

基于遗传算法的全向宽波段减反射膜系的优化设计

唐振方¹ 唐守利¹ 赵亭亭¹ 王小辉² 卫红²

(¹暨南大学物理系, 广东 广州 510632; ²广州市光机电技术研究院, 广东 广州 510663)

摘要 随着斜角沉积及刻蚀等技术的不断发展和完善,具有纳米多孔性结构的低折射率材料的获得为设计和制备减反射膜提供了新思路,在减少大角度入射光的反射,维持色平衡方面具有重要的应用价值。结合纳米多孔性材料在 H-K9L 光学玻璃表面利用遗传算法优化设计了一种具有全向宽波段减反特性的 4 层渐变折射率减反射膜系结构,计算了其反射率变化曲线,并与常规材料制备的单层膜进行了比较,发现在入射角为 0~75° 的范围内可以对可见光起到有效的减反射作用,其关于角度和波长的平均反射率可以降低到 0.21%。

关键词 光学设计;渐变折射率减反射膜系;遗传算法;纳米多孔性材料

中图分类号 O484

OCIS 310.1210 310.4165 310.6628 310.6860

文献标识码 A

Omnidirectional Broadband Antireflection Coatings Optimized by Genetic Algorithm

Tang Zhenfang¹ Tang Shouli¹ Zhao Tingting¹ Wang Xiaohui² Wei Hong²

¹Department of Physics, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China
²Guangzhou Institute of Optical, Mechanical and Electrical Technology,
Guangzhou, Guangdong 510663, China

Abstract Along with the development of oblique angle deposition and etching, the development of reflection coatings has been broadened by the nano-porous low-index material, which has played an important role in reducing the reflection of the wide-angle incident light and maintaining the color balance. An optimized four layers graded-index antireflection coating on H-K9L optical glass with broadband and omnidirectional characteristics designed by genetic algorithm is presented. The reflection coefficient curves are also obtained and compared with the single layer made by normal materials. It plays a very good role in reducing reflectivity for the visible light when the incident angle ranges from 0° to 75°. The total average wide-angle visible spectral reflectivity can be reduced to 0.21% in this scope.

Key words optical design; graded-index antireflection coatings; genetic algorithm; nano-porous material

1 引言

减反射膜广泛应用于诸如平板显示器,LED,激光器和太阳能电池等诸多光学系统和器件中,用来消除不必要的界面反射对系统或器件造成的不利影响。传统的 1/4 波长单层减反射膜仅对于特定波长小角度入射时能起到很好的减反射效果,而传统的多层减反射膜系虽然能实现宽波段减反,却往往需要很多层才能实现。特别对于广角镜头,超广角镜头等光学系统,过多的大角度入射造成的反射容易导致鬼影和眩光效应的产生,此时传统的减反射膜已不能满足减反的要求。为了有效地减少大角度入射导致的反射造成的杂散光的产生和光能量的损失以及降低传统镀膜表面光线反射对色平衡的破坏,全向宽波段减反射膜为此提供一个很好的解决办法。

Lord Rayleigh^[1] 19 世纪就已开始对具有全向和宽波段减反特性的渐变折射率减反射膜展开理论研究,但低折射率材料尤其是可以与空气的折射率相当的材料在当时的实验条件下很难获得,限制了其实际的应

收稿日期: 2010-05-08; 收到修改稿日期: 2010-06-22

基金项目: 广州市科技支撑计划(2008Z1-D581)资助课题。

作者简介: 唐振方(1969—),男,博士,副教授,主要从事光电功能材料与器件方面研究。E-mail: ttangzf@jnu.edu.cn

用发展。直到1962年C. G. Bernhard等^[2]发现“蛾眼”效应及其表面亚波长纳米针尖状阵列结构,为研究和制备全向宽波带减反射结构注入了新鲜思路,并引起了纳米结构在减反膜设计应用中的研究热潮。根据薄膜的介电理论,决定膜层折射率的材料介电常数与此种材料在空气中的填充密度有关^[3]。而纳米针尖状阵列沿结构的生长方向其填充密度是逐渐减小的,遂实现了膜层的折射率连续渐变。近来,J. Q. X.等^[4]利用斜角沉积技术获得了折射率最低为1.05的纳米多孔性结构,并制备了能够有效消除菲涅耳反射的渐变折射率膜系结构。Huang Weihang等^[5~7]利用蚀刻技术制备了“蛾眼”纳米针尖状阵列结构获得了很好的减反射效果。

而在可以获得低折射率材料的前提下对其进行优化组合以达到更好的减反效果是获得优良减反射膜的关键,遗传算法作为一种随机全局搜索和优化方法,在薄膜膜系结构全自动优化设计方面已得到了广泛的应用^[8~11],本文利用这一方法在H-K9L光学玻璃表面优化设计了一种多层渐变折射率减反射膜结构,较好地实现了全向宽波带减反射作用。

2 理论分析

2.1 多层介质薄膜的反射率计算

多层介质膜系光学特性的计算可以通过导纳特征矩阵的方法得以解决^[12]。若在折射率为 n_s 的基底上镀制 m 层折射率分别为 $n_j(j=1,2,3,\dots,m)$,厚度分别为 $d_j(j=1,2,3,\dots,n)$ 的介质膜,基底和 m 层介质薄膜组合的特性矩阵为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^m \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 δ_j 为膜层的相位厚度,对p-偏振波和s-偏振波都为

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos \theta_j, \quad (2)$$

式中每层的入射角 θ_j 可以由Snell折射定律得到

$$\theta_j = \arccos \left[\sqrt{1 - \left(\frac{n_0 \sin \theta_0}{n_j} \right)^2} \right], \quad (3)$$

式中 n_0 和 θ_0 分别表示入射介质的折射率和入射角。

导纳 η_j 为

$$\eta_j = \begin{cases} n_j / \cos \theta_j & \text{p-polarized} \\ n_j \cos \theta_j & \text{s-polarized} \end{cases} \quad j = 0, 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

得到膜系的强度反射率为

$$R = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^* \quad (5)$$

2.2 遗传算法

在优化初始阶段,随机产生一个个体数量为 M 的种群,其中的任一个体代表一种膜层组合,并包含两种基因类型分别为折射率和几何厚度。如果膜系为图1所示的结构,则种群中任意个体可以用染色体为图2所示的表现型加以表示。

为了体现折射率渐变,每层的折射率取值沿入射介质到基底的方向依次增大,对应每层的几何厚度取值依次减小,即折射率越大越靠近基底,并且折射率越大对应的几何厚度越小^[11]。接着对每个个体进行适应度评价,评价函数^[11]为

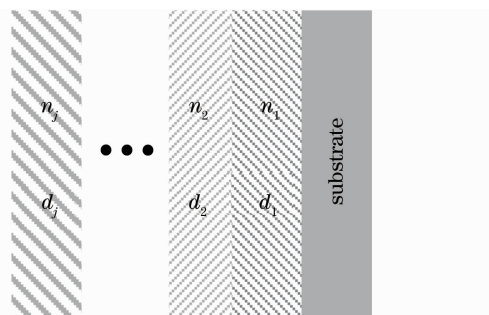


图1 膜系结构

Fig. 1 Structure of the multilayer coating

$$R_{ave} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \frac{2}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^{\pi/2} \frac{R_{TE} + R_{TM}}{2} d\lambda d\theta, \quad (6)$$

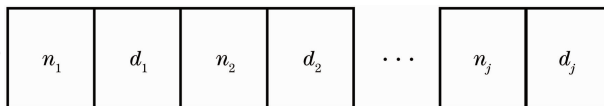


图2 染色体表现型

Fig. 2 Chromosome phenotype

式中 R_{TE} 和 R_{TM} 分别代表 s 波和 p 波, θ 表示光束入射角度, λ 表示波长。依据适应度值的大小对个体进行排序并按一定的选择机制将适应度好的个体选择到并保留下

一代, 一部分表现差的个体便遭淘汰, 取而代之的是经过交叉和变异产生的新个体, 进而产生与父辈种群同等大小的新种群。新种群再经适应度评价等步骤进行循环迭代, 不断产生更适应环境的新个体, 使群体进化到搜索空间中越来越好的区域。最后, 结合局部搜索算法进一步优化, 找到最好个体。

3 结果分析

利用遗传算法在 H-K9L 光学玻璃表面优化设计了一种 4 层渐变折射率减反射膜系结构。优化过程中设定入射角度为 $0 \sim 75^\circ$, 工作带宽为 $380 \sim 780$ nm。由于硬质 SiO_2 与基底的折射率相近选其作为沉积在基底上的第一层膜。对于减反射膜来讲, 与空气接触的膜层折射率越低减反效果越好, 故选取已获得的折射率最低为 1.05 的纳米多孔性 SiO_2 [4] 作为膜系结构的最外层。优化过程中还考虑了基底和硬质 SiO_2 在此波谱范围内的折射率色散, 没有考虑材料的吸收。经过大约 100 代的迭代计算所得膜系结构参数如表 1 所示。

表 1 优化所得减反射膜系的结构参数

Table 1 Design parameters of the optimized antireflection coatings

Layer	Thickness /nm	Refractive index
1	92	1.46
2	110	1.29
3	132	1.13
4	240	1.05

同时, 作为比较计算得到了光学厚度为 $1/4$ 波长 ($\lambda = 550$ nm) 单层 MgF_2 传统减反射膜的光学特性曲线以及 H-K9L 光学玻璃裸露表面的反射情况, 如图 3~5 所示。此外, 与 3 层和 5 层渐变折射率减反射膜结构的优化结果相比较, 3 层结构的减反射特性没有 4 层结构表现得那么好, 而 5 层结构所需的纳米多孔性薄膜间的折射率变化太小, 会加大对镀膜设备的工艺控制要求。

表 1 所示总物理厚度为 574 nm 的 4 层渐变折射率减反射膜系结构的减反射特性如图 3 所示 (计算时波长和角度间隔分别为 1 nm 和 1°), 由图 3(a) 可知其在入射角为 $0 \sim 75^\circ$, 工作带宽为 $380 \sim 780$ nm 的范围内表现出了较好的减反射特性。其关于入射角度和波长的总的平均反射率可以达到 0.21%。图 3(b) 表明在此光谱范围内当入射角度为 74° 时, 反射率最小可以达到 0.64%, 最大仍可以达到 1.8%。而小于 70° 时, 其反射率均小于 1.0%, 当垂直入射时在 750 nm 处可以达到最小值 0.03%。并且在 $430 \sim 780$ nm 的波谱范围内维持在 0.1% 以下。表明优化所得 4 层渐变折射率减反射膜系结构能够对在 H-K9L 光学玻璃表面以入

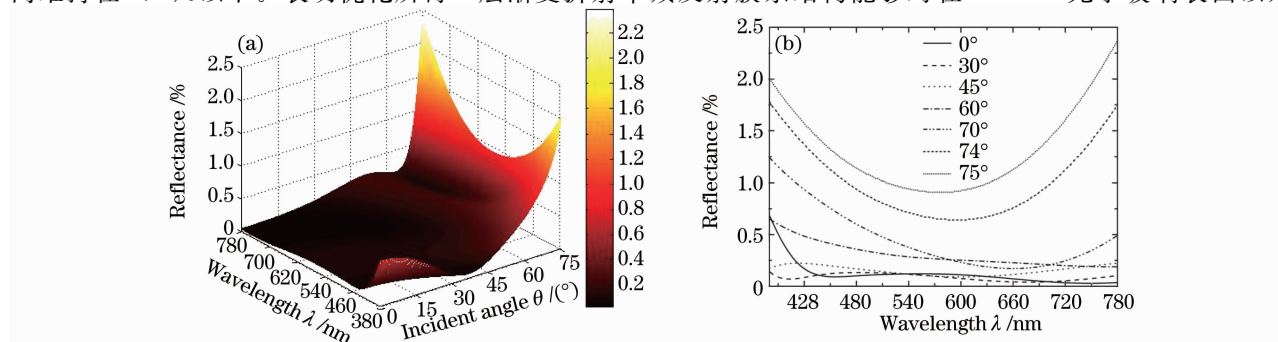


图 3 (a) 优化所得膜系结构的全向宽波段减反射特性曲面; (b) 不同入射角度情况下反射率随波长的变化关系

Fig. 3 (a) Omni directional broadband visible antireflection performance of the optimized coatings;

(b) spectral variation of the reflectance for different incident angles of the coatings

射角度为 $0\sim 75^\circ$ 入射的可见光起到有效的减反射作用, 具有良好的全向宽波带减反射特性。

图 4 进一步表明(计算中波长和角度间隔分别为 1 nm 和 5°)可见光以 75° 角入射时, 其关于波长的平均反射率可以达到 1.32% , 入射角度小于 74° 时, 均小于 1% , 并在 27° 时达到最低 0.085% 。此时此减反射膜结构使得 H-K9L 光学玻璃表面关于波长的平均反射率相比较传统的单层 MgF_2 膜降低了大约 30% 。随着角度的增加此平均反射率呈现先降低后增大的变化趋势, 并在 $70^\circ\sim 75^\circ$ 之间产生突变。

图 5 从另一方面体现了此结构的全向宽波带减反射特性(计算中波点和角度间隔取为 1 nm 和 1°), 其在 $0\sim 75^\circ$ 入射角范围内关于角度的平均反射率在 380 nm 处具有最大值 0.52% , 此后其值不断减小, 并在 $640\sim 690\text{ nm}$ 的范围内出现最小值大约 0.14% 。从这一方面讲, 与传统的单层 MgF_2 相比, 其减反效果提高了大约 49% 。

由此可以看出, 在 H-K9L 光学玻璃表面优化所得四层均质渐变折射率减反射膜系结构能够对以小于 75° 角入射的可见光起到很好的减反射作用。相比较于 Liou Yeuhyeong 等^[13] 利用螺旋搜索方法以 MgF_2 和 TiO_2 两种材料为基材优化得到的 20 层减反射膜系结构, 不仅所需镀制的膜层数量少, 仅需 4 层, 而且可以实现更大入射角度的减反。另外, 随着诸如精确的蚀刻技术以及斜角沉积技术等方法不断发展和完善, 低折射率材料的获得已非难事, 会使此类优化设计所得膜系结构更加容易实现。

4 结 论

利用遗传算法对 H-K9L 光学玻璃表面进行了减反射膜的优化设计, 得到了一种最优化 4 层渐变折射率膜系结构, 其在 $0\sim 75^\circ$ 入射角度范围内可以对可见光起到有效的减反射作用, 关于角度和波长的总的平均反射率可以降低到 0.21% , 在入射角为 75° 时, 关于波长的平均反射率可以达到 1.32% , 而在入射角小于 74° 时, 此反射率维持在 1.0% 以下, 最小值可以达到 0.085% 。另一方面, 在可见光谱范围内, 关于角度的平均反射率维持在 0.52% 以下, 最低可以达到 0.14% 。

参 与 文 献

- 1 Lord Rayleigh. On reflection of vibrations at the confines of two media between which the transition is gradual[J]. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 1880, **11**(1): 51~56
- 2 C. G. Bernhard, William H. Miller. A corneal nipple pattern in insect compound eyes [J]. *Acta Physiologica Scandinavica*, 1962, **56**(3-4): 385~386
- 3 Shen Zicai, Shao Jianda, Wang Yingjian *et al.*. Theoretical study of graded-index coatings prepared by glancing angle deposition[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(7): 3069~3074
沈自才, 邵建达, 王英剑等. 斜角入射沉积法制备渐变折射率薄膜的理论探讨[J]. *物理学报*, 2005, **54**(7): 3069~3074
- 4 J. Q. X., Martin F. Schubert, Jong Kyu Kim *et al.*. Optical thin-film materials with low refractive index for broadband elimination of Fresnel reflection[J]. *Nature photonics*, 2007, **1**(3): 176~179
- 5 Huang Weihang, Sun Chihhung, Min Weilun *et al.*. Templated fabrication of periodic binary nanostructures[J]. *J. Phys.*

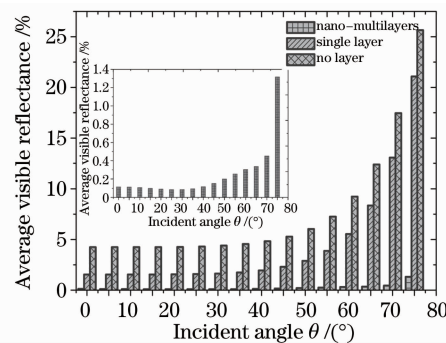


图 4 可见光范围内的平均反射率随光线入射角度的变化情况以及 Nano-multilayers 情况下的放大图

Fig. 4 Average visible wavelength reflectivity changes with the light incident angle with no layer, single layer and nano-multilayers, respectively, and the smaller diagram is an enlarged view of the nano-multilayers

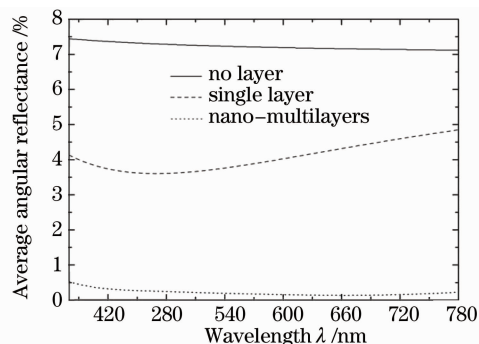


图 5 不同镀膜表面 $0\sim 75^\circ$ 范围内的平均反射率与波长的对应关系

Fig. 5 Relationships between average angular reflectance over angle of incidence $0\sim 75^\circ$ and wavelength of the H-K9L optical glass with different coatings

- Chem. C, 2008, **112**(45): 17586~17591
- 6 Sun Chihhuang, Jiang Peng, Jiang Bin. Broadband moth-eye antireflection coatings on silicon[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(6): 06112
- 7 Huang Yifan, Surojit Chattopadhyay, Jen Yijun *et al.*. Improved broadband and quasi-omnidirectional antireflection properties with biomimetic silicon nanostructures[J]. *Nature Nanotechnology*, 2007, **2**(12): 770~774
- 8 Yang Jinmoon, Kao Chengyen. A robust evolutionary algorithm for optical thin-film designs[J]. *Evolutionary Comput.*, 2000, **2**: 978~985
- 9 Jiang Liyong, Zheng Gaige, Shi Linxing *et al.*. Broad omnidirectional reflectors design using genetic algorithm[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(19): 4882~4888
- 10 Martin F. Schubert, Frank W. Mont, Sameer Chhajed *et al.*. Design of multilayer antireflection coatings made from co-sputtered and low-refractive-index materials by genetic algorithm[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(8): 5290~5298
- 11 David J. Poxson, Martin F. Schubert, Frank W. Mont *et al.*. Broadband omnidirectional antireflection coatings optimized by genetic algorithm[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(6): 728~730
- 12 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. Modern Optical Thin Film Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006. 20~32
唐晋发, 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. 20~32
- 13 Liou Yeuhyeong, Wei Zhiwei, Wang Lirang *et al.*. Spiral search method for designing a wide angular broadband visible antireflection coating[J]. *Opt. Rev.*, 2009, **16**(2): 176~179