

金属/介质多层膜基太阳能光热转换薄膜结构的设计与优化

吴莹¹, 胡二涛^{1*}, 王静², 韦玮¹

¹南京邮电大学电子与光学工程学院, 微电子学院, 江苏 南京 210023;

²南京邮电大学通达学院基础教学部, 江苏 扬州 225127

摘要 理论设计对于高性能太阳能光热转换薄膜的实验制备极为重要。然而,大多数软件通常局限于正入射情况下的太阳光吸收率的优化,而无法直接对太阳能光热转换效率这一重要指标进行优化。鉴于以上问题,使用传输矩阵方法与遗传优化算法,通过改变金属/介质多层膜基太阳能光热转换薄膜中各层薄膜的厚度,直接对其光热转换效率进行优化设计。重点研究了薄膜层数、太阳光照度与工作环境温度对钨/氧化铝基(W/Al₂O₃)多层膜的影响。研究表明,在聚光比为1和100情况下,该膜系的最优膜层数分别为6与8。该研究结果对于高性能太阳能光热转换薄膜的实验制备具有重要的指导意义。

关键词 薄膜; 金属/介质多层膜; 传输矩阵方法; 遗传算法; 太阳能光热转换; 太阳光聚光比

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1431001

Design and Optimization of Multilayered Metal/Dielectric Film Structure for Solar Photothermal Conversion

Wu Ying¹, Hu Ertao^{1*}, Wang Jing², Wei Wei¹

¹ College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

² Department of Basic Education, Tongda College, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Yangzhou, Jiangsu 225127, China

Abstract Theoretical design is very critical for the experimental fabrication of a high-efficiency solar photothermal conversion film structure. However, most softwares are usually limited to the optimization of solar absorption under the normal incident condition, rather than focusing on the criteria of solar photothermal conversion efficiency (PCE). In view of the above problems, the transfer matrix method and the genetic optimization algorithm are used to directly optimize the photothermal conversion efficiency of a multilayered metal/dielectric film structure by changing the thickness of each layer of the film. The effects of the film layer number, solar illuminance, and ambient temperature on tungsten-alumina-based (W/Al₂O₃) multilayered film structures are studied. The results show that the optimal number of film layers is 6 for solar concentration ratio of 1 and 8 for that of 100. These results have important guiding significance in the experimental fabrication of high-efficiency solar photothermal conversion films.

Key words thin films; multilayered metal/ dielectric films; transfer matrix method; genetic algorithm; solar photothermal conversion; solar concentration ratios

OCIS codes 310.4165; 230.4170; 310.6860

1 引言

太阳能光热转换技术具有较高的能量转换效率,且能量便于存储,引起了人们的广泛关注^[1]。目

前,太阳能光热转换技术已在太阳能加热、太阳能发电、太阳能热电、太阳能光伏与海水淡化等^[2-5]领域取得了广泛应用。作为太阳能光热转换系统的核心部件,太阳光选择性吸收薄膜在尽可能吸收太阳辐

收稿日期: 2020-03-03; 修回日期: 2020-04-01; 录用日期: 2020-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(61605089)、南京邮电大学科研基金(NY218107)

* E-mail: iamethu@njupt.edu.cn

射光谱范围内的太阳能量的同时,必须尽量减少由红外光谱区的黑体辐射造成的热能损失^[2-3,6]。

目前,研究者们已制备出 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{W}/\text{SiO}_2/\text{W}$ ^[5], $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3-\text{W}/\text{Al}_2\text{O}_3-\text{WTi}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{W}$ ^[1], $\text{Al}_{34}\text{O}_{62}\text{N}_4/\text{AlN}/\text{ZrN}/\text{AlN}/\text{ZrN}/\text{Zr}_{0.2}\text{Al}_{0.8}\text{N}/\text{Cu}$ ^[7], $\text{SiO}_2/\text{Cr}/\text{SiO}_2/\text{Cr}/\text{SiO}_2/\text{Cu}$ ^[2,8] 以及 $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2/\text{MgF}_2/\text{TiO}_2/\text{W}/\text{TiO}_2/\text{W}/\text{MgF}_2/\text{W}/\text{MgF}_2/\text{W}$ ^[9] 等金属/介质多层膜型太阳光选择性吸收薄膜,这些薄膜具有高于 95% 的光吸收率和较低的热辐射率。另外,通过合理微调多层膜结构中一层薄膜的厚度或若干层膜的整体厚度,可以获得含有复杂图案的彩色太阳光选择性吸收薄膜^[10-11]。

在此前的研究工作中,研究者多采用半经验方法^[8,12],遍历方法^[1]或商用软件^[7,10,13-14]来设计多层膜型太阳光选择性吸收薄膜结构,但这些方法往往受限于正入射条件^[15]。此外,在一些研究工作中^[2,16-18],仅通过优化太阳光吸收率 α 与热辐射率 ϵ 来设计太阳光选择性吸收薄膜,而没有考虑太阳能光热转换效率这一更具有实用价值的指标。

Wang 等^[5]通过改变多层膜结构中各层薄膜的厚度,直接对所设计的光热转换薄膜的太阳能光热转换效率进行优化。在他们的研究中,假设太阳光吸收率 α 和热辐射率 ϵ 都是与角度无关的量。然而,实际上热辐射率是与角度有关的,必须考虑光热转换薄膜在半个球面内的热辐射率,即半球辐射率。Sakurai 等^[19]在考虑半球太阳光吸收率与热辐射率后,依据传输矩阵法与遗传算法,开发了一个可直接优化 Mo-SiO₂-陶瓷基太阳光选择性吸收薄膜的光热转化效率的程序。但是在这项研究中薄膜层数局限于四层,事实上,膜层为 7 层的太阳光选择性吸收薄膜已经在实验上得到实现^[7,20]。因此,研究膜层数大于 4 时,层数、工作温度及太阳光聚光比对太阳光选择性吸收薄膜的光热转换效率的影响具有重要的意义。

基于传输矩阵方法与遗传算法,本文提出了一个 MATLAB 程序,它能够解决常规软件受限于正入射条件和不能优化光热转换效率指标的问题。通过该程序,详细研究了钨/氧化铝基 ($\text{W}/\text{Al}_2\text{O}_3$) 太阳光选择性吸收薄膜的薄膜层数、工作环境温度与太阳光聚光比等因素对太阳光吸收率、热辐射率以及光热转换效率的影响。

2 计算方法

图 1 所示为本文研究的钨/氧化铝基多层薄膜

结构示意图,采用厚度大于 100.0 nm 的铜作为反射层,在反射层上依次堆叠氧化铝与钨薄膜,膜系数层数由氧化铝/钨薄膜对数决定。足够厚的铜反射层可确保膜系的光透射率约等于 0,此外,铜在长波段的优良反射特性有效地降低膜系在红外波段的辐射率。入射太阳光在钨与铜薄膜之间多次反射,进而被钨层吸收,从而提高入射光的吸收效率,这就是所谓的相消干涉效应^[8,21]。

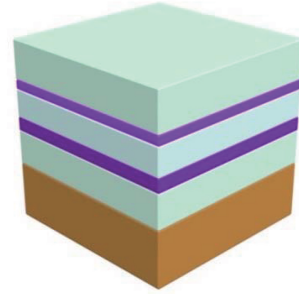


图 1 钨/氧化铝基多层薄膜结构示意图
(从上到下依次: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{W}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{W}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$)

Fig. 1 Schematic of multilayered tungsten-alumina-based film structure (from top to bottom: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{W}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{W}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$)

钨/氧化铝基多层薄膜结构的反射光谱可通过传输矩阵方法(TMM)进行计算^[19,22],计算中认为各层薄膜各项同性且为均匀介质。根据传输矩阵方法,膜系的特征矩阵可以表示为

$$\begin{bmatrix} B' \\ C' \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{r=1}^q \begin{bmatrix} \cos \varphi_r & \frac{i}{\eta_r} \sin \varphi_r \\ i\eta_r \sin \varphi_r & \cos \varphi_r \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_m \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: B' 为归一化的电场; C' 为归一化的磁场; q 为多层膜的总层数; φ_r 为第 r 层膜引起的波的相位改变量; η_r 为第 r 层膜的光学导纳; η_m 为基底的光学导纳, m 表示基底; $\varphi_r = \frac{2\pi N_r d_r \cos \theta_r}{\lambda}$, 其中 λ 为入射光波长, θ_r 为光在第 r 层膜处的入射角, d_r 为第 r 层膜的厚度, N_r 为第 r 层膜的折射率; s 光(横电波)的 $\eta_r = N_r \cos \theta_r$; p 光(横磁波)的 $\eta_r = \frac{N_r}{\cos \theta_r}$ 。

因此,可以得到整个膜系的光学导纳 $Y = C'/B'$ 和反射率 R 的表达式为

$$R = \left(\frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right) \left(\frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right)^*, \quad (2)$$

式中: η_0 为空气的光学导纳; “*”表示取复共轭。

氧化铝、铜和钨的光学常数取自光学常数手册及 Palik 等^[23-24]的工作。具有光滑表面的太阳光选

择性吸收薄膜可视为镜面,从而忽略漫反射。因而,太阳光选择性吸收薄膜的太阳光吸收率 α 可直接由太阳光垂直入射情况下薄膜表面的镜面反射光谱计算获得^[2,25],即

$$\alpha = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_n} [1 - R(0, \lambda)] d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_n} L_{\text{sun}}(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

式中: $R(0, \lambda)$ 为正入射条件下的镜面反射光谱; $[\lambda_1, \lambda_n]$ 为波长积分范围,本文 λ_1 取为250 nm, λ_n 取为3000 nm,这个波段几乎涵盖了整个太阳辐射光谱的波长范围; $L_{\text{sun}}(\lambda)$ 为各个波长下的太阳辐射光谱强度。

依据普朗克黑体辐射法则,样品被太阳光加热后会将热量重新辐射到其表面上方的半球空间中,那么半球热辐射率^[20, 26]就可以表示为

$$\varepsilon(T) = \frac{2 \int_0^{\pi/2} \int_0^{\infty} E(T, \lambda) [1 - R(\theta, \lambda)] \cos \theta \sin \theta d\lambda d\theta}{\int_0^{\infty} E(T, \lambda) d\lambda}, \quad (4)$$

式中: θ 为光入射角; $E(T, \lambda)$ 为温度为 T 时的普朗克黑体辐射光谱; $R(\theta, \lambda)$ 为样品的反射率。

在特定温度 T 与太阳光聚光比 C 下,太阳能光热转换效率(PCE, η_t)^[3,15,19,27]可表示为

$$\eta_t = B\alpha - \frac{\varepsilon\sigma T^4}{CI}, \quad (5)$$

式中: σ 为玻尔兹曼常数; B 为封装玻璃的透射率; I 为标准太阳辐射强度(大气质量为1.5即AM1.5时)。在本文中,取 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$, $B=1$,太阳辐射强度 $I = 1000 \text{ W/m}^2$ (1个标准太阳光强度)。

为了设计出能够在特定温度与聚光比下工作的太阳光选择性吸收薄膜,使用遗传算法优化膜系结构中每一膜层的厚度,从而使膜系的太阳能光热转换效率最大^[19,28]。遗传算法是美国Michigan大学的Holland教授于1975年提出的一种模拟生物进化过程的计算模型^[19]。它是一种全局优化随机搜索算法,具有不依赖梯度信息、简单通用、鲁棒性强、适合并行分布处理、应用范围广的优点。

本文使用遗传算法工具箱^[28],以每一组多层膜的厚度作为一个个体,定义膜系的太阳能光热转换

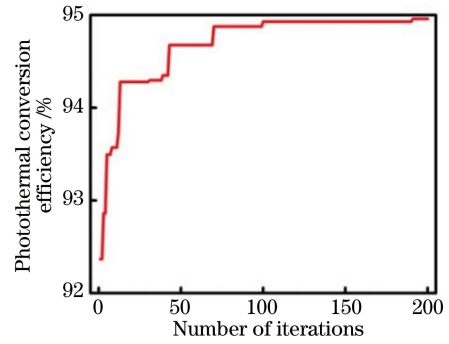


图2 10层W/Al₂O₃膜的太阳能光热转换效率曲线
Fig. 2 Solar photothermal conversion efficiency of ten-layered W/Al₂O₃ film structure

效率为演化函数。考虑到工具箱中的默认参数范围,经过测试,将进化过程中的交叉和变异概率分别为设定为0.7和0.2。测试发现,200个初始种群和200代演化可以确保优化的结果收敛。图2所示为工作在600 K与100个标准太阳光强度下的10层薄膜的收敛曲线,可以发现,经过200代演化后,膜系的太阳能光热转换效率基本趋于稳定。由于种群中的个体正在演化,光热转换效率高的个体被选择进行交叉变异的概率较小,而光热转换效率低的个体会有一定概率被选择进行交叉变异,但不一定能进化出更优的个体,此时光热转换效率保持不变,因而收敛曲线呈阶梯形变化,但由于演化过程中变异的存在,演化过程最终趋于最优解。

3 分析与讨论

首先,通过优化太阳光吸收率设计了一个6层W/Al₂O₃太阳光选择性吸收薄膜,具体膜系结构为:Al₂O₃(83.3 nm)/W(6.4 nm)/Al₂O₃(72.8 nm)/W(14.7 nm)/Al₂O₃(86.1 nm)/Cu(>100.0 nm),该膜系的理论反射光谱如图3所示。可以看到,膜系的反射率在太阳的主要辐射光谱范围内非常低,但在长波范围内快速增加,这表明所设计的膜系结构具有较高的太阳光吸收率与较低的热辐射率。该膜系的太阳光吸收率约为93.7%。

在600 K工作温度及一个标准太阳光强度($C=1$)或100个标准太阳光强度($C=100$)下,层数对W/Al₂O₃多层薄膜结构的太阳光吸收率、热辐射率以及太阳能光热转换效率的影响如图4所示,对应的膜系结构参数如表1所示。在一个标准太阳光强度下,随着层数的增加,膜系的吸收光谱范围变大,因此太阳光吸收率增大。从图4(b)中可以看出,热辐射率也随着层数的增加而增大。在仿真中,

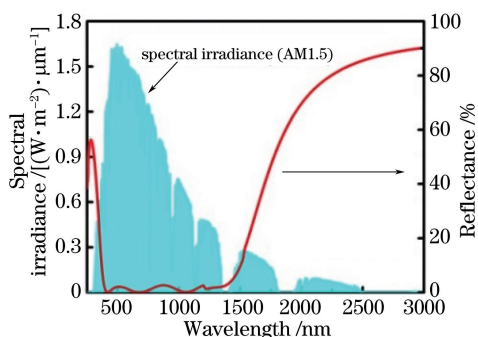


图3 优化的 Al₂O₃ (83.3 nm)/W (6.4 nm)/Al₂O₃ (72.8 nm)/W (14.7 nm)/Al₂O₃ (86.1 nm)/Cu(>100.0 nm)薄膜的反射光谱

Fig. 3 Reflectance spectrum of optimized film structure of Al₂O₃ (83.3 nm) /W (6.4 nm) /Al₂O₃ (72.8 nm)/W (14.7 nm) /Al₂O₃ (86.1 nm)/Cu (>100.0 nm)

温度设定为 600 K,因此普朗克黑体辐射光谱保持不变,随着薄膜层数的增加,变宽的吸收光谱与普朗克辐射光谱的交叠部分增多。(4)式的分母为黑体辐射光谱的积分,温度为定值时,分母为定值;黑体

辐射谱与膜系吸收谱的乘积是(4)式分子的积分元,当二者交叠增多时,分子的积分值变大,从而导致热辐射增加。图 4(c)所示为薄膜层数及太阳光聚光比对太阳能光热转换效率 η_t 的影响规律。在一个标准太阳光强度下,当薄膜层数从 4 增加到 6 时, η_t 略微增大,但当层数继续增加到 8 时, η_t 趋于减小。因此,在一个标准太阳光强度下,6 层是 W/Al₂O₃ 多层膜的最佳层数。在一个标准太阳光强度下,随着薄膜层数的增加,膜系的吸收光谱逐渐变宽,与黑体辐射光谱的交叠也越来越多,导致膜系的太阳光吸收率和热辐射率都逐渐增大,进而使太阳能光热转换效率先增加后减小。在 100 个标准太阳光强度下,太阳光吸收率、热辐射率以及太阳能光热转换效率均随着薄膜层数的增加而增大,但当层数超过 8 时,太阳能光热转换效率 η_t 趋于饱和。考虑到制备的复杂程度与成本,在聚光比为 100 时,8 层应当是 W/Al₂O₃ 太阳光选择性吸收薄膜的最佳膜层数。此外,在 100 个标准太阳光强度下,由(5)式可知此时的热辐射率可忽略不计,太阳能光热转换效率约等于太阳光吸收率。

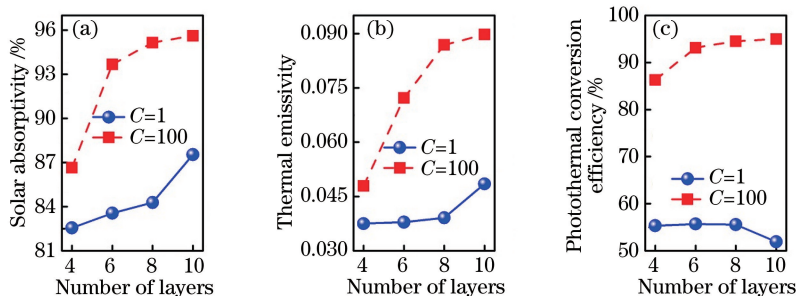


图4 在一个标准太阳光强度或 100 个标准太阳光强度下,层数对 W/Al₂O₃ 多层薄膜结构的的影响。

(a) 太阳光吸收率;(b)热辐射率;(c)太阳能光热转换效率

Fig. 4 Influence of layer number on multilayered W/Al₂O₃ film structure when C=1 or 100.

(a) Solar absorptivity;(b) thermal emissivity ;(c) solar photothermal conversion efficiency

在 50 个标准太阳光强度下,温度对 6 层 W/Al₂O₃ 膜系的太阳光吸收率、热辐射率以及太阳能光热转换效率的影响如图 5 所示。可以看到,太阳光吸收率几乎不随温度的变化而变化,而太阳能光热转换效率随温度的升高而减小。这是因为随着温度的升高,普朗克黑体辐射光谱向短波方向移动,尤其是在高温情况下,薄膜的热辐射率单调增加。此外, η_t 与温度的四次方呈反比,因此 η_t 会随着温度的升高而单调递减。

当工作温度为 600 K 时,太阳光聚光比对 6 层 W/Al₂O₃ 膜系的太阳光吸收率、热辐射率以及太阳能光热转换效率的影响结果如图 5(b) 所示。在 1 个标准太阳光强度下,太阳能光热转换效率约为

55%;而当光照达到 100 个标准太阳光强度时,太阳能光热转换效率增大至 93%,与此时的太阳光吸收率十分接近。可以看到,太阳光吸收率、热辐射率以及太阳能光热转换效率均随太阳光聚光比的增大而增大。根据(5)式可知,当聚光比 C=1 时,(5)式第二项的影响比较显著,导致太阳光吸收率和光热转换效率差别较大。当聚光比逐渐增加时,(5)式中的第二项逐渐减小(热辐射率 ϵ 远小于聚光比 C),致使太阳光吸收率和光热转换效率逐渐增大。随着聚光比的增加,(5)式中第二项的作用逐渐减弱,为了提高膜系的光热转换效率,可使膜系的热辐射率略微增加。当聚光比增加到一定程度时,(5)式中第二项的影响基本可以忽略,光热转换效率接近太阳光

表 1 $T=600\text{ K}$ 时优化得到的 $\text{W}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 太阳光选择性吸收薄膜
Table 1 Optimized $\text{W}/\text{Al}_2\text{O}_3$ solar selective absorption films when $T=600\text{ K}$

Number of layers	Solar concentration ratio	Film structure
4	$C=1$	Al_2O_3 (68.9 nm)/ W (10.2 nm)/ Al_2O_3 (37.7 nm)/ Cu (>100.0 nm)
	$C=100$	Al_2O_3 (82.9 nm)/ W (10.6 nm)/ Al_2O_3 (63.4 nm)/ Cu (>100.0 nm)
6	$C=1$	Al_2O_3 (64.2 nm)/ W (5.8 nm)/ Al_2O_3 (31.4 nm)/ W (13.1 nm)/ Al_2O_3 (5.7 nm)/ Cu (>100.0 nm)
	$C=100$	Al_2O_3 (85.3 nm)/ W (6.0 nm)/ Al_2O_3 (73.6 nm)/ W (14.3 nm)/ Al_2O_3 (84.5 nm)/ Cu (>100.0 nm)
8	$C=1$	Al_2O_3 (69.7 nm)/ W (6.8 nm)/ Al_2O_3 (31.4 nm)/ W (5.8 nm)/ Al_2O_3 (1.0 nm)/ W (7.7 nm)/ Al_2O_3 (4.1 nm)/ Cu (>100.0 nm)
	$C=100$	Al_2O_3 (81.4 nm)/ W (5.0 nm)/ Al_2O_3 (70.5 nm)/ W (10.6 nm)/ Al_2O_3 (100.9 nm)/ W (15.0 nm)/ Al_2O_3 (133.7 nm)/ Cu (>100.0 nm)
10	$C=1$	Al_2O_3 (73.6 nm)/ W (7.1 nm)/ Al_2O_3 (40.8 nm)/ W (48.5 nm)/ Al_2O_3 (1.0 nm)/ W (44.0 nm)/ Al_2O_3 (2.6 nm)/ W (38.9 nm)/ Al_2O_3 (133.7 nm)/ Cu (>100.0 nm)
	$C=100$	Al_2O_3 (86.8 nm)/ W (5.2 nm)/ Al_2O_3 (72.8 nm)/ W (8.9 nm)/ Al_2O_3 (74.4 nm)/ W (7.3 nm)/ Al_2O_3 (97.8 nm)/ W (34.1 nm)/ Al_2O_3 (47.8 nm)/ Cu (>100.0 nm)

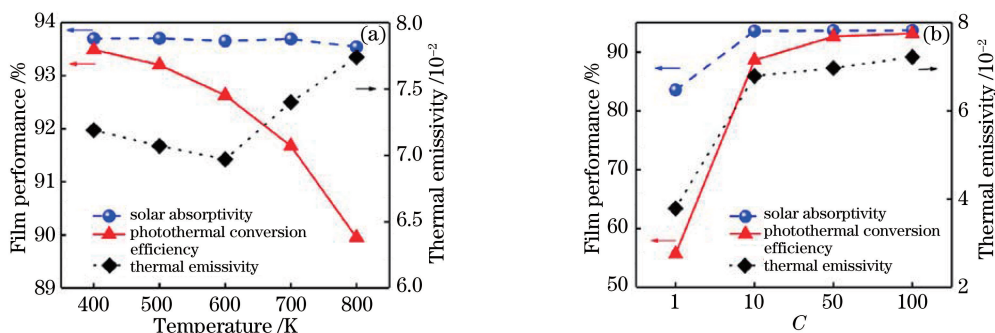


图 5 温度与太阳光聚光比对 6 层 $\text{W}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜系性能的影响。

(a) 50 个标准太阳光强度下温度的影响;(b) 600 K 下太阳光聚光比的影响

Fig. 4 Influences of temperatures and solar concentration ratios on performances of six-layered $\text{W}/\text{Al}_2\text{O}_3$ film structure.

(a) Influence of temperature when $C=50$; (b) influence of solar concentration ratio at 600 K

吸收率,此时可通过优化太阳光选择性吸收薄膜的光吸收率来合理设计多层膜的结构。

4 结 论

为了打破传统商用光学软件在设计太阳光选择性吸收多层膜时所存在的局限性,基于传输矩阵方法与遗传算法,通过直接优化金属/介质多层膜型太阳光选择性吸收薄膜的光热转换效率,获得了高效率的太阳能光热转换薄膜结构。研究表明,太阳光聚光比对太阳光选择性吸收多层膜的性能具有显著影响。在一个标准太阳光强度的光照条件下, $\text{W}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 多层膜的最优层数为 6;然而,在强太阳光照射情况下(≥ 50 个标准太阳光强度),层数增加到 8 之后,薄膜的太阳能光热转换效率基本趋于饱和。此时,制备工艺变得复杂,成本也增加,因此膜系的最佳层数为 8。研究结果能够为高效率太阳能

光热转换薄膜结构的设计提供重要的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Wang X Y, Gao J H, Hu H B, et al. High-temperature tolerance in $\text{WTi}-\text{Al}_2\text{O}_3$ cermet-based solar selective absorbing coatings with low thermal emissivity[J]. *Nano Energy*, 2017, 37: 232-241.
- [2] Hu E T, Guo S, Gu T, et al. High efficient and wide-angle solar absorption with a multilayered metal-dielectric film structure [J]. *Vacuum*, 2017, 146: 194-199.
- [3] Bermel P, Lee J, Joannopoulos J D, et al. Selective solar absorbers[M] // Chen G, Prasad V, Jaluria V, et al. *Annual review of heat transfer*. New York: Begell House, 2012: 231-254.
- [4] Zhou L, Tan Y L, Wang J Y, et al. 3D self-assembly of aluminium nanoparticles for plasmon-enhanced solar desalination [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(6): 393-398.

- [5] Wang H, Alshehri H, Su H, et al. Design, fabrication and optical characterizations of large-area lithography-free ultrathin multilayer selective solar coatings with excellent thermal stability in air [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 174: 445-452.
- [6] Fu X H, Guo K, Zhang J, et al. Strong absorption film of metal-dielectric interference of solar spectrum [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44 (8): 0803002.
付秀华, 郭凯, 张静, 等. 太阳光谱金属-介质干涉型强吸收膜的研究 [J]. *中国激光*, 2017, 44(8): 0803002.
- [7] Meng J P, Liu X P, Fu Z Q, et al. Optical design of Cu/Zr_{0.2}AlN_{0.8}/ZrN/AlN/ZrN/AlN/Al₃₄O₆₂N₄ solar selective absorbing coatings [J]. *Solar Energy*, 2017, 146: 430-435.
- [8] Zhou W X, Shen Y, Hu E T, et al. Nano-Cr-film-based solar selective absorber with high photo-thermal conversion efficiency and good thermal stability [J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28953-28962.
- [9] Sergeant N P, Pincon O, Agrawal M, et al. Design of wide-angle solar-selective absorbers using aperiodic metal-dielectric stacks [J]. *Optics Express*, 2009, 17 (25): 22800-22812.
- [10] Wu Y W, Zheng W F, Lin L M, et al. Colored solar selective absorbing coatings with metal Ti and dielectric AlN multilayer structure [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2013, 115: 145-150.
- [11] Chen F L, Wang S W, Liu X X, et al. Colorful solar selective absorber integrated with different colored units [J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): A92-A103.
- [12] Li X F, Chen Y R, Miao J, et al. High solar absorption of a multilayered thin film structure [J]. *Optics Express*, 2007, 15(4): 1907-1912.
- [13] Rodríguez-Palomo A, Céspedes E, Hernández-Pinilla D, et al. High-temperature air-stable solar selective coating based on MoSi₂-Si₃N₄ composite [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2018, 174: 50-55.
- [14] Thomas N H, Chen Z, Fan S H, et al. Semiconductor-based multilayer selective solar absorber for unconcentrated solar thermal energy conversion [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7 (1): 5362.
- [15] Chester D, Bermel P, Joannopoulos J D, et al. Design and global optimization of high-efficiency solar thermal systems with tungsten cermet [J]. *Optics Express*, 2011, 19(Suppl 3): A245-A257.
- [16] Du M, Hao L, Mi J, et al. Optimization design of Ti_{0.5}Al_{0.5}N/Ti_{0.25}Al_{0.75}N/AlN coating used for solar selective applications [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2011, 95(4): 1193-1196.
- [17] Wu Y X, Wang C, Sun Y, et al. Optical simulation and experimental optimization of Al/NbMoN/NbMoON/SiO₂ solar selective absorbing coatings [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015, 134: 373-380.
- [18] Gremion C, Seassal C, Drouard E, et al. Design, properties and degradation mechanisms of Pt-Al₂O₃ multilayer coating for high temperature solar thermal applications [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2015, 284: 31-37.
- [19] Sakurai A, Tanikawa H, Yamada M. Computational design for a wide-angle cermet-based solar selective absorber for high temperature applications [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, 132: 80-89.
- [20] Yang C Y, Ji C G, Shen W D, et al. Compact multilayer film structures for ultrabroadband, omnidirectional, and efficient absorption [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(4): 590-596.
- [21] Zhang K, Hao L, Du M, et al. A review on thermal stability and high temperature induced ageing mechanisms of solar absorber coatings [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 67: 1282-1299.
- [22] MacLeod H A, MacLeod H A. *Thin-film optical filters* [M]. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [23] Palik E D. *Handbook of optical constant of solids* [M]. New York: Academic Press, 1998.
- [24] Skowronski L, Szczesny R, Zdunek K. Optical and microstructural characterization of amorphous-like Al₂O₃, SnO₂ and TiO₂ thin layers deposited using a pulse gas injection magnetron sputtering technique [J]. *Thin Solid Films*, 2017, 632: 112-118.
- [25] Guo S, Wu Y, Gu T, et al. Preparation and characterization of solar-selective absorbers based on multilayered W/SiO₂ thin films [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(5): 0531001.
郭帅, 吴莹, 古同, 等. W/SiO₂基太阳光谱选择性吸收薄膜的制备和表征 [J]. *光学学报*, 2019, 39(5): 0531001.
- [26] Liu M H, Hu E T, Yao Y, et al. High efficiency of photon-to-heat conversion with a 6-layered metal/dielectric film structure in the 250-1200 nm wavelength region [J]. *Optics Express*, 2014, 22 (Suppl 7): A1843-A1852.
- [27] Ning Y P, Wang W W, Wang L, et al. Optical simulation and preparation of novel Mo/ZrSiN/ZrSiON/SiO₂ solar selective absorbing coating [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, 167:

178-183.
[28] Chipperfield A J, Fleming P J. The MATLAB genetic algorithm toolbox [C] // IEE Colloquium on

Applied Control Techniques Using MATLAB, January 26-26, 1995, London, UK. London: IET, 1995: 4917683.