

# 超宽带减反射膜的设计和制备

郑臻荣<sup>1</sup> 顾培夫<sup>1</sup> 陈海星<sup>2</sup> 陶占辉<sup>2</sup> 艾曼灵<sup>2</sup> 张梅骄<sup>2</sup> 唐晋发<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027; <sup>2</sup> 杭州科汀光学技术有限公司, 浙江 杭州 311100)

**摘要** 设计了 400~900 nm 波段上的超宽带减反射膜, 在 410~850 nm 范围内的平均残余反射率设计值约为 0.2%, 在设计的全波段上约为 0.24%。讨论了初始膜系结构的选择原则, 分析了带宽、膜层折射率差、最外层折射率和膜层总厚度等因素对宽带减反射特性的影响。对特定的带宽, 增加两种薄膜材料的折射率差和选择尽可能低的最外层折射率对获得优良的减反射特性是非常重要的。实验制备了 K<sub>9</sub> 玻璃上 TiO<sub>2</sub>/MgF<sub>2</sub> 两种材料组成的 8 层结构的超宽带减反射膜, 实测结果表明, 在带宽 520 nm 范围内的平均残余反射率约为 0.44%, 说明用二种材料设计超宽带减反射膜是成功的, 对垂直入射的减反射膜, 多种材料的膜系并不比两种材料更具优越性。

**关键词** 薄膜; 减反射膜; 超宽带宽; 初始结构; 优化

中图分类号 O484 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092907.2026

## Design and Preparation of Super Broadband Antireflection Coating

Zheng Zhengrong<sup>1</sup> Gu Peifu<sup>1</sup> Chen Haixing<sup>2</sup> Tao Zhanhui<sup>2</sup> Ai Manlin<sup>2</sup>  
Zhang Meijiao<sup>2</sup> Tang Jinfa<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China  
<sup>2</sup> Keting Optical Technology Inc., Hangzhou, Zhejiang 311100, China

**Abstract** A super broadband antireflection coating used in wavelength region of 400~900 nm is designed, which shows an average reflectance 0.2% at wavelength region 410~850 nm and 0.24% at 400~900 nm. The starting design for the computer optimization is discussed. The effect of bandwidth, the difference between high and low index, out-layer index and total thickness on predicting achievable performance is analyzed. For certain bandwidth, increasing difference between high and low index and selecting out-layer material with low index are very important for achieving an excellent anti-reflectance performance. An eight-layer super broadband antireflection coating with high and low index materials of TiO<sub>2</sub>/MgF<sub>2</sub> on the substrate K<sub>9</sub> has been prepared. The experimental result shows that the residual average reflectance of 0.44% in the bandwidth of 520 nm can be achieved. It is proved that the design of super broadband antireflection coating with two coating materials is successful comparing with more materials used for the situation of vertical incidence.

**Key words** thin film; antireflection coating; super broadband bandwidth; starting design; optimization

## 1 引 言

减反射膜是光学薄膜中应用最广的一种膜系。从远紫外<sup>[1]</sup>至远红外<sup>[2]</sup>、从常用玻璃和塑料基板到各种晶体<sup>[3,4]</sup>、从物理气相淀积到化学气相淀积<sup>[5]</sup>、从单入射角到宽入射角<sup>[6]</sup>、从单波长到宽带<sup>[7]</sup>和超宽带<sup>[8,9]</sup>都开展了深入的研究。随着光学薄膜设计、制备技术的不断提高, 目前制造用于可见光区带

宽  $B = \lambda_{\max}/\lambda_{\min} = 1.7$  的常规减反射膜已趋成熟, 实际制备的特性可以非常接近甚至完全达到理论设计值。但是, 由于规整的常规减反射膜一般由四分之一波长层和半波层组成, 这在过去因其易于膜厚控制而成为优点, 随着膜厚控制技术的进步, 这种规整膜系已因膜厚控制精度低而变成了缺点; 其次, 规整膜系常用 3~4 种材料, 要找到折射率稳定的又

收稿日期: 2008-10-08; 收到修改稿日期: 2008-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(60608014)和浙江省重大科技专项(2008C11104-1)资助课题。

作者简介: 郑臻荣(1972—), 男, 副教授, 博士, 主要从事光电显示和光电薄膜等方面的研究。E-mail: z zr@zju.edu.cn

能适用于不同基板的特定折射率的材料是有一定难度的；最后，这种规整膜系用于超宽带减反射膜设计比较困难，且不说带宽  $B$  扩大到 2 以上，有时甚至扩大到 1.8 都是非常困难的。

为了克服上述规整的常规减反射膜的缺点，本文采用两种材料来设计、制造超宽带减反射膜。这方面的工作曾有人研究过，特别是文献[10]得到了非常有用的结果。经验证明，在膜系总光学厚度和材料折射率给定的条件下，对垂直入射的减反射膜，多种材料的膜系结构并不比两种材料更具优越性。实际设计和实验制备也表明，对于设计制造超宽带减反射膜，采用两种薄膜材料，只要适当选择初始结构，更能获得优良的宽带减反射性能。

## 2 设计

超宽带减反射膜的设计没有简单可行的方法，只能依靠数值优化技术对初始结构优化或用全自动合成来获得满足要求的膜系<sup>[11]</sup>。Willey 根据大量的设计结果，总结出宽带减反射膜所能达到最低平均反射率的经验公式<sup>[10]</sup>：

$$R_{\text{AVE}}(B, L, T, D) \% = \frac{4.378}{D} \left( \frac{1}{T} \right)^{0.31} [\exp(B - 1.4) - 1] (L - 1)^{3.5} \quad (1)$$

式中， $B = \lambda_{\text{max}}/\lambda_{\text{min}}$  表示减反射带宽，其中  $\lambda_{\text{max}}$  是减反射波长区的最大值， $\lambda_{\text{min}}$  是最小值； $L$  是最外层膜的折射率； $T$  是膜系的总光学厚度，

$$T = \sum_i nd / \sqrt{\lambda_{\text{max}}\lambda_{\text{min}}},$$

$D$  是除最外层以外膜层高低折射率的差值。可以看出，附加中间折射率的第三种材料对于膜系达到最低反射率并无作用，膜系的基板折射率与达到的最低反射率也没有直接关系。

据上参数，还可估计减反射波长区域内的波纹数为

$$N = 8B/3 + 2T - 4 \quad (2)$$

影响波纹数的因子仅取决于带宽和总膜厚。

超宽带减反射膜初始结构的选取是获得最佳性能的关键，Baumeister<sup>[12]</sup>曾提出构建宽带减反射膜初始结构的原则：中心波长选为  $\lambda_0 = 2(1/\lambda_{\text{min}} + 1/\lambda_{\text{max}})^{-1}$ ；靠空气的最外层膜选用最低折射率材料，且膜厚为  $\lambda_0/4$ ，其余膜层的光学厚度小于等于  $\lambda_0/10$ ；至少要有一层厚膜，整个膜系应是一系列薄层与厚膜的组合。

综合运用上面的结果，构建了 8 层膜系

$G|(0.3H0.3L)^30.3HL|A$  作为初始结构，其中， $G$  为  $K_9$  玻璃， $H$  和  $L$  分别为  $\text{TiO}_2$  和  $\text{MgF}_2$ ， $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ 。膜系的设计带宽  $B = 2.25$ ， $n_L = 1.38$ ，中心波长处高低折射率的差值  $D = 1$ ，即  $\text{TiO}_2$  膜的折射率为 2.38。经单纯形法数值优化，最终得到 400~900 nm 超宽带减反射膜的反射率  $R$  随波长  $\lambda$  的变化曲线如图 1 所示。表 1 列出了各层膜以  $\lambda_0/4$  为单位的厚度 (QWOT)，总光学厚度  $T = 1.01$ 。由 (1) 式计算可得到理论上最低平均反射率为 0.2%，由 (2) 式可得到带内波纹数为 4。该膜系实际在 410~850 nm 的波长范围内平均残余反射率约为 0.2%，而在全波段上约为 0.24%，与 (1) 式的理论最佳结果稍有差异。

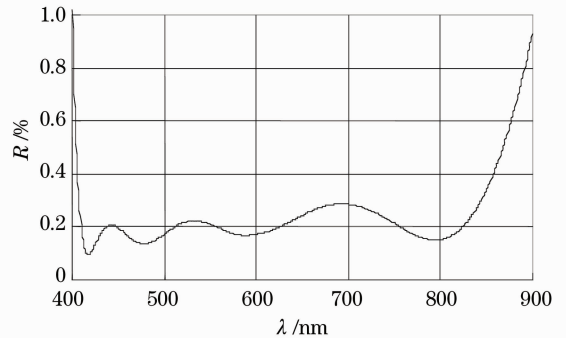


图 1 400~900 nm 超宽带减反射膜的设计反射曲线

Fig. 1 Calculated reflective curve of a 400~900 nm super broadband antireflection coating

表 1 8 层膜系各层膜以  $\lambda_0/4$  为单位的厚度

Table 1 Optical thickness in  $\lambda_0/4$  (QWOT) for an eight-layer antireflection coating

Coating materials from substrate	Thickness /QWOT
$\text{TiO}_2$	0.1946
$\text{MgF}_2$	0.4279
$\text{TiO}_2$	0.5497
$\text{MgF}_2$	0.1680
$\text{TiO}_2$	1.3910
$\text{MgF}_2$	0.1768
$\text{TiO}_2$	0.4556
$\text{MgF}_2$	1.0745

## 3 讨论

从上述超宽带减反射膜设计可以看出，只要初始结构选取合理，即使采用局域优化方法也能很快得到比较理想的结果，所以运用 Baumeister 提出的原则来构建超宽带减反射膜初始结构是非常有效的。

(1) 式给出的最低残余反射率中，减反射带宽  $B$

的影响是比较大的,图 2 计算了  $B = 1.75, 2.0, 2.5$  和  $3.0$  四种情况的设计结果,它们分别表示减反射带为  $400 \sim 700 \text{ nm}$ ,  $400 \sim 800 \text{ nm}$ ,  $400 \sim 1000 \text{ nm}$  和  $400 \sim 1200 \text{ nm}$  四种情况。可以看出,随着  $B$  值增加,不仅反射率平均值增加,而且波纹显著增大。

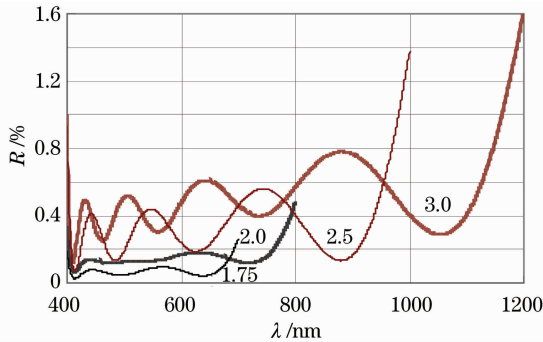


图 2 减反射带宽  $B=1.75, 2.0, 2.5$  和  $3.0$  对残余反射率的影响

Fig. 2 The effect of bandwidth  $B=1.75, 2.0, 2.5$  and  $3.0$  on residual reflectance

两种膜层材料的高低折射率之差或最外层折射率对残余反射率的影响如图 3 所示。计算中选用高折射率材料  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  和低折射率材料  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgF}_2$  组合,形成 4 种膜系结构。设计减反射带宽度为  $B=2.25$ 。由图 3 可见,两种膜料的折射率差或最外层膜的折射率对残余反射率的影响是很大的,增大折射率差或降低最外层膜折射率是超宽带减反射膜选择的目标,否则也会导致残余反射率升高、波纹增大,且使减反射带宽变窄。

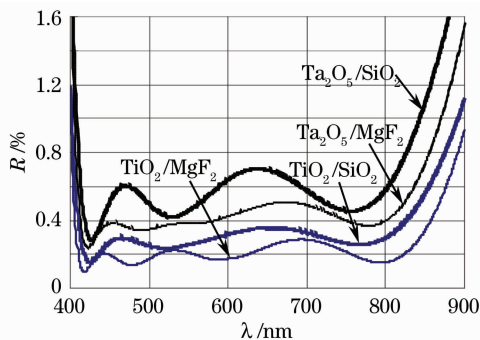


图 3 高低折射率之差或最外层折射率对残余反射率的影响

Fig. 3 The effect of the difference between high and low index and out-layer material index on residual reflectance

## 4 制 备

对表 1 所列的 8 层超宽带减反射膜进行了实验制备。实验制备是在韩一 900 机器上进行的,基板温度为  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ,高低折射率材料均用电子束蒸发,其

淀积速率分别为  $0.2 \text{ nm/s}$  和  $1.4 \text{ nm/s}$ ,蒸发  $\text{TiO}_2$  膜时真空氧压约为  $1.5 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 。样品测试是在 Lambda 900 上进行的,测试结果如图 4 所示。

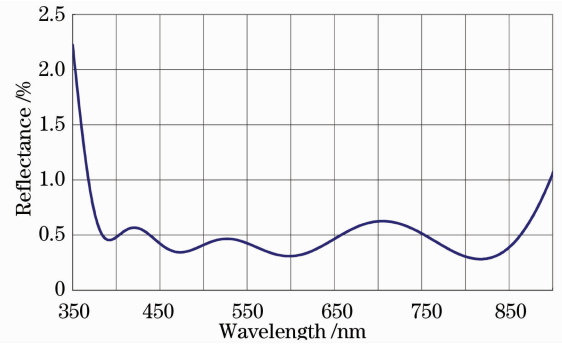


图 4  $400 \sim 900 \text{ nm}$  超宽带减反射膜的实验测试结果

Fig. 4 Measured reflectance curve of a  $400 \sim 900 \text{ nm}$  super broadband antireflection coating

从测试结果可以看到,在带宽  $520 \text{ nm}$  范围内的平均残余反射率约为  $0.44\%$ ,残余反射率比理论设计结果有些上升,但带宽却略有增加,这说明膜层折射率和厚度与设计值仍有一定的偏差。

## 5 结 论

设计表明,附加中间折射率的第三种材料对于超宽带减反射膜达到最低反射率并无作用,即对垂直入射的减反射膜,多种材料的膜系并不比两种材料更具优越性。膜系的基板折射率与达到的最低反射率也没有直接的关系。对特定的带宽,增加两种薄膜材料的折射率差和选择尽可能低的最外层折射率是非常重要的。适当选择初始结构,便能获得优良的超宽带减反射性能。对  $400 \sim 900 \text{ nm}$  减反射膜,在  $410 \sim 850 \text{ nm}$  范围内的平均残余反射率设计值约为  $0.2\%$ ,在设计的全波段上约为  $0.24\%$ 。实验制备表明,在带宽  $520 \text{ nm}$  范围内的平均残余反射率可达到  $0.44\%$ ,虽然残余反射率比理论设计平均值上升约  $0.2\%$ ,但带宽却比理论设计更宽些。

## 参 考 文 献

- Liu M. C., Lee C. C., Kaneko M *et al.*. Microstructure of magnesium fluoride films deposited by boat evaporation at  $193 \text{ nm}$  [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(28): 7319~7324
- Li Daqi, Liu Dingquan, Zhang Fengshan. Design and fabrication of  $6.4 \sim 15 \text{ } \mu\text{m}$  broadband antireflection coatings [J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2006, **25**(2): 135~137  
李大琪,刘定权,张凤山.  $6.4 \sim 15 \text{ } \mu\text{m}$  宽带增透膜的设计与制作 [J]. *红外与毫米波学报*, 2006, **25**(2): 135~137
- TanTianya, Huang Jianbing, Zhan Meiqiong *et al.*. Design of  $1064 \text{ nm}$ ,  $532 \text{ nm}$ ,  $355 \text{ nm}$  frequency-tripled antireflection coating for LBO [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1327~1332  
谭天亚,黄建兵,占美琼等. 三硼酸锂晶体上  $1064 \text{ nm}$ ,

532 nm, 355 nm 三倍频增透膜的设计[J]. 光学学报, 2007, **27**(7):1327~1332

4 Zhao Pei, Wu Fuquan, Hao Dianshen *et al.*. The Developmet of the Glan-Taylor prism AR film[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 671~674

赵培, 吴福全, 郝殿中. Glan-Taylor 棱镜端面增透膜的研制[J]. 光子学报, 2006, **25**(5): 671~674

5 Xu Y, Zhang B, Fan W. H *et al.*. Sol-gel broadband anti-reflective single-layer silica films with high laser damage threshold [J]. *Thin Solid Films*, 2003, **440**(3): 180~183

6 Xu Xiaofeng, Xing Huaishen, Du Xiliang *et al.*. Study of anti-polarization and antireflection coatings of broad angle ranges by inhomogeneous coatings [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9): 1691~1693

徐晓峰, 邢怀中, 杜西亮等. 利用非规整膜系实现宽角度入射减偏振、减反射薄膜的 [J]. 光子学报, 2007, **36**(9):1691~1693

7 Sven Laux, Nobert Kaiser *et al.*. Broad-band antireflectio coatings deposited with ion-assisted evaporation [C]. Part of the Europto Conference on Advnces in Optical Interference Coatings, Ber-lin, Germany . SPIE, 1999, **3738**: 76~80

8 Huang Guangwei, Tian Weijian *et al.*. ew design of supeer wide bandwidth antireflection film [J]. *Acta. Photonica Sinica*, 2007, **36**(9): 1694~1696

黄光伟, 田维坚等. 超宽带增透膜新的设计法 [J]. 光子学报,

2007, **36**(9): 1694~1696

9 Xu Jiangfeng, Chen Qiuling. Anti-reflection coating designed by genetic algorithm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1271~1275

徐江峰, 陈秋灵. 增透膜的遗传算法设计院[J]. 中国激光, 2007, **34**(9): 1271~1275

10 Willey R R. Predicting achievable design performance of broadband antireflection coatings [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(28): 5447~5451

11 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. Modern optical thin film technology [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. 81~83

唐晋必, 顾培夫, 刘旭等. 现代光学薄膜技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006. 81~83


12 Baumeister P. Starting designs for the computer optimization of optical coatings [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(22): 4835~4843

13 Gu peifu, Chean Haixing *et al.*. Determiation of teh extinction coefficient of TiO<sub>2</sub> and effect of preparation parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 1005~1008


顾培夫, 陈海星等. TiO<sub>2</sub> 膜消光系数的确定及制备参量的影响 [J]. 光学学报, 2005, **25**(7): 1005~1008

14 Yu H, Qi H J, Cui Y *et al.*. Influence of substrate temperature on properties of MgF<sub>2</sub> coatings [J]. *Appl. Sur.Sci.*, 2007, **253**: 6113~6117

· 广 告 ·



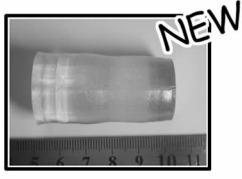
**全球领先的激光晶体和非线性光学晶体制造商**



2009年6月15-18日  
欢迎光临我们的展位: Hall B1 #175

### 磁光晶体系列


铽镱石榴石 (TGG)



**NEW**

### 产品系列


1. 非线性光学晶体
2. 激光晶体
3. 绿光、蓝光晶体组件
4. 声光和电光晶体
5. 双折射晶体
6. 闪烁晶体
7. 激光光学产品
8. 通讯光学产品
9. 光通讯薄膜滤光片
10. 红外光学产品
11. Q-开关、温控炉等



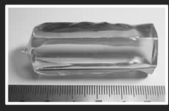
BBO Q-开关

BBO 普克尔盒的应用

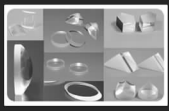
- 1、高重复频率DPSS中Q开关的理想选择
- 2、用于高重复频率再生放大系统的控制
- 3、腔倒空系统
- 4、削波



Q开关驱动源



超长 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体



光学产品

地址: 中国福建省福州市杨桥西路155号    电话: +86-591-83710533    传真: +86-591-83711593    [Http://www.castech.com](http://www.castech.com)    E-mail:sales@castech.com