

微粗糙光学基片表面与上方冗余粒子的 差值场散射特性研究

巩 蕾¹ 吴振森² 代少玉² 李正军²

¹西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021

²西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

摘要 基于小波矩量法(MOM)研究了微粗糙光学基片表面与上方冗余粒子的差值光散射特性。从基本电场积分方程出发,推导出冗余粒子目标与光学基片微粗糙面的积分方程,得到阻抗矩阵,进而推导出散射耦合场及差值场,给出复合散射模型双站散射截面的计算公式,数值计算并分析了不同入射角度,不同材质的单个及双个冗余缺陷粒子与微粗糙光学基片表面的双站散射截面及差值双站散射截面的散射角分布,给出冗余粒子及微粗糙面的散射贡献及差值场散射角分布。

关键词 散射; 光学表面; 小波矩量法; 差值场; 冗余粒子

中图分类号 O436.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0829001

Study on Difference Field Scattering Properties between Slightly Rough Optical Surface and above Redundant Particles

Gong Lei¹ Wu Zhensen² Dai Shaoyu² Li Zhengjun²

¹*School of Photoelectric Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China*

²*School of Physics Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China*

Abstract Based on the wavelet method of moment (MOM), difference field scattering properties between slightly rough optical surface and redundant particles above are researched. The integral equations about slightly rough optical surface and redundant particles are presented from basic electric field integral equations. Impedance matrix, composite scattering field and difference scattering field are obtained. Bistatic radar cross section calculation formula of the composite scattering model is given. Bistatic radar cross section and difference bistatic radar cross section are analyzed between different material one/double redundant particles and slightly rough optical surface with different incident angle and numerical experiments are shown. The scattering contribution and difference field scattering angular distribution of the redundant particles or rough optical surface are provided.

Key words scattering; optical surface; wavelet method of moment; difference field; redundant particles

OCIS codes 290.5825 ; 290.5850; 290.5880

1 引 言

光学基片表面的质量直接影响着光学系统的整体性能。在光学无损检测中,由于冗余粒子的尺寸一般为微米及亚微米量级^[1],因此在检测的散射光强中,光学微粗糙面的散射贡献占主导地位,冗余粒子的散射贡献被淹没其中;只有当入射波的照明宽度很小,被纳入的光学微粗糙面散射的贡献减小时,冗余粒子目标的散射贡献才有效显现出来。因此,为消除这种数值结果的不确定性,对微粗糙光学表面与上方冗余粒子

收稿日期: 2015-01-27; 收到修改稿日期: 2015-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(61308071, 61172031, 61308025)

作者简介: 巩 蕾(1981-),女,博士,讲师,主要从事无损检测中基片与缺陷粒子的复合光散射方面的研究。

E-mail: zzgonglei@126.com

的差值场研究具有重要意义。

关于粗糙面与目标复合散射研究,国内外已经开展了一些工作。Chui等^[2]首次将互易性定理用于计算微粗糙面上层状植被模型以及植被内埋藏体目标的电磁散射。Pino等^[3]应用广义前后向迭代法研究了海面与二维目标的复合电磁散射问题。Li等^[4]利用复镜向技术和MLFMA方法计算界面上多个目标的电磁散射。在国内复旦大学叶红霞等^[5]利用广义前后向算法研究了低掠角入射时一维动态分形粗糙面和二维舰船目标的双站散射模拟。西安电子科技大学郭立新等^[6-7]引入互易性定理结合高频算法给出了目标与目标之间、导体粗糙面与其上方球形目标和平板目标复合电磁散射的混合方法。武汉大学李超等^[8]研究了二维介质粗糙面下方三维金属目标复合电磁散射的快速正演算法。刘鹏等^[9]还应用有限元区域分解法研究了一维海面及其上飞行目标的电磁散射。以上的一些工作均集中在电磁波段,在激光波段的微粗糙面与目标的复合散射研究较少,更没有发现将之应用到光学检测领域的研究。笔者所在研究团队之前做过一些关于基片和缺陷粒子复合散射的研究工作,但是鉴于研究方法的局限性,均未考虑光学平面的粗糙度对复合散射的影响作用^[10-11]。鉴于缺陷尺寸日渐趋于纳米级^[12],光学表面的粗糙度的影响不可忽略。因此,光学平面粗糙度对复合散射场的影响不容忽视。

本文结合基片无损检测工艺的实际情况,给出微粗糙光学基片表面与上方冗余粒子的散射模型,引入差值场概念。基于小波距离量法(MOM),从基本电场积分方程出发,推导出冗余粒子目标与光学基片微粗糙面的积分方程,得到阻抗矩阵,进而推导出散射耦合场及差值场,给出复合散射模型双站散射截面的计算公式,并与参考文献中有关方法进行比较,数值计算并分析了不同入射角度,不同材质的单个及双个冗余缺陷粒子与微粗糙光学表面之间的差值双站散射截面。

2 散射建模及关于差值场的小波MOM方法关键技术

2.1 微粗糙光学基片表面与上方冗余粒子建模

在超精密光学元件加工过程中,需要经历沉积、研磨、抛光等工序。当今对先进光学材料和精密光学元件提出了接近极限的技术指标要求,进而对每道工序要求异常严格。在以上工序中,都可能会机械或人为地引入基底粗糙度、缺陷冗余粒子等疵病。

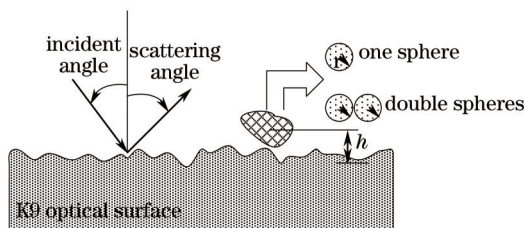


图1 二维随机粗糙面与上方冗余粒子的几何示意图

Fig.1 Geometry of the spherical particles above two dimensional randomly rough surface

计算了微粗糙光学基片表面含有一个及多个冗余金属粒子和氧化物粒子的情况,具体的散射模型如图1所示。基底材质为K9玻璃,折射率 $n_{K9}=(1.52,0)$,高斯型分布粗糙面, $kh=0.5,kl=4.24$,式中 h 为高度起伏均方根(RMS), l 为相关长度, $k=2\pi/\lambda$ 为自由空间波数, λ 为入射波波长 $0.633\mu\text{m}$ 。在距离粗糙面高度起伏平均值以上 h 处有半径为 r 的球形粒子,讨论了两种情况即一个和两个球形粒子,球心位置为 (x,h) ,粒子的材质分别为 SiO_2 和 Cu , $n_{\text{SiO}_2}=(1.67,0)$, Cu 做为理想导体处理。入射波入射时对该微粗糙面和球形粒子而言入射角为 θ_i ,散射角为 θ_s 。

2.2 微粗糙光学基片表面与上方冗余粒子差值场散射描述及推导

光波也是电磁波,因此电磁散射理论也适用于光波波段范围。为模拟光学基片随机粗糙面的光散射,在计算时,必须构造出随机粗糙面的轮廓 $z(x)$, x 为水平距离。为消除粗糙面截断所引起的边缘效应,用锥形波来代替平面波。

由于光学表面作为微粗糙面即是一个分布式的面散射目标,因此可以引入归一化的微散射截面来定义和分析粗糙面的平均散射特性^[13]。理想情况下只要引入的锥形波足够宽,数值计算中所考虑的粗糙面足够

长,归一化的微分散射截面就有一个确定的值,与锥形波的照射宽度无关。但是,如果在光学表面微粗糙面环境中含有缺陷冗余粒子,即引入有限尺寸的孤立散射目标,这样的散射总场包括了冗余粒子散射、光学微粗糙面散射,及其光学表面与冗余缺陷粒子的相互作用的多重散射,粒子尺寸与选取截断的光学微粗糙面长度两者大小之比直接影响散射的最终计算结果。如 Johnson^[14]所说:当入射波照明的粗糙面很宽,远远大于目标尺寸时,总雷达散射截面中将是粗糙面的散射占主导地位,目标散射实际上被淹没在粗糙面的散射中;如果入射波的照明宽度很小,被纳入的粗糙面散射的贡献将减小,目标的散射显现出来。为消除这种数值结果的不确定性,Johnson 提出了差场雷达散射截面的概念,即分别计算粗糙面上有目标和无目标两种情况下空间的散射场,用它们的散射场的差值所计算的雷达散射截面称为差值场雷达散射截面。它体现了目标自身的散射以及与粗糙面之间的相互作用,而消除了入射锥形波照明下截断的粗糙面自身的散射。

考虑光学微粗糙面上方目标的差值散射场,当目标也是介质时,由于目标和粗糙面具有相同的 MOM 表达式,因此可以将粗糙面和目标一起进行建模计算。但是如果目标是导体,它们的 MOM 表达式是不一样的。必须分别对它们进行 MOM 建模,并将它们之间的耦合也要考虑进去。将阻抗矩阵进行小波分解,得到稀疏的矩阵标准形式,利用 Bi-CGSTAB 进行迭代求解,再将得到的结果进行 Mallat 重构就可以了。由于矩阵稀疏化了,在不牺牲精度的情况下,计算速度得到很大的提高。

当粗糙面和目标为有耗介质时,体积分方程将不再适合,此时要用表面积分方程。为方便起见,设粗糙面和目标的介电常数均为 ϵ_r ,将它们的几何模型就在一起建模,如图 2 所示。

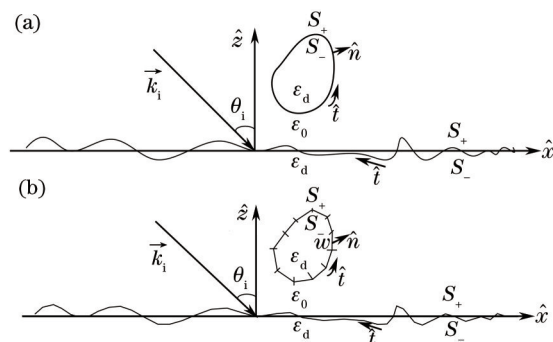


图 2 粗糙面与目标复合散射及离散的几何示意图

Fig.2 Geometric schematic of rough surface and object composite scattering and discrete

假设 TM_y 波照射,根据表面等效原理, S 表面的等效源为 J_y 和 K_x , \hat{t} 为表面切向矢量。则满足的电场积分方程(EFIEs)为

$$E_y^{inc}(t) = K_x(t) + jk_0\eta_0 A_y^{(0)} + \left(\frac{\partial F_z^{(0)}}{\partial x} - \frac{\partial F_x^{(0)}}{\partial z} \right)_{S_r}, \quad (1)$$

$$0 = -K_x(t) + jk_d\eta_d A_y^{(d)} + \left(\frac{\partial F_z^{(0)}}{\partial x} - \frac{\partial F_x^{(0)}}{\partial z} \right)_{S_r}. \quad (2)$$

t 为描述目标表面参数,式中 $A_y^{(0)} = \int J_y(t') \frac{1}{4j} H_0^{(2)}(k_0 R) dt'$, $F_x^{(0)} = \int \hat{t}(t') K_x(t') \frac{1}{4j} H_0^{(2)}(k_0 R) dt'$ 和 $R = \sqrt{[x(t) - x(t')]^2 + [z(t) - z(t')]^2}$ 。介质和外部的波数分别 k_d 和 k_0 ,波阻抗分别为 η_d 和 η_0 , H_0 为零阶贝塞尔函数。(1)式和(2)式随着观察者在哪边变化而改变。将粗糙面和目标表面用 N 段直线元胞拟合近似,如图 2(b) 所示。(1)式和(2)式中的未知量 J_y 和 K_x 在每个元胞的中心。应用点匹配法得到如下矩阵:

$$\begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j \\ k \end{bmatrix}, \quad (3)$$

阻抗矩阵中每个元素为 $N \times N$ 的方阵, N 为模型的总段数。

$$A_{mn} = \frac{k_0\eta_0}{4} \int_{cell_n} H_0^{(2)}(k_0 R) dt', \quad (4)$$

$$B_{mm} = \frac{1}{2}, \quad (5)$$

$$B_{mn} = \frac{k_0}{4j} \int_{\text{cell } n} \left(\cos \phi_n \frac{\Delta x}{R_m} + \sin \phi_n \frac{\Delta z}{R_m} \right) H_1^{(2)}(k_0 R_m) dt', \quad (6)$$

$$C_{mn} = \frac{k_d \eta_d}{4} \int_{\text{cell } n} H_0^{(2)}(k_d R) dt', \quad (7)$$

$$D_{mn} = -\frac{1}{2}, \quad (8)$$

$$D_{mn} = \frac{k_d}{4j} \int_{\text{cell } n} \left(\cos \phi_n \frac{\Delta x}{R_m} + \sin \phi_n \frac{\Delta z}{R_m} \right) H_1^{(2)}(k_d R_m) dt', \quad (9)$$

式中 $\Delta x = x_m - x(t')$, $\Delta z = z_m - z(t')$, $R_m = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta z^2}$, ϕ_n 为第 n 段向外法向的极坐标角度。

同样,将得到的阻抗矩阵利用 Mallat 分解并用行索引压缩技术存储,再利用 BI-CGSTAB 求解,得到未知量 $\{j_n\}$ 和 $\{k_n\}$ 的值。如果不考虑锥形波入射的情况下,双站散射截面为

$$\sigma_{\text{TM}}(\theta_s) = \frac{k_0}{4} \left| \sum_{n=1}^N [\eta_0 j_n - k_n \cos(\theta_s + \phi_n)] w_n \exp[jk_0(x_n \sin \theta_s + Z_n \cos \theta_s)] \right|^2, \quad (10)$$

其与目标的双站散射截面的差值,即为差值双站散射截面。

3 数值计算

图3给出了理想电导体(PEC)导体粗糙面双站散射的本文小波 MOM 方法与参考文献[15]中经典 MOM 方法比较,其中波长 1 m,高度起伏均方 $h=0.05$ m,相关长度 $l=0.35$ m,入射角度 30° 。时域有限差分(FDTD)方法计算中离散网格尺寸(步长)为波长/20,粗糙面样本长度 40 个波长,归一化的雷达散射成面(RCS)为 50 个样本 RCS 的平均值。由图可以看出,两种方法计算结果一致,因此验证了本文方法的有效性。

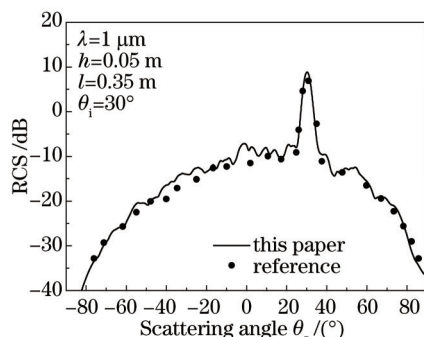


图3 小波 MOM 计算结果与文献结果的比较

Fig.3 Comparison between wavelet MOM simulation result and reference result

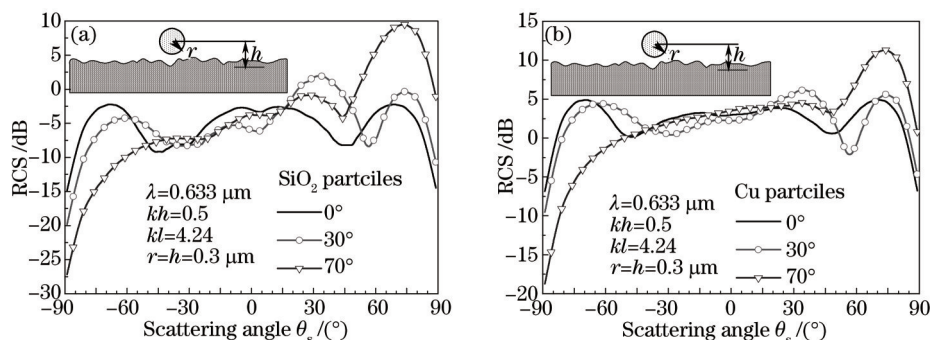


图4 不同入射角微粗糙基片上方不同材质单个粒子的差值双站散射截面比较

Fig.4 Difference bistatic radar cross section for the different material spherical particle above the slightly rough surface with different incident angle

图4(a)和图4(b)分别给出了不同入射角度时, SiO_2 和 Cu 粒子与光学基片微粗糙面的差值双站散射截面随散射角变化图。其中,入射波长为 $0.633 \mu\text{m}$,入射角分别为 $0^\circ, 30^\circ, 70^\circ$ 。 $r=h=0.3 \mu\text{m}$ 。微粗糙光学基底的物理性质在 2.1 节中已经给出描述。由图中可以看出,当入射角为 0° 时,差值双站散射截面的分布是对称

的。从物理意义上分析,因为当入射角为 0° 时即为垂直入射,而且冗余粒子为对称球体。不管冗余粒子的材质是金属还是氧化物,入射角为 70° 时,在散射角 70° 处出现明显差值散射截面峰值。入射角为 30° 时,在散射角 30° 处出现明显差值散射截面峰值。也恰好和 70° 的情况吻合。因此,在光学表面检测工程中,可以选择探测入射角的镜面方向进行重点探测,来判断是否有冗余粒子的存在。

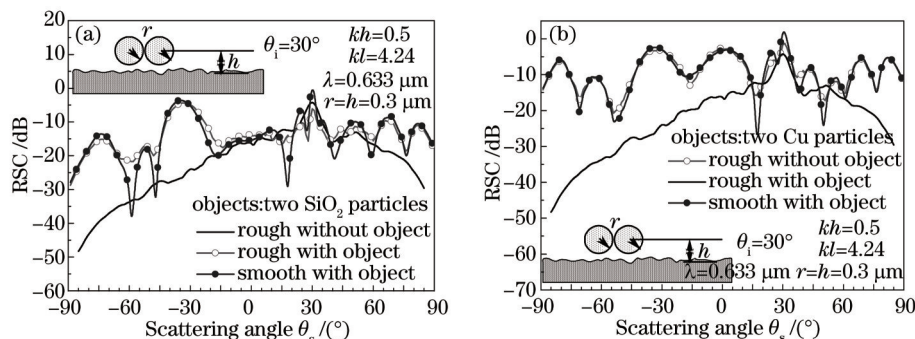


图5 K9玻璃基底分别为粗糙和平滑时有无冗余粒子双站散射截面

Fig.5 Bistatic radar cross section for with/without spherical particle above the K9 optical surface with/without roughness

图5(a)和图5(b)分别给出了入射角为 30° ,K9玻璃基底分别为粗糙和平滑时有无冗余粒子情况下的复合双站散射截面散射角分布图。计算参数同图4,粒子个数变为两个。由图可以看出,基底平滑时(点线),在镜向方向(散射角 30°),散射强度增强。从物理意义上分析,因为光学基底表面属于微粗糙面,其本身的镜向散射比较明显,因此,平滑与粗糙时的双站散射截面变化不大,即点线和圈线变化趋势很接近。黑实线与点线的差值,即为冗余粒子的贡献-差值场,即为图6中虚线的结果。

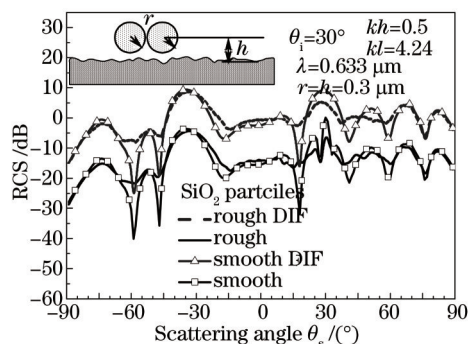


图6 双SiO₂粒子与K9玻璃基底的各情况双站散射截面

Fig.6 Bistatic radar cross section for different cases with double SiO₂ particles above the K9 optical surface

图6给出入射角为 30° 时,双SiO₂粒子与K9玻璃基底的多种情况的双站散射截面。其中,计算参数同图5,DIF表示差值散射截面。smooth表示K9玻璃基底为平滑面,rough表示K9玻璃基底为高斯型分布微粗糙面。由图中可以分别得出,冗余粒子位于平滑表面和微粗糙光学表面的贡献(三角点线和虚线)。实线和方块实线分别表示没有冗余粒子时光学表面自身所产生的光散射截面。上下两组线之间的差值,表示冗余粒子自身单独的贡献。不管哪种情况,极值点依然出现在镜面散射方向,物理意义上说明不管是基片自身的粗糙度贡献还是冗余粒子的贡献均对整体的复合散射影响不大,因此单独研究他们各自的差值散射场极具意义。

4 结 论

基于小波MOM方法研究了微粗糙光学基片表面与上方冗余粒子的差值光散射特性。从基本电场积分方程出发,推导出冗余粒子目标与光学基片微粗糙面的积分方程,得到阻抗矩阵,进而推导出散射耦合场及差值场,给出复合散射模型双站散射截面的计算公式,并与有关方法进行比较验证。数值计算并分析了1)不同入射角微粗糙基片上方不同材质单个粒子的差值双站散射截面。结果表明差值场的极值点出现在入射角的镜面方向且金属粒子的贡献比氧化物粒子的贡献大。2)K9玻璃基底分别为粗糙和平滑时有无冗余粒子的双站散射截面。结果表明光学基底表面属于微粗糙面,其本身的镜向散射较为明显。3)给出了双SiO₂粒子与K9玻

璃基底的多种情况的双站散射截面,给出冗余粒子自身的散射场分布,及粗糙面自身的散射场分布,表征出分别的贡献。不管哪种情况,极值点依然出现在镜面散射方向,说明不管是基片自身的粗糙度贡献还是冗余粒子的贡献均对整体的复合散射影响不明显,因此,对于日益发展的高精密光学领域,单独研究他们各自的差值散射场极具意义。本文局限于单个或双个球体粒子,对于两个以上的多体非球体粒子及周期性结构排布的粒子与微粗糙光学平面的差值场还在进一步研究和拓展中,有关理论和计算结果还有待于进一步实验验证。

参 考 文 献

- 1 Liu C Y, Liu T A, W E Fu. Out-of-plane ellipsometry measurements of nanoparticles on surfaces for thin film coated wafer inspection[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(6): 902-910.
- 2 Chiu T, Sarabandi K. Electromagnetic scattering interaction between leaves and thin branches[C]. 1998 IEEE International IGARSS, 1998: 300-302.
- 3 Pino MR, Landesa L, Rodriguez J L, *et al.*. The generalized forward-backward method for analyzing the scattering from targets on ocean-like rough surfaces[J]. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 1999, 47(6): 961-969.
- 4 Li L, He J Q, Liu Z J, *et al.*. MLFMA analysis of scattering from multiple targets in the presence of a half-space[J]. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2003, 51(4): 810-819.
- 5 Li Zhongxin, Jin Yaqiu. Investigation of bistatic scattering and transmission through fractal rough dielectric surfaces with the physics-based two-grids method in conjunction with the forward and backward method and spectrum acceleration algorithm[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, 51(7): 1403-1411.
李中新, 金亚秋. 双网格前后向迭代与谱积分法计算分形粗糙面的双站散射与透射[J]. *物理学报*, 2002, 51(7): 1403-1411.
- 6 Guo Lixin, Wang Yunhua, Wu Zhensen. Electromagnetic scattering interaction between a conducting plate and a 2-D conducting slightly rough surface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(11): 5130-5138.
郭立新, 王运华, 吴振森. 二维导体微粗糙面与其上方金属平板的复合电磁散射研究[J]. *物理学报*, 2005, 54(11): 5130-5138.
- 7 Guo Lixin, Wang Yunhua, Wu Zhensen. Application of the equivalence principle and the reciprocity theorem to electromagnetic scattering from two adjacent spherical objects[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(11): 5815-5823.
郭立新, 王运华, 吴振森. 等效原理和互易性定理在两个相邻球形目标电磁散射中的应用[J]. *物理学报*, 2006, 55(11): 5815-5823.
- 8 Li Chao, He Siyuan, Zhu Guoqiang, *et al.*. Fast forward computation of a 3-D PEC target in 2-D dielectric rough surface[J]. *Chinese J Geophys*, 2012, 55(11): 3848-3853.
李超, 何思远, 朱国强, 等. 维介质粗糙面下方三维金属目标复合电磁散射的快速正演算法[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(11): 3848-3853.
- 9 Liu P, Jin Y Q. Numerical simulation of bistatic scattering from a target at low altitude above rough sea surface under an EM-wave incidence at low grazing angle by using the finite element method[J]. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2004, 52(5): 1205-1210.
- 10 Gong Lei, Wu Zhensen, Gao Ming. Analysis of composite light scattering properties between wafers and many shapes of particles with different positions[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 0629003.
巩蕾, 吴振森, 高明. 基片与不同方位多形态缺陷粒子的复合光散射特性分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(6): 0629003.
- 11 Gong Lei, Wu Zhensen. Analysis of light scattering about slightly non-spherical nanoparticles on wafers[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(1): 0110001.
巩蕾, 吴振森. 基片表面微球体纳米级缺陷的光散射分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(1): 0110001.
- 12 Gong Lei, Wu Zhensen, Pan Yongqiang. The diagnosis of rayleigh defect particle position by light scattering character on the optical surface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(8): 0831003.
巩蕾, 吴振森, 潘永强. 利用光散射特性研究光学表面中瑞利缺陷粒子的方位诊断[J]. *光子学报*, 2014, 43(8): 0831003.
- 13 Ye Hongxia, Jin Yaqiu. The rapid calculating method of difference field scattering with the dielectric target above randomly rough surface[J]. *Science in China(Series G:Physics, Mechanics & Astronomy)*, 2006, 36(2): 142-157.
叶红霞, 金亚秋. 随机粗糙面上介质目标差场散射的快速计算方法[J]. *中国科学 G辑力学天文学*, 2006, 36(2): 142-157.
- 14 Johnson J T. A numerical study of scattering from an object above a rough surface[J]. *IEEE Trans Antennas Propagat*, 2002, 50(10): 1361-1367.
- 15 Tsang L, Kong J A, Ding K H, *et al.*. *Scattering of Electromagnetic Waves: Numerical Simulations*[M]. New York: Wiley-Interscience, 2001: 148.

栏目编辑: 刘丰瑞