超光滑表面缺陷的分类检测研究

解格飒[1],王红军[1*],王大森[2],田爱玲[1],刘丙才[1],朱学亮[1],刘卫国[1]

(1. 西安工业大学 陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室,陕西 西安 710021;
2. 中国兵器科学院宁波分院,浙江 宁波 310022)

摘　要:为了区分超光滑表面上方存在的微小粒子、亚表面缺陷、微粗糙度三种缺陷产生的散射光,并得到能够探测这三种缺陷的最佳区域,将双向反射分布函数 (Bidirectional Reflection Distribution Function,BRDF)与琼斯矩阵结合,给出了三种缺陷在 ss、sp、ps、pp 四种偏振状态下的偏振系数。在此基础上,模拟和分析了三种缺陷在四种偏振状态下与散射方位角的关系。结果表明:利用 p 偏振入射光引起的 p 偏振散射光能将这几种缺陷区分开。根据三种缺陷与散射方位角变化关系的不同,给出了三种缺陷的最佳探测区域及实现方法。

关键词:散射;　双向反射分布函数;　缺陷类型;　最佳探测区域

中图分类号:O436.2　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.3788/IRLA201948.1113003

Study on classification and detection of supersmooth surface defects

Xie Gesa[1], Wang Hongjun[1*], Wang Dasen[2], Tian Ailing[1], Liu Bingcai[1], Zhu Xueliang[1], Liu Weiguo[1]

(1. Shaanxi Province Key Laboratory of Membrane Technology and Optical Test, Xi′an Technological University, Xi′an 710021, China;
2. The Ningbo Branch of Ordnance Science Institute of China, Ningbo 310022, China)

Abstract: In order to distinguish the scattered light generated by the three defects of micro-particles, sub-surface and micro-roughness existing above the super smooth surface, and to obtain the best region for detecting these three scattering mechanisms, combined the Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) with Jones matrix and the polarization coefficients of the three defects were given in the four polarization states ss, sp, ps, pp. On this basis, the relationship between the three defects and scattering azimuth in four polarization states was simulated and analyzed. The results show that these defects could be distinguished by using p-polarized scattering light induced by p-polarized incident light. According to the different relations between the three defects and the variation of scattering azimuth, the best area to distinguish three kinds of defects and its realization methods were given.

Key words: scattering;　bidirectional reflectance distribution function;　defect types;
optimum detection region

收稿日期:2019-07-05;　**修订日期**:2019-08-15

基金项目:总装备部项目(JCKY2016208A001);西安市智能探视感知重点实验室项目(201805061ZD12CG45);
陕西省科技计划项目(2019JM-373);激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1703)

作者简介:解格飒(1994-),女,硕士生,主要从事光学检测技术方面的研究。Email:1103287447@qq.com

导师简介:王红军(1974-),男,副教授,博士,主要从事光学测量技术方面的研究。Email:whj0253@sina.com

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

0 引 言

超光滑光学元件被广泛应用于国防、太空以及新能源等领域[1]。所谓光学超光滑表面,一般是指其表面粗糙度均方根值(RMS)小于 1 nm 的光学表面,并且对其表面损伤程度和物理结构等也有严格的要求,比如较高的表面面形精度、较小的表面疵病和亚表面损伤,表面残余应力极小和具有完整的晶格结构等[2]。通常情况下,光学元件由于加工工艺及生产环境的限制导致其必然存在着杂质、划痕、麻点等“缺陷”及表面污染[3]。这些缺陷产生的散射光会增大系统噪声、降低对比度、导致激光诱导损伤等,对光学元件本身和整个系统的性能都有很大的影响。通常使用偏振双向反射分布函数 (简称偏振 BRDF)来表征介质表面对散射光偏振态的影响,通过建立缺陷与偏振双向反射分布函数之间的关系,并且对探测到的光强进行分析,反推出缺陷的类型信息,这有助于光散射技术在表面质量检测中得到进一步的应用。因此,对超光滑光学元件表面缺陷分类检测技术的研究有着重要的意义。

目前,国外的学者 Tomas 研究了表面微粗糙度和亚表面缺陷产生散射光的偏振特性,并根据两者之间的差异性对它们进行了有效的区分[4]。Singh U 等研究了用偏振光测量各向同性单层膜的表面粗糙度的问题,并且给出了膜层的厚度与偏振态之间的关系[5]。Kurashov V N 利用标量衍射理论方法对粗糙表面散射光的偏振特性进行了研究,计算了单次散射情况下偏振度与入射角度之间的关系[6]。在国内,吴振森等建立了激光散射自动测量系统来研究粗糙面激光散射,开展了测量和优化建模研究[7]。高明等基于偏振 BRDF 推导出散射光的 Stokes 矢量,数值计算了粗糙面在不同入射角、方位角和复折射率情况下的偏振特性[8]。章延隽等基于微面元理论,通过偏振 BRDF 模型推导出相应的 Mueller 矩阵,计算了粗糙表面偏振特性与入射角、方位角以及粗糙度之间的关系[9]。虽然到目前为止已经有多位学者对不同缺陷的散射理论进行了研究,但是却没有充足的数据来验证理论的正确性,对表面缺陷类型的直接诊断仍没有结论性的成果。

文中基于偏振 BRDF 的原理,模拟计算了在不同入射角条件下,三种缺陷对应的偏振 BRDF 随散射方位角的变化关系,并对计算结果进行分析旨在为超光滑表面存在缺陷类型的分类识别提供一定的参考。

1 理论分析

BRDF 是对粗糙表面散射特性进行建模研究的一种常用函数[10]。它的定义为经过目标表面反射沿着(θ_s,ϕ_s)方向出射的辐亮度 $\mathrm{d}L(\theta_i,\phi_i;\theta_s,\phi_s)$与沿着$(\theta_i,\phi_i)$方向入射到目标表面的辐照度 $\mathrm{d}E(\theta_i,\phi_i)$的比值 f_r[11],即:

$$f_r(\theta_i,\phi_i;\theta_s,\phi_s)=\frac{\mathrm{d}L(\theta_i,\phi_i;\theta_s,\phi_s)}{\mathrm{d}E(\theta_i,\phi_i)} \tag{1}$$

式中:θ_i 为入射角;θ_s 为散射角;ϕ_s 为散射方位角。BRDF 可用于描述目标的散射特性,被广泛应用于目标探测识别、特征分析提取等领域[12]。偏振 BRDF 是 BRDF 的矢量形式,利用它可得到介质对散射光偏振的多种信息,如偏振度和相位延迟等。测量和分析介质表面的偏振 BRDF 可以了解不同介质材料特有的偏振特性,从偏振 BRDF 中提取的偏振信息可用于光学表面分析和亚表面缺陷探测等众多领域[13],对超光滑表面上方的麻点、亚表面缺陷以及表面微粗糙度的检测具有十分重要的意义。

在 BRDF 的偏振特性中,入射光和散射光之间的关系是用矢量形式来表示的。无论是在入射面还是散射面,所有的振动矢量都能分解为两个正交方向的振动分量 s 和 p。如图 1 所示,s 光的振动方向

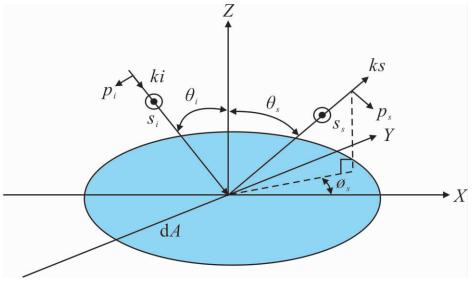

图 1 BRDF坐标关系示意图

Fig.1 Schematic diagram of BRDF coordinate relationship

垂直于入射面 (散射面),p 光的振动方向在入射面(散射面)内。利用右手坐标系$(\hat{k},\hat{s},\hat{p})$,则入射面和散射面的电磁矢量分别满足关系式:$\hat{p}_i=\hat{k}_i\times\hat{s}_i$、$\hat{p}_s=\hat{k}_s\times\hat{s}_s$。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其中$\hat{k}_i$表示光在入射方向上的单位矢量，$\hat{k}_s$表示光在散射方向上的单位矢量。利用琼斯矩阵，可将入射光和散射光之间的关系表示为：

$$\begin{bmatrix} E_p^s \\ E_s^s \end{bmatrix} = \frac{e^{ikR}}{R} \begin{bmatrix} S_{pp} & S_{sp} \\ S_{ps} & S_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_p^i \\ E_s^i \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中：E_p^i、E_s^i分别表示在入射光方向上的 s 光分量和 p 光分量；E_p^s、E_s^s分别表示在散射光方向上的 p 光分量和 s 光分量；S_{ps}反映了入射光为 p 偏振光、出射光为 s 偏振光时的光强分布情况；同理可知矩阵中 S_{pp}、S_{sp}、S_{ss}的意义；$\hat{k}$为波矢量，其数值是 $k=2\pi/\lambda$；R 为待测件散射点到探测器之间的距离。

1.1 表面上方微粒的散射

表面上方存在的缺陷包含微小的麻点、气泡及灰尘等。麻点指光学元件表面上的陷坑、蚀坑、疵点，其坑内的表面粗糙度较大，宽度与深度大致相同，边缘也不规则[14]。在目前疵病检测中，大部分是使用光散射法来完成的。光束散射的情况包括一次散射和多次散射，经多次散射后的能量相对于一次散射后的能量是高阶小量，可予以忽略，所以在文中只考虑一次散射的情况。超光滑表面上方微粒的散射模型主要包括两种情 况：一种为光源直接照射在微粒上发生散射的情况；另一种为经微粒散射后的光在介质表面发生反射的情况，如图 2(a)、(b)所示。

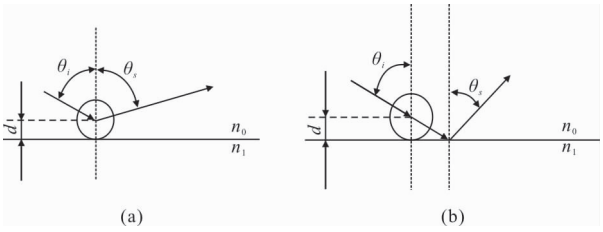

图 2 麻点散射示意图

Fig.2 Scattering diagram of pocking mark

假设缺陷粒子符合瑞利近似条件，形状近似为球形，其折射率为 n，半径为 a，麻点中心距超光滑表面的距离为 d。将散射场和电场结合起来，得到超光滑表面上方麻点的琼斯散射矩阵为：

$$\begin{pmatrix} S_{pp} & S_{sp} \\ S_{ps} & S_{ss} \end{pmatrix} = \left(\frac{n^2-1}{n^2+2}\right) a^3k^2 \begin{pmatrix} q_{pp}^{part} & q_{sp}^{part} \\ q_{ps}^{part} & q_{ss}^{part} \end{pmatrix} \tag{3}$$

在公式(3)中，偏振系数分别为[14]：

$$q_{ss}^{part} = [1+\beta r_s^{01}(\theta_s)]\cdot[1+\alpha r_s^{01}(\theta_i)]\cdot\cos\phi_s \tag{4}$$

$$q_{sp}^{part} = -[1-\beta r_p^{01}(\theta_s)]\cdot[1+\alpha r_s^{01}(\theta_i)]\cdot\cos\theta_s\sin\phi_s \tag{5}$$

$$q_{ps}^{part} = -[1+\beta r_s^{01}(\theta_s)]\cdot[1-\alpha r_p^{01}(\theta_i)]\cdot\cos\theta_i\sin\phi_s \tag{6}$$

$$q_{pp}^{part} = [1+\beta r_p^{01}(\theta_s)]\cdot[1+\alpha r_p^{01}(\theta_i)]\cdot\sin\theta_i\sin\theta_s - [1-\beta r_p^{01}(\theta_s)]\cdot[1-\alpha r_p^{01}(\theta_i)]\cdot\cos\theta_i\cos\theta_s\cos\phi_s \tag{7}$$

式中：$\alpha=\exp(2ik\mathrm{d}\cos\theta_i)$ 表示入射场的相位因子；$\beta=\exp(2ik\mathrm{d}\cos\theta_s)$表示散射场的相位因子；$r_s$ 和 r_p 分别表示 s 光和 p 光的菲涅耳反射系数。其中[14]：

$$r_p^{01}(\theta_i) = \frac{(n_1/n_0)^2\cos\theta_i - \sqrt{(n_1/n_0)^2-\sin^2\theta_i}}{(n_1/n_0)^2\cos\theta_i + \sqrt{(n_1/n_0)^2-\sin^2\theta_i}} \tag{8}$$

$$r_s^{01}(\theta_i) = \frac{\cos\theta_i - \sqrt{(n_1/n_0)^2-\sin^2\theta_i}}{\cos\theta_i + \sqrt{(n_1/n_0)^2-\sin^2\theta_i}} \tag{9}$$

具有微粒密度为 N/A 的光滑表面的 BRDF 表示为：

$$\mathrm{BRDF}_{part} = \frac{16\pi^4}{\lambda^4}\left(\frac{n_{part}^2-1}{n_{part}^2+2}\right)\frac{a^6}{\cos\theta_s\cos\theta_i}\cdot\frac{NF}{A}\times|q_{uv}^{part}\cdot\hat{e}|^2 \tag{10}$$

式中：N/A 为所在光照范围内微粒的密度；n_{part} 为表面上方存在微粒的折射率；q_{uv}^{part} 为偏振系数，对应 u 偏振光入射和 v 偏振光散射，u 和 v 均可分别取 s、p，即表示为 q_{ss}^{part}、q_{sp}^{part}、q_{ps}^{part}、q_{pp}^{part}，若需要讨论哪个方向的散射问题，则可将相应的偏振系数代入；$\hat{e}$为平行于入射电场的单位矢量；F 为依赖于散射体之间相关性的结构因子，对于随机的非相关微粒$F=1$[7]。

1.2 亚表面缺陷的散射

当一束光入射至光学元件表面时，部分光束会在元件表面发生折射。如果存在亚表面缺陷，则折射后的若干光束会进入到亚表面缺陷内部导致光束发生散射现象，部分散射光会从元件表面折射出经探测器探测。存在于亚表面的微粒发生散射的示意图如图 3 所示。

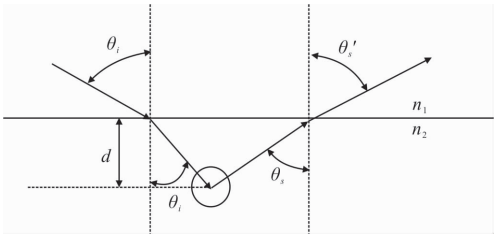

图 3 亚表面缺陷散射的示意图

Fig.3 Schematic diagram of subsurface defect scattering

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对于亚表面缺陷,其琼斯矩阵的偏振系数分别为[6]:

$$q_{ss}^{sub}=\frac{\cos\phi_s}{\left(\cos\theta_i+\sqrt{n_2^2-\sin^2\theta_i}\right)}\cdot\frac{1}{\left(\cos\theta_s+\sqrt{n_2^2-\sin^2\theta_s}\right)} \tag{11}$$

$$q_{sp}^{sub}=\frac{-\sin\phi_s}{\left(\cos\theta_i+\sqrt{n_2^2-\sin^2\theta_i}\right)}\cdot\frac{\sqrt{n_2^2-\sin^2\theta_s}}{\left(n_2^2\cos\theta_s+\sqrt{n_2^2-\sin^2\theta_s}\right)} \tag{12}$$

$$q_{ps}^{sub}=\frac{-\sin\phi_s}{\left(n_2^2\cos\theta_i+\sqrt{n_2^2-\sin^2\theta_i}\right)}\cdot\frac{\sqrt{n_2^2-\sin^2\theta_i}}{\left(\cos\theta_s+\sqrt{n_2^2-\sin^2\theta_s}\right)} \tag{13}$$

$$q_{pp}^{sub}=\frac{\sin\theta_i\sin\theta_s-\left[\sqrt{n_2^2-\sin^2\theta_i}\cdot\sqrt{n_2^2-\sin^2\theta_s}\cos\phi_s\right]}{\left(n_2^2\cos\theta_i+\sqrt{n_2^2-\sin^2\theta_i}\right)\cdot\left(\cos\theta_s+\sqrt{n_2^2-\sin^2\theta_s}\right)} \tag{14}$$

亚表面缺陷的双向反射分布函数 BRDF 表达式为:

$$\mathrm{BRDF}_{sub}=\frac{256\pi^4}{\lambda^4}\left(\frac{n_{sph}^2-n_2^2}{n_{sph}^2+2n_2^2}\right)^2 a^6\cos\theta_i\sqrt{n_2^2-\sin^2\theta_s}\,|\gamma\delta|^2\cdot n_2^3\frac{NF}{A}\times|q_{uv}^{sub}\cdot\hat{e}|^2 \tag{15}$$

式中:n_{sph} 表示亚表面存在微粒的折射率;$|\gamma\delta|^2$ 表示光能在材料中可传播的深度。

1.3 微粗糙面的散射

对于微粗糙面,采用微扰近似法[15](SPM),即入射波波长大于均方根高度。假设微粗糙表面满足高斯分布,粗糙面的功率谱密度函数为 $S(f_x,f_y)$,表达式为:

$$S(f_x,f_y)=\delta^2\frac{l_xl_y}{4\pi}\exp\left(-\frac{f_x^2l_x^2+f_y^2l_y^2}{4}\right) \tag{16}$$

式中:δ 表示均方根高度;l_x,l_y 分别表示沿 x,y 方向的相关长度;f_x、f_y 分别表示沿 x,y 方向的空间频率,且 f_x、f_y 分别满足 $\lambda f_x=\sin\theta_s\cos\phi_s-\sin\theta_i$,$\lambda f_y=\sin\theta_s\sin\phi_s$。

那么由微粗糙度引起的双向反射分布函数的表达式为:

$$\mathrm{BRDF}_{SR}=\frac{16\pi^4}{\lambda^4}\cos\theta_i\cos\theta_s\cdot S(f_x,f_y)\cdot|q_{uv}^{SR}\cdot\hat{e}|^2 \tag{17}$$

微粗糙面的琼斯矩阵相应偏振系数的表达式如下:

$$q_{ss}^{SR}=\frac{(n_{mat}^2-1)\cos\phi_s}{\left(\cos\theta_i+\sqrt{n_{mat}^2-\sin^2\theta_i}\right)}\cdot\frac{1}{\left(\cos\theta_s+\sqrt{n_{mat}^2-\sin^2\theta_s}\right)} \tag{18}$$

$$q_{sp}^{SR}=\frac{-(n_{mat}^2-1)\sin\phi_s}{\left(\cos\theta_i+\sqrt{n_{mat}^2-\sin^2\theta_i}\right)}\cdot\frac{\sqrt{n_{mat}^2-\sin^2\theta_s}}{\left(n_{mat}^2\cos\theta_s+\sqrt{n_{mat}^2-\sin^2\theta_s}\right)} \tag{19}$$

$$q_{ps}^{SR}=\frac{-(n_{mat}^2-1)\sin\phi_s}{\left(n_{mat}^2\cos\theta_i+\sqrt{n_{mat}^2-\sin^2\theta_i}\right)}\cdot\frac{\sqrt{n_{mat}^2-\sin^2\theta_i}}{\left(\cos\theta_s+\sqrt{n_{mat}^2-\sin^2\theta_s}\right)} \tag{20}$$

$$q_{pp}^{SR}=\left[\frac{n_{mat}^2\sin\theta_i\sin\theta_s}{\left(n_{mat}^2\cos\theta_s+\sqrt{n_{mat}^2-\sin^2\theta_s}\right)}-\frac{\sqrt{n_{mat}^2-\sin^2\theta_i}\sqrt{n_{mat}^2-\sin^2\theta_s}\cos\phi_s}{\left(n_{mat}^2\cos\theta_s+\sqrt{n_{mat}^2-\sin^2\theta_s}\right)}\right]\cdot\frac{(n_{mat}^2-1)}{\left(n_{mat}^2\cos\theta_i+\sqrt{n_{mat}^2-\sin^2\theta_i}\right)} \tag{21}$$

式中:下标左边表示入射光的偏振态;右边表示散射光的偏振态。综合比较元件表面上方的缺陷粒子、亚表面缺陷、微粗糙度的 BRDF 的偏振系数 q_{ss}、q_{sp}、q_{ps}、q_{pp} 的表达式,可以发现利用 ss、ps、sp 这三项无法区分这几种散射机理,因为它们这几个偏振因子每一项都存在着一个相同的函数项。根据公式(4)、(11)、(18)可知,q_{ss} 的表达式存在的相同函数项为 $\cos\phi_s$;同理可知,q_{sp} 的表达式中存在一个共同的函数项 $\sin\phi_s$;q_{ps} 的表达式中也有共同的参数 $\sin\phi_s$。由于相同函数项的存在,在散射测量时三种散射机理就会发生叠加,就意味着不能对这三种散射机理进行有效的分离。而三种散射机理的偏振因子 q_{pp} 却不存在单独的共同项,它们各自的表达式明显不同,因此在理论上就可以利用偏振 BRDF_{pp} 分别与散射角、入射角、散射方位角等因素之间关系的不同对三种缺陷进行有效区分。

2 数值计算

对上文理论的分析可以初步判定利用偏振因子能将超光滑表面上方存在的微粒、亚表面缺陷以及微粗糙表面三种散射机理进行有效的区分。为了验证推测的正确性,借助 MATLAB 数学工具分别对每种散射机理的四个偏振因子进行计算。假设入射光波长为 633 nm,被测物的材料为 K9 玻璃,折射率为 1.52[13],材料表面上方存在缺陷的形状近似为球形,其半径为 5 nm,球形微粒中心距离玻璃表面的距离为 150 nm;假设亚表面缺陷粒子也同为半径为 5 nm 的球形颗粒,位于元件表面下方150 nm 处,消光系数

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为 0;微粗糙面服从高斯分布,其相关长度为 300 nm,均方根高度为 1 nm,则计算结果如图 4~6 所示。

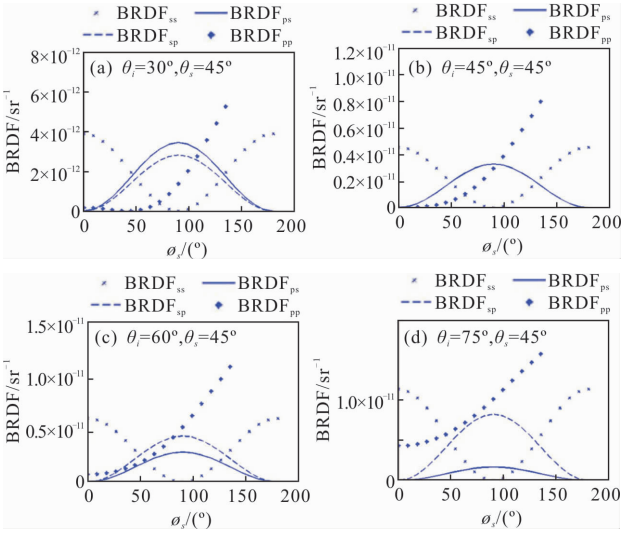

图 4 表面上方存在的微粒在四种偏振状态下对应的 BRDF 与散射方位角的变化关系

Fig.4 Relationship between the corresponding BRDF and the scattering azimuth of the particles existing above the surface in the four polarization states

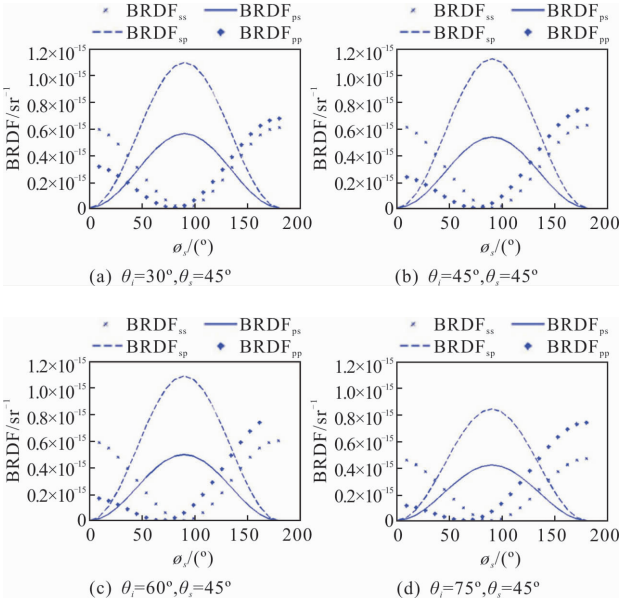

图 5 亚表面缺陷在四种偏振状态下对应的 BRDF 与散射方位角的变化关系

Fig.5 Relationship between the corresponding BRDF and the scattering azimuth of subsurface defects in four polarization states

在图 4~6 中,横坐标表示散射方位角 ϕ_s,范围为 0°~180°;纵坐标表示 BRDF 的值。从三幅图中可以看出,无论是哪种缺陷,其 BRDF$_{sp}$ 与 BRDF$_{ps}$ 随着散射方位角的变化始终呈现先增大后减小的趋势,且最大的 BRDF 对应的散射方位角始终为 90°;BRDF$_{ss}$ 的变化同前两者相反,趋势均为先减小后增大,最小 BRDF 对应的散射方位角也同为 90°;只有 pp 偏振因子对应的曲线有明显的变化,随着入射角的增大,BRDF 为 0 对应的散射方位角始终在减小,与其余三个偏振因子的 BRDF 变化趋势截然不同。

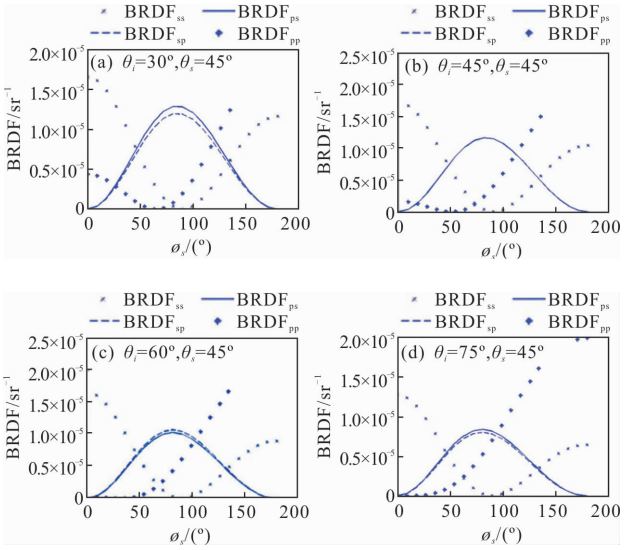

图 6 微粗糙度在四种偏振状态下对应的 BRDF 与散射方位角的变化关系

Fig.6 Relationship between BRDF and scattering azimuth of micro-roughness under four polarization states

综合比较图 4~6,可以得到三种散射机理只有 pp 偏振因子能作为区分三者的依据,验证了推测的正确性与可行性,即利用 p 偏振入射光产生 p 偏振散射光的不同可以对三种缺陷进行区分。

为了比较这三种缺陷的偏振 BRDF$_{pp}$,利用了上文的理论分析,只对公式(7)、(14)、(21)在入射角分别为 30°、45°、60°、75°,散射角为 45°的条件下计算了偏振 BRDF$_{pp}$ 与散射方位角之间的关系,结果如图7 所示。

图 7 中,三种不同的线型分别代表了三种缺陷类型。综合比较图 7(a)~(d),不难发现对于表面上方存在的微粒而言,在散射角一定时,随着散射方位角的增大,BRDF$_{pp}$ 总体上是不断增大的,且不存在零值;对于亚表面缺陷,在散射角一定时,无论入射角为多大,BRDF$_{pp}$ 随着散射方位角的变化趋势是先减

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

小后增大，总能存在一个散射方位角使 $BRDF_{pp}$ 为 0，而且随着入射角的增大，$BRDF_{pp}$ 为 0 对应的散射方位角在不断地减小。在入射角为 60°、散射角为 45°时，亚表面缺陷的最小 $BRDF_{pp}$ 对应的散射方位角约为 72°；对于微粗糙表面，$BRDF_{pp}$ 随着散射方位角的变化趋势与亚表面缺陷的保持一致，都是先增大后减小，$BRDF_{pp}$ 也同样存在一个最小值且最小 $BRDF_{pp}$ 对应的散射方位角约为 36°。为了能够进一步说明这三种散射机理引起的 $BRDF_{pp}$ 之间的区别，验证以上结论的正确性，计算了散射角为 60°的情况时，三种不同散射机理 $BRDF_{pp}$ 随着散射方位角的变化关系，结果如图 8 所示。

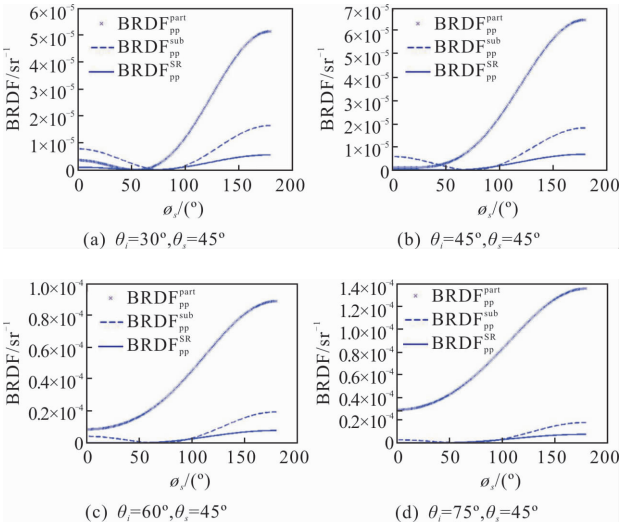

图 7 散射角为 45°时，三种不同缺陷的 $BRDF_{pp}$ 随着散射方位角的变化关系

Fig.7 Variation of $BRDF_{pp}$ with scattering azimuth for three different defects when the scattering angle is 45°

图 8 给出了散射角为 60°时，$BRDF_{pp}$ 随着散射方位角的变化关系。结果与图 5 中的结果保持一致，即表面上方微粒的 $BRDF_{pp}$ 随着散射方位角的增加而增加；亚表面缺陷对应的曲线在散射方位角变化时总是存在一个方位角使得 $BRDF_{pp}$ 最小；同样地，微粗糙度对应曲线的变化趋势与亚表面缺陷对应曲线的变化趋势类似，均存在某一方位角使 $BRDF_{pp}$ 最小，但表面微粗糙度对应的方位角比亚表面缺陷对应的方位角小，由此证实了理论的正确性，即三种缺陷的 $BRDF_{pp}$ 有着显著的区别。为了将这三种缺陷进行有效的区分，笔者就可以充分利用 $BRDF_{pp}$ 之间的差异性进行初步判断，从而将它们分离开。

由于不同的散射角会存在不同的最佳探测区域，所以只针对图 7(c)即入射角为 60°、散射角为 45°这

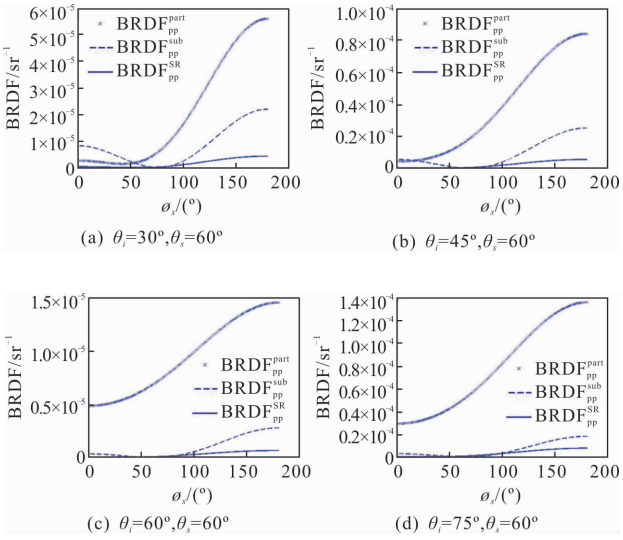

图 8 散射角为 60°时，三种不同缺陷的 $BRDF_{pp}$ 随着散射方位角的变化关系

Fig.8 Variation of $BRDF_{pp}$ with scattering azimuth for three different defects when the scattering angle is 60°

种情况进行了具体分析。假设光学元件表面只存在三种缺陷的其中一种，根据亚表面缺陷的最小的 $BRDF_{pp}$ 对应的散射方位角约为 72°，表面微粗糙度的最小 $BRDF_{pp}$ 对应的散射方位角约为 36°，而表面上方存在的麻点的 $BRDF_{pp}$ 却一直随着散射方位角的增大而增大的趋势，能够判断出在 36°~72°这个角度范围内能将缺陷分离，即区分三种散射机理的最佳区域为 36°~72°。利用这个结果，设计了能直接区分三种缺陷的系统图，如图 9 所示，1 为激光器，2 为光束整形系统，3 为起偏器，4 为检偏器，5 为探测器。

图 9 中，入射角 θ_i=60°，散射角 θ_s=45°激光器发出的光经过光束整形系统和起偏器得到 p 偏振入射光，p 偏振入射光照射至光学元件表面，由于缺陷的存在会导致产生散射光，散射光经检偏器得到 p 偏振散射光，最后经探测器得到相应的功率值。由于亚表面缺陷的最小的 $BRDF_{pp}$ 对应的散射方位角约为 72°，表面微粗糙度的最小$BRDF_{pp}$ 对应的散射方位角约为 36°，所以在 36°~72°范围内改变散射方位角的大小。若 $BRDF_{pp}$ 随着散射方位角的增大而增大，根据图 7、8 可知，接收到的散射光是由表面上方微粒引起的；若在方位角为 36°的附近出现极小值，在之

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

后的角度变化过程中 $BRDF_{pp}$ 又随着方位角的变化而变化，则可判断出散射光是由表面微粗糙度引起的；同样地，若信号在方位角为 72°的附近出现极小值，在其他方位角有着相应的变化，则可判断出散射光是由亚表面缺陷所引起的。

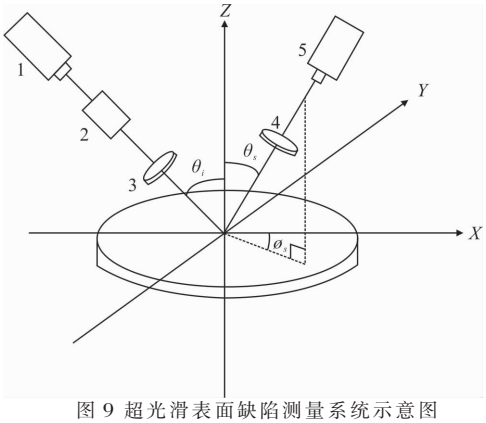

图 9 超光滑表面缺陷测量系统示意图

Fig.9 Schematic diagram of supersmooth surface defect measurement system

3 结 论

文中利用偏振双向反射分布函数，对表面上方存在的微粒、亚表面缺陷、微粗糙面的偏振 BRDF 进行了研究和比较，根据理论公式说明了 p 偏振入射光引起的 p 偏振散射光的双向反射分布函数可以区分这三种缺陷，并且根据理论计算了 $BRDF_{pp}$ 与散射方位角之间的变化关系。在入射角为 60°、散射角为 45°的情况下，表面上方微粒的 $BRDF_{pp}$ 总体上随着散射方位角的增大而增大，且不存在零值；亚表面缺陷的 $BRDF_{pp}$ 随着散射方位角的增大呈先减小后增大的趋势，且最小的 $BRDF_{pp}$ 对应的散射方位角约为 72°，表面微粗糙度的变化趋势同亚表面缺陷的类似，且最小的 $BRDF_{pp}$ 对应的散射方位角约为 36°。这一结果为超光滑表面缺陷提供了一种分类检测方法。

参考文献：

[1] Yuan Shunshan, Cheng Ziqing, Cheng Guang. Experimental study on the selection of polishing powder during super-smooth polishing progress of glass-ceramic [J]. ***Optics & Optoelectronic Technology***, 2015, 13(4): 87-90. (in Chinese)

[2] Meng K. Material removal mechanism and experimental research for loose abrasive super-smoothing polishing [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)

[3] You Xinghai, Zhang Bin. Influence of optical component quality on signal to noise ratio in infrared optical systems[J].***Infrared and laser Engineering***, 2018, 47(3): 0320004. (in Chinese)

[4] Germer T A, Asmail C C. Polarization of light scattered by microrough surfaces and sunsurface defects [J]. ***J Opt Soc Am A***, 1999, 16(6): 1326-1332.

[5] Singh U, Kapoor A. Single layer homogeneous model for surface roughness by polarized light scattering [J]. ***Optics & Laser Technology***, 2008, 40(2): 3415-3424.

[6] Kurashov V N, Marienko V V, Molebna T V, et al. Polarization changes in coherent electromagnetic radiation scattering by the rough surface[C]//SPIE, 1995, 2647: 48-56.

[7] Gong Lei. Study on the composite light scattering from wafer and defect particles and its application [D]. Xi′an: Xidian University, 2011. (in Chinese)

[8] Gao Ming, Song Chong, Gong Lei. Analysis of polarization characteristic about rough surface light scattering based on polarized bidirectional reflectance distribution function [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2013, 40(12): 231-236. (in Chinese)

[9] Zhang Yanjie, Wang Xia, He Si. Polarized properties of rough surfaces based on polarized Bi-directional reflectance distribution function [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2018, 38(3): 441-447. (in Chinese)

[10] Sung L, Mulholl G W, Germer T A. Polarization of light scattered by spheres on a dielectric film [C]//SPIE, 1999, 3784: 296-303.

[11] Zhang Yingge. Study on optical scattering characteristics of surface microstructure for optical elements [D]. Xi′an: Xi′an Technological University, 2017. (in Chinese)

[12] Yuan Yan, Jin Ding, Su Lijuan. Optimization modeling and verfication of bidirectional reflectance distribution function for rough surface [J]. ***Laser & Optoelectronics Progress***, 2018, 55(5): 402-408. (in Chinese)

[13] Pan Yongqiang. Light scattering properties and characteristics of multilayer optical thin films with microroughness [D].Xi′an: Xidian University, 2009. (in Chinese)

[14] Su Sen. Large optical component surface defects detection [D]. Chengdu: Southwest University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)

[15] Zhang Jianhua.The research on the relevant electromagnetic scattering of random rough surface [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net