

太赫兹频段金属粗糙表面散射特性

史杰^{1,2}, 钟凯^{1,2}, 刘楚^{1,2}, 王茂榕³, 乔鸿展^{1,2}, 李吉宁^{1,2}, 徐德刚^{1,2}, 姚建铨^{1,2}

- (1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所, 天津 300072;
2. 光电信息技术教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072;
3. 青岛科技大学数理学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 根据基尔霍夫近似理论分析了金属粗糙表面在太赫兹频段的散射规律及影响因素, 通过加工不同粗糙度的金属铝板样品, 基于远红外激光器搭建的单频点散射特性测量系统及远红外傅里叶光谱仪(FTIR)的宽带反射率测量系统, 对粗糙铝板的散射规律进行了实验测量与验证, 发现实验测量结果与基尔霍夫近似计算结果具有良好的一致性, 证明了峰值散射系数与粗糙度和频率的负相关性, 以及与入射角度的正相关性。分析了近似光滑和较大粗糙度两种极限情况下的散射特性, 给出了基尔霍夫近似理论在太赫兹频段的适用条件。相关结论为复杂目标散射特性的理论计算奠定了基础, 对太赫兹频段雷达相关理论和技术的发展具有重要意义。

关键词: 表面散射特性; 太赫兹波; 粗糙度; 金属平板

中图分类号: O436.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1217004

Scattering properties of rough metal surface in terahertz region

Shi Jie^{1,2}, Zhong Kai^{1,2}, Liu Chu^{1,2}, Wang Maorong³, Qiao Hongzhan^{1,2}, Li Jining^{1,2},
Xu Degang^{1,2}, Yao Jianquan^{1,2}

- (1. Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. School of Mathematics and Physics, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266100, China)

Abstract: The scattering characteristics and the affecting factors of rough metal surface were analyzed based on the Kirchhoff approximation theory. Rough aluminum (Al) plates with different roughness were manufactured and their scattering characteristics were measured by two systems: a single-frequency system built with a far-infrared (IR) laser and a wide-band Fourier Transform IR spectroscopy (FTIR) system. Good consistency was found from the comparison of theoretical and experimental results. It is proved that the peak scattering coefficient has negative correlation with roughness and frequency, and positive correlation with incident angle. Additionally, the applicability of Kirchhoff approximation theory in the terahertz range was given by analyzing two limiting cases for near-smooth and high-roughness

收稿日期: 2018-11-26; 修订日期: 2018-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(61675146)

作者简介: 史杰(1994-), 男, 硕士生, 主要从事太赫兹频段目标特性方面的研究。Email: shijiebesthero@tju.edu.cn

导师简介: 钟凯(1984-), 男, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光及太赫兹技术方面的研究。Email: zhongkai@tju.edu.cn

samples. The conclusions lie the foundation for theoretical calculation of complicated targets and will promote the development of the theories and techniques of terahertz radar.

Key words: surface scattering characteristic; terahertz wave; roughness; metal plate

0 引言

目标散射特性描述了目标对于入射电磁波在各个方向的再辐射,是对可探测和识别的物理量的科学描述,反映了目标的几何特征与电磁特性,是研究雷达、引信、制导、遥感工程和表面探测等领域的理论基础^[1-2]。由于典型军事目标的表面粗糙度在 0.1~100 μm 量级,对微波频段是光滑表面的镜面反射,对光学频段属于粗糙表面的漫反射。而对于微波向光学过渡的太赫兹频段,这一粗糙度恰好处于从光滑向粗糙的过渡区域,太赫兹波的波长与目标表面粗糙度相当,会体现出跟上述两者不同的散射特性,从而直接影响目标的雷达散射截面。粗糙度的影响规律是太赫兹频段目标散射特性的重要研究内容,也是太赫兹雷达等应用发展的基础。

近十几年来,随着太赫兹雷达相关研究的兴起,粗糙面在该频段散射特性一直受到国内外的极大关注。2006 年, Yamac 等将与粗糙度相关的时间延迟参数引入太赫兹时域光谱系统(TDS)的数据处理,得到了与粗糙度相关的幅值公式,并通过测量铜粉末的散射频谱进行了验证^[3]。2008 年, Ortolani 等利用远红外傅里叶光谱仪测量了爆炸物与不同粗糙度金属的准正入射与斜入射反射频谱,得到样品的光学参数,并讨论了太赫兹频段爆炸物粗糙面对其反射强度的影响^[4]。2009 年, Arunkumar 等提出利用 FTIR 测量得到的太赫兹的反射频谱来确定金属表面的粗糙度^[5]。2017 年, Ilaria 等通过 TDS 对粗糙表面进行了角度测量,研究了不同接收角的反射强度,以此来分析粗糙表面的散射特性^[6]。国内对太赫兹频段粗糙表面散射特性的研究工作起步较晚。2014 年, 杨洋等测量了不同粗糙度金属的散射强度,得出散射强度与散射角呈指数关系^[7],但并没有给出与粗糙度相关的具体理论计算公式。2018 年, 陈刚等提出了一种高效混合近似算法用于计算太赫兹频段无限薄粗糙金属板的电磁散射特性^[8]。吴振森课题组基于时域有限差分近似算法研究了粗糙表面的光散射

特性^[9],在散射建模及理论计算方面做了大量工作。总体来看,目前国内对于太赫兹频段粗糙面散射特性进行的研究仍然较少,尤其是相关的实验测量验证数据匮乏,是目前太赫兹频段目标散射特性研究领域的薄弱点之一。

文中对粗糙金属表面的散射规律进行了理论分析,获得了峰值散射系数的主要影响因素及规律,并加工了不同粗糙度的铝板样品,基于 CO₂ 激光抽运的太赫兹激光器与 FTIR 搭建实验测量系统,对 0.3~30 μm 粗糙度范围的铝板散射特性进行了实验测量,实验数据与理论计算具有良好的一致性。该工作不但为太赫兹频段目标散射特性研究中双向反射分布函数的建立提供了可靠的数据,同时获得的结论也为太赫兹频段粗糙目标的近似研究方法奠定了基础。

1 粗糙面散射理论

对于粗糙平面的散射规律,目前应用较为广泛的是基于基尔霍夫近似的散射理论。该理论最早由粗糙表面的电学雷达反射率的统计数据得出^[10]。该理论要求粗糙表面满足如下条件:表面均方根粗糙度小于波长;表面材料是理想导体,以此来保证在表面完全光滑的情况下,只存在镜面反射;目标表面的粗糙度要满足高斯分布规律;表面的自协方差分布满足高斯型。在平行光入射到粗糙表面时,反射光可认为由两部分组成,一部分来自镜面反射,另一部分来自漫反射(即散射)。在正入射时,理想导体的镜面反射率为:

$$R_s = R_0 \exp(-4\pi\sigma/\lambda)^2 \quad (1)$$

式中: R_s 是镜面反射率; R_0 是理想光滑表面反射率; σ 为表面均方根粗糙度; λ 为入射波波长。对于漫反射部分,其反射率可表示为:

$$r_d(\theta)d\theta = R_0 2\pi^4 (a/\lambda^2)(\sigma/\lambda^2)(\cos\theta+1)^4 \sin\theta \cdot \exp[-(\pi a \sin\theta)^2 / \lambda^2] d\theta \quad (2)$$

式中: $a = \sqrt{2} \sigma/m$, m 为表面粗糙度的均方根斜率; θ 为入射角。因此,在正入射时接收角 $\Delta\theta$ 内的漫反射反射率为:

$$\int_0^{\Delta\theta} r_d(\theta)d\theta=R_0 \frac{2^5 \pi^4}{m} (\sigma/\lambda)^4 (\Delta\theta)^2 \quad (3)$$

据此, Bennett 等利用光学方法测量了金属表面粗糙度, 并给出粗糙金属表面粗糙度与正入射反射率的总体表达式^[11]:

$$R_s=R_0 \exp(-4\pi\sigma/\lambda)^2+R_0 \frac{2^5 \pi^4}{m} (\sigma/\lambda)^4 (\Delta\theta)^2 \quad (4)$$

式中: 第一项表示镜面反射部分; 第二项表示漫反射部分。当波长远大于粗糙度(波长足够长)时, 漫反射对于表面整体反射的影响可以忽略; 当接收角 $\Delta\theta$ 足够小, 而 R_s/R_0 相对较大时, 漫反射对于整体的影响也可以忽略。对于非各向同性理想导体的一般金属材料, 其表面反射率与粗糙度的关系也可以由公式得出。

当入射波与表面呈一定角度入射(非正入射)时, 金属粗糙表面的斜入射反射率可以表示为:

$$R_s=R_0 \exp(-4\pi\sigma/\lambda)^2 \cos^2 \theta+R_0 \frac{2^5 \pi^3}{m} (\sigma/\lambda)^4 \cos^3 \theta \Delta\omega \quad (5)$$

式中: $\Delta\omega$ 为装置的立体接收角。当 $\theta=0, \Delta\omega=\pi(\Delta\theta)^2$ 时, 公式(5)等同于公式(4)中正入射的反射率表达式。此外可以得出, 当 σ/λ 一定时, 需要保证很小的接收角才可以忽略漫反射的影响, 获得准确的镜面反射率。此时有:

$$R_s=R_0 \exp(-4\pi\sigma/\lambda)^2 \cos^2 \theta \quad (6)$$

需要注意的是, 公式(6)在太赫兹频段的适用性仍然需要实验验证。假设该式成立, 从中可以得出峰值散射系数(即镜面反射率)的影响因素包括表面粗糙度、入射角和入射波频率, 其中粗糙度越大、频率越高, 散射强度越小; 入射角越大, 散射强度越大。当 $\lambda \gg \sigma$ 或当入射角接近 90° (掠入射)时, 粗糙面的反射率等于理想光滑表面的镜面反射率。而在太赫兹波段, λ 和 σ 相当, e 指数项将对散射强度产生重要影响, 波长或粗糙度的改变会带来散射强度的显著变化。

2 测试样品制备与表征

为了对金属粗糙表面的散射规律进行实验测量及验证, 笔者委托西安工业大学加工了表面粗糙度覆盖 $0.3\sim 30 \mu\text{m}$ 、尺寸为 $50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的铝

板样品。将毛坯金属铝材料经过车削加工后抛光表面可以达到 $0.3 \mu\text{m}$ 粗糙度, 车削后进行不同尺寸金属颗粒喷砂处理可以获得 $3\sim 30 \mu\text{m}$ 粗糙度^[12]。加工的样品利用 Sensofar 公司的 S-neox 三维光学轮廓仪精确测量表面粗糙度。与探针式表面轮廓仪相比, 光学测量方法不破坏表面结构, 而且能够测量大表面区域的细微结构, 使测量值更接近真实值。经测量, 加工的 7 种样品表面粗糙度分别为 $0.3、5、6、10、13、18、30 \mu\text{m}$, 不同位置的均匀性良好且满足高斯分布规律。部分样品的表面形貌图如图 1 所示。

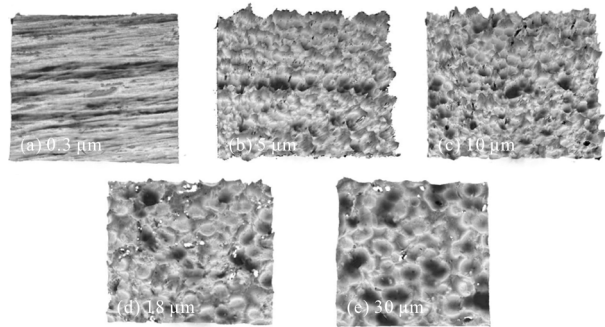


图 1 不同粗糙度铝板表面形貌图

Fig.1 Surface topography of aluminum plate with different roughness

3 单频点粗糙铝板散射特性测量与分析

文中利用爱丁堡公司所产的 FIRL 100 型远红外激光器作为光源搭建测量系统。该激光器利用 CO_2 激光泵浦 CH_3OH 气体能够产生 2.52 THz 和 3.11 THz 的太赫兹波^[13], 两频点处太赫兹波输出功率分别为 40 mW 和 12 mW , 满足粗糙率板的散射特性测量的要求。整个实验测量系统如图 2 所示。

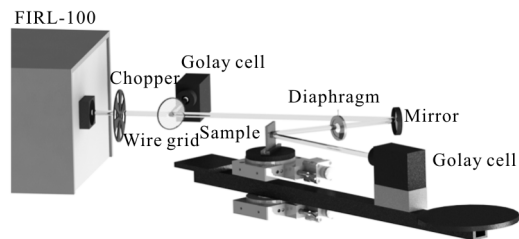


图 2 基于远红外激光器散射特性的实验测量系统

Fig.2 Experimental system for scattering characteristics measurement based on a far-infrared laser

激光器发出的太赫兹波经斩波器调制为 50 Hz 脉冲信号便于探测, 并利用金属线栅分出少量信号用于校正激光器功率漂移引起的测量误差。用金镜

将入射光反射到粗糙铝板中心位置，并在光路中加入小孔光阑，控制入射光的光斑大小及探测器的接收角。粗糙铝板搭载单元为两套独立运行的共轴同心电控转台，下部的较大转台可以控制双站角的变化，分辨率为 0.5° ，相对于粗糙铝板的入射角由上方的小型高精度转台控制，分辨率为 0.075° 。粗糙金属板由定制底板及支撑杆固定，可以根据光束中心高度沿转台轴心上下移动调整。两台 Golay Cell 探测器分别用于测量太赫兹波散射信号及参考信号。双路信号的采集及测量系统的运动控制均由 Labview 程序自动完成。

为了验证粗糙面的峰值散射系数与粗糙度的关系，通过下部转台调整双站角为 40° ，上部转台改变入射角寻找散射峰值（峰值处双站角为入射角的两倍，对应入射角为 20° ），并用光滑金镜（反射率假定为 1）的反射信号进行标定，得到粗糙铝板的实际散射系数率。在 2.52 THz 和 3.11 THz 两个频点的实验测量结果与根据公式(6)的理论计算对比如图 3 所示，其中计算时设定 $R_0=0.995$ ， R_0 即光滑铝板的反射率^[14]。

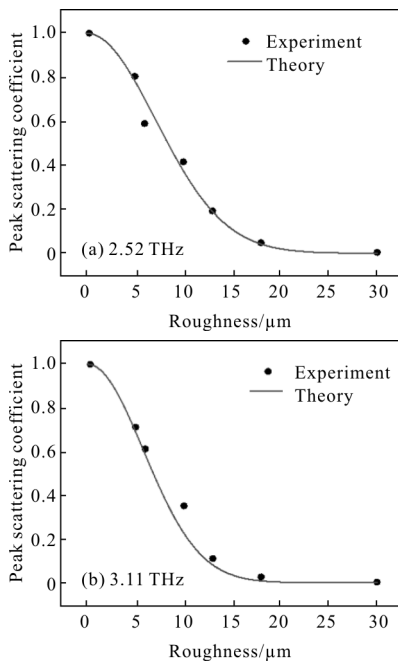


图 3 不同粗糙度铝板峰值散射系数理论与实验结果对比

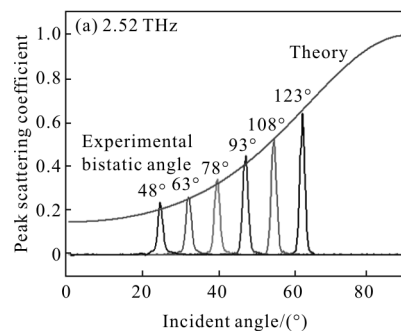
Fig.3 Experimental and theoretical peak scattering coefficients of different rough Al plates

由图 3 中可以看出，在 2.52 THz 与 3.11 THz 处，铝板的峰值散射强度随粗糙度呈现明显减小趋

势，散射强度与粗糙度负相关，实验结果与理论计算相符，部分测量结果的偏移源于表面粗糙度在不同位置处均匀性稍差。在粗糙度为 $0.3 \mu\text{m}$ 时，两个频点处的峰值散射系数相当，均接近光滑金属表面的镜面反射率。随着粗糙度的增加，峰值散射系数明显下降，且 3.11 THz 频点处下降更快，也更早趋于稳定值，这跟公式(6)中指数项的 σ/λ 因子有关。在太赫兹频段，测量样品的粗糙度 σ 与太赫兹波长 λ 相当，粗糙度的变化对散射特性影响很大。当 $\sigma \ll \lambda$ 时，表面近似光滑，粗糙度的变化对散射（镜面反射）信号影响很小；而 $\sigma \gg \lambda/4$ 时，表面非常粗糙，信号很弱，接近漫反射。实验结果与理论计算的一致性也表明，当表面粗糙度不太大（小于 $30 \mu\text{m}$ ）时，低频（不高于 3 THz）太赫兹波的散射特性可由基尔霍夫近似很好地描述。

由公式(6)还可以看出，粗糙平板的峰值散射系数跟入射角有关。对于接近光滑的极小粗糙度，散射规律接近镜面反射，而粗糙度很大时主要是漫反射起作用。为了验证角度对散射信号的影响规律，笔者选取粗糙度 $13 \mu\text{m}$ 的铝板样品进行实验，在双站角一定时，测量入射角变化引起的散射信号变化情况，散射强度由光滑金镜进行标定获得散射系数。双站角的变化范围为 $48^\circ \sim 123^\circ$ ，每隔 15° 测量一组数据，在 2.52 THz 和 3.11 THz 两个频点处，不同入射角的散射系数测量结果与理论计算的峰值散射系数对比情况如图 4 所示。

由图 4 所示，两个频点处的粗糙铝板峰值散射系数均随入射角的增大呈上升趋势，散射强度与入射角正相关，实验结果与理论计算具有良好的一致性。此外，由于散射强度与频率负相关，随着频率增加，同条件下散射信号减弱，漫反射因子的影响会变得更加显著，这也导致了 3.11 THz 的测量结果与计算结果（不考虑漫反射因子）相比，较 2.52 THz 频点



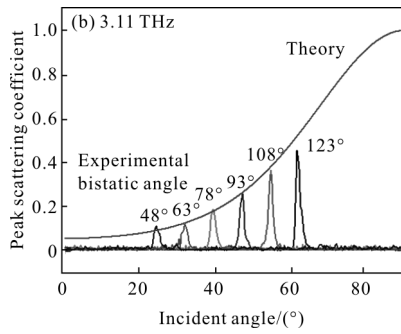


图 4 对于 13 μm 粗糙度的铝板,不同入射角和双站角的散射系数实验值与理论计算值对比

Fig.4 Experimental and theoretical scattering coefficients of the 13 μm -roughness Al plate at different incident and bistatic angles

一致性稍差,在 3.11 THz 频点小角度入射时甚至出现了测量结果高于理论值的情况。

4 宽带散射特性测量与分析

为了更好地验证太赫兹波长对散射规律的影响,笔者采用一套加拿大 Sciencetech 公司生产的 FTIR 对粗糙铝板的宽频带太赫兹散射特性(反射率)进行了测量^[15]。该 FTIR 采用迈克尔逊干涉仪原理,内置光源为高压汞灯,采用聚酯薄膜(Mylar)分光,液氮冷却(4.2 K)的 Bolometer 作为探测器,工作于反射模式时样品的入射角度为 20°,测量结果用相同的金镜进行标定。选取 0.3、5、30 μm 的三个粗糙铝板样品,1~3.5 THz 范围内反射率实验测量结果与公式(6)理论计算结果的对比情况如图 5 所示。

由图 5 可以看出,在有效测量范围内,反射率(即峰值散射系数)随粗糙度的增加呈减小趋势,较小粗糙度铝板样品的测量值与理论计算值具有很好的一致性。对于 0.3 μm 粗糙度的样品,由于表面近似光滑,反射率随频率的变化并不明显;而对于 5 μm

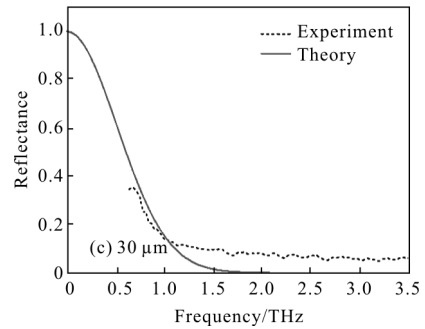
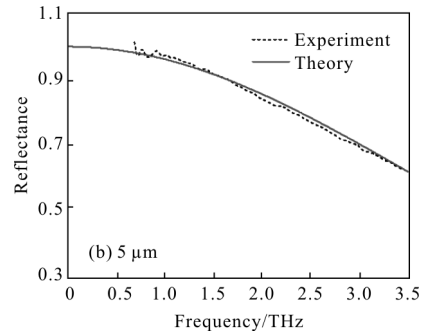
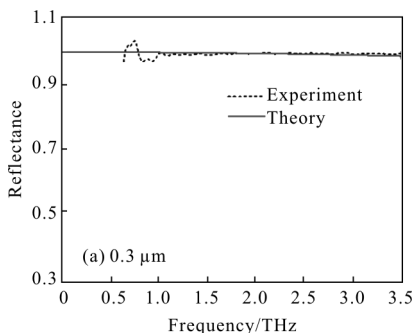


图 5 利用 FTIR 测量的反射率实验数据与理论值对比

Fig.5 Comparison of theoretical results with experimental reflectance results measured by FTIR

粗糙度的样品, σ/λ 因子对于反射率的影响已经非常明显,随着频率增加,反射率显著下降,即散射强度与频率负相关。对于 30 μm 粗糙度铝板样品,此时漫反射因子不可忽略,且 FTIR 探测光路中大尺寸的反射镜会将很大立体角内的漫反射信号汇聚到探测窗口,使得测量结果明显高于不考虑漫反射因子的理论值,这一点在短波(高频)部分更加明显。

5 结论

文中通过对太赫兹频段粗糙金属(以铝为例)平板散射特性的理论及实验研究,获得了粗糙度、入射角及太赫兹波频率对峰值散射系数(反射率)的影响规律:峰值散射系数与粗糙度和频率是负相关的,而与入射角度是正相关的。通过实验与理论结果的对比发现:当波长远大于粗糙度时可以近似为光滑平面进行处理,而在大粗糙度或高频段,目标的散射特性需要考虑漫反射的影响,否则会产生较大的误差。总体来说,文中利用远红外激光器系统的单频点测量和 FTIR 的宽频带测量,验证了基尔霍夫近似散射理论在太赫兹频段的适用性,为复杂目标散射特性的理论计算奠定了基础,对于太赫兹频段雷达相关

理论和技术的发展具有重要意义。

参考文献:

- [1] Hu Weidong, Ji Jinjia, Liu Ruiting, et al. Terahertz atmosphere remote sensing [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(5): 656–665. (in Chinese)
- [2] Wang Maorong, Zhong Kai, Liu Chu, et al. Radar cross section measurement at 3.11 THz based on terahertz gas lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 0225001. (in Chinese)
王茂榕, 钟凯, 刘楚, 等. 3.11 THz 标准体雷达散射截面测量[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(2): 0225001.
- [3] Dikmelik Y, Spicer J B, Fitch M J, et al. Effects of surface roughness on reflection spectra obtained by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(24): 3653–3655.
- [4] Ortolani M, Lee J S, Schade U. Surface roughness effects on the terahertz reflectance of pure explosive materials [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(8): 081906.
- [5] Jagannathan A, Gatesman A J, Giles R H. Characterization of roughness parameters of metallic surfaces using terahertz reflection spectra[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(13): 1927–1929.
- [6] Cacciari I, Siano S. THz characterization of corroded metals: The influence of surface roughness [C]//18th Italian National Conference on Photonic Technologies (Fotonica 2016), 2016: 1–4.
- [7] Yang Yang, Liu Bing, Zhang Jingshui, et al. Influence of rough metal surface on the scattering properties of terahertz frequency[J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(8): 922–926. (in Chinese)
- [8] Chen Gang, Dang Hongxing, Tan Xiaomin, et al. Scattering properties of electromagnetic waves from randomly oriented rough metal plate in the lower terahertz region [J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(1): 75–82. (in Chinese)
- [9] Ge Chengxian, Wu Zhensen, Bai Jing, et al. Difference field scattering properties between multiple inlaid redundant particles and slightly rough optical surface [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2018, 26(2): 268–275. (in Chinese)
- [10] Davies H. The reflection of electromagnetic waves from a rough surface [J]. *Proceedings of the IEE –Part IV: Institution Monographs*, 1954, 101(7): 209–214.
- [11] Bennett H E, Porteus J O. Relation between surface roughness and specular reflectance at normal incidence [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1961, 51(2): 123–129.
- [12] Huang Kuntao, Fang Fengzhou, Gong Hu. Study on the optical characteristics of the surface microscopic topology generated by ultra-precision turning [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2013, 21(1): 101–107. (in Chinese)
- [13] Liu C, Zhong K, Shi J, et al. Accurate measurement of terahertz spectrum and target velocity based on Michelson interferometry[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1117006. (in Chinese)
- [14] Gatesman A J, Giles R H, Waldman J. High-precision reflectometer for submillimeter wavelengths [J]. *JOSA B*, 1995, 12(2): 212–219.
- [15] Guo S B, Zhong K, Wang M R, et al. Theoretical and experimental study on broadband terahertz atmospheric transmission characteristics [J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(1): 019501.