

基于微面斜率法的粗糙表面半透明介质层 光谱散射特性分析

陈 学 孙 创 夏 新 林

(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 对具有一维高斯分布粗糙表面的半透明介质层光谱散射, 基于微面斜率法建立了考虑遮蔽效应的粗糙表面光谱辐射传递概率模型, 采用蒙特卡罗法模拟光谱辐射能束在粗糙表面、半透明介质层介质与镜反射基底之间的多次反射、折射和吸收等传递过程。通过数值模拟, 分析了介质层表面粗糙度、光谱光学厚度、折射率和基底反射率对介质层双向反射分布函数(BRDF)的影响。结果表明, 表面粗糙程度不同时, 反射峰值随入射角度呈现不同的变化趋势; 表面粗糙度增加或折射率增大都将导致漫反射份额增大; 介质层光谱光学厚度和基底反射率主要影响 BRDF 的数值大小, 而对 BRDF 的分布形态影响很小。

关键词 光谱学; 粗糙面; 半透明介质层; 几何光学近似; 双向反射分布函数; 微面斜率法

中图分类号 TK124 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.1229001

Spectral Scattering Properties Analysis of Semitransparent Medium Layer with Rough Surface by Microfacet Slope Method

Chen Xue Sun Chuang Xia Xinlin

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract For one-dimensional semitransparent medium layer with rough surface and Gaussian distribution, the transfer probability model of the spectral radiation on rough surface with shading effect considered is established with microfacet slope method. Monte Carlo method is used to simulate the radiation transfer. The reflection and refraction of spectral radiation at rough surface, absorption of medium and specular reflection on the substrate are considered along with the effects of shadowing and masking. The effects of roughness, optical thickness, refractive index and reflectivity of substrate on bi-directional reflectance distribution function (BRDF) are investigated. The results show that the change trends of reflection peak with incident angles for different rough levels of surface are different, the diffuse component increases with roughness and refractive index, and reflectivity of substrate and optical thickness change the value mainly instead of the distribution trend of BRDF.

Key words spectroscopy; rough surface; semitransparent medium layer; geometric optics approximation; bi-directional reflectance distribution function; microfacet slope method

OCIS codes 240.5770; 080.0080; 290.1483; 290.4210

1 引 言

粗糙表面及材料的光谱散射特性在遥感探测、通信、目标光学特性、辐射测量和光学工程等领域都有着重要的应用前景^[1~3]。由于与入射波长、入射

角度、材料光学常数、温度以及表面形貌等多种因素有关, 对粗糙表面的光谱散射特性的研究通常采用数值模拟方法, 如时域有限差分法(FDTD)^[4]、微扰法^[5]、基尔霍夫近似^[6]和几何光学近似^[7,8]等。其

收稿日期: 2012-06-27; 收到修改稿日期: 2012-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(90816022)资助课题。

作者简介: 陈 学(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事红外仿真与杂散光分析等方面的研究。

E-mail: hit_chenxue@163.com

导师简介: 夏新林(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事杂散光、红外辐射和耦合传热等方面的研究。

E-mail: xiaxl@hit.edu.cn(通信联系人)

中,几何光学近似认为粗糙表面由大量随机朝向的光滑微面构成,辐射能束在微面上镜反射,反射率由菲涅耳定律计算得到,忽略干涉及衍射效应;在 $0.2\lambda/\cos\theta_i < \sigma < 2\tau$ 范围内(λ, θ_i 分别为入射波长和入射角度, σ, τ 分别为粗糙面均方根高度和相关长度),应用几何光学近似可以得到满意的模拟结果^[7]。在许多情况下,半透明介质层材料的表面也具有随机粗糙性,其粗糙表面与内部介质的光谱辐射传递相互耦合,形成介质层的光谱散射特性。

目前,对不涉及介质内辐射传递的粗糙表面光谱散射特性已开展了大量研究,也有一些学者分析了具有光滑表面半透明介质层的反射和发射特性^[9,10],但对具有粗糙表面的半透明介质层光谱散射特性研究还比较缺乏。Lee 等^[11,12]直接采用薄膜光学反射关系,并提出微面斜率法(MSM)计算粗糙表面的折射和反射,分析了具有粗糙表面的薄膜光学散射特性。本文针对光谱光学厚度较大、具有粗糙表面和镜反射基底的半透明介质层,基于微面斜率法建立粗糙表面的多次反射和折射概率模型,结合蒙特卡罗法直接模拟光谱辐射能束在半透明介质内的吸收传播与基底的多次反射效应,分析了其光谱散射特性及相关参数的影响。

2 数学物理模型

计算模型如图 1 所示,具有粗糙表面半透明介质层的平均厚度为 h ,光谱吸收系数和折射率分别为 $\alpha_\lambda, n_\lambda$,不透明基底面镜反射率为 ρ_{sk} ,环境折射率为 1。表面的双向反射分布函数(BRDF)定义为^[9]

$$f_r(\theta_i, \theta_r) = \frac{I_r(\theta_r)}{I_i(\theta_i) \cos\theta_i d\Omega_i}, \quad (1)$$

式中 θ_i, θ_r 为入射角与反射角; $I_i(\theta_i), I_r(\theta_r)$ 分别为入射辐射强度与反射辐射强度; $d\Omega_i$ 为入射辐射能束的立体角。

对不透明粗糙表面散射的能束追迹模拟,大多采用表面生成法(SGM)^[7,8],事先生成确定的表面

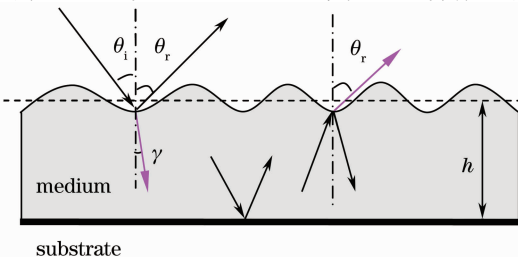


图 1 粗糙表面半透明介质层

Fig. 1 Semitransparent medium layer of rough surface

轮廓,再进行能束追迹;但对半透明材料而言,表面生成和能束追迹比较复杂。微面斜率法^[11,12]则根据粗糙表面的斜率分布,针对每一能束统计地确定微面方位,引入遮蔽函数,无需生成确定表面轮廓,对半透明材料的散射计算具有优势^[1]。采用微面斜率法,针对具有粗糙表面的半透明介质层散射特性进行模拟分析。

一维粗糙表面的每个微面可以用 x 方向斜率 ζ_x ($\zeta_x = dz/dx, z$ 为表面高度) 进行描述,高斯粗糙表面斜率分布的概率密度函数可表示为

$$p(\zeta_x) = (1/\sqrt{2\pi}\omega)\exp(-\zeta_x^2/2\omega^2), \quad (2)$$

式中 ω 为均方根斜率, $\omega = \sqrt{2}\sigma/\tau$ 。

照射到达微面的能量与微面在辐射能束入射方向的投影面积成比例,针对每一能束,需引入加权概率密度函数以确定微面的方位^[12]:

$$p_w(\zeta_x, \theta_i) = \frac{W(\theta_i, \zeta_x) p(\zeta_x)}{\int_{-\infty}^{\infty} W(\theta_i, \zeta_x) p(\zeta_x) d\zeta_x}, \quad (3)$$

式中 $W(\theta_i, \zeta_x)$ 为加权函数,当 $\zeta_x \leq -1/\tan\theta_i$ 时, $W(\theta_i, \zeta_x) = 0$,反之则 $W(\theta_i, \zeta_x) = \cos\theta_i + \zeta_x \sin\theta_i$ 。通过产生随机数生成微面方位的过程详见文献^[11]。

将光谱辐射能束的传递过程分解为介质层表面的反射与折射,粗糙表面的遮蔽效应,介质的吸收以及基底的吸收与反射。这里仅对第二个过程进行说明,其他过程的分析见文献^[13,14]。如图 2 所示,辐射能束经反射或折射后朝向 1 和 2,能束可能再击另一微面或者逃逸进入环境与介质层内部;若辐射能束经反射或折射后朝向 3 和 4,则能束再击另一微面的概率为 1。引入遮蔽函数对能束的遮蔽效应(朝向 1 与 2)进行描述,Smith 遮蔽函数由于准确且形式简单而在散射问题中得到广泛应用^[15,16],利用 Smith 遮蔽函数可表示出能束的再击概率:

$$P(\chi) = \frac{\exp(-\chi^2)}{\exp(-\chi^2) - \chi\sqrt{\pi}\operatorname{erfc}(\chi) + 2\chi\sqrt{\pi}}, \quad (4)$$

式中 $\chi = \tan(90^\circ - \theta)/(\sqrt{2}\omega)$, erfc 为余补误差函数。

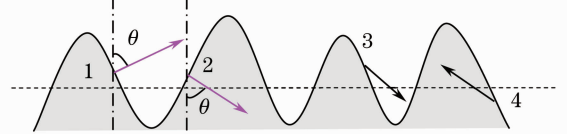


图 2 辐射能束在微面间传输

Fig. 2 Propagation of the radiation energy beams between micro-facets

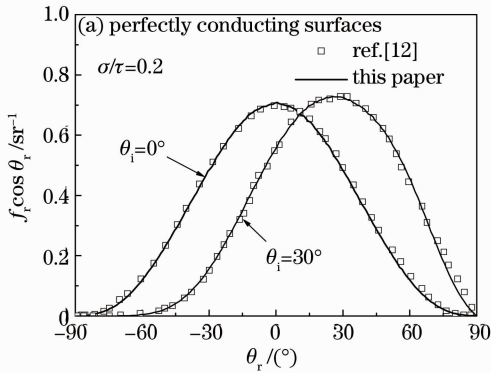
产生随机数 R_p , 若 $R_p > P(\chi)$ 则能束进入环境或介质层内部; 反之, 则与另一微面相交。

3 计算分析

3.1 程序可靠性验证

将反射空间角度离散 $\Delta\theta_r = 1^\circ$ 进行模拟, 把计算程序简化为不透明粗糙表面散射和镜反射基底光滑半透明介质层散射两个方面分别进行验证。其中, 对镜反射基底光滑半透明介质层的反射率可以通过理论推导得到:

$$\rho_\lambda = \frac{\rho_{1\lambda} + \rho_{S\lambda}(1 - 2\rho_{1\lambda})\exp(-2\alpha_\lambda h / \cos \gamma)}{1 - \rho_{1\lambda}\rho_{S\lambda}\exp(-2\alpha_\lambda h / \cos \gamma)}, \quad (5)$$



式中 $\rho_{1\lambda}$ 为介质层表面的菲涅耳反射率, γ 为以 θ_i 入射时折射能束与宏观表面法向的夹角。

图 3(a) 为理想导体(菲涅耳反射率为 1)粗糙表面散射的 BRDF 分布; 图 3(b) 是粗糙硅片(室温下, $\lambda < 1.1 \mu\text{m}$ 时不透明)在 $\lambda = 632 \text{ nm}$ 时折射率 $n_\lambda = 3.882 + 0.019i$ 的 BRDF 计算结果。针对光滑半透明介质层(折射率 $n_\lambda = 1.53$, 光谱光学厚度 $\delta_\lambda = \alpha_\lambda h = 0.2$), 为简化计算, 基底反射率取 $\rho_{S\lambda} = 1.0$, 图 4 为其反射率随入射角度的变化曲线。可见, 对比结果吻合很好从而验证了计算程序。

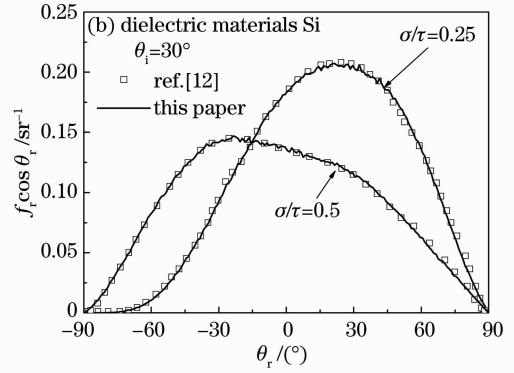


图 3 不透明粗糙表面散射计算结果与文献[12]的对比

Fig. 3 Comparison of the calculated results of the opaque rough surfaces with the results in Ref. [12]

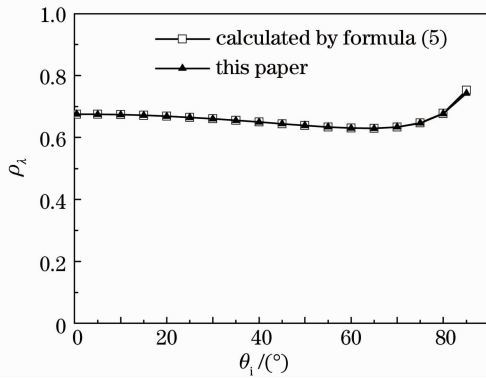


图 4 镜反射基底光滑半透明介质层的反射率

Fig. 4 Reflectivity of smooth semitransparent medium layer on specular reflecting substrate

3.2 光谱散射特性及影响因素

采用蒙特卡罗法模拟光谱辐射能束的传递过程, 不考虑介质散射, 计算粗糙表面半透明介质层的表面 BRDF 分布, 介质层折射率 $n_\lambda = 1.5$, 光谱光学厚度 $\delta_\lambda = \alpha_\lambda h = 0.2$, 基底反射率 $\rho_{S\lambda} = 1.0$, 以下讨论仅一个参数变化时的表面散射特性。

如图 5 所示, 介质层表面微粗糙时($\sigma/\tau = 0.2$),

在镜反射方向存在反射峰值, 且峰值随着入射角度的增大而降低; 这是由于入射角度增大, 折射能束向下传输的距离变大导致介质吸收的份额增加, 表面反射能束整体减少。粗糙程度增加($\sigma/\tau = 0.5$), 镜反射仍然比较强烈, 但在入射角度较大时峰值相对于镜反射方向有所偏离; 不同入射角度下, 粗糙程度的增加导致多次反射增加以及遮蔽效应, 通过介质吸收和基底的反射与吸收, 最终反射进入环境的辐射能束减小, 各入射角度对应的 BRDF 峰值较 $\sigma/\tau = 0.2$ 时整体减小, 而其数值随入射角度的变化较小。

由图 6 可知, 介质层折射率增大, 镜反射份额逐渐减小, 粗糙度较大时出现后向散射增强。这是由于折射率增大后, 相对于同一入射角度, 折射角变小导致折射进入介质层的能束传输距离减小, 介质吸收份额降低, 能束在基底和介质层表面多次反射及折射, 最终导致漫反射份额的变大。

图 7 为介质层光谱光学厚度对散射特性的影响, 可以看出, 随光谱光学厚度的增大, 介质层对辐射能束的吸收份额增加, 反射能束减少从而 BRDF

变小,但分布形态基本一致。图 8 为基底反射率变化时 BRDF 分布,由图可知,基底反射率减小,被基

底吸收的辐射能束增多,反射能束减少最终导致 BRDF 数值变小。

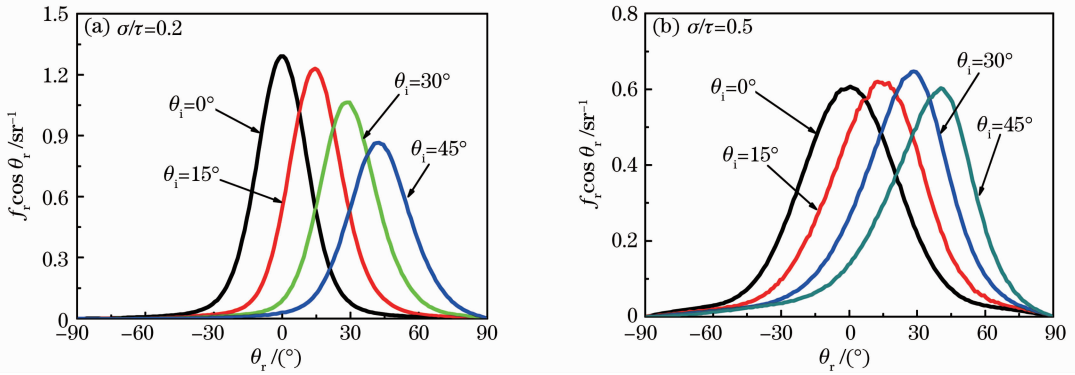


图 5 不同入射角度下的 BRDF 分布

Fig. 5 Distribution of BRDF for different incident angles

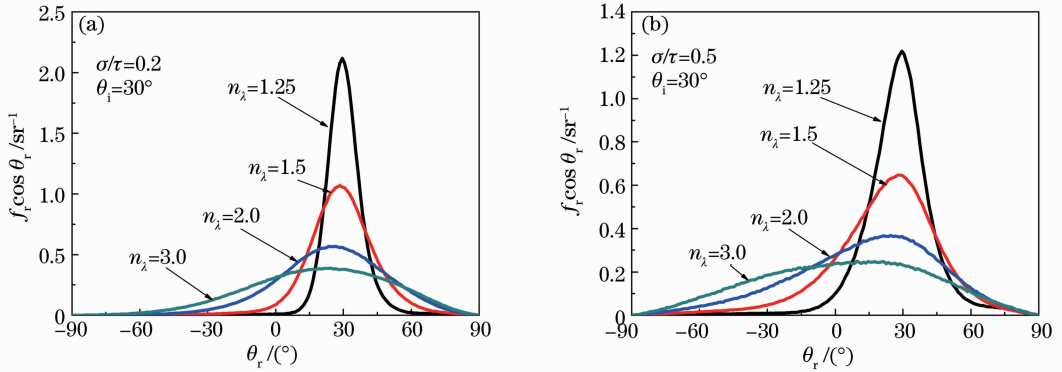


图 6 折射率对 BRDF 的影响

Fig. 6 Effects of refractive indexes on BRDF

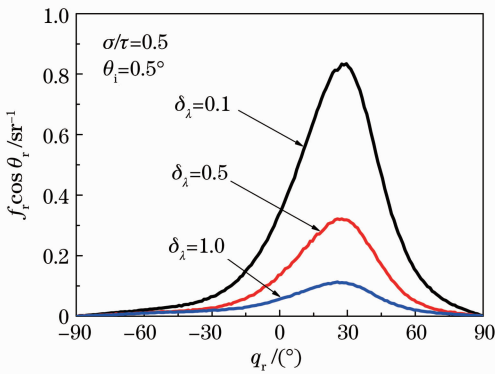


图 7 介质层光谱光学厚度对 BRDF 的影响

Fig. 7 Effects of medium layer's spectral optical thickness on BRDF

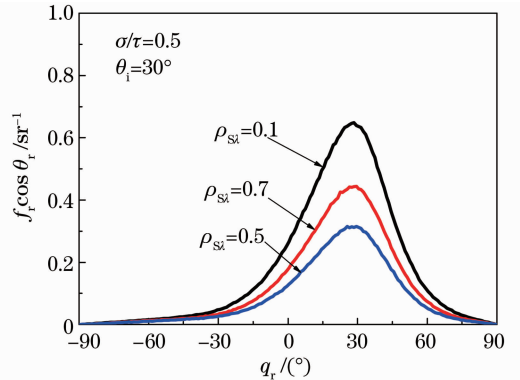


图 8 基底反射对 BRDF 的影响

Fig. 8 Effects of substrate reflection on BRDF

4 结 论

针对光谱光学厚度较大的一维高斯粗糙表面半透明介质层,采用微面斜率法建立了光谱辐射能束的传递模型;通过蒙特卡罗法模拟分析了表面的光谱散射特性以及相关参数的影响,初步得出以下

结论:

1) 半透明介质层粗糙表面、介质吸收与基底反射的耦合作用决定了其散射特性。表面微粗糙 $\sigma/\tau=0.2$ 时镜反射强烈, BRDF 峰值随入射角度的增大而减小;粗糙程度增加, $\sigma/\tau=0.5$ 时镜反射份额仍然较大,但 BRDF 数值整体减小,峰值随入射角度的增大

变化较小。

2) 介质层折射率对 BRDF 的影响较大; 折射率增大, 漫反射份额增加, 且粗糙度较大时反射峰值偏离镜反射方向, 后向散射增强。

3) 介质层的光谱光学厚度与基底反射率对散射特性的影响类似, 仅改变 BRDF 的数值, 对其分布形态的影响较小。

参 考 文 献

- 1 Qunzhi Zhu, Hyunjin Lee, Zhuomin M. Zhang. Radiative properties of materials with surface scattering or volume scattering: a review[J]. *Front. Energy Power Engng. China*, 2009, **3**(1): 60~79
- 2 Yang Yufeng, Wu Zhensen, Cao Yunhua. Practical six-parameter bidirectional reflectance distribution function model for rough surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0229001
杨玉峰, 吴振森, 曹运华. 一种实用型粗糙面六参数双向反射分布函数模型[J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0229001
- 3 Gao Yunhua, Wu Zhensen, Zhang Hanlu *et al.*. Experimental measurement and statistical modeling of spectral bidirectional reflectance distribution function of rough target samples[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 792~798
曹运华, 吴振森, 张涵璐等. 粗糙目标样片光谱双向反射分布函数的实验测量及其建模[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 792~798
- 4 Kang Fu, Hsu Pei-feng. Modeling the radiative properties of microscale random roughness surfaces[J]. *J. Heat Transfer*, 2007, **129**(1): 71~78
- 5 Elena I. Chaikina, A. Georgina Navarrete, Eugenio R. Méndez *et al.*. Coherent scattering by one-dimensional randomly rough metallic surfaces[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(6): 1110~1121
- 6 Jiang Shu, Lai Jiancheng, Wang Chunyong *et al.*. Research on generated mechanism of scattering characteristic of random rough dielectric surface[C]. *SPIE*, 2010, **7854**: 78540T
- 7 K. Tang, R. A. Dimenna, R. O. Buckius. Regions of validity of the geometric optics approximation for angular scattering from very rough surfaces[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1997, **40**(1): 49~59
- 8 K. Tang, R. O. Buckius. The geometric optics approximation for reflection from two-dimensional random rough surfaces[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1998, **41**(13): 2037~2047
- 9 Xia Xinlin, Ren Depeng, Tan Heping. Effects of medium absorption and scattering on bi-directional reflection of semitransparent coatings[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2005, **24**(5): 361~365
夏新林, 任德鹏, 谈和平. 介质吸收散射对半透明介质层表面双向反射特性的影响[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(5): 361~365
- 10 Huang Yong, Liang Xin' gang, Xia Xinlin *et al.*. Thermal emission characteristics of an anisotropic scattering medium layer with gradient index[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2005, **24**(1): 49~52
黄 勇, 梁新刚, 夏新林等. 各向异性散射梯度折射率介质的热发射特性[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(1): 49~52
- 11 H. J. Lee, B. J. Lee, Z. M. Zhang. Modeling the radiative properties of semitransparent wafers with rough surfaces and thin-film coatings[J]. *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2005, **93**(1-3): 185~194
- 12 Q. Z. Zhu, H. J. Lee, Z. M. Zhang. Validity of hybrid models for the bidirectional reflectance of coated rough surfaces[J]. *J. Thermophysics and Heat Transfer*, 2005, **19**(4): 548~557
- 13 Xia Xinlin, Huang Yong, Tan Heping. A ray split-off and tracing approach for analyzing the spectral reflecting performance of a semitransparent fluid layer with undulant surface[J]. *Chinese J. Computational Physics*, 2001, **18**(3): 215~218
夏新林, 黄 勇, 谈和平. 计算波状表面半透明流体层光谱反射特性的能束分裂跟踪法[J]. *计算物理*, 2001, **18**(3): 215~218
- 14 Y. H. Zhou, Z. M. Zhang. Radiative properties of semitransparent silicon wafers with rough surfaces[J]. *J. Heat Transfer*, 2003, **125**(3): 462~470
- 15 K. Tang, R. O. Buckius. A statistical model of wave scattering from random rough surfaces [J]. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 2011, **44**(21): 4059~4073
- 16 Matthew N. O. Sadiku, Sudarshan R. Nelatury. A comparison of models for shadowing functions for random rough surfaces[C]. *Proceedings of the IEEE*, 2006. 11~15

栏目编辑: 李文誌