

光学元件亚表面损伤的激光散射仿真研究

田爱玲 王辉* 王春慧

(西安工业大学陕西省薄膜与光学检测技术重点实验室, 陕西 西安 710032)

摘要 光学元件的亚表面损伤直接影响其使用性能和抗激光损伤阈值等重要指标,而造成这些危害的根本原因是损伤引入的光散射。针对 K9 玻璃光学元件建立损伤模型,结合时域有限差分(FDTD)算法,模拟研究了会聚入射光被光学元件亚表面缺陷如微裂纹、气泡等调制后的光场分布以及光沿纵深方向扫描时探测器所接收的亚表面损伤引入的散射光强变化。研究结果对探索光学元件亚表面损伤的测量方法有重要的理论指导意义。

关键词 光学器件;亚表面损伤;时域有限差分;光散射

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0908006

Simulation Research on the Light-Scattering Properties of the Subsurface Damage of Optical Components

Tian Ailing Wang Hui Wang Chunhui

(Shaanxi Key Laboratory of Film and Optical Inspection Technology, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710032, China)

Abstract There is a serious effect directly for optical element sub-surface damage to optical performance and laser damage threshold in the application, and the primary cause is due to light scattered by subsurface damage. Aim to K9 glass optical element, the simulation model is built. By using finite difference time domain (FDTD) method, the light field distributions, which are the incident light modulated by subsurface micro-cracks and bubbles, are simulated, and the scattering light intensity variation received by detector is analyzed. The results have important theoretical guideline to further study the measuring methods of optical components subsurface damage.

Key words optical devices; subsurface damage; finite difference time domain; light scattering

OCIS codes 120.4630; 120.5820; 240.6645; 290.5820

1 引言

随着空间望远镜、高能激光、惯性约束核聚变、激光陀螺和光刻镜头等光学系统的飞速发展,无亚表面损伤的超光滑表面光学元件的应用越来越多。亚表面损伤是指光学元件研磨过程中在表面下产生的微裂纹和残余应力,它的存在直接影响光学元件的成像质量、抗激光损伤阈值、稳定性和使用寿命等重要性能指标。近年来,研究光学元件亚表面损伤的检测技术成为光学工程领域研究的一个热点问题^[1]。

由于亚表面损伤的隐蔽性,对其检测有诸多困

难。光学元件亚表面损伤通常包括微裂纹、气泡以及残余应力等缺陷类型,其共同特点是破坏了原有基底材料的光学均匀性。微裂纹和气泡区域折射率的变化有两种情况,一种是损伤处充满了空气,另一种是裂纹中含有研磨剂和玻璃粉的混合物。无论哪种情况,其折射率与玻璃的折射率都有明显差异。当光波经过这些损伤区域时,由于折射率的变化就必然发生散射现象。近年来提出的一种基于激光共焦的亚表面损伤非破坏性检测方法^[2],它是利用亚表面损伤对入射光的散射调制信号分析光学元件亚

收稿日期: 2013-03-05; 收到修改稿日期: 2013-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(51075322)、陕西省教育厅资助项目(12JS048)

作者简介: 田爱玲(1964—),女,博士,教授,主要从事光学检测、光电测试等方面的研究。E-mail: tian21964@sohu.com

* 通信联系人。E-mail: yueye216@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

表面的缺陷信息。但是,由于亚表面损伤对光散射调制的复杂性,实际检测精度还不理想。针对光学元件亚表面损伤的散射调制问题,重点研究亚表面损伤的光散射特性以及光散射调制变化规律,探索提高检测精度的有效途径。

目前,常用的电磁波散射计算方法有蒙特卡罗方法与有限元分析两种^[3]。对于光学零件亚表面损伤的散射来说,当利用蒙特卡罗方法模拟计算出了所有出射光子的自由程和出射方向角后,就得到了整个缺陷层的散射效果分布,然而在计算过程中碰撞是按概率进行,不是按实际运动轨迹进行,并且,计算的是样本,不是真实值;有限元是将连续的求解域离散成一组有限个、按一定方式相互联结在一起的单元的组合体,利用有限元求解时,单元尺寸可依据需要划分,相邻介质性质可以不同,混和边界条件容易处理,各种复杂单元可以使几何形状复杂的求解域模型化,各节点上的解的近似函数可以用来求解整个求解域上任一点的结果。时域有限差分法(FDTD)是一种有限元分析方法,在解决非均匀介质、任意形状和复杂结构的散射时优点明显,采用FDTD,结合仿真软件,在合理假设的基础上构造符合实际测量的几何模型,仿真研究激光共聚焦测量光学元件亚表面损伤的光散射特性及其共聚焦探测信号的强度变化^[4-8]。现有的光波散射理论主要研究微粒尺寸和光学元件表面形貌的测量,本文提出了利用光波散射理论研究光学元件亚表面损伤分布

特征,目的是更好地理解亚表面损伤的散射特性,为进一步研究其检测方法提供理论指导。

2 光学元件亚表面损伤散射的模型构建

本文研究了基于共焦层析法测量光学元件亚表面损伤的光散射特性。共焦测量的特点是点照明和点探测,即只有来自焦平面的光波才能通过探测针孔到达探测器,其余来自非焦平面的光全部被阻挡。因此,探测器接收到的光信号仅仅反映被照明点的信息。如果照明点是被检测光学元件亚表面内某点,则可以获得该点的损伤信息。如果沿纵深方向移动被测样品,就能够实现对样品内不同层面的扫描,最后得到整个亚表面损伤的层析分布^[9-10]。

2.1 FDTD 法原理和几何-电磁建模

为了分析光学元件亚表面损伤的光学散射问题,采用FDTD的方法。该方法通过网格离散能够对任意几何结构和任意材料组成的表面散射进行计算,有效地分析了电磁学数值问题^[11],如图1所示。在FDTD网格剖分时,从麦克斯韦(Maxwell)旋度方程出发,在空间和时间上对电场 E 和磁场 H 分量采取交替抽样离散,即每一个 E (或 H)场分量周围有四个 H (或 E)场分量环绕,离散网格中就包含了微表面的结构信息。这种抽样方式后来被称为Yee元胞,即Yee元胞就是电场和磁场交互环绕的一种网格结构。图1为FDTD离散网格^[12]及电场和磁场各节点之间的空间关系。

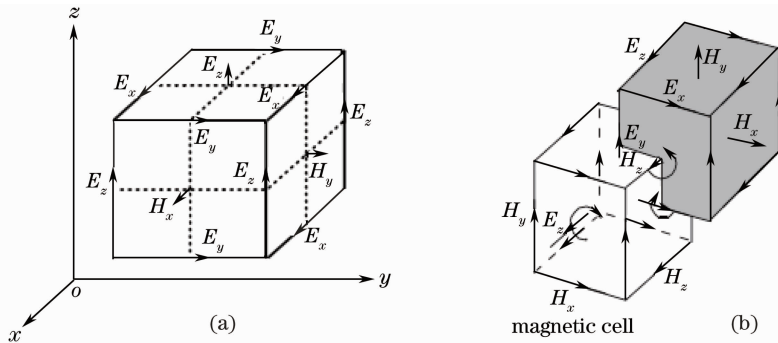


图1 FDTD离散网格及其电磁场位置关系。(a) Yee元胞; (b) 电磁场位置关系

Fig. 1 FDTD discrete grid and its connection with electro-magnetic field position. (a) Yee cellular; (b) connection with electro-magnetic field position

假设有一个入射的电磁场,其麦克斯韦方程的旋度方程^[13]表示为

$$\begin{cases} \Delta \times E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} - J_m \\ \Delta \times H = -\epsilon \frac{\partial E}{\partial t} - J \end{cases}, \quad (1)$$

式中 J_m 为磁流密度, J 为电流密度, μ 表示磁导系数, ϵ 表示介质介电常数。用FDTD计算方法就可以推导出该电磁场与介质相互作用下的场分布。利用Yee网格离散方法对(1)式进行中心差分。电场在空间和时间上的FDTD的逐步推进公式如下所示:

$$E_x^{n+1}\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) = \frac{1 - \delta(i + 1/2, j, k)\Delta t}{2\epsilon(i + 1/2, j, k)} \cdot E_x^n\left(i + \frac{1}{2}, j, k\right) + \frac{\Delta t}{\epsilon(i + 1/2, j, k)} \cdot \frac{1}{1 + [\sigma(i + 1/2, j, k)\Delta t]/[2\epsilon(i + 1/2, j, k)]} \cdot \left[\frac{H_z^{n+1/2}(i + 1/2, j + 1/2, k) - H_z^{n+1/2}(i + 1/2, j - 1/2, k)}{\Delta y} + \frac{H_y^{n+1/2}(i + 1/2, j, k - 1/2) - H_y^{n+1/2}(i + 1/2, j, k + 1/2)}{\Delta z} \right], \quad (2)$$

式中 i, j, k 分别为电磁场各节点对应 x, y, z 坐标的空间分量取样, 时间轴 t 的取值为 $n (n = 1, 2, 3, \dots)$, σ 表示电导率。从(2)式可知, 每个网格点的递推值依赖于该点在前一时刻和临近点的值。若已知初始 $t_{e1} = t_{e0} = n\Delta t$ 时刻空间各处的 E 值, 则可递推得到 $t_{h1} = t_{e1} + \Delta t/2$ 时刻空间各点的 H 值。同理, 可递推算出 $t_{e2} = t_{h1} + \Delta t/2$ 时刻空间各处 E 的值, 然后由 E 值反推得到 $t_{h2} = t_{e2} + \Delta t/2$ 时刻空间各点的 H 值。如此循环往复, 即得到 FDTD 在时域的交叉半步逐步推进计算结果。

对于二维情况, 当满足时间步长 $\Delta t \leq T/12$ 、稳定条件 $c\Delta t \leq \delta/\sqrt{2}$ 和各向异性参数 $\delta \leq \lambda/10$ 时, 才能保证了 FDTD 计算的收敛性, 其中 c 为真空光速, λ 为真空波长, T 为电磁波在真空中的传播周期, Δt 为时间间隔, δ 为空间间隔。

2.2 测量模型的建立

研究亚表层损伤的散射问题时, 是用有限大小的亚表面区域等效模拟无限大区域的散射特性, 本文采用吸收边界获得 FDTD 计算区域。目前 FDTD 算法涉及到的边界条件主要有 Mur 吸收边界条件、廖氏吸收边界条件、超吸收边界条件和完美匹配层(PML)边界条件。完美匹配层边界条件表示介质的波阻抗与相邻介质波阻抗完全匹配, 入射波将无反射地穿过分界面而进入 PML 层。也就是说, 完美匹配层边界可以无反射地吸收电磁波, 在入射角很大时吸收性能依然稳定, 且对波前形状不敏感。而 Mur 吸收边界条件、廖氏吸收边界条件和超吸收边界条件都不能够完全隔离反射的影响, 因此本模型采用 PML 边界条件进行计算。图 3 中正方形边界为 PML 层, 边界包围的内部区域即为本文研究的光波散射区域, 缺陷损伤类型为微裂纹和气泡。

利用 FDTD 方法研究亚表面损伤散射问题, 首先要建立亚表面损伤的结构模型。结合激光共焦层析测量原理做如下假设^[14]: 高斯光束的中心波长为 $0.405 \mu\text{m}$, 亚表层区域取光学元件表面下纵深方向

$120 \mu\text{m}$, 基底材料主要成分为二氧化硅(SiO_2), 亚表面损伤缺陷为微裂纹和气泡。图 2 为测量结构模型剖面图, 图 3 为缺陷类型和积分区域, 其中三角形 $\alpha\beta\gamma$ 为积分区域, 表示能被探测器接收到信号的区域; 正方形内为研究的亚表面区域, 正方形边长为 $120 \mu\text{m}$, 横坐标表示亚表面深度, 纵坐标表示研究的光学元件表面大小。

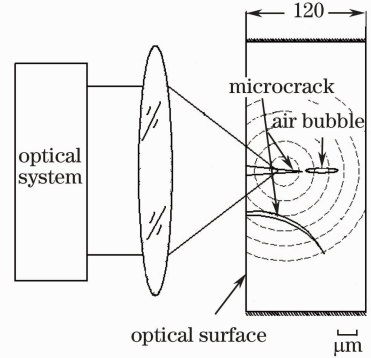


图 2 测量剖面示意图

Fig. 2 Measurement schematic diagram

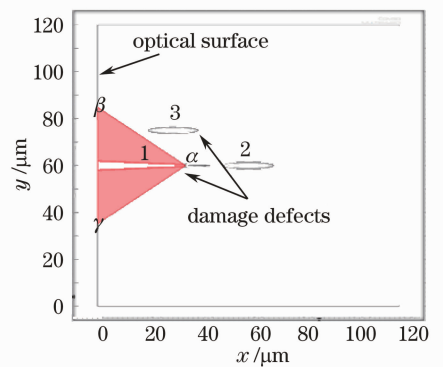


图 3 缺陷类型及积分区域

Fig. 3 Defect type and the integral region

这里把计算区域分解为总场区和散射区。电磁散射问题中, 总场区内电磁场可以写成入射场和散射场之和, 即

$$\begin{cases} E = E_i + E_s \\ H = H_i + H_s \end{cases}, \quad (3)$$

式中下标 i 和 s 分别表示入射场和散射场。模型计

算主要集中在总场区,它是由散射源对入射光波的调制引起的,包括入射场和散射场的分布。

3 模拟仿真实验

为了研究亚表面损伤引起的激光散射分布,利用(2)式模拟了光波在自由空间的传播情况。假设模拟中加载的电磁场为

$$E(r,t) = E_0/r \times \exp[j(k_0 r - \omega t)], \quad (4)$$

式中 $k_0 = 2\pi f/c$, E_0 为振幅, r 为球面波半径, j 为虚部, ω 为角频率, f 为频率, t 为周期。

根据光学元件亚表面损伤的形状、结构和材质等信息建立目标模型,按照 FDTD 的要求以设定的空间步长对目标进行网格剖分,从而得到含有目标尺寸以及材料信息的网格离散数据文件^[15]。图 4 分别给出了目标剖分前后的示意图。

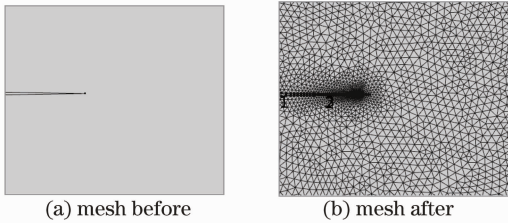


图 4 目标的内部缺陷
Fig. 4 Target internal defect

在利用 FDTD 方法分析问题,激励源是将能量引入系统的一种机制,激励源的模拟是一个十分重要的环节。为了分析单个损伤缺陷对入射光波的散射效应以及散射强度的分布,首先假设光源以一定角度会聚于光学元件亚表面内某一点,激励源沿图 4 水平方向从左到右入射,即沿垂直于光学表面方向(下同)。

从查阅文献知道,亚表面损伤深度范围在 $20 \sim 60 \mu\text{m}$ 之间,宽度范围在 $0 \sim 8 \mu\text{m}$ 之间都有定义^[11,16]。同时,用自制的基于激光共焦层析扫描的测量系统对光学零件亚表面损伤进行检测,所得的缺陷深度范围在 $0 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间。因此,在仿真实验中假设微裂纹沿垂直于零件表面方向深度为 $0 \sim 60 \mu\text{m}$ 之间,气泡缺陷长度在 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 之间,微裂纹和气泡的宽度范围都在 $0 \sim 5 \mu\text{m}$ 之间。实验模拟中定义了多组缺陷尺寸规格,所得实验结果的趋势相同,因此只给出了其中的两组。

图 5(a) 给出了不存在缺陷时会聚激励源在点 $(60,60)$ 某一时刻的光场分布示意图。当亚表面内只有图 3 中的微裂纹 1 或气泡 2 且会聚点坐标为 $(40,60)$ 时,散射分布分别如图 5(b) 和 (c) 所示。从仿真效果图可以看出,当亚表面内有缺陷时,其光场分布发生了明显变化。特别是聚焦点附近光散射现象明显,而且积分区域内(区域 A)的光强增强。这

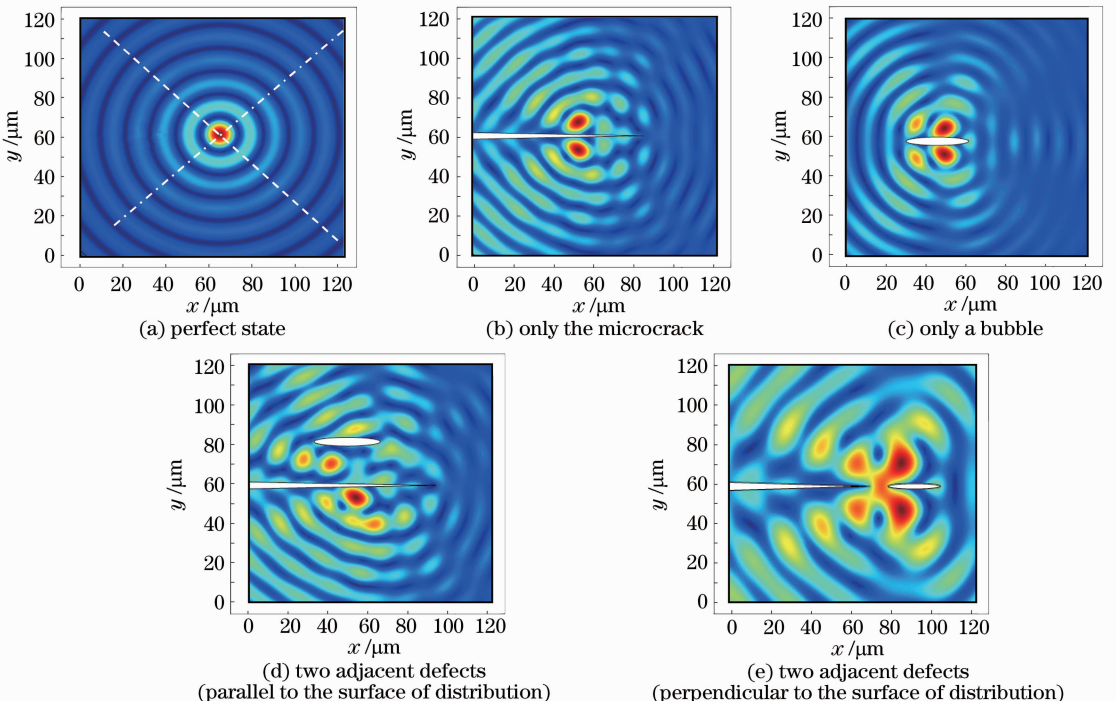


图 5 光学元件内部损伤的光散射分布
Fig. 5 Optical parts internal injury scattering distributions

种仿真结果与理论分析结果是一致的。

为了模拟分析图 2 所示测量系统探测到的散射信号的强度变化,假设参数如下:物镜数值孔径(NA)为 0.65,探测器光波聚焦到 α 点,则定义探测器接收光的范围为三角形 $\alpha\beta\gamma$,对其内部光强进行积分即可求得探测器接收到的散射光强大小^[17]。图 6 是对应图 5(b)和图 5(c)的单损伤缺陷的仿真测量结果。假设沿垂直于零件表面方向的微裂纹纵向深度为 $60\ \mu\text{m}$ 、气泡为 $30\sim 60\ \mu\text{m}$,且微裂纹和气泡的宽度范围都是 $5\ \mu\text{m}$ 。当聚焦点沿纵深方向从表面开始以间隔 $5\ \mu\text{m}$ 移动时探测器得到的散射光强变化如图 6(a)所示。当微裂纹和气泡纵向深度范围分别变小至 $25\ \mu\text{m}$ 和 $5\sim 25\ \mu\text{m}$,宽度范围为 $0\sim 3\ \mu\text{m}$ 时,聚焦点沿纵深方向从表面开始以间隔 $2\ \mu\text{m}$ 移动时探测器得到的散射光强变化则如图 6(b)所示。从图 6 可以看出,随着损伤大小和所处的位置以及聚焦点位置的不同,探测到的光强度是按

照一定规律变化的。对于只有微裂纹的损伤,探测到的近表面信号强度很小,这是因为光波没有经过反射或散射直接向前传播了。当光波传播到一定深度(探测器沿亚表层纵深方向的探测深度),聚焦光斑作用到损伤界面时散射信号强度增强;当聚焦光斑与损伤界面作用面积最大时散射光最强,如图 6(a) $38\ \mu\text{m}$ 和图 6(b) $18\ \mu\text{m}$ 处。当聚焦光斑离开损伤时($60\ \mu\text{m}$ 和 $25\ \mu\text{m}$)散射信号消失。同理,当聚焦光斑与气泡界面作用的面积最大时散射最强,如图 6(a) $42\ \mu\text{m}$ 和图 6(b) $11\ \mu\text{m}$ 处。随后逐渐减小,直至聚焦光斑整个离开气泡散射消失。从图 6 还可以看出,不是传统认为的聚焦光斑和损伤界面接触时散射光信号最强,而是进入到损伤内部某个位置的散射光信号最强。另外,光散射信号的强度与损伤尺寸有关。所以,在采用散射信号提取损伤信息时,不但可以知道损伤的位置,而且还可以分辨损伤的大小。

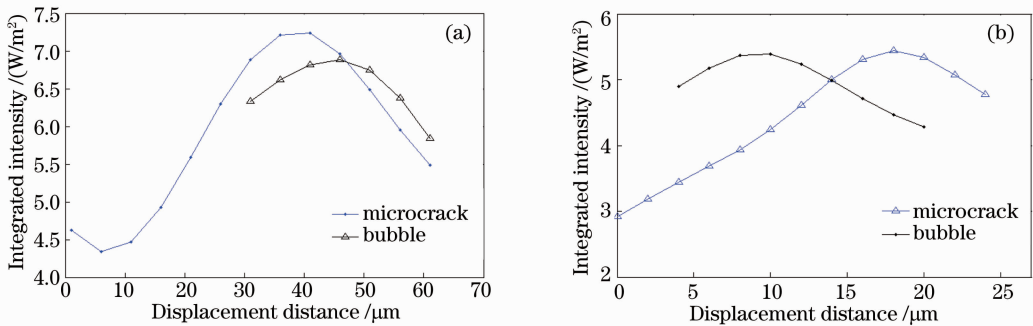


图 6 探测器接收信号强度图

Fig. 6 Signal intensity map received by detector

4 结 论

结合激光共聚焦层析测量原理,并在一定模拟假设的基础上,建立了光学元件亚表面损伤的仿真测量模型。采用 FDTD 算法结合仿真软件模拟实现了聚焦光斑在不同亚表面损伤类型的光学元件内部的散射光场分布,并模拟了层析测量过程中探测到的光散射信号强度的变化曲线。仿真结果可以看出,光场分布图和强度变化曲线包含了光学元件亚表面损伤的尺寸和位置信息,表明采用激光共焦测量亚表面损伤的方法是有效的。同时,对进一步完善亚表面损伤检测方法有重要的理论指导作用。

参 考 文 献

1 Chen Can. Theoretical and Experimental Research on the Measurement of Subsurface Damage During the Grinding of Typical Optical Materials[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2010. 19-25.

陈 灿. 典型光学材料磨削加工亚表面损伤检测方法 with 实验研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2010. 19-25.
2 Li Gailing. Optical Materials Grinding Subsurface Damage Measurement Theory and Experiment Investigation [D]. Changsha: National Defense Science and Technology University, 2006. 18-23.
李改灵. 光学材料磨削加工亚表面损伤测量的理论与实验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006. 18-23.
3 Yan Nan. Study of Parallel FDTD Algorithm and EM Scattering in Layered Half Space[D]. Xi'an: Xidian University, 2008. 20-29.
彦 南. FDTD 并行算法及层状半空间散射问题研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008. 20-29.
4 Chen Chen, Yang Yongying, Wang Daodang, et al.. Analysis of point diffraction wavefront error based on finite difference time domain method[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0908003.
陈 琛, 杨雨英, 王道档, 等. 基于时域有限差分方法的点衍射波前误差分析[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0908003.
5 K S Yee, J S Chen. The finite-difference time-domain (FDTD) and finite-volume time-domain (FVTD) method in solving Maxwell's equations[J]. IEEE Trans Microwave Theory and Technol, 1997, 45(3): 354-363.
6 Ge Debiao, Yan Yubo. Electromagnetic Wave Finite Difference

- Time Domain Method [M]. Xi'an: Xidian Science University Press, 2005. 153-155.
- 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005. 153-155.
- 7 Wang Chunhui. Optical Surface and Surface Damage Detection Technology Research [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2008. 22-26.
- 王春慧. 光学表面亚表面损伤检测技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2008. 22-26.
- 8 Li Yingle, Li Jin, Wang Mingjun, *et al.*. Investigation of scattering for a uniformly anisotropic dielectric sphere[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0429002.
- 李应乐, 李 瑾, 王明军, 等. 均匀各向异性介质球散射的解析研究[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0429002.
- 9 H W Jensen, S. Marschner, M Levoy, *et al.*. A practical model for subsurface light transport[C]. Proceeding of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. ACM, 2001. 511-518.
- 10 Dang Juanjuan. Optical Surface and Surface Damage Representation Technology Research [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2009. 27-30.
- 党娟娟. 光学表面亚表面损伤表征技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2009. 27-30.
- 11 T I Suratwala, P E Miller, J D Bude, *et al.*. HF-based etching processes for improving laser damage resistance of fused silica optical surfaces[J]. J Am Ceram Soc, 2010, 94(2): 416-428.
- 12 K Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell equations in isotropic media[J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1966, 14(3): 302-307.
- 13 Xue Xiaochun, Wang Xuehua. Radar cross sections of airplane wings in the 2D FDTD method [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2005, 22(1): 65-69.
- 薛晓春, 王雪华. 用二维时域有限差分法计算机翼雷达散射截面[J]. 计算物理, 2005, 22(1): 65-69.
- 14 Chen Ji. Confocal Microscopic Images of 3D Visualization and Analysis System Based on[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. 32-38.
- 陈 继. 共聚焦显微图像三维可视化与分析系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004. 32-38.
- 15 Zeng Hao. The Application of the Finite Difference Time Domain Method and Its Parallelization in EM Scattering from the Rough Surface with/without Target [D]. Xi'an: Xidian University, 2010. 34-38.
- 曾 浩. FDTD 及其并行算法在粗糙面和目标复合电磁散射中的应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010. 34-38.
- 16 Jianmei Zhang. Laser Scattering Techniques for Subsurface Damage Measurements: System Development, Experimental Investigation, and Theoretical Analysis [D]. Kansas: Kansas State University Manhattan, 2006. 64-69.
- 17 Su Qianqian, Zhang Guowen, Tao Hua, *et al.*. Effect of the amplitude modulated defects on the intensity distribution and the angular spectrum of a gaussian beam[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(s1): s102004.
- 苏倩倩, 张国文, 陶 华, 等. 振幅调制型“缺陷”对高斯光束的光强分布和角谱的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(s1): s102004.

栏目编辑:何卓铭