

文章编号 1004-924X(2018)02-0268-08

## 微粗糙光学表面与多个镶嵌粒子差值散射场特性

葛城显<sup>1</sup>, 吴振森<sup>1\*</sup>, 白靖<sup>1</sup>, 巩蕾<sup>2</sup>

(1. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

2. 西安工业大学 光电工程学院, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 本文基于时域有限差分算法, 研究了微粗糙光学表面与多个镶嵌粒子的差值场光散射问题。将光学基片视为微粗糙光学表面, 利用蒙特卡洛方法解决了光学表面存在粗糙度的问题, 并将差值场散射理论加入到计算模型中, 更好地分析了缺陷粒子的散射特性, 将计算区域划分成上下两个半空间, 建立了微粗糙光学表面与镶嵌多体粒子复合散射模型, 并与矩量法计算结果比较验证了理论的有效性。运用此模型分析了入射角、镶嵌粒子尺寸、粒子间距、粒子个数等物性特征对微粗糙光学表面与镶嵌多体粒子差值散射场的影响。实验结果表明: 在一定激光入射角下, 以相同回波探测角度间距  $20^\circ$  对光学表面进行测量能够有效地检测出缺陷粒子。本文结果为光学无损检测、光学薄膜、微纳米结构的光学性能设计等提供了理论依据和技术支持。

**关键词:** 差值散射场; 多镶嵌粒子; 半空间时域有限差分法; 微粗糙光学表面

**中图分类号:** O436.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182602.0268

## Difference field scattering properties between multiple inlaid redundant particles and slightly rough optical surface

GE Cheng-xian<sup>1</sup>, WU Zhen-sen<sup>1\*</sup>, BAI Jing<sup>1</sup>, GONG Lei<sup>2</sup>

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. School of Photoelectric Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

\* Corresponding author, E-mail: wuzhs@mail.xidian.edu.cn

**Abstract:** In order to provide a theoretical basis for nondestructive examination, a calculation model for the difference scattering fields between a slightly rough optical surface and multiple inlaid defect particles is established by the finite difference time domain (FDTD) method. The Monte Carlo method is used to solve the problem of the optical surface with roughness. Moreover, the difference radar cross section is added into the half-space model to analyze the selected calculations for the effects of sizes, separation distances, numbers, and incident angles of the defects. The numerical results are analyzed in detail to determine the best position to find the defects in the optical surface by detecting in fixed steps of  $20^\circ$  for the incident angle. The work done in this paper will provide a theoretical basis and technological support for the fields of nondestructive examination, optical film, optical performance design of micro-/nano-structures, among others.

收稿日期: 2017-07-18; 修订日期: 2017-08-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61308071, No. 61601355, No. 61571355); 陕西省自然科学基金资助项目 (No. 2016JM6011)

**Key words:** difference scattering field; multiple inlaid particles; half-space finite difference time domain(FDTD); slightly rough optical surface

## 1 引言

光学介质表面薄膜的质量直接影响着所在光学系统的整体性能。光学介质薄膜的光散射特性与光学材料的物性参数、表面粗糙度以及膜中的缺陷状态紧密相关,表面粗糙度和缺陷散射损耗是限制光学薄膜器件特性的主要因素<sup>[1-2]</sup>。笔者所在研究团队之前做过一些关于微粗糙光学表面与上方掩埋粒子的复合散射特性,不过对于多个(五个及以上)镶嵌粒子的差值场特性还未进行过探讨。由于微粗糙光学表面与镶嵌多体粒子的差值散射场特性极具科学意义,所以本文基于时域有限差分法(Finite Difference Time Domain, FDTD),研究了微粗糙光学表面上多个缺陷的散射特性,为激光无损检测提供了理论依据。

在过去的数年里,关于光学材料表面与粒子间的复合散射问题,国内外学者已经展开了一些研究工作。材料表面含有粒子的解析理论最早由 Bobbert 和 Vlieger<sup>[3]</sup>提出,通过矢量球谐函数或德拜势函数得到材料表面的反射矩阵,再利用散射传输矩阵将该方法扩展为轴对称粒子或一般的非球形粒子与界面的散射。Taubenblatt 和 Tran<sup>[4]</sup>应用 Sommerfeld 积分处理了表面污染物与粒子之间的耦合散射问题。Videen<sup>[5]</sup>应用散射矩阵研究了瑞利小粒子在薄膜介质表面的偏振散射问题。Schmehl<sup>[6]</sup>采用离散偶极子近似方法研究了硅基片上聚苯乙烯粒子的散射问题。然而,解析法在研究问题上有着特殊的限定和条件,在研究特定问题时存在局限性。本文采用数值法,因为它能够避开解析方法的限定性而得到一些重要的散射效应,用以分析缺陷粒子和微粗糙光学表面各自的散射贡献。

关于粗糙面与目标复合散射<sup>[7]</sup>的研究,Pino 等<sup>[8]</sup>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<sup>[9]</sup>利用复镜向技术和 MLFMA (Multilevel Fast Multipole Algo-

rithm)计算了界面上存在多个目标时的电磁散射。叶红霞等<sup>[10]</sup>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。郭立新等<sup>[11-12]</sup>引入互易性定理结合高频算法计算了目标与目标之间、导体粗糙面与其上方球形目标与平板目标复合电磁散射的混合方法。李超等<sup>[13]</sup>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<sup>[14]</sup>应用有限元区域分解法计算了一维海面及其上方飞行目标的电磁散射。

上述研究工作大部分集中在电磁波段,在激光波段下基底与目标的复合散射研究仍然很少。在精密无损检测中,缺陷粒子大多为微米级或微纳米级,传统的电磁检测无法分辨缺陷粒子,而且随着激光技术的不断发展及完善,基于光散射的光学表面质量检测已经成为一种重要的研究理论。

随着无损检测技术的不断发展,研究缺陷在微粗糙光学背景下的差值场散射可以更好地分析缺陷的特性,并及时有效地分辨基片上是否含有缺陷。Johnson<sup>[15]</sup>首次提出了差值散射场的概念,即分别计算背景有无目标时的散射场,再利用前后散射场的差值得到雷达散射截面,即差值雷达散射截面。

本文将差值场的概念加入到 FDTD 计算模型中,为了更加贴近真实的光学基片,利用蒙特卡罗方法模拟微粗糙的光学表面,计算了微粗糙光学表面与多个镶嵌粒子的差值场散射特性,分析了入射角度、粒子尺寸、粒子间距等因素的影响。

## 2 计算模型

微粗糙光学表面示意图见图 1,这里将逐一说明计算模型的建立过程。

### 2.1 FDTD 中的差值场散射理论

在 FDTD 法中,电磁场递推公式可以由下式得到:

$$H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{i}{2}) = CP(m) H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}) - CQ(m) \frac{1}{\Delta y} [E_z^n(i, j + 1) - E_z^n(i, j)], m = i, j + \frac{1}{2}, \quad (1)$$

$$H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2},j) = CP(m)H_y^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2},j) + CQ(m)\frac{1}{\Delta x}[E_z^n(i+1,j) - E_z^n(i,j)], m=i+\frac{1}{2},j, \quad (2)$$

$$E_z^{n+1}(i,j) = CA(m)E_z^n(i,j) + CB(m)\left[\frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2},j) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2},j)}{\Delta x} - \frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j+\frac{1}{2}) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i,j-\frac{1}{2})}{\Delta y}\right], m=i,j, \quad (3)$$

其中:

$$CA(m) = \left(\frac{\varepsilon(m)}{\Delta t} - \frac{\sigma(m)}{2}\right) / \left(\frac{\varepsilon(m)}{\Delta t} + \frac{\sigma(m)}{2}\right),$$

$$CB(m) = 1 / \left[\frac{\varepsilon(m)}{\Delta t} + \frac{\sigma(m)}{2}\right],$$

$$CP(m) = \left(\frac{\mu(m)}{\Delta t} - \frac{\sigma_m(m)}{2}\right) / \left(\frac{\mu(m)}{\Delta t} + \frac{\sigma_m(m)}{2}\right),$$

$$CQ(m) = \frac{\Delta t}{\mu(m)} / \left(1 + \frac{\sigma_m(m)\Delta t}{2\mu(m)}\right).$$

文中只列出了 TM 波情况,上式中的参数意义可由文献[16]获得,本文不再赘述,基础的 FDTD 研究不作为本文研究的重点。

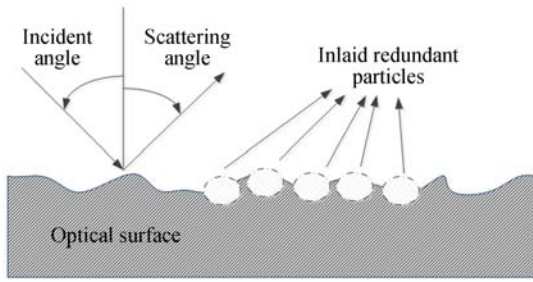


图 1 球形粒子镶嵌在微粗糙光学表面示意图

Fig. 1 Geometry of spherical particles inlaid slightly rough optical surface

对于差值散射场情况,首先,由式(1)和式(2)得出粗糙面的散射场  $H_x'$  和  $H_y'$ ,然后运用同样的方法计算出微粗糙光学表面与缺陷粒子的散射场  $H_x''$ ,  $H_y''$  和  $E_z''$ ,最后差值散射场可以由以下式子得出:

$$H_x = H_x'' - H_x', \quad (4)$$

$$H_y = H_y'' - H_y', \quad (5)$$

$$E_z = E_z'' - E_z'. \quad (6)$$

在式(4)~式(6)中,运用互易定理,将  $E_z$ ,  $H_x$ ,  $H_y$  进行远近场变换,即可得到差值雷达散射截面。

## 2.2 微粗糙面模型

在本文中,微粗糙光学表面区别于传统的粗糙表面,微粗糙光学表面的粗糙度均为微米量级,传统的电磁波段入射光波无法探测到如此微小的粗糙度,会将微粗糙面看作光滑平面,只有在光波

段入射波照射下,微粗糙度才可以被分辨出。所以为了探究微纳米量级光学表面的无损检测问题,本文将光学基底表面看成微粗糙光学表面,这样在激光入射下会更贴近实际检测标准,计算结果也更加准确。

微粗糙面计算模型由蒙特卡洛法模拟得出,然后根据 FDTD 法离散间隔的选取进行粗糙面模拟。由于粗糙表面由大量谐波叠加而成,谐波振幅是独立的高斯随机变量,其方差正比于特定波数的功率谱  $W(K_m)$ ,由此可以得到如下长度为  $L$  的粗糙面的表面起伏高度,在二维  $x$  方向上等间隔取样,每一点  $x$  处的粗糙面起伏高度为<sup>[17]</sup>:

$$z(x) = \frac{1}{L} \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} F(K_m) e^{iK_m x}, \quad (7)$$

$$F(K_m) = \sqrt{2\pi L W(K_m)} \times \begin{cases} [N(0,1) + jN(0,1)]/\sqrt{2} & m \neq 0, N/2 \\ N(0,1) & m \text{ or } n = 0, N/2 \end{cases}, \quad (8)$$

其中: $x$  表示粗糙面上任意一个采样点,  $F(K_m)$  与  $z(x)$  称为傅里叶变换对,  $N(0,1)$  是均值为 0、方差为 1 的高斯随机数。

$$F(k_m) = F^*(K_{-m}),$$

$$W(K_m) = \frac{l\delta^2}{2\sqrt{\pi}} e^{-K_m^2 l^2/4}, \quad (9)$$

其中: $l$  表示相关长度,  $\delta$  为均方根高度,  $K_m = 2\pi m/L$  为离散波数,  $W(K_m)$  为高斯粗糙面功率谱。在  $m > 0$  时,  $F(K_m)$  满足共轭对称关系  $F(k_m) = F^*(K_{-m})$ ,这样可以保证傅里叶逆变换后得到的粗糙表面轮廓  $z(x)$  为实数,由此就可以模拟高斯随机粗糙面。式(9)中,  $l$  与  $\delta$  的取值量级决定光学表面是否为微粗糙表面。最后,通过 FDTD 方法将上述得到的粗糙表面轮廓加入到计算模型中,即可得到 FDTD 法中的微粗糙光学表面。

## 2.3 半空间 FDTD 模型

在本文中,半空间 FDTD 模型见图 2,吸收边界为完全匹配层(Perfect Match Layer, PML),粗糙面通过 2.2 节理论加入到模型中,粗糙面上方

区域被划分为总场区域与散射场区域,在两区域中间连接边界上加入入射波,在输出边界上进行场散射远近场变换,同时为了避免粗糙面与吸收边界截断处产生误差,在计算模型中加入了窗函数<sup>[16]</sup>。通过此模型可以计算微粗糙光学表面与镶嵌粒子的复合/差值场散射。

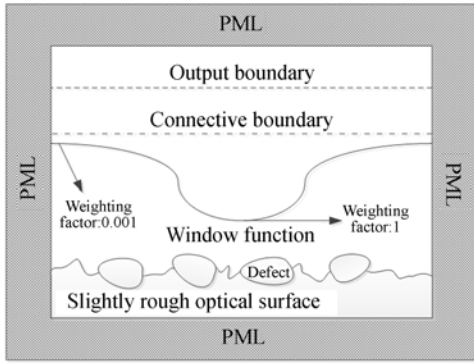
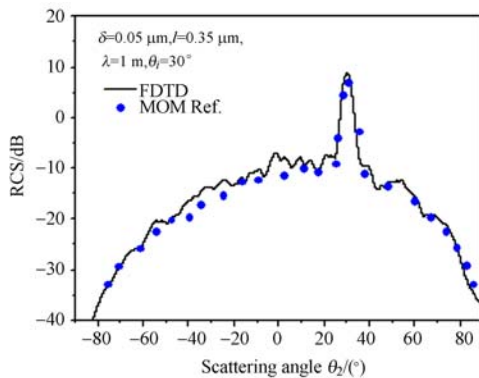


图 2 半空间 FDTD 计算模型示意图

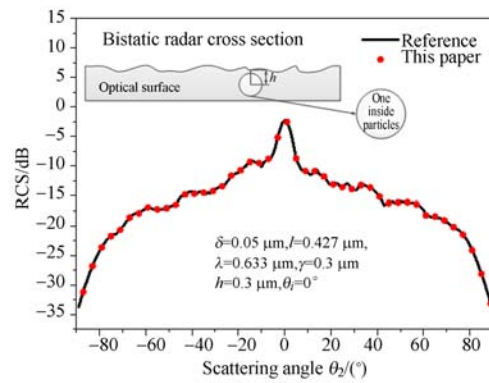
Fig. 2 Schematic diagram of half-space FDTD model

### 3 数值计算结果与分析

为了验证本文方法的有效性,图 3(a)为本文理论与矩量法(MOM)<sup>[18]</sup>的对比。其中粗糙面为理想导体,FDTD 的离散间隔为  $\lambda/20$ ,入射波长  $\lambda$  为 1 m,相关长度  $l$  为 0.35 m,均方根高度  $\delta$  为 0.05 m,入射角  $\theta_i$  为  $30^\circ$ ,粗糙面长度为  $40\lambda$ 。图 3(b)给出单气泡掩埋微粗糙表面下方时双站雷达散射截面本文结果与文献[19]的对比,微粗糙基底材料为 K9 玻璃,入射波长为  $0.633 \mu\text{m}$ 。由于粗糙面起伏为随机的,为了减小数值计算的误差,最终 RCS 结果为 50 次计算的平均值。由图 3



(a) 半空间 FDTD 与 MOM 方法  
(a) Half-space FDTD and MOM



(b) 单气泡掩埋微粗糙光学表面下双站雷达散射截面  
(b) Bistatic radar cross section for air bubble inside slightly rough optical surface

图 3 本文结果与文献结果对比图

Fig. 3 Comparison of results between this paper and reference

可知,本文曲线与文献曲线基本吻合,所以本文建立的计算模型是正确有效的,即模型中各关键条件设置准确。鉴于 FDTD 法的良好适用性,在验证模型后,下文设定入射波长为激光波段来进行复杂结构的数值计算分析。

#### 3.1 微粗糙面与五个镶嵌粒子的复合散射

为了能够直观地看出微粗糙光学表面与多个镶嵌粒子的复合散射情况,在图 4 中分别画出微粗糙面、微粗糙面与粒子以及光滑表面与粒子的复合散射情况,其中 K9 玻璃被选作光学基底,K9 玻璃的折射率为  $(1.52, 0)$ ,粗糙面上镶嵌粒子的数目为 5,每个缺陷粒子球心间的间距  $d$  为  $3\lambda$ ,入射角度为  $30^\circ$ ,入射波长  $\lambda$  为  $0.6328 \mu\text{m}$ ,粗糙面

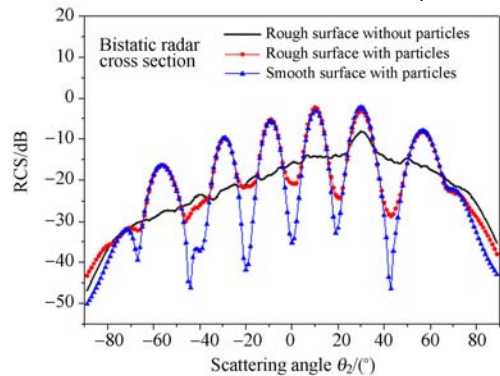


图 4 光学基片(有/无粗糙度)存在缺陷粒子与不存在缺陷粒子的复合光散射

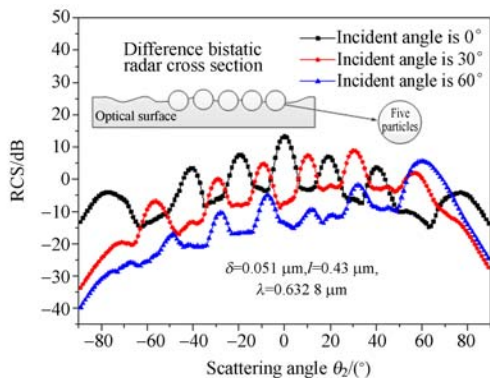
Fig. 4 Bistatic radar cross section for slightly rough optical surface, slightly rough surface with particles and smooth surface with particles

相关长度  $l$  与均方根高度  $\delta$  分别为  $0.43 \mu\text{m}$  和  $0.051 \mu\text{m}$ , 镶嵌粒子为  $\text{SiO}_2$ , 折射率为  $(1.67, 0)$ , 粒子半径  $r$  为  $1\lambda$ 。由图 4 可知, 点线与三角点线散射峰值相近, 而点线散射曲线的极小值比三角点线要大, 这是由于两者都是光学基底与镶嵌粒子的复合散射, 而点线对应微粗糙度基底; 再对比黑线可以看出, 将基底看作微粗糙结构更加贴近真实情况, 在无损检测中也会更加准确, 而仅从复合散射场看不出不同基底下缺陷粒子单独的散射贡献, 所以研究缺陷粒子的差值散射变得尤为重要。

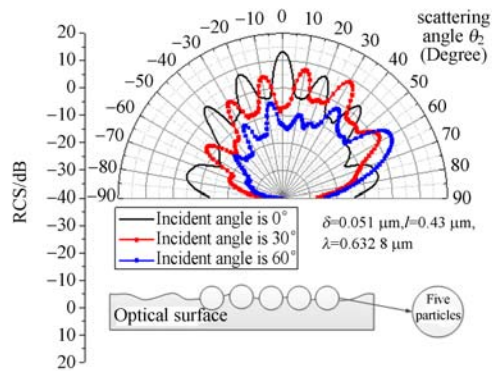
### 3.2 不同入射角度下多个缺陷粒子与微粗糙表面的差值场

利用 2.1 中的差值场散射理论, 不同入射角下 5 个粒子镶嵌在微粗糙光学表面上的差值场散射结果如图 5 所示。图 5 的参数与图 4 相同, 由图 5 可知, 当入射角为  $0^\circ$  时, 差值雷达散射截面图线是对称的, 这是由于入射波垂直于光学基底照射, 并且缺陷粒子为对称球形; 在入射角分别为  $30^\circ$  和  $60^\circ$  时, 散射曲线的峰值永远出现在散射角与入射角相同处, 由此可以得出, 在探测多个粒子镶嵌在微粗糙光学表面上时, 可以通过激光入射角度的镜像位置进行回波探测, 进而判断光学基底中是否存在缺陷。

由图 5(b) 可以更直观地看出, 在缺陷粒子很多的情况下, 散射曲线的峰值存在多个, 并且对于特定入射角度下, 散射曲线的峰值间距都相差固定角度。这项结果表明, 在多粒子镶嵌在光学表面时, 在一定激光入射角度下, 通过固定角度间距  $20^\circ$  进行回波测量可以更准确地确定基片的损伤情况。



(a)  $x-y$  坐标图  
(a)  $x-y$  plot



(b) 极坐标图  
(b) Polar plot

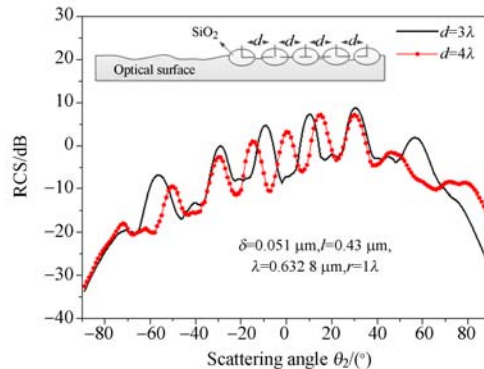
图 5 五个粒子镶嵌在微粗糙光学表面的差值双站雷达散射截面

Fig. 5 Difference bistatic radar cross section for five defect particles inlaid slightly rough optical surface

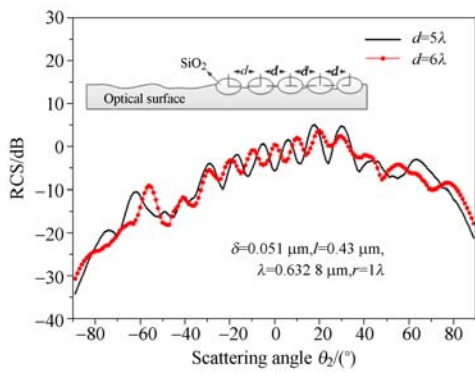
### 3.3 不同缺陷粒子间距下的差值散射场特性

图 6 中, 入射角为  $30^\circ$ , 其余参数与图 4 相同。由图可以看出, 在彼此间距同步变化时, 随着缺陷粒子间距的增大, 差值散射曲线的峰值由震荡加剧变为平滑, 这是由于随着间距  $d$  的增加, 5 个缺陷粒子之间的相互散射作用越来越小, 散射曲线将无限趋近单粒子镶嵌光学基底的情况。所以, 在进行光学表面无损检测时, 应先运用 3.2 节结论判定基底表面有无镶嵌粒子, 然后利用本节结论可大致分析出缺陷的间距。

图 7 所示为缺陷粒子间距不同步变化时的差值双站雷达散射截面, 入射角选为  $0^\circ$  是因为可以直观观测间距不同时正负散射角度 RCS 值的区别, 实线表示微粗糙表面上 5 个镶嵌粒子从左到右间距依次变大, 虚线表示粒子间距从左到右依



(a)  $d = 3\lambda, 4\lambda$



(b)  $d = 5\lambda, 6\lambda$

图 6 五个缺陷粒子不同球心间距下的差值双站雷达散射截面

Fig. 6 Difference bistatic radar cross section for five particles with different distances

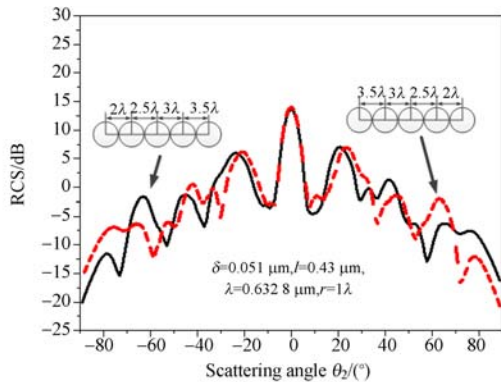


图 7 五个缺陷粒子不均匀球心间距下的差值双站雷达散射截面

Fig. 7 Difference bistatic radar cross section for five particles with non-uniform distances

次减小,最短间距为  $2\lambda$ ,此时相邻两粒子相切。图 7 中,实线的负散射角部分与虚线的正散射角部分对称,同样实线的正散射角部分与虚线的负散射角部分对称,这是由于入射角度为  $0^\circ$ ,且粒子间距左右变化幅度相同,此结果同样验证了本文理论的正确性。并且在间距较小时散射峰值明显,除散射峰主极大之外,间距较小时次极大峰值比粒子间距较大时略低,在间距较大时曲线变化更加敏感,随着粒子间距的不断扩大,曲线逐渐向图 6 中结论趋近,即粒子间的相互作用逐渐减小,曲线逐渐趋于单粒子镶嵌光学基底的情况。

### 3.4 不同缺陷粒子半径的散射场

为了能更加清楚地分析缺陷粒子尺寸对整个散射场的影响,方便判断无损检测中粒子尺寸的

最小量,本节计算了不同粒子尺寸下复合光散射场与单独微粗糙光学表面的散射场。入射角度为  $0^\circ$ ,  $r$  为粒子半径,其余参数与图 4 参数相同。由图 8 可知,随着缺陷粒子半径的减小,散射曲线越来越接近只有微粗糙光学表面时的散射角分布;当  $r=0.1\lambda$  时,变化趋势基本和微粗糙光学基底雷达散射截面重合,因此,在光学表面无损检测工程中,当多体粒子的半径小于  $0.1\lambda$  时,镶嵌粒子对散射场的贡献可以忽略。

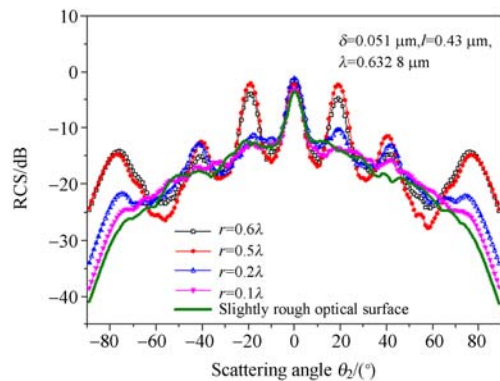


图 8 不同缺陷粒子尺寸下双站雷达散射截面

Fig. 8 Bistatic radar cross section for defect particles in different sizes

### 3.5 不同缺陷粒子个数下的差值散射场特性

为了能够分析更多缺陷粒子对无损检测的影响,区别 5 个以上缺陷粒子的不同散射特性,本节研究了 5 个及以上缺陷粒子个数对差值场的不同贡献,探测入射角为  $0^\circ$ ,粒子的半径、间距、微粗糙面相关参数等与图 4 相同,缺陷粒子个数不同时的差值场散射结果如图 9 所示。由图可知,随着缺陷粒子个数的增加,散射峰的个数减小,曲线

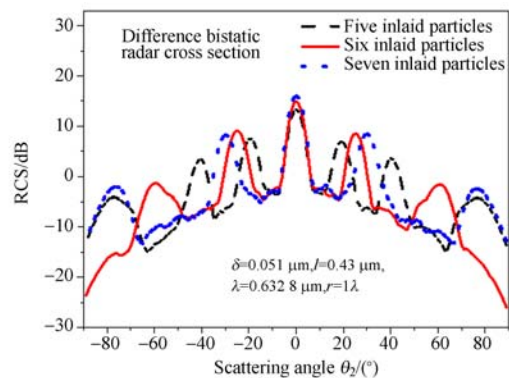


图 9 不同缺陷粒子个数下差值雷达散射截面

Fig. 9 Difference bistatic radar cross section for different numbers of particles

各散射峰值之间的间距增大,并且在散射角为 $0^\circ$ 时 RCS 值逐渐增大,这是由于粒子个数在增加过程中,粒子的散射贡献变大,粒子间的相互作用变多,且粒子之间的排布相比随机微粗糙面更加均匀,所以 RCS 值变化敏感度下降。这些结果表明,在不同缺陷粒子个数镶嵌下,回波探测的固定间隔角度会随之改变,且为了测量更准确,一定入射角度下,回波探测角度应尽量在 $-50^\circ\sim 50^\circ$ ,太大的回波探测角度会引入边缘效应等误差。

## 4 结 论

基于半空间 FDTD 方法,引入差值场散射概念,为了与实际光学表面情况相符,将传统光学表面看作微粗糙结构,提出了多体粒子概念,建立了微粗糙光学表面与镶嵌粒子的复合散射模型,计算模型与矩量法(MOM)等进行对比,验证了本文计算模型的正确性,本文研究了五个球形粒子镶嵌在微粗糙光学表面时的差值散射场,分析了入射角、粒子尺寸、粒子间距和粒子数目对复合散射场/差值散射场的影响。实验结果表明:当五

个粒子镶嵌在微粗糙光学表面时,在一定激光入射角度下,通过固定角度间距 $20^\circ$ 进行回波测量可以更准确地确定光学基片是否存在缺陷。随着光学表面缺陷粒子间距的增大,差值雷达散射截面角分布震荡剧烈,散射场的场值降低,因为缺陷粒子间的相互作用越来越小,更多的能量消耗在粒子与基片的相互作用上,所以工程上,缺陷粒子间距越近,对探测更敏感。当入射波垂直入射时,随着缺陷粒子半径的减小,散射结果越来越接近只有微粗糙光学表面时的散射角分布,在光学无损检测工程中,当粒子半径小于 $0.1\lambda$ 时,缺陷粒子的散射贡献可以忽略不计。当缺陷粒子数目为五个以上时,随着缺陷粒子个数的增加,散射峰的个数减小,散射峰值之间的散射角间距增大,所以在探测五个以上缺陷粒子时回波测量角度间隔要相应增加。

本文的研究局限于多体目标镶嵌在微粗糙光学表面上的散射问题,对于多层膜系与周期性排布粒子的复合/差值场散射研究将是下一步工作的重点。

## 参考文献:

- [1] 周成虎,张秋慧,黄明明,等. 杂质微粒对薄膜的损伤效应[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 0721004.  
ZHOU CH H, ZHANG Q H, HUANG M M, *et al.*. Damage effects of impurity particles on film [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0721004. (in Chinese)
- [2] 田爱玲,王辉,王春慧. 光学元件亚表面损伤的激光散射仿真研究[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0908006.  
TIAN A L, WANG H, WANG CH H. Simulation research on the light-scattering properties of the subsurface damage of optical components[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(9): 0908006. (in Chinese)
- [3] BOBBERT P A, VLEIEGER J. Light scattering by a sphere on a substrate[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 1986, 137(1-2): 209-242.
- [4] TAUBENBLATT M A, TRAN T K. Calculation of light scattering from particles and structures on a surface by the coupled-dipole method[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1993, 10(5): 912-919.
- [5] VIDEEN G, HSU J Y, BICKEL W S, *et al.*. Polarized light scattered from rough surfaces [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1992, 9(7): 1111-1118.
- [6] SCHMEHL R, NEBEKER B M, HIRLEMAN E D. Discrete-dipole approximation for scattering by features on surfaces by means of a two-dimensional fast Fourier transform technique[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1997, 14(11): 3026-3036.
- [7] 姜宇,于少鹏,高红友. 基于 Daubechies 小波的 MRTD 在电磁散射中的应用[J]. 光学精密工程, 2008, 16(10): 2014-2019.  
JIANG Y, YU SH P, GAO H Y. Application of Daubechies-wavelet-based multiresolution time domain to electromagnetic scattering[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(10): 2014-2019. (in Chinese)
- [8] PINO M R, LANDESA L, RODRIGUE J L, *et al.*. The generalized forward-backward method for analyzing the scattering from targets on ocean-like rough surfaces[C]. *Proceedings of IEEE Anten-*

- nas and Propagation Society International Symposium, IEEE, 1999; 1406-1409.*
- [9] LI L, HE J Q, LIU ZH J, *et al.*. MLFMA analysis of scattering from multiple targets in the presence of a half-space[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, 51(4): 810-819.
- [10] 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.  
LI ZH X, JIN Y Q. 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. (in Chinese)
- [11] 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.  
GUO L X, WANG Y H, WU ZH S. Electromagnetic scattering interaction between a conducting plate and a 2-D conducting slightly rough surface [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 54(11): 5130-5138. (in Chinese)
- [12] 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.  
GUO L X, WANG Y H, WU ZH S. 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. (in Chinese)
- [13] 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.  
LI CH, HE S Y, ZHU G Q, *et al.*. Fast forward computation of a 3-D PEC target buried in 2-D dielectric rough surface [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(11): 3848-3853. (in Chinese)
- [14] 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 Transactions on Antennas and Propagation*, 2004, 52(5): 1205-1210.
- [15] JOHNSON J T. A numerical study of scattering from an object above a rough surface [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2002, 50(10): 1361-1367.
- [16] FUNG A K, SHAH M R, TJUATJA S. Numerical simulation of scattering from three-dimensional randomly rough surfaces [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(5): 986-994.
- [17] TSANG L, KONG J A, DING K H, *et al.*. Scattering of electromagnetic waves, numerical simulations [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2004, 25(8): 1155-1160.
- [18] 巩蕾, 吴振森, 代少玉, 等. 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 [J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 348-353.  
GONG L, WU ZH S, DAI SH Y, *et al.*. Study on difference field scattering properties between slightly rough optical surface and above redundant particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0829001. (in Chinese)
- [19] 巩蕾, 吴振森, 葛城显, 等. 微粗糙光学表面与掩埋多体粒子复合光散射特性 [J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1203001.  
GONG L, WU ZH S, GE CH X, *et al.*. Composite light scattering properties between slightly rough optical surface and multi-body particles [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1203001. (in Chinese)

## 作者简介:



葛城显(1991—),男,吉林通化人,博士研究生,主要从事目标复合光散射特性及辐射力的研究。E-mail: cxge@stu.xidian.edu.cn

## 导师简介:



吴振森(1946—),男,湖北沙市人,教授,博士生导师,1969年于西安交通大学获得学士学位,1981年于武汉大学获得硕士学位,主要从事目标与环境光学特性,复杂结构的电磁波传播和散射电磁环境模化技术等研究。E-mail: wuzhs@mail.xidian.edu.cn