

偏振遥感器镜头相位延迟特性分析

裘桢炜^{1,2}, 洪津^{1,2}

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230021;
2. 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230021)

摘要: 偏振遥感器的偏振探测精度受仪器自身的偏振特性影响。其中偏振遥感器镜头的相位延迟是其自身偏振特性的重要组成部分。分析了偏振遥感器镜头相位延迟对偏振遥感测量的影响。说明了镜头的相位延迟可以由各镀膜界面相位延迟累加得到, 且主要由光学薄膜引入了镜头相位延迟。随后利用薄膜理论推导出了单透镜界面相位延迟的解析解。采用该解析式对可见及近红外、红外、超宽带三类减反射膜系的实际应用样例进行研究, 结果表明: 单界面常规宽带减反射膜系的相位延迟随着波长增加而单调递减。因而, 对于宽波段偏振遥感器镜头, 无法利用各光学界面间的补偿来获得总的低相位延迟。

关键词: 遥感与遥感器; 薄膜; 偏振; 相位延迟

中图分类号: TP732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0806-06

Retardance characteristics analysis of lens in polarization remote sensors

Qiu Zhenwei^{1,2}, Hong Jin^{1,2}

- (1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230021, China;
2. Key Laboratory of General Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230021, China)

Abstract: The polarimetric accuracy of existent polarization remote sensors is largely controlled by the polarization properties of those instruments themselves. The retardance of lens in the polarization remote sensors is a key part of the polarization characteristics whose stabilities are crucial for finally reliable polarimetric results. By analyzing the effect of the retardance of the lens in the polarimetric remote sensing measurement, it can show that the total retardance equals to the simple summing of each retardance from various optical interfaces with optical coatings, and the main part of total retardance is from optical coatings. The mathematical expression of retardance from single interface's broadband antireflection coatings is derived from thin film theoretical analysis. Typical examples of visible and near-infrared, infrared, ultra-broadband antireflection coatings in actual applications were studied with this

收稿日期: 2013-07-13; 修订日期: 2013-08-20

基金项目: 中国科学院重点项目资助(KGFZD-125-13-006)

作者简介: 裘桢炜(1982-), 男, 博士生, 主要从事偏振遥感仪器方面的研究。Email: zwqiu@aiofm.ac.cn

导师简介: 洪津(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光谱/偏振遥感技术, 航空/航天遥感器工程技术方面的研究。

Email: hongjin@aiofm.ac.cn

expression, the result shows that retardance of general broadband antireflection coatings is monotone decreasing while wavelength increases. Furthermore, the lens in broadband polarization remote sensors can hardly achieve lower overall retardance by compensation between optical interfaces.

Key words: remote sensing and sensors; thin films; polarization; retardance

0 引言

偏振遥感是利用偏振特性远距离对探测目标进行非接触式测量的一种探测技术^[1]。因为偏振对目标表面的几何特征和材质特征的敏感性^[2],有助于获取和光谱遥感、辐射遥感不同的信息,所以近年来倍受国际遥感领域关注。相应的各种类型的偏振遥感器也在快速发展,著名的如 POLDER, APS, MISR, MSPI 等。国内也有相关的如中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的多角度偏振辐射计^[3]以及一些偏振测量手段研究^[4-5]。偏振遥感器不同于其他偏振仪器的主要特点在于其探测的目标偏振特性变化较大^[6](探测目标从陆地到海洋,偏振度从 10^{-3} 到大于 0.9),偏振探测精度要求较高(偏振度精度从 0.02 到 10^{-4})。因而偏振遥感器尤为需要降低自身的偏振效应以避免影响偏振探测精度。

偏振遥感器自身光学系统往往会带来相当明显的偏振效应。对于非旋光材料构成的光学系统,偏振特性主要包括线性双向衰减和线性相位延迟^[7]。其中线性双向衰减表现较显著,不易忽略,在设计中通常会予以考虑;而线性相位延迟(以下文中均简称相位延迟)则因为其不影响辐射量变化而常被忽略,这

在一般应用和普通精度要求下是可行的。但随着偏振探测技术的发展和精度要求的提高,相位延迟带来的影响渐渐为人所重视^[8]。APS^[9]、MSPI^[10]等仪器建立的误差分析模型均将镜头的相位延迟作为一项重要的因素予以考虑,但对镜头相位延迟特性目前仍未有较系统的研究。因而,有必要研究镜头的相位延迟特性,为低偏振镜头设计提供依据,也有助于偏振遥感器方案的选择。

文中首先分析镜头相位延迟对偏振测量的影响,并说明光学薄膜和镜头相位延迟的关系。随后导出单透镜界面相位延迟的解析解,并对大量常规减反射膜系的相位延迟特性进行了研究。最后进一步拓展到多界面组合的相位延迟特性,并讨论镜头相位延迟特性对低偏振镜头设计方案的影响。

1 镜头相位延迟对偏振探测的影响

对于每一个附有减反射膜的透镜界面,均可以用 Mueller 矩阵来描述其对偏振光的作用。通常光学系统不会应用具有圆双向衰减和圆相位延迟的材料,因此镜头第 i 界面的 16 元的 Mueller 矩阵有以下形式^[11]:

$$M_i = T_i \begin{bmatrix} 1+D_i & -\cos 2\psi_i & 0 & 0 \\ -\cos 2\psi_i & 1+D_i-2D_{vi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin 2\psi_i \cos \theta_i & \sin 2\psi_i \sin \theta_i \\ 0 & 0 & -\sin 2\psi_i \cos \theta_i & \sin 2\psi_i \cos \theta_i \end{bmatrix} = T_i \begin{pmatrix} L_i & 0 \\ 0 & R_i \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: T_i 为透过率修正因子; D_i 为退偏系数; D_{vi} 为交叉退偏系数; ψ_i 、 θ_i 为椭圆偏振系数,其中, θ_i 描述相位延迟。可见,相位延迟只影响 Stokes 矢量中的 U 和 V 分量,对 I 和 Q 则没有影响。公式(1)右侧是简化形式。

假设镜头由 n 个界面组成,那么镜头对偏振光的作用可以由一个总的 Mueller 矩阵描述:

$$M_{\text{lens}} = M_n M_{n-1} \cdots M_2 M_1 = \begin{bmatrix} L_n L_{n-1} \cdots L_2 L_1 & 0 \\ 0 & R_n R_{n-1} \cdots R_2 R_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

单独对相位延迟部分分析,当各个界面的相位延迟均为小量时,有:

$$R_{\text{lens}} = R_n R_{n-1} \cdots R_2 R_1 = \left(\prod_{i=1}^n \sin 2\psi_i \right) \begin{bmatrix} 1 & \sum_{i=1}^n \theta_i \\ \sum_{i=1}^n \theta_i & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

从公式(3)得知,各个界面相位延迟较小时,镜头总的相位延迟是各界面相位延迟之和。若透镜界面没有镀膜时,根据 Fresnel 公式可知,该界面将不

会引入任何相位延迟,因而镜头的相位延迟完全是由光学薄膜引入的。因为常用镜头上镀膜绝大多数是减反射膜,下面分析减反射膜的相位延迟特性。

2 单界面减反射膜相位延迟特性

2.1 减反射膜相位延迟理论计算

膜系的特性计算有多种方法,这里采用 Smith 方法便于分析。按照 Smith 方法^[12],对于某一选定的间隔层来说,

$$t_s = \frac{t_1 t_2 e^{-i\delta}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta}}, t_p = \frac{t_1 t_2 e^{-i\delta}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta}} \quad (4)$$

式中: t 为膜系振幅透过率; t_1, r_1 分别是选定间隔层上等等效界面振幅透过率和振幅反射率, t_2, r_2 则为选定间隔层下等效界面振幅透过率和振幅反射率;下标 s 和 p 表示分别计算 s 波和 p 波的相应参数; δ 是间隔层的等效位相厚度。

由此,膜系相位延迟 τ 为:

$$\tau = \arg\left(\frac{t_s}{t_p}\right) = \arg\left(\frac{t_1 t_2 e^{-i\delta}}{t_1 t_2 e^{-i\delta}} \cdot \frac{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta}}\right) \quad (5)$$

公式(5)的右边括号内可以分开表达为:

$$T_t = \frac{t_1 t_2 e^{-i\delta}}{t_1 t_2 e^{-i\delta}}, R_r = \frac{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta}}{1 + r_1 r_2 e^{-2i\delta}} \quad (6)$$

多层宽带减反射膜的情况下, t, r 均为复数。上式分别表明了间隔层中透射分量和反射分量的作用。 T_t 表明间隔层的两侧子膜系的透过率的影响, R_r 则表明间隔层对整体膜系的相位延迟的作用仅仅和两侧子膜系的反射率有关。因而,在膜系设计中,尽量降低两侧子膜系的反射率是减少膜系相位延迟的关键。

根据公式(5),一些简单的结论有:

(1) 薄膜有效光学厚度趋向于 0 时,相位延迟也趋向于 0;

(2) 入射角趋向于 0 时,即接近垂直入射时,相位延迟也趋向于 0。

这是因为这两条均会导致 $R_r=1$, 从而使得间隔层对整体的相位延迟没有影响。而另一方面,Smith 法中间隔层的选取是任意的,因此所有的层对相位延迟都没有影响,也就是说相位延迟趋向于 0。

2.2 减反射膜相位延迟与波长的关系

低偏振镜头的相位延迟应在整个传感器工作波段均较小,因此此节对薄膜相位延迟与波长的关系做相应的分析。

因膜系计算的复杂性,通过理论进一步分析多层宽带减反射膜的相位延迟具有相当大的困难。Willey 曾利用大量减反射膜例子来研究膜系特性^[13],这里采取类似的方法来分析多层宽带减反射膜的相位延迟。

多层宽带减反射膜是膜系工程应用的重要膜系,往往受专利保护而难以获得详细的参数资料。参考文献中也通常采用折射率-厚度图来表示而不给出精确的膜系参数。对于这类情况,这里是将折射率-厚度图描述的数据作为初始结构进行优化,然后和参考文献中的膜系性能参数进行对比而确定。

常规的宽带减反射膜工作谱段在可见和红外区域居多。因此分别讨论可见及近红外区减反射膜,红外区减反射膜,超宽带减反射膜的情况。

首先分析最常见的可见光及近红外波段减反射膜。为了具有普遍性,表 1 列举了引用自不同领域、不同应用的多种文献中的宽带减反射膜。

表 1 可见光及近红外宽带减反射膜

Tab.1 Visible and near-infrared broadband antireflection coatings

No.	Num-ber of layers	Wavelength range	Incident medium and substrate	Coating materials	Citation
1	6	400-700 nm	A=1;S=1.52	TiO ₂ ;ZnO ₂ ;MgF ₂	[14]
2	15	400-750 nm	A=1;S=BK7	TiO ₂ ;Y ₂ O ₃ ;MgF ₂	[15]
3	19	400-750 nm	A=1;S=1.52	2.10;1.8;1.38	[16]
4	34	400-750 nm	A=1;S=BK7	TiO ₂ ;MgF ₂	[17]
5	8	400-800 nm	A=1;S=1.52	2.35;1.38	[18]
6	8	400-800 nm	A=1;S=1.52	1.95;1.45;1.38	[19]
7	14	400-800 nm	A=1;S=1.52	2.25;1.45;1.38	[19]
8	8	400-900 nm	A=1;S=1.52	2.38;1.38	[20]

其中参考文献中未考虑色散的材料均以材料的

折射率值代替。入射角为 20°、45°可见光及近红外宽带减反射膜的相位延迟如图 1、图 2 所示。

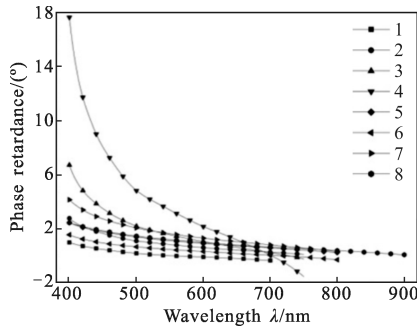


图 1 可见光及近红外宽带减反射膜的相位延迟 ($\theta_0=20^\circ$)

Fig.1 Retardance of visible and near-infrared broadband antireflection coatings ($\theta_0=20^\circ$)

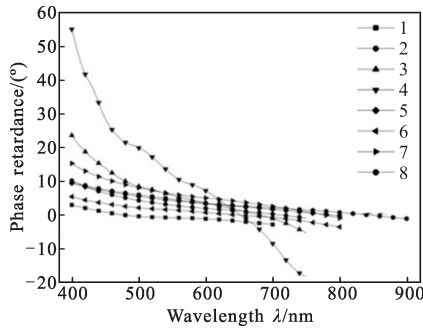


图 2 可见光及近红外宽带减反射膜的相位延迟 ($\theta_0=45^\circ$)

Fig.2 Retardance of visible and near-infrared broadband antireflection coatings ($\theta_0=45^\circ$)

从图 1、2 可以观察到，多层宽带减反射膜的相位延迟在大部分减反谱段内较小，仅在短波区域有明显的增加。相位延迟的大小随着入射角 θ_0 的增加而加大。在入射角 $\theta_0=45^\circ$ 时，甚至出现了 55° 的极大值，这时的相位延迟是不可忽略的。究其原因，结合前面的分析可知，减反射膜层数的增加往往导致薄膜有效光学厚度总和的增加，从而在其他因素不变的情况下带来相位延迟的增加。

另外，图中多层宽带减反射膜在各自的增透光谱波段内呈现明确的单调递减趋势。

下面进一步讨论红外区域的宽带减反射膜的相位延迟。

表 2 引用了一些工作在红外光谱区域的多层宽带减反射膜。红外区的材料较为受限，基底材料往往采用高折射率材料如 Ge, Si 等，因此减反射膜的特性与可见区域减反射膜有所不同。同样利用公式(5)进行计算得到相位延迟如图 3、图 4 所示。

表 2 红外宽带减反射膜

Tab.2 Infrared broadband antireflection coatings

Num-ber of layers	Wavelength range	Incident medium and substrate	Coating materials	Citation
1	800-1 600 nm	A=1;S=1.52	TiO ₂ ;ZnO ₂ ;MgF ₂	[14]
2	800-1 600 nm	A=1;S=BK7	TiO ₂ ;MgF ₂	[17]
3	800-1 600 nm	A=1;S=BK7	TiO ₂ ;MgF ₂	[17]
4	7 700-12 300 nm	A=1;S=4.0	4.2;2.2	[19]
5	7 700-12 300 nm	A=1;S=4.0	4.2;2.2	[19]
6	2 000-16 000 nm	A=1;S=ZnSe	ZnSe;MgF ₂	[21]

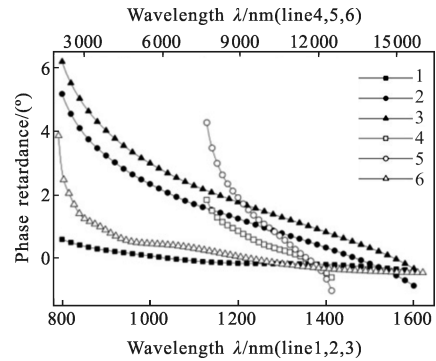


图 3 红外宽带减反射膜的相位延迟 ($\theta_0=20^\circ$)

Fig.3 Retardance of infrared broadband antireflection coatings ($\theta_0=20^\circ$)

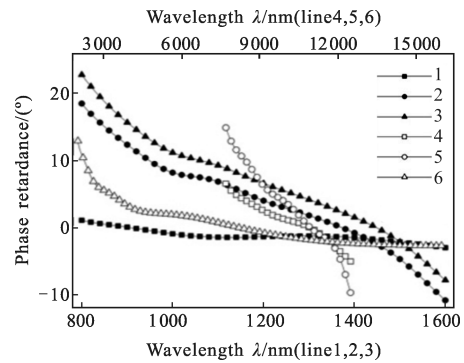


图 4 红外宽带减反射膜的相位延迟 ($\theta_0=45^\circ$)

Fig.4 Retardance of infrared broadband antireflection coatings ($\theta_0=45^\circ$)

图 3、4 显示，红外多层宽带减反射膜的相位延迟和可见近红外的情况总体趋势是一致的。红外区域总体的相位延迟和可见区域相比相对较小，但在大角度入射下，一些膜系的最大相位延迟仍然超过 10° 。在相同谱段的 1、2、3 膜系，相位延迟随着层数增加而增加。

红外宽带减反射膜的相位延迟基本保持随波长单调递减;但是在一些特殊情况下,如膜系 6 在 6 000 nm 附近有微小的起伏,这是由于膜系 6 的超大带宽以及材料色散较大,在局部影响相位延迟的结果。

膜系 6 显示超宽带减反射膜系的相位延迟可能具有一些不同的特点。超宽带减反射膜系这里指带宽 $B=\lambda_{\max}/\lambda_{\min}\geq 3$ 的膜系,膜系工作光谱范围可能包括近紫外和中红外区域。

表 3 引用了多种文献中的超宽带减反射膜系。超宽带膜系往往具有较多的层数;考虑到镀膜工艺,选用的材料也十分受限。其中“*”膜系为自设计膜系,结构为 G[9.49H52.68L25.21H36.27L40.99H13.47L94.62H744L45.95H3289L22.27H121.97L]A,单位为 nm。

表 3 超宽带减反射膜

Tab.3 Ultra-broadband antireflection coatings

Num- No.	Number of Wavelength range layers	Incident medium and substrate	Coating materials	Citation
1	16	A=1;S=1.52	2.38;1.38	[13]
2	16	A=1;S=1.52	2.38;1.38	[13]
3	42	A=1;S=1.52	2.35;1.45	[22]
4	12	A=1;S=BK7	TiO ₂ ;MgF ₂	*
5	16	A=1;S=1.52	2.38;1.38	[13]
6	21	A=1;S=1.52	2.10;1.45; 1.38	[23]
7	9	A=1;S=1.52	2.10;1.45; 1.38	[19]

继续利用公式(5)计算得到的相位延迟如图 5、图 6 所示。

图 5、6 显示,超宽带减反射膜系的相位延迟和

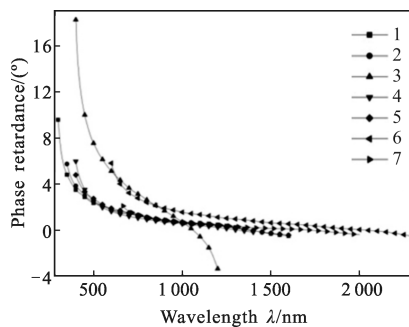


图 5 超宽带减反射膜的相位延迟($\theta_0=20^\circ$)

Fig.5 Retardance of ultra-broadband antireflection coatings($\theta_0=20^\circ$)

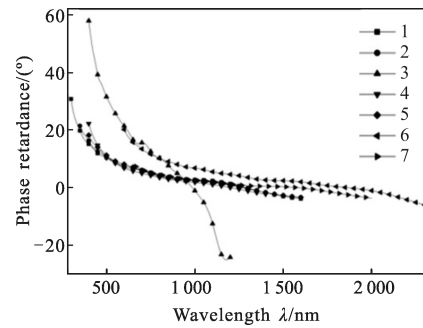


图 6 超宽带减反射膜的相位延迟($\theta_0=45^\circ$)

Fig.6 Retardance of ultra-broadband antireflection coatings($\theta_0=45^\circ$)

前面两类表现一致。由于超宽带的减反光谱区域要求,膜层层数增加,大角度入射相位延迟到接近 60° 。

表 3 中膜系 3 在 45° 入射角时,在工作光谱区域末端(1 200 nm)呈现出与整体单调递减趋势不一致的情况,这是由于随着入射角增大,减反光谱区域向短波方向移动^[12]。在该种情况下,膜系 3 在 1 200 nm 处的反射率已经超过 50%,不再满足减反射膜的要求,相位延迟因而出现异常。

表 1~3 引用的多层宽带减反射膜系的工作波段和形式包含了常规应用的绝大部分。可以发现,在入射介质是空气的情况下且色散影响较小时(符合大多数应用情况),常规多层宽带减反射膜系的相位延迟具有随波长单调递减的特性。

3 多界面组合的相位延迟特性

从公式(3)的结论可知,在各界面相位延迟较小时,多界面组合的相位延迟是各界面相位延迟之和。每一个界面的相位延迟由界面上的光学薄膜决定。而前述分析表明,常规减反射膜的相位延迟随波长单调递减。因此有如下结论:

(1) 对于单波长,可以通过多个界面之间的互相补偿来获得接近于 0 的相位延迟;

(2) 对于宽带光谱,镜头的多个界面相位延迟叠加后仍然是单调递减的,无法补偿。

因而在低偏振镜头的设计中,要保持高透过率并获得低的相位延迟,只能通过降低每一个界面的相位延迟来实现。

4 结论

偏振传感器本身镜头相位延迟是影响偏振探测

精度的重要因素。其相位延迟具有累加特性,即使单个界面的相位延迟并不大,但多个界面累加后会仍然会有不可忽略的相位延迟,这对于偏振传感器来说是不可接受的。另一方面,镜头各界面的相位延迟具有随波长单调递减的特性,因而整个镜头相位延迟也具有相同的特性,导致依靠界面补偿降低总相位延迟难以实现。由此,低相位延迟镜头的设计应主要从减少单个界面相位延迟着手。

参考文献:

- [1] Knobelspiesse K, Cairns B, Mishchenko M, et al. Analysis of fine-mode aerosol retrieval capabilities by different passive remote sensing instrument designs [J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 21457–21484.
- [2] Maignan F, Bréon F –M, Fédèle E, et al. Polarized reflectances of natural surfaces: spaceborne measurements and analytical modeling [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: 2642–2650.
- [3] Wang Yi, Hong Jin, Yang Weifeng, et al. Light resource of on-board calibration for multi-angle polarized radiometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2480–2483. (in Chinese)
- [4] Cheng Minxi, He Zhenjiang, Huang Zuohua. Measurement and application of stokes parameters of polarized light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 109–115. (in Chinese)
- [5] Li Yubo, Zhang Peng, Zeng Yuxiao, et al. Remote sensing measurement by full-Stokes-vector based on opto-electronic modulator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 335–345. (in Chinese)
- [6] Sun Xiaobing, Qiao Yanli, Hong Jin. Review of polarization remote sensing techniques and applications in the visible and infrared[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2010, 5(3): 175–189. (in Chinese)
- [7] Li Yanghui, Shen Weidong, Luo Zhenyue, et al. Analysis of coating-induced polarization aberrations by Jones matrix[C]// *Optical Interference Coatings*, 2010: WC7.
- [8] Daugherty B, Chipman R A. Low Polarization Microscope Objectives[M]. Bellingham: PIE, 2010.
- [9] Cairns B, Mishchenko M, Maring H, et al. Accurate monitoring of terrestrial aerosols and total solar irradiance: the NASA Glory mission[C]//SPIE, 2010, 7826: 78260U.
- [10] Mahler A –B, Diner D J, Chipman R A. Analysis of static and time-varying polarization errors in the multiangle spectropolarimetric imager[J]. *Appl Opt*, 2011, 50(14): 2080–2087.
- [11] Nee S –M F. Error analysis for Mueller matrix measurement [J]. *J Opt Soc Am A*, 2003, 20(8): 7.
- [12] Macleod H A. Thin-film Optical Filters [M]. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [13] Willey R R. Further guidance for broadband antireflection coating design[J]. *Appl Opt*, 2011, 50(9): C274–C278.
- [14] Honciuc G, Singurel G. Antireflection optical coatings for the spectral range 400–700 nm, 400–900 nm and 800–1600 nm [J]. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2004, 6(4): 1199–1205.
- [15] Liou Y –Y. Design of wide-angular-incidence antireflection coating over visible spectral region [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, 45(5A): 4051–4057.
- [16] Liou Y –Y, Liu Y T. Digital designs of broadband visible antireflection coating for wide angular incidence[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44(1A): 163–167.
- [17] Liou Y –Y, Chen Y P, Wang S K, et al. Optimization of a broadband visible or near-infrared antireflection coating design using recurrent circling search algorithm[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, 50: 032501.
- [18] Dobrowolski J A, Tikhonravov A V, Trubetskov M K, et al. Optimal single-band normal-incidence antireflection coatings [J]. *Appl Opt*, 1996, 35(4): 644–658.
- [19] Baumeister P. Starting designs for the computer optimization of optical coatings[J]. *Appl Opt*, 1995, 34(22): 4835–4843.
- [20] Zheng Zhengrong, Gu Peifu, Chen Haixing, et al. Design and preparation of super broadband antireflection coating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 2026–2029. (in Chinese)
- [21] Pan Yongqiang, Hang Lingxia, Wu Zhensen, et al. Design and fabrication of ultra broadband infrared antireflection hard coatings on ZnSe in the range from 2 to 16 nm[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009, 52: 193–195.
- [22] Tikhonravov A V, Trubetskov M K, Amotchkina T V, et al. Estimation of the average residual reflectance of broadband antireflection coatings [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(13): C124–C130.
- [23] Hobson M P, Baldwin J E. Markov-chain Monte Carlo approach to the design of multilayer thin-film optical coatings [J]. *Appl Opt*, 2004, 43(13): 2651–2660.