

可见光波段宽带增透光学膜的研究

韦 龙, 王 惠, 施钧策, 丁可可, 马宇航, 李 轩, 李再金*, 曾丽娜,
李 林, 乔忠良, 曲 轶, 刘国军

海南师范大学物理与电子工程学院, 海南省院士团队创新中心, 海南省激光技术与光电功能材料重点实验室, 海南 海口

收稿日期: 2022年5月28日; 录用日期: 2022年6月28日; 发布日期: 2022年7月7日

摘 要

本文提出一种基于不同实验条件下的镀膜研究方法, 设计了可见光波段宽带增透膜。选择 TiO_2 和 MgF_2 为镀膜材料, 通过TFCalc软件设计了380 nm~780 nm波段宽带增透膜(AR膜), 并通过模拟仿真实验分析得到单层 TiO_2 、 MgF_2 薄膜各波段的折射率, 以及不同中心波长、单层材料折射率误差和厚度误差、入射角变化对可见光波段宽带AR膜平均透过率(AT)的影响。结果表明: 中心波长为610 nm, 入射角小于 50° , TiO_2 折射率偏差在-0.2~0, 厚度偏差在-10~0 nm, MgF_2 折射率偏差在-0.1~0.1, 厚度在-5 nm~5 nm之间变化时, 可实现全波段平均透过率超过96%, 为光学薄膜的研究提供了一种可参考的研究途径。

关键词

增透膜, 光谱曲线, 平均透过率, 薄膜镀制

Study on Broadband Antireflection Optical Film in Visible Band

Long Wei, Hui Wang, Junce Shi, Keke Ding, Yuhang Ma, Xuan Li, Zaijin Li*, Lina Zeng,
Lin Li, Zhongliang Qiao, Yi Qu, Guojun Liu

Key Laboratory of Laser Technology and Optoelectronic Functional Materials of Hainan Province, Academician Team Innovation Center of Hainan Province, College of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou Hainan

Received: May 28th, 2022; accepted: Jun. 28th, 2022; published: Jul. 7th, 2022

Abstract

In this paper, a coating research method based on different experimental conditions is proposed,

*通讯作者 Email: lizaijin@126.com

文章引用: 韦龙, 王惠, 施钧策, 丁可可, 马宇航, 李轩, 李再金, 曾丽娜, 李林, 乔忠良, 曲轶, 刘国军. 可见光波段宽带增透光学膜的研究[J]. 现代物理, 2022, 12(4): 97-107. DOI: 10.12677/mp.2022.124010

and a broadband antireflection film in visible light band is designed. TiO_2 and MgF_2 were selected as coating materials. The broadband antireflection film (AR film) in 380 nm~780 nm band was designed by TFCalc software. The refractive index of each band of single-layer TiO_2 and MgF_2 film, as well as the effects of different central wavelengths, refractive index error and thickness error of single-layer material and incident angle on the average transmittance (AT) of broadband AR film in visible band were analyzed through simulation experiments. The results show that when the central wavelength is 610nm, the incident angle is less than 50° , the refractive index deviation of TiO_2 is $-0.2\sim 0$, the thickness deviation is $-10\sim 0$ nm, the refractive index deviation of MgF_2 is $-0.1\sim 0.1$, and the thickness changes between -5 nm~5 nm, the full band average transmittance can be more than 96%, which provides a reference research way for the research of optical films.

Keywords

AR Coating, Spectral Curve, Average Transmittance, Thin Film Plating

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着科技蓬勃发展, 光学薄膜以成为了人们生活的重要组成部分, 在我们生活中的各个领域, 光学薄膜都发挥着重要作用, 如太阳能电池、光伏玻璃、隔离涂层、电子设备等。自 1930 年扩散泵问世以来, 尤其计算机的广泛应用, 极大推动了薄膜技术和制备工艺的发展, 形成了从理论计算、设计优化到实验工艺制备和测量监控等较为成熟的镀膜体系[1], 2008 年, 唐亚陆等人[2]通过讨论, 给出了光学薄膜作为增透膜应满足的条件, 以及单层光学薄膜反射率与膜层折射率及膜厚关系曲线。2015 年, 德国夫琅和费应用光学与精密工程研究所的 S.Schroder 等人[3]在基于矢量散射的基础上, 将不同波长的角分辨光散射值、粗糙度测量值和简化的理论模型相结合, 设计了新的实验方法和建模技术来研究不同粗糙面的散射特性。2019 年, 蓝惠琴[4]提出基于周期结构模型的光学折射率研究方法, 利用周期结构模型, 确定薄膜的光学常数, 在依据各材料在反应气体中的配比, 测量光学薄膜折射率, 解决了传统方法测量折射率材料精度无法达到标准化生产标准的问题。2020 年, 杨秀琴等人[5]在玻璃上制备纳米多孔 SiO_2 增透膜, 分析出膜层折射率和透光率, 膜层结构, 耐候性之间的关系, 为镀膜玻璃的生产提供了有力的数据。2021 年, L Pan 等人[6]提出平移匹配法(TMM)用于准确计算薄膜的折射率, 解决了在光照、电测、退火等常规处理后使用 Swanepoel 法导致薄膜折射率计算误差的问题。国内外对于镀膜工艺对折射率的影响及折射率、厚度对膜系影响都进行了多方面的研究, 但通过设计膜系并对整个镀膜实验多方面影响因素进行系统性研究的相关研究比较少见。本文在已有的镀膜体系的基础上, 就实际工艺制备中存在因镀膜设备、环境等差异导致镀膜材料折射率不确定, 采用同样的镀膜体系, 实验结果也依然可能存在差异等问题, 设计了一种基于不同实验条件下的镀膜研究方法, 为光学薄膜的研究提供了一种可参考的研究途径。

2. 膜系设计

2.1. 材料选择

在设计膜系时, 首先需要确定所选择的材料在实际工艺制备中的可行性以及在特定使用环境中能保持性能稳定性, 它将直接决定最终制备得到的薄膜能否达到使用的要求。我们在选择材料时, 既要考虑

材料的折射率、透光波段材料的透光度,同时也要考虑材料间的应力是否匹配[7],为保证体系的稳定性,应考虑不同膜层之间的应力大小,尤其是本征应力,最好选择同一工艺下应力类型相反的两种物质进行组合。根据以上原则以及实验需要,本文选用 TiO_2 和 MgF_2 作为镀膜材料, TiO_2 有较宽的透明透明波段,密度为 4.29 g/cm^3 , 其透明波段为 $0.36 \mu\text{m}\sim 9 \mu\text{m}$, 覆盖可见光波段, 而且它的机械、化学性质稳定, 折射率较高并可随制备工艺变化, 此外, TiO_2 薄膜还具备很好的光催化性与光致亲水性[8], 低折射率材料选用 MgF_2 , MgF_2 薄膜的光学损耗比较低, 密度为 4.2 g/cm^3 , 其透明波段为 $0.25 \mu\text{m}\sim 9 \mu\text{m}$, 与 TiO_2 应力匹配良好, 性能稳定。随着薄膜科学的蓬勃发展, MgF_2 的应用也日益广泛[9] [10] [11] [12] [13]。研究表明: MgF_2 和 TiO_2 都适合采用真空蒸发法制备薄膜[14]-[19]。

2.2. 设计流程与结果

2.2.1. 设计理论

宽带 AR 膜的设计没有捷径, 只能通过数值优化技术对初始结构进行优化, 或用全自动合成来获得满足要求的膜系[20]。我们可以利用 Willey 总结出的宽带 AR 膜所能达到最高 AT 的经验公式为基础确定初始膜系结构[21]:

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

在式中, $T = \sum_i nd/\sqrt{\lambda_{\max}\lambda_{\min}}$, T 表示膜系的总光学厚度, $B = \lambda_{\max}/\lambda_{\min}$ 表示透射带宽; 其中 λ_{\min} 表示透射波长区的最小值, λ_{\max} 表示最大值; L 表示最外层膜的折射率; D 表示除最外层以外膜层高低折射率的差值。显然, 中间折射率的第三种材料对于膜系达到最高透射率并无作用, 膜系的基板折射率与达到的最高透射率也没有直接关系, 获得最佳性能的关键在于初始结构的选取。Baumeister [22]曾提出构建宽带 AR 膜初始结构的原则: $\lambda_0 = 2(1/\lambda_{\min} + 1/\lambda_{\max})^{-1}$ 为中心波长, 因此, 可以在这个原则基础上, 通过 TFCalc 软件改变中心波长以得到最佳中心波长; 接触空气的最外层膜应选用折射率最低的材料, 且膜厚为 $\lambda_0/4$, 其余膜层的光学厚度小于或等于 $\lambda_0/10$; 但其中至少要有一层厚膜, 设计的整个膜系应是一系列薄层与厚层的组合。

2.2.2. 初始膜系结构设计及优化

运用 2.1 理论分析的结果, 运用 TFCalc 软件构建了 8 层膜系作为 $\text{Sub}|(0.299\text{H}0.296\text{L})3 \ 0.37\text{HL}| \text{Air}$ 初始结构, 其中, G 为 K9 玻璃 H 和 L 分别为 TiO_2 和 MgF_2 。选择膜层优化方式, 并设定相关参数, 如允许误差、最高迭代次数等, 然后设置针形优化参数, 选择 TiO_2 和 MgF_2 作为插层材料, 获得具体膜层结构及优化后理论透光曲线。优化后的膜系为 $\text{Sub}|0.3334\text{L}0.1661\text{H}0.468\text{L}0.4023\text{H}0.1865\text{L}1.1271\text{H}0.1326\text{L}0.3918\text{H}0.8855\text{L}| \text{Air}$, 该膜系优化结构由 TiO_2 和 MgF_2 两种膜材交替叠加 9 层组成, 虽然初始结构设为规整膜系, 膜厚均为 $1/4$ 光学波长, 但在优化过程中, 软件采用 Needle 法进行了自动插层, 并优化了膜厚, 最后得到的膜层厚度均为非规整类型, 其中基体表面第一层和靠近空气界面的均为 MgF_2 。此外, 由图 1 可以看出, 该膜系相较初始膜系, 全波段 AT 值均有上升, 且在 $380 \text{ nm}\sim 780 \text{ nm}$ 范围内的透光率一直保持在 99.8%左右, 优化后的光谱曲线十分平坦, 达到了膜系设计的光学性能指标。因此, 可以认为这个膜系结构是比较理想的。

3. 模拟误差分析

3.1. 实际与理论之间的差异

当我们在实验室镀膜时, 常发现镀制的薄膜实际测试得的性能与理论设计的增透效果差很多, 这是

因为薄膜的实际结构与理论设计模型已产生较大偏差，主要体现在折射率与厚度两方面。我们进行理论设计时，每个膜层的折射率与厚度都是均匀分布的，而且折射率多选择块体理论值进行计算。但在实际制备薄膜时，由于薄膜的密度有限，折射率偏低，导致工艺参数的浮动和界面状态的变化，实际制备的薄膜折射率与厚度均不可避免存在非均匀性，这种非均匀性对传统分层介质薄膜的光学性能不利，需要尽量降低；因此有必要研究不同工艺条件下薄膜折射率和厚度的非均匀性变化，对其实现灵活调控，有利于制备光学性能优异的增透膜体系。

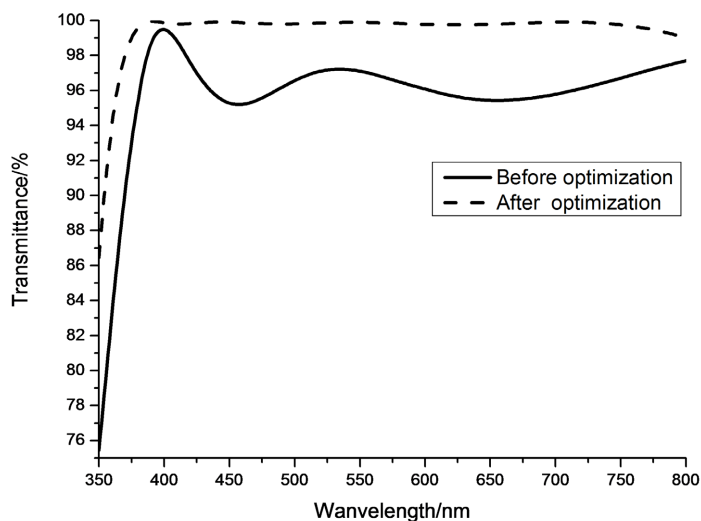


Figure 1. Spectral curve of AR film in visible light band before and after optimization

图 1. 优化前后可见光波段 AR 膜光谱曲线

3.2. 模拟过程

3.2.1. 单层 TiO₂、MgF₂ 薄膜折射率研究

由于在不同的实验环境和设备下，同样的材料制备出的膜层的折射率可能不同，在确定了实验环境后，首先应研究在该实验条件下材料的折射率，设计单层 TiO₂ 和 MgF₂ 薄膜，膜系为 G|8H|Air，其中，G 为 K9 玻璃，H 分别为 TiO₂ 和 MgF₂，在此之前，我们应先讨论折射率随镀膜工艺参数如沉积速率、基片温度、不同的氧分压对单层薄膜折射率的影响，采用控制变量法，通过控制单一变量，镀制单层薄膜，研究以上关键工艺参数对单层 TiO₂ 或 MgF₂ 单层薄膜折射率的影响。确定镀膜工艺参数对单层 TiO₂ 或 MgF₂ 单层薄膜随各项工艺参数的变化趋势，以 G|8H|Air 为膜系，选定中心波长为 380 nm，镀制薄膜，用光谱仪测得该中心波长对应得实际得光谱线，利用通过光学透过率公式计算极值点折射率，当对应薄膜的光学厚度为 $\lambda/2$ 时， $T = (1 - R_1)(1 - R_2)$ ， $R_1 = R_2 = \left| \frac{n_0 - n_2}{n_0 + n_2} \right|^2$ 。当对应薄膜的光学厚度为 $\lambda/4$ 奇数倍

时， $R_1 = \left| \frac{n_0 n_2 - n_1^2}{n_0 n_2 + n_1^2} \right|^2$ ， $R_2 = \left| \frac{n_0 - n_2}{n_0 + n_2} \right|^2$ 。入射介质的折射率为 n_0 ，玻璃的折射率为 n_2 ，薄膜的折射率为 n_1 。

计算 380 nm 处以及光谱出现的极值点的折射率。再改变单层膜系的中心波长，得到多个极值点，由于两种材料的短波折射率变化幅度较大，故分别取中心波长为 380 nm、400 nm、420 nm、440 nm、460 nm，分别得到 TiO₂、MgF₂ 的 5 个光谱图，当中心波长为 380 nm 时，TiO₂ 单层膜可得到 380 nm、484 nm、564 nm、694 nm 处 4 个极值点，当中心波长为 400 nm 时，可得到 400 nm、447 nm、510 nm、594 nm、737 nm

处 5 个极值点, 同理, 选取 420 nm、440 nm、460 nm 为中心波长, 可分别得到覆盖 380 nm~780 nm 多个极值点。同理也可得到 MgF_2 的多个极值点对应的折射率, 再分别绘制出 TiO_2 和 MgF_2 的实验实际的色散曲线。图 2、图 3 分别为模拟实验的 TiO_2 和 MgF_2 的单层薄膜对应不同中心波长的光谱图, 利用以上方法求得 TiO_2 和 MgF_2 折各个极值点折射。

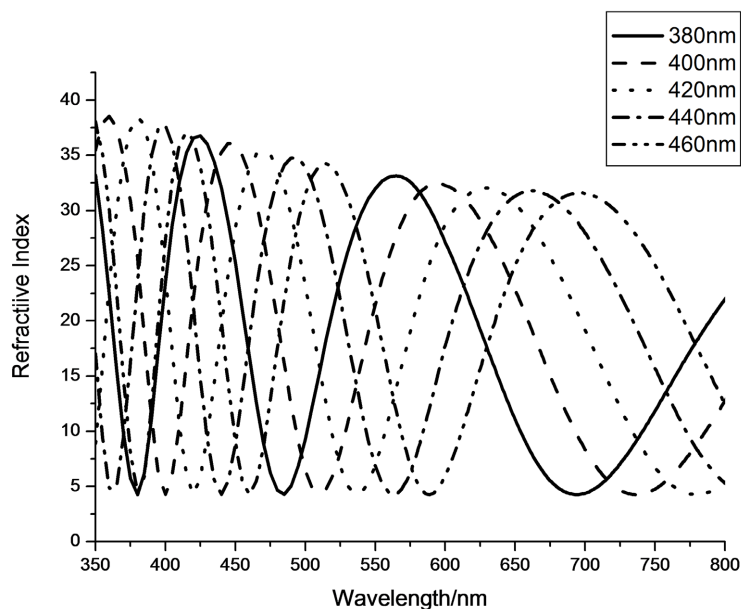


Figure 2. TiO_2 Spectra of different center wavelengths of single-layer thin films

图 2. TiO_2 单层薄膜不同中心波长光谱图

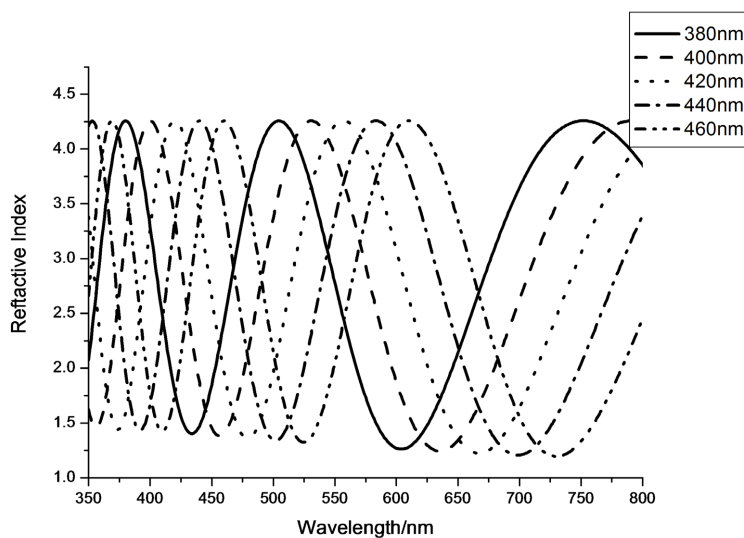


Figure 3. MgF_2 Spectra of different center wavelengths of single-layer thin films

图 3. MgF_2 单层薄膜不同中心波长光谱图

3.2.2. 中心波长选择

中心波长选取应让可见光区的透过率尽可能大, 由于改变中心波长不会对光谱图造成很大影响, 因

此可以通过改变中心波长,找到 AT 值最大时对应的中心波长。由图 4 可以看出当中心波长在 550 nm~630 nm 之间变化时,光谱曲线出现红移现象,随着光谱曲线红移,450 nm 附近透过率有一定的上升趋势,当设定中心波长为 630 nm 时,385 nm 处光透过率波长急速下降,因此,选择中心波长 610 nm 为宽波段 AR 膜的中心波长。

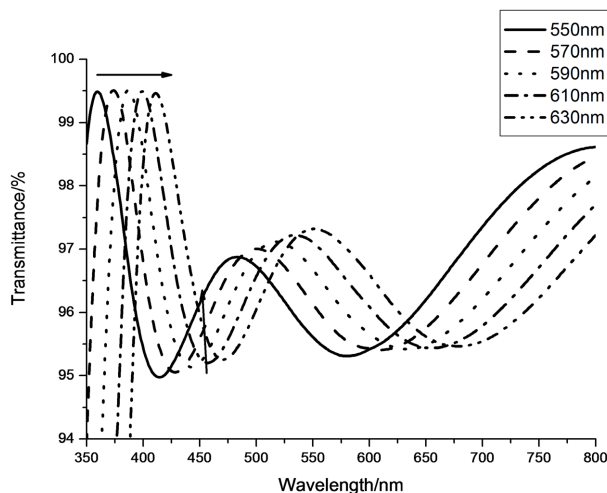


Figure 4. Broadband AR film in visible light band varies with central wavelength
图 4. 可见光波段宽带 AR 膜随着中心波长变化

3.2.3. 折射率变化对宽波段 AR 膜影响

TiO₂ 具有多种晶型结构,且容易发生热分解,在镀膜过程中,由于工艺参数的浮动和界面状态的变化,其折射率容易发生变化。而单个膜层的折射率变化只会导致透射光谱中透射极值点的增加或减少,曲线的红移或蓝移现象不明显,曲线不失规律,不影响膜系整体的减反射效果,因此可通过调制各膜层折射率来提高膜系性能,观察图 5、图 7 可知,当 TiO₂ 的折射率在 -0.2~+0.2 之间变化时,随着折射率升高,透射光谱在 440 nm~780 nm 的波峰和波谷都逐渐下降,AT 值大幅降低,而 380 nm~440 nm 波段的光谱曲线几乎不受影响,TiO₂ 折射率变化宽波段 AR 薄膜的透射率影响较大,为了增加宽波段 AR 薄膜

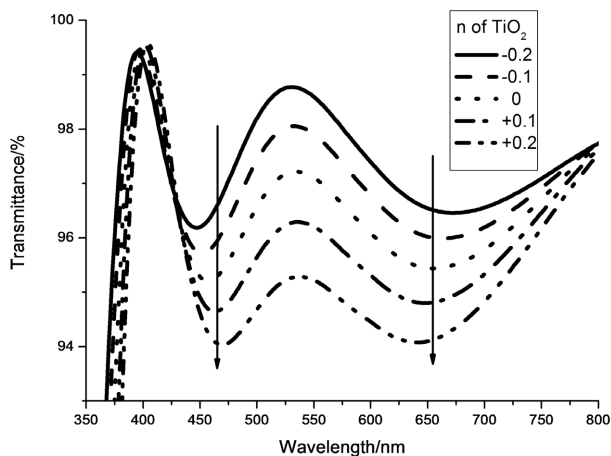


Figure 5. Effects of refractive index changes of TiO₂ monolayers on the performance of broadband AR in visible light band
图 5. TiO₂ 单层膜折射率变化对可见光波段宽带 AR 性能的影响

的透射率尽量应降低 TiO_2 薄膜的折射率。由图 6、图 7 可知, 当 MgF_2 折射率在 $-0.2 \sim +0.2$ 之间变化时, 透射光谱在 450 nm 附近的波谷迅速降低, 550 nm 附近的波峰逐渐升高, 在 670 nm 左右的波谷先升高后减小, 全波段平均透率先升高后降低, MgF_2 折射率变化对全波段 AT 值的影响较大, 因此 MgF_2 折射率误差尽量控制在 $-0.1 \sim +0.1$ 之间。综上叙述, 为了增加全波段 AT 值, 镀膜时应降低 TiO_2 折射率, 保持 MgF_2 折射率不变。

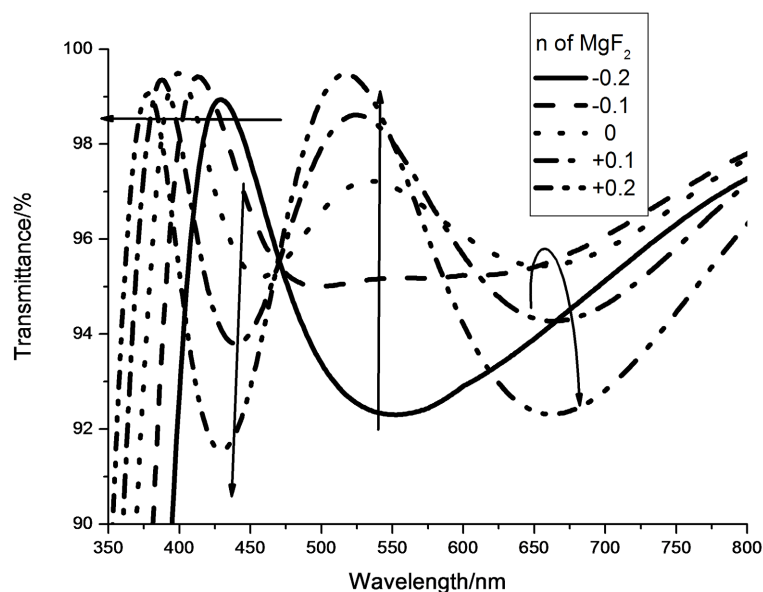


Figure 6. Effects of refractive index changes of MgF_2 monolayers on broadband AR performance in visible light band

图 6. MgF_2 单层膜折射率变化对可见光波段宽带 AR 性能的影响

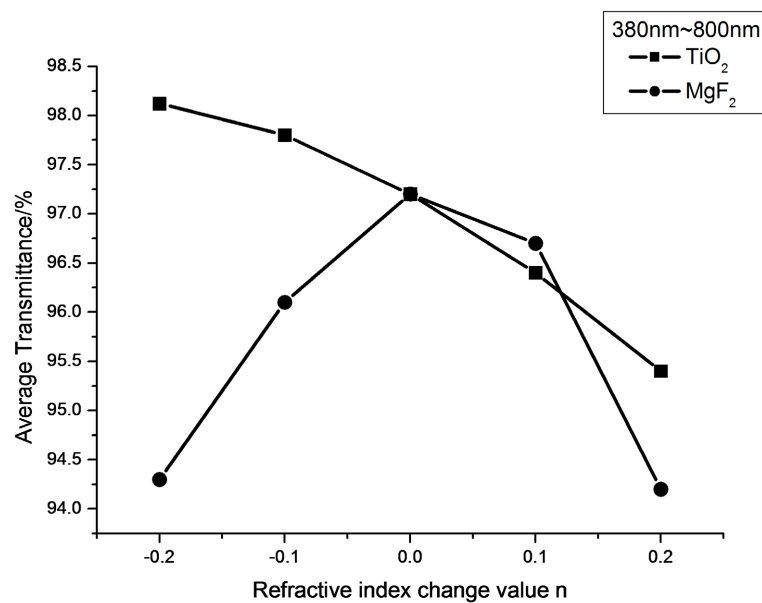


Figure 7. Effects of refractive index changes of TiO_2 and MgF_2 on AT value of broadband AR films in visible light band

图 7. TiO_2 和 MgF_2 折射率变化对可见光波段宽带 AR 膜 AT 值的影响

3.2.4. 厚度误差对 AR 膜影响

光学薄膜厚度直接决定和影响薄膜的光谱特性, 研究薄膜随厚度变化规律对制备光学薄膜由为关键。由于实际镀膜时精确把控薄膜厚度十分困难, 因此我们通过改变薄膜厚度, 得到薄膜厚度影响较小的可接受的误差区间。观察图 8、图 10 可知, 当 TiO₂ 膜层厚度误差从 0 nm~10 nm 之间变化时, 450 nm~800 nm 波段的透过率均上移, 透过率增加约 1%, 当 TiO₂ 膜层厚度误差从 0 nm~+10 nm 之间变化时, 450 nm~800 nm 波段的透过率均下移, 随着透射光谱曲线发生了红移, 400 nm 附近的透过率下降到 72%左右, 为了增加全波段的平均透过率, 应适当的降低 TiO₂ 薄膜的厚度, TiO₂ 薄膜的厚度偏差应在-10 nm~0 nm 之间。

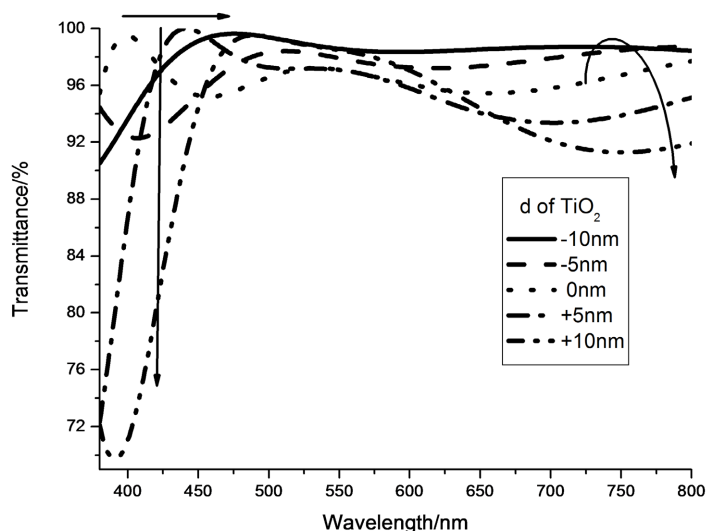


Figure 8. Influence and analysis of TiO₂ monolayer thickness variation on properties of broadband AR films in visible light band

图 8. TiO₂ 单层膜厚度变化对可见光波段宽带 AR 膜性能的影响及分析

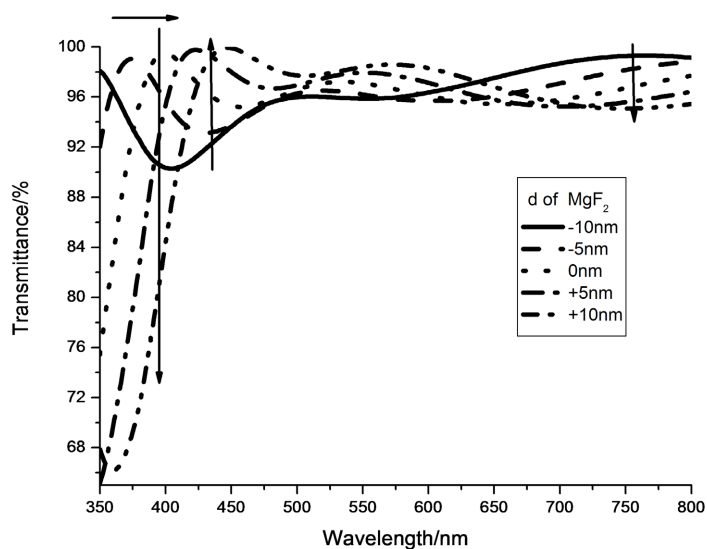


Figure 9. Influence and analysis of MgF₂ monolayer thickness variation on properties of broadband AR films in visible light band

图 9. MgF₂ 单层膜厚度变化对可见光波段宽带 AR 膜性能的影响及分析

由图 9 可知, MgF_2 膜层厚度误差从 $-10\text{ nm}\sim 0\text{ nm}$ 之间变化时, 450 nm 附近的透过率大幅度上升, 增加了 6% 左右, 其他波段的透过率基本不变, MgF_2 膜层厚度误差从 $0\text{ nm}\sim +10\text{ nm}$ 之间变化时, 450 nm 附近的透过率增加, 但同时透射光谱曲线发生了红移, 使 400 nm 附近的波长急剧下降, 故全波段的透过率反而在下降, 由图 10 可知, 全波段 AR 膜的平均透过率先升高后降低, 故 MgF_2 膜层厚度误差尽量在 $-5\text{ nm}\sim +5\text{ nm}$ 之间。曲线波形的变化对膜系性能影响较大, 因此, 应尽量控制各膜层厚度, 减小厚度偏差。

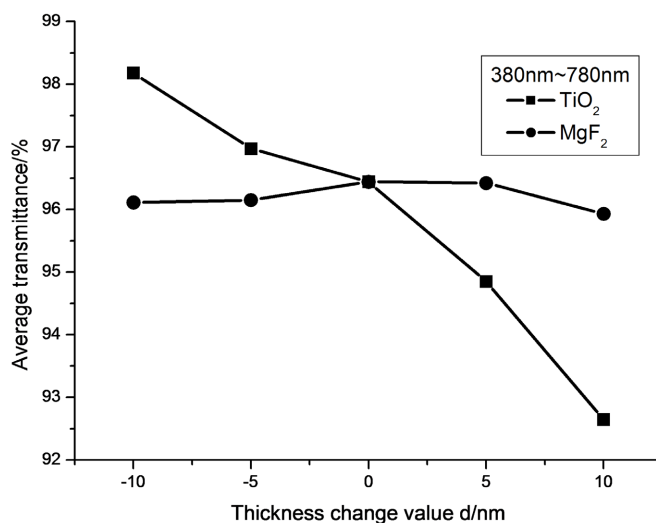


Figure 10. Effects of TiO_2 and MgF_2 thickness changes on average transmittance of broadband AR films in visible light band

图 10. TiO_2 和 MgF_2 厚度变化对可见光波段宽带 AR 膜平均透过率的影响

3.2.5. 太阳入射角变化对 AR 膜性能的影响

宽波段 AR 膜在一些应用场景下需要考虑入射角的影响, 例如镀在太阳能电池表面的宽波段 AR 膜在使用过程中, 太阳光不能一直保持垂直照射, 所以研究太阳入射角对膜系增透性能的影响是有必要的。观察图 11 透射谱可知, 随着太阳入射角的增加, 膜系的 AT 值逐渐降低; 在 $380\text{ nm}\sim 780\text{ nm}$ 光波段上,

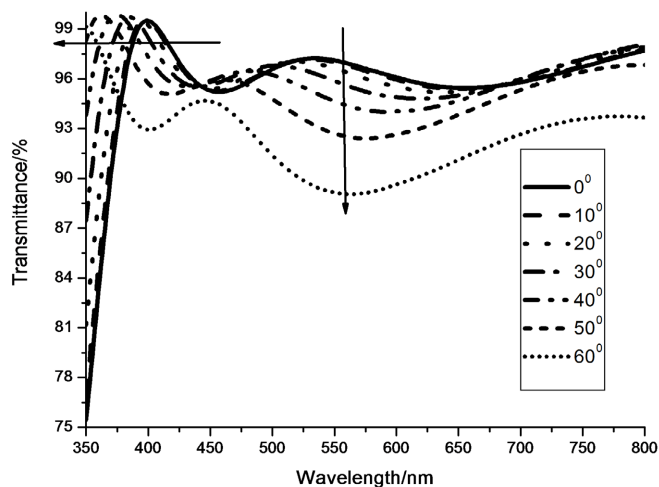


Figure 11. Influence of solar incident angle change on transmittance of broadband AR film in visible light band

图 11. 太阳入射角变化对可见光波段宽带 AR 膜透过率的影响

当入射角小于 30° 时, 透射曲线发生了轻微的蓝移; 超过 30° 时, 透过率逐渐增加; 超过 60° 时, 曲线波形发生了较大变化, 透射大幅降低, 由图 12 可知, 全波段透过率在入射角小于 20° 时基本保持不变, 只有 0.1% 的波动; 在入射角在 $30^\circ\sim 50^\circ$ 之间时, 变化幅度较小, 大约有 1.25% 的波动; 达到 50° 以后, 大幅度增加, 膜系减反射性能降低。

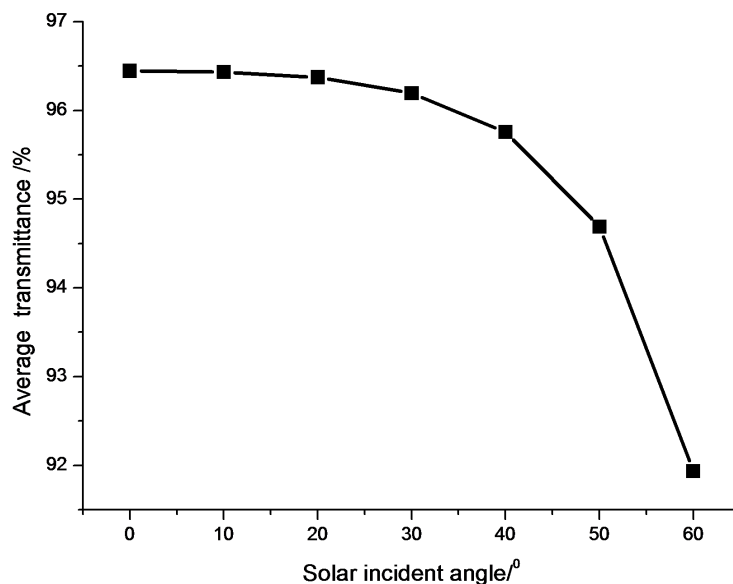


Figure 12. Effect of incident angle change on average transmittance of broadband AR film in visible light band

图 12. 入射角变化对可见光波段宽带 AR 膜平均透过率的影响

4. 总结

本文通过宽波段增透膜的设计研究, 分别选取 TiO_2 和 MgF_2 作为宽波段增透膜的高低折射率材料, 通过 TFCalc 软件设计优化膜系, 再根据不同镀膜条件的这个前提条件, 提出了一种基于不同实验条件下的设计方法。首先需要讨论单层 TiO_2 和 MgF_2 的折射率随镀膜工艺参数如沉积速率、基片温度、不同的氧分压对单层薄膜折射率的影响, 确定理想的镀膜工艺参数, 再根据理想的镀膜参数镀制单层 TiO_2 和 MgF_2 薄膜, 以不同的中心波长设计单层 TiO_2 和 MgF_2 膜系, 得到 TiO_2 和 MgF_2 在特定实验条件下的色散曲线。本文利用所设计的可见光波段宽带增透膜的初始膜系, 根据实际应用需要, 分别讨论不同中心波长、单层材料折射率误差和厚度误差、入射角变化对宽波段增透膜平均透过率的影响, 最终结果表明: 中心波长为 610 nm, 入射角小于 50° , TiO_2 折射率偏差在 $-0.2\sim 0$, 厚度偏差在 $-10\text{ nm}\sim 0\text{ nm}$, MgF_2 折射率偏差在 $-0.1\sim 0.1$, 厚度在 $-5\text{ nm}\sim 5\text{ nm}$ 之间变化时为所设计的 AR 膜得最佳镀膜方案, 实现全波段平均透过率超过 96%, 为光学薄膜的研究提供了一种可参考的研究途径。

项目资助信息

海南省高等学校科学研究项目(Hnky2020-24)、海南省自然科学基金(120MS031)、海南省重大科技计划项目(ZDKJ2019005)、海南省重点研发项目(ZDYF2020217, ZDYF2020020, ZDYF2020036), 海南省自然科学基金(2019RC190, 2019RC192), 国家自然科学基金项目(62174046, 62064004, 61964007, 61864002), 海南省院士创新平台专项(YSPTZX202034, YSPTZX202127)和大学生创新创业开放基金(202111658021X, 202111658022X, 202111658023X, 202111658013)。

参考文献

- [1] 罗小兰. TiO₂ 系光学减反膜的设计与制备[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2011: 103-112.
- [2] 唐亚陆, 胡光, 等. 增透膜反射率与膜层折射率及膜厚之间的关系[J]. 淮阴工学院学报, 2008, 17(3): 86-88.
- [3] Schröder, S., Trost, M., Garrick, M., *et al.* (2015) Origins of Light Scattering from Thin Film Coatings. *Thin Solid Films*, **592**, 248-255. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.02.077>
- [4] 兰慧琴. 基于周期结构模型的光学薄膜折射率研究[J]. 青年与社会, 2019(24): 207-208.
- [5] 杨秀琴, 陈金桂, 等. 光伏增透膜折射率对膜层性能影响的研究[J]. 全国性建材科技期刊. 2020, 47(8): 45-48.
- [6] Pan, L., *et al.* (2021) Translation Matching Method for Obtaining the Refractive Index of Chalcogenide Films Based on the Transmission Spectra. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **70**, 69-71. <https://doi.org/10.1109/TIM.2021.3088483>
- [7] 徐万劲. 磁控溅射技术进展及应用[J]. 现代仪器, 2005, 11(5): 1-5.
- [8] 周娟, 郭宪英, 等. 自清洁 TiO₂ 薄膜的制备与表征[J]. 现代涂料与涂装, 2009, 12(2): 6-10.
- [9] Asahi, R., Morikawa, T., Ohwaki, T., *et al.* (2001) Visible-Light Photocatalysis in Nitrogen-Doped Titanium Oxides. *Science*, **293**, 269-271. <https://doi.org/10.1126/science.1061051>
- [10] Lettmann, C., Hildenbrand, K., Kisch, H., *et al.* (2001) Visible Light Photodegradation of 4-Chlorophenol with a Coke-Containing Titanium Dioxide Photocatalyst. *Applied Catalysis B: Environmental*, **32**, 215-227. [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(01\)00141-2](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(01)00141-2)
- [11] Khan, S.U.M., Al-Shahry, M., Ingler, W.B., *et al.* (2002) Efficient Photochemical Water Splitting by a Chemically Modified n-TiO₂. *Science*, **297**, 2243-2245. <https://doi.org/10.1126/science.1075035>
- [12] 陈崧哲, 张彭仪, 祝万鹏, 等. 可见光响应光催化剂研究进展[J]. 化学进展, 2004, 16(4): 613-619.
- [13] 俞守耕. 钙钛矿型氧化物在净化汽车尾气催化剂中的应用[J]. 贵金属, 2001, 22(2): 61-66.
- [14] Kaiser, N., Anton, B., Jaenchen, H., *et al.* (1995) Laser Conditioning of LaF₃/MgF₂ Dielectric Coatings for Excimer Lasers. *Proceedings of SPIE*, **2428**, 400-409.
- [15] Dijon, J., Quesnel, E., Rolland, B., *et al.* (1998) High Damage Threshold Fluoride UV Mirrors Made by Ion Beam Sputtering. *Proceedings of SPIE*, **3244**, 406-416. <https://doi.org/10.1117/12.306989>
- [16] Protopapa, M.L., Perrone, M.R., Piegari, A.M., *et al.* (2000) Laser Damage Threshold of MgF₂ Thin Films by Photoacoustic Beam Deflection. *Proceedings of SPIE*, **3902**, 175-181. <https://doi.org/10.1117/12.379303>
- [17] Protopapa, M.L., De Tomasi, F., Perrone, M.R., *et al.* (2001) Laser Damage Studies on MgF₂ Thin Films. *Journal of Vacuum Science & Technology*, **19**, 681-688. <https://doi.org/10.1116/1.1347049>
- [18] Yoshida, K., Ohya, M., Atooka, K., *et al.* (2002) Optical Properties of Porous Fluoride Coatings for UV and DUV Lasers. *Proceedings of SPIE*, **4679**, 429-434. <https://doi.org/10.1117/12.461692>
- [19] Ristau, D., Gunster, S., Bosch, S., *et al.* (2002) Ultraviolet Optical and Microstructural Properties of MgF₂ and LaF₃ Coatings Deposited by Ion-Beam Sputtering and Boat and Electron-Beam Evaporation. *Applied Optics*, **41**, 3196-3204. <https://doi.org/10.1364/AO.41.003196>
- [20] 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.
- [21] Willry, R.R. (1993) Predicting Achievable Design Performance of Broadband Antireflection Coatings. *Applied Optics*, **32**, 5447-5451. <https://doi.org/10.1364/AO.32.005447>
- [22] Baumeister, P. (1995) Staring Designs for the Computer Optimization of Optical Coatings. *Applied Optics*, **34**, 4835-4843. <https://doi.org/10.1364/AO.34.004835>