

近红外波段偏振编码用分色片的设计与制作

尹欣, 刘定权*, 段微波, 李大琪, 陈刚

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:在基于偏振编码的光通信试验中,需要对不同波长的线偏光进行光路分离,同时要保持分离后线偏光的偏振方向和消光比,为此设计和制备了入射角为 45° 的810 nm 波长透射/850 nm 波长反射的近红外分色片.为了抑制斜入射条件下工作波长附近 s、p 偏振分量的能量、相位分离,选择了合适的基础膜系,利用旁反射带边缘透、反射带光谱过渡迅速的特性,实现了临近波长的光路分离,也减小了偏振分离;通过非规整膜层的相位补偿和软件自动优化,实现了设计目标.分别选用 TiO_2 和 SiO_2 为高低折射率膜层材料,以离子束辅助沉积技术镀制薄膜,采用光学极值法和晶体振荡法相结合的方式控制膜层厚度.制备样品的消光比在波长 810 nm 处达到 7000 : 1 以上,在 850 nm 处达到 20000 : 1,实现了分色片对相位的控制,满足了偏振编码光通信试验的需求.

关键词:光学薄膜;分色片;消偏振设计;相位控制;偏振编码

中图分类号:O484.4 文献标识码:A

Design and fabrication of near-infrared dichroic beam-splitter for polarization state coding

YIN Xin, LIU Ding-Quan*, DUAN Wei-Bo, LI Da-Qi, CHEN Gang

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: To separate two polarized lights with wavelengths at 810 nm and 850 nm, respectively, into two optical beams while keeping their polarization directions unchanged and degree of polarization maximized, a dichroic beam-splitter at incidence angle of 45° was designed and fabricated. The 810nm beam passes through the splitter while 850nm beam is reflected. An apposite initial film configuration was selected to control the separation of s- and p-polarization components. It was further optimized with the Global Modified LM method in Film Wizard software. The phase and energy parameters of the separated two beams meet the design target. TiO_2 and SiO_2 have been chosen as high- and low-refractive index layer materials, respectively. Ion beam-assisted deposition, optical extreme value method, and quartz crystal oscillator have been used to control the thickness of films. The extinction ratio of obtained sample reaches 7000 : 1 in 810 nm beam and 20000 : 1 in 850 nm beam. The control of phase and energy of optical thin films were realized to meet the demands of polarization state coding for its application in communication.

Key words: optical thin films; dichroic beam-splitter; depolarization design; phase control; polarization states coding

PACS: 07.07. DF

引言

由于自由空间激光通信^[1]在长距离空-地传输方面的优势,使其受到广泛重视.一方面,研究者致力于提升空间激光通信的速度,如以欧空局(ESA)^[2]为代表的专家通过相干激光通信的方法发展了高速空间光通信技术;另一方面,在空间激光通

信的基础上进行空间量子通信研究^[3],试图获得理论上更为安全的保密通信方式.

根据大气中气体分子和气溶胶的散射、吸收特性,为了减小激光信号在空间传输过程中的衰减,目前,自由空间激光通信采用的大气信道多选择在波长 850 nm、1.06 μm 和 1.55 μm 等大气窗口附近^[4].在 850 nm 波长附近,因为激光光源的实现较

收稿日期:2011-12-22,修回日期:2012-07-08

基金项目:国家自然科学基金项目(60878038)

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (60878038)

作者简介(Biography): 尹欣(1986-),男,浙江金华人,博士研究生,主要从事光学薄膜技术与元件方面的研究工作, E-mail: yinxin.hit@gmail.com.

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: dqliu@mail.sitp.ac.cn.

Received date: 2011-12-22, revised date: 2012-07-08

为简便,发展较为成熟.光纤通信过程中光纤双折射效应对偏振信息存在严重干扰^[5],而空间通信过程避免了这个影响,使得较为简单、易于实现的偏振编码优势明显,在量子密钥分发(Quantum Key Distribution, QKD)等领域有着较多的应用.偏振编码的信息载体为光子的不同偏振态,故而对光学系统的偏振特性提出了较高的要求,对光学系统中的光学薄膜器件来说,在传统的光谱-能量控制的基础上,还必须特别注重对偏振效应和相位分离的控制.

光学多层薄膜在倾斜入射条件下难以避免偏振效应.对通常的光学遥感应用来说,严重的偏振效应会引起能量信息的失真,而目标光学信号本身的偏振特性同样包含着可以利用的信息,所以随着遥感技术的发展,越来越多的应用对光学薄膜元器件的偏振控制性能提出了要求.从1961年Baumeister^[6]设计消偏振薄膜开始,国内外研究者对偏振控制薄膜器件陆续进行了研究,1980年Thelen^[7]首次设计了倾斜入射条件下的消偏振分色片;国内上海技物所马小凤^[8]于2007年针对海洋遥感的应用,设计制备了宽光谱消偏振分色片,对薄膜器件的偏振能量特性进行了一定程度的控制.本文是利用线偏光的偏振态来加载信息,对偏振效应控制的要求很高,不仅要同时对s、p偏振分量的能量变化差异力求消除,还要对两分量间的相位差变化进行控制.为了实现这样的目标,选择具备透射-反射光谱过渡迅速特点的膜系,有效分离了810 nm和850 nm两个目标波长;在分色片的膜系设计中引入了非规整薄膜层,并对膜系进行优化,实现能量控制和相位补偿,保证了在目标波长上的偏振性能.

1 薄膜设计

1.1 光机系统的要求

在偏振编码的空间光通信应用中,信息分别以偏振方向间隔45°(相对参考面0°、45°、90°和135°)的四种线偏光形式传递,在倾斜入射进入分色片膜层表面后,线偏光受到介质的影响有可能从良好的线偏振态变化为椭圆偏振态.考虑光线入射分色片时的入射面与参考面一致的情况,四种线偏光中,45°和135°两个偏振方向的光线变化相对更为明显,消光比(Extinction Ratio, ER,数值上等于椭圆偏振光长轴与短轴之比的二次方,理想线偏振光消光比为 $+\infty:1$)受到的影响更大.随着消光比的下降,系统误码率将升高,会对通信过程产生影响.为了抑制这种效应以保持低误码率,需要利用光学薄膜在

实现光谱分色功能的同时注重偏振特性的控制.根据光机系统的要求,需要分色片工作在45°倾斜入射条件下,让波长为810 nm的光线透射,将波长为850 nm的光线反射;经过分色片后,810 nm和850 nm两个波长点上偏振极值方向不变,且消光比需要保持在3000:1以上.

1.2 初始膜系的设计

长波截止滤光片的膜系结构,在45°入射角下倾斜使用,可以实现两个工作波长的有效分离,但一般使用的截止滤光片膜系结构,从反射到透射的光谱过渡缓慢,难以有效分离邻近的两个波长.浙江大学顾培夫等人^[9]提出了对法布里-珀罗干涉滤光片膜系进行变形设计的方法,实现了消偏振截止滤光片设计.借鉴这种方法,以(H L H 2L 2H 2L H L H L)ⁿ作为基础膜系,选用TiO₂和SiO₂分别为高低折射率膜层材料,设计波长为710 nm,并选择周期 $n=6$,在波长830 nm处附近的透射-反射过渡带明显收缩.规整膜系的过渡带波长范围可以控制在10 nm左右,在峰值透射率的50%处,s、p分量的波长分离在2 nm左右;在此基础上引入若干非规整的薄膜层,在保持过渡带特性的同时,对工作波长处的s、p能量分离进行了补偿,获得的膜系在45°入射时的s、p分量光谱理论曲线如图1所示,将此膜系作为优化前的初始膜系.

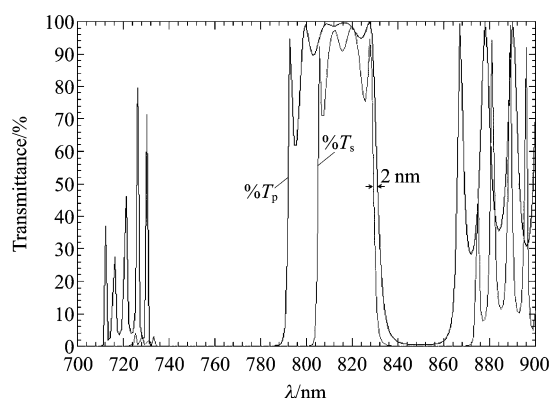


图1 初始膜系45°入射时s、p偏振分量光谱
Fig. 1 Initial spectra of s- and p- components at incidence of 45°

1.3 偏振分量相位差的影响

获得了合适的初始膜系后,以透射率和反射率的偏振分量为目标,适当调整膜层厚度以实现目标波长s、p分量的能量透射率、反射率接近并不困难,但这依然无法避免两偏振分量的相位差变化导致的消光比下降.消光比下降后形成的椭圆偏振光如图

2 所示. 根据光波的电磁场特性, 构成椭圆偏振光的正交分量间相位差 δ 与椭圆偏振光长短轴比值 (a/b) 存在如下关系^[10]:

$$\sin 2\chi = (\sin 2\alpha) \sin \delta, \quad (1)$$

其中 $\chi = \arctan(\mp b/a)$; $\alpha = \arctan(a_2/a_1)$, (a_2/a_1) 为两正交分量 s、p 的振幅比, 在分色片的 s、p 能量特性经过优化之后, 可以引入两正交分量强度相等的条件, $\sin 2\alpha = 1$.

根据式 (1) 可以推导得到偏振方向为 45° 和 135° 的线偏光. 因为 s、p 分量间引入相位差而变为椭圆偏振光时, s、p 分量相位差 δ 与椭圆偏振光消光比 ER 的关系为

$$\delta = \pm 2 \arctan \sqrt{\frac{1}{ER}} \quad (ER \geq 1). \quad (2)$$

由式 (2) 可以看出, 相位差对消光比数值的影响以 180° 为周期, 故而设计、优化的相位差目标值也可以在原目标基础上加减 180° 的整数倍.

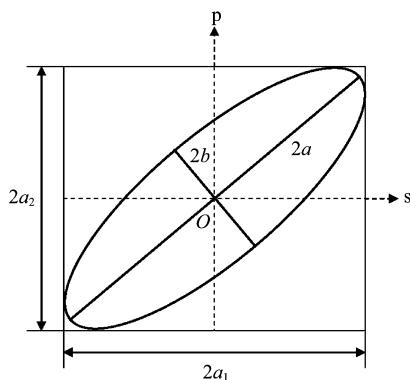


图2 椭圆偏振光电矢量示意图

Fig. 2 Diagram of electric vector of the elliptic polarized light

以 45° 或 135° 偏振方向线偏光入射, 经过薄膜分色片后 s、p 分量相位差与消光比 ER 关系如图 3 所示, 由图看出消光比在数值较高区间内对 s、p 分量相位差特别敏感.

1.4 优化结果及分析

根据软件模拟计算结果, 分色片设计膜系透射区两偏振分量相位差 δ 较接近 0° , 而反射区两偏振分量相位差 δ 较接近 180° , 故而在透射区 δ 优化目标选择 0° , 而在反射区 δ 优化目标选择 180° . 优化后得到的偏振能量光谱理论曲线如图 4 所示, s、p 偏振分量理论相位差曲线如图 5 所示.

优化后的膜系在 45° 倾斜入射条件下, 过渡带 s、p 分量曲线在 50% 峰值透射率处的光谱分离小于 1 nm ; $(810 \pm 5) \text{ nm}$ 透射区和 $(850 \pm 5) \text{ nm}$ 反射区

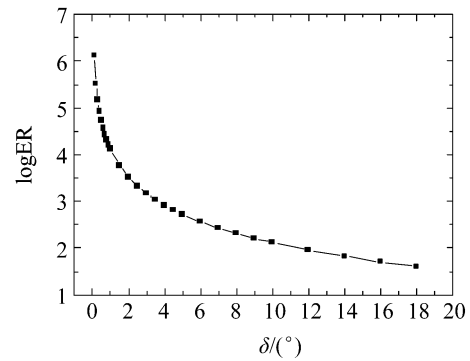


图3 消光比与 s、p 分量相位差的关系

Fig. 3 Relationship between the extinction ratio and the phase difference of s- and p-components

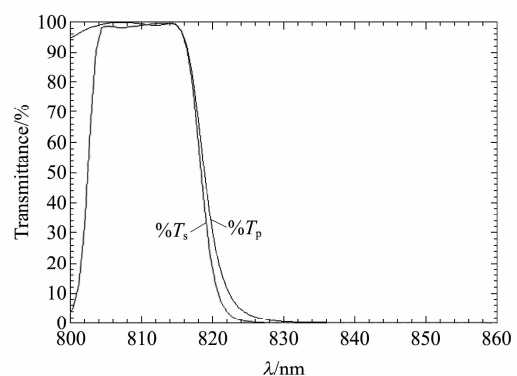


图4 优化后得到的分色片 45° 入射时 s、p 偏振分量光谱
Fig. 4 Optimized spectra of s- and p- components at incidence of 45°

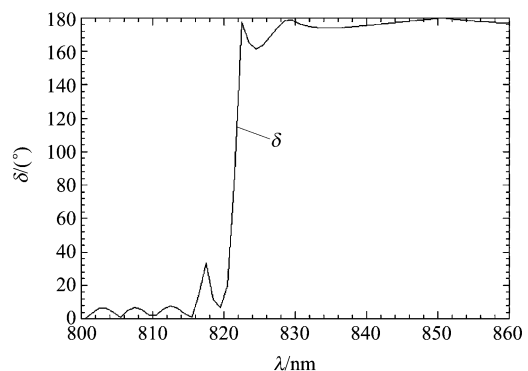


图5 优化后得到的分色片 45° 入射时 s、p 偏振分量相位差
Fig. 5 Optimized phase difference of s- and p- components at incidence of 45°

的 s、p 分量透射率、反射率与相位差的理论计算值见表 1.

考察光学薄膜元件偏振能量特性的指标偏振度 P 计算式^[11]为

$$P = \left| \frac{T_s - T_p}{T_s + T_p} \right| \text{ 或 } \left| \frac{R_s - R_p}{R_s + R_p} \right|, \quad (3)$$

其中 T_s 和 R_s 为元件对 s 偏振光的透射率/反射率, T_p 和 R_p 为元件对 p 偏振的光透射率/反射率.

优化后的膜系结构通过理论计算,在目标波长 810 nm 处 P 为 0.005, δ 为 1.36° , 消光比达到 8000 : 1; 850 nm 处 P 为 0.0002, δ 为 179.58° , 消光比达到 75000 : 1. 从表 1 看出,在两目标波长 ± 3 nm 以内,偏振度 P 都控制在了 0.01 以内,偏振分量的能量分离得到了控制,而偏振分量相位差也都控制在了 0° 或 180° 附近 $\pm 2^\circ$ 以内,相应的线偏光消光比在 3000 : 1 以上. 认为获得的膜系设计能够满足要求.

在目标波长附近对入射角进行允差分析,810 nm 透射和 850 nm 反射的 s、p 分量透射率、反射率与相位差在表 2 中列出. 可以看到 850 nm 反射光对角度变化不敏感,但 810 nm 波长的透射光对入射角比较敏感,虽然从能量上看两偏振分量的分离并不严重,但相位差变化非常明显,在超过 0.1° 的入射角误差下,将导致 s、p 分量相位差达到 5° 以上,对应的消光比 ER 也将迅速地下降到 500 : 1 以下.

表 1 目标波长附近 45° 入射时 s、p 分量偏振光谱与相位差
Table 1 Polarization spectra and phase differences of s- and p- components at incidence of 45° around the target wavelength

λ/nm	$T_p/(\%)$	$T_s/(\%)$	$\delta/(\circ)$	λ/nm	$R_p/(\%)$	$R_s/(\%)$	$\delta/(\circ)$
805.5	97.46	98.59	2.00	845.6	99.93	100.00	177.61
806.5	97.89	98.38	1.02	846.6	99.94	100.00	178.06
807.5	98.34	98.24	0.58	847.6	99.94	100.00	178.50
808.5	98.77	98.20	0.67	848.6	99.95	100.00	178.93
809.5	99.14	98.25	1.08	849.6	99.95	100.00	179.34
810.5	99.44	98.36	1.52	850.6	99.96	100.00	179.74
811.5	99.67	98.46	1.79	851.6	99.96	100.00	179.89
812.5	99.82	98.44	2.05	852.6	99.96	100.00	179.52
813.5	99.92	98.08	2.64	853.6	99.96	100.00	179.17
814.5	99.98	96.89	3.58	854.6	99.97	100.00	178.84

2 样品制备与测量

分色片的制备使用成都南光机器有限公司制造的 ZZS900-G/2 型光学镀膜机,膜层采用离子束辅助沉积技术进行镀制,生长过程中一直用氧离子束进行辅助轰击. 规整膜层的控制采用光电极值法监控,非规整膜层采用 IC5 石英晶振监控仪监控膜厚. 镀制过程中,高低折射率膜层 TiO_2 和 SiO_2 的沉积速率分别保持在 0.25 nm/s 和 1.0 nm/s 附近.

制成样品的光谱测量使用美国 Perkin Elmer 公司的 Lambda 900 分光光度计,以 45° 入射角测量,分色片的光谱如图 6 所示,满足系统对能量光谱的要求.

表 2 入射角 45° 附近两目标波长的 s、p 分量偏振光谱与相位差

Table 2 Polarization spectra and phase differences of s- and p- components at incidence around 45° of target wavelength

Angle/ $(^\circ)$	810 nm			850 nm		
	$T_p/(\%)$	$T_s/(\%)$	$\delta/(\circ)$	$R_p/(\%)$	$R_s/(\%)$	$\delta/(\circ)$
44.80	99.32	98.06	4.53	99.95	100.00	179.28
44.84	99.31	98.11	3.48	99.95	100.00	179.33
44.88	99.31	98.15	2.38	99.96	100.00	179.38
44.92	99.31	98.20	1.22	99.96	100.00	179.42
44.96	99.30	98.25	0.01	99.96	100.00	179.47
45.00	99.30	98.30	1.31	99.96	100.00	179.52
45.04	99.29	98.35	2.69	99.96	100.00	179.56
45.08	99.29	98.40	4.15	99.96	100.00	179.61
45.12	99.28	98.45	5.70	99.96	100.00	179.66
45.16	99.28	98.50	7.35	99.96	100.00	179.71
45.20	99.27	98.55	9.11	99.96	100.00	179.75

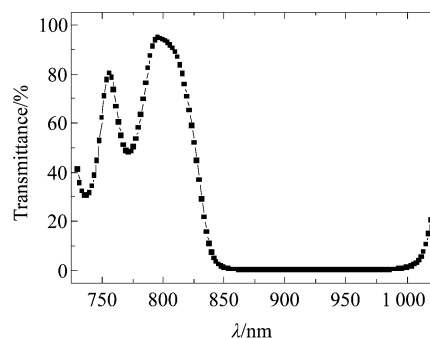


图 6 分色片样品实测光谱曲线

Fig. 6 Spectrum of a dichroic beam-splitter sample

样品的消光比测量时采用了波长 810 nm 和 850 nm 激光器,并配合偏振片和光功率计进行了直接测量,并通过椭圆偏振仪测量 s、p 分量相位差进行计算验证. 测量使用的偏振片为 Thorlabs 公司 LPVIS100,目标波长消光比实测值大于 $10^5 : 1$; 椭圆偏振仪为美国 J. A Woollam 公司 V-Vase 光谱型椭圆偏振仪. 测量过程中通过偏振片(起偏器)将激光起偏为各目标偏振方向的线偏光,以 45° 精确入射分色片表面,角度控制误差在 0.02° 内. 根据波长分别将透射、反射光路光束垂直入射到另一片偏振片(检偏器)表面,用光功率计测量该偏振片出光光强,图 7 为测量平台示意图. 测量中,入射元件光束偏振方向与系统基矢量方向夹角分别为 0° 、 90° 、 45° 和 135° , 分别代表不同的偏振编码. 通过旋转元件出射光路的偏振片(检偏器),分别读取出射光极大值 I_{\max} 和极小值 I_{\min} ,根据以下关系计算元件消光比,

$$\text{ER} = \frac{I_{\max}}{I_{\min}} \quad (4)$$

测量结果表明,样品对 810 nm 波长透射光,在

45°和 135°偏振方向上消光比达到 7000 : 1 以上,同时对 850 nm 波长反射光,在 45°和 135°偏振方向上消光比达到 20000 : 1,在 0°和 180°两个偏振方向上消光比达到 20000 : 1 以上。

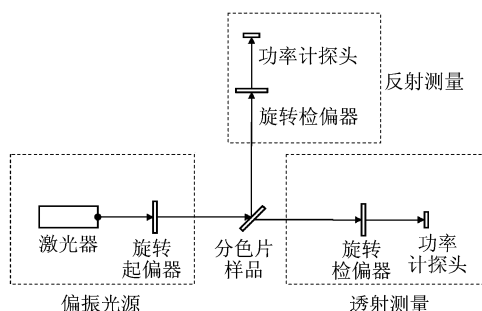


图7 消光比测量平台示意图

Fig. 7 Sketch of ER measurement platform

3 分析与讨论

从图6的光谱曲线看,实际样品光谱与设计光谱相比有一定的偏差,透射带较窄. 主要原因是为了减少波长 810 nm 附近透射偏振 s、p 分量之间相位差,优化后的膜系引入了非规整膜层,这些膜层的厚度通常只有归整膜层的二分之一甚至更少,监控精度要求更高,相对监控精度下降,误差经过积累,改变了光谱曲线,使之与设计目标产生了偏差. 透射带收窄的结果是偏振性能最佳的透射波长范围变小,需要在制作过程中将目标波长尽可能地控制在透射带中心位置,以免透射率下降引起的透射偏振 s、p 分量之间能量差异变大,进而导致光束偏振方向发生改变。

在镀制过程中,相比能量光谱曲线,偏振分量相位差的光谱曲线对膜层厚度误差更为敏感,使得偏振控制分色片的镀制难度提高,成品率较低,在完成试验性项目需求的同时尚不足以进行量产,需要通过技术和工艺手段进一步提高膜厚(特别是非归整膜层厚度)的监控精度来提升研制水平. 在现有条件下,使用光学极值监控方法和石英晶体振荡配合的方式,并配合较低的淀积速率来有效地提高了监控精度、降低了镀制误差;通过固定的工艺参数来保证工艺的稳定性、提高镀制的可重复性,也是制备高精度偏振编码用分色片的关键因素之一。

4 结论

采用干涉滤光片变形后的膜系结构,利用其长波侧的旁反射带的带边缘光谱过渡迅速、偏振分量

分离小的特点,结合软件在固定入射角下以 s、p 偏振分量的能量和相位特性为目标进行优化,引入非归整膜层缩小 s、p 偏振分量的相位分离. 设计并采用离子束辅助沉积技术制备了 810 nm 透射/850 nm 反射的,45°倾斜工作的分色片. 具有这样薄膜结构的分色片,可以将临近波长的光线有效分离到相互垂直的光路中去,而自身引入的偏振影响可以忽略。

REFERENCES

- [1] HUANG Yin-Bo, WEI He-Li, MEI Hai-Ping, *et al.* Effects of atmospheric channel on system performance of infrared laser communication system[J]. *Acta Photonica Sinica*. (黄印博,魏合理,梅海平,等. 大气信道对红外激光通信系统性能影响的实验研究. *光子学报*), 2009, **38**(3): 646-650.
- [2] LIU Hong-Zhan, SUN Jian-Feng, LIU Li-Ren. Analyzing the trends of space laser communication[J]. *Optical Communication Technology*. (刘宏展,孙建峰,刘立人. 空间激光通信技术发展趋势分析. *光通信技术*), 2010, **8**: 39-42.
- [3] PAN Jian-Wei, Anton Zeilinger. Experimental realization of quantum teleportation[J]. *Physics*. (潘建伟,安东·塞林格. 量子态远程传送的实验实现. *物理*), 1999, **28**(10): 609-613.
- [4] LI Xiao-Feng, CHEN Yan, HU Yu. The analysis of wavelength selection for space-to-ground laser communication [J]. *Applied Optics*. (李晓峰,陈彦,胡渝. 空地激光通信链路波长选择的因素分析. *应用光学*), 2004, **25**(1): 30-33.
- [5] WEI Ya-Dong, TANG Zhi-Lie, LIU Xiao-Bao *et al.*. Study on sending after verify scheme in quantum channel for quantum key distribution system based on polarization coding [J]. *Acta Photonica Sinica*. (魏亚东,唐志列,刘小宝,等. 基于相位调制偏振态 QKD 系统的量子信道校正发送方案. *光子学报*), 2009, **38**(7): 1852-1857.
- [6] Baumeister P. The Transmission and degree of polarization of quarter-wave stacks at non-normal incidence[J]. *Opt Acta*, 1961, **8**: 105-119.
- [7] Thelen A. A voidance or enhancement of polarization in multilayers[J]. *Opt. Soc. Am. A*, 1980, **70**: 118-121.
- [8] MA Xiao-Feng. Control of polarization and processing technology study of broadband dichroic filter for ocean remote sensing[D]. Shanghai Institute of Technical Physics. (马小凤. 海洋遥感用宽光谱分色片的偏振控制与工艺研究. 上海技术物理研究所), 2007. 64-78.
- [9] GU Pei-Fu, CHEN Wei-Bin, LIU Xu. Design of depolarization thin film cutoff filters [J]. *Optical Communication Technology*. (顾培夫,陈卫斌,刘旭. 薄膜截止滤光片的消偏振设计. *光学学报*), 2005, **25**(2): 274-278.
- [10] Max B, Emil W. *Principles of Optics* [M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Publishing house of electronics industry. (马克斯·波恩,埃米尔·沃尔夫. 光学原理. 杨葭荪译), 北京:电子工业出版社,2009: 21-25.
- [11] LI Da-Qi, LIU Ding-Quan, ZHANG Feng-Shan. Control of polarization for the visible infrared broadband dichroic beamsplitter at oblique incidence[J]. *Acta Photonica Sinica*. (李大琪,刘定权,张凤山. 可见/红外宽光谱分色片偏振调控的设计. *光子学报*), 2011, **40**(1): 5-8.