

# 典型卫星表面材质的近红外干涉光谱反演

徐 融<sup>1</sup>, 梁奕瑾<sup>1</sup>, 杨海龙<sup>1</sup>, 祝 竺<sup>1</sup>, 赵 飞<sup>2</sup>

(1. 上海卫星工程研究所, 上海 201109; 2. 中国科学院 空天信息创新研究院, 北京 100094)

**摘 要:** 为研究空间碎片表面材料发生镜面反射时的光谱特征, 采用光纤光谱仪联合高精度测角光度计, 测量了 4 种典型空间碎片材质在多种入射角下的可见-短波红外光谱反射率, 发现三结砷化镓电池片和聚酰亚胺包覆膜的镜面反射光谱在近红外波段(1 000~1 800 nm)出现了明显的等倾干涉光谱条纹。进一步分析表明, 该光谱条纹由空间材质本身的多层工艺结构特性引起, 并运用相关分析法建模计算求得砷化镓层厚度为 5.518 9  $\mu\text{m}$ , 近红外折射率为 3.472 4; 聚酰亚胺层厚度为 24.210 6  $\mu\text{m}$ , 近红外折射率为 1.707 4, 反演结果与材质标称参数相符。实验结果表明: 近红外波段镜面反射光谱特征可用于多层结构的碎片材质的厚度、折射率等工艺特性反演, 该方法可为卫星材质精细辨识提供新的研究思路。

**关键词:** 光谱分析; 空间碎片; 近红外; 镜面反射; 等倾干涉

**中图分类号:** O 433.4

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.05.009

## Characterization of Typical Satellite Surface Material Using Near-Infrared Interference Spectra

XU Rong<sup>1</sup>, LIANG Yijin<sup>1</sup>, YANG Hailong<sup>1</sup>, ZHU Zhu<sup>1</sup>, ZHAO Fei<sup>2</sup>

(1. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China;

2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

**Abstract:** To study the spectral characteristics of space debris surface materials when specular reflection occurs, the visible to shortwave-infrared spectral reflectance of four typical space debris materials at various incident angles is measured with a high-precision goniometer and a fiber optic spectrometer. It is found that the specular reflection spectra of the gallium arsenide (GaAs) cell and the polyimide coating film show significant isoclinic interference spectrum fringes in the near-infrared band (from 1 000 nm to 1 800 nm), which is probably caused by the multi-layer structure of the materials. A model is established and calculated for further analysis by using correlation methods. The results show that the thickness of the GaAs layer is 5.518 9  $\mu\text{m}$  with near-infrared refractive index of 3.472 4, and the thickness of the polyimide layer is 24.210 6  $\mu\text{m}$  with near-infrared refractive index of 1.707 4, which are consistent with the nominal characteristics of the materials. The experimental results indicate that the near-infrared reflectance spectral characteristics can be used to retrieve the process characteristics of multi-layer space debris materials such as thickness and refractive index. The methods used in this article may be applicable to the fine identification of space debris materials.

**Key words:** spectral analysis; space debris; near-infrared; specular reflection; equal inclination interference

## 0 引言

随着人类航天活动日益频繁, 地球轨道空间碎片数量与日俱增, 航天资产的安全面临严重威胁<sup>[1]</sup>。

远距离探测识别空间碎片的材质、类型、尺寸, 并在轨道编目的基础上进行光学特征编目, 可为卫星防护、在轨服务、碎片清除等任务提供参考依据。由

收稿日期: 2021-06-09; 修回日期: 2021-09-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41974034)

作者简介: 徐 融(1991—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为空间目标探测识别、航天器信息处理与自主任务规划等。

于空间碎片探测距离远、体积小、观测几何条件变化大,基于空间点目标光度光谱特性的探测识别是目前较为可行的手段<sup>[2-3]</sup>。

空间碎片本身不发光,其亮度来自于表面材质反射的太阳光。对空间碎片进行光谱观测,其本质是获取目标反射的太阳光谱,测量光谱受目标的光照-探测几何关系及表面材质的组成、结构、角度、混合比率等多种因素影响<sup>[4]</sup>。通过测量碎片的可见光谱,结合已知的材质光谱双向反射分布函数(Bi-directional Reflectance Distribution Function, BRDF)数据库,可在一定程度上反演碎片材质类型和组成<sup>[5]</sup>。然而,反演效果一方面受限于光谱测量精度和定标精度,另一方面受限于数据库的完备性和准确性,使得反演结果存在较大的不确定性<sup>[6]</sup>。另外,典型碎片表面材质(如太阳能电池板、聚酰亚胺包覆膜、铝材等)都表现出明显的镜面反射特性。在空间中太阳光单一光源的照射下,由于表面材质的结构、组成和角度的不同,在空间碎片的光度光谱观测数据中呈现出大量激烈变化的突变和尖峰,更对基于光谱强度线性混合模型的光谱反演造成了困难<sup>[7-8]</sup>。

当空间碎片发生镜面反射时,其反射光能量通常由单一或少量材质部件主导,使其材质本身的光谱特征得以凸显出来<sup>[9]</sup>。单一材质的光谱特征的峰-谷特性反映了其本征吸收-辐射特征,其出现的波长位置不受光谱强度幅值变化影响,如铝材、太阳能电池片的光谱吸收特性<sup>[10]</sup>。由于发生镜面反

射时,单一部件的亮度可在整体光度中占据很大比重,通过测量空间碎片的镜面反射光谱,可以有效判别相关部件材质特性<sup>[11-12]</sup>。

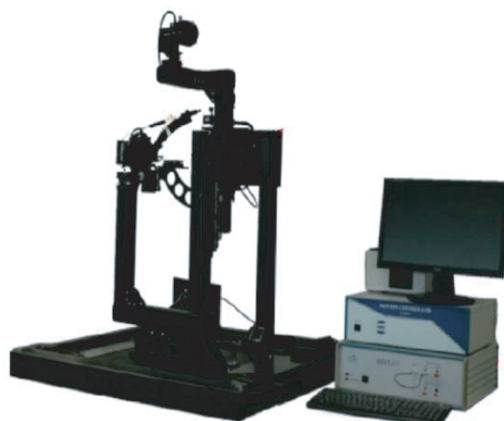
进一步利用镜面反射时太阳、空间碎片、探测器之间的相对位置关系,可以推断该材质部件表面的法线指向,推断整体姿态<sup>[13]</sup>。因此,研究空间碎片发生镜面反射时的光谱特性,对空间碎片材质的精细辨识具有重要意义。

## 1 碎片材质样片镜面反射光谱测量实验设计

由于空间碎片表面材质的镜面反射特性对角度变化敏感,对其镜面反射光谱进行有效测量的关键是确定其精确的光照-探测几何角度,因此,需要高精度电控旋转系统以实现光源入射角和探测角度的精密控制。Reflet 180S是法国Light-Tec公司开发的材料光谱散射特性测量设备,光源及探测器角度控制精度可达 $0.01^\circ$ ,可以高效地自动化测量材料样片的可见光和近红外BRDF。为了获取空间碎片材质样片更精细的多角度光谱特性,本次实验中采用了ASD公司的FieldSpec3光纤光谱仪取代了其原有的可见光光谱探测器,结合其系统原有的准直卤钨灯光源,可测量材质样片的可见-短波红外光谱。仪器改装后,测量谱段可拓展至 $350\sim 2\,500\text{ nm}$ ,光谱分辨率分别可达 $3\text{ nm}@700\text{ nm}$ 、 $8\text{ nm}@1\,400/2\,100\text{ nm}$ ,测量设备如图1所示,实验中所用仪器及物品参数见表1。



(a) ASD FS3光纤光谱图



(b) Reflet 180S测角光度计

图1 光谱散射特性测量仪器

Fig.1 Instruments for spectral BRDF measurement

表 1 实验仪器及用品

Tab.1 Instruments and materials for the experiment

| 序号 | 实验仪器及用品              | 参数                                                      |
|----|----------------------|---------------------------------------------------------|
| 1  | ASD FieldSpec3 光纤光谱仪 | 波长范围:350~2 500 nm;光谱分辨率:3 nm@700 nm,8 nm@1 400/2 100 nm |
| 2  | Reflet 180S 测角光度计    | 角度控制精度:0.01°                                            |
| 3  | 典型空间碎片材质样片           | 三结砷化镓电池片、硅电池片、导电型聚酰亚胺镀铝二次表面镜                            |
| 4  | 标准平面反射镜              | 反射率>99% (波长范围:350~2 500 nm)                             |

实验选取了 3 种具备镜面反射特性的典型空间碎片材质样片:三结砷化镓电池片、硅电池片、导电型聚酰亚胺镀铝二次表面镜(聚酰亚胺包覆膜),其中聚酰亚胺包覆膜的金色聚酰亚胺面和银色镀铝面作为 2 种材质考虑,以下称金色面为聚酰亚胺包覆膜(正面),银色面为聚酰亚胺包覆膜(背面)。

首先,实验采用逐点测量的方式,测量了 2°~70° 共计 8 个角度入射光条件下 4 种空间碎片材料的镜面反射光谱;然后,对于三结砷化镓电池片和聚酰亚胺包覆膜(正面)2 种材料,还测量了 30° 入射角条件下镜面反射方向附近小角度范围内的散射光谱(镜面反射方向±4°,以 1°为间隔),实验原理如图 2 所示。

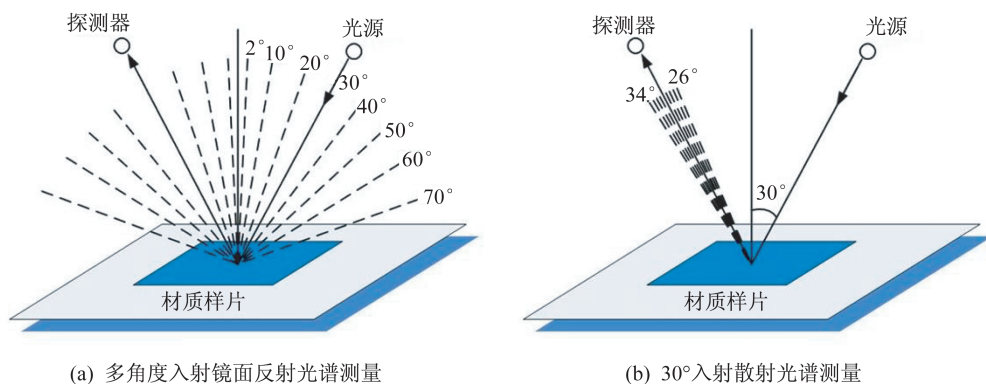


图 2 实验示意图

Fig.2 Experimental diagram

由于待测样片类型都是镜面反射特性较强的材质,为了避免因仪器灵敏度不足导致的量化误差,没有采用标准朗伯体白板用于定标,而是同时测量了标准平面反射镜在每个测量角度下的镜面反射光谱作为光源光谱能量标定。平面反射镜在测量谱段内的光谱反射率可近似为 1,两组实验测量流程如图 3 所示。

## 2 实验结果分析

### 2.1 多角度镜反光谱测量实验结果

多角度镜面反射光谱测量实验中获得了 8 组入射角下 4 种典型材料的镜面反射光谱数据。原始数据经本底去除后,与同入射角下的平面反射镜的镜面反射光谱数据相除,可得到材料样片的多角度光谱反射率数据。以 60°入射角为例,4 种材料样片的

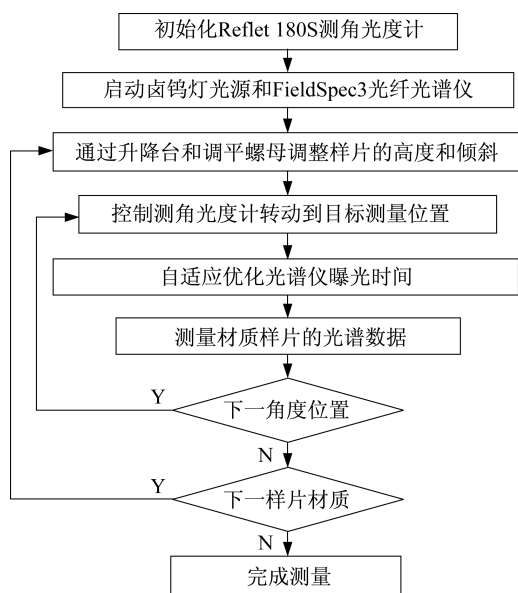


图 3 光谱测量实验流程

Fig.3 Experimental procedures for spectral measurement

镜面反射方向光谱反射率如图 4 所示(图中取 400~

1 800 nm 可见-近红外谱段数据作为展示)。

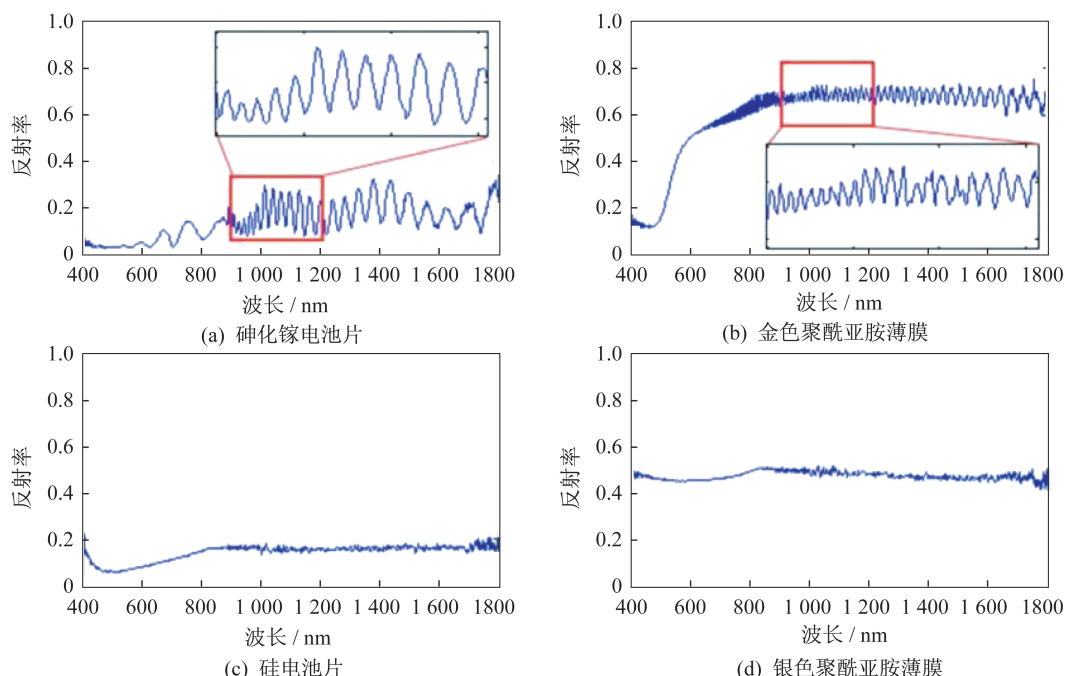


图 4 60°入射角时 4 种材料的镜面反射光谱反射率

Fig.4 Spectral reflectance of 4 materials at the incident angle of 60°

由实验数据可知,在不同入射角条件下,三结砷化镓电池片和聚酰亚胺包覆膜(正面)的镜面反射光谱都出现了如图 4 所示的类周期性光谱条纹特征。两者光谱条纹出现的起始位置不同:砷化镓电池片光谱条纹在 850 nm 左右开始,而聚酰亚胺包覆膜(正面)出现在 650 nm 左右。但是,硅电池片和聚酰亚胺包覆膜(背面)的镜反光谱数据中并未出现该震荡特征。

经分析,这种类周期性的光谱条纹特征并非源自碎片材质单质分子的固有光谱反射-吸收特

性,而是由于砷化镓电池片和聚酰亚胺包覆膜这 2 种材料采用了多层复合的工艺结构,使其对不同波长的入射光产生了光学干涉,从而产生了等倾干涉条纹,如图 5 所示。砷化镓电池片为 3 层结构,聚酰亚胺包覆膜为 2 层结构。其中,三结砷化镓电池片的镜面反射光谱中的等倾干涉条纹可能来自表面的封装玻璃层或砷化镓层,需要进一步确定。为了分析等倾干涉光谱条纹现象的产生机理及材质特性,对光谱干涉条纹进行进一步的建模分析。

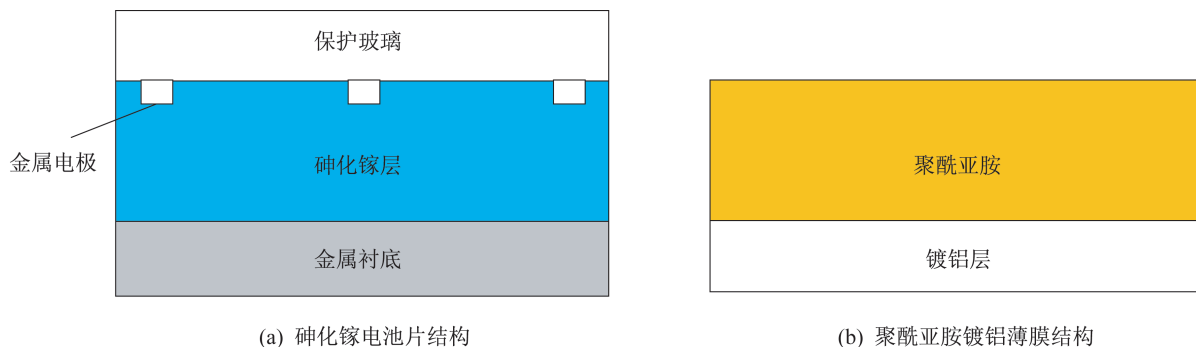


图 5 2 种空间碎片材质的多层复合工艺结构示意图

Fig.5 Multi-layer structure diagram of two debris materials

## 2.2 镜面反射光谱等倾干涉条纹建模分析

等倾干涉是发生在平行平板之间的光学干涉现象,其原理示意图如图 6 所示。

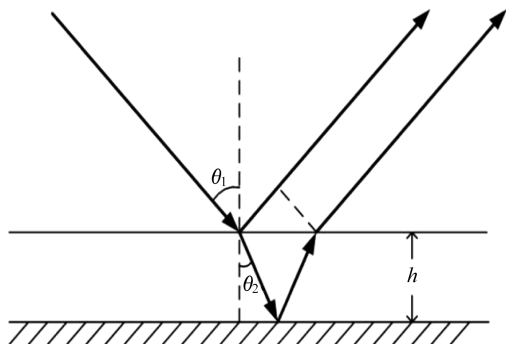


图 6 等倾干涉原理示意图

Fig.6 Diagram of equal inclination interference

若只考虑一次表面和二次表面之间的等倾干涉现象,则等倾干涉的光程差公式如下:

$$\Delta(\lambda) = 2h\sqrt{n(\lambda)^2 - (\sin\theta_1)^2} \quad (1)$$

式中: $\Delta$ 为光程差; $h$ 为介质厚度; $n$ 为折射率; $\lambda$ 为波长。由于 2 种材质都采用金属衬底,因此无半波损失。

由于入射光倾角相同,对于不同波长的入射

光,则光谱条纹间隔的周期特性应与如下公式的周期特性一致,定义  $I_m(\lambda)$  为模拟等倾干涉光谱强度:

$$I_m(\lambda) = 1 + \cos\left(\frac{\Delta(\lambda)}{\lambda} \cdot 2\pi\right) \quad (2)$$

若忽略折射率在较短谱段范围内的变化,则假定  $n$  为常数,得

$$I_m(\lambda) = 1 + \cos\left(\frac{\Delta}{\lambda} \cdot 2\pi\right) \quad (3)$$

获取材质样片在任意入射角实测的镜面反射光谱数据后,可采用相关分析法,求解镜面反射光谱数据  $I_s(\lambda)$  和  $I_m(\lambda)$  的协方差矩阵及相关系数:

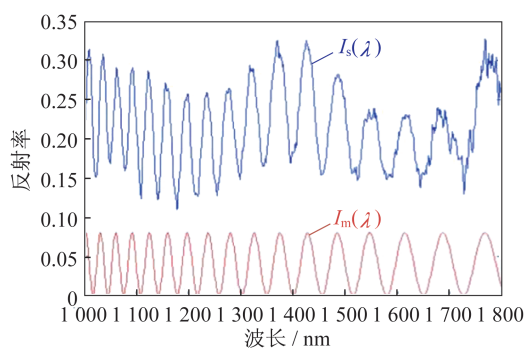
$$\text{cov}(I_s(\lambda), I_m(\lambda)) = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$r(I_s(\lambda), I_m(\lambda)) = \frac{c_{12}}{\sqrt{c_{11} \cdot c_{22}}} \quad (5)$$

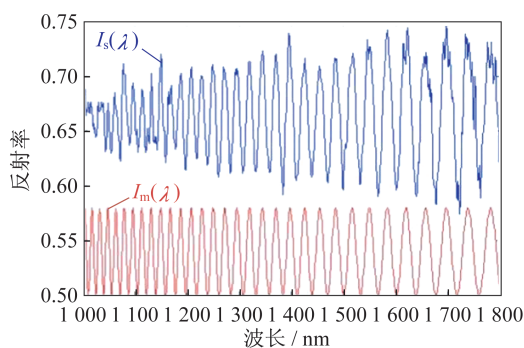
然后,通过数值分析法求解使得相关系数最大时,即满足如下公式的光程差  $\Delta$  的取值:

$$r_{\max} = \max_{\Delta > 0} (r(I_s(\lambda), I_m(\lambda))) \quad (6)$$

由此解得  $60^\circ$  入射时砷化镓电池片和聚酰亚胺包覆膜(正面)的光程差及模拟等倾干涉光谱如图 7 所示。



(a) GaAs 电池片 ( $\Delta = 37.12 \mu\text{m}$ , 最大值 = 0.766 03)



(b) 金色聚酰亚胺 ( $\Delta = 71.25 \mu\text{m}$ , 最大值 = 0.899 12)

图 7  $60^\circ$  入射时材质镜面反射光谱相关分析结果

Fig.7 Correlation analysis results of the material specular spectra at the incident angle of  $60^\circ$

随后对各入射角镜反光谱曲线与模拟等倾干涉光谱做相关分析,得各入射角下满足最优相关匹配性的光程差列表,见表 2。

表 2 各入射角镜反光谱相关分析结果

Tab.2 Correlation analysis results of the material specular spectra at different incidence angles

| $\theta_1 / (^\circ)$              | 2     | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\Delta \text{GaAs} / \mu\text{m}$ | 38.33 | 38.28 | 38.13 | 37.93 | 37.67 | 37.39 | 37.12 | 36.89 |
| $\Delta \text{聚酰亚胺} / \mu\text{m}$ | 82.68 | 82.26 | 80.98 | 78.94 | 76.43 | 73.93 | 71.25 | 69.01 |

表 2 描述了一组等倾干涉光程差和入射角的变化关系曲线,该函数关系与发生干涉的介质的折射率和厚度参数相关。因此,理论上可利用光程差公式进行非线性拟合,反演材质的折射率和厚度参数。由于入射角  $\theta_1$  和光程差  $\Delta$  满足式(1),则将  $h$  和  $n$  作为未知参数,对表 2 数据进行非线性最小二乘拟合,即得

$$\min_{h, n} \left\| 2h\sqrt{n^2 - (\sin\theta_1)^2} - \Delta \right\|_2^2 =$$

$$\min_{h,n} \sum_i (2h\sqrt{n^2 - (\sin \theta_{li})^2} - \Delta_i)^2 \quad (7)$$

计算最小二乘拟合结果的最大相对残差:

$$\text{Res}_{\max} = \frac{\max_i |2h\sqrt{n^2 - (\sin \theta_{li})^2} - \Delta_i|}{\Delta_i} \quad (8)$$

由式(7)和式(8)得,在1 000~1 800 nm波段内,2种多层结构材质的折射率和厚度参数反演结果如下:砷化镓电池片 $h=5.5189 \mu\text{m}$ , $n=3.4724$ , $\text{Res}_{\max}=0.0003$ ;聚酰亚胺包覆膜(正面) $h=24.2106 \mu\text{m}$ , $n=1.7074$ , $\text{Res}_{\max}=0.0035$ 。

由折射率计算结果可知,砷化镓电池片发生镜面反射时,等倾干涉条纹的来源介质可确定为砷化镓,而非表面的封装玻璃。聚酰亚胺包覆膜(正面)发生镜面反射时,等倾干涉介质为聚酰亚胺。硅电

池片和聚酰亚胺包覆膜(背面)的反射主要发生在第一表面(硅/镀铝),故未能产生等倾干涉光谱条纹。查阅相关产品文献资料可知<sup>[14-15]</sup>,反演计算结果与材质典型参数相符,证明了该反演方法的有效性。

### 2.3 30°入射样片散射光谱测量结果分析

由于等倾干涉的干涉条纹现象需要在镜面反射方向才能进行观测,然而在实际观测中,探测器很难总是处在目标镜面反射的峰值方向。为了研究等倾干涉光谱条纹的可探测角度范围,对砷化镓电池片和聚酰亚胺包覆膜(正面)30°镜面反射附近的散射光谱进行了测量。由式(4)、式(5)和式(6)计算得各散射角处(26°~34°), $I_s(\lambda)$ 和 $I_m(\lambda)$ 的最大相关系数,如图8所示。

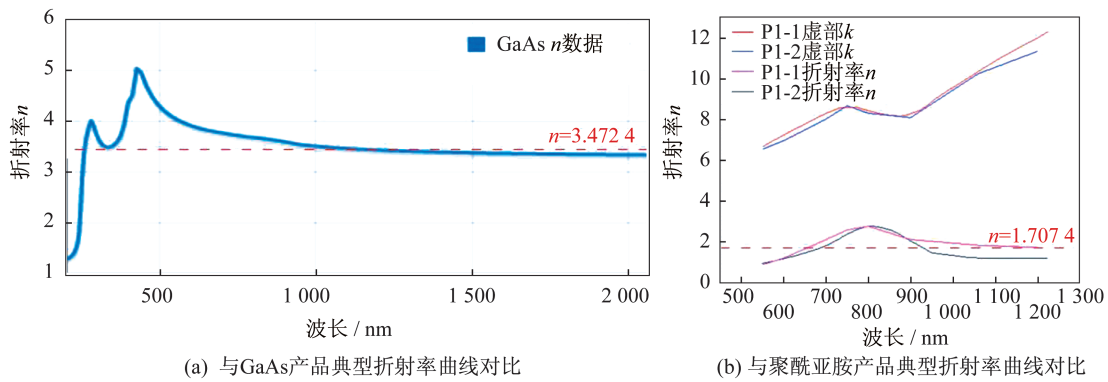


图8 与2种材质产品典型折射率曲线对比

Fig.8 Comparison with typical refractive index curve of twomaterial products

各散射角测得的光谱中等倾干涉条纹的明显程度如图9所示。以相关系数 $r_{\max}=0.4$ 为界,当入射角 $\theta_i=30^\circ$ 时,砷化镓电池片光谱等倾干涉条纹的可探测散射角 $\theta_s$ 范围约为 $30^\circ \pm 2.5^\circ$ ,聚酰亚胺包覆膜(正面)光谱等倾干涉条纹的可探测 $\theta_s$ 范围约为

$30^\circ \pm 1.5^\circ$ 。

因此,等倾干涉光谱条纹只出现在镜面反射附近的较小角度范围内,在偏离镜反方向上该干涉条纹现象将迅速减弱,直至不可见,这一现象符合等倾干涉的特点。

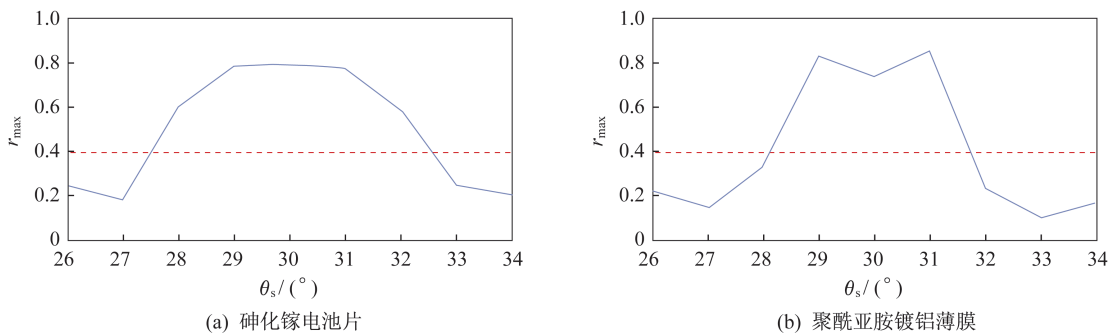


图9 2种材质散射光谱的相关性分析结果(30°入射)

Fig.9 Correlation analysis results of the scattering spectra of 2 materials (at the incident angle of 30°)

### 3 结束语

由实验数据得,在 1 000~1 800 nm 波段内,砷化镓电池片: $h=5.518\ 9\ \mu\text{m}$ , $n=3.472\ 4$ , $\text{Res}_{\text{max}}=0.000\ 3$ ;聚酰亚胺包覆膜(正面): $h=24.210\ 6\ \mu\text{m}$ , $n=1.707\ 4$ , $\text{Res}_{\text{max}}=0.003\ 5$ ,拟合值和测量数据重合度较好。查阅 2 种产品的相关文献资料可知,折射率和厚度反演结果与参考资料相符。

实验结果表明:2 种具有多层结构的材质(砷化镓电池片、聚酰亚胺包覆膜(正面))的镜面反射光谱的等倾干涉条纹十分明显,其近红外谱段光谱特征有别于硅电池片、聚酰亚胺包覆膜(背面)等第一表面反射材料。通过深入分析空间碎片材质镜面反射光谱中的等倾干涉条纹特征,即可反演其准确的折射率和厚度等细节参数信息。在实际观测场景中,砷化镓电池片和聚酰亚胺包覆膜都是空间碎片表面的主要材质类型,光度观测曲线中存在大量的镜面反射尖峰。由于该方法是针对材质本身多层结构引起的光谱条纹间隔特征进行分析,无需材质光谱数据库作为先验信息进行匹配,受光度测量精度影响较小,因此有望为空间碎片材质精细辨识提供新的研究思路。

### 参考文献

- [1] Space Debris Office ESA. ESA's annual space environment report [R]. Germany: European Space Agency, 2018.
- [2] 王阳,杜小平,范椿林.地基光度曲线反演空间目标特征技术研究进展[J].科学通报,2017(15):1578-1590.
- [3] 徐融,赵飞,周锦松.空间点目标光谱探测与特征识别研究进展[J].光谱学与光谱分析,2019,39(2):333-339.
- [4] 徐融,赵飞.典型 GEO 卫星部件光谱散射特性反演方法[J].红外与激光工程,2016,45(增刊1):128-133.
- [5] 孙成明,赵飞,袁艳.基于光谱的天基空间点目标特征提取与识别[J].物理学报,2015,64(3):277-283.
- [6] RAPP J B. Identification of orbital objects by spectral analysis and observation of space environment effects [D]. California: Polytechnic State University, 2012.
- [7] VANANTI A, SCHILDKNECHT T, KRAG H. Reflectance spectroscopy characterization of space debris [J]. Advances in Space Research, 2017, 59(10): 2488-2500.
- [8] BÉDARD D, WADE G A. Time-resolved visible/near-infrared spectrometric observations of the Galaxy 11 geostationary satellite [J]. Advances in Space Research, 2017, 59(1): 212-229.
- [9] DUNSMORE A N, KEY J A, TUCKER R M, et al. Spectral measurements of geosynchronous satellites during glint season [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2016, 54(2):1-7.
- [10] BÉDARD D, WADE G A, ABERCROMBY K. Laboratory characterization of homogeneous spacecraft materials [J]. Journal of Spacecraft & Rockets, 2015, 52:1-19.
- [11] CAMPBELL T, REDDY V, FURFARO R, et al. Characterizing LEO objects using simultaneous multi-color optical array [C]// Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. 2019: 51.
- [12] PEARCE E C, WEINER B, BLOCK A, et al. Examining the effects of on-orbit aging of sl-12 rocket bodies using visible band spectra with the MMT telescope and 5-color photometry with the UKIRT/WFCAM [C]// Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. 2019: 69.
- [13] WALLACE B, SOMERS P, SCOTT R. Determination of spin axis orientation of geosynchronous objects using space-based sensors: an initial feasibility investigation [C]// Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. 2010: E72.
- [14] THEETEN J B, ASPNES D E, CHANG R P H. A new resonant ellipsometric technique for characterizing the interface between GaAs and its plasma-grown oxide [J]. Journal of Applied Physics, 1978, 49(12): 6097-6102.
- [15] 刘泽涵,庞龙,李庆,等.高折射率聚酰亚胺研究进展[J].高分子通报,2017(2):22-29.