论文

W-AIN 高温太阳光谱选择吸收涂层的结构优化与实验验证

张敏^{①*}, 梁卉^①, 张志丹^①, 索妮^②, 李培刚^③^① 辽宁师范大学物理与电子技术学院, 大连 116029;^② 大连理工大学材料科学与工程学院, 大连 116085;^③ 浙江理工大学物理系光电材料与器件中心, 杭州 310018

* E-mail: m.zhang@live.com

收稿日期: 2015-06-10; 接受日期: 2015-08-30; 网络出版日期: 2015-11-18

国家自然科学基金(批准号: 61274017, 51572241)、教育部留学回国人员科研启动基金(编号: 教外司留 2012 940 号)和辽宁省高等学校优秀人才支持计划(编号: LJQ2011115)资助项目

摘要 选取 W-AIN 金属-介质型选择性吸收涂层为研究对象, 用金属 W 作为红外反射层, W-AIN 作为吸收层, AIN 作为减反层, 利用 Mathematica 软件对该涂层的金属 W 体积分数和吸收层、减反层的厚度等参数进行优化计算, 优化结果表明: 吸收层中金属 W 的体积分数对涂层的选择吸收性能有直接影响; 与高金属吸收层相比, 低金属吸收层的厚度对涂层选择吸收性能的影响较显著; 低/高金属吸收层中金属 W 体积分数的最优值分别为 0.2/0.8, 而最优厚度分别为 0.1/0.05 μm , 此时涂层的吸收率为 0.841, 发射率为 0.021; 加入厚度为 0.06 μm 的 AIN 减反层后, 吸收率达到 0.920, 发射率为 0.022; 加入厚度适当的减反层可以有效提高涂层的吸收率, 同时也会使发射率随之增加; 增加减反层和低金属吸收层厚度都会使涂层的反射率骤升阈值波长发生红移. 利用磁控溅射方法在抛光的不锈钢表面制备了 W/W-AIN/AIN 选择吸收涂层, 各层膜厚度和吸收层中金属体积分数都严格遵循优化结果, 测试所得涂层的反射率曲线、吸收率和发射率均与优化结果符合良好.

关键词 太阳光谱选择吸收涂层, W-AIN, 吸收率, 反射率, 结构优化

1 引言

高温太阳能选择吸收涂层是太阳能光热转换的关键材料. 它对太阳光谱中从紫外到可见再到近红外波段的光波保持高吸收, 而对红外光谱保持高反射, 从而实现最大限度地吸收太阳能, 有效提高太阳

能集热管的热吸收效率^[1,2].

近年来由于复合材料的使用, 使得高温太阳光谱选择吸收涂层的性能大幅提高, 其中由红外反射层、高金属含量吸收层、低金属含量吸收层、减反射层构成的金属-介质型薄膜体系^[3]备受关注. 1995 年, 黄岩彬等人^[4]利用导纳递推法结合 C 语言程序对

引用格式: 张敏, 梁卉, 张志丹, 等. W-AIN 高温太阳光谱选择吸收涂层的结构优化与实验验证. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 46–53
Zhang M, Liang H, Zhang Z D, et al. Structural optimization and experimental verification of W-AIN high temperature solar spectrum selective absorbing coatings (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 46–53, doi: 10.1360/N092014-00381

SiO₂/Mo-N-O/Mo 薄膜进行了模拟计算, 吸收率最高可达 0.94, 发射率 0.19, 发射率偏高; 1997 年, 杨晓继等人^[5]对干涉-吸收型太阳光谱选择吸收表面进行研究, 指出吸收层中金属体积分数的选取和吸收层厚度直接影响整个膜系的选择吸收性能; 2000 年, 谢光明等人^[6]研制了 M-AIN 涂层, 其吸收率大于 0.9, 发射率小于 0.1; 2004 年, Zhang 等人^[7]运用下山单纯形法对 AION/W-AION/AI 金属陶瓷涂层进行了优化计算, 其吸收率高达 0.953, 发射率仅为 0.051; 2006 年, 牛继楠等人^[8]利用 TFCalc 光学软件对 Al-AIN/AI 薄膜进行了优化设计, 得到吸收率高达 0.92 的膜系; 2012 年, 丁迪等人^[9]在所开展的 AIN 薄膜太阳能吸收率的研究中提出, 使用 W 作为减反层的 AIN 膜系的吸收率比使用 AI 做减反层时更高.

本文综合以上研究经验, 选取 W-AIN 金属-介质型太阳光谱选择吸收涂层(涂层结构如图 1 所示)进行研究, 对金属 W 体积分数、吸收层厚度和减反层厚度进行组合, 运用 Mathematica 软件编程对上述 3 个参数进行优化计算, 得到选择吸收性能最优的涂层的结构参数; 按照优化所得结构参数, 本研究将利用磁控溅射技术在 316L 不锈钢表面制备 W/W-AIN/AIN 选择吸收涂层, 通过大量的实验工艺摸索, 使各层膜厚度和吸收层中金属体积分数都严格遵循优化结构参数, 然后对其进行选择吸收性能的实验验证.

2 光学薄膜优化设计理论

本文所选用的 W-AIN 金属-介质型选择吸收涂层可用光学膜系设计原理对整个膜系进行设计和优化, 其中 W-AIN 复合材料的介电常数和复折射率通过

图1 W-AIN 金属-介质型选择吸收涂层的结构简图

Bruggeman 聚集微结构理论^[10]进行计算. 该理论假定: 两种材料体积相当, 随机混合分布, 会形成聚集微结构. 本文所用的吸收层是由 W 和 AIN 组成的复合材料, 其中 W 的体积百分比为 f , 那么 AIN 为 $1-f$. 复合材料介电常数 ε_c 与两种材料介电常数 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 的关系式为

$$f \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_c}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_c} + (1-f) \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_c}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_c} = 0. \quad (1)$$

已知介电常数均为复数, 而复折射率 $\bar{N}^2 = \varepsilon$, 故(1)式可变为

$$f \frac{\bar{N}_1^2 - \bar{N}^2}{\bar{N}_1^2 + 2\bar{N}^2} + (1-f) \frac{\bar{N}_2^2 - \bar{N}^2}{\bar{N}_2^2 + 2\bar{N}^2} = 0, \quad (2)$$

式中, N_1 为 W 的复折射率; N_2 为 AIN 的复折射率; N 为介质材料的复合折射率(复折射率 $N=n-ik$, n 为折射率; k 为消光系数).

本文利用矩阵法和递推法对图 1 所示选择吸收膜系的光学参数进行计算. 令薄膜的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \frac{i}{\eta_1} \sin \delta_1 \\ i\eta_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix}, \text{ 则利用递推导纳法}^{[11]} \text{ 可得多层}$$

膜系统的特征矩阵为

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{r=1}^n \begin{bmatrix} \cos \delta_r & \frac{i}{\eta_r} \sin \delta_r \\ i\eta_r \sin \delta_r & \cos \delta_r \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{n+1} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中, $\delta_r = \frac{2\pi N_r d_r \cos \theta_r}{\lambda}$, 通过相应计算可求得膜系的反射率为

$$R = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^*. \quad (4)$$

太阳光谱吸收涂层的选择吸收性能通常用吸收率 α ^[12]和发射率 ε ^[13]来衡量, 可分别利用(5)式和(6)式计算得到.

$$\alpha = \frac{\int_{\lambda} \Phi(\lambda) \times \alpha(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} \Phi(\lambda) d\lambda}, \quad (5)$$

$$\varepsilon(T) = \frac{\int_{\lambda} [1 - R(\lambda, T)] \times B(\lambda, T) d\lambda}{\sigma T^4}, \quad (6)$$

式中, $\alpha(\lambda)$ 为单色光谱吸收比; $\Phi(\lambda)$ 为太阳辐射光谱 (AM1.5); $\alpha(\lambda)=1-R(\lambda)$; $B(\lambda, T)$ 为黑体在温度 T 下的单色辐射强度, $B(\lambda, T)=\frac{C_1}{\lambda^5 \left[e^{\left(\frac{C_2}{\lambda T} \right)} - 1 \right]}$, 式中

$C_1=3.7405 \times 10^8 \text{ W } \mu\text{m}^4 \text{ m}^{-2}$, $C_2=1.43879 \times 10^4 \text{ } \mu\text{m K}$, 斯蒂芬-玻尔兹曼常数 $\sigma=5.6696 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$.

3 薄膜参数的优化计算

3.1 吸收层金属体积分数的优化计算

由 Palik 手册^[14]中查得金属 W 在不同波长下的光学常数, 并且近似认为 AlN 的折射率为 1.9, 消光系数为 0.001^[15]. 金属 W 的体积分数分别取 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 计算得到了 W-AlN 复合材料的光学常数(图 2).

设定高/低金属吸收层的厚度均为 $0.1 \text{ } \mu\text{m}$, 对不同金属体积分数的膜层进行组合, 共有 6 种组合方式, 如表 1 所示. 每种组合都采用低金属 W-AlN 吸收层/高金属 W-AlN 吸收层的方式, 组合优化的主要对象是两个吸收层的金属 W 的体积分数, 以得到最优的膜系结构.

根据薄膜干涉原理, 即(4)式, 使用 Mathematica 软件计算得到各种组合膜系的反射率, 如图 3 所示. 可以明显看出, 只有组合 B 和组合 C 的反射率曲线最接近理想太阳光谱选择性吸收涂层的反射率曲线, 即在 $2.5 \text{ } \mu\text{m}$ 以下波长区域保持低反射, 在 $2.5 \text{ } \mu\text{m}$ 处的反射率急剧上升, 在 $2.5 \text{ } \mu\text{m}$ 以上波长区域保持高反射率. 因此, 选取组合 B 和 C 继续优化. 利用公式(5)和(6)式, 计算得出组合 B 和 C 的吸收率和发射率 (100°C), 如表 2 所示.

由于本文所选结构含有减反层, 考虑到增加减反层虽对吸收率有所提高, 但同时会使发射率变大, 因此, 综合考虑, 选择组合 C 继续进行吸收层厚度的优化.

3.2 吸收层厚度的优化计算

由 3.1 可知, 金属体积分数为 $f_{\text{低}}/f_{\text{高}}=0.2/0.8$ 的膜系选择吸收性能最优, 因此, 将吸收层中金属 W 体积分数设定为 $f_{\text{低}}/f_{\text{高}}=0.2/0.8$, 对吸收层厚度进行优化计算. 将不同膜厚的吸收层进行组合, 其组合方式共 16 组, 如表 3 所示. 计算得到其反射率, 如图 4 所示可见, 只有图 4(b)在波长为 $0.3 \sim 2.5 \text{ } \mu\text{m}$ 时保持高吸收率, 在 $\lambda > 2.5 \text{ } \mu\text{m}$ 时保持低发射率, 即组合 5~8 的选择吸收性能最佳. 计算得出组合 5~8 的吸收率和发射

图 2 金属 W 为不同体积分数时 W-AlN 复合材料的光学常数

(a) 0.2; (b) 0.4; (c) 0.6; (d) 0.8

表 1 吸收层金属体积分数的组合方式

Patterns	A	B	C	D	E	F
$f_{低}$	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.6
$f_{高}$	0.4	0.6	0.8	0.6	0.8	0.8

图 3 厚度为 $d_{低}=0.1\text{ }\mu\text{m}$, $d_{高}=0.1\text{ }\mu\text{m}$ 时, 吸收层 6 种组合方式对应的反射率曲线

表 3 吸收层厚度的组合方式

Patterns	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$d_{低}(\text{ }\mu\text{m})$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3
$d_{高}(\text{ }\mu\text{m})$	0.05	0.1	0.2	0.3	0.05	0.1	0.2	0.3	0.05	0.1	0.2	0.3	0.05	0.1	0.2	0.3

图 4 金属体积分数 $f_{低}=0.2, f_{高}=0.8$ 时, 不同组合吸收层的反射率曲线
(a) 组合 1~4; (b) 组合 5~8; (c) 组合 9~12; (d) 组合 13~16

表 2 组合 B 和组合 C 的选择吸收性能

Patterns	B	C
α	0.8453	0.8408
ε	0.0288	0.0222

率, 结果如图 5 所示. 可以看出, 虽然组合 6~8 的吸收率比组合 5 稍高, 但发射率也高很多, 综合考虑, 认为组合 5 的选择吸收性能最佳, 将在此基础上对 AlN 减反层厚度进行优化计算.

3.3 AlN 减反层厚度的优化计算

在对 W-AlN 吸收层优化的基础上, 选取 AlN 作为减反层, 加入到多层结构中. 设定低/高金属吸收层的金属 W 体积分数为 0.2/0.8, 厚度为 $0.1\text{ }\mu\text{m}/0.05\text{ }\mu\text{m}$, 并以 W 作红外反射层, AlN 减反层的厚度由 $0.04\text{ }\mu\text{m}$ 增大至 $0.2\text{ }\mu\text{m}$, 计算整体膜层的反射率, 结果如图 6 所示. 在此基础上, 计算其吸收率和发射率, 如图 7 所示.

图5 组合5~8的吸收率和发射率曲线

图6 (网络版彩图)加入不同厚度减反层后薄膜的反射率曲线

图7 加入不同厚度减反层后膜系的吸收率和发射率

4 结果与讨论

(1) 由图2可以看到: 随着金属W体积分数的增

加, W-AlN 复合材料的光学常数都随之增大, 消光系数增加得更快, 说明随着金属体积分数增加, 使得 W-AlN 复合薄膜的金属性逐渐增强。

(2) 从图3可以看出, 当吸收层厚度一定时, 6种组合方式中, 组合B(0.2/0.6)和C(0.2/0.8)的反射率曲线都比较接近理想的选择性吸收涂层的反射率曲线。仔细比较可以发现, 组合C的反射率曲线在太阳光谱范围内具有最低的反射率, 同时在红外区域具有最高的反射率。两个组合的吸收率和发射率计算结果也显示, 组合B的吸收率只比C高0.005, 而发射率却高出0.007, 因此认为组合C的选择吸收性能最优。

(3) 当薄膜吸收层W金属体积分数一定时, 对吸收层厚度进行优化, 结果如图4所示。可以看出, 按表3所给组合, 每4组曲线接近重合, 即低金属吸收层厚度不变, 高金属吸收层厚度改变时, 整个膜系反射率几乎不变。将高金属吸收层厚度相同而低金属吸收层厚度不同的膜系的反射率曲线画图, 如图8所示。可见, 高金属吸收层厚度不变, 低金属吸收层厚度改变时, 整个膜系反射率变化明显。说明低金属吸收层的厚度对整个膜系反射率影响显著, 而高金属吸收层厚度对膜系的反射率影响不大。这是由于低金属层中介质的体积分数较大, 因此该层的介质属性较强, 受光的干涉影响较大, 因此整个涂层的反射率曲线受该层厚度的影响较显著, 而高金属体积分数吸收层中的介质体积分数较小, 几乎不受光的干涉影响, 因此该层厚度对涂层整体反射率影响较小。

(4) 随着低金属吸收层厚度的增加, 反射率曲线

图8 (网络版彩图)金属体积分数为 $f_{\text{低}}=0.2, f_{\text{高}}=0.8$ 时, 组合1, 5, 9, 13吸收层的反射率曲线

骤升阈值波长向长波方向移动. 这是因为低金属层的介质属性较强, 受光的干涉影响依旧较明显, 当其厚度增加, 太阳光进入薄膜后的光程变大, 根据薄膜干涉原理, 对应的相消与相长的干涉点的波长值也变大, 即反射率曲线骤升阈值波长向长波方向移动. 其中, 虽然组合 1~4 的反射率曲线在太阳光谱范围内具有最低反射率 0.042, 在红外区域的反射率也高达 0.981, 但这 4 种组合的反射率曲线在波长还未达到 2.5 μm 时就已迅速升高, 选择吸收性能不佳; 组合 5~8 的反射率曲线都在波长 2.5 μm 处迅速升高, 其中, 组合 5 的反射率曲线在太阳光谱范围内具有最低反射率 0.044, 在红外区域的反射率也高达 0.981. 由图 5 所示的吸收率和发射率结果, 认为组合 6~8 都不及组合 5 优越; 组合 9~12 的反射率曲线的升高点则明显落后于 2.5 μm , 且太阳光谱区域内的反射率值也不够低; 组合 13~16 的反射率曲线则明显差于其他组合.

(5) 从图 6 可看出, 加入减反层后, 涂层的反射率骤升阈值波长向长波方向移动, 这也可用光的干涉原理解释: 当减反层厚度增加, 太阳光进入薄膜后的光程变大, 对应的相消与相长的干涉点的波长值也变大, 即涂层的反射率骤升阈值波长向长波方向移动. 由图 7 所示的吸收率和发射率可以看出, 随着 AlN 减反层厚度的增大, 膜系的吸收率先增大后减小, 在减反层厚度为 0.06 μm 时达到最大值 0.920; 而发射率先减小后增加, 在减反层厚度为 0.04 μm 时达到最小值为 0.022. 可以看出, 减反层虽能适当提高涂层的吸收率, 但同时也会使发射率增加. 因此所加减反层厚度的选取很重要, 综合考虑认为选择厚度为 0.06 μm 的 AlN 减反层为最优结果. 优化得到的选择性吸收涂层的吸收率为 0.920, 100 $^{\circ}\text{C}$ 时的发射率为 0.022.

5 实验验证

本文采用磁控溅射技术在镜面抛光后的 316L 不锈钢表面制备 W/W-AlN/AlN 选择吸收涂层, 从内到外分别是金属 W 作为红外反射层、W-AlN 吸收层和 AlN 减反层, 其中吸收层包括高金属吸收层和低金属吸收层. 由于所制备的 W-AlN 吸收层为聚集微结构, 所以, 金属的体积分数近似为金属含量. 首先将尺寸为 $\varnothing 30\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的不锈钢样品超声清洗、吹干后放置于真空室样品台, 极限真空抽至 $5.0 \times 10^{-3}\text{ Pa}$, 通入

Ar 气维持真空在 2.0 Pa, 在基片台上施加 -700 V 负偏压, 进行辉光清洗 10 min 以清洁表面和提高表面活性. 然后调整真空至 0.5 Pa, 依次开启钨靶和氮化铝靶开始制备 W/W-AlN/AlN 选择吸收涂层, 通过控制溅射时间控制各膜层的厚度, 通过调整钨靶的功率控制金属 W 的含量. 红外反射层、高金属吸收层、低金属吸收层和减反层的厚度分别为 100, 500, 100 和 60 nm, 高金属吸收层中 W 的含量为 0.8, 低金属吸收层中 W 的含量为 0.2.

利用 Nicolet-FT5700 红外光谱仪测试样品的中红外区域的反射率, 利用配有 5 度绝对反射附件的 HITACHI U-4100 紫外-可见-近红外分光光度计测试样品 300~2500 nm 区域的反射率曲线. 图 9 是实验所得 W/W-AlN/AlN 选择吸收涂层的反射率曲线与优化计算值的对比图. 可以看出, 实验值与优化计算值符合较好. 但实验所得膜层的反射率骤升阈值波长(约 1.5 μm)略低于优化计算值(2.5 μm), 我们认为这是由于实验所得 W/W-AlN/AlN 选择吸收涂层中各膜层间的界面不够锐利所致. 根据图 9 的反射率曲线, 计算得到吸收率和发射率的实验值和理论值, 如表 4 所示. 可见实验所得涂层的吸收率比优化计算值稍高, 但其发射率也稍高, 总之实验所得涂层的选择吸收性能与优化设计值相当, 两者符合良好.

图 9 实验所得与优化计算 W/W-AlN/AlN 选择吸收涂层的反射率曲线

表 4 实验所得与优化计算 W/W-AlN/AlN 选择吸收涂层的吸收率和发射率

Patterns	As-deposited	Optimized
α	0.93	0.92
ε	0.023	0.022

6 结论

本文选取 W-AlN 金属-介质型选择性吸收涂层为研究对象, 金属 W 作为红外反射层, W-AlN 作为吸收层, AlN 作为减反层, 利用 Mathematica 软件对该涂层的金属 W 体积分数、吸收层厚度和减反层厚度 3 个参数进行优化计算, 得到以下主要结论:

(1) 吸收层中金属 W 的体积分数对涂层的选择吸收性能有直接影响; 与高金属吸收层相比, 低金属吸收层的厚度对涂层选择吸收性能的影响较显著.

(2) 加入厚度适当的减反层可有效提高涂层的

吸收率, 但也会使发射率增加.

(3) 增加减反层和低金属吸收层厚度都会使涂层的反射率骤升阈值波长发生红移.

(4) 低/高金属吸收层中的金属 W 体积分数分别取 0.2/0.8, 低/高金属吸收层厚度分别取 $0.1\ \mu\text{m}/0.05\ \mu\text{m}$, 减反层厚度取 $0.06\ \mu\text{m}$, 此时涂层的选择吸收性能最佳, 吸收率为 0.92, 发射率为 0.022.

(5) 按照优化所得的膜层结构参数, 制备得到 W/W-AlN/AlN 选择吸收涂层, 其反射率曲线与优化计算值符合良好, 其吸收率为 0.93, 发射率为 0.23, 与优化计算值符合良好.

参考文献

- 张霖, 赵腾, 陈大鹏, 等. 太阳能选择性吸收薄膜研究进展. 真空科学与技术学报, 2013, 50: 57-62
- 郝雷, 王树茂, 蒋利军, 等. 非真空高温太阳光谱选择性吸收涂层的研制. 科学通报, 2009, 54: 251-254
- 唐晋发, 郑权. 应用薄膜光学. 第 1 版. 上海: 上海科学技术出版社, 1984. 39-42
- 黄岩彬, 殷志强, 史月艳. 太阳光谱选择性吸收表面光学性能计算. 太阳能学报, 1995, 16: 185-190
- 杨晓继, 史月艳, 殷志强. 干涉吸收型太阳光谱选择性吸收表面. 真空科学与技术学报, 1997, 17: 315-320
- 谢光明, 于凤琴. M-AlN 太阳能选择性吸收涂层的研制. 太阳能学报, 2000, 21: 15-18
- Zhang Q C, Shen Y G. High performance W-AlN cermet solar coatings designed by modeling calculations and deposited by DC magnetron sputtering. Solar Energy Mater Solar Cells, 2004, 81: 25-37
- 牛继楠, 强颖怀, 张宁. 铝-氮化铝/铝太阳选择性吸收膜的计算机优化设计. 新能源及工艺, 2006, 6: 41-45
- 丁迪, 张贵锋, 冯煜东, 等. AlN 薄膜对太阳能吸收率的研究. 太阳能学报, 2012, 1: 68-72
- 李时润. 中高温太阳能选择吸收薄膜. 长春: 长春理工大学, 2010
- 唐晋发. 光学中的固体薄膜. 第 1 版. 北京: 科学出版社, 1987. 183-185
- 丁大伟. 高温太阳能选择性吸收涂层的设计. 上海: 上海交通大学, 2008
- Kennedy C E. Review of mid- to high-temperature solar selective absorber materials. National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-520-31267, 2002
- Palik E D. Handbook of Optical Constants of Solids. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 1985. 357-368
- 申越, 史月艳. 新型太阳光谱选择性吸收涂层的热稳定性. 太阳能学报, 2002, 23: 571-574

Structural optimization and experimental verification of W-AlN high temperature solar spectrum selective absorbing coatings

ZHANG Min¹, LIANG Hui¹, ZHANG ZhiDan¹, SUO Ni² & LI PeiGang³

¹ School of Physics and Electronic Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China;

² School of Material Science & Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China;

³ Department of Physics, Center for Optoelectronics Materials and Devices, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

W-AlN metal-dielectric selective absorbing coatings were studied, in which tungsten thin film acted as the infrared reflective layer, W-AlN as the absorbing layer and AlN as the antireflective layer. The volume fraction of W, the thickness of absorbing layer and antireflective layer were optimized and calculated using Mathematica software. Optimization results show that the volume fraction of W in the absorbing layers exerts a direct influence on the selective absorbing performance of the whole W/W-AlN/AlN coatings; compared with that of the high metal volume fraction absorbing layer, the thickness of low metal volume fraction absorbing layer exerts more apparent influence on the selective absorbing performance of the W/W-AlN/AlN coatings. Optimal volume fractions of W in the low/high metal absorbing layers are 0.2/0.8, and their optimal thickness are 0.1 μm /0.05 μm , respectively. The absorptance of the optimized coating is 0.841, the emittance is 0.021. After adding the AlN antireflective layer of 0.06 μm , the absorptance increases to 0.920 and the emittance is 0.022. An antireflective layer with a appropriate thickness can effectively improve the absorptance of the coating, however, it will also make the emittance increase. The surge threshold wavelength of the reflectance will red-shift as increasing the thickness of antireflective layer and the low metal absorbing layer. The W/W-AlN/AlN selective absorbing coating was fabricated on polished stainless steel using magnetron sputtering. The thickness of absorbing layer and antireflective layer, and the W volume fraction were controlled to match the optimized results. The reflectance, absorptance and emittance of the as-deposited W/W-AlN/AlN coating agree well with the optimized results.

solar spectrum selective absorbing coating, tungsten-aluminum nitride, absorptance, reflectance, structural optimization

doi: 10.1360/N092014-00381