

文章编号: 0253-2239(2003)09-1110-5

# 随机分布粒子侧向散射光特性的实验研究\*

陈延如 赵琦

(南京理工大学光学工程系, 南京 210094)

**摘要:** 两种不同直径(0.22 μm 和 0.494 μm)的粒子与过滤的蒸馏水制作不同体积分数的悬浮液作为散射介质。比较了微粒子群侧向散射光中垂直与水平两种偏振光的强度分布。实验结果表明,直径大的粒子其侧向散射光中水平方向线偏振强度远远小于直径小的粒子,而垂直方向线偏振强度却完全相反,远远大于直径小的粒子。

**关键词:** 物理光学; 复合散射; 偏振; 激光

中图分类号: O436.2 文献标识码: A

## 1 引 言

随机分布的多个粒子对入射激光复合散射特性研究在现代科学和工程应用中日趋重要<sup>[1~5]</sup>。这里,两种直径的球形粒子(0.494 μm 和 0.22 μm)与蒸馏水按三种不同比例混合,选作为复合散射场。对其侧向散射光中水平线偏振和垂直线偏振两种成分研究发现,其强度和偏振度随着粒子直径的变化,呈现出完全相反的现象。这对探测粒子场粒子直径(特别是对直径小于 1 μm 的粒子)分布有着很强的实用意义。

## 2 理论背景与实验步骤

线性偏振光入射到一很小的微粒(直径  $d < \lambda$ ),其散射如图 1 所示。散射粒子位于坐标  $O$  处, $x$  轴方向为入射光偏振方向。 $z$  轴方向为光入射方向。 $OP$  为散射方向。角  $\phi$  被限制在  $x, y$  平面内,角  $\psi$  和  $\theta$  分别为  $OP$  和  $x$  轴、 $OP$  和  $z$  轴之间的夹角。 $OQ$  为  $OP$  在  $xy$  平面的投影<sup>[6,7]</sup>。

由米氏理论,当非偏振光入射到半径为  $r_0$  的球形粒子上时, $P$  点的散射光强度为

$$I_{\mu} = \frac{\lambda^2}{8\pi^2 R^2} |S|^2, \quad (1)$$

其中  $|S|^2 = |S_1|^2 + |S_2|^2$ 。 $S_1$  和  $S_2$  分别为在  $x, z$  平面和  $x, y$  平面的振幅函数,它们与粒子半径  $r_0$ 、相对折射率  $n_r$ 、 $\theta$  角、入射光波长等有关<sup>[11~13]</sup>。

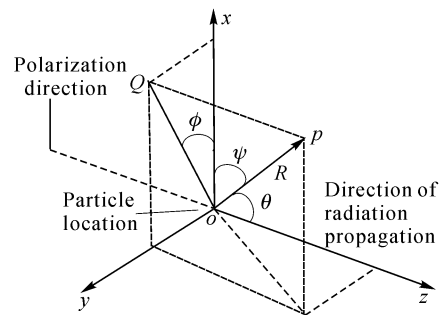


Fig. 1 Geometry of classical scattering

偏振度

$$P = \frac{|S_1|^2 - |S_2|^2}{|S_1|^2 + |S_2|^2}, \quad (2)$$

本文从实际应用出发,所讨论的考察平面为  $xy$  平面,  $\theta = \pi/2$ 。入射光为线偏振光,振动方向为  $x$  方向,则在与入射光方向垂直的平面(即与图 1 中  $x, y$  平行的平面)内散射光强度分布为<sup>[12,13]</sup>

$$I_i = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 R^2} [ |S_1|^2 \sin^2 \phi + |S_2|^2 \cos^2 \phi ]. \quad (3)$$

由于考察平面的限制,  $|S_1|^2$  和  $|S_2|^2$  为常量,有

$$I_i = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 R^2} [ ( |S_1|^2 - |S_2|^2 ) \sin^2 \phi + |S_2|^2 ] = PI_{\mu} \sin^2 \phi + \frac{\lambda^2}{4\pi^2 R^2} |S_2|^2. \quad (4)$$

在所限的平面内观察到散射图样应为双叶型(类似于“8”字)<sup>[8~10]</sup>。

$$\frac{I_i(\phi)}{I_i(\phi=0)} = 1 + \left( \frac{|S_1|^2}{|S_2|^2} - 1 \right) \sin^2 \phi = A(\phi). \quad (5)$$

上述都是对单个粒子而言,更有实际意义的是随机分布的多个粒子散射效果。显然,多个粒子多次散射的效应必将导致散射光强度分布和散射光偏振

\* 国家自然科学基金(50176020)、兵器预研基金(YJ026732)资助课题。

E-mail: yrchen@yahoo.com.cn

收稿日期: 2002-09-25

态的变化,而这一变化是散射场中粒子大小、密度、场的空间范围的函数,与粒子本身特性密切相关。本文为了考察  $A(\phi)$  与  $\phi$  的变化和实际应用中的方便,类似(2)式定义

$$P = \frac{A(\phi) - 1}{A(\phi) - 1 + 2\sin^2\phi}, \quad (6)$$

来估算本文中散射光“退偏振”状态。

很显然,如果散射光偏振状态不变,则  $A(\phi)$  必然随  $\phi$  的变化而变化,以保持  $P$  为常量<sup>[8~12]</sup>。

实验步骤:

1) 实验装置如图 2 所示,放置于光学隔振平台上。对照图 1 选取坐标,激光入射方向为正  $z$  方向,图平面为  $yz$  平面, $x$  方向垂直于图平面向外。转盘转动中心轴与  $z$  轴重合,以保证接收窗在平行于  $xy$  的平面内绕  $z$  轴以任意  $\phi$  角转动。垂直支架可在  $z$  方向上下调整,以便探测不同深度;

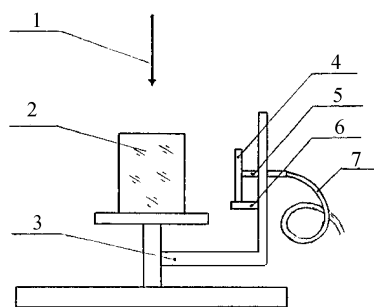


Fig. 2 Experimental apparatus: 1: Laser beam; 2: Container of liquid and particles; 3: Rotating plate; 4: Polaroid sheet; 5: Aperture of  $2^\circ$  acceptance angle; 6: Vertical locator; 7: Fiber bundle

2) 线偏振激光(波长  $\lambda$  为  $0.6328 \mu\text{m}$ )沿正  $z$  方向垂直入射到粒子与水混合液,偏振方向为  $x$  方向,入射光束直径  $1 \text{ mm}$ ;

3) 聚合物微小球形微粒子悬浮液(美国 Duke Scientific Corporation 生产,主要成分为聚甲醛丙稀酸脂、聚苯乙烯等)与 2 次蒸馏的水按不同体积分数(体积比)混合作为散射介质,粒子相对散射率  $n_r$  为  $1.197^{[14]}$ 。本文实验所取两种体积分数(体积比)分别为  $0.25 \times 10^{-4}$  和  $1.25 \times 10^{-4}$ 。两种粒子直径分别为  $0.494 \mu\text{m}$  和  $0.22 \mu\text{m}$ 。

4) 混合液置于圆柱型玻璃器皿之中,器皿内外均严格清洗以去除杂物,放置于经黑色消光处理的转盘上,混合液中心位于转动轴中心,液体上表面与  $x, y$  平面平行;

5) 光纤(数值孔径  $\text{NA} = 0.35$ )一端联接光电倍增管,另一端联接接收窗,接收窗与转轴距离

$200 \text{ mm}$ ,接收窗前可放置检偏器。在与入射光垂直的平面上(见图 1 中  $x, y$  平面)以入射光偏振方向( $x$  方向)为基准定义  $\phi = 0^\circ$ 。取不同  $\phi$  处作为探测点,本文实验中每隔  $5^\circ$  取一探测点,测得粒子场在该  $\phi$  值处侧向散射中三种散射光强:第一种全部散射光强(TP),实验装置中不加检偏器,所测的散射光强度;第二种水平方向偏振光强(HP),检偏器透光轴平行于  $x, y$  面时所测得的散射光强度;第三种垂直方向偏振光强(VP),检偏器的透光轴垂直于  $xy$  平面时所测得的散射光强度。

6) 整个实验均在暗室中进行。

### 3 实验结果与分析

图 3 显示了散射光强典型的对称性,即全部散射光强关于入射光偏振面的对称。图中 8 条曲线分别表示在不同的深度位置(从混合液表面起算深度为  $0$ ,依次垂直下降  $0.5 \text{ cm}$  而得不同深度位置)测得的结果。很显然,深度位置不同,散射光强度不同,从高到低依次下降。但其对称性保持不变。这和理论分析(4)式单个粒子“蝶状散射图样”很近似<sup>[9~11]</sup>。图中所取粒子直径为  $0.22 \mu\text{m}$ ,体积分数为  $0.25 \times 10^{-4}$ 。对于直径为  $0.494 \mu\text{m}$  粒子及不同体积分数,同样可得类似结果。再次说明,一个有限的微粒子场复合散射光强的对称性和单个粒子散射时的理论结果有很好的近似。

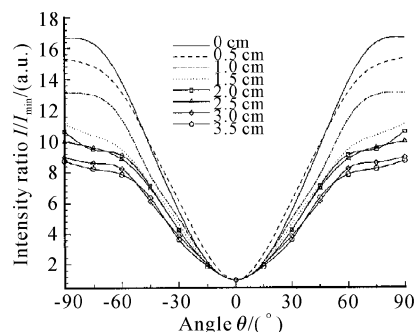


Fig. 3 Intensity ratio for the side scatter versus scatter angle for particles with a diameter of  $0.22 \mu\text{m}$  and a volume fraction of  $0.0025\%$  at different depths

然而,从本研究实际应用出发,值得注意的是其散射光中偏振成分的变化。为了看清这种变化,图 4 提供了在深度为  $0$  且与  $xy$  平面平行的平面内,所测全部散射光强、水平偏振和垂直偏振三种散射光成分强度比较。图中 A、B、C 三条曲线分别代表三种光强。(其曲线值均为相对值,考虑图的尺寸及便于对比,图中曲线 A 缩小了 4 倍,但其变化趋势保

持不变)。很显然,当总的散射光强以及水平方向偏振光强下降时,散射光中垂直偏振光强度却增加,其最大值位置在 $\phi=0^\circ$ 处,与全部散射光强、水平偏振的最小值位置相同。其极大值的对称面恰好与全部散射光强、水平偏振最大值的对称面互相垂直。可以看出,总的侧向散射光强的对称分布中,水平偏振占主要部分,而垂直偏振削弱这种对称。微粒子场复合散射引起散射光退偏振,主要原因是有了垂直偏振成分的存在。换言之,垂直偏振的变化更多地显示着一个粒子场复合散射的特性。

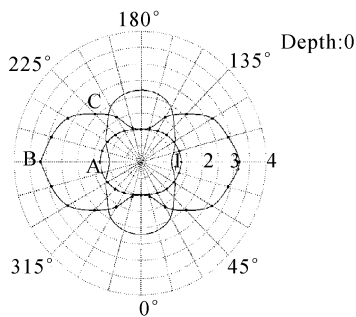


Fig. 4 Intensity ratio of total scattered radiation (A), horizontal polarization (B) and vertical polarization (C) versus scatter angle for particle with diameter of  $0.494 \mu\text{m}$  and volume fraction of  $0.0125\%$

为了进一步观察,图5用直径为 $0.494 \mu\text{m}$ 的粒子所做实验给出垂直偏振相对探测深度的分布特性。图中八条曲线代表在不同 $\phi$ 处所测得垂直偏振相对光强。显然它们均随探测深度的增加而下降,这和全部散射光强及水平偏振有相同规律。不同的是,在任一探测深度, $\phi=0^\circ$ 所代表的曲线最高,随着 $\phi$ 值的增加,依次下降, $\phi=90^\circ$ 为最低。

图6为用直径为 $0.22 \mu\text{m}$ 的粒子所做实验得

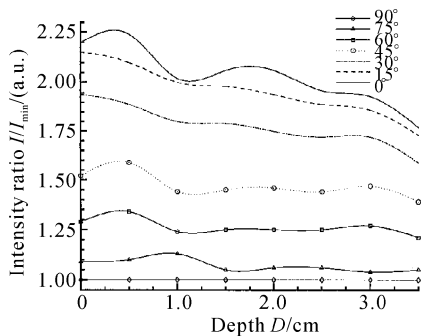


Fig. 5 Vertical polarization in side scattered radiation for  $0.494 \mu\text{m}$  diameter particles and a  $0.0125\%$  volume fraction versus detector depth at different scatter angles

到的曲线,与图5有着完全类似的结果。

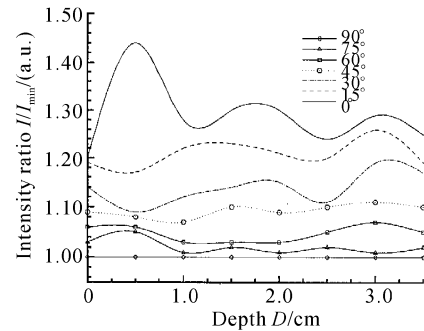


Fig. 6 Vertical polarization in side scattered radiation for  $0.22 \mu\text{m}$  diameter particles and a  $0.0125\%$  volume fraction versus detector depth at different scatter angles

更有意义的是垂直偏振与水平偏振的变化与粒子直径之间的关系。图7与图8分别为在 $\phi=0^\circ$ 处,对同一体积分数中探测到的两种不同直径的粒子散射光中垂直偏振和水平偏振的比较。很清楚,图7中 $0.494 \mu\text{m}$ 的粒子散射光中垂直偏振值远远高于 $0.22 \mu\text{m}$ 的粒子。而图8中,水平偏振值恰恰相反, $0.494 \mu\text{m}$ 的粒子散射光中水平偏振值远远低于 $0.22 \mu\text{m}$ 的粒子。对比两图可知,粒子直径越大,侧向散射光中垂直偏振值越大,而水平偏振值越小。同时还可发现,两图中的低值曲线(图7中的 $0.22 \mu\text{m}$ 的粒子曲线和图8中的 $0.494 \mu\text{m}$ 粒子曲线)相对探测深度的变化较平缓,而另外两条高值曲线变化很明显。这一特性对一个待测的粒子场,探测其粒子直径大小,分布很有实用价值。用不同的体积分数( $0.5 \times 10^{-4}$ )重复实验,均证明了这一特性。见图9和图10。

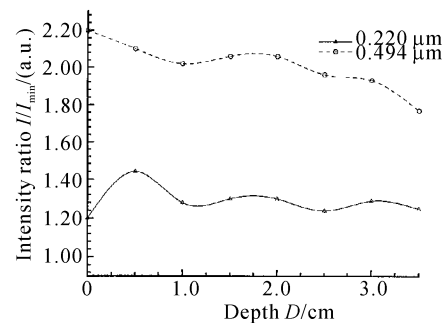


Fig. 7 Vertical polarization ratio for side scattering from particles with diameters of  $0.22 \mu\text{m}$  and  $0.494 \mu\text{m}$  versus detector depth. The volume fraction is  $0.0125\%$

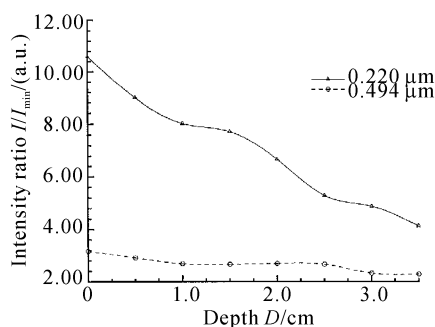


Fig. 8 Horizontal polarization ratio for side scattering from particles with diameters of  $0.22 \mu\text{m}$  and  $0.494 \mu\text{m}$  versus detector depth. The volume fraction is  $0.005\%$

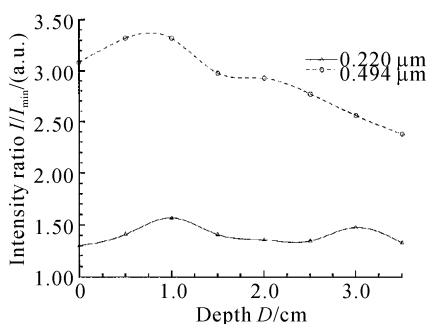


Fig. 9 Vertical polarization ratio for side scattering from particles with diameters of  $0.22 \mu\text{m}$  and  $0.494 \mu\text{m}$  versus detector depth. The volume fraction is  $0.0125\%$

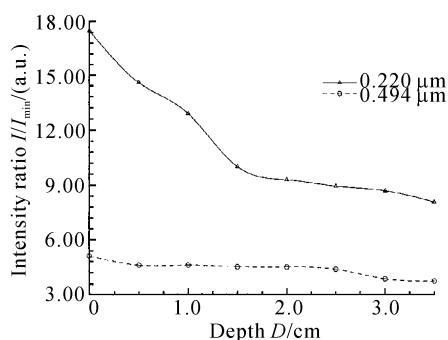


Fig. 10 Horizontal polarization ratio for side scattering from particles with diameters of  $0.22 \mu\text{m}$  and  $0.494 \mu\text{m}$  versus detector depth. The volume fraction is  $0.005\%$

**结论** 1) 粒子场复合侧向散射的总光强在与入射光垂直的平面内关于入射光偏振向量对称分布,类似“8”字形,与单个粒子散射理论分析近似;

2) 侧向散射光中垂直偏振分量和水平偏振分量相对  $\phi$  值的变化有着完全不同的结果,水平偏振最大值和最小值的位置恰好对应垂直分量的最小值

和最大值,其对称面互相垂直;

3) 垂直偏振和水平偏振值与粒子直径呈完全相反的关系,即直径小的粒子( $0.23 \mu\text{m}$ )所对应的水平偏振值大于直径大的粒子( $0.494 \mu\text{m}$ ),而直径小的粒子所对应的垂直偏振值却相反小于直径大的粒子;

4) 上述特性在本实验所取不同体积分数的粒子场侧向散射光中均相同。

### 参 考 文 献

- 1 Nelson H F. Influence particulates on infrared emission from a cylindrical cloud of particles. *J. Spacecrafts and Rockets*, 1984, **21**(5):425~432
- 2 Nelson H F. Influence particulates on infrared signatures of rocket plumes. *J. Spacecrafts and Rockets*, 1984, **21**(5):508~510
- 3 Carswell A I, Pal S R. Polarization anisotropy in lidar multiple scattering from atmospheric clouds. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(21):3464~3471
- 4 Cheung R L T, Ishimaru A. Transmission, backscattering, and depolarization of waves in randomly distributed spherical particles. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(20):3792~3798
- 5 Kostuk R K, Sincerbox G T. Polarization sensitivity of noise recorded in silver halide volume holograms. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(14):2993~2998
- 6 Look D C, Jr, Chen Y R. Experimental demonstration of the effects of scattering on a linearly polarized laser beam by spherical particles. *Proc. SPIE*, 1992, **1779**:130~139
- 7 Look D C, Jr, Chen Y R. Radial scattering of a linearly polarized laser beam by spherical particles: A feasibility study of polarization. *Presented at the AIAA 27<sup>th</sup> Thermophysics Conference*, Nashville, TN, USA, July 1992, AIAA 92~2895
- 8 Look D C, Jr, Chen Y R. Study of polarization of laser radiation scattered 90 DEG. *J. Thermophysics and Heat Transfer*, 1993, **7**(4):631~636
- 9 Look D C, Jr, Chen Y R. Linear polarization components scattered 90. *Presented at the AIAA 28<sup>th</sup> Thermophysics Conference*, July 1993, Orlando, Florida, USA (AIAA 93~2727)
- 10 Look D C, Jr, Chen Y R. Examination of scattering at  $90^\circ$  from a cylindrical volume illuminated by polarized light. *Appl. Opt.*, 1995, **24**(1):144~151
- 11 Born M, Wolf E. *Principles of Optics*. Fourth Edition, New York: Pergamon Press, 1970
- 12 De Hulst V H C. *Light Scattering by Small Particles*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1957. 127
- 13 Kerker M. *The Scattering Light and Other Electromagnetic Radiation*. New York: Academic Press, 1969. 35
- 14 Nelson H F, Satish B V. Radial scattering of laser beam in anisotropic scattering media. *J. Thermophysics and Heat Transfer*, 1988, **2**(2):104~109

## Experimental Study on Property of a Laser Radiation Side-Scattered by the Spherical Particles Distributed Randomly

Chen Yanru Zhao Qi

(Department of Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

(Received 1 March 2002; revised 25 September 2002)

**Abstract:** The scattering medium consists of various volume fraction of particles which are either  $0.22\ \mu\text{m}$  or  $0.494\ \mu\text{m}$  in diameter and which are suspended in filtered distilled water. A comparison is made of the intensity distribution of the horizontally and vertically polarized radiation side-scattered from small particles. The experimental results indicate that the intensity of horizontal polarization for the small particles is much larger than that of the larger particles. This phenomenon is exactly the reverse of the vertical polarization cases.

**Key words:** physical optics; multiple scattering; polarization; laser

\*\*\*\*\*



### ILOPE 2004

## 第 9 届中国国际激光及光电子产品展览会

展会地点：中国国际展览中心·北京

展会时间：2004 年 4 月 27 日~30 日

展品大类：

- |            |                |
|------------|----------------|
| 1 激光器与激光应用 | 5 光通信产业        |
| 2 光电材料和元件  | 6 光学仪器         |
| 3 显示技术及设备  | 7 红外、传感技术等相关应用 |
| 4 生产、制造设备  |                |

联系方式：

中展集团北京华港展览有限公司

方 芳 刘宝存 梁 晨

电 话：010-84600344 84600339 84600335

传 真：010-84600325 84600346

电子邮件：fang@ciec-exhibition.com lc@ciec-exhibition.com

中国光学光电子行业协会

所洪涛

电 话：010-64362211-490

传 真：010-64347322

展会网址：www.ilope-expo.com