

文章编号: 0258-7025(2003)03-0259-04

# 墙面靶材料用于激光遥感探测气体的 反射特性实验研究

尹王保, 赵建明, 马维光, 李昌勇, 肖连团, 贾锁堂

(山西大学电子信息技术系 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

**摘要** 通过实验研究了在强背景光、反向散射条件下, 十余种建筑物墙面靶材料在波长  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  下的反射特性。利用调制光谱技术, 通过与标准反射参考板的比对测量, 得到了这几种墙面靶材料的双向反射分布函数。其结果为设计气体遥感探测仪器信号放大器的动态范围、测试距离以及理论计算最低探测灵敏度提供了必要的实验依据。

**关键词** 遥感信息工程; 反射特性; 频率调制光谱; 双向反射分布函数; 菲涅耳透镜

**中图分类号** TN 204; TH 744.1 **文献标识码** A

## Experimental Research on the Backscatter Characteristics from Surface Materials of Wall as Target for Laser Remote Detection of Gases

YIN Wang-bao, ZHAO Jian-ming, MA Wei-guang,

LI Chang-yong, XIAO Lian-tuan, JIA Suo-tang

(Dept. of Electronics & Information Technology, Shanxi University,

and State key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

**Abstract** In this article, the characteristics of several surface materials of wall as target for laser remote detection of toxic and hazardous gases were described. The backscatter data were obtained by a novel measured method with one particular technique. By use of these data, the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) of these surface materials was calculated by comparing with that of the PTFE diffuse plate.

**Key words** remote information engineering; diffuse characteristic; frequency-modulation spectroscopy; BRDF; fresnel lens

## 1 引言

应用调谐激光二极管吸收光谱(TDALs)技术进行危险、有毒气体的痕量泄露检测是目前气体遥感检测的主要研究内容之一<sup>[1~3]</sup>。在利用该技术进行现场遥感探测时, 一般采用开腔样品池结构, 它需要一个反射面将入射探测光线反射给接收装置, 接收装置通过接收、处理含有被探测气体浓度信息的反射光来确定被探测气体浓度。由于被检测区域危险程度的不可预知性及考虑到仪器的使用方便性,

一般选用被检测区域附近的建筑物墙面作为反射参考板。因此, 作为参考反射板的墙面材料的反射特性就成为设计该类检测仪器不可或缺的依据。

双向反射分布函数(BRDF)能够准确地表述材料表面的反射特性。对此, 国际上进行的研究已相当多, 但大部分研究是基于空间遥感、天文或计算机图像处理等进行的<sup>[4~7]</sup>, 其实验的方法和所获得的数据对这种近距离的遥感探测仪器的设计并不适宜。

我们设计了能较好模拟墙面靶材料在激光遥感

收稿日期: 2001-11-15; 收到修改稿日期: 2002-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(60078009)、山西省科技攻关项目(002096)和山西省自然科学基金(20001031)资助项目。

作者简介: 尹王保(1965—), 男, 山西新绛人, 山西大学电子信息技术系讲师, 博士生。主要研究方向为激光技术与激光光谱。E-mail: ywb65@sxu.edu.cn

探测危险有毒气体时的实际情况的实验装置。由于该装置采用了光谱调制技术,并利用菲涅耳透镜收集反射光,所接收的反射信号只与入射光和样品的反射特性有关而不受环境光的影响,克服了传统的反射特性测试系统需在暗室内进行的不足,因而能较完全地模拟这类仪器的现场工作环境。利用该实验装置所测的实验数据计算出了十余种墙面材料在反向散射测试条件下的双向反射分布函数。从而为设计气体遥感探测仪器信号放大器的动态范围、测试距离以及理论计算最低探测灵敏度提供了必要的实验数据。

## 2 实验装置

实验装置示意图如图 1 所示,主要由激光源、光纤分光传输系统、样品承载台、光接收系统、信号放大处理系统、调制信号发生器等部分组成。

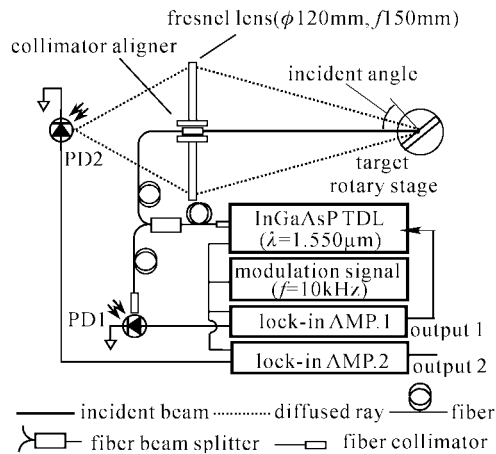


图 1 在强背景下测量墙面材料 BRDF 的实验装置  
Fig.1 Schematic diagram of experimental system for the BRDF measurements of several surface materials of wall under strong environmental light

激光源主要由 InGaAsP TDL 激光二极管 (OKI 公司的 OL5104L, 出射功率  $W \geq 1$  mW)、电流驱动器 (美国 Newport 公司的 Model505 Laser Diode Driver)、温度控制器 (美国 Newport 公司的 Model325 Temperature Controller) 等组成。电流驱动器可外加调制信号 (该信号由锁相放大器 2 内部产生), 使激光二极管输出的光受到调制, 以便于信号处理系统进行相敏检测放大。

光纤分光传输系统主要由一分二单模光纤光分路器 (分光比为 1:9)、光纤准直器和光纤等组成。采用该传输系统可减少光路中其他光学器件对反射

光的影响且光路简单、调整容易。

样品承载测试台示意图如图 2 所示, 其旋转范围为  $-90^\circ \sim +90^\circ$ , 读数精度  $\pm 0.2^\circ$ 。图 2(c) 示出了实验测试光路图。由于测量的是样品材料表面的反向散射特性, 即在光线入射方向观测样品的反射特性。因此, 在此测试条件下得到的样品 BRDF 为  $f_r(\theta, \varphi; -\theta, \varphi)$ , 其中  $(\theta, \varphi; -\theta, \varphi)$  表示测试的几何条件, 各角度定义及物理意义详见参考文献[8]。在本实验中取方位角  $\varphi = 0^\circ$ 。

光接收系统主要由菲涅耳透镜、光电探测器等组成 (如图 1 所示)。在菲涅耳透镜中心位置有一个直径  $\phi = 10$  mm 的圆孔用以固定光纤准直器, 由激光二极管发出的激光通过光纤耦合到该光纤准直器准直后由此出射到样品表面。光电探测器 PD1, PD2 使用的是 InGaAs PIN 光电探测器。

信号放大处理系统、调制信号发生器主要由两台数字锁相放大器 (美国 SRS 公司的 SR830) 组成。用 SR830 内置参考信号发生器的输出作调制信号。PD1, 锁相放大器 1 与电流驱动器组成闭环控制系统, 用于稳定光功率。

## 3 实验结果

激光波长为  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ , 出射功率为 0.825 mW; 电流调制信号为 10 kHz 的正弦波信号; 锁相放大器 SR-830 的积分时间常数为 300 ms; 菲涅耳透镜平面与样品承载台旋转轴中心的距离为 6 m; 样品承载台旋转范围为  $0^\circ \sim +80^\circ$ , 旋转角度间隔为  $10^\circ$ 。

### 3.1 标准反射参考板的 BRDF 测定

为了测定建筑物墙面材料样品的 BRDF, 须先测定标准反射参考板的 BRDF。本实验研究中选用的是经中国计量科学研究院标定的聚四氟乙烯 (PTFE) 漫反射参考板, 其标定几何条件为  $\rho(0, d)$ 。

利用图 1 的实验装置在上述实验条件和几何测试条件下, 测得的聚四氟乙烯漫反射参考板的实验数据见表 1。在表 1 中, 第一列为光线入射角度 (也即观测角度, 下同), 第二列为实验所得到的数据, 第三列为利用第二列的数据和经中国计量科学研究院标定的聚四氟乙烯漫反射参考板的  $\rho(0, d)$  值, 计算得到聚四氟乙烯漫反射参考板的 BRDF 即  $f_r^{\text{PTFE}}(\theta, \varphi; -\theta, \varphi)$  (计算方法见参考文献[7]), 其函数曲线见图 3(a)。

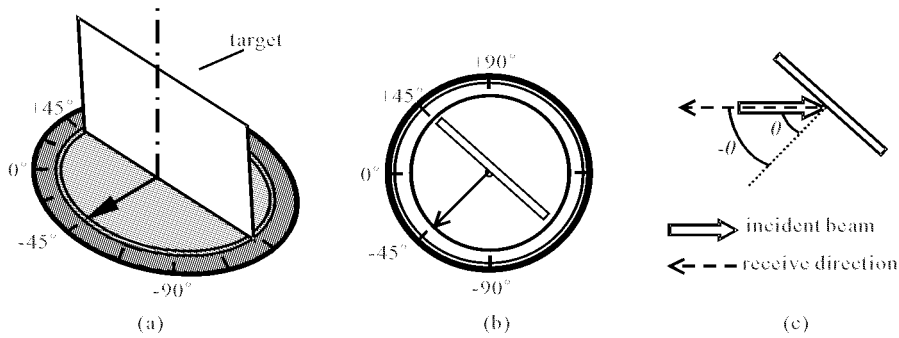


图 2 样品承载台示意图  
(a) 斜视图; (b) 顶视图; (c) 光路图

Fig. 2 Sketch map of target rotary stage

(a) oblique drawing; (b) top view; (c) light path

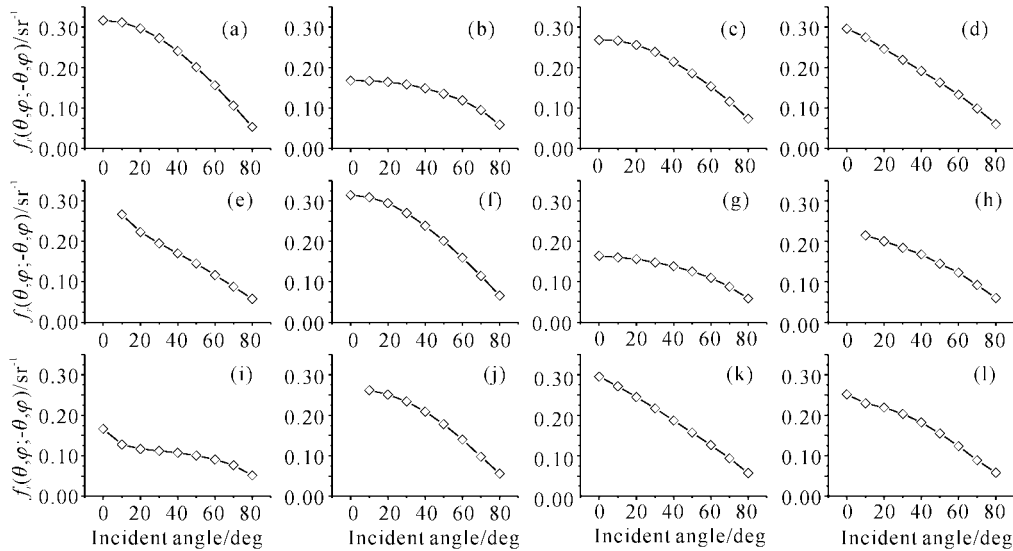


图 3 入射光 ( $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ) 在不同入射角度时的各种墙面材料反向反射的 BRDF

(a) PTFE; (b) 混凝土; (c) 红砖; (d) 木胶合板; (e) 聚氨脂漆; (f) 涂料;

(g) 大理石; (h) 玻璃马赛克; (i) 黑壁纸; (j) 釉面白瓷砖; (k) 纸板; (l) PVC 塑料板

Fig. 3 BRDF measurements of several surface materials of wall via incidence-angle

(a) PTFE; (b) concrete; (c) red-brick; (d) wooden veneer; (e) varnish; (f) whitening coating;

(g) marble; (h) mosaic; (i) black wallpaper; (j) a glazy white tile; (k) cardboard; (l) plastic-board

### 3.2 墙面材料的 BRDF 测定

根据 BRDF 的定义、幅亮度与幅强度的关系、幅强度与探测器的读数的关系,并参考文献[8]的方法,在上述几何测试条件下,可以得到

$$f_r^{\text{sample}}(\theta, \varphi; -\theta, \varphi) \approx \frac{V_r^{\text{sample}}(\theta, \varphi; -\theta, \varphi)}{V_r^{\text{PTFE}}(\theta, \varphi; -\theta, \varphi)} \times f_r^{\text{PTFE}}(\theta, \varphi; -\theta, \varphi)$$

其中,  $f_r^{\text{sample}}(\theta, \varphi; -\theta, \varphi)$ ,  $f_r^{\text{PTFE}}(\theta, \varphi; -\theta, \varphi)$  分别是在上述测试几何条件下的样品双向反射分布函数和标准参考板的双向反射分布函数;  $V_r^{\text{sample}}(\theta, \varphi; -\theta, \varphi)$ ,  $V_r^{\text{PTFE}}(\theta, \varphi; -\theta, \varphi)$  分别是样品和标准参考板在

不同入射角(观测角)下的光电探测器 PD2 接收到的信号读数值。这里  $f_r^{\text{PTFE}}(\theta, \varphi; -\theta, \varphi)$  已知,只要分别测得在不同入射角度下的  $V_r^{\text{PTFE}}(\theta, \varphi; -\theta, \varphi)$  和  $V_r^{\text{sample}}(\theta, \varphi; -\theta, \varphi)$ , 就可求得样品材料在上述几何测试条件下的  $f_r^{\text{sample}}(\theta, \varphi; -\theta, \varphi)$ 。

对常见的十余种建筑物墙面材料分别进行了测量。根据实验数据和以上关系式,计算出了这十余种墙面材料的  $f_r^{\text{sample}}(\theta, \varphi; -\theta, \varphi)$  (如图 3(b)~(l), 这十余种墙面材料均取自太原某装饰城。)

表 1 聚四氟乙烯(PTFE)反射参考板反向反射实验数据  
及由此获得的 BRDF

Table 1 The BRDF data of PTFE plate from the  
experiment of backscatter at  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$

Incident angle /deg	$V_r^{\text{PTFE}}(\theta, \varphi; -\theta, \varphi)$ / $\mu\text{V}$	$f_r^{\text{PTFE}}(\theta, \varphi; -\theta, \varphi)$ / $\text{sr}^{-1}$
0	253.2	0.31638
10	248.9	0.31148
20	238.9	0.29693
30	224.6	0.27321
40	205.2	0.24107
50	182.36	0.20158
60	155.51	0.15601
70	126.03	0.10591
80	93.37	0.05305

## 4 讨 论

从图 3 中发现,在入射角度为  $0^\circ \sim +80^\circ$  时,现有的墙面材料基本上都可以作为激光现场遥感探测危险、有毒气体的反射靶。同时发现有些材料在正入射 ( $\theta = 0^\circ$ ) 时产生镜面反射 (Specular Reflection),如图 3 中的(e),(h),(j),它们在  $\theta = 0^\circ$  的 BRDF 分别为 6.6, 0.4732, 10.39981, 为便于比较不同材料在  $\theta = 10^\circ \sim 80^\circ$  的 BRDF,这三个值在图 3 中未标出。如果采用正入射进行测量,需要考虑这些材料可能导致探测器或放大器过载。

从图 3 中还可以看到,黑壁纸(图 3(i))的反射能力在这十余种材料中最低,应当以此来确定遥感探测接收器的最低探测灵敏度;釉面白瓷砖(图 3(j))在  $\theta = 0^\circ$  时存在较大的镜面反射,接收信号放大器的动态范围应由它和最低反射来决定;涂料墙面

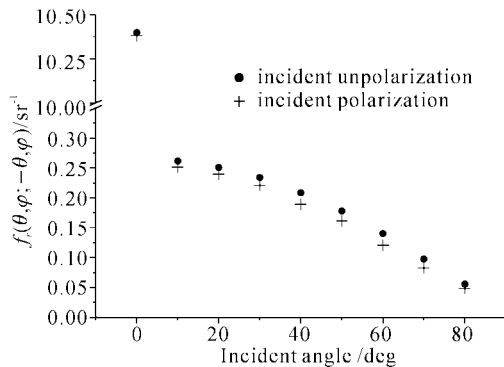


图 4 釉面白瓷砖在入射光 ( $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ) 不同偏振  
情况下反射特性比较

Fig. 4 Comparison of the backscatter characteristics of a  
glazy white tile for the polarization and  
unpolarization incident light

(图 3(f))的反射特性与标准反射板的反射特性近似;硬纸板(图 3(d))的反射特性与入射角度近似呈线性关系且其反射能力也较强,在探测区域没有建筑物作反射靶时,可用它做临时反射板。

实验也研究了入射光偏振对反射特性的影响。图 4 是釉面白瓷砖在入射光没有偏振和有偏振时的 BRDF 比较。其他材料的偏差均小于釉面白瓷砖。因此可以认为入射光偏振方向对反射特性的影响很小,在设计时可以不予考虑。

## 5 结 论

通过模拟以墙面材料为反射靶的激光现场遥感探测气体环境,得到了在环境光干扰情况下,十余种墙面材料的反射特性。其结果表明,现有的墙面材料都可以作为激光现场遥感探测危险、有毒气体的反射靶;入射光偏振对反射特性的影响可以忽略;个别材料在正入射反向散射时,有镜面反射现象,应防止探测器过载。

## 参 考 文 献

- 1 P. Werle. A review of recent advances in semiconductor laser based gas monitors [J]. *Spectrochimica Acta*, Part A, 1998, **54**:197~236
- 2 M. E. Parrish, C. N. Harward. Measurement of formaldehyde in a single puff of cigarette smoke using tunable diode laser infrared spectroscopy [J]. *Appl. Spectroscopy*, 2000, **54**(11):1665~1677
- 3 K. L. McNesby, R. T. Wainner, R. G. Daniel *et al.*. Detection and measurement of middle-distillate fuel vapors by use of tunable diode lasers [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(6):840~845
- 4 S. Liang, A. H. Strahler. Retrieval of surface BRDF from multiangle remotely sensed data [J]. *Remote Sens. Environ*, 1994, **50**:18~30
- 5 St. Sandmeier, Ch. Müller, B. Hosgood *et al.*. Sensitivity analysis and quality assessment of laboratory BRDF data [J]. *Remote Sens. Environ*, 1998, **64**(2): 176~191
- 6 M. Oren, S. K. Nayar. Generalization of the lambertian model and implications for machine vision [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1995, **14** (3):227~251
- 7 S. R. Sandemeier, A. H. Strahler. BRDF laboratory measurements [J]. *Remote Sens. Rev.*, 2000, **18**:481~502
- 8 G. Meister, R. Wiemker, J. Bienlein *et al.*. In Situ BRDF Measurements of Selected Surface Materials to Improve Analysis of Remotely Sensed Multispectral Imagery [C]. Proc. of the 18th Congress of the Int. Soc. for Photogrammetry and Remote Sensing ISPRS, Wien, Vol. XXXI, B7, Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 1996. 493~498