

· 光电探测 ·

空间目标材质偏振光谱特性规律研究(特邀)

赵元辰^{1,2,3}, 朱京平^{1,2,3,*}, 郭奉奇^{1,2,3}, 李浩翔^{1,2,3}, 侯 洵^{1,2,3}

(1. 西安交通大学电子与信息学部电子科学与工程学院, 西安;

2. 电子物理与器件教育部重点实验室, 西安; 3. 陕西省信息光子技术重点实验室, 西安)

摘 要: 针对空间目标偏振探测识别的需求, 研究了三类(保温膜、太阳能帆板、卫星涂层)六种(金色保温膜、银色保温膜、单晶硅、砷化镓、卫星涂层SR107和S781)典型空间目标材质偏振光谱反射特性。基于研制的材质偏振光谱测量装置测试结果进行分析, 揭示了空间目标材质的偏振光谱特性空间分布规律。结果表明, 光谱特性不随接收角变化, 峰值特征波长不随检偏器角度变化; 材质光谱半峰宽、特征波长以及保偏和消偏特性不随入射角变化, 但不同入射角处光谱特征峰的峰值不同。文中研究对空间目标偏振探测具有重要的指导意义。

关键词: 偏振光谱特性; 空间材料; 双向反射分布函数

中图分类号: O433

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2022)-05-0044-07

Study of Polarization Spectral Characteristics of Space Target Material (Invited)

ZHAO Yuanchen^{1,2,3}, ZHU Jingping^{1,2,3,*}, GUO Fengqi^{1,2,3}, LI Haoxiang^{1,2,3}, HOU Xun^{1,2,3}

(1. School of Electronic Science and Engineering, Faculty of Electronic and Information Engineering,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China;

2. Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China;

3. Shaanxi Key Lab of Information Photonic Technique, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China)

Abstract: According to the requirements of polarization detection and recognition for space targets, the polarization spectral reflection characteristics of six typical space target materials such as gold insulating film, silver insulating film, monocrystalline silicon, gallium arsenide, satellite coatings SR107 and S781 are investigated. The testing results of material polarization spectrum are analyzed, and the spatial distribution of polarization spectrum characteristics of space target is disclosed. The results show that the spectral characteristics don't change with the detection angle, the spectral peak doesn't change with the polarization analyzer angle. The half-peak width, characteristic wavelength, polarization retaining and depolarization properties of the materials don't change with the incidence angle, but the values of characteristic spectral peak at different incidence angles are different. The work may provide guidance for polarization detection of space targets.

Key words: polarization spectral reflection characteristics; space material; bidirectional reflection distribution function

由于偏振光谱探测可以克服恶劣的天气影响, 高保真地还原材料的原始形貌, 同时抑制背景噪声、提高探测距离, 因而被广泛地运用于医疗诊断^[1]、军事探测^[2]、农业林业^[3]、海洋生态^[4]等领域。自 20 世纪 70 年代以来, 国外的科学家们开始对不同材料表

面的偏振特性展开研究, 做了大量实验, 研究材料表面偏振光散射产生的原理。SPOSATO 等人设计实验测量了一些材料表面的特征偏振光谱, 包括锈蚀的钢板、表面覆盖黑漆的铝板和表面光滑玻璃片等, 发现偏振光谱是不同材料表面的独有特征, 可

收稿日期: 2022-10-14

基金项目: 国家自然科学基金重大课题(61890961); 国家重大科研仪器研制项目(62127813)

以用来反映不同目标的表面特性,实现不同目标间的区分^[5]。WOLFF等人也设计实验通过散射光的偏振度进行目标表面的分类,主要方法是保持散射方向辐射强度的极大值和极小值不变,利用二者的比值粗略地计算散射光的偏振度^[6]。RICHARD利用轮廓图对偏振双向反射分布函数(polarimetric bidirectional reflection distribution function, pBRDF)进行分析,得到了穆勒矩阵 $m_{00}, m_{02}, m_{22}, m_{33}$ 四个分量等值线图,提取了偏振散射的关键特征^[7]。

我国对偏振光散射技术的研究整体上还处在初期阶段。福建师范大学基于数值模拟分析的方法,分析研究了影响目标表面后向散射 Mueller 矩阵的因素^[8],浙江大学陈远等人对材料表面的后向扩散散射过程进行了全面分析,在多散射理论和双散射理论的基础上,建立了目标表面后向扩散散射的物理模型^[9]。曲阜师范大学设计了一套可以实现对光束偏振态进行智能测试的系统,可以快速地测量光束 Stokes 矢量,便于对目标偏振特性进行分析^[10]。李雅男等人研究了空间目标的光学偏振成像特性^[11],高明、宋冲等人建立 pBRDF 模型分析了粗糙面的偏振散射特性,并基于微面元理论推导了散射光的 Stokes 矢量^[12]。刘庆等人研究了在 P-G 模型的基础上,非光滑表面的偏振激光回波的特性^[13]。

基于自主建立的多维度光学特性测试系统,测试分析了6种典型空间目标材质偏振反射光谱图、双向反射分布函数(bidirectional reflection distribution function, BRDF)三维图、Stokes 矢量图和线偏振度(degree of linear polarization, DOLP)图、结合粗糙度、折射率等光学特性参量,揭示了空间目标材料的偏振光谱反射特性规律。

1 偏振反射特性基本参量

表示光波的偏振态的主要方法包括 Stokes 矢量法、琼斯矢量法、邦加球图示法、三角函数法等^[14]。其中,Stokes 矢量法是 1852 年 Stokes 提出的采用四个参量来表述光强和光波的偏振态^[15-16]的偏振态表示方法,定义为

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2I_1 \\ 2I_2 - 2I_1 \\ 2I_3 - 2I_1 \\ 2I_4 - 2I_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

线偏振度表示光波中线偏振光分量在总光强

中的占比,定义式为

$$\text{DOLP} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \quad (2)$$

BRDF 表述光波沿某一方向入射到物体表面,经过反射后能量在上半球空间的分布状况^[17],如图 1 所示。

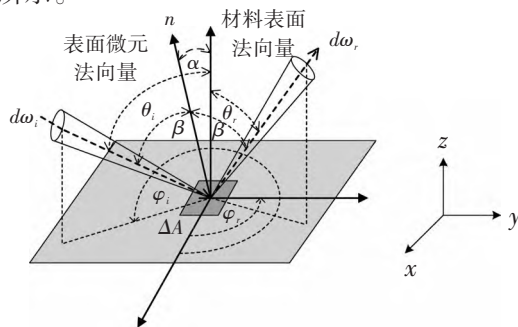


图1 双向反射分布函数 BRDF 示意图

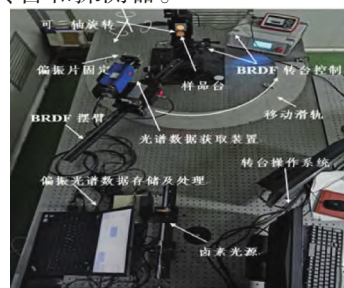
BRDF 定义式为

$$f_r(\theta_r, \theta_i, \Phi, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_r, \theta_i, \lambda)}{dE_i(\theta_r, \theta_i)} \quad (3)$$

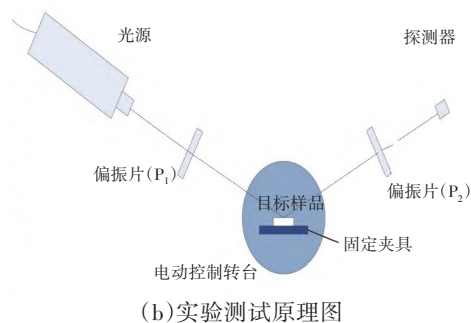
其中, dL_r 为沿着出射方向出射的辐亮度; dE_i 为沿着入射方向入射到材料表面的辐照度。

2 实验测量装置

实验在暗室中进行,搭建如图 2(a)所示的实验装置,主要由三个部分构成,如图 2(b)所示,分别是光源,样品转台和探测器。



(a) 实验装置图



(b) 实验测试原理图

图2 实验装置图及实验测试原理图

实验测试了金色保温包覆膜、银色保温包覆膜、SR107卫星涂层、S781卫星涂层、单晶硅和砷化镓这三类6种典型空间样品和一个标准白板的偏振反射特性光谱。

测试包括4种入射偏振状态: 0° , 45° , 90° , 135° , 4种反射偏振状态: 0° , 45° , 90° , 135° , 入射与反射偏振排列组合, 每个样品共测量16种偏振状态。每一种偏振状态下, 再改变光束的入射角(0° , 10° , 20° , 30° , 40° , 50° , 60°), 记录每个入射角下不同反射角($-81^\circ \sim 81^\circ$ 以 3° 为步长测量)的偏振反射光谱。

需要注意的是, 当探测器旋转到光源和样品台中间时, 会存在遮蔽阴影, 影响样品表面的光反射

强度, 所以对存在遮蔽的光谱不予计量, 在下文中称为“共线遮蔽效应”。

3 数据处理分析

3.1 目标材质偏振反射光谱测量结果分析

图3为同一样品在固定的入射条件下(即入射角和入射偏振角固定不变), 镜面角反射的光谱测试结果。其中, 横坐标为波长, 纵坐标为光强值; 每类样品选取一种材质做为代表, 分别是银色保温包覆层、卫星涂层SR107和单晶硅; 入射角选取反射效果好且镜面角离共线遮蔽角度较远的 40° ; 入射偏振角取 0° 。

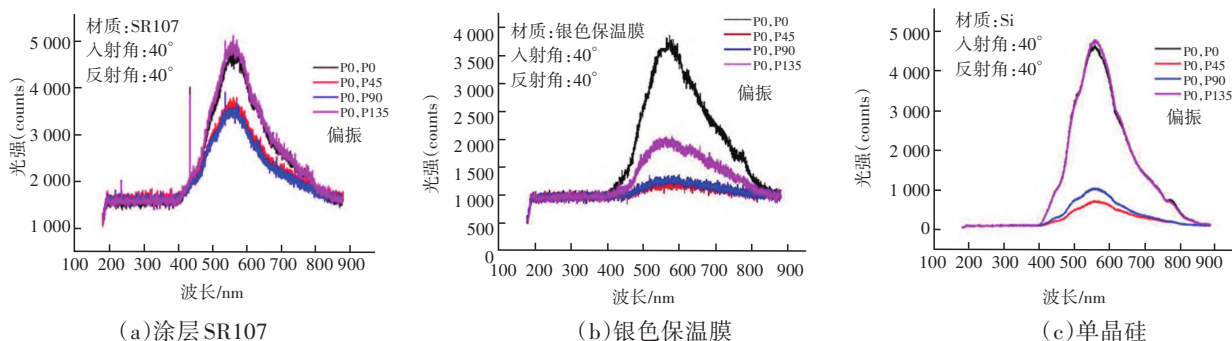


图3 入射状态固定时,在镜面角 40° 处相同入射偏振不同反射偏振状态下的光谱图

比较 0° , 45° , 90° , 135° 反射偏振状态下的光谱差异, 可见, 在波长 $500 \sim 600 \text{ nm}$ 时反射达到峰值, 且偏振反射角的改变不会改变光谱的形状, 只会改变光谱的峰值, 即光强。在入射偏振角为 0° 时, 反射偏振角为 0° 或 135° 时, 反射光谱的光强最大, 90° 时反射光谱光强最小, 证实了光谱是物质的固有属性, 不会随着偏振状态的改变发生变化。

根据上文结论在入射偏振和反射偏振角都为 0° 时光谱的反射光强最大。为分析反射角对偏振反射光谱的影响规律, 取入射角 30° 、入射和反射偏振状态都为 0° 时的结果得到图4。其中横坐标是波长, 纵坐标是光强值。

不同样品的粗糙度不同, 所选取的反射角也不同。卫星涂层的粗糙度较大, 反射角选取较为均匀, 在测量时反射角范围为 $-81^\circ \sim 81^\circ$, 每 3° 记录一组光谱数据, 单独记录镜面反射角的光谱; 绘制光谱曲线图时选用的反射角也较为均匀, 分别为 -81° , -69° , -57° , -45° , -18° , -6° , 6° , 18° , 30° , 42° ,

54° , 66° , 78° 。由图4(a)和图4(b)可见: 涂层几乎在全部反射角范围内都能探测到反射光谱, 镜面角 30° 时反射光谱的光强最大, 离镜面角越远光强越小, 但变化较缓, 漫反射效应非常明显。涂层SR107的粗糙度大于S781, 所以漫反射效应更明显, 在反射角全范围内均可探测到光谱; 而涂层S781在反射角小于 -15° , 大于 66° 的范围内光谱响应很弱, 探测到的基本上是环境噪声。

保温包覆层的粗糙度相对较小, 镜面反射效应增强, 反射光谱在不同反射角上分布范围较广, 测量时反射角范围选取 $-81^\circ \sim 81^\circ$, 每 3° 记录一组数据。做图时选择更多镜面角附近的数据, 分别是 -81° , -45° , -15° , 6° , 18° , 24° , 27° , 30° , 33° , 39° , 45° , 66° , 81° 。如图4(c)和图4(d)所示, 图像呈现出镜面反射的特点, 在反射角为 33° 时光谱强度出现最大值, 离镜面角 30° 很近, 离开镜面角后光谱很快消失。

单晶硅和砷化镓材质表面更为光滑, 镜面反射

效应更明显,由图4(e)和图4(f)可见,反射光谱几乎只分布在镜面反射角附近,选取测量反射角范围为 $-80^{\circ}\sim 80^{\circ}$,在镜面角 $\pm 6^{\circ}$ 范围内每 1° 一测,之外每

3° 一测,更远时每 5° 一测。做图选用反射角 $-80^{\circ}, -50^{\circ}, 0^{\circ}, 20^{\circ}, 26^{\circ}, 28^{\circ}, 30^{\circ}, 32^{\circ}, 34^{\circ}, 40^{\circ}, 44^{\circ}, 60^{\circ}, 80^{\circ}$ 。

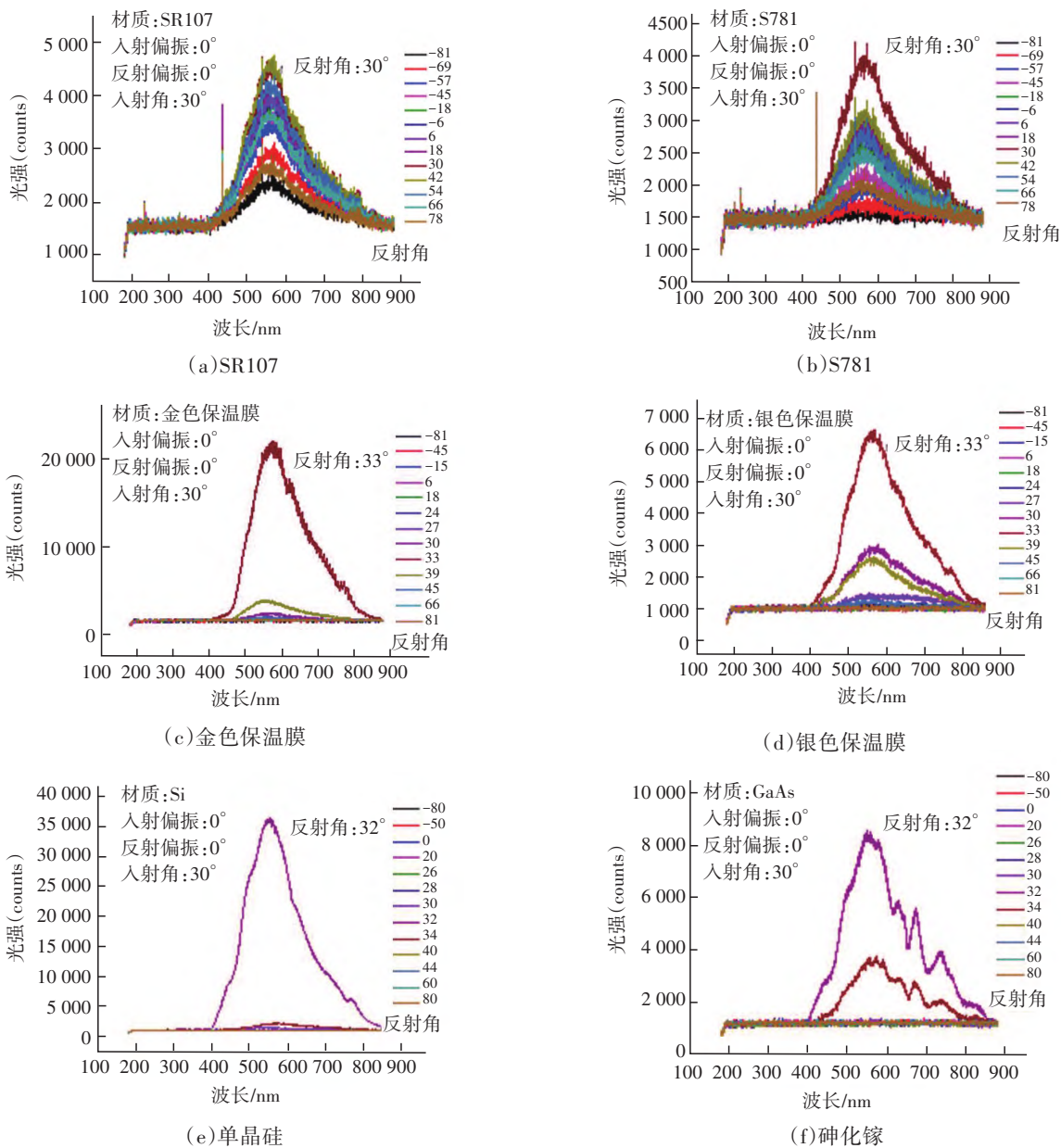


图4 不同材料在入射角 30° 处不同反射角的光谱

3.2 BRDF 特性

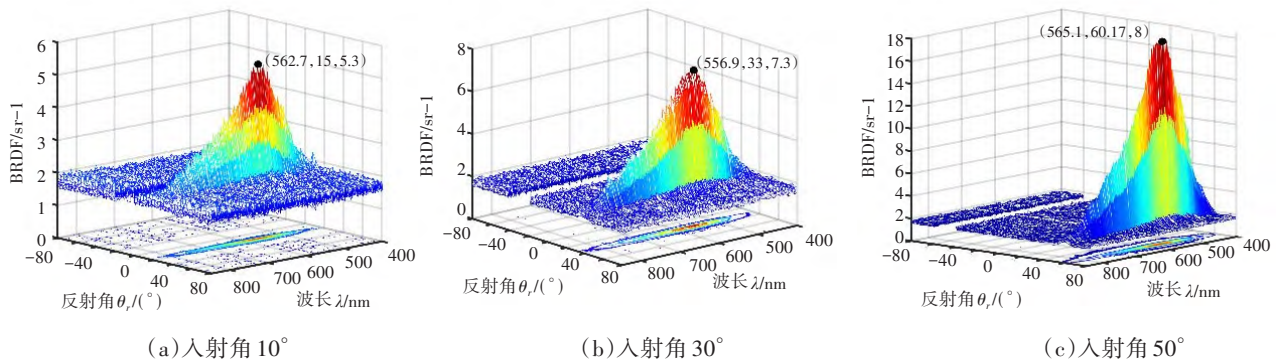
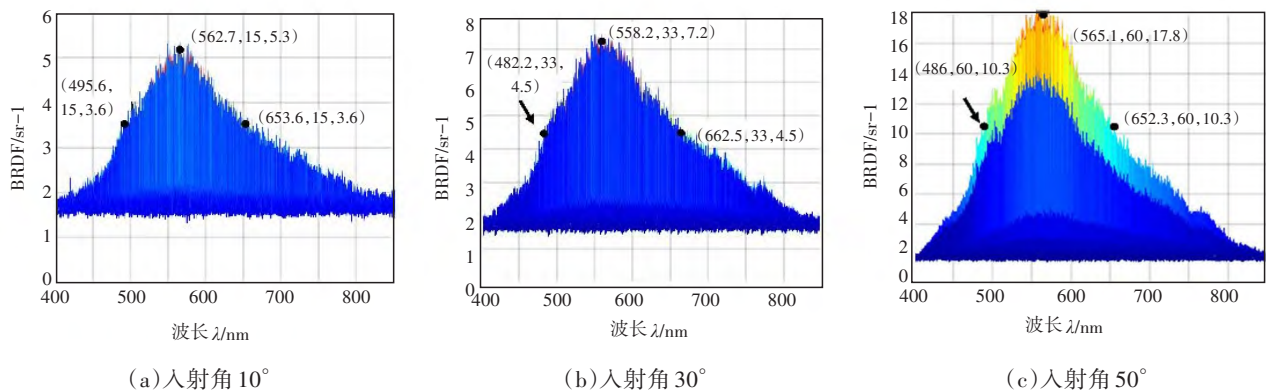
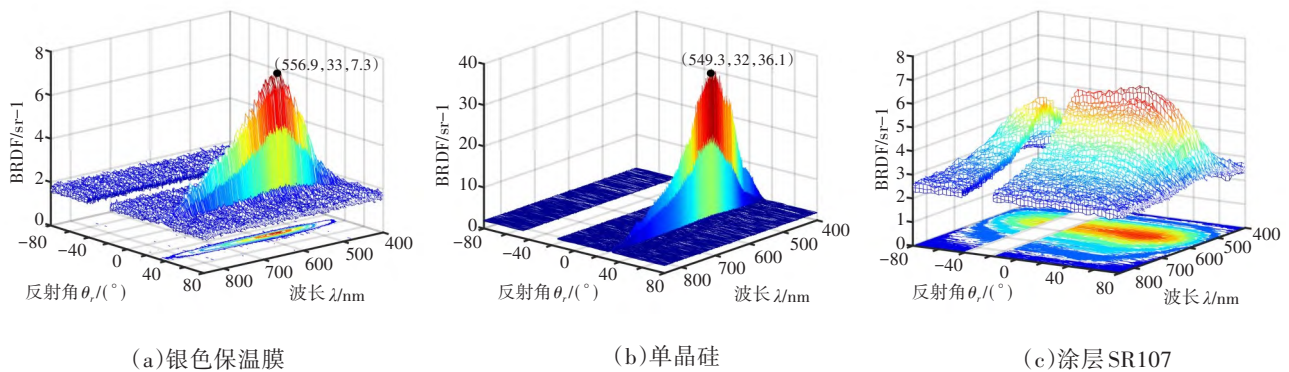
BRDF是表征反射特征的函数,反映了光线在物体表面反射后在上半球的能量分布,与偏振无关。图5为入射偏振角为 45° 时银色保温膜的BRDF图。其中X轴为光谱波长,Y轴为反射角,Z轴为BRDF值,数据的空缺是由于共线遮蔽效应造成的。

为了更加直观的反映材料BRDF值的光谱规

律,抽取了固定反射角时银色保温膜的BRDF图,如图6所示,分别取入射角 $10^{\circ}, 30^{\circ}, 60^{\circ}$ 。

可见,有效数据分布较为集中,位于镜面角前后 15° 左右的范围内。BRDF的值随着入射角增大依次递增;半峰宽对应的波长范围在 $480\sim 660\text{ nm}$ 之间,特征波长在 560 nm 左右,随入射角的变化甚微,证明特征谱是材料的固有属性,与入射因素无关。

相同条件下不同材料的BRDF图如图7所示。

图5 银色保温膜在入射偏振角为 45° 时的 BRDF图6 银色保温膜在入射偏振角为 45° , 固定反射角时的 BRDF图7 不同材料在入射偏振角为 45° , 入射角 30° 时的 BRDF 图

可以看出,不同类型的材料 BRDF 图的分布不同,材料越光滑, BRDF 图的峰值越尖锐,反之亦反。

3.3 材料的保偏消偏特性

保偏和消偏性能是偏振成像的重要指标。保偏性能良好的材料反射光的偏振态与入射偏振态相同或差别不大,而消偏则会使另一偏振方向的光波在反射中占优。由于偏振是材料的固有属性,与外界因素无关,所以文中基于某一样品选取同一入

射角下 Stokes 矢量的 S_1 和 S_2 分量来分析保偏和消偏特性。

银色保温膜的分析结果如表1所示。入射偏振角 0° 时, S_1 分量为正,反射后 0° 偏振分量占优势;入射偏振角 45° 时, S_2 分量为正,反射后 45° 偏振分量占优势;入射偏振角 90° 时, S_1 分量为负,反射后还是 90° 偏振分量占优;入射偏振角 135° 时, S_2 分量为负值,反射后 135° 偏振分量占优势。综上所述,银色保温膜的保偏性能良好,在四种偏振状态下的反射光波都能保留与入射偏振角相同的偏振态。

表1 银色保温膜Stokes矢量分析表

入射偏振角/(°)	Stokes矢量	反射后占优的偏振/(°)	保偏和消偏性能
0	S_1 为正	0	保偏性能良好
45	S_2 为正	45	保偏性能良好
90	S_1 为负	90	保偏性能良好
135	S_2 为负	135	保偏性能良好

金色保温膜,单晶硅和砷化镓矢量图的结果与银色保温膜类似,不再列举。

SR107结果如表2。入射偏振角0°时, S_1 分量为正值,反射后仍是0°偏振分量占优;入射偏振角45°时, S_2 分量有正有负,存在消偏;入射偏振角90°时, S_1 分量有正有负,存在消偏;入射偏振角135°时, S_2 分量为负,反射后135°偏振分量占优。图中个别数据突变是数据记录时噪声导致,并非有效数据。

表2 涂层SR107的Stokes矢量分析表

入射偏振角/(°)	Stokes矢量	反射后占优的偏振态/(°)	保偏和消偏性能
0	S_1 为正	0	保偏性能良好
45	S_2 有正有负	45	存在消偏
90	S_1 有正有负	90	存在消偏
135	S_2 为负	135	保偏性能良好

S781结果如表3。入射偏振角0°时, S_1 分量为正值,反射后0°偏振分量仍占优;入射偏振角45°

时, S_2 分量有正有负,存在消偏;入射偏振角90°时, S_1 分量为正值,反射后还为90°偏振分量占优;入射偏振角为135°时, S_2 分量有正有负,存在消偏。

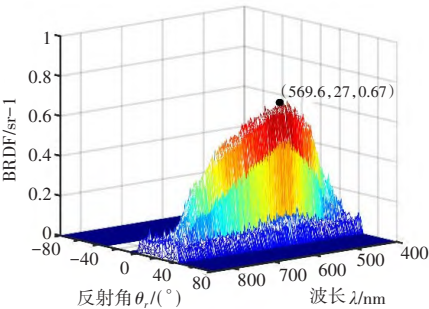
表3 涂层S781的Stokes矢量分析表

入射偏振角/(°)	Stokes矢量	反射后占优的偏振/(°)	保偏和消偏性能
0	S_1 为正	0	保偏性能良好
45	S_2 有正有负	45	存在消偏
90	S_1 为负	90	保偏性能良好
135	S_2 有正有负	135	存在消偏

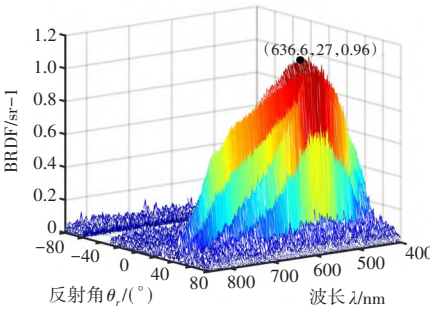
3.4 DOLP图分析

本节讨论基于材料线偏振度DOLP的材料分类。

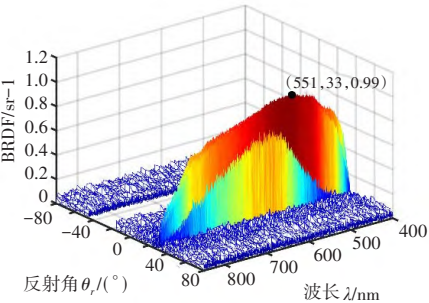
DOLP与入射角无关。由图8可见,非涂层材料的DOLP只有在镜面反射角附近取值较大,而涂层则在较大反射角范围内取值均有效,基于此可将涂层材料与其他材料分开;与保温包覆层相比,太阳能帆板材料单晶硅、砷化镓的DOLP峰值更接近1,而银色保温膜的DOLP约为0.67,就此可区分太阳能帆板材料和保温包覆层。图9是六种不同空间目标材质的DOLP直方图。可以看到,涂层峰值处的DOLP值约在0.3左右,太阳能帆板材料的DOLP值几乎为1,而保温包覆层的DOLP值处于二者之间。



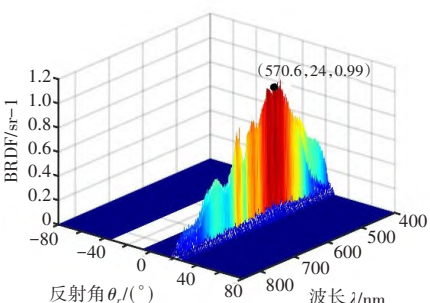
(a)入射角30°下银色保温膜



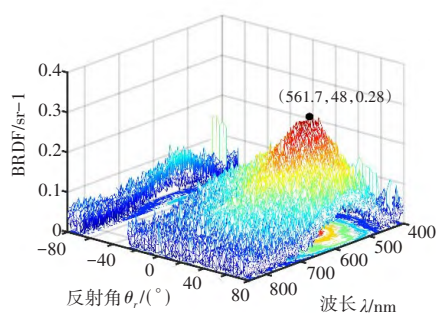
(b)入射角30°下金色保温膜



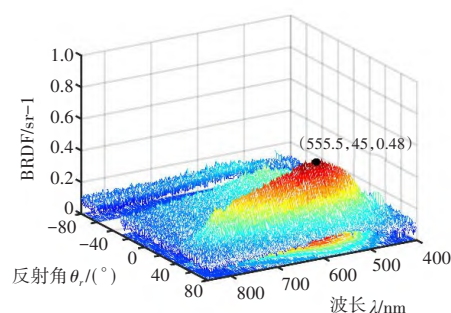
(c)入射角30°下单晶硅



(d)入射角30°下砷化镓



(e) 入射角 40°下 SR107



(f) 入射角 40°下 S781

图8 不同材料的DOLP图

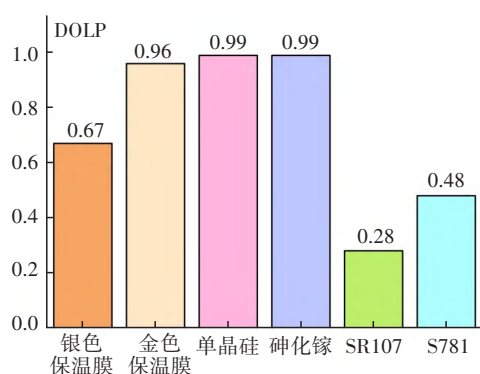


图9 六种空间目标材质DOLP图

4 结论

基于目标材质偏振反射光谱实验数据,通过对三类(保温层、涂料、太阳能帆板)六种典型空间材料的偏振特性和反射特性分析,得出结论:(1)镜面反射效应与材料的粗糙度有关,涂层材料几乎在全部反射角范围内都可探测到反射光谱,且镜面角时光谱强度最大,且随着与镜面角的偏离缓慢变小,漫反射效应非常明显;保温包覆层的粗糙度影响相对较小,镜面反射效应逐渐加强;太阳能帆板材料(单晶硅和砷化镓)表面最为光滑,镜面反射效应明显,只有在镜面角附近反射光谱才有取值;反射偏振角改变会影响光谱强度的变化,但不影响光谱出现峰值的特征波长;镜面反射角对偏振度的改变最为敏感。BRDF图的峰值会随着入射角增大而递增,但是入射角的改变不影响光谱半峰宽和特征波长。

不同类型的材料BRDF图的分布不同,材料越光滑,BRDF图的峰值越尖锐。通过分析Stokes矢量图,入射角对材料的保偏和消偏特性无明显影响,太阳能帆板材料和银色保温膜的保偏性能良

好,金色保温膜和涂层材料存在不同程度的消偏。BRDF图是对总光强的描述,与偏振状态无关,基于DOLP图可实现对三类六种典型空间碎片进行分类,为空间目标材料分类识别提供特征参量选择。

参考文献

- [1] 李霓,韩江雪,姜新海,等. 利用荧光偏振方法的IDOL/LDLR蛋白相互作用评价体系的建立[J]. 中国医药生物技术,2022,17(2):97-103.
- [2] 段锦,付强,莫春和,等. 国外偏振成像军事应用的研究进展(上)[J]. 红外技术,2014,36(3):190-195.
- [3] 王战辉,张素霞,沈建忠,等. 荧光偏振免疫分析在农药和兽药残留检测中的研究进展[J]. 光谱学与光谱分析,2007,27(11):8.
- [4] 王晓彬,赵泓楷,周雨迪,等. 偏振海洋激光雷达探测黄海水母特性[J]. 红外与激光工程,2021,50(6):122-128.
- [5] SPOSATO S H, FETROW M P, BISHOP K P, et al. Two long-wave infrared spectral polarimeters for use in understanding polarization phenomenology[J]. Optical Engineering,2002,41(5):1055-1064.
- [6] WOLFF L B. Polarization-based material classification from specular reflection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis&Machine Intelligence, 1990, 12(12): 1059-1071.
- [7] GHOSH A, CHEN T, PEERS P, et al. Circularly polarized spherical illumination reflectometry[J]. Acm Transactions on Graphics, 2010, 29(6):162-173.
- [8] 徐兰青. 后向散射Mueller矩阵数值模拟及实验方法在散射介质光学特性识别中的应用[D]. 福州:福建师范大学,2005.
- [9] 陈远,王凌,冯华君,等. 高散射介质后向扩散散射实验的图像预处理[J]. 光电子·激光,2005,16(11):1373-1377.

(下转第61页)

- fier neural networks[C]//Proceedings of the Fourteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics, 2011: 315-323.
- [31] HU H F, LIN Y, LI X B, et al. IPLNet: a neural network for intensity-polarization imaging in low light[J]. Optics Letters, 2020, 45(22): 6162-6165.
- [32] CHEN C, CHEN Q F, XU J, et al. Learning to see in the dark[J]. 2018 IEEE/Cvf Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Cvpr), 2018: 3291-3300.
- [33] BG A, AD B, SA A, et al. Image denoising review: from classical to state-of-the-art approaches[J]. Information Fusion, 2020(55): 220-244.
- [34] ANWAR S, BARNES N. Real image denoising with feature attention[C]//2019 IEEE/Cvf International Conference on Computer Vision (Iccv 2019), 2019: 3155-3164.
- [35] TIAN C W, XU Y, LI Z Y, et al. Attention-guided CNN for image denoising[J]. Neural Networks, 2020(124): 117-129.
- [36] WANG F, JIANG M, QIAN C, et al. Residual attention network for image classification[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017: 3156-3164.
- [37] WOO S H, PARK J, LEE J Y, et al. CBAM: convolutional block attention module[J]. Computer Vision-Eccv 2018, Pt Vii, 2018(11211): 3-19.
- [38] LIU H D, ZHANG Y Z, CHENG Z Z, et al. Attention-based neural network for polarimetric image denoising[J]. Optics Letters, 2022, 47(11): 2726-2729.
- [39] JI S, XU W, YANG M, et al. 3D convolutional neural networks for human action recognition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2013, 35(1): 221-231.
- [40] HU J, SHEN L, SUN G. Squeeze-and-excitation networks[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 7132-7141.
- [41] JOHNSON J, ALAHI A, LI F F. Perceptual losses for real-time style transfer and super-resolution[J]. Computer Vision-Eccv 2016, Pt Ii, 2016(9906): 694-711.
- [42] AWAN M J, MASOOD O A, MOHAMMED M A, et al. Image-based malware classification using VGG19 network and spatial convolutional attention[J]. Electronics, 2021, 10(19): 2444.

(上接第50页)

- [10] 冯伟伟. 光束偏振态的斯托克斯参量及偏振度的智能化测量[D]. 济宁: 曲阜师范大学, 2004.
- [11] 李雅男, 孙晓兵, 乔延利, 等. 空间目标的光学偏振特性研究[J]. 光电工程, 2010, 37(7): 24-29.
- [12] 高明, 宋冲, 巩蕾. 基于偏振双向反射分布函数的粗糙面光散射偏振特性研究[J]. 中国激光, 2013(12): 225-230.
- [13] LIU Q, ZHAN Y H, YANG D, et al. Parameters inverting of polarized bidirectional reflectance distribution function model for target rough surface[J]. Proc SPIE, The International Society for Optical Engineering, 2014(9299): 92990W-92990W-6.
- [14] 张磊. 典型空间材料偏振散射特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [15] NICODEMUS F E. Directional reflectance and emissivity of an opaque surface[J]. Applied Optics, 1965, 4(7): 767-773.
- [16] LUCHT W, SCHAAF C B, STRAHLER A H. An algorithm for the retrieval of albedo from space using semiempirical BRDF models[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(2): 977-998.
- [17] van der LAAN J D, SCRYMGEOUR D A, KEMME S A, et al. Detection range enhancement using circularly polarized light in scattering environments for infrared wavelengths[J]. Applied Optics, 2015, 54(9): 5464-5473.