

金属目标表面的反射激光偏振特性

杨雨迎^{1,2}, 崔占忠¹, 王玲³, 魏双成¹

1. 北京理工大学机电工程与控制国家重点实验室, 北京 100081
2. 装甲兵工程学院兵器工程系, 北京 100072
3. 中国人民解放军 61905 部队, 沈阳 110005

摘要 针对目前激光近程探测时仅利用漫反射回波强度信息抗干扰能力差的问题, 提出基于激光偏振特性的目标探测方法, 对金属目标表面的激光偏振特性进行了分析, 给出了偏振反射的模型, 并对典型金属目标的表面偏振反射特性进行了仿真。通过对反射光 Stokes 矢量的分析表明, 线偏振光或圆偏振光经过金属表面反射后变为椭圆偏振光, 其椭圆度和方位角随金属材质的不同而呈现不同的变化规律, 将反射的偏振特性作为区分不同材料目标的依据, 可提高探测系统的抗干扰性能。

关键词 近程探测; 偏振特性; Stokes 矢量; 金属目标

中图分类号 TN247

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.11.002

Reflective Laser Polarization Characteristics of Metal Target Surface in the Short-range Detection

YANG Yuying^{1,2}, CUI Zhanzhong¹, WANG Ling³, WEI Shuangcheng¹

1. National Key Laboratory of Mechatronics and Control Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China
2. Department of Arms Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China
3. Troops 61905 of PLA, Shenyang 110005, China

Abstract In view of that only the intensity information of retroreflection wave is used and the poor capacity of anti-interference in laser short-range detection, the polarization characteristics of laser beam on the metal target surface are analyzed and a reflection model of polarized laser is established. A target detection method based on polarization characteristics of reflection laser is putted forward and the simulation of polarization characteristics on the surfaces of several typical metal targets is conducted at last. By analyzing the Stokes vector of reflection laser, both of the linear polarized light and the circular polarized become elliptically polarized light after reflection and the elliptical angle and the azimuth angle vary with different metal materials. The polarization characteristics of reflection laser, which provide the basis for distinguishing targets with different materials, could improve the anti-interference capacity of laser short-range detection.

Keywords short-range detection; polarization characteristic; Stokes vector; metal target

0 引言

目前利用激光进行近程探测时, 通常是采用激光脉冲照射目标, 根据目标反射回波强度信息获取目标距离。但是, 由于只利用激光的强度信息, 在复杂的战场环境中进行目标探测时, 目标和背景地物混杂在一起, 探测器难以有效区分目标和地物, 背景地物反射的激光也经常会造成虚警, 使得探测器抗干扰性能不高。偏振是激光强度、频率和相干属性之外的重

要信息, 有效拓展了激光探测的信息维度, 已获得各国科研人员的关注, 研究热点分布于军事目标探测^[1-3]、遥感^[4-5]、医学成像^[6]等多个领域。国内关于激光偏振的研究也主要集中于上述领域, 对于利用激光偏振特性的地面目标近程探测, 尤其是理论方面研究较少。本文中主要对金属表面的激光偏振特性进行了分析和仿真, 提出了一种激光近程探测方法并对几种典型的金属目标样板进行了偏振特性分析。

收稿日期: 2013-01-11; 修回日期: 2013-02-15

基金项目: 机电工程与控制国家重点实验室基金项目 (9140C3607070C11BQ01)

作者简介: 杨雨迎, 博士研究生, 研究方向为激光近程探测, 电子信箱: wangling@bit.edu.cn; 崔占忠 (通信作者), 教授, 研究方向为目标探测与环境识别, 电子信箱: cuizz@bit.edu.cn

1 金属目标的偏振特性

1.1 金属表面反射

由于金属电导率不为零,因此金属是有损耗电介质。当激光照射金属表面时,其反射仍遵循折射定律和菲涅尔反射定律^[7],如图 1 所示。

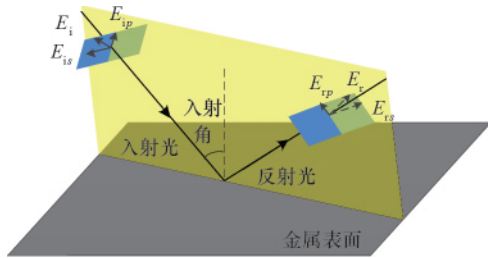


图 1 激光在金属表面反射时的偏振态变化
Fig. 1 Polarization variation of laser reflected from metal surface

定义 n_1, θ_1 为入射介质的折射率 (文中为空气, 取值 1.003) 和入射角; $\hat{n}_2, \hat{\theta}_2$ 为金属材料的复折射率和复折射角。其中,复折射率 \hat{n}_2 的表达式为

$$\hat{n}_2 = n(1 - ik) \quad (1)$$

式中: n 为金属的折射率; nk 为损耗率, n, k 均为入射角的函数^[8], 共表达式为

$$\begin{cases} n^2 = [n_0^2 - n_0^2 k_0^2 + \sin^2 \theta_1 + \sqrt{(n_0^2 - n_0^2 k_0^2 - \sin^2 \theta_1)^2 + 4n_0^4 k_0^2}] / 2 \\ k^2 = [-n_0^2 + n_0^2 k_0^2 + \sin^2 \theta_1 + \sqrt{(n_0^2 - n_0^2 k_0^2 - \sin^2 \theta_1)^2 + 4n_0^4 k_0^2}] / 2 \end{cases} \quad (2)$$

式中 $n_0, n_0 k_0$ 分别为 0° 入射角条件下的主折射率和主损耗率。综合上面所涉及的公式, 金属表面偏振激光反射的 s, p 分量反射比和相位角变化量的表达式为

$$\begin{cases} R_s = \hat{r}_s \cdot \hat{r}_s^* = \frac{(n_1 \cos \theta_1 - l)^2 + m^2}{(n_1 \cos \theta_1 + l)^2 + m^2} \\ R_p = \hat{r}_p \cdot \hat{r}_p^* = \frac{[n^2(1 - k^2) \cos \theta_1 - n_1 l]^2 + (2n^2 k \cos \theta_1 - n_1 m)^2}{[n^2(1 - k^2) \cos \theta_1 + n_1 l]^2 + (2n^2 k \cos \theta_1 + n_1 m)^2} \\ \varphi_s = \arctan \left(\frac{2mn_1 \cos \theta_1}{l^2 + m^2 - n_1^2 \cos^2 \theta_1} \right) \\ \varphi_p = \arctan \left(\frac{2n_1 n^2 \cos \theta_1 [2kl - m(1 - k^2)]}{n^4(1 + k^2)^2 \cos^2 \theta_1 - n_1^2(l^2 + m^2)} \right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: \hat{r}_s^* 中的星号表示该变量的共轭复数; l 和 m 的表达式为

$$\begin{cases} l = \sqrt{\frac{n^2 - n^2 k^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1 + \sqrt{(n^2 - n^2 k^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^2 + 4n^4 k^2}}{2}} \\ m = \sqrt{\frac{-(n^2 - n^2 k^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1) + \sqrt{(n^2 - n^2 k^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1)^2 + 4n^4 k^2}}{2}} \end{cases} \quad (4)$$

1.2 金属表面反射的 Mueller 矩阵

通过对金属表面反射特性的分析可知, 偏振激光照射金属材质表面时, s, p 方向上反射比和相位角均发生不同程度的变化。在金属表面反射产生的偏振态的改变可根据 Stokes

矢量定义推导出反射过程的 Mueller 矩阵。入射光和反射光的振幅反射比可以表述为

$$\begin{cases} \hat{r}_s = \frac{E_{rs}}{E_{is}} = r_s \exp(i\varphi_s) \\ \hat{r}_p = \frac{E_{rp}}{E_{ip}} = r_p \exp(i\varphi_p) \end{cases} \quad (5)$$

式中 r_s 和 r_p 分别为 \hat{r}_s, \hat{r}_p 的绝对值。定义入射光的 Stokes 矢量为 $S_i = [S_0 \ S_{11} \ S_{22} \ S_{33}]$, 反射光的 Stokes 矢量为 $S_r = [S_0 \ S_{r1} \ S_{r2} \ S_{r3}]$ 。根据 Stokes 矢量的定义可以得到关系式

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_{r1} \\ S_{r2} \\ S_{r3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & n & 0 & 0 \\ n & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -p & -q \\ 0 & 0 & q & -p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mS_0 + nS_{11} \\ nS_0 + mS_{11} \\ -pS_{22} - qS_{33} \\ qS_{22} - pS_{33} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,

$$m = (r_s^2 + r_p^2) / 2 \quad (7)$$

$$n = (r_s^2 - r_p^2) / 2 \quad (8)$$

$$p = r_p r_s \cos \varphi \quad (9)$$

$$q = r_p r_s \sin \varphi \quad (10)$$

式中 $\varphi = \varphi_s - \varphi_p$, 式中的 4 阶方阵即为描述偏振激光金属表面反射过程的 Mueller 矩阵。从金属材质表面激光的偏振反射 Mueller 矩阵可以看出, 当水平或垂直线偏振光入射到金属物体表面时, 反射光仍为线偏振光, 能量衰减系数为式(3)中的 R_s 或 R_p ; 其余线偏振光或者圆偏振光经过反射后变为椭圆偏振光。根据 Stokes 矢量一般关系式为^[9,10]

$$\begin{cases} \sin 2\chi = S_3 / S_0 & -\pi/4 \leq \chi \leq \pi/4 \\ \tan 2\phi = S_2 / S_1 & 0 \leq \phi < \pi \end{cases} \quad (11)$$

因此得到反射光椭圆度、椭圆方位角表达式分别为

$$\begin{cases} \sin 2\chi = \frac{qS_{22} - pS_{33}}{mS_0 + nS_{11}} \\ \tan 2\phi = \frac{-pS_{22} - qS_{33}}{nS_0 + mS_{11}} \end{cases} \quad (12)$$

表征金属表面反射过程的 Mueller 矩阵对偏振激光的作用通常表现为双向衰减和相延^[10], 金属表面粗糙特性使得偏振激光发生漫反射而退偏^[11-13]。

2 偏振探测方法

偏振激光照射物体表面时, 由于物体表面的材质、粗糙程度以及偏振激光波长、入射角等因素的不同, 反射回波的偏振状态会发生不同程度的改变, 通过检测反射回波的 Stokes 矢量, 可提取目标相关信息并实现对杂乱地物中的目标进行探测。对于光滑的金属表面, 本文中主要考虑其反射特性。根据金属物体表面对偏振激光不同分量的反射比和相位角改变特性, 本文中提出了一种基于激光偏振特性的近程探测方法, 该探测方法的原理如图 2 所示。线偏振激光器发射的激光经过能量分配棱镜被分为一定比例的两部分, 一部分经反射后作为参考光, 另一部分透过棱镜作为探测光; 透射的线偏振光经过半波片、偏振分光棱镜和 1/4 波片变为圆

偏振光,经准直扩束后照射金属目标表面,入射光在目标表面发生漫反射和镜面反射,光滑的金属表面镜面反射光为主要成分。由于采用收发一体化设计,后向反射光沿入射光路被 APD 探测器 2 接收,信号处理电路通过比较探测器 1、2 输出的参考光和后向反射光电压,计算 s 分量和参考光反射比等参数的差异,从而区分不同表面材料的目标。

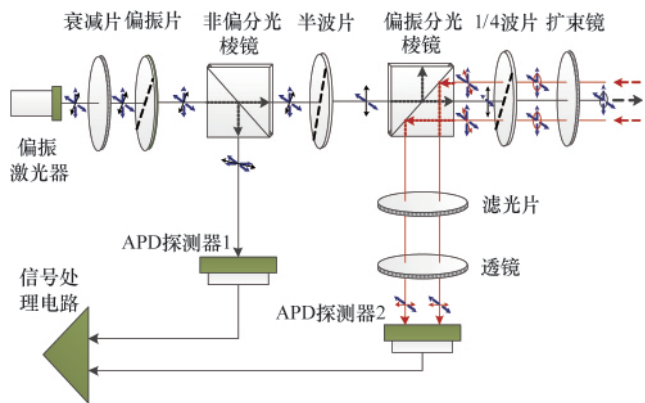


图 2 基于激光偏振特性的近程探测原理

Fig. 2 Principle of short-range detection based on laser polarization properties

3 金属偏振反射特性仿真

根据式(3)可知,改变入射光的入射角度, s 和 p 方向上的反射比和相位角会发生变化。综合式(2)对金属材料光学参数的描述,本文中对几种典型金属表面反射比和相位角变化情况进行了仿真,金属的主折射率和主损耗率如表 1 所示^[7,8]。

表 1 常见金属的主折射率和主损耗率($\lambda=589.3\text{nm}$)

Table 1 Main refractive index and loss rate of several common metals ($\lambda=589.3\text{nm}$)

金属	n	nk	测量者
Cu	0.62	2.57	Oppitz
Al	1.44	5.23	Drude
Fe	3.03	1.78	Shea
Steel	2.41	3.40	Drude

图 3 为铝、铜、铁、钢 4 种金属及水面的表面反射特性曲线。从图 3 中可以看出,金属与非金属材质的反射特性区别较大。垂直入射时($\theta_i=0$)金属的 s 、 p 分量的反射比相等,且均大于 0.5;水体表面的反射比均较小,接近于 0。随着入射角的增大,金属的 s 分量缓慢增大到 1, p 分量通常先减小,达到一定角度(主入射角)后迅速增大到 1;水体的 s 、 p 反射比变化趋势和金属类似,但垂直入射反射比和反射比变化幅度的区别比较明显。

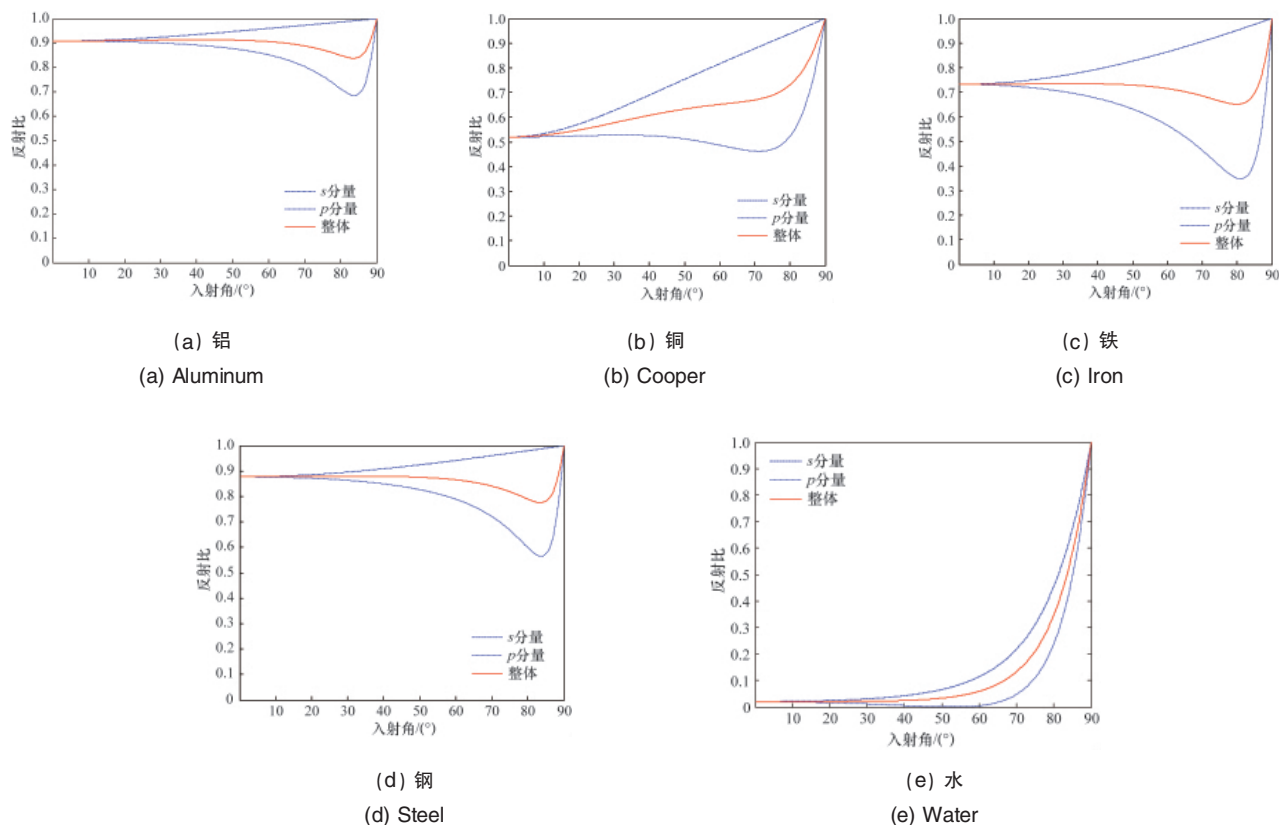


图 3 不同材料表面的 s 、 p 方向的反射比率曲线

Fig. 3 Curves of reflection ratio in the directions of s , p on the surface of different materials

当激光束照向目标表面发生反射时, 能量在 s 和 p 方向上重新进行分配。金属材料不同, 能量分配的规律不同。对每种金属表面反射的 s 和 p 方向的反射比取值或差值, 可以得到金属反射比的变化情况。图 4 为 4 种金属表面的 s 和 p 分量的反射比差值、比值和相位差值。从图中可以看出不同金属表面的 s 和 p 方向反射比差值或比值存在差异, 入射角达到主入射角时, 反射比差值和比值均达到最大值, 此后随着入射角的增大迅速减小到 0° 。主入射角条件下, 反射比差值或比值由大到小依次为铁、铜、钢、铝。除了在低于约 67° 入射角时, 铁的反射比差值和比值小于铜之外, 其余情况下反

射比差值或比值均遵循铁、铜、钢、铝依次减小的顺序。在入射角为 0° 和 90° 时, s 和 p 方向的反射比相等, 所以差值为 0, 比值为 1; 但是相位变化不同, 如图 4(c) 所示, 入射角为 0° 时 p 分量相位变化量为 180° , s 分量并未变化。

根据式 (6) 可知, 当线偏振光或圆偏振光入射到金属表面时, 出射光变为椭圆偏振光。出射椭圆偏振光的椭圆度、椭圆方位角变化可根据式 (12) 计算, 例如当入射光为 45° 线偏振光时, 对应前面的 4 种金属表面反射光椭圆偏振参数的变化曲线如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 由于入射角范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$, 所以椭圆

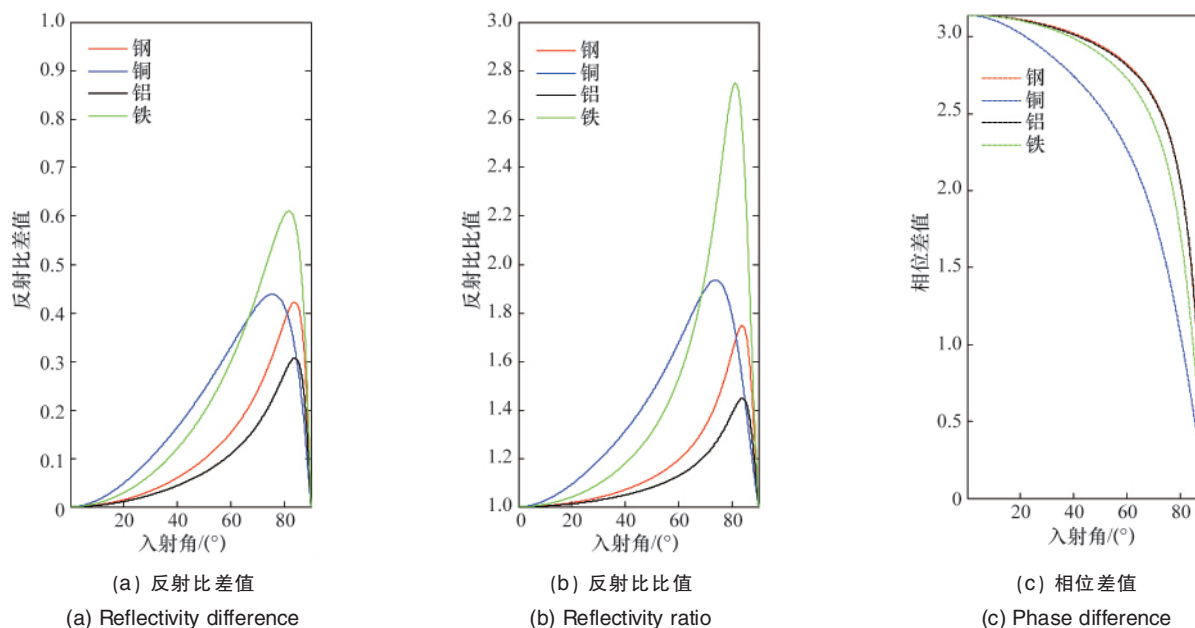


图 4 不同材料表面 s 、 p 方向的反射比和相位差异

Fig. 4 Reflection ratios and phase differences in the directions of s , p from the surface of different materials

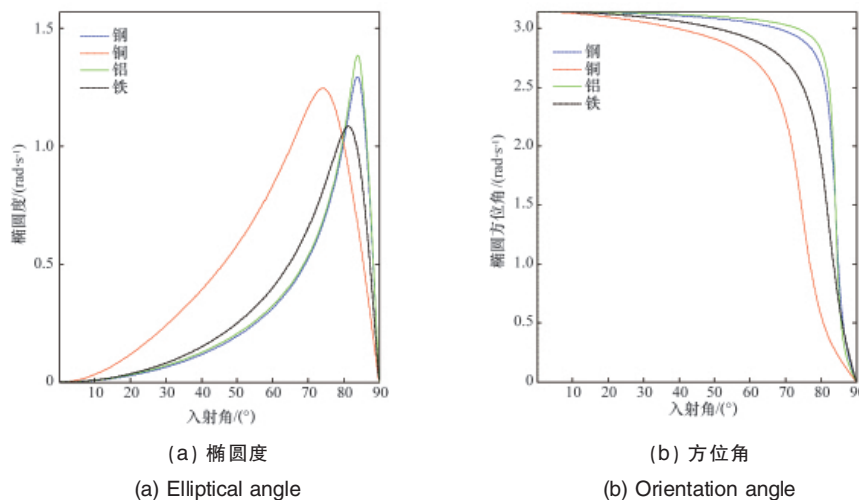


图 5 出射椭圆偏振光的椭圆度角、椭圆方位角变化

Fig. 5 Variations of elliptical angle and orientation angle for exiting laser

度和椭圆方位角只是其取值范围的 1/2。当入射光以 0° 和 90° 入射时,椭圆度均为 0° ,即这两种状态下反射光仍为线偏振光;椭圆方位角分别为 π 和 0 ,即反射光为 135° 和 45° 线偏振光。小角度入射条件下,铜对偏振光椭圆度的改变最大,其他 3 种金属相差不大;铜对方位角的改变最小,其次为铁、钢,改变最大的为铝。

4 结论

主要考虑光滑金属表面反射的主成分镜面反射,根据 4 种金属的反射特性的分析可以得出:偏振激光射向金属目标表面时, s 和 p 方向的反射比、相位角均发生变化,变化的程度因金属材质不同而不同;磁性金属铁、钢的表面反射比的 s 、 p 分量变化程度差别明显,磁性金属含量越高变化程度越明显;金属表面 s 、 p 分量反射比通常远大于非金属物质表面反射比,因此可以将反射的偏振特性作为区分二者的依据,提高探测系统的抗干扰性能。

通过对反射光 Stokes 矢量的分析,线偏振光或圆偏振光经过金属表面反射后变为椭圆偏振光,其椭圆度和方位角随金属材质的不同而呈现不同的变化规律。

参考文献 (References)

- [1] Egan W G, Dogging M J. Optical enhancement of aircraft detection using polarization [J]. SPIE, 2000, 4133: 172-178.
- [2] Egan W G. Detection of vehicles and personnel using polarization [J]. SPIE, 2000, 4133: 233-237.
- [3] Cremer F, Wim de Jong, Klamer Schutte. Infrared polarization measurements and modeling applied to surface-laid antipersonnel landmines [J]. SPIE, 2002, 3286: 1021-1032.
- [4] Itaru Sano. Optical thickness and angstrom exponent of aerosols over the land and ocean from space-borne polarimetric data [J]. Advances in Space Research, 2004, 34: 833-837.
- [5] Roy G, Cao X, Bernier R. On linear and circular depolarization LIDAR signatures in remote sensing of bioaerosols: experimental validation of the Mueller matrix for randomly oriented particles [J]. Optical Engineering, 2011, 50(12): 126001-126010.
- [6] Buscemia I C, Guyot S. A new imaging technique for the study of polarimetric properties using light polarization biomedical applications of light scattering [J]. SPIE, 2012, 8230(1A): 1-7.
- [7] Born M, Wolf E. Principles of optics [M]. 7th ed. Yang Xiasun, tran. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [8] 陈军. 光学的电磁理论[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
Chen Jun. Electromagnetic theory of optical [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [9] Dennis G. Polarized light [M]. New York: Marcel Dekker Inc, 2005.
- [10] Bass M, Mahajan V N. Handbook of optics [M]. New York: McGraw-Hill Co Inc, 2010.
- [11] Chipman R A. Metrics for depolarization [J]. SPIE, 2005, 5888(0L): 1-10.
- [12] Gil J J, Bernabeu E. A depolarization criterion in Mueller matrices [J]. Optic Acta, 1985, 32: 259-261.
- [13] Gil J J, Bernabeu E. Depolarization and polarization indices of an optical system [J]. Optic Acta, 1986, 33: 185-189.

(责任编辑 赵业玲)

· 学术动态 ·



欢迎申办“青年科学家论坛”

“青年科学家论坛”是由中国科协主办、申报单位承办、以委托方式实施完成的学术交流项目。

项目内容:为扶持优秀青年科技工作者学术成长、培养学术带头人和科技领军人才而设立的平台,旨在推动青年科技工作者拓宽学术视野,提高学术水平。重点围绕学科和技术领域的前沿、热点问题,以及与经济社会发展密切相关的重大科技问题进行选题。要求 2/3 的参会代表为 35 岁以下青年科技工作者。

项目数量:2013 年举办 15 次。

经费额度:8 万元/次。

欢迎 45 岁以下已取得突出成就的青年科学家担任论坛执行主席

申报方式:根据《中国科协青年科学家论坛管理实施办法》有关要求申报。申报单位为全国学会,地方科协,具有独立法人资格的科研院所、高等院校等单位。

联系人:中国科协学会学术部 史彬

电话:68524993

网址:<http://www.cast.org.cn/n35081/n35488/14500829.html>。