \delta_2 + \epsilon_2^2$ ;  $\epsilon_2 = (v_2' - v_2)/(v_2' + v_2)$ ;  $v_2 = 1/s_2$ ;  $v_2' = 1/s_2'$ 。

式中  $\delta_1 = -1$  为主镜形状参数,  $s_1$  为主镜物距,  $s_1'$  为主镜像距,  $\delta_2 = -1$  为次镜形状参数,  $s_2$  为次镜物距,  $s_2'$  为次镜像距,  $d_1$  为主次镜间距,  $\Omega_1$  为次镜与主镜的焦比,  $t_1$  为入瞳距离。

ZH 系统元件的失调主要表现为倾斜、偏心

和间距变化,其像差需要后续模块补偿,在装调过程中,整个光学系统的高级像差不变,由 5 种单色像差表达式分析,像差与两镜焦比  $\Omega_1$ 、面形  $\delta_1$  和  $\delta_2$ 、间距  $d_1$  和入瞳距离  $t_1$  紧密相关,焦比和入瞳距离随系统的确定已固定。由式(3)至式(7)对  $\delta_1$  取偏导数得:

$$\frac{\partial A}{\partial \delta_1} = \frac{1-\Omega_1}{2d_1}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial B}{\partial \delta_1} = \frac{1-\Omega_1}{2d_1} t_1, \quad (9)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \delta_1} = \frac{1-\Omega_1}{d_1} t_1^2, \quad (10)$$

$$\frac{\partial D}{\partial \delta_1} = \frac{1-\Omega_1}{2d_1} t_1^2, \quad (11)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \delta_1} = \frac{1-\Omega_1}{2d_1} t_1^3. \quad (12)$$

倾斜和偏心等效于面形  $\delta_1$  或  $\delta_2$  变化,由式(8)至式(12)可知,倾斜和偏心会导致 5 种单色像差的变化。由式(3)至式(7)对  $d_1$  取偏导数得:

$$\frac{\partial A}{\partial d_1} = \left( -\frac{1-\Omega_1}{2d_1^2} \right) (\Delta\delta_1 - \Omega_1 \Delta\delta_2), \quad (13)$$

$$\frac{\partial B}{\partial d_1} = -\frac{(1-\Omega_1)^3}{16d_1^3} \Delta\delta_2, \quad (14)$$

$$\frac{\partial C}{\partial d_1} = -\frac{2(At_1 - B)}{\Omega_1}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial D}{\partial d_1} = -\frac{(1-\Omega_1)^2}{2d_1^2 \Omega_1}, \quad (16)$$

$$\frac{\partial E}{\partial d_1} = \frac{At_1^2 - 4Bt_1 + C}{2\Omega_1}, \quad (17)$$

由式(13)至式(17)可知,间距变化将带来 5 种单色像差的变化。

为保证两镜间距、倾斜与偏心在一定的误差范围之内,下面采用误差分析法来确定两镜间距、倾斜与偏心的失调范围。

在整机光学系统中,假定除 ZH 系统外其余光学模块装调达到设计要求,利用 ZEMAX 的误差分析功能对 ZH 系统进行误差分析,采用 MTF、波前误差和点列图对元件的倾斜、偏心 and 间距等失调变化进行评价得到最坏的结果如表 2、表 3 和表 4。

表 2 MTF 评价结果

Tab. 2 Results of MTF merits

Type	Surf	Value/mm	Criteria	Change
TEDY	3 3	-0.70	0.398 351	-0.146 404
TEDY	7 7	0.70	0.404 126	-0.140 628
TTHI	7 8	-0.30	0.405 214	-0.139540
TTHI	7 8	0.30	0.405 214	-0.139540
TEDX	3 3	0.70	0.407 444	-0.137 310
TEDX	3 3	-0.70	0.407 444	-0.137 310
TEDX	7 7	-0.70	0.412 259	-0.132 496
TEDX	7 7	0.70	0.412 259	-0.132 496
TEDY	3 3	0.70	0.416 753	-0.128 002
TEDY	7 7	-0.70	0.420 664	-0.124 091

表 3 波前误差评价结果

Tab. 3 Results of wavefront merits

Type	Surf	Value/mm	Criteria	Change
TTHI	7 8	-0.30	0.148 505	0.059 385
TTHI	7 8	0.30	0.148 505	0.059 385
TEDX	7 7	-0.70	0.143 424	0.054 304
TEDX	7 7	0.70	0.143 424	0.054 304
TEDY	7 7	0.70	0.143 021	0.053 901
TEDY	7 7	-0.70	0.141 486	0.052 366
TEDX	3 3	0.70	0.139 645	0.050 526
TEDX	3 3	-0.70	0.139 645	0.050 526
TEDY	3 3	-0.70	0.139 377	0.050 258
TEDY	3 3	0.70	0.137 010	0.047 890

表 4 点列图评价结果

Tab. 4 Results of RMS spot radius merits

Type	Surf	Value/mm	Criteria	Change
TTHI	7 8	-0.30	0.012 303	0.005 970
TTHI	7 8	0.30	0.012 303	0.005 970
TEDY	3 3	-0.70	0.012 284	0.005 950
TEDY	7 7	0.70	0.012 083	0.005 750
TEDX	3 3	-0.70	0.012 021	0.005 687
TEDX	3 3	0.70	0.012 021	0.005 687
TEDX	7 7	0.70	0.011 802	0.005 468
TEDX	7 7	-0.70	0.011 802	0.005 468
TEDY	3 3	0.70	0.011 565	0.005 232
TEDY	7 7	-0.70	0.011 449	0.005 115

由误差分析结果可知,当间距误差为 0.3 mm,偏心误差为 0.7 mm,倾斜误差为  $0.1^\circ$  时,整个光学系统在 33 lp/mm 处边缘视场 MTF 值由 0.43 降低到 0.28,波前误差由 0.15 个波长增大

到 0.21 个波长,点列图半径由  $12 \mu\text{m}$  增大到  $19 \mu\text{m}$ ,这样的误差范围是 ZH 系统光学元件装调可以接受的敏感度范围,因此 ZH 系统光学元件装调的误差范围是间距误差为 0.3 mm,偏心误差为 0.7 mm,倾斜误差为  $0.1^\circ$ 。

装调时采用水平偏移补偿镜和垂直偏移补偿镜补偿轴上主光线在 X、Y 方向的平移,装调原理如图 2,具体装调如图 3,装调完成后去掉水平偏移补偿镜和垂直偏移补偿镜,实现光轴设计的空间平移量。补偿 X 方向的平移时需装水平偏移补偿镜,将水平偏移补偿镜安装校正到与 X 方向成  $45^\circ$  角。补偿 Y 方向的平移时需装替代分束镜和垂直偏移补偿镜,将垂直偏移补偿镜安装校正到与 y 方向成  $45^\circ$ 。

### 3.3 ZH 系统装调方法

采用可见光平行光管进行辅助装调,装调原理如图 2 所示,装调的光路如图 3,装调中平晶、反射镜的调节量采用测微组件测量和测微目镜监测实现,ZH 系统装调方法如下:

调节第二平行光管与第一平行光管光轴一致。

调节壳体支撑平台的高度使入射窗中心高与主平行光管中心高一致,以壳体入射窗的端面为基准面放置一块平晶,调节壳体实现入射光线自准直,固定壳体,取下平晶。

在 ZH 系统出射光路中放置一块平晶,ZH 系统双面反射镜中心有一开孔,先不遮挡该小孔,让光线通过该小孔,调节平晶实现光路自准直,在入射窗中心遮挡双面反射镜中心小孔。

装上主反射镜,用一束激光 A 从主反射镜光轴附近垂直平行光管光轴照射主反射镜,旋转主反射镜,对反射镜的安装台面进行研磨,使反射激光斑点不动或在很小的范围内转动,记下主镜的位置。

取下主反射镜,装上次反射镜,用一束激光从 A 的轴线上照射次反射镜,旋转次反射镜,对次反射镜的安装台面进行研磨,使反射激光斑点不动或在很小的范围内转动,记下次镜的位置。

取下次反射镜,在主反射镜处放置一块平晶,调节双面反射镜,实现入射光线自准直。

在 ZH 系统出射光路的平晶前合适位置装上水平偏移补偿镜,然后安装主、次反射镜,旋转主、次反射镜,调节主次镜和双面反射镜,使入射光线

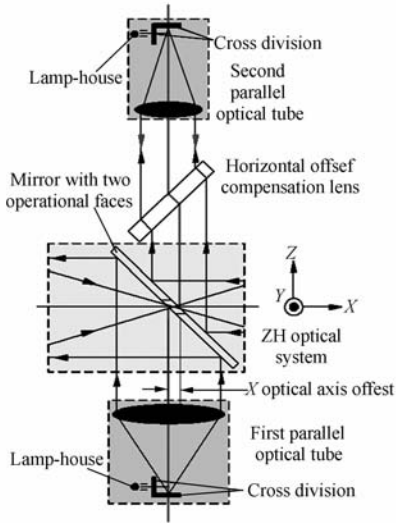


图 2 ZH 系统装调原理图

Fig. 2 Alignment principle of ZH optical system

取下 ZH 系统出射光路的平晶,装上垂直偏移补偿镜和替代分束镜,调节替代分束镜,使第一平行光管的十字分划中心与第二平行光管的十字分划中心重合,用定位销钉确定替代分束镜的位置。

通过第二平行光管目镜观察 ZH 系统出射光束应为平行光,视差小,十字线在第二平行光管的十字分划中心。

装调实现 ZH 系统入射光轴与出射光轴的同轴后,去掉水平偏移补偿镜、垂直偏移补偿镜,使系统光轴实现设计的空间平移量。

### 3.4 ZH 系统装调结果

如图 5 所示为采用上述装调方法完成的 ZH 系统,装调结果实现了 ZH 系统两抛物面反射镜共焦点,两抛物面反射镜、双向平面反射镜共轴,双向平面反射镜第二表面的通孔位于两抛物面反射镜的焦平面上,ZH 系统出射光轴与入射光轴平行。

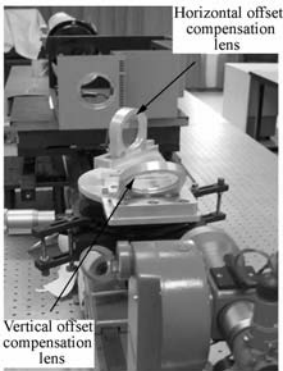


图 3 ZH 系统装调图

Fig. 3 Alignment of ZH optical system

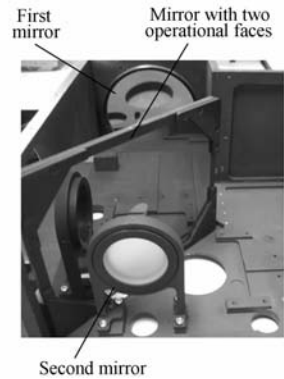


图 5 装配完成的 ZH 系统

Fig. 5 Alignment result of ZH optical system

自准直,调节主次镜间距使焦点重合,平移主次镜保证焦点在双面反射镜次反射面中心(如图 4 所示)。

### 3.5 整机成像演示

在装调的 ZH 系统的基础上装调完成了中波偏振红外成像光学系统,利用中波偏振红外成像

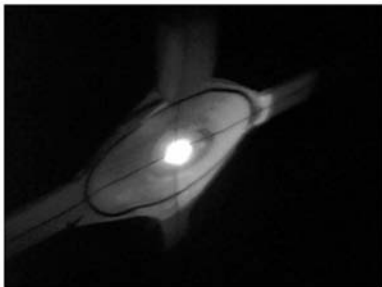


图 4 主次反射镜公共焦点

Fig. 4 Common focal plane of first mirror and second mirror



图 6 整机成像演示

Fig. 6 Image of MWIR optical system

光学系统进行了成像,结果如图 6 所示。从成像演示结果看,图像清晰,成像质量较好,说明提出的 ZH 系统的装调方法是可行的,装调的 ZH 系统能够满足整机的要求。

## 4 结 论

为了满足中波/短波双色偏振红外成像光学

系统双波段共口径、重量轻、体积小等要求,设计了新颖的全反射式同轴无焦 ZH 系统,克服了传统卡氏系统遮拦比大、次反射镜安装困难等缺点。提出了 ZH 系统的装调方法,完成了 ZH 光学系统的装调,实现了 ZH 系统光轴设计的空间平移。装调的 ZH 系统实现了中波/短波双波段共口径成像,为实现双色偏振红外成像奠定了基础。

## 参考文献:

- [1] 何红星,赵劲松,潘顺臣. 共口径中波/短波偏振红外成像光学系统[J]. 光学学报,2009,29(4):932-936.  
HE H X, ZHAO J S, PAN S C. Common aperture optical system for MWIR/SWIR polarization imager [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(4): 932-936. (in Chinese)
- [2] 赵劲松,潘顺臣,何红星. 一种中心遮挡比最小的全反射式光学系统及其应用[P]. 国防专利,2007.  
ZHAO J S, PAN S C, HE H X. *A novel all-reflective optical system with the minimal central obscuration ratio and its applications, national defence patent*[P]. 2007. (in Chinese)
- [3] 潘君骅,李新南. 偏轴两镜系统设计[J]. 光学学报,1994,14(8):867-871.  
PAN J H, LI X N. Design of a tilted two-mirror optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, 14(8): 867-871. (in Chinese)
- [4] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州:苏州大学出版社,2004:10-62.  
PAN J H. *The design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces* [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004:10-62. (in Chinese)
- [5] 杨晓飞,张晓辉,韩昌元. Zemax 软件在离轴三反射镜系统计算机辅助装调中的应用[J]. 光学精密工程,2004,12(3):270-274.  
YANG X F, ZHANG X H, HAN CH Y. Application of zemax software in alignment of three-mirror off-axis aspherical optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(3): 270-274. (in Chinese)
- [6] 张继超,丁亚林,张洪文. 一种四维光学仪器像面的装调方法[J]. 长春理工大学学报,2006,29(4):30-32.  
ZHANG J CH, DING Y L, ZHANG H W. A method of adjustment for four-dimensional optical system [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2006, 29(4): 30-32. (in Chinese)
- [7] BURGE J H. An easy way to relate optical element motion to system pointing stability [J]. *SPIE*, 6288:62880I-1-62880I-12 (2006).
- [8] 刘磊,李景林,吕清涛,等. 大口径反射光学系统装调装置设计研究[J]. 光学精密工程,2005,13(supp.):1191-1196.  
LIU L, LI J L, LV Q T, et al.. Research on adjusting device of large aperture reflective optics system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(supp.): 134-137. (in Chinese)
- [9] 乔健,高云国,韩光宇,等. 水平式两轴转台中库德光路的快速装调[J]. 光学精密工程,2010,18(8):1760-1765.  
QIAO J, GAO Y G, HAN G Y, et al.. Fast alignment of Coude optical system in alt-alt two axis tracking turntable[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1760-1765. (in Chinese)
- [10] KORSCH D. *Reflective Optics* [M]. New York: Academic Press, INC., 1991:152-206.

## 作者简介:



何红星(1977—),男,贵州盘县人,博士研究生,主要从事红外光学技术与光电仪器的研究。E-mail: hxhe2000@163.com



潘顺臣(1949—),男,湖北武汉人,研究员,博士生导师,目前研究方向为光学技术与光电仪器。E-mail: pcs@163.com

## 导师简介:



赵劲松(1972—),男,云南大理人,研究员,目前研究方向为红外光学工程及红外成像系统总体技术。E-mail: zazqj@sohu.com

## ●下期预告

## 球面弯曲晶体在 X 射线背光成像的应用

刘利锋<sup>1</sup>,肖沙里<sup>1</sup>,毋玉芬<sup>1</sup>,钱家渝<sup>1</sup>,韦敏习<sup>2</sup>,陈伯伦<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 激光聚变研究中心,四川 绵阳 621900)

为了研究和诊断惯性约束聚变的聚爆靶等离子体的形状、分布及稳定性情况,利用 X 射线布喇格衍射理论,研制了球面弯曲晶体分析器。其核心器件是石英球面弯晶,弯曲晶体半径为 143.3 mm。在中国工程物理研究院激光聚变研究中心首次利用石英球面弯曲晶体进行了单色 X 射线背光成像实验。采用接收面积 40 mm×30 mm 的磷屏成像板作为接收装置,得到清晰的铬靶单色 X 射线二维背光聚焦图像。通过对所得实验弧矢方向区域谱线的分析,用石英球面弯曲晶体得到 X 射线背光成像的空间分辨率约为 83.3 μm。实验结果表明,该球面弯曲晶体适用于 X 射线的背光诊断研究。