

可见光近红外波段宽带增透膜研究

郑照轩, 孔惠颖, 邱美叶, 孙康迅, 施钧策, 周金辉, 张弛, 赵春洁, 罗薇, 乔忠良,
徐东昕, 李林, 曲轶, 李再金*

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

收稿日期: 2023年11月14日; 录用日期: 2024年1月22日; 发布日期: 2024年1月30日

摘要

增透膜技术在各个领域的广泛应用无可否认, 从日常生活中的眼镜镀膜到国家安全领域的武器系统, 增透膜的重要性不断凸显。随着科技的进步和应用需求的不断提高, 人们对增透膜性能的要求也越来越高。本研究通过分析增透膜理论, 采用光学设计工具TFCalc软件, 运用高低折射率材料的交替堆叠的膜系设计方法, 利用单纯形法和针插法优化膜系结构, 通过材料对比选择钠钙玻璃作为基底材料, 选择TiO₂、SiO₂、Al₂O₃以及MgF₂作为薄膜材料, 设计了一种在400~1100 nm波段平均透过率99.0%以上的宽带增透膜, 其中在400 nm处最大透过率为99.92%, 1100 nm处最小透过率为99.11%。最后从膜层厚度变化和入射角度方面进行了膜层透过率的误差分析, 并提出了可接受范围的误差值。

关键词

宽带增透膜, 光学薄膜, 薄膜材料

Research on Broadband Antireflection Coatings in the Visible and Near-Infrared Spectral Ranges

Zhaoxuan Zheng, Huiying Kong, Meiye Qiu, Kangxun Sun, Junce Shi, Jinhui Zhou, Chi Zhang,
Chunjie Zhao, Wei Luo, Zhongliang Qiao, Dongxin Xu, Lin Li, Yi Qu, Zaijin Li*

Key Laboratory of Laser Technology and Optoelectronic Functional Materials of Hainan Province, Academician
Team Innovation Center of Hainan Province, Hainan International Joint Research Center for Semiconductor
Lasers, College of Physics and Electronic Engineering, Hainan Normal University, Haikou Hainan

Received: Nov. 14th, 2023; accepted: Jan. 22nd, 2024; published: Jan. 30th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 郑照轩, 孔惠颖, 邱美叶, 孙康迅, 施钧策, 周金辉, 张弛, 赵春洁, 罗薇, 乔忠良, 徐东昕, 李林, 曲轶, 李再金. 可见光近红外波段宽带增透膜研究[J]. 材料化学前沿, 2024, 12(1): 50-60. DOI: 0.12677/amc.2024.121008

Abstract

The wide-ranging applications of antireflection coating (AR coating) technology across various fields are undeniable, from the everyday use of eyeglass coatings to the crucial role it plays in national security systems. As technology advances and application demands continue to rise, the requirements for the performance of AR coatings are becoming increasingly stringent. In this study, we conducted a comprehensive analysis of AR coating theory. We employed optical design software, TFCalc, and utilized a film stack design approach that involved the alternation of high and low refractive index materials. We further optimized the film stack structure using the simplex method and the needle optimization technique. To enhance the coating's performance, we carefully selected the substrate material, sodium calcium glass, in comparison to several other materials. Additionally, we chose TiO_2 、 SiO_2 、 Al_2O_3 and MgF_2 as the thin-film materials. These materials allowed us to design a broadband AR coating with an average transmittance exceeding 99.0% over the spectral range of 400~1100 nm. Notably, the maximum transmittance reached 99.92% at 400 nm, while the minimum transmittance was 99.11% at 1100 nm. Finally, an error analysis of the film transmittance was conducted in terms of the change in film thickness and incident angle, and an acceptable range of error values was proposed.

Keywords

Broadband Anti-Reflection Films, Optical Films, Thin Film Materials

Copyright © 2024 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

20 世纪 30 年代, 增透膜的发现为薄膜光学的初期发展做出了贡献, 它对薄膜光学技术的发展发挥了关键作用[1] [2]。可见光及近红外波段的宽带增透膜是一种具有广泛应用前景的光学薄膜技术[3], 对于提高光学设备的性能、能源利用效率和图像质量具有重要作用, 它涉及到众多领域, 包括太阳能电池、光学器件、传感器、显示技术和激光器等[4] [5]。在可见光和近红外波段内实现高透明度是许多光学应用的关键需求。然而, 自然界的光学材料通常会引发反射损失, 降低透明度, 限制了设备性能。宽带增透膜技术通过设计复杂的多层薄膜结构, 可以实现对多个波长范围内光的折射和干涉控制, 从而最大程度地减少了反射损失, 提高透明度。近年来, 随着纳米技术和薄膜技术的发展, 宽带增透膜的设计和制备变得更加精确和可控。2009 年郑臻荣等[6]设计了一种适用于 400~900 nm 波段的超宽带减反射膜, 在 520 nm 带宽范围内, 平均残余反射率为 0.44%。2014 年, 阙立志等[7]设计了一种基于 QK3 在 400~800 nm 波段透过率为 97.73% 的宽带增透膜。2016 年, 孙亚军等[8]在 CaF_2 基底上设计了 900~1700 nm 平均透过率 98.95% 的宽带增透膜。2022 年 Hou Guo Jiao 等[9]通过一种被称为高低折射率堆栈新的减反射膜设计理念, 在 $\text{GaInP}/\text{InGaAs}/\text{Ge}$ 三结太阳能电池上实现了这种新型宽带增透薄膜。2022 年 Xiaoyu Sun 等[10]在 400~800 nm 处, 涂覆 $\text{MgF}_2/\text{SiO}_2$ 双层增透膜的钠钙玻璃的太阳透射率提高了 8.89%。在宽波段增透膜领域, 研究者们通过不同的材料组合和设计理念取得了显著的成果, 这些研究为宽波段增透膜的设计和制备提供了新思路, 不仅在光学材料的选择上有所创新, 还在膜层结构和堆叠设计等方面上做了深入研究。本文以钠钙玻璃为基底材料设计 400~1100 nm 可见光近红外波段宽带增透膜, 钠钙玻璃的折射率 $n = 1.51$, 通过合理调整膜层结构采用 TiO_2 、

SiO₂、MgF₂ 以及 Al₂O₃ 四种材料设计了 400~1100 nm 可见光及近红外波段宽带增透膜。

2. 增透膜理论

对于单层反射膜，在薄膜层厚度为 $\lambda/4$ 的入射光时，两个相邻的光的光程差异为 $\lambda/2$ ，也就是振荡的方向相反，重叠的结果就是没有反射。在这种情况下，反射膜的折射率等于基底的折射率的平方根乘以入射介质的折射率[11]。单层增透膜只能针对某一波长进行减反射，其他波段的入射光反射率仍然很高，对于某一波段想要达到反射率为零只能镀双层膜[12]或者多层膜来达到目的。镀制宽带减反射膜，一般采用多层膜设计理论[13]。对于多层膜结构，其特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_i & i\eta_i / \cos \delta_i \\ i\eta_i / \cos \delta_i & \cos \delta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta^s \end{bmatrix}$$

其中

$$\delta_i = \frac{2\pi}{\lambda} N_i d_i \cos \theta_i, \eta_i = \begin{cases} N_i / \cos \theta_i (TM) \\ N_i \cdot \cos \theta_i (TE) \end{cases}$$

η_s 为基底玻璃的折射率。得出最终的多层膜和基片的组合导纳为 $\eta = C/B$ 。由于入射介质为空气，因此入射介质的导纳为 η_0 ，故为使表面反射为零，理论上多层膜的导纳满足 $\eta = \eta_0$ 。

当在基片上镀制 $\lambda_0/4$ 整数倍的膜层。根据四分之一法则，当薄厚度为 $\lambda_0/4$ 奇数倍时，有

$$R = \left[\frac{(\eta_0 - \eta_1^2 / \eta_s)}{(\eta_0 + \eta_1^2 / \eta_s)} \right]^2$$

偶数倍时，有

$$R = \left[\frac{\eta_0 - \eta_s}{\eta_0 + \eta_s} \right]^2$$

根据反射率和透射率的关系可知

$$T = 1 - R$$

在光学厚度为 $\lambda_0/2$ 的整数倍时波长 λ_0 处的透射率值等于没镀膜的基片透射率值，也就是虚设层[14]。

膜层为 $\lambda_0/4$ 时透射率最大，通过下列柯西公式[15]可求得各极值点处的折射率，得到薄膜材料的折射率。

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \dots$$

其中， $n(\lambda)$ 代表特定波长 λ 处的折射率， A, B, C 等是常数，通常通过实验测量来确定。

3. 材料选择

3.1. 基底材料选择

钠钙玻璃在可见光和近红外波段有着许多优点，使它成为广泛应用的光学材料之一。首先，钠钙玻璃具有良好的透明性，能够有效传播可见光和近红外光线。这一特性使其成为制备透明光学元件，如透镜和窗户的理想选择。其次，钠钙玻璃具有良好的化学稳定性，可以抵抗化学侵蚀和腐蚀。这使得它在不同环境下的长期使用成为可能，包括在潮湿、酸性或碱性条件下。另外，钠钙玻璃的机械性能较好，对于制备薄膜或涂层时，具有足够的强度和稳定性，以保持光学元件的性能。

3.2. 薄膜材料选择

在可见光到近红外波段的广泛应用中,材料的选择不仅仅是一个简单的过程,而是一项关键的决策。我们需要仔细考虑一系列因素,包括材料的折射率,层间应力的匹配,透明度以及化学稳定性。这是因为在这个波段范围内,不仅需要材料具有合适的光学性能,还需要确保材料的物理和化学特性与薄膜层间相互匹配,以便在不同应用中表现出最佳性能。因此,材料的选择对于宽带增透膜的成功设计至关重要[16]。可见及近红外波段常用的高折射率材料有 Ta_2O_5 [17]、 ZrO_2 以及 TiO_2 等[18],常用的低折射率材料有 MgO 、 SiO_2 [19]、 MgF_2 [20]以及 Al_2O_3 [21]等。如表 1 为高低折射率材料参数对比,主要对折射率、透明波段以及一些物理性质进行对比。

TiO_2 作为高折射率材料在光学薄膜设计中具备多重优势,它在可见光和近红外范围内具有卓越的透明性,确保光学元件在这些关键波长范围内的高效操作。其次, TiO_2 的高折射率可以更灵活地调整薄膜的光学性能,满足不同应用的需求。其化学稳定性也使得 TiO_2 在各种环境条件下都能保持性能稳定,这对于长期使用和特殊应用至关重要。因此我们选择高折射率材料 TiO_2 作为薄膜成分。 SiO_2 在光学领域具有极高的多功能性和众多优点。它在可见光和近红外光谱区域具有较低的折射率,因此非常适合作为低折射率材料用于抗反射膜设计。 SiO_2 在可见光及近红外波段范围内具有很高的光透明性,可以允许大部分入射光线通过,同时最大限度地减少反射。它具有卓越的化学稳定性和耐腐蚀性,适用于各种光学和环境条件。 SiO_2 相对容易加工,因此非常适合用于各种薄膜结构的制备。它具有较低的色散性,从而可减小不同波长下的折射率变化,减少色差。因此我们将选择较低折射率材料为 SiO_2 [22]。 Al_2O_3 材料制备的薄膜性能稳定,吸收小,耐高温、耐腐蚀与耐磨损性能好,抗激光损伤性能强,透明区覆盖紫外到远红外波段,透射率较高[23]。选取 Al_2O_3 作为中折射率材料。 MgF_2 作为光学薄膜材料具有独特的优势,它拥有相对较低的折射率和色散性,同时在紫外线至红外线波段范围内具有良好的透明性,这使得 MgF_2 能够在多个波段内实现高透射率。此外, MgF_2 还表现出较低的散射特性,对于光学元件和传感器等高精度应用尤为重要。其材料稳定性和耐热性也使其适用于高温环境下的应用[24]。

对于宽带减反射膜的设计来说,其膜系复杂度较高,传统的简单设计方法并不适用。在这种情况下,需要借助数值优化技术,通过对初始膜结构进行反复的精细调整和优化,以满足特定的性能要求。有时,这个过程可能会变得非常复杂,要求进行多次迭代和计算,以找到最佳的设计方案。甚至可能需要采用全自动合成方法,以制备出符合要求的膜系[25]。这种高度复杂和精密的设计和合成过程,旨在实现宽带减反射膜在广泛波长范围内的更好参数指标。

Table 1. Comparison of high and low refractive index material parameters

表 1. 高低折射率材料参数对比

材料	折射率	透明波段(nm)	硬度	弹性模量(GPa)	熔点(°C)	蒸发温度(°C)	密度(g/cm ³)
Ta_2O_5	1.8~2.3	350~10,000	6~8	140~160	1800	2100	7.8
ZrO_2	2.9~2.2	340~12,000	11~15	200~240	2715	2700	5.49
TiO_2	2.5~2.8	350~12,000	5.5~6	230~320	1850	2000	3.8~4.3
MgO	1.65~1.74	200~8000	5.5~6.5	130~330	2800	2600	3.58
SiO_2	1.4~1.6	200~4000	6~7	70~90	1730	1600	2.1
MgF_2	1.38~1.48	110~6000	5.5	138~160	1266	1540	2.9
Al_2O_3	1.54~1.62	200~8000	9	380~420	2020	2100	3.98

在波长范围 400~1100 nm 内，以钠钙玻璃为基底，旨在设计一款宽带增透膜。我们的膜系设计遵循以下原则：最大程度地减少膜层数量以实现尽可能高的透过率，充分融入实际的制备工艺和方法，特别关注以下几个关键考虑因素[26]：1) 薄膜层的折射率应该与相邻材料的折射率匹配，以最小化反射损失；2) 膜层的厚度应根据所需的光学路径长度进行精确控制，以实现特定波长的相位调节，膜系中的每一层厚度应保持均匀。膜层过厚会引发较大的应力，可能影响膜系的稳定性。相反，过薄的膜层难以监控，可能导致较大的厚度误差，从而对整个光谱曲线产生负面影响；3) 为了减小膜层制备过程中的误差积累，过多的膜层可能导致复杂的控制问题，使得整个膜系更容易受到制备误差的影响，因此应该尽量减少总层数，以保持薄膜的均匀性和稳定性。

4. 膜系设计

宽带减反射膜初始结构的选取是获得最佳性能的关键，Baumeister [27]曾经提出构建宽带减反射膜初始结构的原则：中心波长选为 $\lambda_0 = 2(1/\lambda_{\min} + 1/\lambda_{\max})^{-1}$ ；在最外层膜中，我们选择具有最低折射率的材料，其膜厚设定为波长 $\lambda_0/4$ 。对于其余的膜层，它们的光学厚度都被限制在波长 $\lambda_0/10$ 以内。至少存在一层较厚的膜，膜系结构被设计成由一系列薄膜和厚膜的组合构成。设计膜系采用高低折射率材料交替的方法，以 Sub|M aHbL2H cL dH L|Air 为初始结构，参考波长为 630 nm，M、H、L 分别为 Al_2O_3 、 TiO_2 以及 SiO_2 对应 1/4 参考波长光学厚度的膜层。2H 层对于参考波长而言是虚设层，但它能起到平滑膜系反射特性的作用。

初始膜系设计为 Sub|M0.3H0.3L2H0.3L0.3HL|Air，得到的透过率曲线如图 1 所示，其中虚线为优化前的透过率曲线。通过观察图 1，我们可以发现在所需的 400~1100 nm 波长范围内，虽然在 1040 nm 处有高达 99.87% 的最大透过率，但在较短波段，透过率较低且波动明显。特别是在 644 nm 处，透过率仅为 95.60%。这结果表明，初始的薄膜结构的光谱性能在带宽和透过率方面未达到广泛的宽带增透要求，因此需要进行更进一步的性能优化。在图 1 中，我们可以看到实线部分代表了经过微调、优化后的理论透过率曲线。在这种情况下，我们仍然使用了 7 层膜层，但对膜层厚度进行了一些微小的调整以及最外层由原来的 SiO_2 换为折射率更低的 MgF_2 材料，在结构公式中代号为 F。最终确定的膜系结构为 Sub|0.9896M0.3131H0.2108L2.0230H0.2531L0.3076H0.9942F|Air。

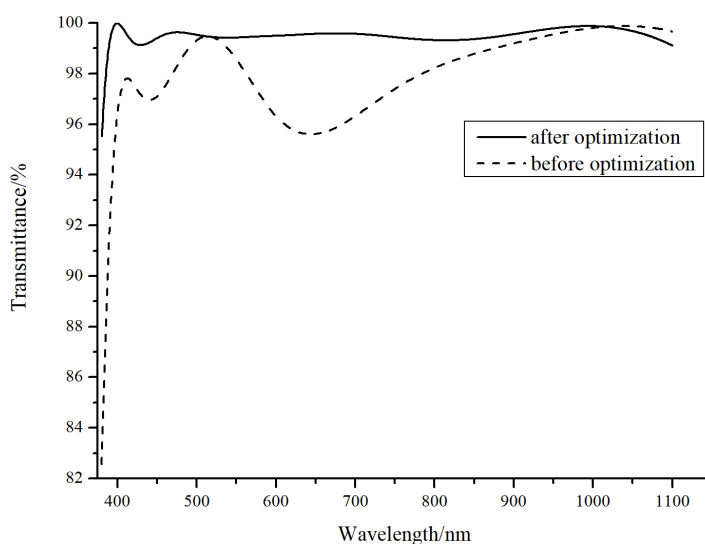


Figure 1. Comparison of theoretical transmittance curves before and after optimisation
图 1. 优化前后理论透过率曲线对比

根据图 1 的数据, 整个频谱带宽内的曲线变得平缓, 显示出增透带宽得到显著扩展。在 400~1100 nm 波长范围内, 最大透过率达到 99.92% (400 nm 处), 最小透过率达到 99.11% (1100 nm 处)。这可能是由于膜层数量被固定在 7 层, 透过率的进一步优化受到限制。然而, 从图 1 的比较中可以看出, 在优化前后, 透过率有了明显的提高。图 2 为优化前后膜层厚度对比, 可以更直观地看到优化前后膜层厚度的一个变化。优化前第二层和第六层存在薄层过薄的情况, 虽然整体膜层厚度变化不大, 但是尽量避免了极端膜厚, 通过增加敏感层的厚度, 我们有效地解决了之前存在的敏感层过薄的问题[28]。

这意味着我们的薄膜结构更趋于完善, 不再受到薄膜过薄所带来的性能问题的制约。此外, 随着敏感层厚度的增加, 薄膜的厚度偏差相对于设计膜层厚度而言减小了。这一改进对于确保膜层的一致性和稳定性非常关键, 因为它降低了薄膜制备过程中的不确定性。更一致的薄膜厚度使实验更加可重复, 也减少了实验的技术难度, 为后续镀膜工作提供便利。

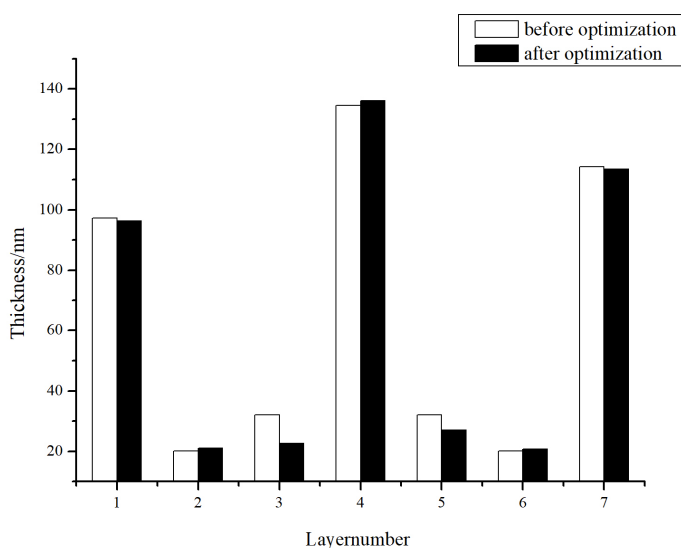


Figure 2. Comparison of film thickness before and after optimisation

图 2. 优化前后膜层厚度对比

5. 误差分析

5.1. 膜层厚度

膜层厚度是光学薄膜设计中的关键参数, 然而实际制备中难免会受到一些误差的影响, 这包括沉积过程中的控制精度、材料性质的微小变化以及测量技术的限制。因此, 对膜层厚度误差的分析变得至关重要。考虑到实际薄膜制备中难以精确控制每一层的厚度, 我们采用了一种策略, 即通过微调单层膜的厚度, 来获得一系列可接受的误差范围, 这些范围内薄膜厚度的变化对性能的影响较小[29], 同时满足我们提出的薄膜透射要求: 平均透过率 99% 以上, 又因为不能只单纯的看平均透过率, 因此将最小透过率定为 98% 以上, 避免膜层透过率波动范围较大引起的薄膜性能问题。

表 2 列出了优化后的各膜层厚度。基于这些结果, 我们对每一层膜的厚度进行了微调, 以找到影响较小的、可接受的误差区间。这有助于更好地应对实际薄膜制备中的误差, 确保性能的稳定性。因数据过多, 只罗列各膜层区间范围值, 如表 3 所示。由表 3 中我们可以看出对于厚层可接受误差范围较大, 但是薄层的可接受范围较小, 例如第二层 TiO_2 膜层厚度为 21.06 nm, 可接受的误差范围为 +3~-6 nm, 但是第四层 TiO_2 膜层厚度为 136.06 nm, 可接受的误差范围为 +14~-10 nm, 因此在设计膜系的时候尽量避

免极端薄膜，可能会引起较大误差。

通过图 3 我们也可以看出，短波波段波动较大，且大部分膜层变厚引起蓝移，薄层变薄引起红移，推测是因为在多层膜结构内干涉模式的改变，当薄膜的厚度改变时，光波在不同膜层之间的反射和干涉会导致不同波段的光强度出现变化。特别是在短波波段，由于光波在这个范围内的波长较短，所以即使微小的膜层厚度变化也可能导致明显的干涉效应，从而引起光谱的波动。

对膜层厚度进行误差分析，通过观察表 2、表 3 以及图 3，我们确定了最优厚度，发现了单层膜在不同厚度范围内透过率的变化趋势，并通过各膜层变动上下范围值对应的最大、最小以及平均透过率得到了完成提出的指标可接受变动厚度范围，保持较高透过率的同时减小了误差。

Table 2. Thickness of each film layer

表 2. 各膜层厚度

层数	1	2	3	4	5	6	7
材料	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	TiO ₂	SiO ₂	TiO ₂	MgF ₂
膜层厚度(nm)	96.29	21.06	22.57	136.06	27.1	20.69	113.54

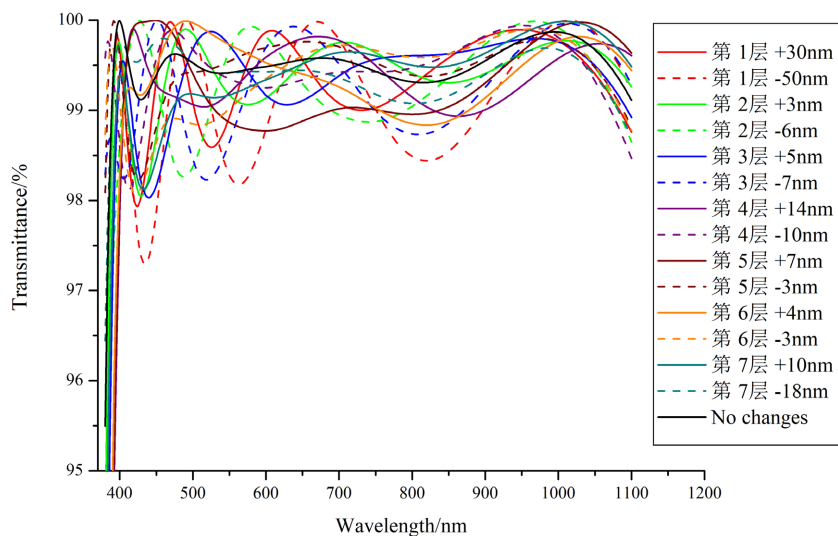


Figure 3. Transmission rate curve for each film thickness variation

图 3. 各膜层厚度变化对应透过率曲线

Table 3. Upper and lower range values for changes in each film layer

表 3. 各膜层变动上下范围值

第一层 Al ₂ O ₃	平均透过率(%)	最大透过率(%)	最小透过率(%)
30	99.2154	99.9946	98.1453
0	99.5207	99.9921	99.1106
-50	99.1035	99.9979	98.1935
第二层 TiO ₂	平均透过率(%)	最大透过率(%)	最小透过率(%)
3	99.4363	99.8992	98.0496
0	99.5207	99.9921	99.1106
-6	99.3579	99.9994	98.2609

续表

第三层 SiO ₂	平均透过率(%)	最大透过率(%)	最小透过率(%)
5	99.4249	99.8746	98.0307
0	99.5207	99.9921	99.1106
-7	99.3067	99.9949	98.2284
第四层 TiO ₂	平均透过率(%)	最大透过率(%)	最小透过率(%)
14	99.4100	99.9163	98.1290
0	99.5207	99.9921	99.1106
-10	99.4522	99.9397	98.1219
第五层 SiO ₂	平均透过率(%)	最大透过率(%)	最小透过率(%)
7	99.3124	99.9971	98.1267
0	99.5207	99.9921	99.1106
-3	99.4738	99.7919	98.2224
第六层 TiO ₂	平均透过率(%)	最大透过率(%)	最小透过率(%)
4	99.4012	99.9890	98.3151
0	99.5207	99.9921	99.1106
-3	99.4041	99.9044	98.0724
第七层 MgF ₂	平均透过率(%)	最大透过率(%)	最小透过率(%)
10	99.4644	99.9868	98.1288
0	99.5207	99.9921	99.1106
-18	99.0582	99.7191	98.0706

5.2. 入射角

当我们谈论光学薄膜设计时，不得不提的一个误差源就是入射角度的变化。这种角度变化有时候可能会让薄膜的性能大打折扣，甚至完全不一样。这些变化会对膜层的光学性能，比如反射率、透射率以及色散性质产生明显的影响。宽波段抗反射膜在特定应用中需要考虑入射角度的影响，尤其是当这些膜被应用在太阳能电池表面时。由于太阳光的入射角度会随时间而变，不总是垂直入射，因此研究太阳光入射角对薄膜的宽带抗反射性能造成的影响变得至关重要。这样的分析能帮助我们了解在不同的入射条件下薄膜如何工作，提高设计的准确性和可靠性。

如图 4 所示，入射角的变化对应的是不同的透射率曲线，而图 5 则展示了入射角变化对平均透的影响。从图 4 中我们可以明显观察到，随着入射角的增大，膜系的 AT 值逐渐减小，说明在不同的射角下，膜系的性能会发生变化。透射曲线表现出多样的特性，这表明薄膜的性能在入射角变化时也会有所不同。当入射角小于 30°时，我们观察到轻微的蓝移，即波长向光谱的短端轻微偏移。在 30°和 50°之间，透射率明显下降，特别是在 1100 nm 等较长的波长上，透射率下降到 96% 以下。当入射角超过 50°时，曲线迅速下降，导致透射率急剧下降。如图 5 所示，当入射角小于 20°时，整个光谱的透射率保持在 99.5% 左右，仅有 0.08% 的波动。在入射角 20°至 40°范围内，波动相对较小，约为 0.4%。然而，一旦入射角超过 40°，波动明显增加，膜系的减反射性能显著下降，基本已经无法满足增透要求。

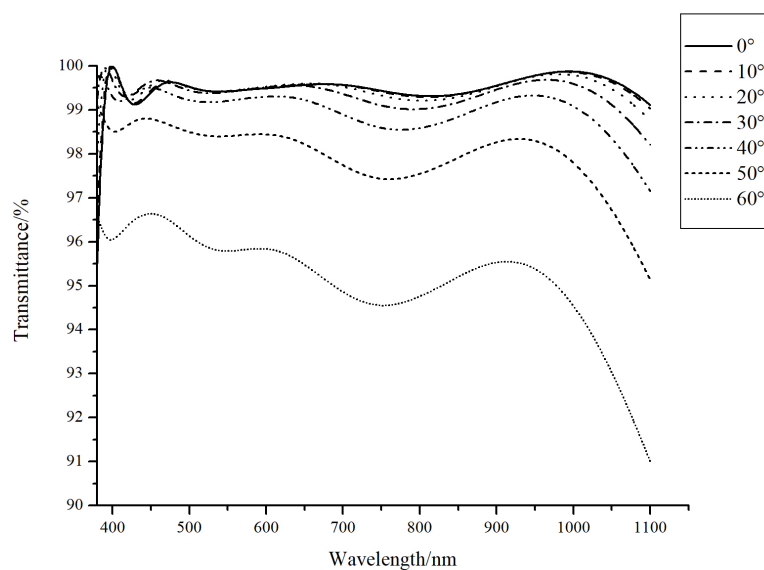


Figure 4. Transmittance curves for each angle of incidence

图 4. 各入射角对应的透过率曲线

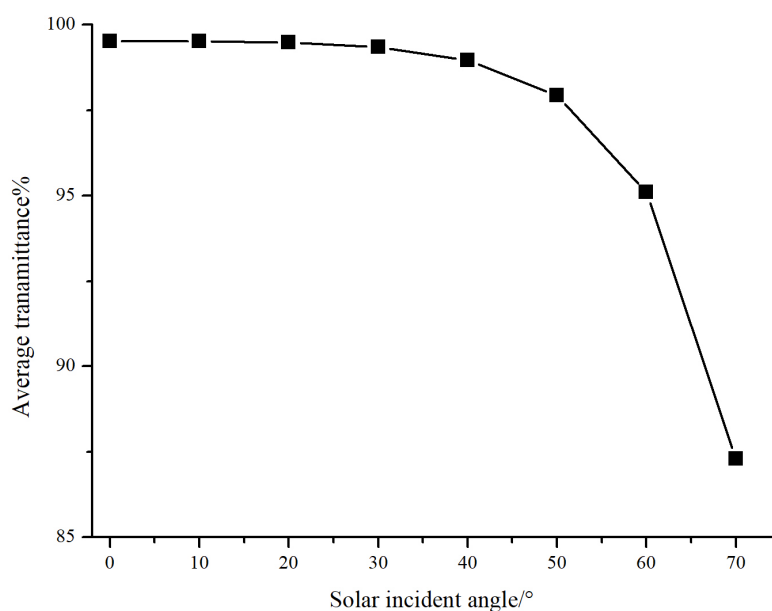


Figure 5. Line graph of the average transmittance for a change in the angle of incidence

图 5. 入射角变化时所对应的平均透过率折线图

6. 总结

通过分析膜系理论进行优化设计可见光到近红外宽波段增透膜，基于钠钙玻璃基底，选择 TiO_2 、 SiO_2 、 Al_2O_3 以及 MgF_2 作为镀膜材料，采用光学设计工具 TFCalc 软件，通过高低折射率材料交替的方法设计出了 400~1100 nm 可见光到近红外宽波段增透膜，平均透射率达到 99% 以上，其中在 400 nm 处最大透过率为 99.92%，1100 nm 处最小透过率为 99.11%。最后从膜层厚度变化何入射角度方面进行了膜层透过率的误差分析，最薄膜层厚度误差范围为 -3 nm~+4 nm，最薄膜层厚度误差范围为 -50 nm~+30 nm。

基金项目

项目资助信息：海南省自然科学基金高层次人才项目(622RC671)、海南师范大学大学生创新创业开放基金(榕树基金)项目(RSYH20231165824X、RSXH20231165803X、RSXH20231165811X、RSYH20231165806X、RSYH20231165833X)、海南师范大学研究生创新科研项目(hsyx22022-81)和国家自然科学基金项目(62174046、62064004、61964007、61864002)。

参考文献

- [1] 房淑芬, 付新华, 周滨滨. 晶体表面增透膜设计及工艺研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2007, 30(4): 44-45.
- [2] Tanner, H.A. and Lockhart, L.B. (1946) German Reflection Reducing Coatings for Glass. *Journal of the Optical Society of America*, **36**, 701-706. <https://doi.org/10.1364/JOSA.36.000701>
- [3] 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.
- [4] Abe, K., Sanada, Y. and Morimoto, T. (2001) Anti-Reflective Coatings for CRTs by Sol-Gel Process. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, **22**, 151-166. <https://doi.org/10.1023/A:1011284824681>
- [5] Raut, H.K., Ganesh, V.A., Nair, A.S., et al. (2011) Anti-Reflective Coatings: A Critical, in-Depth Review. *Energy & Environmental Science*, **4**, 3779-3804. <https://doi.org/10.1039/c1ee01297e>
- [6] 郑臻荣, 顾培夫, 陈海星, 等. 超宽带减反射膜的设计和制备[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 2026-2029.
- [7] 阙立志, 李帅, 朱华新. QK3 玻璃基底上可见光区宽带增透膜研究[J]. 江南大学学报(自然科学版), 2014, 13(1): 113-116.
- [8] 孙亚军, 朱益清, 李帅, 等. CaF₂ 基底上近红外区宽带增透膜的研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(1): 76-80.
- [9] Hou, G.J., et al. (2022) High-Low Refractive Index Stacks as Antireflection Coatings on Triple-Junction Solar Cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, **31**, 62-70. <https://doi.org/10.1002/ppp.3608>
- [10] Sun, X., Xu, X., Song, G., et al. (2020) Preparation of MgF₂/SiO₂ Coating with Broadband Antireflective Coating by Using Sol-Gel Combined with Electron Beam Evaporation. *Optical Materials*, **101**, Article ID: 109739. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.109739>
- [11] 黄华义. 玻璃表面镀制增透膜的机理分析[J]. 国外建材科技, 2008, 29(6): 34-38.
- [12] 姜浩, 龙骧, 王跃川. 新型复合双层光学增透膜的制备与性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2006, 22(5): 128-131.
- [13] 卢进军, 刘卫国, 潘永强. 光学薄膜技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [14] 孙岩. 红外三波段薄膜的研究与制备[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2011.
- [15] 梁铨廷. 物理光学第 3 版[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 42-43
- [16] Jiang, H., Long, X. and Wang, Y.C. (2020) Preparation and Property of Novel Double-Layer Antireflection Coatings. *Gaofenzi Cailiao Kexue yu Gongcheng/ Polymer Materials Science & Engineering*, **22**, 128-131.
- [17] Muscalu, G.L. (1995) Low-Loss Antireflection Coating for the Visible. *ROMOPTO'94: Fourth Conference in Optics*, Bucharest, 5-8 September 1994, 566-570. <https://doi.org/10.1117/12.203482>
- [18] 杨道奇, 付秀华, 耿似玉, 等. 0.6~1.55μm 可见/近红外超宽带增透膜的研制[J]. 中国光学, 2012, 5(3): 74-80.
- [19] Zhang, L., Zhao, X. and Lu, J. (2006) Study of Columnar Grain in Poly-Si Thin Films. *Journal of Synthetic Crystals*, **35**, 1159.
- [20] Xi, J.Q., Schubert, M.F., Kim, J.K., et al. (2007) Optical Thin-Film Materials with Low Refractive Index for Broadband Elimination of Fresnel Reflection. *Nature Photonics*, **1**, 176-179. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.26>
- [21] 李学磊, 冯煜东, 王志民, 等. Al₂O₃ 薄膜的性能、制备与应用[J]. 真空, 2016, 53(3): 17-20.
- [22] Shokeen, P., Jain, A., Gupta, V., et al. (2017) Multilayer Silver Nanoparticles Embedded in Graded-Index Dielectric Layers. *Optical Materials*, **66**, 29-34. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.01.038>
- [23] 王丽萍, 郭昭华, 池君洲, 王永旺, 陈东. 氧化铝多用途开发研究进展[J]. 无机盐工业, 2015(6): 11-15+62.
- [24] Camargo, K.C., Michels, A.F., Rodembusch, F.S., et al. (2012) Multi-Scale Structured, Superhydrophobic and Wide-Angle, Antireflective Coating in the Near-Infrared Region. *Chemical Communications*, **48**, 4992-4994. <https://doi.org/10.1039/c2cc30456b>
- [25] Patel, S.J. and Kheraj, V. (2015) Optimization of the Genetic Operators and Algorithm Parameters for the Design of a

Multilayer Anti-Reflection Coating Using the Genetic Algorithm. *Optics & Laser Technology*, **70**, 94-99.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2014.12.022>

- [26] 张家斌, 付秀华, 贺才美. 可见与近红外增透膜的设计与制备[J]. 激光与红外, 2009, 39(5): 528-530.
- [27] Baumeister, P. (1995) Starting Designs for the Computer Optimization of Optical Coatings. *Applied Optics*, **34**, 4835-4843. <https://doi.org/10.1364/AO.34.004835>
- [28] Fu, X.H., Sun, Y.J., *et al.* (2013) Study and Fabrication of Visible and Infrared Broadband Antireflection Coating. *Acta Optica Sinica*, **33**, 0331002. <https://doi.org/10.3788/AOS201333.0331002>
- [29] 张晓晖, 丁双红. 规整膜系层厚允许误差的研究[J]. 光子学报, 2003, 32(9): 1145-1148.