

## 实际加工表面红外激光散射特性的实验研究\*

朱元庆 曲兴华 张福民<sup>†</sup> 陶会荣

(天津大学, 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

(2013年7月10日收到; 2013年9月9日收到修改稿)

为了研究激光在实际加工表面的散射特性, 利用分辨率为 10 nW 的激光功率计 PM100D, 波长为 1550 nm 的激光器和精密转台, 自行设计并搭建了半球空间中目标表面散射特性的测量系统. 以典型的刨床加工的若干标准粗糙度比较样块为被测目标, 在 1550 nm 红外激光以不同方位照射下, 测量了微观具有 V 形槽结构的不同粗糙度的样块表面的散射功率分布. 实验结果转换成双向反射分布函数后, 对比分析了入射光方位、入射角和表面粗糙度对此类典型表面散射特性的影响, 并分析了特殊散射场形成的原因. 结果表明, 表面纹理、入射角以及粗糙度均对目标表面的散射特性有规律性影响, 这一结果对于具有规律性加工纹理表面的散射特性的研究和建模有一定的参考价值, 对激光技术在实际加工表面的应用研究提供了一定的基础.

**关键词:** 散射特性, 双向反射分布函数, 红外激光, 实际加工表面

**PACS:** 42.68.Mj, 06.30.-k

**DOI:** 10.7498/aps.62.244201

## 1 引言

电磁波(光波)在物体表面的散射特性一直是遥感探测、隐身技术、机器视觉等领域的重要研究课题<sup>[1-5]</sup>. 然而由于激光波长远小于实际表面微观尺度, 表面微观形貌直接影响着散射场的大小与分布, 加上表面散射机理不明朗, 使得物体表面散射特性目前仍未得出清晰明确的结果. 目前对于散射特性的研究方法主要有两大类, 一类从麦克斯韦方程组出发, 根据目标表面特性的不同确定相应的边界条件, 从而求解出散射场, 为了计算, 通常根据不同的需要将实际表面理想化为较简单的表面进行近似求解, 例如基尔霍夫近似法、几何光学法、微扰法等, 主要应用于一维随机粗糙面散射研究<sup>[6-10]</sup>; 另一类更常用的研究方法是基于实验的研究, 通过实验直接获得表面散射场分布, 从而进行建模或者分析表面散射特性, 实验研究能真实、直观地反映目标表面的散射特性, 但实际表面千差万别, 导致散射场也形态各异, 因此此类研究主要

集中在随机粗糙面散射特性研究<sup>[11-13]</sup>. 实际上, 各类机械加工形成的表面都具有一定规律的表面纹理, 例如刨床、铣床加工的表面具有 V 形槽形状的纹理, 对这种具有一定规律纹理的表面散射特性还少有研究. 因此本文通过典型的刨床加工的表面粗糙度样板在 1550 nm 的红外激光照射下的散射分布特性实验测量, 分析 V 形槽表面纹理、粗糙度等特征与散射场分布形态的关系, 并分析特殊散射场形成的原因, 这一结果对于激光在实际加工表面散射特性的分析和建模具有重要意义, 对于利用激光散射特性来进行此类表面特征提取、跟踪、识别、探测等实际问题有应用价值.

## 2 样块表面双向反射分布函数测量

## 2.1 测量原理

在实验研究目标表面反射特性时通常使用双向反射分布函数(bidirectional reflectance distributional function, BRDF)这一参数来描述散射场分布. BRDF 是关于入射角、反射角和波长的函数, 能反

\* 国家自然科学基金仪器专项(批准号: 513279012)、高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20100032120062)和天津市应用基础及前沿技术研究计划(批准号: 11JCYBJC01000)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: zhangfumin@tju.edu.com

映回波信号与漫反射率之间的关系,与目标表面形状、尺寸、粗糙度、介电常数、偏振态等表面特性有关,也与入射光方向和入射光波长有关,能比较综合地反映表面的散射特性,因此本文基于这一函数来研究实际加工表面散射特性.

美国材料试验学会标准 ASTM Standard E1392-1996《规则反射面或漫射面的光散射测量角度定义》中将 BRDF 准确定义为:当一束光均匀投射到足够大的均匀且各向同性材料的表面上,材料表面的反射辐亮度与入射辐照度的比值:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)}, \quad (1)$$

式中:  $\theta_i, \varphi_i$  为入射光的入射角和方位角;  $\theta_r, \varphi_r$  为反射光的反射角和方位角;  $L_r$  为面元  $dA$  经照射后在  $(\theta_r, \varphi_r)$  方向上的辐亮度,单位为  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ;  $E_i$  为入射方向激光产生的表面辐照度,单位为  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ , 则 BRDF 的单位为  $\text{sr}^{-1}$ . 图 1 所示为其几何关系图.

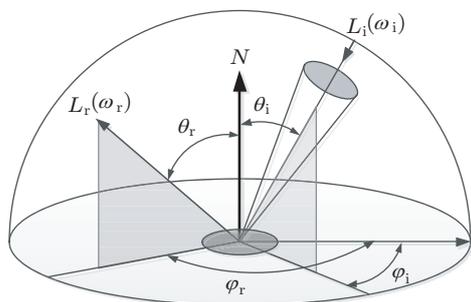


图 1 BRDF 几何关系图

具体应用中,假设激光光源固定,则入射辐照度是一定值,并且入射光可以视作在一个小的立体角  $d\omega$  内,则 (1) 式可近似为

$$\begin{aligned} f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) &= \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} \\ &= \frac{L_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{E_i(\theta_i, \varphi_i)}, \end{aligned} \quad (2)$$

由光照度的余弦定则有

$$dE = L \cos \theta d\omega = L \cos \theta d\theta d\varphi. \quad (3)$$

且由光亮度的定义可知

$$\Phi_r = L_r \Omega_r A_r \cos \theta_r, \quad (4)$$

其中  $\Phi_r$  表示反射方向的光通量.

综上各式,设照射面积为  $A$ ,以单波长入射时,则有

$$\begin{aligned} f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) &= \frac{L_r(\theta_r, \varphi_r)}{L_i(\theta_i, \varphi_i) \cdot \cos \theta_i} \\ &= \frac{\Phi_r \Omega_i}{\Phi_i \Omega_r \cos \theta_r} \\ &= \frac{P_r}{P_i} \cdot \frac{4d_r^2}{\pi D^2 d_i^2} \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $\Omega$  为立体角,  $P_r$  为接收功率,  $P_i$  为入射功率,  $d_i$  为光源到物体表面的距离,  $d_r$  是探测距离,  $D$  探测器口径. 当光源功率  $P_i$  固定时,  $f_r$  正比于接收功率,因此本实验中 BRDF 测量转换为测量散射光功率  $P_r$ .

## 2.2 测量方法

本文自行设计并搭建了测量半球空间内散射光分布的实验测量系统,如图 2 所示. 整个实验测量系统主要由旋转装置、光源和接收器三部分组成. 旋转装置中的水平转台 B 固定在实验台上,垂直转台 A 用连接件垂直固定在 B 上且位置可调节,被测目标固定在转台 A 的中心;光源部分通过连接杆固定到转台 A 上,可随 A 转动,通过调节连接杆夹角也可以调节入射角大小,激光经过准直透镜后以一定角度入射到被测目标表面;接收器置于水平实验台上,接收镜头中心对准转台 A 的中心. 调整好光路进行测量时,转台 A 可控制方位角  $\varphi_r$ , 转台 B 控制天顶角  $\theta_r$ , 从而可以实现样块在整个半球空间内的反射分布测量.

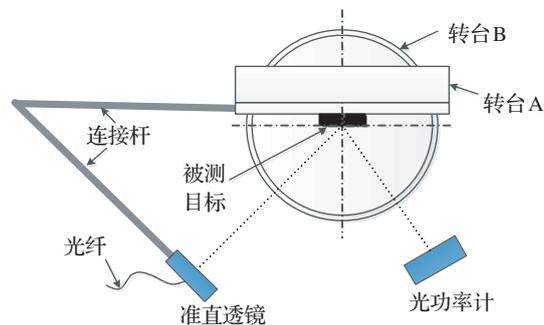


图 2 测量装置示意图

实验光源采用 RIO 公司窄线宽激光器,中心波长为 1550 nm,输出功率 10 mW;接收器采用 Thorlabs 公司的激光功率计 PM100D,其接收功率范围为 50 nW—40 mW,分辨率 10 nW;实验样块采用若干标准粗糙度比较样块.采集数据时天顶角和方位

角均间隔  $5^\circ$  采集一次,而在镜像点(即镜面反射方向)附近光能量变化非常迅速,因此进行了加密采集,以间隔  $1^\circ$  采集数据,从而在减少工作量的同时保证测量精度,最终实验测量结果进行了三次样条插值处理之后进行拟合.

### 3 实验结果与分析

实验中以华光量具生产的刨床加工方式下的粗糙度比较样块为典型被测目标,其材料为 45 碳素结构钢.由于加工方式的影响,使得该表面具有 V 形槽加工纹路,图 3 是利用激光共聚焦扫描显微镜观察到的实验样块表面形貌(图为算术平均粗糙度  $Ra = 0.8 \mu\text{m}$  的表面形貌).

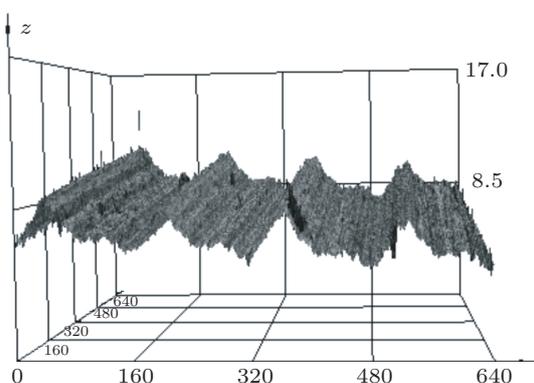


图 3 被测目标表面形貌 ( $Ra = 0.8 \mu\text{m}$ )

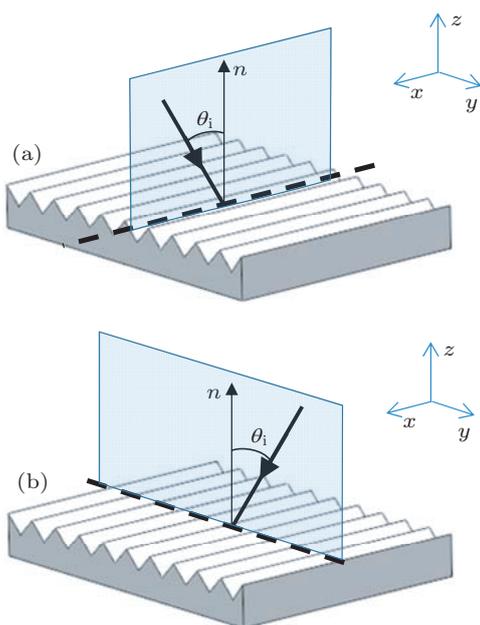


图 4 激光入射光方位示意图 (a)  $\varphi_i = 0^\circ$ ; (b)  $\varphi_i = 90^\circ$

由于被测目标表面纹理的特殊性,使得入射光

线的方位角不同,均对散射结果有影响.因此,实验对每一块粗糙度比较样块分别测量了入射光线在  $xz$  平面内和  $yz$  平面内以不同入射角(即天顶角)入射时的光功率分布.图 4(a) 和 (b) 分别为实验中入射光线在  $xz$  平面内和  $yz$  平面内的两种入射方位示意图,为了方便后续分析说明,假设  $xz$  所在平面方位角  $\varphi_i = 0^\circ$ ,则  $yz$  平面方位角  $\varphi_i = 90^\circ$ .实际上即使在同一入射角  $\theta_i$  下,当入射光线处于任意两个不同方位角时,散射结果都会有差异,实验中选取了两种特殊平面内的入射方式来分析这种差异.

实验测量了这两种入射方式下,以不同入射角 ( $60^\circ, 45^\circ, 30^\circ$ ) 入射时的 BRDF 分布情况,对不同粗糙度样板表面 ( $Ra = 0.8, 1.6, 3.2 \mu\text{m}$ ) 分别进行了测量.

#### 3.1 入射光方位角不同时结果对比分析

粗糙度  $Ra$  为  $0.8 \mu\text{m}$  的粗糙度样板表面在上述两种入射方位下的 BRDF 测量结果分别如图 5 和图 6,在同一入射角  $45^\circ$  时,两种 BRDF 分布随方位角的不同也有很大的区别.从散射光能量分布形态来看,散射场能量峰值位置均在镜面反射方向 ( $\theta_r = 45^\circ, \varphi_r = \varphi_i + 180^\circ$ ),在  $x$  轴方向散射光能量从峰值位置急剧减弱,而在  $y$  轴方向散射光能量相比较而言变化较缓慢,在后向散射方向 ( $\theta_r = -45^\circ, \varphi_r = \varphi_i$ ) 也有一个很小的次峰值;从散射光能量大小来看,次峰值远比镜向的主峰值要小,离峰值越远的位置能量越小,甚至被环境光淹没,并且  $\varphi_i$  为  $90^\circ$  时的镜向峰值也比  $\varphi_i$  为  $0^\circ$  时的峰值要小.实验也测量了在不同粗糙度样板表面 ( $Ra = 0.8, 1.6, 3.2 \mu\text{m}$ ) 或者不同入射角 ( $60^\circ, 30^\circ$ ) 下的 BRDF 分布,不同方位角下散射光分布规律与上述以  $45^\circ$  入射到  $0.8 \mu\text{m}$  的粗糙度样板表面规律相同.

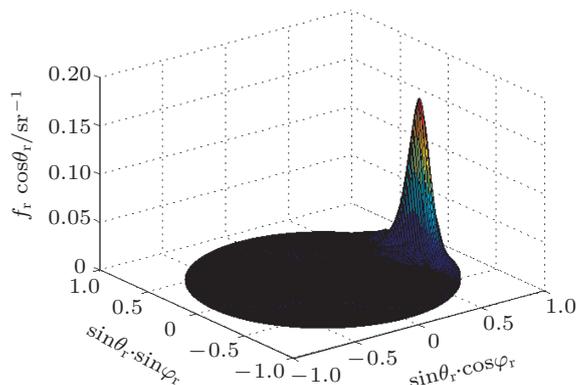


图 5 目标表面 BRDF 分布 ( $Ra = 0.8 \mu\text{m}, \theta_i = 45^\circ, \varphi_i = 0^\circ$ )

### 3.2 入射角大小不同时的结果对比分析

在同一入射方位角下, 入射角度不同时散射光分布也有一定的不同. 入射角为  $45^\circ$  时散射光峰值位置在  $(\theta_r = 45^\circ, \varphi_r = 270^\circ)$  处, 如图 6 所示, 两者峰值位置恰好也都在镜面反射所在位置; 从光能量大小来看, 入射角度越大, 峰值越小, 且峰值附近能量变化越缓慢. 入射角为  $30^\circ$  时散射光峰值在位置  $(\theta_r = 30^\circ, \varphi_r = 270^\circ)$  处, 如图 7 所示.

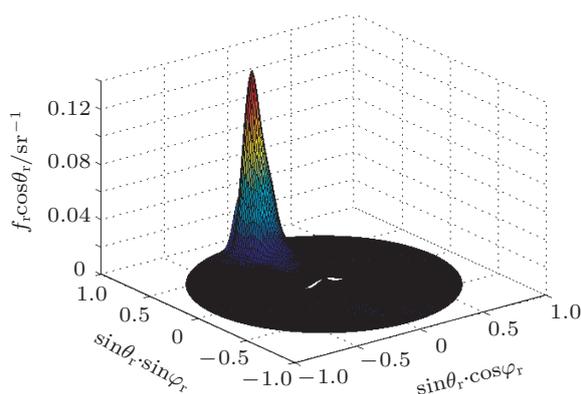


图 6 目标表面 BRDF 分布 ( $Ra = 0.8 \mu\text{m}$ ,  $\theta_i = 45^\circ$ ,  $\varphi_i = 90^\circ$ )

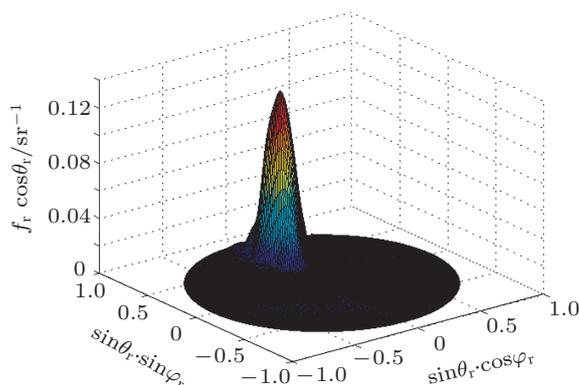


图 8 目标表面 BRDF 分布 ( $Ra = 1.6 \mu\text{m}$ ,  $\theta_i = 30^\circ$ ,  $\varphi_i = 90^\circ$ )

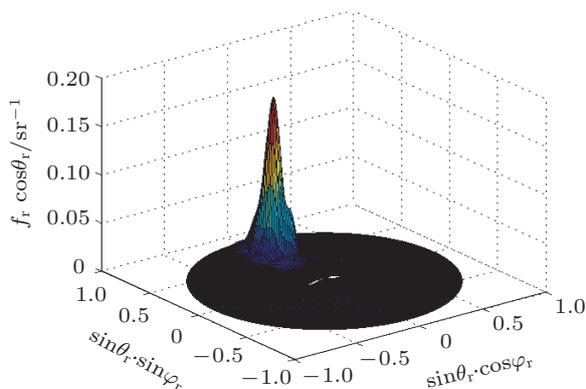


图 7 目标表面 BRDF 分布 ( $Ra = 0.8 \mu\text{m}$ ,  $\theta_i = 30^\circ$ ,  $\varphi_i = 90^\circ$ )

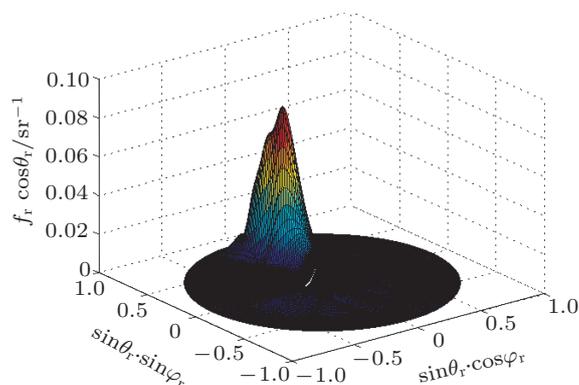


图 9 目标表面 BRDF 分布 ( $Ra = 3.2 \mu\text{m}$ ,  $\theta_i = 30^\circ$ ,  $\varphi_i = 90^\circ$ )

### 3.3 表面粗糙度不同时的结果对比分析

此外, 在同一入射角度下, 不同粗糙度表面散射特性也有差异. 图 8 和图 9 分别为  $Ra = 1.6 \mu\text{m}$  和  $3.2 \mu\text{m}$  时的粗糙度样板表面 BRDF 分布. 在同一入射角  $30^\circ$ , 同一入射方位角  $90^\circ$  时, 对比图 7, 图 8 和图 9 可以发现, 随着表面粗糙度均值的增大, 散射光峰值逐渐减小, 峰值附近能量变化趋势也逐渐减慢.

综上所述, 对于表面具有 V 形槽纹路的被测目

标而言, 入射光线方位、入射角大小及被测表面粗糙度都对散射场能量分布有影响, 这三种因素影响散射光能量的变化趋势及峰值大小, 但峰值的位置总在镜面反射方向.

与随机粗糙面的散射特性不同的是, 本文的被测表面散射场呈扁平状, 在  $x$  轴和  $y$  轴两个方向的变化趋势不同, 推广到  $xy$  平面的任意方向, 变化趋势必然也是不同的, 而随机粗糙面的散射场在  $xy$  平面任意方向变化趋势均一致, 这种现象是不同的表面纹理造成的结果.

进一步分析, 理想的漫反射即朗伯体表面的散射光能量在各个方向均匀分布, 散射场在空间呈半球形, 理想的光滑镜面只有一条反射光, 现实中所有的表面均介于二者之间, 散射场也是二者的综合结果. Cook-Torrance 模型<sup>[14]</sup> 及 Tagare 和 DeFigueiredo<sup>[15]</sup> 提出的散射模型也说明了表面散射场是漫反射分量和镜面反射分量叠加的结果, 表面特性不同则二者影响系数不同, 例如较光滑表面镜面反射分量占主导, 而较粗糙的表面漫反射分量

占主导. 由此也可以解释本文散射场在  $xy$  平面各个方向变化趋势不一的原因, 由被测表面形貌图 3 可以清晰地看出被测表面在  $x$  轴方向近乎光滑, 而在  $y$  轴方向锯齿形变化, 相比较而言高度变化非常大, 因此在  $x$  轴方向散射光能量从峰值位置急剧降低, 可见此时漫反射分量已经很小了, 而镜面反射特征非常明显.

## 4 结论

实验利用半球空间散射特性测量系统, 测量了在 1550 nm 激光入射下, 刨床加工方式的粗糙度分别为 0.8, 1.6 和 3.2  $\mu\text{m}$  的表面粗糙度对比样块表面的散射特性, 实验分别以  $0^\circ$  和  $90^\circ$  的方位角,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  和  $60^\circ$  的入射角条件进行了测量. 通过对

实验结果单因子变量的对比分析, 得出入射光方位、入射角及粗糙度都对散射场大小与分布有规律性影响, 其中, 根据入射光方位及散射场分布, 可以轻易判断出表面纹理的趋势; 入射角决定散射场峰值位置; 粗糙度则决定着散射场中漫反射分量和镜面反射分量的大小. 根据这些散射特性规律, 在获得未知表面的散射场后可以推知表面形貌特征, 也可以在已知表面特性的情况下定性分析表面散射场, 在进一步研究表面纹理与空间散射场之间的函数关系之后可以直接计算实际加工表面的散射场, 对于研究众多机械加工表面的散射特性具有重要意义. 随着激光技术在众多领域的发展与应用, 实际加工表面的散射特性将为更多的研究领域提供支持.

- 
- [1] Boschker J E, Tybell T 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 151604
  - [2] Frankot R T, Chellappa R 1988 *TPAMI* **10** 439
  - [3] Fleming R W, Torralba A, Adelson E H 2004 *J. Vision.* **4** 798
  - [4] Guo L X, Wang Y H, Wu Z S 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 96 (in Chinese) [郭立新, 王运华, 吴振森 2005 物理学报 **54** 96]
  - [5] Zhang L H, Yang Y, Zang H G, Hu S J, Chen W B, Lu Y T 2008 *Chinese J. Lasers* **35** 1001 (in Chinese) [张雷洪, 杨艳, 臧华国, 胡善江, 陈卫标, 陆雨田 2008 中国激光 **35** 1001]
  - [6] Ishimaru A 1991 *Proc. IEEE* **79** 1359
  - [7] Kuo C H, Moghaddam M 2006 *IEEE Antenn. Propag. M* **54** 2917
  - [8] Johnson J T 2002 *IEEE Antenn. Propag. M* **50** 1361
  - [9] Li J, Guo L X, Zeng H, Han X B 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2757
  - [10] Zhang Y, Zhang X J, Fang G Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 184203 (in Chinese) [张宇, 张晓娟, 方广有 2012 物理学报 **61** 184203]
  - [11] Nieto-Vesperinas M, Sánchez-Gil J A 1993 *J. Opt. Soc. Am. A* **10** 150
  - [12] Yuan Y, Sun C M, Zhang X B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2097 (in Chinese) [袁艳, 孙成明, 张修宝 2010 物理学报 **59** 2097]
  - [13] Ruiz-Cortés V, Dainty C 2012 *J. Opt. Soc. Am. A* **29** 1154
  - [14] Cook R L, Torrance K E 1982 *ACM Trans. Graph.* **1** 7
  - [15] Tagare H D, DeFigueiredo R J 1993 *CVGIP: Image Understanding* **57** 265

# Infrared laser scattering characteristics of machining surfaces\*

Zhu Yuan-Qing Qu Xing-Hua Zhang Fu-Min<sup>†</sup> Tao Hui-Rong

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Institute of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering,  
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 10 July 2013; revised manuscript received 9 September 2013)

## Abstract

In order to study the scattering characteristics of practical machining surfaces under the infrared laser irradiation, an experiment device is designed to measure the semispherical scattering characteristics of machining surfaces. The measuring system consists of a laser power meter with a resolution of 10 nW, a laser device of 1550 nm wavelength, and two precisely rotating platforms. The distributions of scattering power from the specimen surfaces with micro V-groove structures and different surface roughness values are measured under the irradiation of 1550 nm infrared laser. After the measured results are converted into the bidirectional reflectance distributional function, the effects of incident azimuthal angle, incident angle, and surface roughness on the scattering characteristics of surface of such a kind are comparatively analyzed, and the cause for the formation of special scattering field is also analyzed. The experimental results indicate that the surface texture, incident angle and surface roughness all affect the scattering property in a regular manner. The results contribute to the study of surface scattering characteristics and the application of laser technology to surfaces with V-groove structures.

**Keywords:** scattering characteristics, bidirectional reflectance distributional function, infrared laser, machining surfaces

**PACS:** 42.68.Mj, 06.30.-k

**DOI:** 10.7498/aps.62.244201

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 513279012), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20100032120062), and the Tianjin Research Program of Application Foundation and Advanced Technology, China (Grant No. 11JCYBJC01000).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: zhangfumin@tju.edu.com