

文章编号: 1000-2022(2006)06-0815-04

雾对光偏振态影响的实验研究

刘瑞芳, 王振会, 肖韶荣, 徐娟

(南京信息工程大学 电子信息工程系, 江苏 南京 210044)

摘要: 测量了不同人工雾浓度下垂直偏振入射光的透射光强。利用实验数据, 分析了垂直、平行方向上透射光强的变化趋势, 得出平行偏振分量透射光强大致呈指数下降的趋势, 垂直偏振分量透射光强先略微上升而后下降。由退偏振度随雾浓度的变化讨论了退偏产生的原因, 指出雾浓度较低时, 雾滴可近似视为球形。基于光的偏振特性, 从理论上分析并计算得到光在雾中传输时透射、散射光强。实验结果对研究光在雾中传输及分析大气中雾对透射光偏振态的影响有一定的参考价值。

关键词: 大气光学; 人工雾; Mie 散射; 偏振态

中图分类号: P407 **文献标识码:** A

Experimental Study on the Laser Polarization of Fog

LIU Rui-fang WANG Zhen-hui XIAO Shao-rong XU Juan

(Department of Electronic Engineering NU IST, Nanjing 210044 China)

Abstract Transmission intensity of vertical polarized incident light under different artificial fog concentrations was experimentally measured, and based on the experimental data, changes in relative vertical and parallel transmission intensity were analyzed. Results show that the parallel transmission intensity approximately shows an exponentially decline distribution while the vertical one displays a rising-then-declining trend. Using the degree of depolarization, cause of depolarization was discussed, and the droplet can be viewed as a sphericity in the lighter fog. Based on the characteristic of polarized light transmission intensity and scattering intensity were calculated. The experiment is valuable in study of the light transmission in fog and in analyzing the effect of fog on laser radiation polarization in the atmosphere.

Key words optics of the atmosphere; artificial fog; Mie scattering; polarization

0 引言

激光在大气中传输时, 由于受到气体分子和气溶胶粒子的吸收、散射作用, 能量会不断地衰减, 在浓雾中传播时衰减更大。为了估计激光在有雾大气

中自由通讯的可能用途, 定量数据是必须的。衰减的测量是确定室外激光通讯系统可行性的首要因素。

1960年 Kumick 等^[1]研究了由雾引起的红外辐射的衰减。余香仁^[2]就云雾对激光传播及能见度

收稿日期: 2005-02-28 改回日期: 2005-06-09

基金项目: 江苏省高校自然科学基金计划基金项目 (02KJB510006)

作者简介: 刘瑞芳 (1978-), 女, 山东潍坊人, 硕士, 研究方向: 激光探测与遥感, sslr2000@yahoo.com.cn

的影响作出分析。Chu 等^[3]则对 0.63 3.5 10.6 μm 激光束因雾引起的衰减和散射进行了计算和测量,并详细讨论了 2.6 km 路径上的传播测量,得出光在雾中的衰减很大程度上是由于许多小液滴散射的结论。

衰减的测量与偏振的测量是相辅相成、互为补充的。聂守平等^[4]研究了由 4 种不同直径球形粒子组成的复合粒子场,在粒子浓度一定的情况下,散射光强度变化幅度和偏振度随粒子直径的减小而增大。Martin Schnaiter 等^[5]研究了微米尺寸的球状聚集粒子引起的光的衰减和偏振。叶伏秋^[6]分析了群体粒子散射的偏振特性,通过实验发现,对于垂直偏振光,直径大的粒子所对应的偏振度大于直径小的粒子,水平偏振光则相反。本文在 Mie 散射理论的基础上,通过对激光传输中衰减的研究,分析不同浓度的人工雾对透射光偏振态的影响,这对研究光在雾中的传输具有一定的参考价值。

1 实验装置

实验装置如图 1 所示。激光源采用波长 0.650 μm 的半导体激光光源。P₁、P₂ 为共轴平行放置的两偏振片, P₁ 偏振方向固定, P₂ 偏振方向可调。容器 C 为人工雾室,用有机玻璃制成,底面直径为 30 cm,器壁上开有透光小孔,可使偏振光透过、照射到人工雾上。探测器和激光功率计用于测量光强。容器 C 内的雾由雾发生器产生,经由橡胶管导入。雾发生器为一家庭用来增加湿度的超声波雾化器,由文献[7]知,在产生人工雾的电功率为小功率时,雾化速度与超声波功率有关,使得雾滴数量与超声波功率成正比,即功率大时,产生的雾滴多,雾的浓度大,而雾滴直径的大小则随超声波频率的

增大而减小^[8]。因此人工雾的浓度可由电功率来表征。调节加湿器的驱动功率,更变雾浓度。

实验是在暗室中进行,以便背景光强可忽略不计。坐标系选取如图 1 所示, x 轴方向为入射光的偏振方向, z 为入射光的传播方向。激光器发出沿 oz 方向的激光束,垂直入射于偏振片 P₁,产生电矢量平行于 x 轴方向的偏振光,射进装有人工雾的容器 C。光束在容器中发生衰减后,透过光经偏振片 P₂射到探测器上,调节偏振片 P₂,由激光功率计读出 P₂与 P₁的偏振方向在垂直、平行两状态下的透射光强。

2 理论基础

激光通过大气时,其衰减系数 β 包含吸收和散射两种独立的物理过程,所以 β 可表示为

$$\beta = k_m + \sigma_m + k_a + \sigma_a \tag{1}$$

式中: k_m 和 σ_m 分别为大气分子的吸收和散射系数; k_a 和 σ_a 分别为大气气溶胶的吸收和散射系数。在 0.650 μm 波长处纯水吸收损失很少^[9],因此衰减几乎全部由散射引起。

假定散射粒子呈球形,半径为 b,入射光波长为 λ。当 b 远小于 λ 时,发生 Rayleigh 散射,这是由气体分子引起的散射。当 b 与 λ 相比量级相近时,发生 Mie 散射,气溶胶引起的散射就是 Mie 散射。雾滴大小取决于雾的含水量。含水量大时,雾滴大些^[10],雾滴半径一般在 1~60 μm 的范围内,所以 0.650 μm 条件下属于 Mie 散射。文献[11]指出,分子 Rayleigh 散射就前向散射而言相对于气溶胶 Mie 散射可以忽略。

在所给容器环境下的入射光传输方向上,定义

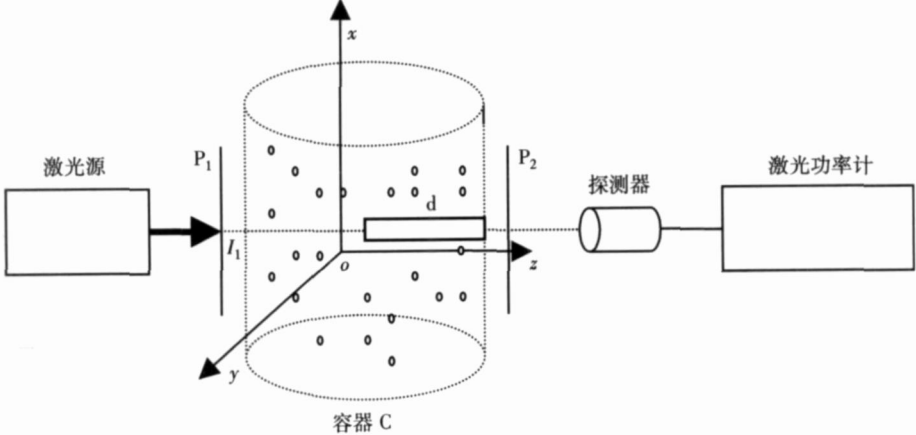


图 1 实验装置示意图

Fig 1 Schematic diagram of the experiment

X 为单位长度 (本文取 15 cm, 即容器半径) 直接透射率, 则传输路径中心点处透射光强 $I_{t2} = XI_1$, 出口处透射光强 $I_{t3} = X^2 I_1$ 。

定义 Y 为单位长度前向散射率, 则中心点前向散射偏振光强为 $I_{s2} = \frac{1}{2} YI_1$, “ $\frac{1}{2}$ ” 表示光经多次散射后消偏为自然光, 仅一半与入射光同偏振态。在出口处, 前向散射偏振光强为 $I_{s3} = \frac{1}{2} YI_2$, 其中 I_2 为中心点处前向传输偏振光强, 可表示为

$$I_2 = I_{t2} + I_{s2} = XI_1 + \frac{1}{2} YI_1 \quad (2)$$

则 $I_{s3} = \frac{1}{2} Y \left[XI_1 + \frac{1}{2} YI_1 \right]$, 故出口处的前向传输偏振光强为

$$I_3 = I_{t3} + I_{s3} = X^2 I_1 + \frac{1}{2} Y \left[XI_1 + \frac{1}{2} YI_1 \right] \quad (3)$$

定义 Z 为单位长度侧向散射率, 则显然有

$$X + Y + Z = 1 \quad (4)$$

在光的传输路径上, 在后半段置一单位长度、足够细 (不影响散射环境)、两端透明、柱面不透明的中空管子 d (图 1), 截面与透光小孔相同, 则此时出口处测得的光强为 I_{t3} 。故用图 1 所示装置测出偏振光强 I_1 、 I_2 、 I_3 , 联立 (2)、(3) 式可解得 X 、 Y 值, 即

$$X = \frac{I_2 + \sqrt{4I_1 I_3 - 3I_2^2}}{2I_1} \quad (5)$$

$$Y = \frac{I_2 - \sqrt{4I_1 I_3 - 3I_2^2}}{I_1} \quad (6)$$

对于入射光为平行于 x 轴的偏振光, 在其散射光中却含有垂直于 x 轴的线偏振光, 这种现象称之为退偏振。一般用退偏振度来定量的描述退偏振现象。退偏振度定义^[11]为: 垂直分量 (电矢量与入射波电矢量垂直) 的散射波强度 $I_{\perp}$ 与平行分量 (电矢量与入射波电矢量平行) 的散射波强度 $I_{\parallel}$ 之比。

$$\delta = \frac{I_{\perp}}{I_{\parallel}} \times 100\% \quad (7)$$

退偏振是由散射引起的, 散射越强烈, 退偏振也越强烈。根据 Mie 散射理论, 对于散射体粒子为各向同性球来说, 出射光的偏振态与入射光偏振方向相同, 即各向同性球形粒子的一次散射是不产生退偏振的^[11], 薄雾时的散射可视为单次散射。而由文献 [12] 知, 即使所有的散射体都是各向同性球, 多次散射也会产生部分退偏。

3 实验结果分析

图 2~5 中用电功率表征雾的浓度, 图中曲线是对多次测量结果平均值的拟合曲线。由图 2 可以看出, 垂直透射光强随着浓度的增加先略微增加而后下降。分析认为, 随着浓度的增加, 更多的薄雾水滴将一部分散射光又散射回透射光的方向上来, 即前面所说的多次散射的结果; 随着浓度的进一步增大, 透射光强开始下降, 但是下降的趋势逐渐缓慢。而由透射理论, 透射光强应该按指数迅速衰减, 分析其原因: 随着雾浓度的增加, 雾滴数越来越多, 散射光强越来越强, 由 Mie 散射理论的散射强度分布形态知, 散射主要集中于前向, 前向散射使得透射光强的下降趋势减缓。

从图 3 可以看出, 平行偏振分量透射光强大致呈指数下降的趋势, 电功率在 27~29 W 时快速下降, 之后下降速度逐渐变缓。由图中显示的光强变化趋势分析, 雾的浓度较小时, 含水量较小, 雾滴半径较小, 其衰减系数非常大, 因而透射光强迅速下降; 随着雾浓度的增大, 含水量增加, 雾滴半径相对增大, 衰减系数越来越小, 光强下降放缓。另外雾浓度增大时, 雾滴数目增加, 多次散射的存在也使得透射光强的下降趋势减缓。平行分量透射光强的变化幅度在 $10^{-2} \sim 10^{-5}$ W 上, 而垂直分量变化一直在 10^{-5} W 上, 相比之下平行偏振方向透射光强大得多, 因而总的透射光强呈下降的趋势。

由图 4 知, 在雾的浓度较小, 电功率小于 30 W 时, 退偏度几乎为零, 由 Mie 散射理论知, 雾粒子近似为球形; 随着雾浓度增加时, 单位体积内的雾滴越来越多, 多次散射越来越强, 同时在重力、表面张力的作用下, 雾滴不再呈规则的球形, 两种作用使得退

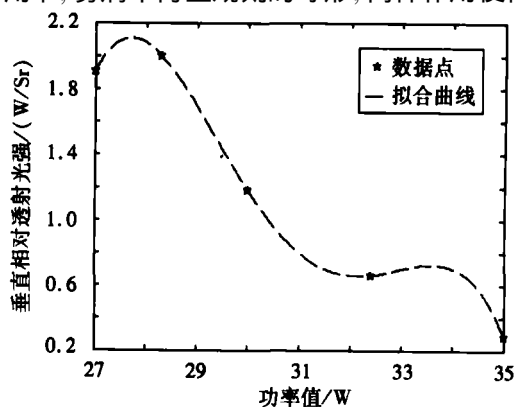


图 2 垂直透射光强与雾的浓度的关系

Fig 2 Relation between density of fog and vertical transmission intensity

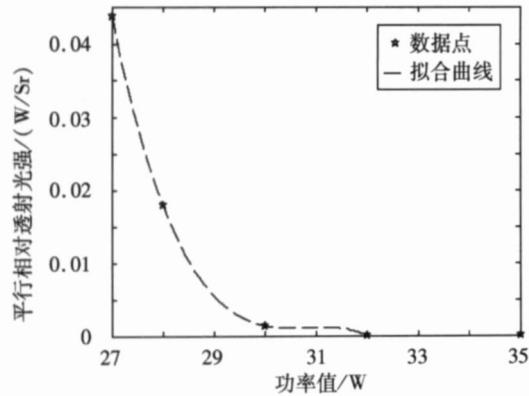


图 3 平行透射光强与雾的浓度的关系
Fig 3 Relation between density of fog and parallel transmission intensity

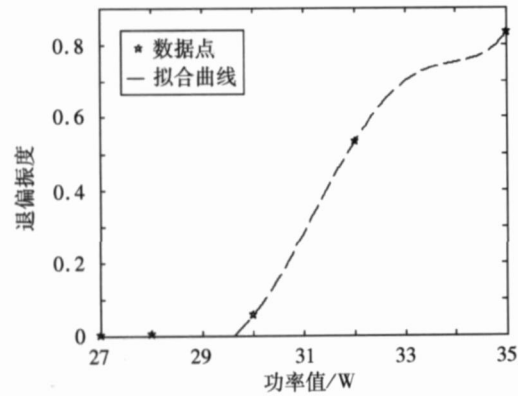


图 4 不同雾的浓度对退偏振度的影响
Fig 4 Effect of the density of fog on depolarization

偏振度随浓度迅速增加,退偏现象越来越明显。
为了对激光在雾中的传输过程有更深入的理解,依次测得偏振光强 I_1 、 I_2 和 I_3 , 将之代入 (5)、(6) 式求得不同浓度下的 X 、 Y 、 Z 值。由图 5 知,随着雾浓度的增加,透射光强迅速减小,前向散射光强则是随着浓度的增加先增大而后减小,功率大于 32 W 后绝大部分入射光被漫射出透射方向。

4 结语

本文实验和理论分析表明: 平行偏振分量透射光强随雾浓度增加而大致呈指数下降的趋势, 垂直偏振分量透射光强先略微上升后再下降。这是因为, 在雾浓度较小时, 更多的薄雾水滴将一部分散射光又散射回透射光的方向上来, 使透射光增强。退偏曲线表明, 雾的浓度较低时, 雾滴近似为球形。本

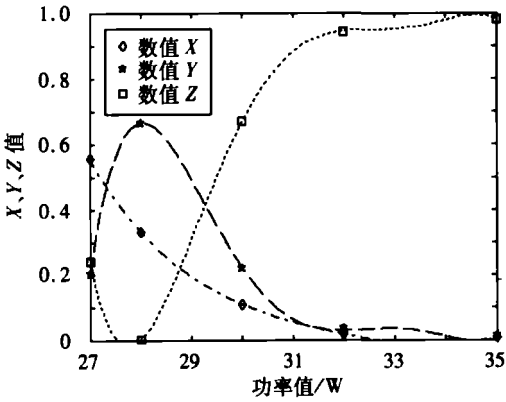


图 5 X 、 Y 、 Z 值随雾浓度的变化曲线
Fig 5 Regression curves of X , Y , Z with different fog concentrations

文透射、散射率的计算对研究光在雾中的辐射传输有一定的参考价值。

参考文献:

[1] Kumick S W, Titter R N, William s D B. Attenuations of infrared radiation by fogs[J]. Opt Soc Amer, 1960, 50(6): 578-583
[2] 余香仁. 云雾对激光传播及能见度的影响[J]. 气象, 1982, 8(5): 24-26
[3] Chu T S, Hogg D C. Effects of precipitation on propagation at 0.63, 3.5 and 10.6 microns[J]. Bell Sys Tech J, 1968, 47(8): 723-759
[4] 聂守平, 陈延如, 赵琦. 复合粒子场散射光强度与偏振态研究[J]. 激光与红外, 2001, 31(1): 45-47
[5] Martin Schnaier, Gerhard Wum. Experiments on light scattering and extinction by small micrometer-sized aggregates of spheres[J]. Appl Opt, 2002, 41(6): 1175-1180
[6] 叶伏秋. 群体粒子散射光偏振特性的研究[J]. 应用光学, 2004, 25(2): 22-24
[7] 陶有迁. 超声雾化在盐雾实验中的应用[J]. 电子产品可靠性与环境实验, 2000, 6(3): 27-29.
[8] 袁林. 医用超声雾化器的工作原理及其改进[J]. 医疗设备信息, 2002, 16(2): 42-43.
[9] 宋正方. 应用大气光学基础[M]. 北京: 气象出版社, 1990: 33
[10] 孙奕敏. 灾害性浓雾[M]. 北京: 气象出版社, 1994.
[11] 周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. 高等大气物理学[M]. 北京: 气象出版社, 1991: 778-807.
[12] 欣克利 E D. 大气激光探测[M]. 宋正方, 孙凤仪, 韩景诚, 译. 北京: 科学出版社, 1984: 106.