

文章编号: 0258-7025(2009)08-2144-06

反应磁控溅射制备 SiO_x 渐变折射率红外梳状滤光片

宋秋明^{1,3} 黄 烽¹ 李 明¹ 谢 斌¹ 王海千¹ 姜友松² 宋亦周²

¹ 中国科学技术大学合肥微尺度物质科学国家实验室,
USTC-SHINCRON 先进薄膜工艺材料联合实验室, 安徽 合肥 230026

² SHINCRON 株式会社 品川 东京 114-0011 日本

³ 中国科学院深圳先进技术研究院, 中国科学院香港中文大学深圳先进集成技术研究所, 广东 深圳 518055

摘要 梳状滤光片是一种特殊的非均匀光学薄膜器件,其膜层折射率渐变分布结构使它与常规均匀光学薄膜相比具有更好的光学和机械性能。利用反应磁控溅射工艺,改变沉积 SiO_x ($0 \leq x \leq 2$) 膜氧化程度,获得折射率从 2.74 逐渐变化到 1.58($\lambda = 1550 \text{ nm}$)的 SiO_x 渐变折射率薄膜材料。通过调制膜层折射率振幅和引入膜层-外部介质折射率匹配层,成功地设计并制备了具有较好光学性能的 SiO_x 渐变折射率红外梳状滤光片光学薄膜器件。使用单一的硅溅射靶材,通过改变氧化程度获得可变折射率材料的方法,为特殊光学薄膜器件的制备提供了一种经济实用的工艺路线。

关键词 薄膜; 渐变折射率; 梳状滤光片; 反应磁控溅射; SiO_x

中图分类号 O484.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093608.2144

Graded Refractive-Index SiO_x Infrared Rugate Filter Prepared by Reactive Magnetron Sputtering

Song Qiuming^{1,3} Huang Feng¹ Li Ming¹ Xie Bin¹
Wang Haiqian¹ Jiang Yousong² Song Yizhou²

¹ Hefei National Laboratory for Physical Science at Microscale, USTC-Shincron Joint Laboratory for Advanced Thin Film Techniques & Materials, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

² Shincron Co., Ltd, Shinagawa-Ku Tokyo 140-0011, Japan

³ CAS/CUHK Shenzhen Institute of Advanced Integration Technology, Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518055, China

Abstract Rugate filter is a special inhomogeneous optical coating. The graded refractive-index profile makes it have better optical and mechanical properties than conventional homogeneous optical coating. The graded refractive index SiO_x ($0 \leq x \leq 2$) coating materials with precisely controlled refractive index ranging from 2.74 to 1.59 ($\lambda = 1550 \text{ nm}$) are deposited by tuning its oxidation degree in reactive magnetron sputtering. Then high quality SiO_x infrared rugate filters are successfully designed and fabricated by choosing proper refractive index amplitude apodization function and introducing refractive index matching layer on the interface, which provides a practical and economical technique for industrial fabrication of rugate filters.

Key words thin films; graded refractive-index; rugate filters; reactive magnetron sputtering; SiO_x

1 引 言

梳状(rugate)滤光片是一种特殊的具有非均匀

折射率分布膜层的光学滤光片^[1~5],它克服了层与层之间的界面跃变,膜层具有平稳的应力分布,使薄

收稿日期: 2008-08-05; 收到修改稿日期: 2008-10-07

基金项目: 国家自然科学基金(52772109)资助课题。

作者简介: 宋秋明(1980—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事磁控溅射制备渐变折射率光学薄膜和光学薄膜新材料方面的研究。E-mail: qmsong@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 王海千(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事薄膜材料与物理方面的研究。

E-mail: hqwang@ustc.edu.cn (通信联系人)

膜的耐激光损伤阈值得到大大提高,在光谱性能、机械性能和光损耗性能等方面均优于传统均匀分层薄膜^[4~8]。梳状滤光片可以实现一些传统光学薄膜很难,甚至无法实现的光学性质,在如宽波段、宽角度减反膜、高功率激光反射膜、太阳能分光膜和光通信光交叉连接器等领域有极优的应用前景^[9~11]。

与常规高低折射率交替堆叠的光学多层膜不同,梳状滤光片很难甚至不能用传统的高低折射率(n_H, n_L)材料交替堆叠的膜系结构来实现。在 n_H 和 n_L 之间往往需要补充多种中间折射率(n_m)材料^[2]。

为了解决这个问题,引入 Herpin 等价折射率膜层概念^[12,13];实际仍然只使用高低折射率两种材料,通过适当的多层膜设计(一般是3层)等价为一层具有相同光学厚度且满足需要的折射率膜层;使用 n_H 和 n_L 两种材料不同比例混合的方法,可以获得折射率介于 n_H 和 n_L 之间的混合材料膜层^[14,15];改变材料的化学价态及组分,从而改变材料的光学性质^[3~9]。例如 Bartzsch 等^[9]改变硅的氮氧化合物 $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$ 组分获得折射率介于1.46(SiO_2)和1.99(Si_3N_4)的渐变折射率分布材料。

本文在前期工作的基础上^[16,17],利用磁控反应溅射工艺,只使用硅一种靶材,通过改变溅射功率 P 从而改变沉积 SiO_x ($0 \leq x \leq 2$)膜的氧化程度,获得折射率由1.58(SiO_x , $P=1.4$ kW)到2.74(SiO_x , $P=3$ kW)之间大范围渐变可调的 SiO_x 光学薄膜材料体系。讨论了材料的选择及折射率分布的设计对梳状滤光片光学性质的影响。通过调节沉积 SiO_x 膜的氧化程度,成功地制备了具有较好光学性质的梳状滤光片。

2 实 验

所有的 SiO_x 膜都是使用一台中频反应磁控溅射镀膜机(ASC-800, Shincron Co., Ltd)制备的。溅射靶材为硼掺杂的纯度为99.95%的多晶硅靶,放置在与衬底的距离为12 cm的位置。衬底为直径30 mm,厚度1 mm的BK7玻璃圆片。溅射前真空室内保证本底真空低于 2×10^{-4} Pa。每次镀膜前真空室内衬底在150 °C下烘烤2 h,以减小沉积薄膜由于镀膜温度变化带来的不均质^[18]。溅射过程中往真空室导入的氩气和氧气由两个质量流量控制计分别控制,维持溅射过程中导入氩气流速为180 sccm(标准状况下毫升每分钟),氧气流速为20 sccm。

沉积薄膜的光谱性质由一台带积分球的紫外-

可见-红外分光光度计(U4100, Hitachi Co., Ltd)测量得出。薄膜的厚度、折射率以及消光系数由测量的透过率和反射率光谱通过包络法^[19]计算得到。沉积速率由膜厚除以镀膜时间计算得出。

3 结果与讨论

3.1 渐变折射率 SiO_x 光学薄膜材料的获得

制备渐变折射率梳状滤光片必须使用渐变折射率光学薄膜材料体系,因此制备梳状滤光片的关键在于精确、可控、稳定重复地获得折射率在一定范围内连续变化的光学薄膜材料体系。图1是在沉积的 SiO_x 薄膜的折射率、消光系数($\lambda=1550$ nm)以及沉积速率随溅射功率的变化关系。在高溅射功率下,沉积速率较高,有限的氧气流速无法完全氧化溅射出来的靶材粒子。所以沉积的薄膜氧化程度较低,为Si各种价态的混合物膜^[16],具有较高的折射率和消光系数。随着溅射功率的降低,沉积速率下降,沉积的薄膜氧化程度增大,折射率降低,直至完全氧化生成 SiO_2 膜。溅射功率从3 kW降低到1.4 kW的区间里,制备的硅氧化物薄膜折射率从2.74逐渐下降到1.58($\lambda=1550$ nm),消光系数从 10^{-3} 量级减小到 10^{-5} 量级。折射率 n 随溅射功率 P (kW)分布用四次多项式曲线拟合,拟合的曲线方程为

$$n = -5.31912 + 10.08194P - 5.24818P^2 + 1.28913P^3 - 0.1205P^4. \quad (1)$$

沉积速率 R 从1.88 nm/s线性减小到1.15 nm/s,拟合的线性方程为

$$R = 0.5098 + 0.45612P. \quad (2)$$

因此,通过对溅射功率的控制,即可以对沉积的薄膜折射率和沉积速率进行可控调节,可以用来制备渐变折射率梳状滤光片。

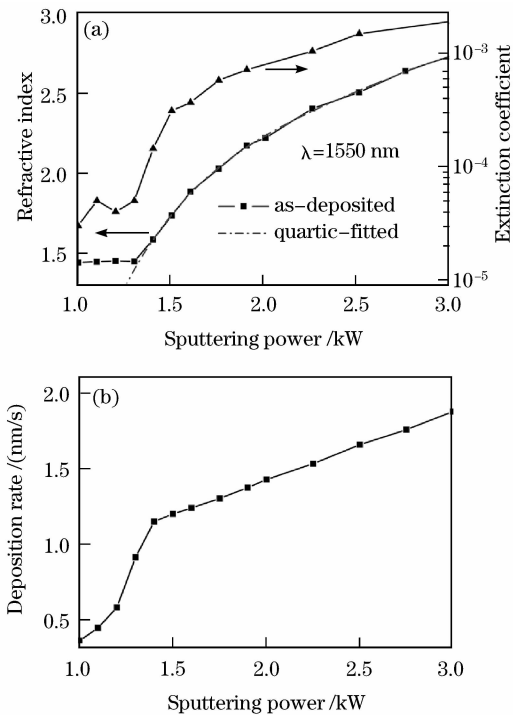
3.2 简单正弦周期单反射带梳状滤光片的制备

图2(a)中实线是设计的简单单反射带梳状滤光片膜层折射率($\lambda_0=1550$ nm)随膜层光学厚度(一个正弦周期等于 $\lambda_0/2$ 光学厚度)的分布。这种折射率分布满足正弦关系^[2]

$$n(y) = n_A + \frac{n_{pv}}{2} \sin\left(\frac{2\pi y}{n_A T_p} + \theta\right), \quad (3)$$

其中 y 为膜层的光学厚度, n_A 为膜层平均折射率; n_{pv} 为折射率振幅,即折射率波动峰与谷的差值; θ 为初相位(在这里取 $\theta = -\pi/2$); $n_A T_p$ 为一个正弦周期的光学厚度, T_p 为一个正弦周期膜层等效物理厚度($n=n_A$),满足关系^[2]

$$\lambda_0 = 2n_A T_p, \quad (4)$$



1 沉积的硅氧化物膜的折射率与消光系数(a)及沉积速率(b)与溅射功率的关系

Fig. 1 Refractive indices and extinction coefficients (a) and deposition rate (b) of SiO_x films as a function of sputtering power

式中 λ_0 为参考波长, 对应图 2(b) ($g = \lambda/\lambda_0$) 反射率设计光谱反射带中心波长。调节 $n_A T_p$ 的值, 可以调节梳状滤光片反射带中心波长位置。

在实际的梳状滤光片制备中, 将每个周期分解成 16 层折射率梯度变化的 SiO_x 子层来近似连续渐变折射率膜层。每个子层的光学厚度为 $\lambda_0/32$, 每个正弦周期里膜厚为 $\lambda_0/2$, 膜层总光学厚度为 $2.5\lambda_0$ 。膜层的分布如图 2(a) 中的圆点所示, 每个数据点坐标分别对应这层薄膜所处的位置以及折射率值。由(1)式和(2)式的关系, 以 3 kW 的溅射功率下制备的 SiO_x 薄膜折射率 2.74 为最大值, 1.4 kW 制备的 SiO_x 薄膜折射率 1.58 为最小值。通过改变溅射功率即可获得相应折射率值和沉积速率的沉积薄膜。

图 2(b) 是制备的简单梳状滤光片测量与设计反射率光谱, 横坐标为相对波数 $g = \lambda_0/\lambda$ 。反射率光谱只存在一个反射带, 谐波反射带抑制得很好, 反射带中心在 $g=1$ 位置, 测量反射率达到 93.2% (设计光谱是不考虑材料吸收的理论计算结果, 实际镀膜中膜层材料吸收不可忽略, 所以实际测量光谱反射带反射率略有降低, 下同)。由于折射率分布满足

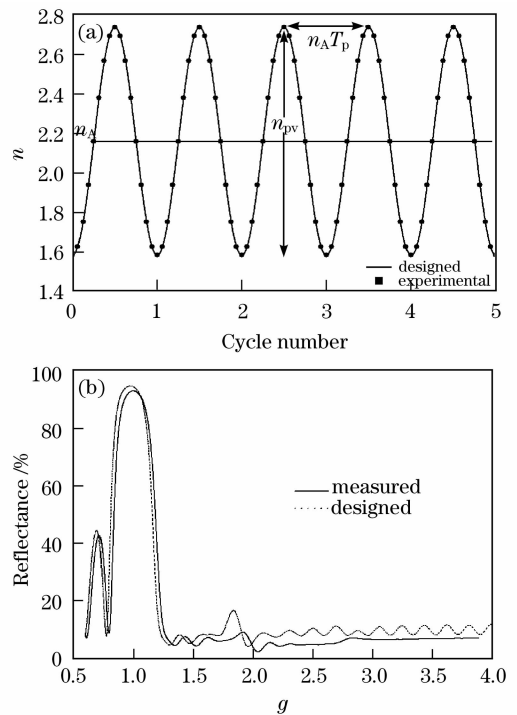


图 2 5 个正弦周期简单单反射带梳状滤光片的设计膜层渐变折射率分布(实线)与实际分层梯度折射率膜层分布(圆点)(a)和测量(实线)与设计(虚线)反射率光谱(b)。其中入射介质为空气, 出射介质为 BK7 玻璃衬底

Fig. 2 Designed (solid line) and experimental (dots) graded refractive-index profile (a) and designed (dash line) and measured (solid line) reflectance spectra (b) of a single-band 5 cycles sine wave rugate filter. The incidence media is air and emergent media is BK7 glass substrate

(3) 式中初相位 $\theta = -\pi/2$, 因此反射带外干涉旁瓣在 $g > 1$ 的短波段抑制得较好, 而在 $g < 1$ 的长波段则几乎没有抑制。

除了由实际材料吸收带来的测量反射率与设计值相比略有降低外, 测量反射率光谱整体向短波方向移动。这个现象说明在多层膜沉积过程中, 实际薄膜沉积速率与由单层膜沉积计算出来的沉积速率(2)式相比略有降低。这是因为在多层膜的沉积过程中, 长时间的溅射使得衬底的温度升高。而高的衬底温度使得沉积的薄膜更致密, 折射率增高, 沉积速率下降^[18]。这种由衬底温度的变化带来的薄膜不均质是产生测量与设计光谱偏差的主要原因, 可以使用膜厚监控系统来减小。同时设计光谱是基于理想的连续折射率变化材料计算得来的, 而实际使用了折射率梯度变化的 SiO_x 子层来近似, 不考虑吸收和膜层界面, 这样的近似也会带来光谱的差别。

此外,每层膜的光学常数和沉积速率由(1)式和(2)式关系拟合得来,可能与实际也有偏差。

可以看出,简单正弦周期折射率变化的梳状滤光片可以显著抑制波长低于 λ_0 的波段的谐波反射带。但是对于反射带外的干涉旁瓣抑制效果还是不理想。要抑制这种旁瓣效应,依靠这种简单的梳状滤光片膜系设计是不行的,需要在这个膜系的基础上加上较复杂的折射率振幅调制和匹配层。

3.3 优化梳状滤光片

为了抑制干涉旁瓣,提高梳状滤光片的光学性能,可以在其原来膜层折射率分布呈正弦周期波动的基础上,通过一个振幅控制函数来调制膜层折射率振幅分布,即梳状滤光片中的“小波”设计。图 3 是一个使用高斯控制函数调制梳状滤光片膜层折射率振幅分布的实例。高斯曲线折射率振幅调制函数表达式定义为^[2]

$$f(y) = \exp\left\{-\beta\left[y - \frac{N(n_A T_p)}{2}\right]^2\right\}, \quad (5)$$

其中 N 为总的周期数,则膜系总光学厚度 $T = N(n_A T_p)$, β 为高斯控制因子,它决定了高斯振幅包络曲线的宽度和截止点的位置,取 $\beta = 20/T^2$ 。将(5)式代入(3)式的折射率振幅 n_{pv} 上,得到新的折射率分布函数表达式为

$$n(y) = n_A + \frac{n_{pv}}{2} f(y) \sin\left(\frac{2\pi y}{n_A T_p} + \theta\right). \quad (6)$$

取 $\theta = 0$, 则 18 个正弦周期梳状滤光片折射率随膜层厚度分布如图 3(a) 所示。可以看到,新的折射率分布等于在原来等振幅正弦曲线折射率分布的基础上对折射率振幅进行调制。图中折射率极值点的包络线就是定义的振幅调制高斯函数曲线。经过调制的梳状滤光片反射率光谱见图 3(b)。与图 2(b) 相比,反射带外的干涉旁瓣分布变得均匀,但仍然存在明显的干涉旁瓣。

这是因为,膜层介质与入射和出射介质(分别为空气与玻璃衬底)界面两端折射率相差往往较远。较大的折射率差带来明显的干涉效应,因此造成干涉旁瓣^[20]。可以在经过调制的折射率振幅膜层与入射和出射介质的界面间增加匹配层,使得膜层外部折射率能够平滑地过渡到入射或者出射介质的折射率值,可以很好地抑制干涉旁瓣^[20,21]。值得注意的是自然界中并不存在折射率接近 1(空气)的镀膜材料,所以与入射介质接触的匹配层的最低折射率与 1 仍有差距,但要求做到尽量接近。

匹配层折射率分布可以采用如下的 5 次多项式

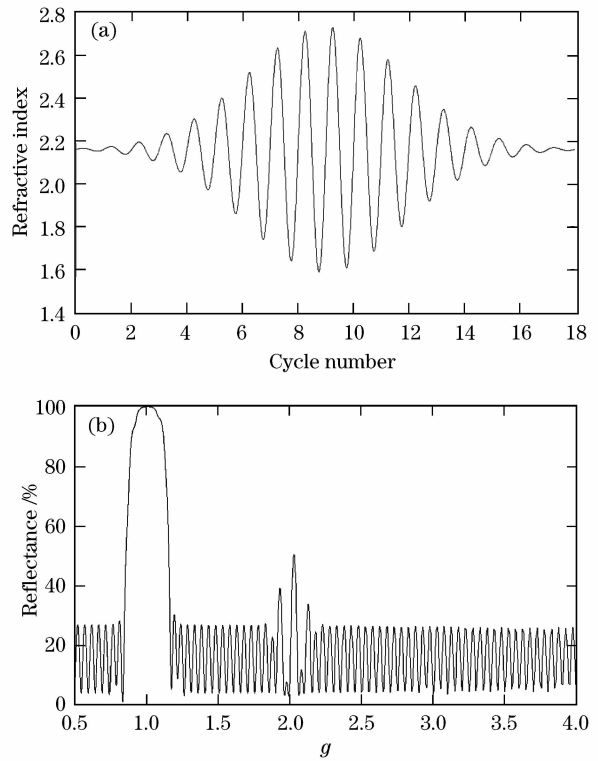


图 3 高斯振幅折射率控制函数调制的 18 个正弦周期梳状滤光片。(a)膜层折射率随膜厚分布;(b)通过计算得到的反射率光谱

Fig. 3 Designed graded refractive-index profile (a) and reflectance spectrum (b) of a Gaussian apodized 18 cycle sine wave rugate filter

曲线关系^[20,21]。与入射介质相邻的匹配层的折射率分布为

$$n(y) = n_L + (n_A - n_L) \times (10t^3 - 15t^4 + 6t^5) \quad (7)$$

$$t = \frac{y}{T_1},$$

其中 n_L 为能达到的材料最低折射率, T_1 为该匹配层的光学厚度。

与出射介质相邻的匹配层的折射率分布为

$$n(y) = n_s + (n_A - n_s) \times (10t^3 - 15t^4 + 6t^5) \quad (8)$$

$$t = \frac{T - y}{T_1},$$

其中 n_s 为衬底折射率,如果 $n_L > n_s$, 则 n_s 由 n_L 代替。

图 4(a) 中实线是一个包含中心正弦函数周期折射率分布层,高斯函数折射率振幅调制层以及 5 次多项式曲线折射率分布匹配层的梳状滤光片设计实例。图 4(b) 中虚线是由此折射率分布计算得出的梳状滤光片反射率光谱。由反射率光谱可以看出,通过优化,反射带外的干涉旁瓣已经受到很大抑制,在反射带外,滤光片具有较低的反光率。因此,

尽管经过调制的梳状滤光片膜系结构复杂,但可以获得较好的光学性能。

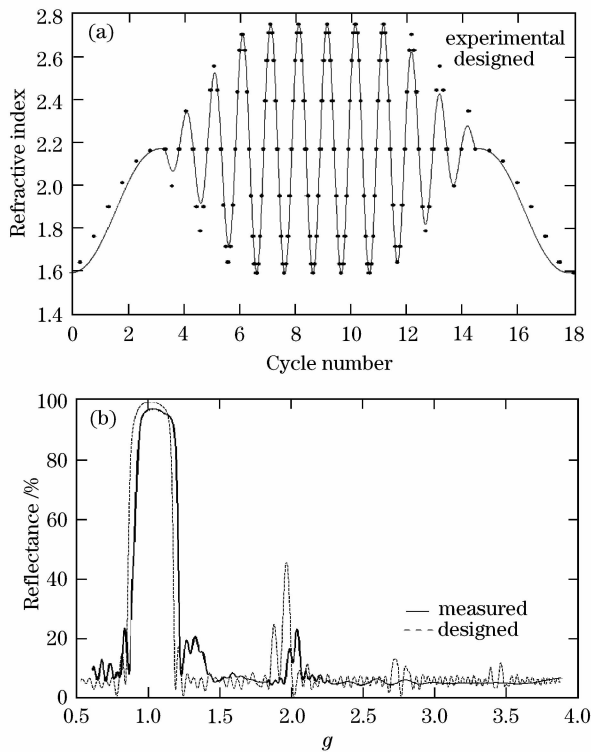


图4 匹配层和折射率振幅控制层以及中心正弦函数折射率分布层共同作用下的梳状滤光片。(a)设计膜层渐变折射率分布(实线)与实际分层梯度折射率膜层分布(圆点);(b)测量(实线)与设计(虚线)反射率光谱

Fig. 4 Designed (solid line) and experimental (dots) graded refractive-index profile (a) and designed (dash line) and measured (solid line) reflectance spectra (b) of a 18 cycle sine wave rugate filter with Gaussian apodization and quintics matching layers

为了实现这样复杂的梳状滤光片制备,依然采取折射率梯度变化的 SiO_x 子层来近似连续渐变折射率膜层,膜层的分布如图4(a)中的圆点所示。膜层从外到内分别为:5次多项式曲线折射率分布匹配层、高斯函数折射率振幅调制层以及中心正弦函数周期折射率分布层。其中最外两端5次曲线匹配层各占3.5个周期,每层膜厚 $\lambda_0/4$,每边7层;两边高斯折射率振幅控制部分各占3.5个周期,从外到内单个周期的膜层数分别为4,8,12层,剩余半个周期膜层数为8层,每个周期里的单层膜光学厚度分别为 $\lambda_0/8, \lambda_0/16, \lambda_0/24$ 和 $\lambda_0/32$;中心折射率正弦周期函数分布部分占4个周期,每个周期包含16个子层膜,每个子层膜仍然采用 $\lambda_0/32$ 光学厚度,分别

使得每个周期光学厚度都为 $\lambda_0/2$ 。

膜层最低折射率约为1.58,所以匹配层可以与出射介质衬底($n=1.52$)平滑过渡,但是与入射介质空气还有较大差距。图4(b)中的实线为制备的梳状滤光片透射率光谱,谐波反射带抑制得较好。唯一的反射带中心反射率测量值为97.6%,由于材料的吸收使得与设计相比略有降低。对于反射带外的干涉旁瓣,无论长波和短波方向抑制得都较好,在反射带外具有较低的反射率,具有较好的单反射带,宽波段减反光学性能。

4 结 论

讨论了材料的选择及折射率分布的设计对梳状滤光片光学性质的影响。结果表明,选择合适的折射率振幅调制函数及引入界面折射率匹配层,可以使梳状滤光片的光学特性得到很大的改善。利用磁控反应溅射方法通过调节 SiO_x 中的氧含量,成功地制备了具有较好光学性能的 SiO_x 渐变折射率红外梳状滤光片光学薄膜器件。

参 考 文 献

- 1 B. G. Bovard. Rugate filter theory: an overview[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(28):5427~5442
- 2 W. E. Johnson, R. L. Crane. Introduction to rugate filter technology[C]. *SPIE*, 1993, **2046**:88~108
- 3 H. Yoda, D. Tanaka, O. Hanaizumi *et al.*. Rugate filters fabricated by a radio frequency magnetron sputtering system by use of an optical *in situ* monitoring technique[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(1):184~190
- 4 E. P. Donovan, D. Van Vechten, A. D. F. Kahn *et al.*. Near infrared rugate filter fabrication by ion beam assisted deposition of $\text{Si}_{(1-x)}\text{N}_x$ films[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(14):2940~2944
- 5 Shen Zicai, Wang Yingjia, Fan Zhengxiu *et al.*. Analysis of optical characteristics of gradient refractive index coatings prepared by linear co-evaporation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6):829~834
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
- 6 Wang Dan, Xu Xueke, Shen Zicai *et al.*. Color filter design based on rugate wavelets theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5):792~796
王丹,徐学科,沈自才等.基于梳状小波理论的颜色滤光片设计[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5):792~796
- 7 Li Dawei, Xu Cheng, Zhao Yuan'an *et al.*. Delamination of optical thin films induced by 1064 nm laser pulse[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5):764~767
李大伟,许程,赵元安等.1064 nm激光脉冲致光学薄膜分层剥落损伤特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5):764~767
- 8 Cui Yun, Zhao Yuan'an, Jin Yunxia *et al.*. Laser damage characteristic of third harmonic separator at 1064 nm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6):1129~1134
崔云,赵元安,晋云霞等.三倍频分光膜在1064 nm的破斑特性研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6):1129~1134
- 9 H. Bartzsch, S. Lange, P. Frach *et al.*. Graded refractive index

- layer systems for antireflective coatings and rugate filters deposited by reactive pulse magnetron sputtering[J]. *Surf. & Coat. Technol.*, 2004, **180-181**:616~620
- 10 Deng Hongxiang, Zhu Xiaotao, Zheng Wanguo *et al.*. Gradient optical film taking the place of classical high-reflectivity film[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(1):58~62
邓洪祥, 祖小涛, 郑万国 等. 梯度膜作为高功率激光反射膜的初步研究[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(1):58~62
- 11 Yang Jun, Ming Hai, Wang Pei *et al.*. Application in optical communication of optical films[J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2003, **16**(3):10~14
杨军, 明海, 王沛 等. 光学薄膜在光通信中的应用[J]. *光电子技术与信息*, 2003, **16**(3):10~14
- 12 J. A. Dobrowolski, S. H. C. Piotrowski. Refractive index as a variable in the numerical design of optical thin film systems[J]. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(8):1502~1509
- 13 Ma Xiaofeng, Wang Dan, Liu Dingquan *et al.*. Design of non-polarizing broadband antireflection coating using equivalent layer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3):563~566
马小凤, 王丹, 刘定权 等. 利用等效层的消偏振宽带减反膜设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3):563~566
- 14 X. Wang, H. Masumoto, Y. Someno *et al.*. Helicon plasma deposition of a $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ multilayer optical filter with graded refractive index profiles[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(25):3264~3266
- 15 X. Wang, H. Masumoto, Y. Someno *et al.*. Design and preparation of a 33-layer reflection filter of $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ system[J]. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2000, **18**(3):933~937
- 16 Q. M. Song, F. Huang, M. Li *et al.*. Graded refractive-index SiO_x infrared filters prepared by reactive magnetron sputtering[J]. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 2008, **26**(2):265~269
- 17 F. C. Lai, M. Li, H. Q. Wang *et al.*. Effect of oxygen flow rate on the properties of SiO_x films deposited by reactive magnetron sputtering[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(8):490~493
- 18 F. C. Lai, M. Li, K. Chen *et al.*. Substrate temperature effect on the refractive index and a two-step film method to detect small inhomogeneities in optical films[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(29):6181~6185
- 19 Wang Yanzhi, Zhang Weili, Fan Zhengxiu *et al.*. Analysis for accurately fitting the refractive index of SiO_2 thin film[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5):760~763
王胭脂, 张伟丽, 范正修 等. SiO_2 薄膜折射率的准确拟合分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(5):760~763
- 20 W. H. Southwell, R. L. Hall. Rugate filter sidelobe suppression using quintic and rugated quintic matching layers[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**:2949~2951
- 21 Zhan Yuanling, Qu Huizhong, Zhang Tiequn. Suppression of rugate filter sidelobes[J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, **11**(2):172~175
战元龄, 曲会忠, 张铁群. Rugate 光学薄膜通带内反射次峰的抑制[J]. *光学学报*, 1991, **11**(2):172~175