

文章编号: 0253-2239(2006)05-0792-5

基于梳状小波理论的颜色滤光片设计

王 丹^{1,2} 徐学科^{1,2} 沈自才^{1,2} 王英剑¹ 范正修¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 渐变折射率薄膜因为消除了界面而克服了传统的分层介质膜的固有弊端。探讨了一种基于这种渐变膜系的设计方法。从小波理论与渐变折射率增透理论出发,以分层介质高反膜系为参照,给出了采用梳状(Rugate)滤光片设计不同类型颜色滤光片的设计原理,并以目前背投系统中使用的红、绿、蓝颜色滤光片为指标,理论设计出了具有优良光谱特性的红、绿、蓝颜色滤光片;对该设计结果进行了角度敏感性分析、偏振效应分析与传统的反射膜叠加法得到的分层膜系进行比较,发现通过梳状滤光片理论设计的滤光片较传统的多层膜滤光片具有更小的角度敏感性和较小的偏振效应。

关键词: 薄膜光学; 颜色滤光片; 渐变折射率; 梳状滤光片; 小波

中图分类号: O484 文献标识码: A

Color Filter Design Based on Rugate Wavelets Theory

Wang Dan^{1,2} Xu Xueke^{1,2} Shen Zicai^{1,2} Wang Yingjian¹ Fan Zhengxiu¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)
(² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: The gradient refractive index coating overcomes the initial disadvantages of the traditional discrete coating by eliminating the interfaces. A way of designing this kind of coatings is provided. Based on the wavelets theory and the gradient refractive index antireflection theory, with the high-reflection discrete multilayer dielectric coatings as the reference, the design principle with Rugate filters of different type and color filters is presented, and red, blue and green color filters with high spectral performance are designed theoretically according to the targets of color filters used in the rear display system. The angular sensitivity and polarization effect of the new design are compared with the multilayer coating obtained by the traditional high-reflection coating stacking method, and it is found that the former is less sensitive to the incidence angle and exhibits less polarization effect.

Key words: thin film optics; color filter; gradient refractive index; Rugate filter; wavelets

1 引 言

梳状(Rugate)滤光片是渐变折射率薄膜的一种,其折射率沿薄膜界面的法向方向呈周期性正弦或余弦变化的结构^[1],它能够反射一个较窄的带宽并对其余的带宽高透,类似传统的高反膜系 $[(HL)^n]$,但没有高级次反射带且其截止带较陡。因为其折射率呈现渐变,克服了传统的分层膜层间界面的跃变,光谱特性、散射损失、机械性能等属性均优于传统的分层膜系^[2]。

梳状滤光片代表了一种革新的膜系设计观念。自 20 世纪 80 年代问世以来,薄膜学者从电磁场理论

出发,利用傅里叶变换,设计出了不同类型的滤光片^[3~8],中国科学院上海光学精密机械研究所薄膜中心沈自才等^[2,3,9]在渐变折射率薄膜性能及实现方面也做了很多工作,但因为这种渐变膜系的特殊性,其膜系设计理论不像分层介质膜系理论那么完善,对于一些具有高要求的膜系设计,还处于尝试阶段。

1995 年 William H. Southwell 等^[6]是最早依据渐变折射率增透膜理论及小波(wavelets)^[7,8]理论进行膜系设计。但是他的工作仅针对如何展宽反射带宽做了一定的研究,本文在该理论上通过比较梳状滤光片与 $(HL)^n$ 型膜系的特点,利用传统的

作者简介: 王 丹(1981~),女,河南新乡人,中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生,主要从事背投系统中光学引擎的研究及高性能颜色滤光片的设计及制备。E-mail: sunnywd@mail.siom.ac.cn

收稿日期: 2005-06-27; 收到修改稿日期: 2005-09-19

主膜系添加匹配层的设计思想^[1,10],设计出了不同类型的高性能颜色滤光片,并且对滤光片的角度敏感性及其偏振效应进行了分析。

2 设计原理

普通的梳状滤光片其截止带处的特性与高反膜

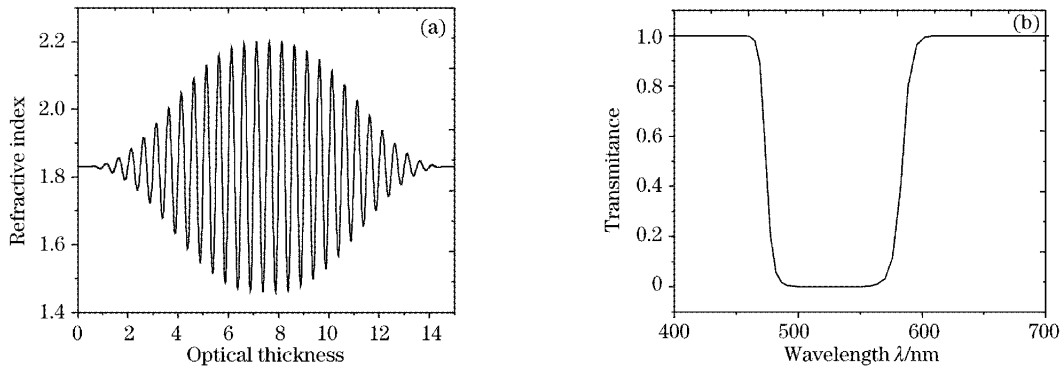


图1 梳状小波函数折射率曲线(a)及其理论透过率曲线(b)

Fig. 1 Curves of refractive index of the Rugate wavelet function (a) and the theoretical transmittance (b)

图1中渐变折射率小波方程^[7]如(1)式

$$n(x) = n_a + 0.5(n_h - n_l)A(x)\sin(4\pi x/\lambda_0 + \phi), \quad (1)$$

其中 n_h 、 n_l 分别表示高、低折射率, $n_a = (n_h + n_l)/2$ 表示平均折射率。 ϕ 表示正弦波的初始相位; x 表示膜层光学厚度, $A(x)$ 表示振幅修整函数。

$$A(x) = 10t^3 - 15t^4 + 6t^5, \quad (2)$$

t 表示垂直入射时膜层光学厚度。

$$t = \begin{cases} 2x/T, & x < T/2 \\ 2(T-x)/T, & x > 2(T-x)/T \end{cases}$$

T 表示一个小波的光学厚度, $T = N_c\lambda_0/2$, N_c 表示一个小波包含的正弦函数周期数, λ_0 表示参考波长。

图1(a)中小波方程各参量分别为 $n_h = 2.2$, $n_l = 1.46$, $\lambda_0 = 530 \text{ nm}$, $N_c = 30$ 。

根据式(1)所示小波方程可以很容易的将通带波纹消除掉,但截止带的宽度较窄,通过小波叠加可以展宽截止带或得到分离的高反带。

类似高反膜的叠加,在小波后叠加一串小波,新叠加的小波参考波长为前一个小波的倍数(以下称扩展小波系数)。新叠加的小波也可以从前一个小波的中间开始叠加^[6,7],通过调整新叠加小波正弦函数的初始相位使其在两个小波间均匀过渡。也可实现平均折射率不同的两小波叠加,只要在两膜系中间加上渐变层即可。

主膜系确定后,在入射介质和主膜系、主膜系与出射介质或者平均折射率不同的两主膜系之间镀上

系截止带处呈现类似的特点,截止度随峰谷值折射率之差及周期数变大而变大,截止带宽比高反膜系确定的带宽稍小,这是因为在部分膜层处折射率之差没有达到高低折射率之差。但其截止波长两旁的波纹影响了其分光性能。通过小波修整后可以消除旁瓣及其附近的通带波纹,如图1所示。

一层折射率渐变的过渡膜层,过渡区膜层折射率变化采用式(2)所示的五次方函数,如此,便可实现两膜层间的零反射。

3 滤光片设计

根据上面的理论可以设计不同类型的分光滤光片,包括截止、带通及负滤光片。先根据小波理论设计出达到不同分光要求的主膜系,然后在主膜系两侧添加匹配层即过渡层。确定主膜系时以高反膜的参量选取为参照,适当选取高低折射率材料,参考波长,小波光学厚度,扩展小波系数,正弦波初始相位等参量。下面根据目前背投系统中使用的颜色滤光片的指标,进行红、绿、蓝颜色滤光片设计。

设计中采用材料 $n_h = 2.2$, $n_l = 1.46$, 入射介质 $n_0 = 1.0$, 出射介质 $n_s = 1.52$, 一个小波光学厚度 $T = 30\lambda_0/2$, 渐变膜的光学厚度 $T_m = 10\lambda_0/2$ 。

3.1 红色滤光片

图1中的截止带宽对红色滤光片来说偏短,在其基础上再叠加两个小波即可满足要求,如图2所示。扩展小波系数 1.14, 1.27, 小波初始相位分别为 $0, -\pi/6, -2\pi/6$, 入射介质为空气, $n_0 = 1.0$, 出射介质为 BK7 基片, $n_s = 1.52$, 第二、三个小波叠加时分别从前一个小波的中间开始叠加,如图2(a)。图2(b)表示该种小波情况下的理论透过率曲线图,将参考波长选为 423 nm, 得到的红色滤光片 50% 透过波长为 597 nm。

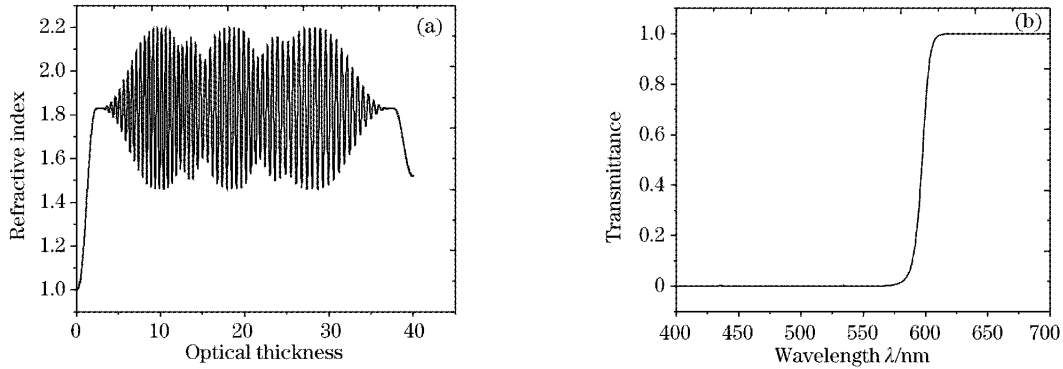


图 2 (a)红色滤光片折射率随厚度变化图, (b) 0°入射时膜层透过率曲线图

Fig. 2 (a) Red filter refractive index dependent on the optical thickness, (b) design transmittance curve of (a) at normal incidence

3.2 蓝色滤光片

将图 2 中参考波长修改为 575 nm 即可实现蓝

色滤光片的设计。如图 3 所示,此时 50%透过波长为 514.5 nm。

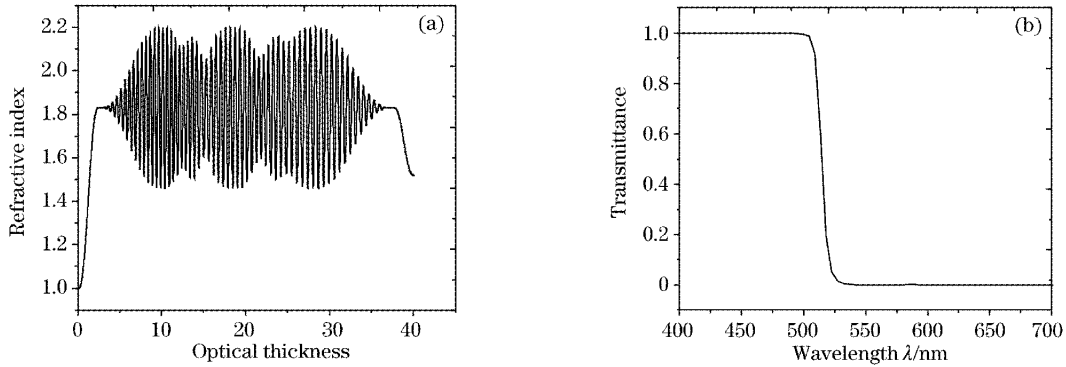


图 3 (a)蓝色滤光片折射率随厚度变化图, (b) 0°入射时蓝色滤光片理论设计透过率曲线图

Fig. 3 (a) Blue filter refractive index dependent on the optical thickness, (b) design transmittance curve of (a) at normal incidence

3.3 绿色滤光片

调整扩展小波倍数,最终得到的结果如图 4 所示,扩展小波系数 1.49, 1.7;小波初始相位分别为 0, -4π/6, -4π/6;参考波长 427 nm, 50%透过波长

分别为 475 nm, 572 nm。

带通膜的小波叠加时,因为扩展小波系数较大。采用图 4 所示的方法,叠加小波从上一个波中间开始叠加,容易使叠加处的小波曲线不连贯,并且新

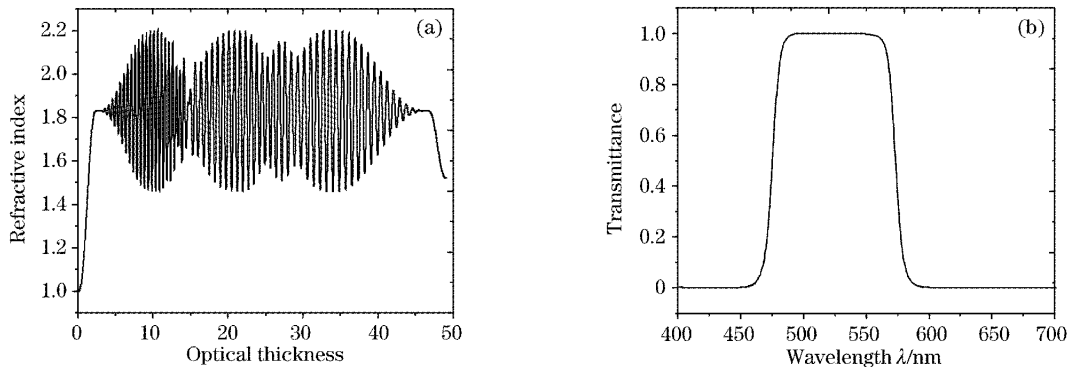


图 4 (a)绿色滤光片折射率随厚度变化图, (b) 0°入射时绿色滤光片理论设计透过率曲线图

Fig. 4 (a) Green filter refractive index dependent on the optical thickness, (b) design transmittance curve of (a) at normal incidence

叠加的小波相对于前一个小波的相位也较难确定,容易影响膜系的性能。为此,可以采取 2 节中第一种方法,新叠加的小波从前一个小波的尾部开始叠加。这样,虽然膜系的厚度有所增加,但设计及制造

都相对于第二种方法较为简单,如图 5 所示,小波初始相位分别为 $0, 0, -\pi/6$, 其余参量与图 4 相同, 50% 透过波长分别为 475 nm, 573 nm。

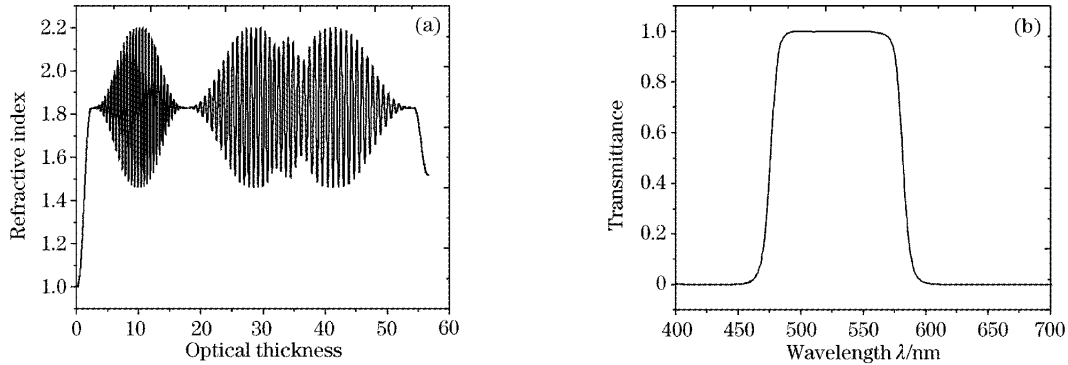


图 5 (a) 绿色滤光片折射率随厚度变化图, (b) 绿色滤光片理论设计透过率曲线图

Fig. 5 (a) Green filter refractive index dependent on the optical thickness, (b) design transmittance curve of (a) at normal incidence

4 讨 论

4.1 角度敏感性分析

在实际使用中,一方面入射光束具有发散角,另外在很多领域内要求倾斜使用,所以入射光线相对于膜面来说并不是垂直入射,而其光谱曲线可能会因光线入射角度的变化而产生漂移。图 6 以蓝色滤光片为例,对梳状滤光片设计的角度敏感性作了比较分

析。图 6(a) 中梳状蓝色滤光片,参考波长 575 nm, 0° 入射时 50% 透过波长 514.5 nm, 15° 入射时为 509 nm, 角度漂移 5.5 nm; 图 6(b) 中高反膜系[基础膜系(HL)¹³1.14(HL)¹³, $n_h = 2.2, n_l = 1.46$]经厚度优化(0° 入射)设计出来的蓝色滤光片,参考波长 582 nm, 0° 入射时 50% 透过波长 514.5 nm, 15° 入射时 508.5 nm, 角度漂移 6 nm。

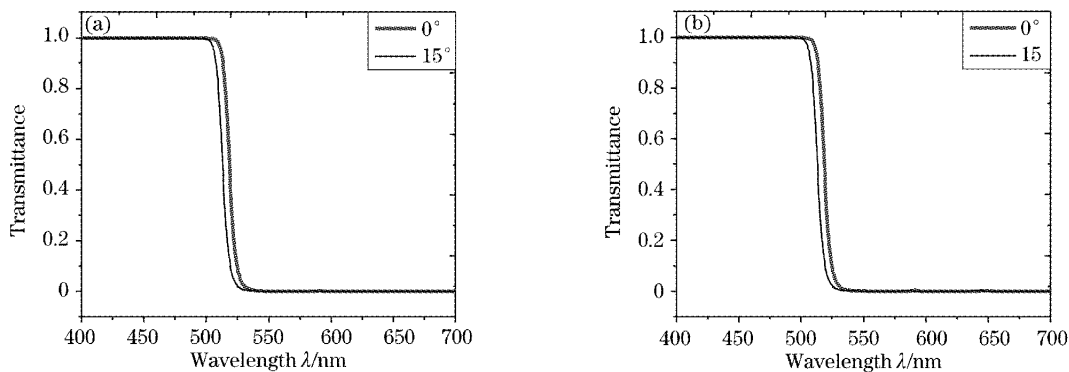


图 6 (a) 梳状蓝色滤光片 15° 角度漂移情况, (b) 高反膜 0° 优化设计后的蓝色滤光片角度漂移情况

Fig. 6 15° angle sensitivity of blue filters based on the Rugate wavelets design (a) and on the traditional (HL)ⁿ design (b)

由图 6 可知,梳状滤光片因为截止带宽比高反膜相比有所压缩,其角度敏感性比高反膜要好些,但在小角度入射时效果不是很明显,下面在 45° 时对这两种滤光片的偏振效应进行分析,可以很明显的看到梳状滤光片在这方面的优势。

4.2 偏振效应分析

光束的发散效应或者滤光片本身在倾斜状态下使用时其偏振效应也是必须考虑的。梳状滤光片及

其小波压缩了带宽, p、s 偏振分离比高反膜系设计的滤光片有所减小。图 7 仍以图 3 设计的蓝色滤光片为例,对梳状滤光片设计的滤光片与高反膜系设计的滤光片的偏振效应作一下比较。图 7(a) 中梳状蓝色滤光片在 45° 入射时 50% 透过波长 p-524 nm, s-507 nm, p、s 偏振分离 17 nm, 参考波长选为 623 nm; 图 7(b) 中图 6(b) 中高反膜优化后的蓝色滤光片 45° 入射时, 50% 透过波长 p-506.5 nm,

s-527 nm, p, s 偏振分离 20.5 nm, 参考波长选为 645 nm。

由图 7 可以看到,大角度入射时梳状滤光片设

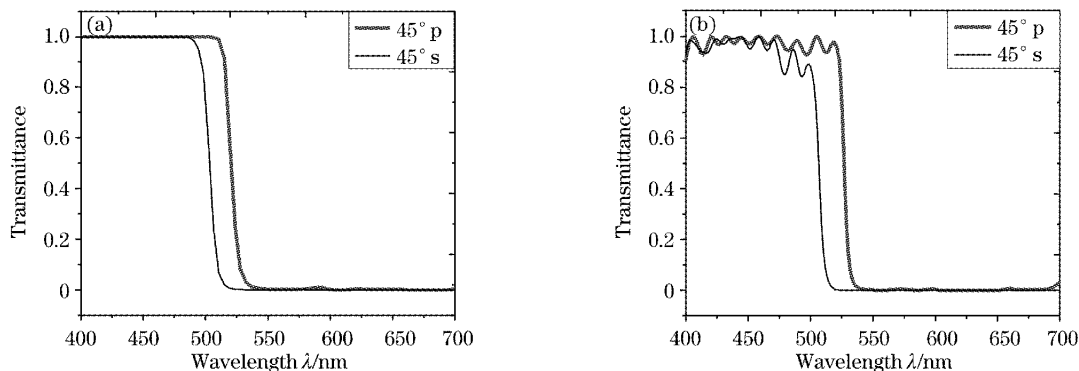


图 7 (a)梳状蓝色滤光片 45°偏振情况,(b)高反膜 0°优化设计后的蓝色滤光片 45°入射偏振情况

Fig. 7 45° polarization of blue filters based on the Rugate wavelets design (a) and on the traditional (HL)ⁿ design (b)

5 结 论

根据小波方程,将 W. H. Southwell 的小波展宽截止带理论扩展到设计不同类型的分光滤光片,设计出了红、绿、蓝颜色滤光片,光谱性能较好。并且,因为这种膜系压缩了截止带宽,偏振效应比分层介质膜有所减小,相关的膜系镀制仍在进行中^[2,3,11]。此种设计思想并不仅限于渐变折射率膜系的设计,在此基础上根据折射率随厚度变化公式将膜层分成等光学厚度的分层介质膜^[12],也可实现较好的设计,且易于镀制。

但该方法目前也存在一些问题,如截止带宽的确定,叠加小波系数及初始相位的选择,都需要依靠经验采用试行法,如能推导出一些公式对这些参量进行选取,将会使该种设计更为系统且简便。

参 考 文 献

- 1 H. Angus Macleod. *Thin Film Optical Filters* [M]. Bristol, Philadelphia: Institute of Physics Publishing, 2001. 588~598
- 2 Shen Zicai, Wang Yingjian, Fan Zhengxiu *et al.*. Analysis of optical characteristics of gradient refractive index coatings prepared by linear co-evaporation[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32** (6): 829~834 (in Chinese)

沈自才,王英剑,范正修等. 线性共蒸法制备渐变折射率薄膜的光学特性分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 829~834

计出来的滤光片偏振效应比高反膜设计的有所减小,而且通带的平坦性依然保持的很好。

- 3 Shen Zicai, Wang Yingjian, Fan Zhengxiu *et al.*. Analysis of deposition rate of inhomogeneous coatings prepared by co-evaporation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(4): 561~566 (in Chinese)
- 沈自才,王英剑,范正修等. 共蒸法制备非均匀膜的速率控制分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(4): 561~566
- 4 Bertrand G. Bovard. Rugate filter theory; an overview [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(28): 5427~5442
- 5 Olaf Stenzel. New challenges in optical coating design[J]. *Adv. in Solid State Phys.*, 2003, **43**: 875~888
- 6 W. H. Southwell. Gradient-index antireflection coatings [J]. *Opt. Lett.*, 1983, **8**(11): 584~586
- 7 William H. Southwell. Extended bandwidth reflector designs using wavelets[J]. in *Optical Interference Coatings*, Vol. 17 of 1995 OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, D. C., 1995). 11~13
- 8 William H. Southwell. Extended-bandwidth reflector designs by using wavelets[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(1): 314~318
- 9 Jingping Hu, Ping Ma, Qiao Xu *et al.*. Effect of $\lambda/2$ SiO₂ overcoat on the laser damage of HfO₂/SiO₂ high-reflector coatings[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(6): 340~342
- 10 Tang Jinfa, Zheng Quan. *Applied Thin Film Optics* [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1984. 209~234 (in Chinese)
- 唐晋发,郑 权. *应用薄膜光学* [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984. 209~234
- 11 D. A. Linkens, M. F. Abbod, J. Metcalfe *et al.*. Modeling and fabrication of optical interference Rugate filters [J]. *ISA Transactions*, 2001, **40**(1): 3~16
- 12 E. Cojocaru. Quarter-wave discrete wavelet design of dichroic highly reflecting-transmitting mirrors for ultrafast solid-state lasers[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(6): 1261~1265