

基于薄膜干涉理论的三阶砷化镓电池散射光谱研究

李 鹏¹, 李 智², 徐 灿², 方宇强²

1. 航天工程大学研究生院, 北京 101416

2. 航天工程大学, 北京 101416

摘 要 三阶砷化镓电池具有较高的光电转换效率, 是卫星帆板的主要材料。利用卫星帆板的散射光谱特性, 可以辅助判断帆板姿态以及卫星工作状态, 对空间目标识别具有重要意义。搭建了空间目标表面材料散射光谱测量系统, 对太阳能电池样片散射光谱进行测量。测量系统主要由 REFLET 180S 和 FieldSpec@4 光纤光谱仪组成。REFLET 180S 能提供暗背景、稳定光源和高精度转台, 光源光谱范围 400~1 800 nm, 转台角分辨率为 0.01°。FieldSpec@4 光谱仪具有高的光谱分辨率(3 nm@700 nm, 10 nm@1 400/2 100 nm)。针对电池样片强镜反特性, 选择标准平面反射镜作为定标体, 测量入射角为 5°, 15°, 30°, 45°和 60°, 反射角为镜反射方向±2°, 角度间隔为 0.1°。测量结果发现三阶砷化镓电池在可见光波段(600~900 nm)散射光谱存在三个明显吸收峰, 并且随着入射角的增加, 吸收峰出现向左“迁移”特性; 在近红外波段(900~1 800 nm)散射光谱出现类周期性震荡特性, 而硅电池散射光谱并没有这些特性。三阶砷化镓电池结构复杂, 将其物理结构简化为 DAR 层和三个半导体吸收膜层: 顶电池 GaInP 层、中电池 GaAs 层和衬底 Ge 层。基于薄膜干涉理论, 利用等效光学导纳法, 对三阶砷化镓电池散射光谱进行建模。仿真光谱基本拟合出可见光波段的吸收特性以及近红外波段的周期性震荡特性, 说明利用薄膜干涉理论建立反射率模型的正确性。利用光谱仿真模型, 分析不同膜层对三阶砷化镓散射光谱的影响。结果表明: DAR 层主要作用是降低光谱反射率, 对光谱形状影响不大; Ge 层对散射光谱没有影响, 主要作用是增加光的透射率和吸收效率; GaInP 层和 GaAs 层对散射光谱形状起主要作用, GaAs 层是造成近红外波段干涉特性的主要原因; GaInP 层是引起可见光波段吸收特性的主要原因, 同时对近红外波段干涉曲线的振幅和频率起调制作用。研究结果可为卫星太阳能帆板和电池碎片识别提供数据支撑。

关键词 卫星; 三阶砷化镓电池; 散射光谱; 吸收峰; 震荡特性; 薄膜干涉

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)10-3092-06

引 言

太阳能电池是保证卫星正常工作的重要电力来源。随着太阳能电池制造技术发展, 三阶砷化镓电池已将光谱吸收限红移至 1 800 nm, 基本实现太阳光谱的全吸收, 因此目前卫星上主要采用三阶砷化镓电池。

由于太阳能帆板体积和表面积通常较大, 因此对卫星的光学散射特性影响较大^[1]。在 NASA 的支持下, 约翰逊航天中心对 300 多种空间目标材质的光谱特性进行了测量, 建立了较为完备的光谱数据库。俄罗斯国家工程物理研究将太阳能电池阵作为一大类重要空间目标表面材质, 开展老化对材质光谱的影响。加拿大 Bedard^[2]等以 Can X-1 工程试验小卫

星为研究对象, 对其表面主要材质铝以及 Emcore 三阶砷化镓电池的光谱双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF)进行了建模与分析。美国空军学院在春分点附近对两颗地球同步轨道(geosynchronous orbit, GEO)卫星进行观测时, 发现造成卫星亮度闪光的主要部件是太阳能帆板^[3]。在此基础上, 徐灿^[4]等对地面观测 GEO 卫星帆板闪光现象的规律进行了光度仿真验证。国内长春理工大学、光电研究院等机构对卫星表面包覆材料、硅太阳能电池、白漆涂层的光谱 BRDF 进行测量研究^[5-7], 但是对目前广泛采用的三阶砷化镓电池研究较少。三阶砷化镓电池研究重点主要如何在如何提高电池的光电转换效率上^[8], 但是电池的结构和工艺对其散射光谱的影响并没有得到广泛关注, 而三阶砷化镓电池散射光谱对卫星帆板识别和指向确定

收稿日期: 2019-09-12, 修订日期: 2020-01-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(61304228)资助

作者简介: 李 鹏, 1990 年生, 航天工程大学研究生院博士研究生

e-mail: 693078757@qq.com

具有重要意义。本文以三阶砷化镓电池为研究对象,首先对其散射光谱进行测量,并与硅基太阳能电池散射光谱对比发现三阶砷化镓电池特有的可见光波段的吸收特性以及近红外波段的干涉特性;利用薄膜干涉理论,建立基于多层膜系的光谱反射率模型,对三阶砷化镓电池的吸收特性以及干涉特性进行解释分析。

1 实验部分

1.1 装置

散射光谱实验测量装置如图 1 所示,主要由法国 RE-



图 1 光谱反射率测量系统

Fig. 1 Spectral reflectance measurement system

1.2 原理

采用单一比较法测量三阶砷化镓电池的光谱反射率。由于太阳能电池片的强镜反射特性,若采用常规的聚四氟乙烯(F4)压制的白板,在镜反射方向附近的样片光谱反射率将远大于 1,这与实际情况是不符的,因此对于镜反射类型材质样片,实验中采用 REFLECT 180S 配备的由美国计量院标定的标准平面反射镜作为定标体,其镜反射方向光谱反射率基本都在 0.95 以上,设镜反射方向标准平面反射镜的光谱反射率为 ρ_{cal} 。光谱反射率测量原理:设入射角为 θ_i ,反射角为

θ_r , ASD 测量的太阳能电池样片光谱原始灰度(digital number, DN)值为 $DN_{material}$,标准平面反射镜的光谱 DN 值为 DN_{cal} ,则在 (θ_i, θ_r) 方向上样片的光谱反射率 ρ 为

$$\rho = \frac{DN_{material}}{DN_{cal}} \rho_{cal} \quad (1)$$

实验采用逐点测量的方法。测量入射角 θ_i 选取 $5^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$,因为太阳能电池片的强镜反射性,选择的反射角 $\theta_r = \theta_i \pm 2^\circ$,角度间隔为 0.1° 。光谱反射率测量流程如图 2 所示。

1.3 测量结果

图 3 为入射角 30° 时三阶砷化镓电池光谱反射率曲线。

从图 3 中可以看出,三阶砷化镓电池光谱反射率曲线具有三个特征:

(1)三阶砷化镓电池散射光谱镜反射现象明显。在镜反射时($\theta_r = \theta_i$),光谱反射率值最高,随着反射角逐渐偏离镜反射方向,反射率逐渐降低。当反射角偏离镜反射方向 2° 时,光谱反射率已经降到 0.05 左右。三阶砷化镓电池的强镜反射特性与卫星的光度特性中偶尔观测到帆板闪光现象的结论是一致的^[4]。

(2)可见光波段存在明显吸收峰。在可见光波段 $600 \sim 850 \text{ nm}$ 之间,反射光谱曲线中均出现三个明显吸收峰,硅基电池并没有这种吸收特性,说明该吸收峰是三阶砷化镓电池内部某种特殊材料造成的。

(3)近红外波段存在周期性震荡特性。在 900 nm 以后,

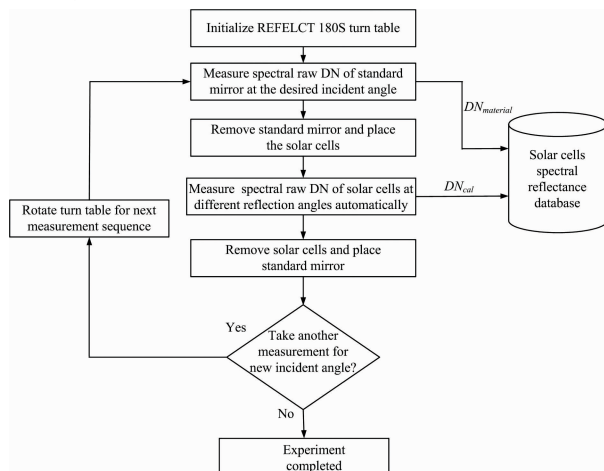


图 2 光谱反射率测量流程

Fig. 2 Flow chart of spectral reflectance measurement

光谱反射率曲线出现了明显的类正(余)弦曲线的周期性震荡特征,而硅基太阳能电池并没有这种周期性震荡特征,说明这种周期性震荡特性是三阶砷化镓电池近红外波段重要的光谱特征,可作为三阶砷化镓电池识别的重要依据。

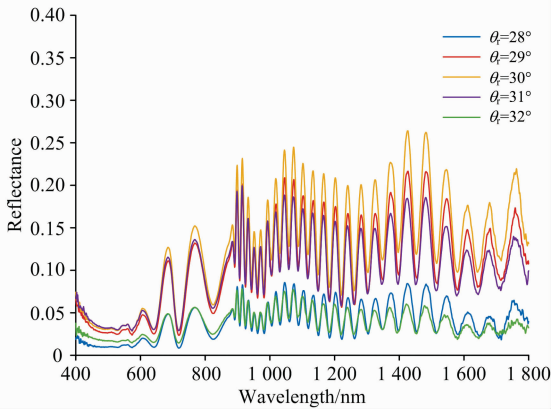


图 3 三阶砷化镓电池光谱反射率

Fig. 3 Spectral reflectance of GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cell

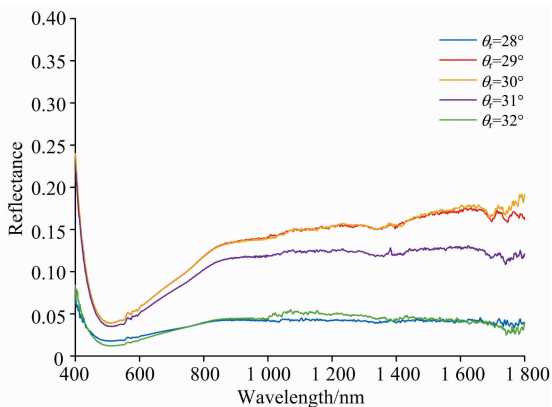


图 4 硅基电池光谱反射率

Fig. 4 Spectral reflectance of Si-based solar cell

2 结果与讨论

2.1 多层膜的反射率模型

实验中采用的是上海空间电源研究所研制的 GaInP/GaAs/Ge 三阶砷化镓电池,该电池采用双层减反射膜(double anti-reflection coating, DAR) $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$,以 Ge 为衬底,由三个 N/P 结构的子电池通过隧穿结串联形成,转换效率高达 32%,目前广泛应用于国内卫星上。图 5 为三阶砷化镓电池具体物理特性模型以及简化模型。

简化模型各层厚度如下: $\text{TiO}_2 = 50 \text{ nm}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 50 \text{ nm}$, $\text{GaInP} = 670 \text{ nm}$, $\text{GaAs} = 3\ 700 \text{ nm}$, $\text{Ge} = 170\ 000 \text{ nm}$, 电池片总厚度约为 $174.47 \mu\text{m}$ 。

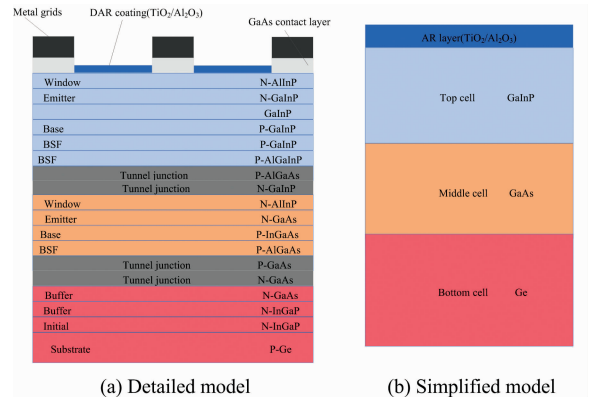
采用导纳矩阵法推导多层膜与基底组合的等效光学导纳 Y 与膜层及基底结构参数之间的定量关系式^[9]

$$\mathbf{E}_0 \begin{bmatrix} 1 \\ Y \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos\delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin\delta_j \\ i\eta_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix} \mathbf{E}_{k+1} \quad (2)$$

式(2)中: \mathbf{E}_0 是第 1 层膜上界面(入射介质空气)外侧电场强度, \mathbf{E}_{k+1} 是第 k 层膜(出射介质 Ge)下界面外侧电场强度, k 为膜层数, η 是修正导纳, δ_j 为第 j 层膜的有效相位厚度,表达式为

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos\theta_j \quad (3)$$

式(3)中, d 为每层膜的厚度, n_j 是每层膜的折射率, θ_j 为折射角。



(a) Detailed model

(b) Simplified model

图 5 三阶砷化镓电池详细(a)和简化(b)模型

Fig. 5 Detailed (a) and simplified (b) models of triple-junction solar cell

$$\text{令} \begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos\delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin\delta_j \\ i\eta_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix}, \text{ 代入上式得}$$

到 $Y = \frac{C}{B}$ 。

所以任意 k 层膜系的光谱反射率 R 为

$$R = \left| \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right|^2 = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^* \quad (4)$$

当入射光是无偏振的,根据菲涅尔方程,总的光谱反射率为

$$R_{\text{total}}(\theta_i, \lambda) = \frac{R_s(\theta_i, \lambda) + R_p(\theta_i, \lambda)}{2} \quad (5)$$

式(5)中, R_s 和 R_p 分别代表 S 偏振波和 P 偏振波入射时的光谱反射率。

入射角 30° 时三阶砷化镓电池镜反射方向仿真和实测光谱反射率对比如图 6 所示。

从图 6 中可以看出,在 $400 \sim 600 \text{ nm}$ 波段,仿真和实测光谱反射率曲线走势一致,均是逐渐减小,但是幅值存在差异;在 $600 \sim 900 \text{ nm}$ 仿真光谱反射率曲线同样存在三个吸收峰,实测和仿真光谱反射率吸收峰波长如表 1 所示。在表 1 中,首先将实测和仿真光谱在相同入射角情况下进行对比,发现仿真和实测光谱吸收峰波长接近,存在稳定的相位差,约为 30, 20 和 10 nm;其次对比不同入射角吸收峰波长,发现随入射角增大吸收峰基本符合向左“迁移”特性(不考虑 5° 时的小角度入射),从入射角 15° 开始,角度每增大 15° ,迁移

波长约为 5~10 nm。

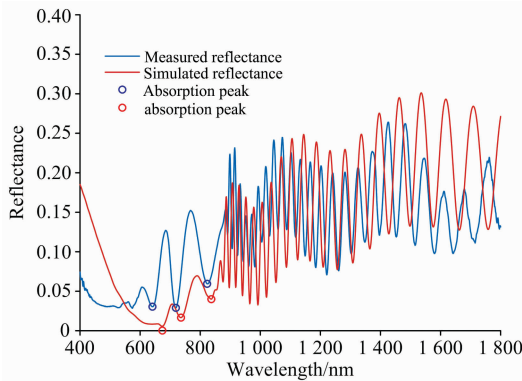


图 6 三阶砷化镓电池仿真和实测光谱反射率对比

Fig. 6 Comparison between simulated and measured spectral reflectance of triple-junction solar cell

900 nm 以后, 仿真和实测散射光谱均出现了类周期性震荡现象, 900~1 400 nm 波段仿真和实测光谱曲线振幅和频率基本一致, 在 1 400 nm 以后仿真和实测光谱曲线振幅和频率出现了差别。

分析仿真和实测光谱曲线存在差异的主要原因是文中采用材料的折射率和消光系数均是网上开源获取的数据, 和文中三阶砷化镓各层膜的折射率和消光系数不可能完全一致, 并且三阶砷化镓结构复杂, 采用简化模型必然会导致出现差别。但是建立的基于多层膜系的光谱反射率计算模型, 基本拟合出了实测光谱的可见光波段吸收和近红外波段干涉特性, 说明光谱计算模型的正确性。

表 1 三阶砷化镓电池仿真和实测光谱反射率可见光波段吸收峰

Table 1 Triple-junction solar cell absorption peak of simulated and measured spectral reflectance in visible band

Incident angle/(°)	Measured reflectance/nm	Simulated reflectance/nm
5	644, 721, 828	680, 743, 844
15	645, 723, 831	678, 741, 842
30	641, 719, 823	674, 736, 837
45	635, 713, 817	668, 728, 827
60	630, 706, 808	664, 721, 815

2.2 不同膜层对三阶砷化镓电池散射光谱的影响

在三阶砷化镓光谱反射率仿真计算时, 发现衬底 Ge 层对散射光谱没有影响, Ge 层主要影响近红外波段 (850~1 650 nm) 透射光谱和增加太阳光吸收效率。以入射角 30° 为例, Ge 层对透射光谱的影响如图 7 所示。

因为衬底 Ge 层对散射光谱没有影响, 因此影响散射光谱的主要是 DAR 层, GaInP 层和 GaAs 层。入射角 30° 时, DAR 层对散射光谱的影响如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 仅含 DAR 层时, 可见光波段没有出现吸收峰, 近红外波段也没有出现类周期性震荡的薄膜干涉现象; 而去除 DAR 层的三阶砷化镓电池, 反射率幅值整体

提高, 可见光波段有明显吸收峰, 近红外波段出现薄膜干涉, 曲线形状基本不变, 因此可以得出结论: 三阶砷化镓电池在可见光波段的吸收特性和近红外波段的干涉特性均是由电池的 GaInP 层和 GaAs 层决定的, 与 DAR 层没有关系, DAR 层主要作用是降低反射光能量, 提高光的透过率。

进一步分析 GaInP 层和 GaAs 层对电池散射光谱的影响, 将 GaInP 层和 GaAs 层的光谱反射率单独进行计算, 入射角 30° 时结果如图 9 所示。

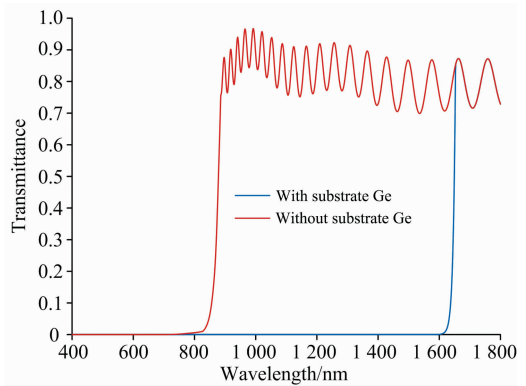


图 7 三阶砷化镓电池光谱透过率

Fig. 7 Spectral transmittance of GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cell

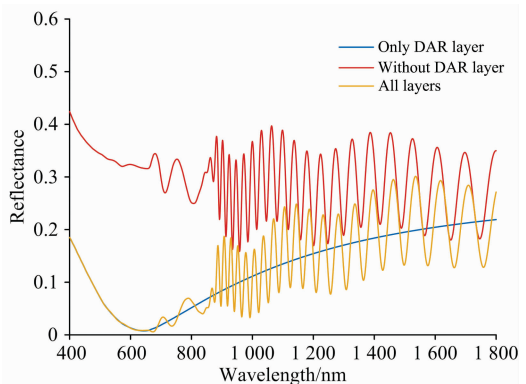


图 8 DAR 层对三阶砷化镓光谱反射率的影响

Fig. 8 Influence of DAR layer on spectral reflectance of triple-junction solar cell

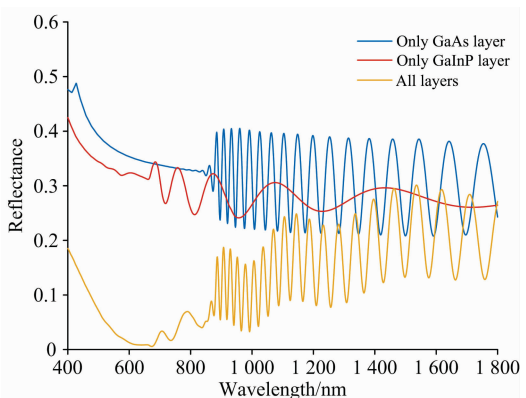


图 9 GaInP 和 GaAs 层对三阶砷化镓光谱反射率的影响

Fig. 9 Influence of GaInP and GaAs layers on spectral reflectance of triple-junction solar cell

从图 9 中可以看出, 仅含顶电池 GaInP 层的光谱反射率曲线在可见光波段出现三个吸收峰, 而 GaAs 层的光谱反射率曲线在可见光波段没有吸收峰, 因此三阶砷化镓电池可见光波段的吸收特性主要是由顶电池 GaInP 层引起的; GaAs 层光谱反射率曲线在 900 nm 后出现周期震荡的薄膜干涉特性, 而仅含顶电池 GaInP 层的光谱反射率曲线近红外波段仅存在三个吸收峰, 没有明显的干涉特性, 说明引起三阶砷化镓电池散射光谱近红外波段干涉特性的主要是 GaAs 层; 但是单独 GaAs 层引起干涉的频率、振幅和三阶砷化镓电池的干涉特性曲线存在差异, 说明 GaInP 层对干涉曲线振幅和频率起到调制作用。

3 结 论

三阶砷化镓电池是目前卫星帆板广泛采用的电池材料。

References

- [1] HOU Qing-yu, GONG Jing-nan, FAN Zhi-peng, et al(侯晴宇, 巩晋南, 樊志鹏, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2017, 66(15): 154201.
- [2] Bédard D, Lévesque M. Journal of Spacecraft and Rockets, 2014, 51(5): 1492.
- [3] Ryan M T, Evan M W, Francis K C, et al. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2015.
- [4] XU Can, ZHANG Ya-sheng, ZHANG Feng, et al(徐 灿, 张雅声, 张 峰, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2018, 38(5): 0529001.
- [5] LIU Hao, LI Zhe, SHI Jing, et al(刘 昊, 李 喆, 石 晶, 等). Laser & Infrared(激光与红外), 2017, 47(8): 1024.
- [6] XU Rong, ZHAO Fei, LI Huai-feng, et al(徐 融, 赵 飞, 李怀峰, 等). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2016, 45(2): 212002.
- [7] XU Rong, ZHAO Fei(徐 融, 赵 飞). Infrared and Laser Engineering(红外与激光工程), 2016, 45(S1): 123001.
- [8] Lan D, Green M A. Applied Physics Letters, 2016, 109(12): 123508.
- [9] Angus Macleod H. Thin-Film Optical Filters (Fourth Edition)(薄膜光学·第 4 版). Translated by XU De-gang, JIA Dong-fang, WANG Yu-ye(徐德刚, 贾东方, 王与焱, 译). Beijing: Science Press(科学出版社), 2016. 14.

Research on the Scattering Spectrum of GaAs-Based Triple-Junction Solar Cell Based on Thin-Film Interference Theory

LI Peng¹, LI Zhi², XU Can², FANG Yu-qiang²

1. Graduate School, Space Engineering University, Beijing 101416, China

2. Space Engineering University, Beijing 101416, China

Abstract GaAs-based triple-junction solar cell has high photoelectric conversion efficiency and is the main material of satellite solar arrays. The scattering spectrum characteristics can be used to assist in determining the solar arrays' attitudes and satellite working status, which have great significance for space object identification. An automatic scattering spectrum measurement system of space object's surface materials was established and the scattering spectrum of solar cell samples was measured. The measurement system primarily consists of REFLET 180S and FieldSpec@4 fiber spectrometer. The REFLET 180S can provide a dark environment, a stable light source with spectral range of 400~1 800 nm and a high-precision turntable with 0.01° angular resolution. FieldSpec@4 spectrometer has an advantage of high spectral resolution (3 nm @ 700 nm, 10 nm @ 1 400/2 100 nm). According to the strong specular reflection characteristic of the solar cell samples, a standard plane reflector was selected as the calibrator. The incident angles were 5°, 15°, 30°, 45° and 60°, and the reflection angles were plus or minus 2° in the direction of specular reflection with 0.1° angle intervals. The measurement results showed that there were three obvious absorption peaks in the visible (600~900 nm) scattering spectrum of the GaAs-based solar cell, and these absorption peaks appeared to

测量了三阶砷化镓电池的散射光谱, 发现其散射光谱在可见光波段存在三个明显吸收峰, 并且 900~1 800 nm 波段散射光谱出现类正(余)弦周期性震荡特性。为解释这两个特殊现象, 针对三阶砷化镓电池的物理结构, 建立了通用的简化模型。利用薄膜光学理论, 建立基于多层膜的反射率模型, 模拟的反射光谱基本拟合出可见光波段的吸收特性和近红外波段的干涉特性。利用光谱反射率计算模型, 分析了不同膜层对散射光谱的影响。结果表明: 衬底 Ge 层对散射光谱没有影响, 主要作用是增加光的吸收率; DAR 层主要作用是降低反射率, 对光谱形状影响不大; 顶电池 GaInP 层是引起可见光波段三个明显吸收特性的主要原因, 中电池 GaAs 层是引起近红外波段干涉特性的主要原因, 但同时 GaInP 层对干涉特性曲线的振幅和频率起调制作用。相关研究对卫星太阳能帆板、太阳能电池碎片的识别具有重要意义。

the left “migration” characteristic with the increase of incident angles, and in the near-infrared (900~1 800 nm) scattering spectrum showed distinct periodic oscillation characteristics. While the scattering spectrum of Si-base solar cell did not have these characteristics. The structure of GaAs-based solar cell was complex, and its physical structure was simplified into a double anti-reflection coating layer and three semiconductor absorptive dielectric layers: a top cell called GaInP layer, a middle cell called GaAs layer, and a substrate cell called Ge layer. Based on the thin-film interference theory, the scattering spectrum of GaAs-based triple-junction solar cell was modeled by the equivalent optical admittance method. The simulation spectrum basically fitted the absorption characteristics in the visible band and the periodic oscillation characteristics in the near-infrared band, which indicated the correctness of the spectral reflectance model established by thin-film interference theory. The influence of different film layers on the scattering spectrum of GaAs-based triple-junction solar cell was analyzed by using the spectral simulation model. The simulation results showed that the main function of the DAR layer was to reduce the spectral reflectance, which had little effect on the shape of the spectral curve. The main function of the Ge layer was to increase the light transmittance and absorption efficiency, which had no effect on the scattering spectrum. GaInP and GaAs layers played a major role in the spectral shape of GaAs-based triple-junction solar cell. GaAs layer was the main reason for the interference characteristics of the scattering spectrum in the near-infrared band. GaInP layer had the main influence on the absorption characteristics in the visible band, and it also modulated the amplitude and frequency of the interference curve in the near-infrared band. The research results can provide data support for satellite solar panel and solar cell debris identification.

Keywords Satellite; GaAs-based triple-junction solar cell; Scattering Spectrum; Absorption peak; Oscillation characteristic; Thin-film interference

(Received Sep. 12, 2019; accepted Jan. 10, 2020)