

文章编号: 0253-2239(2008)12-2436-05

结合傅里叶变换合成法设计均匀薄膜

朱华新^{1,2} 高劲松¹ 王笑夷¹ 王彤彤^{1,2} 陈 红¹ 郑宣明¹ 申振峰^{1,2} 李香波^{1,2}
尹少辉^{1,2} 刘小涵^{1,2} 王珊珊^{1,2}

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; ² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 基于傅里叶变换合成法的基本原理, 合成了一个 K9 基底上的负滤光片, 合成的渐变折射率薄膜具有期望光学特性, 但实际制备难度很大, 因此将其细分为足够多层离散折射率的均匀薄膜, 由于实际薄膜材料种类有限, 不能获得任意折射率膜层, 鉴于两层高低折射率薄层可近似为一层中间折射率膜层的思想, 将膜系转化成一个可实际制备的膜系结构: 膜系采用 ZrO₂ 和 SiO₂ 两种膜料, 膜层总数为 183 层, 经单纯形调法优化后, 膜层总厚度为 7.09 μm, 通带和截止带内平均透射比分别为 97.56% 和 3.13%, 其结果优于直接采用傅里叶方法合成的非均匀膜系, 与期望透射比曲线吻合更好。说明通过这种思想设计任意光谱特性的膜系是可行的, 也使傅里叶变换合成法设计的薄膜实际制备成为可能。

关键词 光学薄膜; 傅里叶变换合成法; 均匀薄膜; 单纯形调法

中图分类号 O484 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20082812.2436

Design of Homogeneous Thin Film Combining with Fourier-Transform Synthesis Method

Zhu Huaxin^{1,2} Gao Jinsong¹ Wang Xiaoyi¹ Wang Tongtong^{1,2} Chen Hong¹ Zheng Xuanming¹
Shen Zhenfeng^{1,2} Li Xiangbo^{1,2} Yin Shaohui^{1,2} Liu Xiaohan^{1,2} Wang Shanshan^{1,2}

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract Based on the theory of Fourier-transform synthesis method, a minus filter on K9 substrate was synthesized. The gradient-index thin film with the desired transmittance character was synthesized by Fourier-transform synthesis method, but it is difficult to fabricate. So it was divided into many homogeneous coatings with discrete refractive index. For the limited kinds of coating material, the thin film with arbitrary refractive index is not available. Based on the idea of two very thin high-low pair layers can be treated approximately as a thin layer with an average refractive index of the two layers, these coatings were replaced by homogeneous coatings. After optimization of simplex-law, the layers are composed by 183 layers of ZrO₂ and SiO₂. And the total thickness is 7.09 μm. The average transmittances in pass band and rejection band are 97.56% and 3.13%, respectively. And the optimized result is better than that made with ununiform coatings and coincides with the desired one. All these indicate that it is a feasible method to design coatings with any desired spectrum character, and it is possible to fabricate the coatings designed with Fourier-transform synthesis method in practice.

Key words optical thin film; Fourier-transform synthesis method; homogeneous coatings; simplex law

1 引 言

傅里叶变换合成法是一种早期的膜系合成方法, 可以根据任意的期望光谱曲线设计出渐变折射

率薄膜, 相比其它薄膜自动合成法^[1,2], 具有灵活多变的特点。而且它对设计波段和波形没有限制, 合成的膜系沿着膜层表面的法线方向折射率连续变

收稿日期: 2008-05-06; 收到修改稿日期: 2008-06-04

作者简介: 朱华新(1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学薄膜方面的研究。E-mail: zhuhuaxing1312@163.com

导师简介: 高劲松(1968—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学薄膜的设计、制备以及相关测试等方面的研究。

E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn

化,而在垂直于法线的水平方向上折射率保持不变,可以应用在很多领域,如太阳能玻璃的吸收膜、激光膜、非偏振薄膜^[3]、啁啾镜和 Rugate^[4]滤光片等。随着现代镀膜技术的进步,如多元共蒸法^[5]、反应溅射法、掠入射沉积法(GLAD)^[6,7]等可以制备渐变折射率薄膜,但要精确控制连续变化的折射率薄膜难度很大。

本文通过傅里叶变换合成法设计了负滤光片,用两层组合(PQ)近似的方法,将其转换成一个仅由 ZrO_2 和 SiO_2 两种均匀膜组成的膜系。与传统膜系设计相比,这种思想继承了傅里叶合成方法能逆向合成的优点,减少了膜系设计者的工作量,同时只用了两种实用的膜料均匀膜层结构,解决了渐变折射率薄膜难以实际制备的缺点,也降低了制备工艺难度和成本。

2 基本原理

傅里叶变换合成法可直接由傅里叶变换将期望光谱曲线变换成膜层折射率轮廓图。渐变折射率薄膜的光谱曲线和折射率轮廓有如下关系式^[8,9]:

$$n(x) = \exp\left\{\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{Q(k)}{k} \sin[\phi(k) - kx] dk\right\}, \quad (1)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$, $x = 2 \int_0^z n(u) du$ 为两倍的光程, z 为膜的几何厚度, $\phi(k)$ 为相位因子,这里的相位因子并不是薄膜的相位厚度。

从公式(1)得出,只要确定了膜层的光学厚度,就可以得出膜层的折射率轮廓 $n(x)$ 。

由于傅里叶变换合成法得到的是一个渐变折射率薄膜,实际制备难度很大。在不影响光谱曲线的前提下,首先将此渐变折射率薄膜近似成足够多层离散折射率的均匀膜层组成的膜系。由于适于镀膜的材料非常有限,只有少数膜层可以实用膜料获得。理论上可以用高低折射率的两种膜料用对称膜系等效层或者两层组合(PQ)近似取代^[10]。而对称膜系等效层仅仅只是在单波长处成立,在宽波段范围内等效层的色散很大,因此等效折射率在宽波段内的等效误差较大,等效后的效果并不理想。因此本文采用后者解决中间折射率膜层的问题。

根据 Southwell 的理论,任意中间折射率的均匀薄膜在厚度很薄时,此薄膜可用两层组合近似地取代,于是每层细分均匀膜可由两层不同厚度的高低折射率膜层来近似。

折射率为 N ,物理厚度为 T 的均匀薄膜在光线垂直入射下的特征矩阵表示为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \frac{i}{N} \sin \phi \\ iN \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 ϕ 为相位厚度,其值 $\phi = kNT$, $k = 2\pi/\lambda$ 。

当 $NT \ll \lambda$ 时,矩阵(2)可近似表示为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{i2\pi T}{\lambda} \\ i \frac{2\pi}{\lambda} N^2 T & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

假设两薄层组合,一层为高折射率材料 n_H ,厚度为 t_H ;另一层为低折射率材料 n_L ,厚度为 t_L ,两者特征矩阵相乘后,略去其厚度二次项,可近似表示为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & i \frac{2\pi}{\lambda} (t_H + t_L) \\ i \frac{2\pi}{\lambda} (n_H^2 t_H + n_L^2 t_L) & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

对照单层膜特征矩阵(3),可以看出两层高低折射率材料的薄膜可以近似成单层膜,该单层膜的折射率和厚度分别为

$$N^2 = \frac{n_H^2 t_H + n_L^2 t_L}{t_H + t_L}, \quad (5)$$

$$T = t_H + t_L. \quad (6)$$

由矩阵(4)得,高低折射率层的顺序对近似后的膜层没有任何影响。(6)式得,近似后膜层物理厚度为两层近似层的物理厚度总和。当给定一中间折射率材料 N ,厚度为 T 时,两高低折射率材料的厚度为

$$t_H = \frac{(N^2 - n_L^2)}{(n_H^2 - n_L^2)} \cdot T, \quad (7)$$

$$t_L = T - t_H. \quad (8)$$

由于理论中忽略了厚度二次项,以上近似只在 $NT \ll \lambda$ 时适用。实践证明当两层膜的光学厚度之和小于 $\lambda/10$ 时,就可以应用两层组合来近似取代一层中间折射率薄膜。

采用这种方法近似渐变折射率薄膜相比对称膜系等效折射率算法比较简单,且在 $NT \ll \lambda$ 的条件下,若高低折射率材料没有色散,则这两层组合近似后膜层也没有色散。因此,在宽波段范围内,这种等效相比于对称膜系等效层的效果要更理想。另外从公式(7)得,只要等效层的折射率在两高低折射率值之间,总能得到正解。

3 设计实例

在 K9 基底上设计一负滤光片,工作波段为 $0.4 \sim 2 \mu\text{m}$,图 1 是期望光谱曲线。

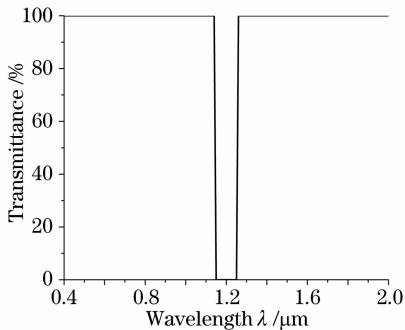


图 1 期望透射比曲线

Fig. 1 Desired transmittance curve

在合成过程中, $Q(k)$ 的表达式为

$$Q(k) = \sqrt{-\ln T(k)}. \quad (9)$$

在薄膜的两端加上折射率呈五次多项式变化的匹配层^[11],能有效地减少通带内的波纹。只要匹配层的光学厚度大于某一波长的 $1/2$,则理论上在小于此波长的范围内反射率总是很低。图 2 是两端加上匹配层后的折射率轮廓图,膜层的空气一侧,不可能匹配到折射率为 1,仅匹配到 1.46,相当于 SiO_2 的折射率。基底一侧完全可以匹配到 1.52,两端匹配层光学厚度均为 $1 \mu\text{m}$,整个膜层的光学厚度为 $12 \mu\text{m}$ 。薄膜的折射率在 $1.46 \sim 2.2$ 之间,未超出实际可获得薄膜材料的折射率范围。但此薄膜的折射率是连续变化的,要实际制备该渐变折射率薄膜难度很大。

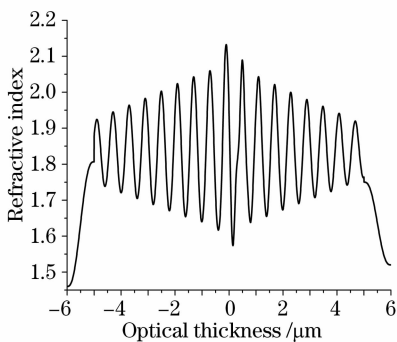


图 2 两端匹配的折射率轮廓图

Fig. 2 Refractive-index profile with quintic matching layers at the two ends

在不影响透射比曲线的前提下,将图 2 折射率轮廓图进行近似,得到一个由 96 层离散折射率的均匀薄膜组成的膜系结构,如图 3 所示。每层薄膜的光学厚度均为 $0.125 \mu\text{m}$,折射率的范围在 $1.46 \sim$

2.05 之间,恰好为 SiO_2 和 ZrO_2 折射率之间。图 4 是由图 3 计算得到的透射比曲线,由于在薄膜的空气侧只匹配到 1.46,所以通带内还存在波纹。

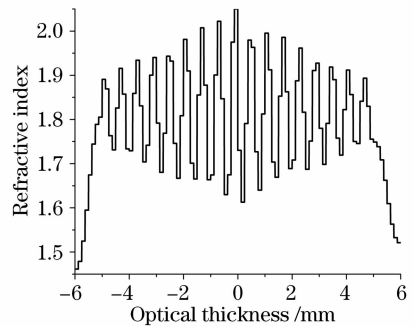


图 3 离散折射率轮廓图

Fig. 3 Discrete refractive-index profile

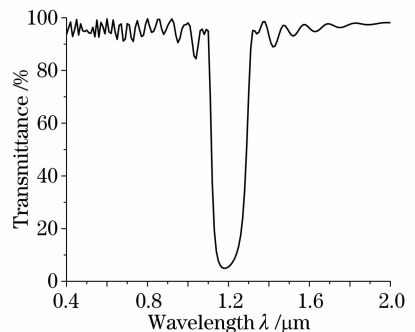


图 4 离散折射率透射比曲线

Fig. 4 Transmittance curve corresponding to the discrete refractive-index profile

由于每层膜的光学厚度是 $0.125 \mu\text{m}$,并没有满足 $NT \ll \lambda$ 的条件。因此直接采用高低折射率两层组合来近似中间折射率膜层的误差很大,可将每层膜分割成等厚的两层,每层膜的光学厚度变为 $0.0625 \mu\text{m}$,这样就能基本满足要求。为了尽量减少等效后的膜层数,分割的一层用 HL 来等效,另一层则用 LH 来等效,高折射率材料的折射率取为

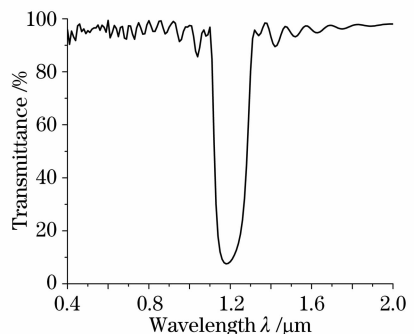


图 5 两层高低折射率组合近似后透射比曲线
Fig. 5 Transmittance curve after refractive index approximation of two high-low layers

2.05, 低折射率材料的折射率取为 1.46, 最终等效后的均匀膜系为 193 层。去除其中一些特别薄的膜层, 它们对光谱曲线基本没有影响, 膜系总共为 183 层, 其透射曲线如图 5 所示。与图 4 相比, 在短波处的透射比略有下降, 这是由于在短波处未能达到 $NT \ll \lambda$ 的条件, 两层高低折射率材料的近似误差引起的, 但近似后透射比曲线基本不变。

上述高低折射率材料并未考虑其色散, 将高折射率材料替换为 ZrO_2 , 低折射率材料替换成 SiO_2 , 计算透射比曲线如图 6 所示。

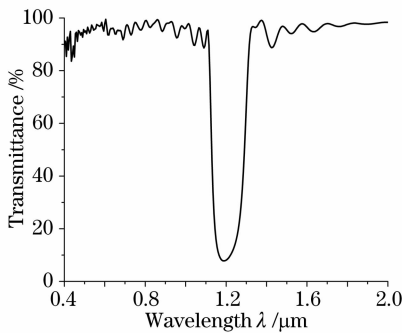


图 6 考虑色散的透射比曲线

Fig. 6 Transmittance curve considering dispersion

由图 6 得, 其透射比曲线在短波处相比图 5 有所下降。这是材料的色散引起的。在通带 $0.4 \sim 1.11 \mu\text{m}$ 内, 平均透射比为 95.13%, 最大透射比为 99.48%, 最小透射比为 83.63%, 均方差为 2.96%; 在截至带 $1.15 \sim 1.25 \mu\text{m}$ 内, 平均透射比为 10.52%, 最大透射比为 15.97%, 最小透射比为 7.79%, 均方差为 2.66%; 在通带 $1.3 \sim 2 \mu\text{m}$ 内, 平均透射比达 96.31%, 最大透射比为 99.13%, 最小透射比为 83.85%, 均方差为 2.46%。

傅里叶变换合成法本身是一种近似的方法, 而且其合成的渐变折射率薄膜并没有考虑色散。在引入材料的色散后, 通带内波纹较大, 截止带的反射率也不高, 与期望光谱曲线之间还有一定的差距。经过单纯形调法优化后, 膜层总厚度为 $7.09 \mu\text{m}$, 透射比曲线如图 7 所示。

由图 7 得, 在通带 $0.4 \sim 1.11 \mu\text{m}$ 内, 平均透射比为 96.4%, 最大透射比为 99.25%, 最小透射比为 92.84%, 均方差为 1.2%; 在截至带 $1.15 \sim 1.25 \mu\text{m}$ 内, 平均透射比为 2.91%, 最大透射比为 6.86%, 最小透射比为 1.49%, 均方差为 1.66%; 在通带 $1.3 \sim 2 \mu\text{m}$ 内, 平均透射比达 98.22%, 最大透射比为 99.8%, 最小透射比为 96.51%, 均方差为 0.54%。优化后通带内波纹明显减少, 且截至带反射率明显

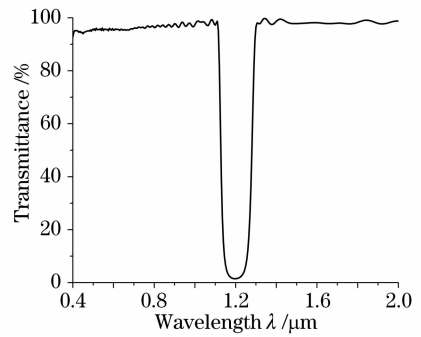


图 7 优化后透射比曲线

Fig. 7 Transmittance curve after optimization

提高, 与期望透射比曲线已经比较接近, 说明优化前的初始结构比较合理。

由于低折射率材料为 SiO_2 , 所以通带内的透射比无法再通过优化提高, 但整个通带内的透射比呈上升的趋势。这是由于 SiO_2 材料的正常色散引起的, 随着波长的增加, SiO_2 材料的折射率逐渐变小, 通带内的剩余反射率也逐渐减小。

4 结 论

通过傅里叶变换合成法合成了具有期望光谱曲线的渐变折射率薄膜, 但在实际的工艺中很难精确制备渐变折射率薄膜, 因此将其细分成很多离散折射率的均匀薄膜。通过两层高低折射率薄膜的组合近似中间折射率膜层, 得到一个仅含有 SiO_2 和 ZrO_2 薄膜组成的负滤光片。傅里叶变换合成法是一种近似的方法, 将其合成的渐变折射率薄膜转化成均匀薄膜, 并引入色散后, 透射曲线与期望曲线之间存在一定的偏差。但经单纯形调法优化即可与期望曲线很接近, 说明由此方法得到的初期结构比较合理。事实上傅里叶变换合成法对设计波段和波形没有任何限制, 因此在膜系设计过程中, 可以采用这种思想设计任意光谱特性的膜系, 使傅里叶变换合成法合成的结果实际制备成为可能, 降低了制备工艺难度和成本, 同时也减少了膜系设计者的工作量。

参 考 文 献

- 1 Yu Kan, Liu Wen, Huang Dexiu *et al.*. Optimal design and arithmetic on stack of angle tuned filter[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1287~1291
俞 侃, 刘 文, 黄德修 等. 角度调谐滤光片的膜系优化设计算法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1287~1291
- 2 Xu Jianghong, Chen Qiuling. Anti-reflection coating design by genetic algorithm[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1271~1275
徐江峰, 陈秋灵. 增透膜的遗传算法设计[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1271~1275

- 3 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
- 4 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
- 5 Shen Zicai, Wang Yingjian, Fan Zhenxiu *et al.*. Modeling analysis of deposition rate of inhomogeneous coatings prepared by double-source co-evaporation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **54**(1): 295~301
沈自才,王英健,范正修等. 双源共蒸法制备非均匀膜的模型分析[J]. *光学学报*, 2005, **54**(1): 295~301
- 6 Xiaoyong Fu, Sumei Wang, Degang Deng *et al.*. ZrO₂ films with variable refractive index by glancing angle deposition[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(4): 247~248
- 7 Kate Kaminska, Tim Brown, Gisia Beydaghyan *et al.*. Rugate filters grown by glancing angle deposition[J]. *Proc. SPIE*, 2002, **4833**: 633~639
- 8 Sossi L. A method for synthesis of multilayer dielectric interference coatings[J]. *Eesti Tead Akad Toim Fuus.*, 1974, **23**: 229~237
- 9 J. A. Dobrowolski, D. Lowe. Optical thin film synthesis program based on the use of Fourier transforms[J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**: 3039~3050
- 10 Southwell W H. Coating design using very thin high- and low-index layers[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(4): 457~460
- 11 Southwell W H. Scaling rules for quintic refractive index matching semi-infinite band antireflection coatings [C]. *Proc. SPIE*, 1997, **3133**: 65~70