

# 合金铝表面近红外波段光学常数的反演与 双向反射分布函数的计算

杨玉峰 吴振森 曹运华

(西安电子科技大学理学院, 陕西 西安 710071)

**摘要** 采用分光光度计测得了 $0.5\sim 1.5\ \mu\text{m}$ 波段抛光合金铝样片的镜反射率谱,利用常数外推法和幂函数外推法将其进行外推,获得了全波段的镜反射率谱。然后根据克拉默斯-克勒尼希(Kramers-Kronig)方法,反演获得了该样片在 $0.5\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 波段的复折射率和介电常数,与 $0.5\sim 1.5\ \mu\text{m}$ 波段椭偏仪的测量结果吻合良好。利用基尔霍夫法和反演得到的介电常数,计算了波长 $1.06\ \mu\text{m}$ 时粗糙合金铝样片的散射双向反射分布函数(BRDF),与BRDF测量仪得到的结果吻合良好。利用样片的粗糙度参数和外推的 $1.5\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 波段的介电常数,获得了粗糙合金铝样片在该波段的散射BRDF。

**关键词** 散射;克拉默斯-克勒尼希方法;粗糙度参数;光学常数;双向反射分布函数

**中图分类号** O436.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0229001

## Optical Constants Deduction and Scattering Bidirectional Reflectance Distribution Function Computation of Alloy Aluminum Surface in Near Infrared Waveband

Yang Yufeng Wu Zhensen Cao Yunhua

(School of Science, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract** Polishing alloy aluminum sample's specular reflection spectrum in waveband  $0.5\sim 1.5\ \mu\text{m}$  is measured by spectrophotometer, then it can be extrapolated to the all band by using constant and power function extrapolation. According to Kramers-Kronig (K-K) method, complex refractive index and dielectric constant of this sample in waveband  $0.5\sim 2.5\ \mu\text{m}$  are deduced, this result well coincides with ellipsometer's data in waveband  $0.5\sim 1.5\ \mu\text{m}$ . The rough alloy aluminum sample's scattering bidirectional reflectance distribution function (BRDF) at  $1.06\ \mu\text{m}$  is calculated using Kirchhoff method and deduced dielectric constant, which well coincides with BRDF measurer's data. Roughness parameters and dielectric constants extrapolated in waveband  $1.5\sim 2.5\ \mu\text{m}$  is used to calculate scattering BRDF of the rough alloy aluminum sample in this waveband.

**Key words** scattering; Kramers-Kronig (K-K) method; roughness parameter; optical constant; bidirectional reflectance distribution function (BRDF)

**OCIS codes** 290.1483; 290.5820; 290.5825; 240.3695

## 1 引 言

紫外、可见和红外波段的传输特性以及在目标表面或涂层的散射特性在目标探测、识别和特征提取中起着举足轻重的作用,其中主要的影响因素是

目标的材料和形状<sup>[1~5]</sup>。通常紫外与可见波段目标的散射特性基本上可以利用实验测得,而近红外波段目标表面材料的物理特性参数与光谱散射特性,尤其是散射的空间分布,很难直接获得。波长大于

**收稿日期**: 2010-05-10; **收到修改稿日期**: 2010-09-20

**基金项目**: 国家自然科学基金(60771038)和中央高校基本科研业务费专项资金(K50510070009)资助课题。

**作者简介**: 杨玉峰(1980—),男,博士研究生,主要从事目标光散射特性和图像处理等方面研究。

E-mail: yfyang@mail.xidian.edu.cn

**导师简介**: 吴振森(1946—),男,教授,主要从事目标与环境的光电特性与随机介质中的波传播与散射等方面的研究。

E-mail: wuzhs@mail.xidian.edu.cn

2 μm 的目标表面双向反射分布函数(BRDF)的获取,主要依靠实验测量,但是测量仪器受波长、水汽和二氧化碳等外在条件的影响造成很大误差,这给红外波段散射 BRDF 的准确获取带来很大困难。

克拉默斯-克勒尼希(K-K)法是 20 世纪 20 年代 Kramers 和 Kronig 最早提出的,主要用于研究光学常数实部与虚部之间的积分关系<sup>[6~12]</sup>。该方法的优点是可以利用有限波段的反射率谱反演等效光学常数。Gwo-Jen Jan 等<sup>[7]</sup>通过对半导体材料非晶体氢化硅反射率谱的分析并利用 K-K 法反演得到了它的复折射率和介电常数(表征电介质的极化程度)。周英彪等<sup>[12]</sup>通过 K-K 法利用透射率、消光因子等参变量得到了燃烧微粒的复折射指数。P. O. Nilsson 等<sup>[13]</sup>对 K-K 法在计算中的误差做了综合分析。

因为 K-K 法原则上适用于光滑面的光学常数反演。但大多数目标样片(例如合金铝样片)粗糙度参数偏大。为了满足 K-K 法的前提条件,对样片做了抛光处理。根据 0.5~1.5 μm 波段抛光样片的反射率谱,通过 K-K 法反演得到了该波段样片的复折射率和介电常数。同时与椭偏仪测量的复折射率实验值进行了比较,两者吻合良好。通过测量粗糙样片(未抛光样片)表面的粗糙度参数,对介电常数进行适当的外推,结合粗糙面散射基尔霍夫法计算了 0.5~1.5 μm 波段粗糙样片的散射 BRDF<sup>[14]</sup>。以 1.06 μm 激光为例,对粗糙样片的 BRDF 计算结果与 BRDF 测量仪测量得数据进行了比较,结果吻合良好。由此,通过对粗糙样片的复折射率外推,计算获得了 1.5~2.5 μm 波段粗糙样片的散射 BRDF。该方法避免了测量仪器受本身和外在条件的不利影响,解决了难于直接测量和测量不准确的问题,该方法简单易行并且反演结果较准确,基本满足了工程中对 BRDF 统计建模的要求<sup>[15~17]</sup>。

## 2 利用 K-K 法反演复折射率和介电常数

### 2.1 K-K 法理论基础

介质表面的菲涅耳公式可表示为

$$r = \frac{n - ik - 1}{n - ik + 1} = |r| \exp(-i\theta), \quad (1)$$

由(1)式可得

$$\ln r = \ln |r| - i\theta, \quad (2)$$

式中  $n$  为介质材料的折射率,  $k$  为消光系数,  $\theta$  代表频率的相移。利用 K-K 关系得<sup>[7,10]</sup>

$$\theta(\omega) = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\ln R(\omega') - \ln R(\omega)}{\omega^2 - \omega'^2} d\omega', \quad (3)$$

式中的积分可分成三部分计算<sup>[10]</sup>:

$$\theta(\omega) = \frac{\omega}{\pi} \int_{\omega_a}^{\omega_b} + \frac{\omega}{\pi} \left( \int_0^{\omega_a} + \int_{\omega_b}^{\infty} \right) = \theta_1(\omega) + \Delta\theta(\omega). \quad (4)$$

对波段  $\omega_a \leq \omega' \leq \omega_b$  上的反射率谱  $R(\omega')$  采用梯形法求积分可得  $\theta_1(\omega)$ 。要计算  $\Delta\theta(\omega)$  就需要对  $0 < \omega' < \omega_a$  和  $\omega_b < \omega' < \infty$  两个波段上的反射率谱  $R(\omega')$  进行合理的估计。

$0 < \omega' < \omega_a$  低能区域对总积分值的影响非常小,通常采用常数法估计反射率

$$R(\omega') = R(\omega_a), \quad (5)$$

与低能区域相比,频率大于  $\omega_b$  的高能区域的反射率  $R(\omega')$  估计要重要得多,并且只有当测量的反射率谱高能端  $\omega_b$  足够大时,这种外推才更有效。而通常采用的方法是幂函数外推<sup>[10]</sup>:

$$R(\omega') = R(\omega_b) \left( \frac{\omega'}{\omega_b} \right)^{-p}, \quad (6)$$

式中  $p$  是一个优化参数,可以利用已知波段的折射率来拟合获取一个合适值。由此可得出频率相移为

$$\Delta\theta(\omega) = \frac{1}{2\pi} \ln \left[ \frac{R(\omega_b)}{R(\omega)} \right] \ln \left| \frac{\omega_b - \omega}{\omega_b + \omega} \right| - \frac{\omega}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} r_{2k} \omega^{2k}, \quad (7)$$

式中  $r_{2k} = \frac{-p}{(2k+1)^2 \omega_b^{-2k-1}}$ 。计算  $\omega_a \leq \omega \leq \omega_b$  内频率相移  $\theta_1(\omega)$  积分时,奇异点用该点的微商值来确定

$$\lim_{\omega' \rightarrow \omega} \frac{\ln R(\omega') - \ln R(\omega)}{\omega^2 - \omega'^2} = - \frac{1}{2\omega R(\omega)} \frac{dR}{d\omega} \Big|_{\omega}, \quad (8)$$

总的频率相移为

$$\theta(\omega) = \theta_1(\omega) + \Delta\theta(\omega), \quad (9)$$

利用菲涅耳公式  $r = (n - ik - 1)/(n - ik + 1)$  和  $r = |r| \exp(-i\theta)$  得到折射率实部为

$$n(\omega) = \frac{1 - R(\omega)}{1 + R(\omega) - 2 \sqrt{R(\omega)} \cos \theta(\omega)}, \quad (10)$$

折射率虚部为

$$k(\omega) = \frac{2 \sqrt{R(\omega)} \sin \theta(\omega)}{1 + R(\omega) - 2 \sqrt{R(\omega)} \cos \theta(\omega)}, \quad (11)$$

复介电常数为

$$\epsilon = \epsilon_1 + i\epsilon_2, \quad (12)$$

式中介电常数的实部为  $\epsilon_1 = n^2(\omega) - k^2(\omega)$ , 虚部为  $\epsilon_2 = 2n(\omega)k(\omega)$ 。利用(10)式和(11)式可以根据光谱反射率对微粗糙材料的复折射率进行反演。

## 2.2 反演复折射率和介电常数

因为 K-K 法仅适用于微粗糙面的光学常数反演,所以首先对合金铝样片进行抛光处理以增加镜反射率,抛光前后分别命名为样片 A 和样片 B。样片 A 和 B 的粗糙度参数采用英国 FORM TALYSURF 系列 2 表面轮廓仪测量,样片 A 的粗糙度参数  $\delta=0.14 \mu\text{m}$ ,  $l=2.4 \mu\text{m}$ ,两个参数分别为表面高度起伏标准偏差和相关长度,样片 B 的粗糙度参数为  $\delta=0.03 \mu\text{m}$ ,  $l=19 \mu\text{m}$ 。

反射率谱是采用 Varian Cary 2390 型可见-近红外分光光度计测得的,测量入射角为  $3.2^\circ$ ,抛光样片 B 的镜反射率谱测量结果,如图 1 所示。

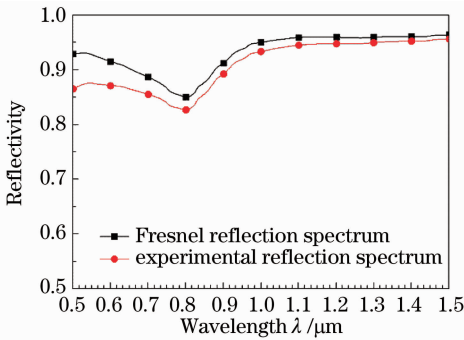


图 1 样片 B 的镜反射率谱及相应的菲涅耳反射率谱  
Fig. 1 Specular reflection spectrum and the corresponding Fresnel reflection spectrum of sample B

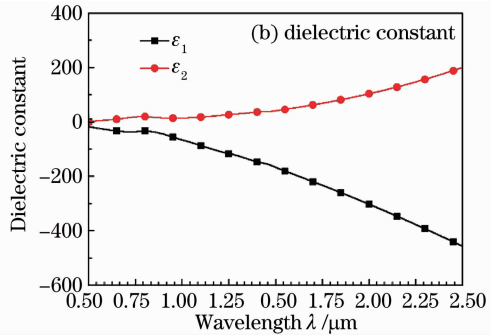
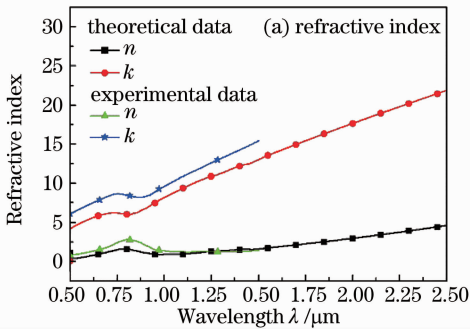


图 2 样片 B 的折射率曲线和介电常数

Fig. 2 Refractive index curve and dielectric constant of sample B

用 K-K 法反演折射率过程中,影响精度的主要因素来源于两方面:1)反射率谱的选择,若反射率谱高能段省略太多势必会造成反演结果的不准确。文中选择的反射率谱是  $0.5 \sim 1.5 \mu\text{m}$  这一段,基本满足要求。2)优化参数  $p$  的选择是影响反演效果的关键因素,若  $p$  过大或过小都会造成外推结果偏离真实值。为了保证反演的准确性,首先利用  $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$  波段的复折射率实验值作为反演初值,通过遗传算法确定优化参数  $p=0.9$ 。在确定了优化参

从图 1 中可以看出,抛光样片 B 的镜反射率很大,并且在  $0.8 \mu\text{m}$  处反射率谱出现了一个突变点,这是由于材料本身特性造成的。由于实验中样片的表面是微粗糙面,因此其反射率谱明显小于理想光滑表面时的菲涅耳反射率谱。

在微粗糙情况下,对于高斯分布粗糙平面由平均相干反射系数和菲涅耳反射率谱之间的关系式为<sup>[18]</sup>

$$\langle R_r(\theta_i) \rangle = R_r(\theta_i) \exp[-(k_0 \delta \cos \theta_i)^2 / 2]. \quad (13)$$

可得菲涅耳反射率谱如图 1 所示,其中  $R_r(\theta_i)$  为菲涅耳反射系数,  $\langle R_r(\theta_i) \rangle$  为粗糙面平均反射系数。由此根据(10)式和(11)式,利用菲涅耳反射率谱可以反演获得样片的复折射率。

图 2 给出了  $0.5 \sim 1.5 \mu\text{m}$  波段折射率谱的实验值和理论值,其中实验值是利用德国 SENTECH Instruments 公司 M-2000UI 型号椭偏仪测量的。与实验值比较可知,在波长小于  $0.9 \mu\text{m}$  时理论值和实验值稍有差异,这是由于在  $0.8 \mu\text{m}$  反射率谱的变化影响到了折射率的反演,但是理论值与实验值的曲线形状基本一致,并且在波长大于  $0.9 \mu\text{m}$  以后,理论值与实验值吻合得较好,这说明 K-K 法反演折射率是比较成功的。图 2 为反演介电常数随波长的变化曲线。

数后,为保证反演结果的准确性只计算了  $1.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$  波段的复折射率,为了验证反演结果的准确性,又进一步与  $1.0 \sim 1.5 \mu\text{m}$  波段的测量折射率(未参与反演的实验数据)进行了比对。通过计算,反演折射率实部的相对平方和误差为  $3.16\%$ ,虚部的相对平方和误差为  $2.08\%$ ,这说明反演结果还是相当准确的。因为样片介电常数在抛光前后是相同的,所以反演得到的介电常数即是样片 A 的介电常数,再结合基尔霍夫法就可以近似计算样片 A 近红

外波段的散射 BRDF。

### 3 基尔霍夫法近似计算 BRDF

粗糙物体散射截面由相干和非相干部分组成,当平面波以  $\theta_i$  角度入射到各向同性的随机粗糙平面时,由于表面均方根斜度  $s \approx \sqrt{2}\delta/l < 0.25$ , 所以根据基尔霍夫的标量近似方法,可得相干散射系数为<sup>[11]</sup>

$$\sigma_{pq}^r = \pi k_1^2 |a_0|^2 \delta(q_x) \delta(q_y) \exp(-q_z^2 \delta^2), \quad (14)$$

它表明只有当  $q_z \delta$  值较小时,相干散射项才是显著的,由于式中  $\delta(\cdot)$  函数的作用,故当  $p \neq q$  时,相干散射系数就为零值。式中  $q_x = k_1(\sin \theta_s \cos \phi_s - \sin \theta \cos \phi)$ ,  $q_y = k_1(\sin \theta_s \sin \phi_s - \sin \theta \sin \phi)$ ,  $q_z = k_1(\cos \phi_s + \cos \phi)$ ,  $k_1$  表示介质中的波数,  $a_0$  称为极化系数。

非相干部分的散射系数为

$$\sigma_{pp,n}^r = (|a_0| k_1 l/2)^2 \exp(-q_z^2 \delta^2) \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(q_z^2 \delta^2)^n}{n! n} \exp\left[-\frac{(q_x^2 + q_y^2) l^2}{4n}\right]. \quad (15)$$

由表面斜度引起的散射系数项为

$$\sigma_{pqs}^r = -(k_1 \delta)^2 (q_z/2) \times \exp(-q_z^2 \delta^2) \operatorname{Re}\{a_0(q_x a_1^* + q_y a_2^*)\} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(q_z^2 \delta^2)^{n-1}}{n! n} \exp\left[-\frac{(q_x^2 + q_y^2) l^2}{4n}\right]. \quad (16)$$

完整的散射系数表达式可写为

$$\sigma_{pq}^r = \sigma_{pq}^r + \sigma_{pqn}^r + \sigma_{pqs}^r, \quad (17)$$

式中  $p$  和  $q$  表示极化方向。

对于非极化接收,可得获得激光雷达截面(LRCS)<sup>[11]</sup>

$$\sigma^r = (\sigma_{pp}^r + \sigma_{pq}^r + \sigma_{qp}^r + \sigma_{qq}^r)/2, \quad (18)$$

由 BRDF 与 LRCS 的关系<sup>[15]</sup>可得

$$f_r = \frac{\sigma^r}{4\pi \cos \theta_i \cos \theta_r}. \quad (19)$$

### 4 外推近红外散射 BRDF

样片 A 的粗糙度参数为  $\delta = 0.14 \mu\text{m}$ ,  $l = 2.4 \mu\text{m}$ ,以基尔霍夫标量近似法求粗糙面点的散射场。为了验证散射 BRDF 外推结果的正确性,首先以  $1.06 \mu\text{m}$  时的理论计算值与 BRDF 测量仪的测量值进行比较,其中入射角为  $10^\circ$ ,入射波长  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ ,介电常数为  $-77.98 + i16.05$ 。

图 3 表示理论计算值与 BRDF 测量仪的测量值基本吻合,只是峰值位置略有偏移,这是由于 BRDF 测量仪在测量过程中角度误差的累积造成的。

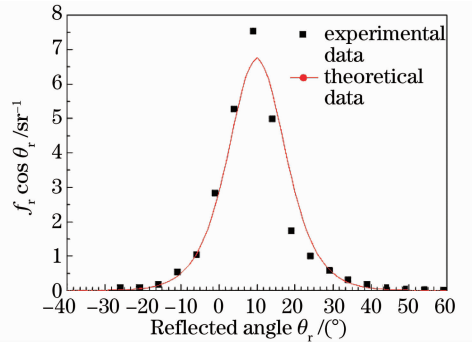


图 3 波长  $1.06 \mu\text{m}$  时样片 A 的  $f_r \cos \theta_r$

Fig. 3  $f_r \cos \theta_r$  of sample A at  $1.06 \mu\text{m}$

基于样片 B 反演得到的近红外介电常数外推到  $1.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$  波段,结合测量的粗糙度参数,利用基尔霍夫法就可以外推样片 A 的近红外波段散射 BRDF,以下仅列出了其中三个波长的 BRDF。

图 4 给出了样片 A 在波长为  $1.5, 2, 2.5 \mu\text{m}$  时不同入射角随散射角变化的  $f_r \cos \theta_r$  曲线。外推获得三个波长的介电常数分别为  $-166.22 + i41.11$ ,  $-302.34 + i103.87$  和  $-456.73 + i200.68$ 。

图 4(a)~4(c)表示不同波长样片的  $f_r \cos \theta_r$  曲线的幅度均不相同。当入射角等于散射角时,  $f_r \cos \theta_r$  曲线达到峰值。波长越大峰值幅度越小,即  $f_r \cos \theta_r$  越小,例如  $20^\circ$  入射时,其峰值从  $1.5 \mu\text{m}$  时的 4 减小到  $2.5 \mu\text{m}$  时的 1.4,其他角度也是这样的趋势。但随着波长的增大,峰值归一化后角分布变宽。这主要是由于样品材料色散性造成的,随着波长的增大,折射率变大,介电常数绝对值也变大,造成样片表面回波能量变小,因此导致峰值变小。从图中可知镜反射方向有明显的峰值,尤其图 4(c)中的峰值最为突出,这是由于基尔霍夫方法计算得到的散射系数是由相干散射系数、非相干散射系数和由表面斜度引起的散射系数三部分相加而得,而相干散射系数只存在于镜反射方向附近很小的区域,所以镜反射方向形成了明显的峰值。

### 5 结 论

测量了抛光后某合金铝样片的粗糙度参数和  $0.5 \sim 1.5 \mu\text{m}$  波段上的镜反射率谱,基于 K-K 方法利用遗传算法反演得到了该铝样片的复折射率和介电常数,与椭偏仪测量的结果相比,反演所得的复折射率实部的相对平方和误差为  $3.16\%$ ,虚部的相对平方和误差为  $2.08\%$ 。并且利用反演的介电常数和基尔霍夫法理论计算了该样片在波长为  $1.06 \mu\text{m}$  时的散射 BRDF,与 BRDF 测量仪所得到的结果吻

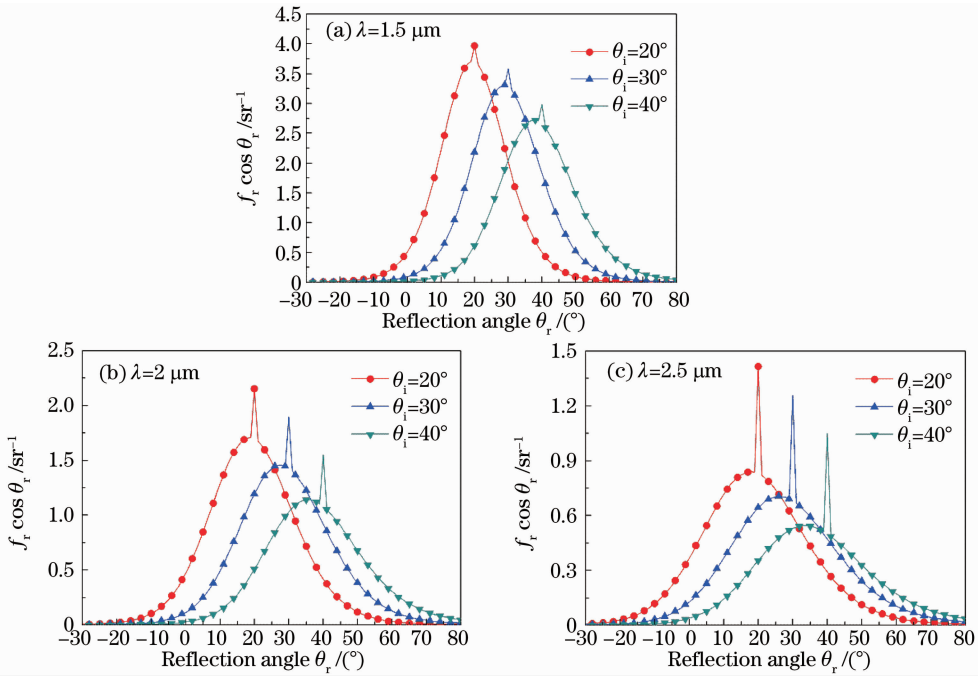


图4 波长为 1.5, 2.0, 2.5  $\mu\text{m}$  时样片 A 的  $f_r \cos \theta_r$   
 Fig. 4  $f_r \cos \theta_r$  of sample A where  $\lambda$  is 1.5, 2.0, 2.5  $\mu\text{m}$

合良好。最后通过外推获得了 1.5~2.5  $\mu\text{m}$  波段的介电常数,计算了样片近红外散射 BRDF,分析了  $f_r \cos \theta_r$  峰值随入射波长的变化趋势。该方法简单易行且结果较精确,基本满足了工程中对 BRDF 统计建模的要求,为下一步研究目标光谱散射特性提供了一定指导。

### 参 考 文 献

- 1 Bai Lu, Tang Shuangqing, Wu Zhensen *et al.*. Transmission characteristic of external mixture of aerosol from ultraviolet to visible light band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30** (8): 2175~2179
- 白璐, 汤双庆, 吴振森等. 紫外到可见波段外混合气溶胶的传输特性[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2175~2179
- 2 Li Yanhui, Wu Zhensen, Wu Yingli. Small damping vibration measurement using laser Doppler effect [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 231~235
- 李艳辉, 吴振森, 武颖丽. 基于激光多普勒法测量微小阻尼振动[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 231~235
- 3 Jing Xu, Chen Gao, Mao Rui. Investigation of characteristics of stimulated Raman scattering in  $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$  crystal at ultraviolet wave band [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1950~1955
- 井旭, 陈高, 毛瑞. 硝酸钡晶体紫外波段受激拉曼散射特性研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 1950~1955
- 4 Ma Huilian, Bao Huiqiang, Jin Zhonghe. Backscattering in a silica optical waveguide ring resonator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 105~109
- 马慧莲, 鲍慧强, 金中和. 二氧化硅光波导环形谐振腔的背向散射特性[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 105~109
- 5 Wang Xiangwei, Zhou Tianhua, Chen Weibiao. Study on laser backscattering properties by ship wakes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 14~18
- 王向伟, 周田华, 陈卫标. 舰船尾流激光后向散射特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 14~18

- 6 Ikswa S., Ohba T.. Measurement of far-infrared optical constants by atr [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1985, **6**(4): 287~306
- 7 Jan Gwojen, Huang Yingsheng. Optical properties of hydrogenated amorphous silicon [J]. *Chinese Journal of Physics*, 1986, **24**(1): 19~28
- 8 Karakassides M. A., Petridis D., Gournis D.. Infrared reflectance study of thermally treated Li- and Cs-montmorillonites [J]. *Clays and Clay Minerals*, 1997, **45**(5): 649~658
- 9 Moravec T. J., Rife J. C., Dexter R. N.. Optical constants of nickel, iron, and nickel-iron alloys in the vacuum ultraviolet [J]. *Phys. Rev. B*, 1976, **13**(8): 3297~3306
- 10 Wallis D. H., Wickramasinghe N. C.. Determination of optical spectra by a modified Kramers-Kronig integral [J]. *Astrophysics and Space Science*, 1999, **262**(2): 193~213
- 11 Han Jianjun, Liu Jixiang, Zhou Xuedong. Study on calculation method for oxide glasses infrared optical constants [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(10): 1420~1425
- 韩建军, 刘继翔, 周学东. 氧化物玻璃的中红外光学常数计算方法的探讨[J]. *光学学报*, 1999, **19**(10): 1420~1425
- 12 Zhou Yingbiao, Liu Zhaohui, Ruan Liming *et al.*. The cold and fired test and application of a slit bluff-body burner [J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech.*, 1997, **25**(1): 74~85
- 周英彪, 柳朝晖, 阮立明等. 燃烧微粒复折射率及辐射特性参数的求解[J]. *华中理工大学学报*, 1997, **25**(1): 74~85
- 13 Nilsson P. O., Munkby L.. Investigation of errors in the Kramers-Kronig analysis of reflectance data [J]. *Chemistry and Material Science*, 1969, **10**(3): 290~298
- 14 Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K.. Microwave remote sensing [M]. San Jose: Addison-Wesley, 1982, 295~307
- 15 Renhorn I. G. E., Boreman G. D.. Analytical fitting model for rough-surface BRDF [J]. *Opt. Express*, 2008, **16** (17): 12892~12898
- 16 Ozturk A., Kurt M., Bilgili A. *et al.*. Linear approximation of bidirectional reflectance distribution functions [J]. *Computers & Graphics*, 2008, **32**(2): 149~158
- 17 Cao Yunhua, Wu Zhensen, Zhang Hanlu *et al.*. Experimental

- measurement and statistical modeling of spectral bidirectional reflectance distribution function of rough target samples[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 792~798
- 曹运华, 吴振森, 张涵璐等. 粗糙目标样片光谱双向反射分布函数的实验测量及其建模[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 792~798
- 18 Wu Zhensen. IR Laser Backscattering by arbitrarily shaped dielectric object with rough surface[J]. *Journal of Electronics*, 1993, **15**(4): 359~366
- 吴振森. 任意形状粗糙物体红外激光后向散射[J]. *电子科学学报*, 1993, **15**(4): 359~366
- 19 Wu Zhensen, Han Xiang'e, Zhang Xiangdong *et al.*. Experimental study for bidirectional reflectance distribution function of laser scattering for various rough surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(3): 262~268
- 吴振森, 韩香娥, 张向东等. 不同表面激光双向反射分布函数的实验研究[J]. *光学学报*, 1996, **16**(3): 262~268