

宽谱段成像光栅光谱仪消偏器的设计

陈 芳 徐彭梅

(北京空间机电研究所, 北京 100086)

摘要 随着宽谱段高分辨率光谱仪在海洋空间遥感领域的广泛应用,其前置消偏器的设计要求越来越高。为满足成像光谱仪的要求,利用矩阵光学的原理,对应用最为广泛的 Lyot 消偏器,从残余偏振度的公式出发,对其与晶体楔角和厚度的关系进行数值分析,结合残余偏振度和光学系统分辨率的要求提出了用于宽谱段光谱仪消偏器参数的设计方法。运用该设计方法对 400~950 nm 宽谱段成像光栅光谱仪消偏器进行设计,在全波段范围内,光谱分辨率为 4 nm 时,对任意偏振态的线偏光,消偏器的出射光的残余偏振度均小于 2%。

关键词 光学设计;消偏器;残余偏振度;宽谱段;成像光谱仪

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0422002

Depolarizer Design for Broadband Imaging Grating Spectrometer

Chen Fang Xu Pengmei

(Beijing Institution of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100086, China)

Abstract With the wide application of broadband imaging spectrometer in the ocean remote sensor, the depolarizer in front of the optical system must satisfy the high requirement. Based on the theory of matrix optics, Lyot depolarizer is introduced. According to the numerical analysis, the relationship between the residual polarization and the angle and thickness of the depolarizer is analyzed in the wide wavelength range. Combined with the residual polarization and resolution requirement of the optical system, a depolarizer used in a broadband imaging spectrometer is designed. With in the wavelength from 400 nm to 950 nm, when the spectral resolution is 4 nm, the residual polarizations of the depolarizer are less than 2% for arbitrary polarization of linear polarized.

Key words optical design; depolarizer; residual polarization degree; broadband; imaging spectrometer

OCIS codes 120.6200; 300.6190; 080.2730

1 引 言

宽谱段成像光栅光谱仪具有谱段宽、光谱分辨率高的特点,广泛应用于海洋目标的遥感探测。由于光栅具有较强的偏振响应,而海水以及海中的悬浮物质的反射光具有明显的偏振特性^[1-2],为了保证成像光谱仪测量的光谱辐射数据的准确性,需在全谱段范围内消去入射光的偏振性。

Lyot 消偏器以其结构简单、性能稳定的特点广泛应用于光纤、光栅光谱仪等对光辐射偏振态要求严格的领域。Lyot 消偏器由两块楔角相同的晶体组合而成,快轴方向互成 45°角,两块晶体厚度之比为 2:1,入射光经过消偏器后,不同孔径处的出射光偏振态不同,使出射光具有各种偏振态,从而达到消偏效果^[3-4]。现有的 Lyot 消偏器设计方法都是针

对准单色光的激光器、窄波段的光源和遥感器,利用相干条件的判据对其进行设计^[5-8],然而对于宽谱段的消偏器,相干条件求解出的晶体参数对某一波长适用,而对其他波长不合适。本文对一宽谱段成像光栅光谱仪进行了消偏器设计,总结了针对宽谱段范围的消偏器的设计方法。

2 消偏器理论分析

消偏器作为成像光栅光谱仪的前置模块,其在成像光栅光谱仪中的位置如图 1(a)所示,常用的 Lyot 消偏器结构如图 1(b)所示。其中,第一块晶体光轴沿着 Y 方向,第二块晶体的光轴与第一块成 45°角,两块晶体的材料相同,第一块晶体的位相延迟为: $\delta_1 = \frac{2\pi\Delta n}{\lambda}(d_1 - y \tan \beta)$,第二块晶体的相位

收稿日期: 2013-09-16; 收到修改稿日期: 2013-11-24

作者简介: 陈 芳(1985—),女,硕士,工程师,主要从事空间遥感器方面的研究。E-mail: happystraw@126.com

延迟为: $\delta_2 = \frac{2\pi\Delta n}{\lambda}(d_2 + y \tan \beta)$, $k = d_2/d_1 = 2$, $\Delta n = n_e - n_o$, n_e 为晶体 e 光的折射率, n_o 为晶体 o 光的折射率, λ 为入射光波长, d_1 为第一块晶体的中心

厚度, d_2 为第二块晶体的中心厚度, β 为晶体的楔角, D 为消偏器的孔径, 消偏器半孔径 $a = D/2$, 晶体厚度 $d = d_1 + d_2$.

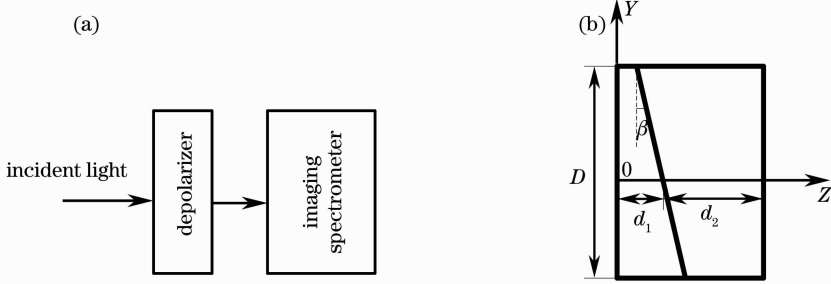


图 1 (a) 光学系统组成图和 (b) Lyot 消偏器结构图

Fig. 1 (a) Diagram of optics system and (b) structure diagram of Lyot depolarizer

根据矩阵光学, Lyot 消偏器的密勒矩阵为^[9]

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta_2 & \sin \delta_1 & \sin \delta_2 \\ 0 & 0 & \cos \delta_1 & \sin \delta_1 \\ 0 & \sin \delta_2 & -\sin \delta_1 \cos \delta_2 & \cos \delta_1 \cos \delta_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

设入射光是振动方向与 X 轴夹角为 φ 的线偏光, 其斯托克斯矩阵 \mathbf{V} 和出射光 \mathbf{I} 为^[9]

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\varphi \\ \sin 2\varphi \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \mathbf{M}\mathbf{V}. \quad (3)$$

在全孔径 D 范围内以及光谱分辨率 $\Delta\lambda$ 范围内对出射光的斯托克斯矩阵进行积分, 可得到出射光表达式为^[7]:

$$I_1 = 2a\Delta\lambda, \quad (4)$$

$$I_2 = 2a \cos 2\varphi \int_{\lambda-\Delta\lambda/2}^{\lambda+\Delta\lambda/2} \cos\left(\frac{2\pi\Delta n}{\lambda}kd_1\right) \text{sinc}\left(\frac{2\Delta n}{\lambda}a \tan \beta\right) d\lambda - a \sin 2\varphi \int_{\lambda-\Delta\lambda/2}^{\lambda+\Delta\lambda/2} \cos\left[\frac{2\pi\Delta n}{\lambda}(d_1 + d_2)\right] d\lambda + a \sin 2\varphi \int_{\lambda-\Delta\lambda/2}^{\lambda+\Delta\lambda/2} \cos\left[\frac{2\pi\Delta n}{\lambda}(d_2 - d_1)\right] \text{sinc}\left(\frac{2\Delta n}{\lambda}2a \tan \beta\right) d\lambda, \quad (5)$$

$$I_3 = 2a \sin 2\varphi \int_{\lambda-\Delta\lambda/2}^{\lambda+\Delta\lambda/2} \cos\left(\frac{2\pi\Delta n}{\lambda}d_1\right) \text{sinc}\left(\frac{2\Delta n}{\lambda}a \tan \beta\right) d\lambda, \quad (6)$$

$$I_4 = 2a \cos 2\varphi \int_{\lambda-\Delta\lambda/2}^{\lambda+\Delta\lambda/2} \sin\left(\frac{2\pi\Delta n}{\lambda}d_2\right) \text{sinc}\left(\frac{2\Delta n}{\lambda}a \tan \beta\right) d\lambda - a \sin 2\varphi \int_{\lambda-\Delta\lambda/2}^{\lambda+\Delta\lambda/2} \sin\left[\frac{2\pi\Delta n}{\lambda}(d_2 + d_1)\right] d\lambda + a \sin 2\varphi \int_{\lambda-\Delta\lambda/2}^{\lambda+\Delta\lambda/2} \sin\left[\frac{2\pi\Delta n}{\lambda}(d_2 - d_1)\right] \text{sinc}\left(\frac{2\Delta n}{\lambda}2a \tan \beta\right) d\lambda. \quad (7)$$

出射光的偏振度为 $P = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2} / I_1$ ，为了使 P 趋近于零，则应使 I_2, I_3, I_4 都趋近于零。针对特定的消偏器，可以通过数值分析的方法对出射光的偏振度进行讨论，得出满足残余偏振度要求的消偏器的设计方法。

3 消偏器的设计分析

由(4)式得到的残余偏振度的表达式无法简单地求出解析解，但是随着计算机科学的进步，可以通过数值分析的方法对其进行分析，通过比较残余偏振度与晶体楔角和厚度的变化关系，推导出晶体楔

角和厚度的设计方法。

宽光谱成像光谱仪的光学系统的孔径为 30 mm， F 数为 2.5，波长范围为 400~950 nm，波长分辨率为 4 nm。由于光学系统孔径较大，其他晶体材料难以做到大孔径，Lyot 消偏器的晶体材料选用石英材料， $k = d_2/d_1 = 2$ 。根据(4)~(7)式分别求得 400、600、800、950 nm 波长下，残余偏振度与晶体厚度 d 和楔角 β 的关系，如图 2 所示。由图 2 可知，残余偏振度随着晶体楔角和晶体厚度增加而振荡衰减，并逐渐趋于稳定。

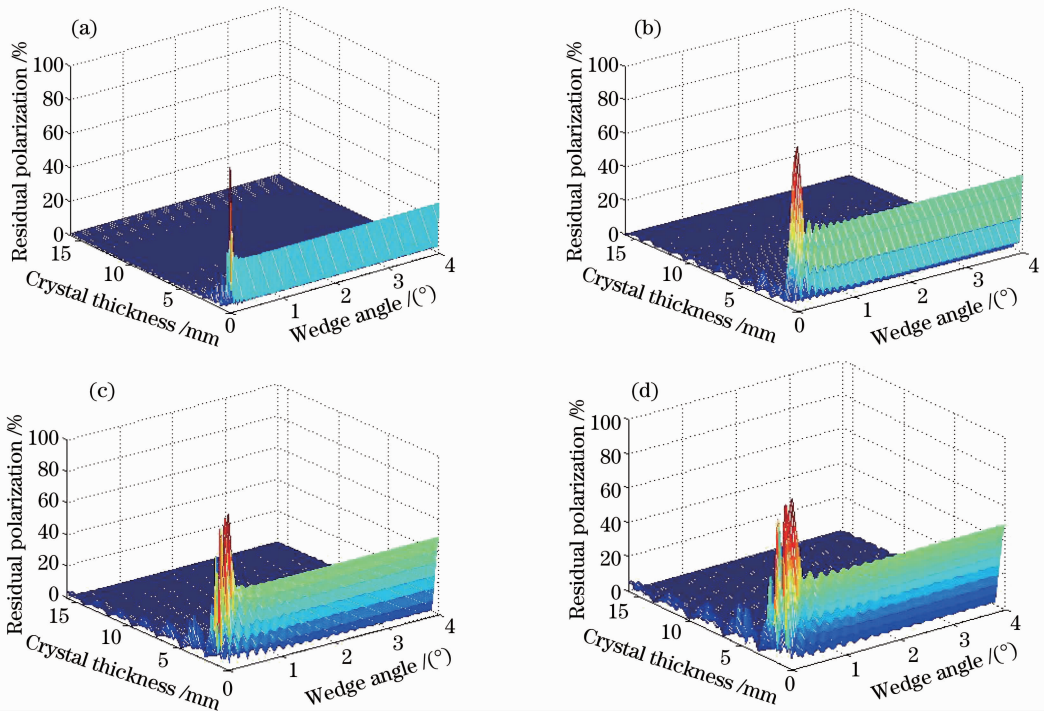


图 2 不同波长下残余偏振度与晶体楔角和晶体厚度关系曲线。(a) 400 nm; (b) 600 nm; (c) 800 nm; (d) 950 nm
Fig. 2 Curves of residual polarization degree with crystal angle and thickness under different wavelengths. (a) 400 nm; (b) 600 nm; (c) 800 nm; (d) 950 nm

将图 2 中不同波长下晶体楔角、晶体厚度与残余偏振度的关系提出，可以得到特定晶体厚度不同波长下晶体楔角与残余偏振度的关系，以及特定晶体楔角下不同波长下晶体厚度与残余偏振度的关系，如图 3、4 所示。由图 3、4 可知，波长对残余偏振度的影响主要是决定稳定值的大小及振荡衰减的快慢，波长越长，稳态值越大，振荡衰减越慢。因此，对一定波长范围内的光进行消偏器设计时，只需要对其最大波长进行分析即可，消偏器在最大波长处满足残余偏振度的要求，在波长范围内的其他位置也满足要求。

此处仅对 950 nm 的入射光进行消偏器设计分析，可以得到如图 5 所示不同晶体厚度下残余偏振

度与晶体楔角的曲线。通过对图 5 的分析可以发现，随着楔角的增加，残余偏振度振荡逐渐衰减趋于稳态值。随着晶体厚度的增加，残余偏振度逐渐衰减趋于零。

因此，根据(4)式可得到，设计消偏器时，增大楔角和晶体厚度均可增强消偏器的性能，但是由于光学系统的限制及分辨率要求，楔角与晶体厚度还需符合以下要求。

3.1 晶体楔角的设计

随着晶体楔角的增大，其对残余偏振度的影响越来越小，但是 o 光与 e 光的出射分离角增大，分离角过大会造成光学系统的分辨率不能满足要求，因此需

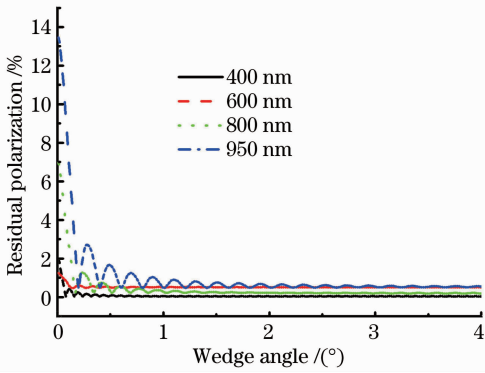


图 3 残余偏振度与晶体楔角的关系 ($d=12$ mm)
Fig. 3 Curves between residual polarization degree and crystal angle ($d=12$ mm)

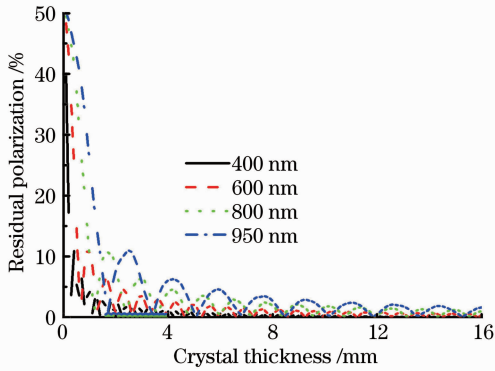


图 4 残余偏振度与晶体厚度的关系 ($\theta=2^\circ$)
Fig. 4 Curves between residual polarization degree and crystal thickness ($\theta=2^\circ$)

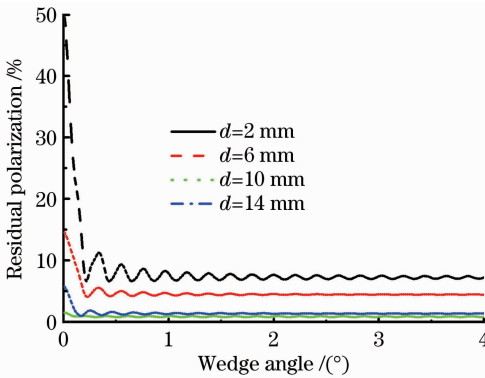


图 5 不同晶体厚度下残余偏振度与晶体楔角的关系 ($\lambda=950$ nm)

Fig. 5 Curves between residual polarization degree and crystal angle under different crystal thicknesses ($\lambda=950$ nm)

要对晶体楔角的取值进行限制。探测器像元尺寸为 ϵ , 焦距为 f , 光学系统的视场角分辨率为 $\tan \alpha = \epsilon/f$ 。根据折射定律, 消偏器 o 光与 e 光的分离角(此消偏器中, 光线方向和光法线方向的分离角很小, 用光法线方向来计算 o 光与 e 光的分离角)为 $\sin \theta =$

$n_o \sin[\arcsin(n_e \sin \beta/n_o) - \beta]$, 由于 β 的取值较小, 计算过程中的正弦值可近似为弧度值, 则 $\theta = (n_e - n_o)\beta$ 。为了不影响光学系统的分辨率, o 光与 e 光的出射分离角应小于光学系统的最小视场角分辨率, 即: $|n_e - n_o| \beta < \epsilon/f$ 。综合残余偏振度和光学系统分辨率的要求, 晶体楔角应满足 $\beta < \frac{\epsilon}{|n_e - n_o| f}$ 。

光谱仪采用的探测器像元大小为 $40 \mu\text{m}$, 焦距为 40 mm, 晶体的 o 光和 e 光折射率与波长有关, 根据(3)式, 不同波长对应不同的楔角取值范围, 图 6 是楔角的上限值与波长的关系图, 因此为了满足光谱范围的要求, 楔角取值为 2.4° 。

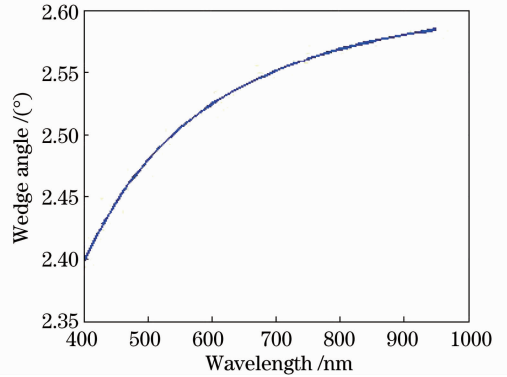


图 6 晶体楔角的上限值
Fig. 6 Limits of crystal angle

3.2 晶体厚度的设计

残余偏振度随着晶体厚度的增大而振荡衰减趋于零, 且波长越大, 振荡衰减的速度越慢, 图 7 是晶体楔角为 2.4° 、光谱分辨率为 4 nm 时残余偏振度随晶体厚度的变化曲线。

根据图 7, 晶体厚度增大到一定值后, 残余偏振度的振荡在要求范围内, 此时的晶体厚度值是满足残余偏振度要求的最小值, 在 $400 \sim 950$ nm 的范围

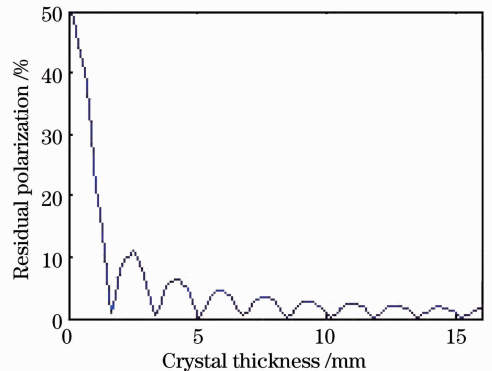


图 7 残余偏振度随晶体厚度的变化曲线 ($\theta=2.4^\circ$)
Fig. 7 Curve between residual polarization degree and crystal thickness ($\theta=2.4^\circ$)

内,晶体厚度 d_1 需大于 12.5 mm 才能使全谱段满足残余偏振度小于 2% 的要求。一般考虑到光学系统的尺寸要求等,晶体厚度选择能满足要求的最小值。

4 消偏器的残余偏振度分析

根据以上的分析和设计,晶体楔角为 2.4° ,晶体厚度 $d_1=12.5$ mm, $d_2=25$ mm,计算消偏器对不同偏振角度的入射光对应的出射光的残余偏振度,在波长范围内均满足要求,如图 8 和表 1 所示。

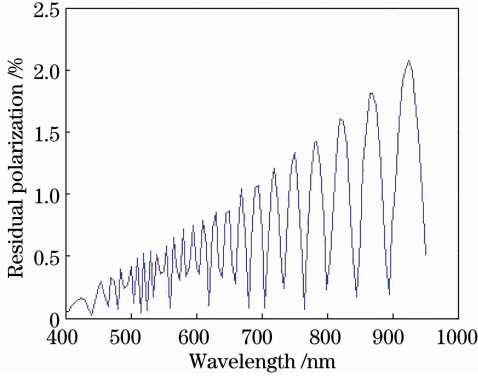


图 8 入射光偏振方向为 45° 对应的出射光的残余偏振度
Fig. 8 Residual polarization degree of corresponding emergent light for 45° polarization state of incident light

表 1 不同偏振方向入射光对应出射光的残余偏振度
Table 1 Residual polarization degree of corresponding emergent light for incident light with different polarization direction

Polarization state	Wavelength /nm			
	400	600	800	950
0°	0.008	0.019	0.347	0.065
30°	0.044	0.164	1.237	1.726
45°	0.046	0.192	1.439	2.0
60°	0.037	0.169	1.257	1.77
90°	0.008	0.019	0.347	0.065

采用分光光度计对上述指标的消偏器进行残余偏振度的测试,入射光偏振方向为 45° 时,出射光的残余偏振度最大。表 2 是入射光偏振方向为 0° 和 45° 的实验结果,结果表明根据以上分析设计的消偏器满足系统设计要求。

表 2 入射光偏振方向为 0° 和 45° 的残余偏振度测试数据
Table 2 Test results of residual polarization degree with polarization direction of 0° and 45° for incident light

Polarization state	Wavelength /nm			
	400	600	800	950
0°	0.02	0.03	0.12	0.76
45°	0.19	0.13	0.26	1.54

5 结 论

利用矩阵光学的原理对用于宽波段成像光谱仪的 Lyot 消偏器的残余偏振度设计进行了详细的数值分析,总结出了残余偏振度在不同波长下与晶体楔角和厚度的变化规律,求解出了满足系统残余偏振度要求和光学系统要求的晶体楔角和厚度值。对用于宽波段的消偏器设计方法为在最大波长处对残余偏振度与晶体楔角和晶体厚度的关系进行数值求解,利用光学系统分辨率对晶体楔角的要求确定晶体楔角值,利用数值分析的结果求出最大波长处满足残余偏振度要求的最小晶体厚度值,根据光学尺寸要求确定晶体厚度值。此种方法可广泛应用于空间用紫外、可见以及近红外宽波段高分辨率光谱仪的消偏器设计。

参 考 文 献

- 1 Wu Taixia, Yan Lei, Xiang Yun. The multi-angle polarization spectral character of water and its applications in water color remote sensing [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(2): 448-452.
- 2 吴太夏, 晏磊, 相云. 水体的多角度偏振波谱特性及其在水色遥感中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(2): 448-452.
- 3 C Stephen. Design and analysis of depolarizer for the NASA moderate resolution imaging spectrometer-tilt (MODIS-T) [C]. SPIE, 1992, 1746: 375-385.
- 4 B H Billings. Amonochromatic depolarizer [J]. J Opt Soc Am, 1951, 41(12): 966-975.
- 5 Liu Jihong, Fang Qiang, Yin Yafang, et al.. Low-DOP depolarizer for linearly polarized light independent of direction of vibration [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(3): 536-539.
- 6 刘继红, 方强, 阴亚芳, 等. 与入射线偏振光振动方向无关的低偏振度消偏器[J]. 光学学报, 2007, 27(3): 536-539.
- 7 Chi Hao, Zhang Xianmin, Chen Kangsheng. Coherence analysis of Lyot depolarizer [J]. Journal of Zhejiang University, 2000, 34(2): 140-142.
- 8 池灏, 章献民, 陈抗生. Lyot 退偏器的相干分析[J]. 浙江大学学报, 2000, 34(2): 140-142.
- 9 Yin Yafang, Fang Qiang, Liu Jihong. Analysis of design criterion for Lyot crystal-type depolarizer in frequency domain [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2005, 26(3): 180-182.
- 10 阴亚芳, 方强, 刘继红. Lyot 晶体型消偏器设计判据的频域分析[J]. 半导体光电, 2005, 26(3): 180-182.
- 11 Wang Rui, Wang Shurong, Li Futian. Research on the depolarizer performance of the space-borne grating spectrometer [J]. Optical Technique, 2009, 35(1): 89-92.
- 12 王锐, 王淑荣, 李福田. 星载光栅光谱仪消偏器性能研究[J]. 光学技术, 2009, 35(1): 89-92.
- 13 Yan Fengping, Yao Yi, Jian Shuishong. Characteristics of Lyot optical fiber depolarizer [J]. Acta Optica Sinica, 1996, 16(6): 848-852.
- 14 延凤平, 姚毅, 简水生. 基于 Lyot 型光纤消偏器特性的研究[J]. 光学学报, 1996, 16(6): 848-852.
- 15 Wei Guanghui. Matrix Optics [M]. Beijing: Arms Industry Press, 1995.
- 16 魏光辉. 矩阵光学 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995.