

近红外双波段消偏振分光膜的设计

王文梁¹ 郝宏刚²

(¹ 南昌大学物理系, 江西 南昌 330031; ² 重庆邮电大学光电工程学院, 重庆 400065)

摘要 大角度倾斜入射时, 光学薄膜表现出强烈的偏振效应。这一现象在大部分应用场合会带来系统光学性能的劣变, 然而控制偏振效应的光学薄膜设计是困难的。分析了产生偏振效应的内在原因, 采用由三种全介质材料构成的四层膜堆和等效层结构膜堆组合得到初始膜系, 结合单纯形法和共轭梯度法的多级优化, 设计了 1300~1330 nm 和 1535~1565 nm 两个波段范围内分光比都为 1:1 的近红外双波段消偏振分光膜。结果显示, 在 45° 入射时, 在两个工作波段的 s 分量和 p 分量的反射率曲线偏振分离小, 反射和透射引起的相位变化也控制在很小范围。

关键词 薄膜; 近红外; 双波段; 偏振效应

中图分类号 O484 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.1131002

Designs of Near Infrared Two-Waveband Non-Polarizing Beam Splitter

Wang Wenliang¹ Hao Honggang²

¹ Department of Physics, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China
² School of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing, 400065, China

Abstract When used at oblique angle incidence, optical thin films exhibit strong polarization effects. This phenomenon will make the optical performance worsen in most application cases. But the design of optical thin film system to control the polarization effect is very difficult. The physical mechanism of the polarization effect is analyzed first, and then a near-infrared two-waveband nonpolarizing beam splitter at 1300~1330 and 1535~1565 nm spectral ranges with the splitting ratio of 1:1 is designed. The initial thin film stack is formed with a four-layer set and an equivalent layer using three all dielectric materials. Then it is optimized in multiple steps by simplex and conjugate gradient algorithms. According to the results, in the working spectrum range with the incident angle of 45°, it maintains a very low polarization ratio whether reflectance or transmittance induces phase changes.

Key words thin films; near infrared; two-waveband; polarization effect

OCIS codes 310.1210; 310.5448

1 引 言

许多现代光学系统都比较复杂, 常有不同光路的叠加, 需要同时多个波段满足一定要求^[1~3]。另外, 为了实现像的旋转, 需要进行不同光路的叠加以及激光腔的折叠等, 其光轴都是弯曲的, 会遇到很多倾斜入射的光学元件。光在倾斜入射时, 由于膜层对两个偏振状态的有效折射率不同, 引起反射率、透射率和相位移动都不同, 因此在反射光和透射光中会引入偏振效应。这一现象对大多数光学系统带来的都是光学性能的劣变, 消除倾斜入射时的

偏振效应的影响是光学薄膜设计与制造领域的一个难题^[4]。

理想的消偏振膜系设计, 应该在一个较大的波长范围内, 使 s 偏振光和 p 偏振光具有相同的反射率和透射率特性, 且相位延迟很小。要使人射角具有一个合理的范围, 而且要没有吸收。金属材料相对于全介质材料, 具有比较小的偏振效应。因此, 采用包括金属层的多层膜设计能在较大的波长范围内使 s 偏振光和 p 偏振光具有近似相同的特性^[5~8], 但金属材料的强烈吸收在激光系统中是一个问题。

收稿日期: 2011-04-14; 收到修改稿日期: 2011-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(60907041)资助课题。

作者简介: 王文梁(1978—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: w. l. wang@163. com

为解决薄膜的消偏振问题,曾经有过大量的研究工作。Baumeister等^[9,10]较早考虑消偏振理论,但在工作波长范围内,在实际折射率材料中并不能得到期望的解。1976年,Thelen^[11]的理论显示了采用3种或4种材料的组合,有可能得到满足要求的解,然而该消偏振分光膜的工作波长范围非常有限。接下来,有很多致力于采用全介质材料来设计消偏振分光膜的报道。近些年,也有很多采用数值方法的优化设计,取得了一些不错的结果^[12~15]。

以上结果多为可见光波段范围,而实际应用中常用的近红外波段的相关研究较少。1.31 μm和1.55 μm波长激光器是近红外系统的常用光源,石英材料在该两处波长位置具有零色散和低损耗特性,对于光电系统的性能提高具有重要意义。由于偏振效应对于倾斜入射的单层介质膜是固有属性,采用折射率匹配的多层膜结构在有限范围内可减弱这种角度变化引起的现象。由于介质材料明显的色散现象,材料在多个波长的折射率匹配要比单波长困难,从而多波段的消偏振处理要比单波段的情况困难许多。

本文通过对偏振效应的主要表现和内在原因进行分析,采用由3种全介质材料构成的四层膜堆和对称性结构膜堆组合得到初始膜系,结合单纯形法

和共轭梯度法的多级优化,设计了1300~1330 nm和1535~1565 nm两个波段范围内分光比都为1:1的近红外双波段消偏振分光膜。

2 薄膜偏振效应

根据波动光学理论,当一束光以θ角倾斜入射到薄膜上时,TH波(或p偏振光)和TE波(或s偏振光)将表现出不同的有效折射率

$$\begin{cases} \eta_p = \frac{N}{\cos \theta} \\ \eta_s = N \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

根据电磁场边界连续性条件,在折射率为 n_1 和 n_2 的两介质分界面上,以 θ_1 倾斜角入射时,s分量和p分量的反射系数分别为

$$\begin{cases} r_s = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \\ r_p = \frac{n_1 \cos \theta_2 - n_2 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1} \end{cases} \quad (2)$$

对于单层膜,如果两界面的反射系数分别为 r_{1s}, r_{1p} 和 r_{2s}, r_{2p} ,则根据菲涅耳系数的递推算法,可以得到单层膜的反射率和反射引起的相位变化:

$$\begin{cases} R_p = [r_{1p} + r_{2p} \exp(-i2\delta)] / [1 + r_{1p} r_{2p} \exp(-i2\delta)] \\ \varphi_p = [-r_{2p}(1 - r_{1p}^2) \sin 2\delta] / [r_{1p}(1 + r_{2p}^2) + r_{2p}(1 + r_{1p}^2) \cos 2\delta] \\ R_s = [r_{1s} + r_{2s} \exp(-i2\delta)] / [1 + r_{1s} r_{2s} \exp(-i2\delta)] \\ \varphi_s = [-r_{2s}(1 - r_{1s}^2) \sin 2\delta] / [r_{1s}(1 + r_{2s}^2) + r_{2s}(1 + r_{1s}^2) \cos 2\delta] \\ \delta = 2\pi n_1 d_1 \cos \theta_1 / \lambda \end{cases} \quad (3)$$

可见,由于边界连续性条件,而倾斜入射光的s分量和p分量等效导纳不同,自然光倾斜入射到单层薄膜上时,将不可避免地引入偏振效应,p分量和s分量的反射率和反射引起的两个分量的相位变化都是不同的。同时,对于透射率与透射引起的两个分量的相位变化也可以得出类似结论。而对于多层膜系,一般情况下也将在倾斜入射时表现出强烈的偏振效应。

3 近红外双波段消偏振设计

由以上分析可知,偏振效应的主要表现是倾斜入射光的s分量和p分量的反射率(或透射率)以及反射(或透射)引起的两个分量的相位变化都不相同,有一定的偏振分离。引起这一问题的关键原因

是倾斜入射光经过薄膜传播时,s分量和p分量的等效导纳不同。这对于单层薄膜是固有属性,必然存在而无法消除。而对于多层膜系,采用一定的材料匹配和特定的膜系结构,有可能会使整个薄膜系统对于倾斜入射光的s分量和p分量具有非常相近的等效导纳,从而消除偏振偏振效应的影响,这是消偏振设计的基本思路。

Willey^[16]在研究众多消偏振的设计成果时发现:由3种材料构成的周期性4层λ/4结构膜堆,当周期数变大时,膜堆对倾斜入射光的s分量和p分量的等效导纳逐渐接近,而且反射或透射引起的两个分量的相位变化相同,偏振效应减弱。参考波长处的反射率也随着周期数的增大而变高。此结构的性质非常类似于正入射情况下的周期性两层λ/4结构膜堆。另外,3种材料构成的等效层结构可改变其

他波段处的特性,而不影响参考波长处的光谱特性。此结构类似于正入射情况下使用的半波层结构。

所要设计的近红外双波段消偏振分光膜,要求在 45° 倾斜入射时,在 1300~1330 nm 和 1535~1565 nm 波段,两个分量的反射率或透射率特性以及反射或透射引起的两个分量的相位变化都非常接近。选用 Air|L(MLMH LMHMHML)³MLMH H|Substrate 做为初始膜系,其中 H,M 和 L 分别表示 TiO₂(1420 nm 处折射率为 2.24),Al₂O₃(1420 nm 处折射率为 1.63)和 MgF₂(1420 nm 处折射率为 1.37)材料在入射光 45° 倾斜入射时对应参考波长 1420 nm 的 λ/4 厚度,基底材料是 K9 玻璃。其对于 45° 倾斜入射光 s 分量和 p 分量的反射率特性和设计目标如图 1 所示。4 层的 MLMH 膜堆是主体结构,具有

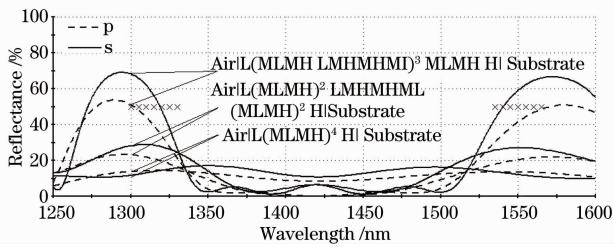


图 1 初始膜系 Air|L(MLMH LMHMHML)³H|Substrate 的反射率曲线(H:TiO₂,M:AL₂O₃,L:MgF₂;入射角 45°,参考波长 1420 nm)

Fig.1 Reflectance curve of initial thin film stack Air|L(MLMH LMHMHML)³MLMH H|Substrate (H:TiO₂,M:AL₂O₃,L:MgF₂;incident angle 45°,reference wavelength 1420 nm)

对称性特点的等效层结构 LMHMHML 主要用来改造其他波段的光谱特性,而靠近空气的入射介质 L 层和靠近基底 K9 玻璃的 H 层是导纳匹配层。

为更好地消除倾斜使用时的偏振效应,包括反射率和透射率以及反射或透射引起的相位延迟,进一步的优化设计是必须的。优化目标设为入射角 45° 时在工作波长 1300~1330 nm 和 1535~1565 nm 内满足

$$\begin{cases} |R_s - 50\%| \leq 5\% \\ |R_p - 50\%| \leq 5\% \\ |R_s - R_p| \leq 3\% \\ |\Delta_r| \leq 5^\circ \\ |\Delta_t| \leq 5^\circ \end{cases} \quad (4)$$

根据 Dobrowolski 多级优化的思想^[17],采用单纯形法和共轭梯度法多级优化后,其反射率特性曲线如图 2 所示。优化后的膜系结构如表 1 所示,表中 H,M 和 L 分别表示 TiO₂,Al₂O₃ 和 MgF₂ 材料在入射光 45° 倾斜入射时对应参考波长(1420 nm)的 λ/4 波长厚度。

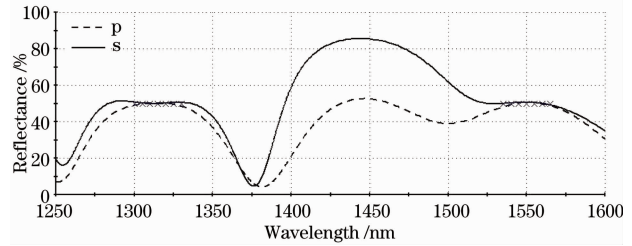


图 2 优化后得到的膜系反射率曲线
Fig.2 Reflectance curve of thin film stack after optimization

表 1 对应于图 2 的膜系结构

Table 1 Structure of thin film stack corresponding to Fig.2

Air 1.1825L
1.0474M 0.9113L 0.4692M 1.9771H 2.1488L 1.2632M 1.0884H 1.0745M 1.0994H 0.8290M 0.8781L
1.3410M 1.6606L 0.6230M 1.5463H 1.1116L 0.8052M 1.1951H 1.0654M 1.0653H 1.4600M 1.2556L
0.6497M 0.9276L 1.4917M 0.7516H 1.3396L 1.2934M 1.7876H 0.3194M 0.8896H 0.9652M 1.2188L
1.5544M 0.9398L 0.9589M 1.7737H Glass

1300~1330 nm 波段的反射率特性曲线及反射和透射引起的相位延迟如图 3 所示。由图 3(a) 可以看到,|R_p-50%| 最大值为 1.4707%,平均值为 0.4688%;|R_s-50%| 最大值为 0.7652%,平均值为 0.3357%;|R_s-R_p| 最大值为 2.1530%,平均值为 0.7690%。由图 3(b) 可以看到,反射引起的相位变化 |Δ_r| 最大值为 1.6205°,平均值为 0.7509°。由图 3(c) 可以看到,透射引起的相位变化 |Δ_t| 最大值为 4.9249°,平均值为 2.5071°。

和透射引起的相位延迟如图 4 所示。由图 4(a) 可以看到,|R_p-50%| 最大值为 1.7183%,平均值为 0.6139%;|R_s-50%| 最大值为 0.6837%,平均值为 0.3923%;|R_s-R_p| 最大值为 1.6843%,平均值为 0.4691%。由图 4(b) 可以看到,反射引起的相位变化 |Δ_r| 最大值为 2.2908°,平均值为 1.1461°。由图 4(c) 可以看到,透射引起的相位变化 |Δ_t| 最大值为 4.5098°,平均值为 2.3866°。

可以看到,在 1300~1330 nm 和 1535~1565 nm 两个波段范围内,对于 45° 倾斜入射光来说,其 s 分量

1535~1565 nm 波段的反射率特性曲线及反射

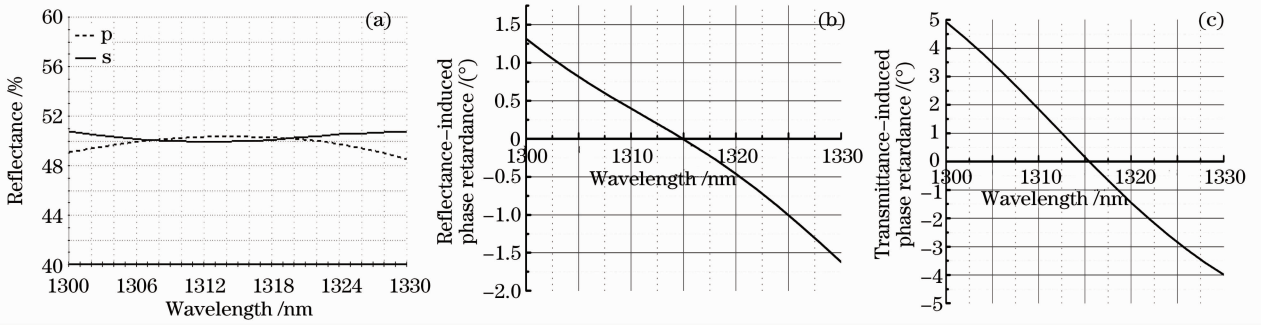


图 3 1300~1330 nm 波段处的偏振效应。(a) s 和 p 分量的反射率曲线；(b) 反射引起的相位延迟；
(c) 透射引起的相位延迟

Fig. 3 Polarization effect at 1300~1330nm. (a) Reflectance curve of s and p components; (b) reflectance-induced phase retardance; (c) transmittance-induced phase retardance

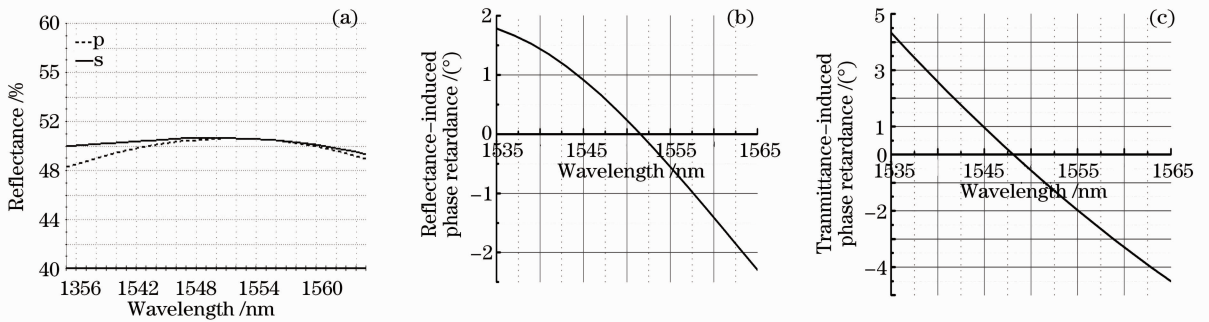


图 4 1535~1565 nm 波段处的偏振效应。(a) s 和 p 分量的反射率曲线；(b) 反射引起的相位延迟；
(c) 透射引起的相位延迟

Fig. 4 Polarization effect at 1535~1565 nm. (a) Reflectance curve of s and p components; (b) reflectance-induced phase retardance; (c) transmittance-induced phase retardance

和 p 分量的反射率基本相同。由于采用的材料都是介质材料,吸收基本可忽略,则两个分量的透射率特性也基本相同。而且反射或透射引起的两个分量间的相位延迟也都满足设计目标,控制在较小的范围。

可以说,此设计在近红外的两个波段较好的控制了偏振效应。鉴于薄膜实际制备过程中难免存在的材料参数误差,进一步采用蒙特卡罗方法对该设计的敏感度进行分析。图 5 分别显示了薄膜物理厚度

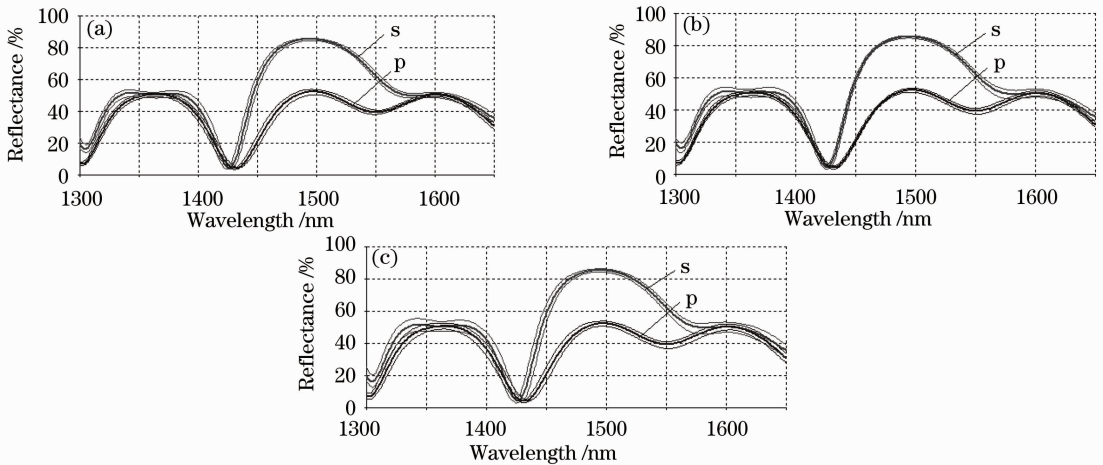


图 5 基于蒙特卡罗方法的敏感度分析。(a)以 0.5% 的相对误差改变物理厚度；(b)以 0.5% 的相对误差
改变材料折射率；(c)以 0.5% 的相对误差同时改变物理厚度和材料折射率

Fig. 5 Sensitivity analysis based on Monte-Carlo method. (a) Varying physical thickness by 0.5% relative error; (b) varying refractive index by 0.5% relative error; (c) varying both physical thickness and refractive index by 0.5% relative error

0.5%的相对误差、折射率参数0.5%的相对误差以及薄膜材料同时具有物理厚度和折射率参数0.5%的相对误差时该设计的光谱性能变化。可以看到,3种误差情况下引起的性能劣变还是比较小的。采用离子束辅助或溅射等稳定的高精度现代薄膜制备技术,控制薄膜材料参数0.5%的相对误差是可行的。

4 结 论

由于倾斜入射时,薄膜对于入射光的s分量和p分量的等效导纳不同,引起薄膜两个分量反射率或透射率以及反射或透射引起两个分量的相位变化都不同,表现出强烈的偏振效应。这对于单层薄膜是固有属性,必然存在。而对于多层膜,可以选择合适的材料匹配与巧妙的设计,尽量消除偏振效应的影响。分析了产生偏振效应的内在原因,采用由3种全介质材料构成的四层膜堆和等效层结构膜堆组合得到初始膜系,结合单纯形法和共轭梯度法的多级优化,设计了1300~1330 nm和1535~1565 nm两个波段范围内分光比都为 $R:T=1:1$ 的近红外双波段消偏振分光膜。结果显示,在 45° 入射时,在两个工作波段的s分量和p分量的反射率曲线偏振分离小,反射和透射引起的相位变化也控制在很小范围。基于蒙特卡罗方法的敏感度分析表明,该设计对于薄膜材料参数0.5%的相对误差引起的光谱性能劣变比较小。

参 考 文 献

- 1 Zhou Ming, Zhao Yuan'an, Li Dawei *et al.*. Laser damage of optical film with the combined irradiation of 1064 nm and 532 nm pulse [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3050~3054
周 明, 赵元安, 李大伟 等. 1064 nm 和 532 nm 激光共同辐照薄膜的损伤[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 3050~3054
- 2 He Caimei, Fu Xiuhua, Sun Yulin *et al.*. Study and fabrication of

- multi-band laser filter film [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1550~1554
贺才美, 付秀华, 孙钰林 等. 多波段激光滤光膜的研制[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1550~1554
- 3 Shi Peng, Fu Xiuhua, Sun Yan *et al.*. Design and fabrication of double wavelength laser protective infrared antireflection coatings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0407003
石 澎, 付秀华, 孙 岩 等. 双波段激光防护红外减反膜的研制[J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0407003
- 4 H. A. Macleod. *Thin-Film Optical Filters* (3rd ed.) [M]. London: Institute of Physics Publishing, 2002. 368
- 5 S. J. Reformat, A. F. Turner. Polarization Free Beam Divider [P]. U. S. patent 3,559,090, 1991
- 6 S. Itoh, M. Sawamura. Achromatized Beam Splitter of Low Polarization [P]. U. S. patent 4,415,233, 1983
- 7 L. Y. Chang, S. H. Mo. Design of non-polarizing prism beam splitter [C]. *Optical Interference Coatings*, OSA Technical Digest Series, 1988, **6**: 381~384
- 8 H. A. Macleod, Z. Milanovic. Immersed beam splitters: an old problem [C]. *Optical Interference Coatings*, OSA Technical Digest Series, 1988, **6**: 28~30
- 9 P. Baumeister. The transmission and degree of polarization of quarter-wave stacks at non-normal incidence [J]. *Optica Acta*, 1961, **8**(2): 105~119
- 10 V. R. Costich. Reduction of polarization effects in interference coatings [J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(4): 866~870
- 11 A. Thelen. Nonpolarizing interference films inside a glass cube [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(12): 2983~2985
- 12 A. V. Tikhonravov, M. K. Trubetskov. Development of the needle optimization technique and new feature of optilayer design software [C]. *SPIE*, 1994, **2253**: 10~20
- 13 Alexander V. Tikhonravov, Michael K. Trubetskov, Gary W. DeBell. Application of the needle optimization technique to the design of optical coatings [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(28): 5493~5508
- 14 Jerzy Ciosek, J. A. Dobrowolski, Glenn A. Clarke *et al.*. Design and manufacture of all-dielectric nonpolarizing beam splitters [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(7): 1244~1250
- 15 P. Ma, P. G. Verly, J. A. Dobrowolski *et al.*. All-dielectric front-surface non-polarizing beam splitter operating between 500 and 600 nm [C]. *Optical Interference Coatings*, OSA Technical Digest Series, 2004, TuF10
- 16 Ronald R. Willey. Building blocks for nonpolarizing optical coatings [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **33**(20): 6230~6235
- 17 J. A. Dobrowolski. Computer design of optical coatings [J]. *Thin Solid Films*, 1988, **16**(3): 97~110