

# 基于散射模型设计外遮光罩

梅 超<sup>1,2</sup> 周泗忠<sup>1</sup> 闫佩佩<sup>1</sup> 姜 凯<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 通过对粗糙表面散射情况的分析发现,普通金属材料的表面散射能量主要集中在  $10^\circ$  散射角内。针对这种现象,提出了基于该散射特性的光学系统外遮光罩设计方法,该遮光罩的杂散光抑制角比基于反射理论计算的大  $5^\circ$ ,具有良好的散射杂散光的抑制作用。最后以 Ritchey-Chretien(R-C)光学系统为例,为其设计了合适的遮光罩,并在 TracePro 软件中对比性地建模、分析。结果证明了该模型的正确性,且该遮光罩对抑制杂散光起到了很好的效果,点源透射比(PST)相对较低。

**关键词** 光学设计;杂散光抑制;遮光罩设计;散射

**中图分类号** TN214 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0122005

## Design of an Outer Baffle Based on Scattering Model

Mei Chao<sup>1,2</sup> Zhou Sizhong<sup>1</sup> Yan Peipei<sup>1</sup> Jiang Kai<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** By the analysis of the scattering situation of the rough surface, it is found that the ordinary metal material scattering energy is centralized in  $10^\circ$ . Based on the scattering characteristics, the method of the outer baffle design is put forward, the baffle rings' restraint angle is  $5^\circ$  larger than the stray light suppression angle which is calculated based on reflection theory, and the effect of the outer baffle to suppress the stray light is very good. The baffle is designed for a Ritchey-Chretien (R-C) system and the model is built in the TracePro software for analysis. With the contrast of different models and the designs, the results show that the consideration of the scattering is more accurate, the effect of the outer baffle is better, and the point source transmittance (PST) of the system is lower than others.

**Key words** optical design; stray light suppression; optical baffle design; scattering

**OCIS codes** 220.4830; 290.2648; 290.1483

## 1 引 言

光学系统在实际应用中容易受到杂散光的影响,导致其成像质量下降,所成图像对比度降低,影响图像的提取和处理,因此在光学系统设计时,要有合理的杂散光抑制措施<sup>[1]</sup>。目前国外对物体表面散射模型研究比较深入,根据物体表面的散射属性,建立了  $AB_g$  模型,适用于大部分材料,并与工程实际结果匹配较好,仿真分析时可以获得较为可靠的结果<sup>[2~4]</sup>。国内对杂散光的抑制提出了很多方法,尤

其是对外遮光罩的结构设计不断改善。但没有深入研究物体表面散射现象,仅基于反射理论设计遮光罩结构,仿真分析时采用的  $AB_g$  模型仅考虑了吸收率和散射率,即除了吸收外其余能量全部漫反射,  $AB_g$  模型中  $g$  取值为  $0^{[5~7]}$ 。经验表明,在实际工程中采用这种模型并不合适,设计结果难以达到预期效果。

本文通过对物体表面属性的分析和研究,在考虑物体表面散射特性的基础上建立了优化的散射模

**收稿日期**: 2012-06-28; **收到修改稿日期**: 2012-09-10

**作者简介**: 梅 超(1987—),男,博士研究生,主要从事光学系统杂散光分析与抑制方面的研究。

E-mail: s09026@opt.cn

**导师简介**: 周泗忠(1953—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光电跟踪方面的研究。E-mail: szh@opt.ac.cn

型,阐述了在散射模型的基础上如何设计合理的外遮光罩。以 Ritchey-Chretien(R-C)光学系统为例设计了外遮光罩,对比仿真分析了基于散射、折射理论设计的外遮光罩的不同,以及在实际散射模型下和朗伯体散射模型下仿真结果的不同,验证了该设计和模型的正确性和合理性。

## 2 散射模型分析

20 世纪 80 年代随着微波技术的迅速发展,关于随机粗糙表面散射模型的研究结果大量出现。通常描述随机粗糙表面的统计量包括功率谱密度、高度起伏的概率密度函数和均方根高度、相关函数和相关长度、结构函数、特征函数、均方根斜率与曲率半径等<sup>[8]</sup>。这些参数都会影响物体表面的散射。

通常散射系数定义为

$$\sigma_{pq} = \frac{4\pi R^2 P_{pq}}{E_0^2 A_0}, \quad (1)$$

式中  $R$  为接收面半径,  $P_{pq}$  为非相干散射功率,下标  $p, q$  分别表示入射波和散射波的极化方式(水平或垂直),  $E_0$  为入射场强,  $A_0$  为照射面积。在电磁场理论的支持下,通过求解电磁波到达散射面的极化电磁场方程得到基于积分方程模型(IEM)的后向散射系数,即

$$\sigma_{pp} = \frac{k_1^2}{4\pi} \exp(-2k_1^2 \delta^2 \cos^2 \theta_i) \times \sum_{n=1}^{\infty} |I_{pp}^n|^2 \frac{W^{(n)}(2k_1 \sin \theta_i, \varphi)}{n!}, \quad (2)$$

式中  $k_1$  为入射波波数,  $\theta_i$  为入射角,  $\delta$  为物体表面高度起伏均方根,  $\varphi$  为散射波矢量与反射波矢量的夹角,  $W$  为表面功率谱密度,与粗糙面相关函数和入射、散射角有关,  $I_{pp}^n$  为相关照度,与物体表面介电常数和粗糙度有关。由该式获得的结果与实际测量结果相符度较好。由(2)式可以看出物体表面越光滑散射能量集中度越高,散射能量越强;入射光波长越长,散射能量集中度越低,散射能量越低<sup>[9]</sup>,实际测量情况如图 1 所示。

图 1(a)为基于美国材料与试验协会(ASTM)标准 E1392 测量的亮铂玻璃(MO,均方根高度差为 450 nm)、美国国家标准与技术研究院(NIST)提供的非常平整的标准玻璃(CA)、美国罗姆航空发展中心/光电技术部门(RADC/OCPC)提供的亮铂玻璃(BE)三种材料的双向散射分布函数(BSDF)测量结果<sup>[10]</sup>,其中 BE 平整度优于 MO。

在杂散光分析时软件对物体表面模型重新进行

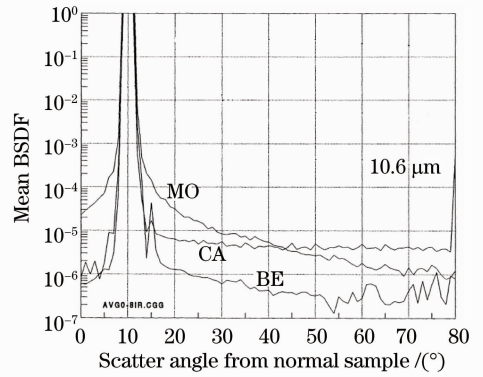


图 1 几种玻璃的 BSDF

Fig. 1 BSDF of different glasses

了定义,首先确定积分散射能量(TIS),即散射能量占入射光能量的比例为

$$E_{TIS} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} f_{BSDF}(\theta_r, \nu_r, \theta_i, \nu_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i d\nu_i, \quad (3)$$

式中  $\nu$  为垂直于物体表面的方位角,  $f_{BSDF}(\theta_r, \nu_r, \theta_i, \nu_i)$  为散射能量占入射能量比例函数(BSDF),等同于上述散射系数,通常在反射方向上取极值,其定义式为

$$f_{BSDF}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s) = \frac{dL_s(\mathbf{r}_s)}{dE(\mathbf{r}_i)}, \quad (4)$$

式中  $dL_s(\mathbf{r}_s)$  指的是从样本  $dA_s$  面上辐射出的量,  $dE(\mathbf{r}_i)$  是除去吸收能量后照射到样本  $dA_s$  面上的入射照度[如图 2(a)]。

所以 BSDF 函数也是由物体自身表面属性和入射光波长决定的。吸收率越高 BSDF 积分值越小,表面越光滑 BSDF 函数曲线在反射角方向值越大且集中度越高。

在照明分析和杂散光分析软件中对 BSDF 结果利用数学模型做进一步拟合,简化模型计算。这些数学模型包括 ABg 模型、Gaussian 模型、Table BSDF 模型、Asymmetric 模型<sup>[11,12]</sup>。其中 ABg 模型与大部分实际结果符合较好,软件也都支持,所以本文采用 ABg 模型<sup>[13]</sup>。

A、B、g 为 ABg 模型中三个待定参数,定义式为

$$f_{BSDF} = \frac{A}{B + |\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}_0|^g}, \quad (5)$$

式中 A 由物体反射能量决定, B、g 由散射能量集中度决定, B 为曲线上端拐点, g 为曲线下端拐点。BSDF 是  $|\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}_0|$  的函数,可以通过实验测量,  $\boldsymbol{\beta}$  和  $\boldsymbol{\beta}_0$  为散射波矢在样本表面的投影矢量,如图 2(b)所示。

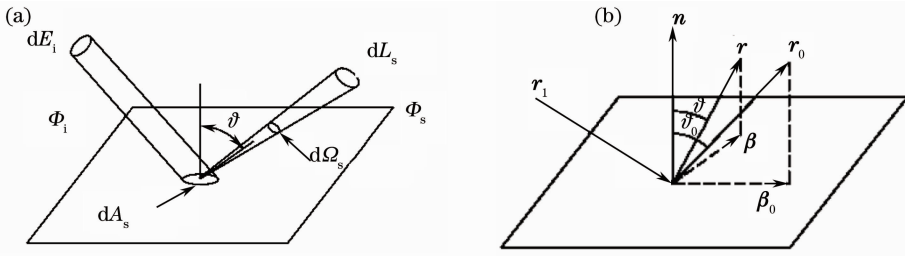


图2 TracePro 中散射模型定义。(a) BSDF 模型；(b) ABg 模型

Fig. 2 Scattering model in TracePro. (a) BSDF model; (b) ABg model

遮光罩在制造上通常采用普通轧制铝,然后涂黑漆。普通轧制铝表面(Ra 为 6.4 左右)在 10.6 μm 波长下的 BSDF 测量结果在国内有人测量<sup>[14]</sup>,从测量结果可知,其散射能量集中在以反射光线为中心的 ±5° 内。考虑到这种散射现象,在设计外遮光罩时,在反射抑制杂光理论的基础上增加了对 5° 范围内的散射杂散光抑制。普通轧制铝表面镀上吸收率为 90% 吸收涂料后,其表面散射 TIS 为 10%,涂料均匀附着,由(2)式可知,这样对散射曲线没有很大的影响。所以本文建立的遮光罩 ABg 模型取  $A=0.0003385, B=0.0001, g=3.5$ , 如图 3 所示。

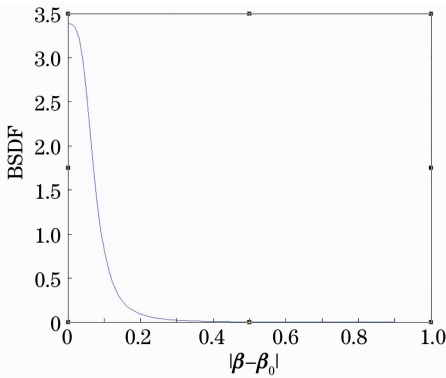


图3 所用轧制铝表面的 BSDF。  $A=0.0003385;$

$$B=0.0001; g=3.5$$

Fig. 3 BSDF of rolled Al used.  $A=0.0003385;$

$$B=0.0001; g=3.5$$

### 3 外遮光罩参数计算

在文献[15]的分析基础上,考虑对散射光线的抑制,所用结构具体设计方法如下:

1) 确定遮光罩的长度和口径。长度可以由内遮光罩确定,如图 4 所示,将主、次镜内遮光罩边缘相连,延长后与外遮光罩相交,交点到主镜距离即为外遮光罩长度。口径可以由镜头口径和视场角以及遮光罩长度确定。如图 5 所示,  $D$  为镜头口径半径,  $L$  为遮光罩长度,  $H$  为遮光罩口径半径,假定外观比例系数为  $\delta$ ,遮光罩厚度为  $d$ ,则  $H = L \times \delta - d$ 。

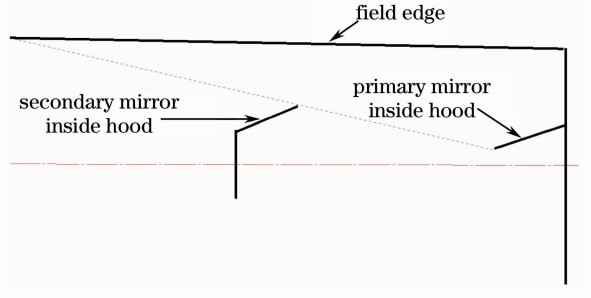


图4 外遮光罩结构图

Fig. 4 Structure of outer baffle

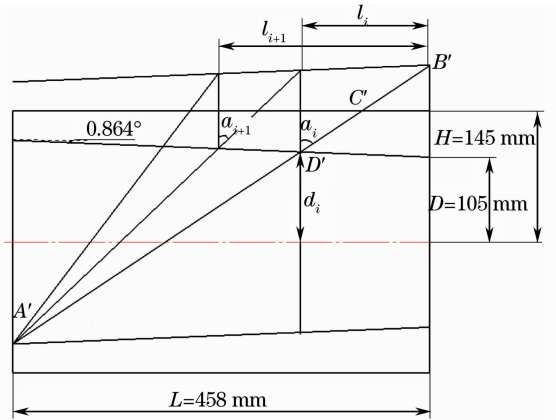


图5 挡光环参数计算示意图

Fig. 5 Diagrammatic for the rings calculation

2) 确定挡光环数目。涂黑后遮光罩的吸收率  $\alpha$  为 90%,若光线进入遮光罩后反射 5 次,则在没有挡光环的情况下,入射光到达保护玻璃的能量为原来的  $(1-\alpha) \times 5 = (1-0.9) \times 5 = 10^{-5}$  倍。若光学系统没有安装外遮光罩,但内部安装了适当的消杂光结构,则入射的杂光到达像面的能量会下降到  $10^{-4}$ 。那么,安装外遮光罩时,入射的杂光能到达像面的能量就会低于  $10^{-9}$ 。所以由  $n = L \times \tan \varphi / (2H) = 5$  可以计算出当挡光环倾斜角大于  $\varphi$  时就不用再继续设置挡光环了。而  $\varphi = (2D + d_i) / (L - l_i)$ , 就可以计算出

要使用几级挡光环。

3) 确定挡光环参数,此时要考虑散射影响。为装调方便,外遮光罩分为两段,以保护玻璃所在位置为界,先求解前端各挡光环参数,确定挡光环大小。本文在计算挡光环参数时采用了和原有文献不同的数学模型<sup>[16,17]</sup>,添加了辅助线,减少了反射光线的计算,大大简化了计算方法,也利于程序化设计。

如图 5 所示,在建立模型时以遮光筒基线为对称轴,将挡光环边缘的连线镜像后再计算,这样连接 A'、B' 点就可以计算出 C'、D' 点的位置,挡光环的初始位置和倾斜角就确定下来了。再结合本文所考虑的 5° 范围的过度抑制,计算出其结构。具体计算公式如下:

$$a_i = \arctan[(L - 5 - l_{i-1}) \div (H + D + 2L \times \tan 0.864^\circ + H - d_{i-1})], \quad (6)$$

$$l'_i = (H - d_{i-1}) \times 2 \times \tan a_i, \quad (7)$$

$$l_i = l'_i - (L - 5 - l_{i-1}) \times \tan 5^\circ, \quad (8)$$

$$d_i = D + l_i \times \tan 0.864^\circ, \quad (9)$$

式中的  $l_i$ 、 $d_i$ 、 $a_i$  如图 5 所示, $l_i$  为第  $i$  带  $i+1$  个挡光环间的间距, $d_i$  为第  $i$  个挡光环半径, $a_i$  为第  $i$  个挡光环与垂直方向夹角, $i$  取正整数,为挡光环环数,(6)式中减 5 是为了留 5 mm 的连接余量,(8)式是考虑了 5° 散射的影响。

4) 以同样的方法计算保护玻璃右端遮光罩的挡光环参数,结合实际修改连接处形状,主要考虑保护玻璃在其中的安放。

以前的外遮光罩设计方法在第一步和第四步是相同的。第二步有人做过挡光环数对比分析,而这里按照实际情况给出了挡光环数目的边界条件,这样对任何一个系统都不用再一一对比分析<sup>[17]</sup>。在第三步中,通过对模型的修改由(6)、(7)、(9) 3 个式子就能计算出整个挡光环参数<sup>[17,18]</sup>, (8) 式则表明该模型考虑了散射的影响。

## 4 设计实例

所采用 R-C 光学系统的具体参数:焦距为 400 mm,口径为 210 mm,半视场角为  $0.864^\circ$ ,波长为  $9.7 \mu\text{m}$ 。如图 6 所示。

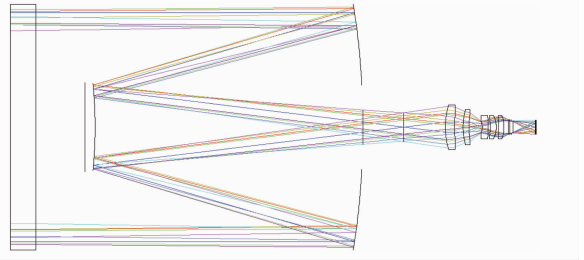


图 6 光学系统结构图

Fig. 6 Structure of optical system

针对该系统按照上述方法计算其外遮光罩参数:外遮光罩总长为 755 mm,前端保护玻璃往左共 458 mm,遮光罩内口径取 290 mm,厚度为 5 mm,外尺寸就是 300 mm,这样外尺寸长宽比接近 2.5:1,外观比较美观。

如图 5 标注  $H = 145 \text{ mm}$ ,  $D = 105 \text{ mm}$ ,  $L = 458 \text{ mm}$ ,当  $i=0$  时  $l_i=0$ ,  $d_i=105 \text{ mm}$ ,然后就能利用(6)~(9)式计算出第  $i$  个挡光环的大小、位置参数。如图 7 所示,该系统总共设计了 8 个挡光环,这是因为第 8 环底端位置距离遮光罩最左端 102 mm,往后的入射角  $\varphi = (2D + d_8) / (L - l_8) = (290 + 34.13) / 102$ ,已大于  $72^\circ$ ,这时的光线即使进入遮光罩,要到达保护玻璃前至少需先反射 5 次。

结合实际加工挡光环厚度为 2 mm,保护玻璃连接处倒角如图 7 所示。由于保护玻璃右端挡光环与保护玻璃冲突,所以两个挡光环仅为原来的一部分,接好后的总体图如图 7 所示,其具体参数如表 1 所示(以保护玻璃为 0 点,左负右正)。

如果没有考虑散射影响,那么经过计算后挡光环结构为 7 环,具体参数如表 2 所示。

表 1 散射模型下挡光环结构参数表

Table 1 Parameters of the rings based on scattering model

Ring number /mm	1	2	Protective glass	3	4	5	6	7	8
Bottom position /mm	149.5	62.00	0	-74.455	-175.121	-247.190	-299.642	-338.392	-356.00
Top position /mm	93.86	22.00	-5.00	-128.342	-212.150	-275.111	-320.310	-353.865	-366.45
Height /mm	40.50	21.18	40.00	39.06	37.77	34.41	33.89	33.54	34.13

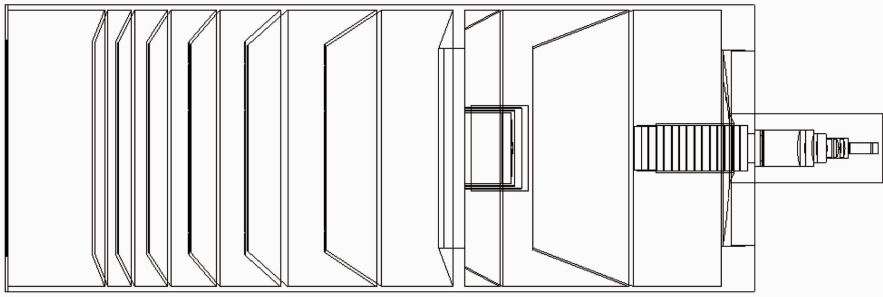


图7 光学系统总体结构图

Fig. 7 Whole structure of the optical system

表2 反射模型下挡光环结构参数表

Table 2 Parameters of the rings based on reflective model

Ring number	1	2	Protective glass	3	4	5	6	7
Bottom position /mm	149.5	62.00	0	-70.37	-171.44	-238.98	-290.08	-327.82
Top position /mm	93.86	22.00	-5.00	-123.43	-206.14	-266.00	-309.71	-342.15
Height /mm	40.50	21.18	40.00	38.14	36.83	35.89	35.16	34.59

## 5 仿真结果及分析

将基于散射和反射两种方法计算出的外遮光罩模型和光学系统模型在 TracePro 软件中一起建模, 并进行仿真分析, 材料表面属性  $AB_g$  模型参数分别设为:  $A=0.0003385, B=0.0001, g=3.5$  和  $A=0.03183, B=0.0001, g=0$ , TIS 均为 10%。得到其点源透射比(PST)曲线如图 8 所示。

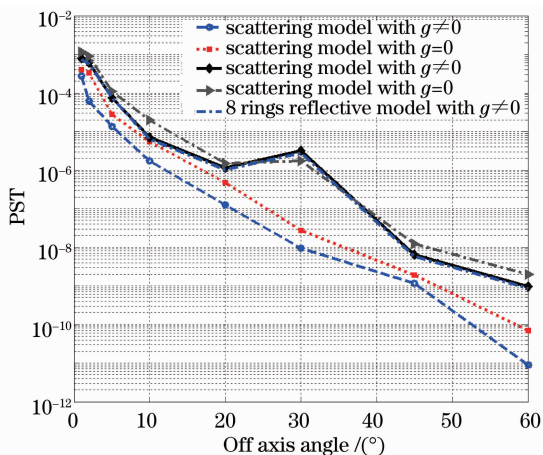


图8 PST 仿真测试结果

Fig. 8 PST simulation result

如图 8 中右上角图标标注, 分别给出了散射模型下  $g$  取非 0 时的结果、散射模型下  $g$  取 0 时的结果、反射模型下  $g$  取非 0 时的结果、反射模型下  $g$  取 0 时的结果以及反射模型下挡光环环数增加 1 个时  $g$  取非 0 时的结果。从该系统仿真测量的 PST 结果可以得出:

1) 由第一条和第三条曲线可以看出, 基于散射模型设计的外遮光罩抑制杂散光效果最好, 要比反射式的低一个数量级左右。

2) 由第一条和第二条曲线、第三条和第四条曲线可以看出实际散射模型和漫反射模型仿真结果有差别, 根据实际散射情况建模分析会更准确, 并且 PST 值要比漫反射结果低。

3) 由第三条和第五条曲线可以看出, 外遮光罩设计第二步中挡光环环数边界条件是正确的, 增加环数对抑制效果没有太大的提升。

4) 第三、四、五条曲线在离轴角  $30^\circ$  时出现了上升, 在仿真时发现光线在挡光环倒角上反射后又经过 4 次反射到达主镜, 然后按照正常光线光路到达像面。在实际应用设计时要避免这种情况发生, 但这里只有离轴角在  $30^\circ$  时出现, 并不影响整个分析对比结果。

5) 由第一条曲线可以看出, 该系统 PST 曲线下降较为平稳, 没有太大波动, 和理想情况符合较好, 细节上没有太大问题。

## 6 结 论

基于散射模型进行外遮光罩设计, 可以大大提升外遮光罩对杂散光的抑制水平, 并且在仿真分析时提高仿真精度。利用文中所述方法设计出的挡光环与遮光罩的材料散射情况有关, 随着遮光罩表面散射能量集中程度的降低, 需要的过度抑制角会增



大,挡光环数量也就会增加。但是挡光环数量的增加可能会带来如上面反射模型中离轴角  $30^\circ$  时的情况,使其发生几率增大,此时可以通过增加遮光筒口径来减少环数。实际应用时口径增大会导致体积和重量增加,所以外遮光罩的实际设计要考虑多方面问题。

## 参 考 文 献

- 1 Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Zhaohui *et al.*. Analysis of stray light caused by thermal radiation of infrared detection system[J]. *Acta Optic Sinica*, 2010, **30**(8): 2267~2271  
牛金星,周仁魁,刘朝晖等. 红外探测系统自身热辐射杂散光分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2267~2271
- 2 R. R. Breault, Control of Stray Light. In: Michaelbass. *Hand Book of Optics Volume 11* [M]. New York: McGraw-Hill, 1995. 38.1~38.34
- 3 S. H. C. P. McCall, S. M. Pompea, R. P. Breault *et al.*. Reviews of black surfaces for space and ground-band optical systems[C]. *SPIE*, 1993, **1753**: 158~170
- 4 S. McCall, R. L. Sinclair, S. M. Pompea *et al.*. Spectrally selective surfaces for ground and space-based instrumentation; support for a resource base[C]. *SPIE*, 1993, **1945**: 497~504
- 5 Li Ting, Yang Jianfeng, Ruan Ping *et al.*. Stray light analysis of the lunar-based optical telescope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(s): 137~141  
李 婷,杨建峰,阮 萍等. 月基光学天文望远镜(LOT)的杂散光分析[J]. *光子学报*, 2007, **36**(s): 137~141
- 6 Yan Peipei, Fan Xuewu. Optical design and stray light analysis of R-C system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **33**(4): 214~218  
闫佩佩,樊学武. R-C 光学系统设计及杂散光分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, **33**(4): 214~218
- 7 Liao Zhibo, Fu Ruimin, Zong Xiaoying. Optimal designing of baffle of star sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 987~990  
廖志波,伏瑞敏,宗肖颖. 星敏传感器遮光罩的优化设计[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 987~990
- 8 Guo Lixin, Wang Rui, Wu Zhensen. Theory and Method of Wave Scattering from Random Rough Surface [M]. Beijing: Science Press, 2010. 33~39  
郭立新,王 蕊,吴振森. 随机粗糙表面散射的基本理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2010. 33~39
- 9 T. A. Leonard, P. Rudolph. BRDF round robin test of ASTM E1392[C]. *SPIE*, 1995, **1165**: 285~293
- 10 Zhao Tingting, Tang Zhenfang, Tang Huaqing. Simulating analysis of light scattering properties of polycarbonate materials doped with barium sulfate microspheres[J]. *J. Light Scattering*, 2011, **23**(4): 301~305  
赵亭亭,唐振方,汤华清. 硫酸钡微球掺杂聚碳酸酯材料的光散射特性模拟分析[J]. *光散射学报*, 2011, **23**(4): 301~305
- 11 G. J. Ward. Measuring and modeling anisotropic reflection[J]. *Computer Graphics*, 1992, **26**(2): 265~272
- 12 S. M. Pompea, R. P. Breault. *Optical Black Surfaces In: Handbook of Optics (2nd Edition)* [M]. Washington DC: Optical Society of America, 2000. 6~8
- 13 TracePro 学习秘籍[M]. 上海: 讯技光电科技有限公司, 2006. 143~151
- 14 Wang Mingjun, Dong Yangbing, Wu Zhensen *et al.*. Research on light scattering characteristics of rough surface and optical constants deduction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(5): 549~552  
王明军,董雁冰,吴振森等. 粗糙表面光散射特性研究与光学常数反演[J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(5): 549~552
- 15 Mei Chao, Sizhong Zhou, M. Ming *et al.*. A new method of baffle design[J]. *Procedia Engineering*, 2011, **15**: 4516~4520
- 16 Du Baolin, Li Lin, Huang Yifan *et al.*. Optimum design and analysis of vane in satellite remote sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 233~236  
杜保林,李 林,黄一帆等. 星载遥感器的挡光环优化设计与分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 233~236
- 17 Huang Zhiqiang, Xing Tingwen. Principle and realization of baffle and vane's programmable design [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(4): 119~123  
黄智强,邢廷文. 遮光罩和挡光环程序化设计的原理及实现[J]. *光电工程*, 2006, **33**(4): 119~123
- 18 Gao Guopeng, Xiong Wang'e, Chen Rongli *et al.*. Program design of outer baffle vanes and improvement of conical inner baffle in R-C system[J]. *J. Applied Optics*, 2009, **30**(4): 575~579  
高郭鹏,熊望娥,陈荣利等. R-C 系统外遮光罩挡光环的程序化设计及锥状内遮光罩的改进[J]. *应用光学*, 2009, **30**(4): 575~579

栏目编辑: 韩 峰