

文章编号: 1672-8785(2020)04-0020-07

基于偏振测量的粗糙表面参数反演方法

张正林 陈锦成 韩玉阁

(南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘 要: 材料的复折射率是计算偏振度时不可缺少的物理参数。由于直接测量复折射率较为困难, 在现有的粗糙表面偏振双向反射分布函数(polarized Bidirectional Reflectance Distribution Function, pBRDF)的基础上, 推导了材料的偏振反射率表达式, 提出了入射光线为线性偏振时材料表面参数的反演方法, 提高了复折射率计算的适用性。反演结果与文献中参考值的对比表明, 该反演方法具有较高的可靠性。

关键词: 偏振; 复折射率; 偏振反射率

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.04.004

Inversion Method of Rough Surface Parameters Based on Polarization Measurement

ZHANG Zheng-lin, CHEN Jin-cheng, HAN Yu-ge

(School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The complex refractive index of materials is an indispensable physical parameter for calculating the degree of polarization. Since it is relatively difficult to measure the complex refractive index directly, the polarized reflectivity expression of the materials is derived, and an inversion method of surface parameters is proposed when the incident light is linearly polarized based on the existing polarized bidirectional reflectance distribution function of rough surfaces, which can improve the applicability of the complex refractive index calculation. The comparison between the inversion results and the reference values indicates that the inversion method has good reliability.

Key words: polarization; complex refractive index; polarized reflectance

0 引言

偏振是电磁波的固有属性之一。在电磁波的传播过程中, 其偏振态会随着角度、温度以及所受辐射强度的变化而变化。与红外辐射强度相比, 偏振态对环境因素的变化更加敏感。

因此, 偏振探测可以提高探测和识别的精度及准确度, 是对传统遥感探测的一个有益补充。

偏振探测建立在求解偏振度的基础上。材料的复折射率通过影响偏振双向反射缪勒矩阵而间接地决定了偏振度。该矩阵可用于计算物

收稿日期: 2020-04-11

作者简介: 张正林(1993-), 男, 河南三门峡人, 硕士研究生, 主要从事复杂目标表面的偏振特性研究。
E-mail: 1159655950@qq.com

体在反射辐射和自身辐射下的偏振度^[1]。因此, 测量材料表面的复折射率是计算材料偏振度的基础。在工程中, 一般使用透射反射法和椭圆偏振法来测定材料表面的复折射率^[2]。其中, 透射反射法要求被测介质是透明或者半透明的, 椭圆偏振法一般需要将被测物体加工成均质且表面光滑的薄片。

针对复折射率测试方法对介质要求过高的问题, Thilak V 等人^[3-4]提出了通过用被动旋光仪收集多个测量值来联合反演复折射率及探测角的方法, 并通过多次改变偏振探测器的出射角来获取物体的斯托克斯矢量以反演复折射率及入射角。该方法对实验器材要求较高, 需要使用高精度线性偏振探测器、光谱滤波器以及相应旋转光学平台等, 因此适用性较差。

针对以上反演方法存在的问题和不足, 本文在其基础上加以改进, 通过测量材料的半球偏振反射率建立了表面光学常数和粗糙度系数反演模型, 并利用该模型对材料表面参数进行了反演。对比粗糙度的反演值与实际测量值后可知, 本文方法具有较好的适用性和可靠性, 且对材质表面的光学特性没有特殊要求。

1 偏振的传输模型

在工程中, 通常使用斯托克斯矢量 \mathbf{S} 来描述光的偏振状态。该矢量不仅可以描述椭圆偏振, 也可以描述随机偏振。斯托克斯矢量是一个四维矢量, 其定义式为^[1]

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, 四个量分别描述一束光所包含的四种可测量的偏振状态: S_0 与出射光光强相关, S_1 与水平偏振出射光相关, S_2 与 45° 或 135° 斜偏振出射光相关, S_3 与圆偏振出射光相关^[5]。如图 1 所示, 一束光通过某个光学系统后, 其偏振状态发生改变, 相应的斯托克斯矢量也发生改变。图 1 中的 \mathbf{S}_i 和 \mathbf{S}_r 分别为入射光和出射光的斯托克斯矢量。

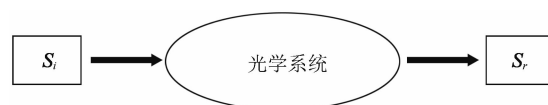


图 1 光学系统的示意图

缪勒矩阵 \mathbf{M} 可以表征光学系统对入射光偏振态的影响。对于一般的光学系统, 光偏振态的变化可表示为

$$\mathbf{S}_r = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}_i = \begin{pmatrix} S_0^r \\ S_1^r \\ S_2^r \\ S_3^r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_0^i \\ S_1^i \\ S_2^i \\ S_3^i \end{pmatrix} \quad (2)$$

粗糙表面也是一种可以改变入射光偏振态的光学系统。入射光被物体表面反射后, 其偏振态也随之改变。粗糙表面对入射光偏振态的影响可以用 pBRDF 来描述。它可以同时描述表面的散射和偏振特性^[7]。pBRDF 来自双向反射分布函数 (BRDF) 模型^[8]。该模型将反射光分成反射项和散射项, 弥补了 Thilak V 等人所提方法的不足。在微观上, 粗糙表面可以视为一组微元面的集合。假设每个微元面均绝对光滑且遵循菲涅耳方程, 计算中忽略体散射的影响且认为体散射只由表面散射或镜面散射引起。在以上这些条件下, pBRDF 可以表示为^[9]

$$f_{ij}(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi) = \frac{\exp[-\tan^2(\theta_N)/2\sigma^2]}{(2\pi)(4\sigma^2)\cos^4(\theta_N)\cos(\theta_i)} \times m_{ij}(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi) \quad (3)$$

式中, f_{ij} 为 pBRDF 缪勒矩阵中的元素, m_{ij} 表示菲涅耳反射缪勒矩阵中的元素, i 与 j 分别为该矩阵的行序号与列序号, $\Delta\phi$ 为入射光和出射光周向角之差, θ_N 为微元面法线与宏观面法线的夹角。图 2 为式 (3) 中角度的示意图。

2 阴影遮挡效应修正

从微观上来说, 某一表面的粗糙度是由多个微元面之间不同的位置关系造成的。由于微元面之间可能存在相互重叠以及随机分布的情况, 因此经某一微元面反射后的光线可能会被其他微元面遮挡, 导致无法在探测点观测到该

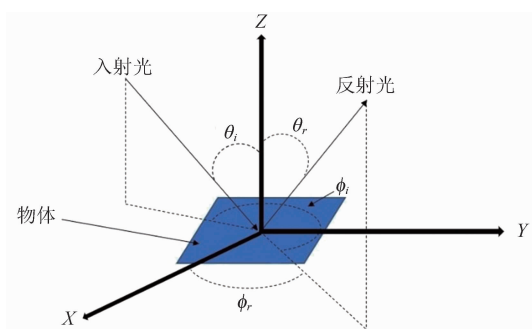


图2 pBRDF的示意图

微元面的反射光。如图3所示,某微元面受其他微元面遮蔽的效果可以分为以下三种情况:(1)全入射及全反射;(2)全入射及部分反射;(3)部分入射。

式(3)中的pBRDF模型不能体现微元面之间的遮挡情况,因此Beard J和Maxwell J P提出了B-M修正模型^[9]:

$$\rho' = \frac{R(\beta)\rho_s(\theta_N)\cos^2\theta_N}{R(0)\cos\theta_r\cos\theta_i} \left[\frac{1+\theta_N}{1+\theta_N \cdot \exp(-2\beta/\tau)/\Omega} \right] + \rho_d + \frac{2\rho_v f(\beta)g(\theta_N)}{\cos\theta_r + \cos\theta_i} \quad (4)$$

式(4)中的 ρ' 等于式(3)中的 f 。文献[10]中, $\rho_s(\theta_N)$ 被写作 $f_{ZBS}(\theta_N)$,并表示为

$$f_{ZBS}(\theta_N) = \frac{R(0)D(\theta_N, \phi_N)}{4\cos\theta_r\cos\theta_i} \quad (5)$$

式中, R 为非涅尔反射系数, ρ_d 为散射项, ρ_v 为体积影响因子, $f(\beta)$ 和 $g(\theta_N)$ 为具体描述体积影响因子的数学函数,可依据具体的表面材质和情况给出经验公式。在计算中,Maxwell J R一般假设 $f(\beta)=g(\theta_N)=1$ 。为了简化计算, $\rho_d + \frac{2\rho_v f(\beta)g(\theta_N)}{\cos\theta_r + \cos\theta_i}$ 一般可以省略。式中, $D(\theta_N, \phi_N)$ 为微元面的经验密度函数。

结合式(3)和式(4)可得,改进后的pBRDF可以表示为

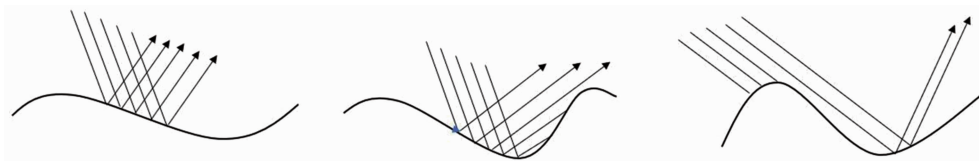


图3 粗糙面遮挡效应的示意图

$$f_{ij}(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi) = B_n \cdot \frac{[\Omega + \theta \cdot \exp(-2\beta/\tau)] \cos\theta_i \cos\theta_r}{(\Omega + \Omega\theta) \cos^2(\theta_N)} \frac{\exp[-\tan^2(\theta_N)/2\sigma^2]}{(2\pi)(4\sigma^2) \cos^4(\theta_N) \cos(\theta_r) \cos(\theta_i)} \cdot m_{ij}(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi) \quad (6)$$

式中, B_n 为比例修正系数,用于修正大角度下反射率过大的问题。将式(6)代入式(2),并用 \mathbf{F}_r 来表示pBRDF缪勒矩阵,则入射光经粗糙表面反射后的偏振态变化可以表示为

$$\mathbf{S}_r = \mathbf{F}_r \cdot \mathbf{S}_i = \mathbf{F}_r \times \begin{bmatrix} S_0^i \\ S_1^i \\ S_2^i \\ S_3^i \end{bmatrix} \quad (7)$$

3 反演理论与反演算法

当入射光为垂直线性偏振光时,经材质表面反射后光的斯托克斯矢量可以表示为

$$\begin{bmatrix} S_0^r \\ S_1^r \\ S_2^r \\ S_3^r \end{bmatrix} = \mathbf{F}_r \times \begin{bmatrix} S_0^i \\ S_1^i \\ S_2^i \\ S_3^i \end{bmatrix} = \mathbf{F}_r \times \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{00} & f_{01} & f_{02} & f_{03} \\ f_{10} & f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{20} & f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{30} & f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{00} - f_{01} \\ f_{10} - f_{11} \\ f_{20} - f_{21} \\ f_{30} - f_{31} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中, S_k^i 与 S_k^r (k 取0,1,2,3)分别为垂直线性偏振入射光与反射光的斯托克斯矢量。由式(8)可知,当入射光为垂直线性偏振光时,该表面的反射率为

$$R_s = \frac{S_0^r}{S_0^i} = \frac{f_{00} - f_{01}}{1} = f_{00} - f_{01} \quad (9)$$

当入射光为自然光(即随机偏振光)时,经某一表面反射后光的斯托克斯矢量为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} S_0^r \\ S_1^r \\ S_2^r \\ S_3^r \end{bmatrix} &= \mathbf{F}_r \times \begin{bmatrix} S_0^i \\ S_1^i \\ S_2^i \\ S_3^i \end{bmatrix} = \mathbf{F}_r \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} f_{00} & f_{01} & f_{02} & f_{03} \\ f_{10} & f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{20} & f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{30} & f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{00} \\ f_{10} \\ f_{20} \\ f_{30} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

此时, 该表面的反射率为

$$R_0 = \frac{S_0^r}{S_0^i} = \frac{f_{00}}{1} = f_{00} \quad (11)$$

由式(11)可知, 当某一表面上的入射光为自然光时, f_{00} 为该表面的反射率。

P-G 模型的非涅耳反射缪勒矩阵为^[11]

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & 0 & 0 \\ m_{01} & m_{00} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{22} & -m_{23} \\ 0 & 0 & m_{23} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (12)$$

根据 P-G 模型, 当入射光为自然光时, 经某一表面反射后光的斯托克斯矢量可以表示为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} S_0^r \\ S_1^r \\ S_2^r \\ S_3^r \end{bmatrix} &= \mathbf{F}_r \times \begin{bmatrix} S_0^i \\ S_1^i \\ S_2^i \\ S_3^i \end{bmatrix} = \mathbf{F}_r \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} f_{00} & f_{01} & 0 & 0 \\ f_{01} & f_{00} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & f_{22} & -f_{23} \\ 0 & 0 & f_{23} & f_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{00} \\ f_{01} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

由琼斯矩阵代换可知, 反射光的 S_1^r 仅与该平面的反射分量有关。因此本文的复折射率利用了 f_{01} 与 S_1^r 之间的数学关系, 具体推导过程见文献 [11]。由菲涅耳反射定律可知:

$$f_{01} \propto m_{01} = \frac{1}{2} |R_s - R_p| \quad (14)$$

式中, R_s 与 R_p 分别是垂直波与平行波的反射率, 它们的表达式如下:

$$R_s = \frac{(A - \cos\beta)^2 + B^2}{(A + \cos\beta)^2 + B^2} \quad (15)$$

$$R_p = \frac{(A - \sin\beta \tan\beta)^2 + B^2}{(A + \sin\beta \tan\beta)^2 + B^2} \quad (16)$$

由式(14)可知, f_{01} 正比于 m_{01} 。将式(14)~式(16)代入式(6), 可得

$$\begin{aligned} f_{01} &= \frac{(A - \cos\beta)^2 + B^2}{(A + \cos\beta)^2 + B^2} \cdot \frac{A \sin\beta \tan\beta}{(A + \sin\beta \tan\beta) + B^2} \\ &\times \frac{\Omega + \theta_N \exp(-2\beta/\tau)}{\Omega + \theta_N} \cdot \frac{B_n \exp[-\tan^2(\theta_N)/2\sigma^2]}{8\pi\sigma^2 \cos^3(\theta_N)} \\ &\times \frac{1}{\cos\theta_i \cos\theta_r} \end{aligned} \quad (17)$$

由式(9)可知, 垂直波偏振反射率的测量值 R'_s 可表示为

$$\begin{aligned} R'_s = f_{00} - f_{01} &= R_0 \frac{(A - \cos\beta)^2 + B^2}{(A + \cos\beta)^2 + B^2} \\ &\times \frac{A \sin\beta \tan\beta}{(A + \sin\beta \tan\beta) + B^2} \cdot \frac{\Omega + \theta_N \exp(-2\beta/\tau)}{\Omega + \theta_N} \\ &\times \frac{B_n \exp[-\tan^2(\theta_N)/2\sigma^2]}{8\pi\sigma^2 \cos^3(\theta_N)} \cdot \frac{1}{\cos\theta_i \cos\theta_r} \end{aligned} \quad (18)$$

对 R'_s 进行半球积分, 可得入射光垂直波的偏振半球积分反射率:

$$\begin{aligned} y(n, k, \tau, B_n, \sigma, \Omega, \theta_i, \theta_r, \Delta\phi) &= R_0 \\ &- \int_{2\pi} \left\{ \frac{(A - \cos\beta)^2 + B^2}{(A + \cos\beta)^2 + B^2} \cdot \frac{A \sin\beta \tan\beta}{(A + \sin\beta \tan\beta) + B^2} \right. \\ &\times \frac{\Omega + \theta_N \exp(-2\beta/\tau)}{\Omega + \theta_N} \cdot \frac{B_n \exp[-\tan^2(\theta_N)/2\sigma^2]}{8\pi\sigma^2 \cos^3(\theta_N)} \\ &\left. \times \frac{1}{\cos\theta_i \cos\theta_r} \right\} d\omega \end{aligned} \quad (19)$$

中间参数 A、B、C、D 以及材料表面的复折射率 n 、 k 之间的关系如下:

$$A = \sqrt{\frac{\sqrt{C} + D}{2}} \quad (20)$$

$$B = \sqrt{\frac{\sqrt{C} - D}{2}} \quad (21)$$

$$C = 4n^2 k^2 + D^2 \quad (22)$$

$$D = n^2 - k^2 - \sin^2\beta \quad (23)$$

式(19)~(23)中的未知量包括复折射率 n 、 k 以及粗糙度 σ 。因此, 通过多次改变 θ_i 可以计算垂直波的偏振半球反射率。采用遗传算法对式(19)~式(23)进行拟合, 可计算出相应的复折射率和粗糙度。 B_n 在计算中用作比

例校正系数, 仅在反射角较大时才加以考虑, 而在偏振计算中只作为参考。因此, 本文的反演方法没有深入讨论参数 B_n 。

4 实验操作及数据分析

使用美国安捷伦公司生产的 Cary5000 型分光光度计将通过垂直线性偏振器后的入射光投射到样品表面上, 然后用积分球测量垂直波的偏振半球积分反射率。通过连续改变入射光的波长, 可以测得样品的光谱偏振半球积分反射率。实验中, 在 $20^\circ \sim 40^\circ$ 的范围内多次改变入射角 θ_i 。每改变 2° 就采集一次数据, 由此得到垂直波在各个角度下的偏振半球积分反射率。对于每组测量数据,

$$y(\theta_i; n, k, \Omega, \tau, \sigma) = R_s \quad (24)$$

式中, R_s 为垂直波在粗糙表面上的偏振半球积分反射率的测量值。实验中, 在 $800 \sim 2000$ nm 的波长范围内提取 10 个波长值, 然后对每个样品在不同入射角下的偏振半球积分反射率进行测量, 并用遗传算法对其进行拟合, 最终得到复折射率和粗糙度等光学参数。将拟合算法的评价函数定义为

$$z(x) = \sqrt{\sum_j^R (y_j(\theta_i; n, k, \Omega, \tau, \sigma, B_n) - \hat{y}_j)^2} \quad (25)$$

式中, y_j 为理论计算值, \hat{y}_j 为测量值。当 $z(x) < 0.15$ 时, 认为获得了反演结果的近似值。

5 反演结果及可靠性验证

本文分析了铝箔样品和铜箔样品的表面光

学参数。利用上述反演方法得到了复折射率 n 、 k 以及表面粗糙度等光学参数。由于粗糙度的测量精度较高, 因此将样品粗糙度的反演值与测量值进行对比, 以验证反演方法的可靠性。本文利用原子力显微镜和 JB-5C 轮廓仪对样品表面进行了粗糙度测量, 得到了粗糙度的上下界。测量结果如表 1 所示。

表 1 样品粗糙度的测量值

	σ 下边界/ μm	σ 上边界/ μm
铝箔	0.002	0.016
铜箔	0.172	0.262

为了进一步验证反演方法的可靠性, 将复折射率反演结果与参考值进行了比较^[12]。铝箔表面光学参数的反演结果如表 2 所示。可以看出, 样品的 n 值随波长的增加先减小后增大, 与参考值的变化趋势一致; 粗糙度的反演结果均在实测结果的上下界范围内, 反演算法的误差小于 0.15。因此认为该结果是可靠的。将表 2 中的复折射率 n 、 k 与相应波长的参考值进行了比较(结果见图 4)。

从图 4 中可以看出, 本文的反演结果与参考值较为吻合。图 4(a)为 n 值的对比曲线, 二者趋势相同, 均随波长增加先下降后上升。图 4(b)为 k 值的对比曲线, 反演结果随波长的增加呈现逐渐增长的趋势, 与参考值保持一致。二者的反演结果均在参考值附近上下波动。

铜箔表面光学参数的反演结果如表 3 所

表 2 铝箔表面参数的反演值

波长/nm	n	k	σ	Ω	τ	B_n	z
865	2.503	8.688	0.0033	127.513	67.129	129.179	0.114
926	2.002	7.311	0.0137	95.474	43.315	91.014	0.128
1000	1.249	9.821	0.0039	49.749	37.431	220.931	0.139
1087	0.854	11.672	0.0042	95.430	45.069	348.640	0.134
1190	1.100	11.580	0.0037	21.702	36.885	276.974	0.114
1315	1.476	12.982	0.0038	29.015	47.776	204.790	0.139
1471	1.585	15.353	0.0039	91.057	2.275	191.869	0.101
1667	1.383	16.141	0.0052	83.960	45.584	399.489	0.137
1923	2.247	20.836	0.0042	76.522	21.472	169.486	0.077

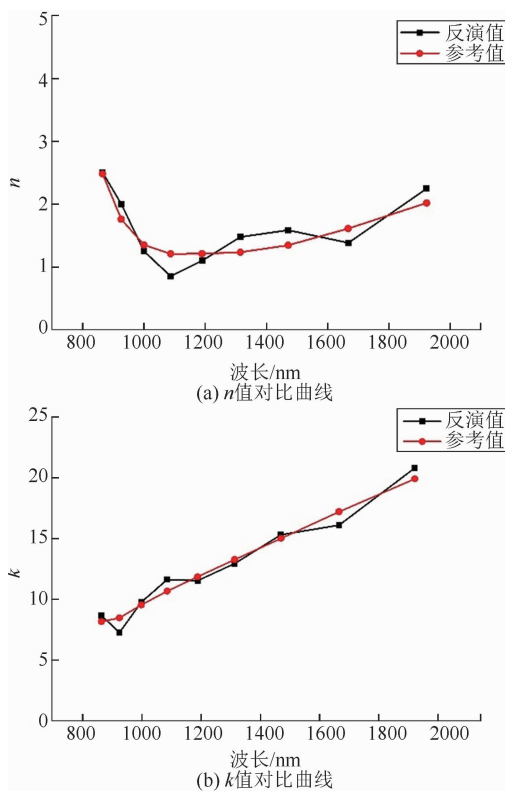


图 4 铝箔参考值与反演值的对比图

示。可以看出, 样品的 n 值随波长的增加而减小, 这与参考值的趋势一致。粗糙度的反演结果也在实测结果的上下界之内, 反演算法的误差小于 0.15, 因此认为该结果也是可靠的。将表 3 中的复折射率 n 、 k 与相应波长的参考值进行了比较(结果见图 5)。

从图 5 中可以看出, 铜箔样品表面 n 值的反演值随波长的变化趋势与参考值一致, 均随波长的增加而增大; 反演值在参考值附近上下波动。样品表面 k 值的反演值随波长的增加而

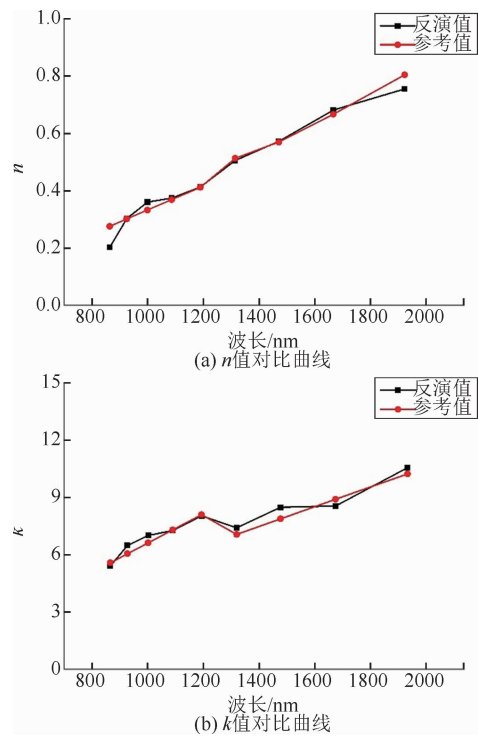


图 5 铜箔参考值与反演值的对比图

增大, 同样也在参考值附近上下波动。由此可见, 反演结果与参考值的吻合度良好。

在文献 [3] 中, Thilak V 等人将 $n=0.4$ 和 $k=2.95$ 作为铜的复折射率的参考值。根据文献 [12] 可知, 该值是在波长为 600 nm 时获得的。因此本文还反演了铜箔在 600 nm 波长处的复折射率, 并将其与文献 [3] 进行了对比。600 nm 波长下铜箔表面参数的反演结果如表 4 所示。

在文献 [3] 中, 波长为 600 nm 时 n 与 k 反演结果的平均值分别为 0.5275 和 3.285。将

表 3 铜箔表面参数的反演值

波长/nm	n	k	σ	Ω	τ	B_n	z
865	0.203	5.398	0.262	14.598	7.665	0.109	0.094
926	0.303	6.465	0.178	13.859	12.356	0.172	0.080
1000	0.360	6.990	0.190	0.502	0.671	0.271	0.078
1087	0.375	7.244	0.176	0.232	2.590	0.290	0.077
1190	0.413	8.013	0.172	10.316	1.033	0.266	0.122
1315	0.506	7.385	0.259	0.169	36.741	0.243	0.190
1471	0.573	8.458	0.172	8.230	7.938	0.328	0.134
1667	0.682	8.524	0.198	19.237	1.098	0.520	0.075
1923	0.756	10.523	0.179	2.469	4.665	0.396	0.133

表 4 波长 600 nm 下铜箔表面参数的反演结果

波长/nm	n	k	σ	Ω	τ	B_n	z
600	0.390	2.902	0.172	8.277	18.578	0.485	0.149

表 5 铜箔反演结果的误差对比

	n	k	n 值误差	k 值误差
参考值	0.4	2.95	—	—
文献[3]的反演值	0.5275	3.285	24.17%	10.20%
本文的反演值	0.390	2.902	2.56%	1.65%

这些结果与本文反演结果进行了对比(结果见表 5)。

从表 5 中可以看出,与 Thilak V 等人提出的方法相比,本文方法具有更高的精度。通过对上述曲线和表格的对比分析可以发现,本文的反演结果较为准确,可用于后续的分析计算,说明本文方法是合理有效的。

6 结论

基于 pBRDF 提出了一种粗糙表面光学参数的反演方法,并使用该方法反演得到了不同样品的表面光学参数。其中,样品复折射率的反演结果与参考值较为吻合,说明本方法的有效性和准确性较高。本方法具有比 Thilak V 等人提出的反演方法更高的精确度,且对实验仪器的要求较低,因此在获取粗糙表面的复折射率及偏振度方面具有很好的实用性。

参考文献

- [1] 马利祥,李范鸣,牛继勇,等. 基于复折射率的偏振模型及其应用 [J]. *激光与红外*, 2013, **43**(10): 1138-1141.
- [2] 李佶芯,安巍,朱彤. 介质复折射率测试技术与计算模型的进展 [J]. *节能技术*, 2017, **35**(3): 214-219
- [3] Thilak V, Voelz D G, Creusere C D, et al. Estimating the Complex Index of Refraction and View Angle of an Object using Multiple Polarization Measurements [C]. *SPIE*, 2009, **6240**: 624004.
- [4] Thilak V, Voelz D G, Creusere C D. Polarization-Based Index of Refraction and Reflection Angle Estimation for Remote Sensing Applications [J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(30): 7527-7536.
- [5] 陈伟力,孙秋菊,王淑华,等. 目标表面发射率对红外辐射偏振特性的影响分析 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, **37**(3): 737-742.
- [6] 范化喜,武文远,黄雁华,等. 基于涂层材料散射光偏振度的复折射率反演 [J]. *光学技术*, 2018, **44**(3): 349-353.
- [7] Lei G, Wu Z S, Hou H L. Polarized Bidirectional Reflectance Distribution Function for Optical Substrate and Different Films [C]. *SPIE*, 2012, **8417**: 84170J.
- [8] Torrance K E, Sparrow E M. Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1967, **57**(9): 1105-1114.
- [9] Meyers J P. Modeling Polarimetric Imaging Using DIRSIG [D]. Rochester: Rochester Institute of Technology, 2002.
- [10] Zhuan S X, Wu W, Huang Y, et al. Establishment and Simulation of Simplified Polarimetric BRDF Model Based on MB Model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(3): 1098-1102.
- [11] 战永红,刘卿,杨迪,等. 表面粗糙材质的复折射率反演 [J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(8): 2178-2184.
- [12] Index of Refraction: Fixed and Variable Ratio at Given Wavelength [EB/OL]. http://www.luxpop.com/HU_v174.cgiOpCode=73, 2019.