

doi: 10. 3788/gzxb20134204. 0397

晶体材料电光系数和压电系数的同时测量

肖平平, 邓满兰

(宜春学院 物理科学与工程技术学院, 江西 宜春 336000)

摘要:利用双面金属包覆波导结构激发的高阶导模是导波层折射率的灵敏函数这一特性提出了一种测量非线性材料电光系数和压电系数的新方法. 该方法利用反射率曲线在不同电压下的移动参量可以直接计算出被测样品的电光系数和压电系数. 理论与实验研究表明, 该方法具有结构紧凑、插入损耗小、整个装置无运动部件、可靠性能高等诸多优点. 预计这一研究在应用压电效应和电光效应制备光电子器件的诸多领域中有极其广泛的应用前景.

关键词:衰减全反射; 铋银酸铅-钛酸铅; 压电系数; 电光系数

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)04-0397-5

Simultaneous Measurement of Piezoelectric and Electro-optical Coefficients of Crystal Material Utilizing Ultrahigh Modes

XIAO Ping-ping, DENG Man-lan

(College of Physics Science and Engineering Technology, Yichun University, Yichun, Jiangxi 336000, China)

Abstract: A novel method for simultaneous measuring piezoelectric coefficient and electro-optical coefficients of crystal material is proposed by utilizing the ultrahigh modes excitation from a symmetrical metal-cladding optical waveguide. The method can be directly used to calculate the electro-optic coefficient and piezoelectric coefficient by shift of the reflectance curves at different voltages. The theoretics and experiment results all indicate that this method has an excellent performance, such as high compact, low insert loss, no moving parts, high reliability and so on, which promises an application prospect in optical devices in electro-optic coefficient and piezoelectric coefficient.

Key words: Attenuated total reflection (ATR); PMN-PT; Piezoelectric coefficient; Electro-optical coefficient

0 引言

随着新光学材料研究技术的迅猛发展, 许多大电光系数 (Electro-Optical Coefficient, EOC) 和大压电系数 (Converse-Piezoelectric Coefficient, CPE) 的新型光学材料不断涌现. 目前以铋镁酸铅晶体材料 $((1-x) [\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3]_x [\text{PbTiO}_3])$, PMN-PT^[1-2] 优为突出, 其主要特点之一是这种材料的通光波长宽, 对 500~700 nm 范围里的可见光波段几乎全部透明; 另一个是具有极高压电系数、大机电耦合系数、高介电系数、低损耗

的特性, 其压电性能比普通的压电材料要高出 10 倍之多. 基于上述特点这种材料常常又称为透明陶瓷玻璃. 通过修饰 x 的值来调控透明陶瓷玻璃的各项参量, 突显出传统铋酸锂晶体和 PZT 压电陶瓷无可比拟的优良性能, 制备工艺相对简单^[3-4]. 因此它从一出现就引起光学科技工作者的极大的关注, 广泛应用在声纳、叠层式驱动、超声成像、光限幅、偏振控制器以及光开关^[5-6] 等光学领域. PMN-PT 透明陶瓷在光通信器件制备原材料中具有极其广泛的应用前景.

尽管 PMN-PT 透明陶瓷已被广泛应用在光通

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61168002)、国家重点实验室开放基金 (No. 2011GZFO31105) 和宜春市科技局科技项目 (No. JXYC2013KGA01) 资助

第一作者: 肖平平 (1972-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光纤通信、导波光学、集成光学及其应用领域. Email: xpp7967@163.com

收稿日期: 2012-08-20; 录用日期: 2012-10-15

信系统中,但其电光系数和压电系数的关系还没有完全搞清楚,因为压电效应和电光效应总是关联的,只要一通电压两种效应就同时存在,这给科技工作者的分析研究以及设计带来了诸多不便.目前常常是依赖一些模拟分析软件来分析研究两者间的关系.当然,单独研究电光系数的方法很多,如衰减全反射(Attenuated Total Reflection, ATR)方法^[7],光束椭圆偏技术^[8-9]测量两个正交平面偏振光和双光束干涉的相位延迟^[10],Mach-Zehnder型和迈克尔逊干涉引起的相位延迟测量两平行平面偏振光的干涉.单独研究压电系数的方法也很多,如压电系数测量常常由IEEE标准技术^[11]提供的共振频率法.然而这些不同的测量技术都只能单独研究电光效应和压电效的一个方面.为了能准确分析该类材料的压电效应和电光效应就迫切需要有一种简单的方法来同时测量PMN-PT透明陶瓷的压电系数和电光系数的新方法.在多年金属包覆波导研究的基础上本文应用双面金属包覆波导结构^[12-13]激发出的超高阶导模为探针,提出一种能够同时测量电光系数和压电系数的新型测量方法.

1 原理

本文设计的同时测量晶体材料压电系数和电光系数的样品结构如图1.一块PMN-PT透明陶瓷玻璃两面镀上银膜.上层银膜比较薄,它既是入射光耦合进波导的耦合层,又是测量透明陶瓷玻璃电光系数和压电系数时输入电压的上电极;下层银膜既是输入电压的下电极又是波导的衬底层,它的厚度足以阻止导波光能量从波导层泄漏出去.两层电极以及中间的透明陶瓷玻璃构成双面金属包覆波导.一束准直的偏振光入射到波导的上层银膜表面,进行角度扫描,根据衰减全反射原理可知,在满足导模激发的匹配条件 $\beta = k_0 \cdot n_{\text{Air}} \cdot \sin \theta$ 时,入射光能量将会耦合到波导中发生导模共振,引起反射光能量急剧减小,形成一系列的导模吸收峰,施加电压时,由于透明陶瓷玻璃的电光效应和压电效应导致折射率和厚度变化,将破坏原来的匹配条件

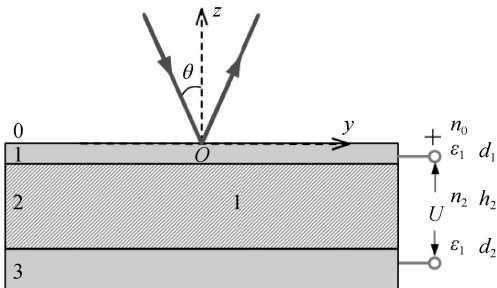


图1 样品结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of the sample

引起吸收峰在角度方向上移动,其衰减全反射谱理论模拟结果如图2.

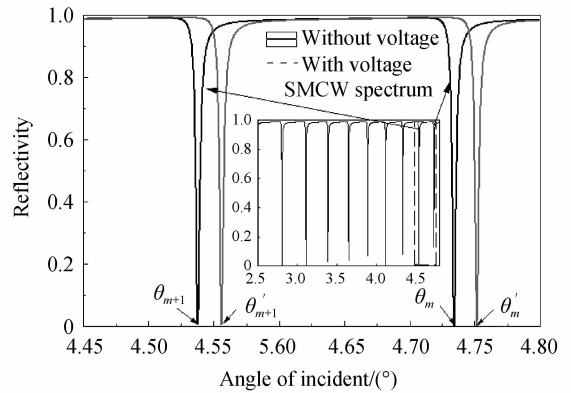


图2 衰减全反射谱
Fig.2 Attenuated total reflection spectrum

本文模拟使用的参量: $n_{\text{air}} = 1.0, n_2 = 2.620, \epsilon_1 = -18.6 + 0.5i, d_1 = 39.0 \text{ nm}, h_2 = 3.00 \text{ mm}, d_3 = 300 \text{ nm}$,入射激光波长 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$,其中介电系数和上层银膜的厚度是通过双波长法^[14]测量得到的.

由平板波导理论知道双面金属包覆波导结构的模式本征方程为^[13]

$$\kappa_2 h = m\pi + 2 \tan^{-1} \left[\left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_3} \right)^\rho \cdot \left(\frac{\alpha_3}{\kappa_1} \right) \right] \quad (1)$$

式中, h 为导波层的厚度, α_3 为衰减系数, m 为模式数它取为从零开始的有限个正整数, κ_2 为中间导波层沿 y 方向的波矢, ρ 是一个与偏振有关的量

$$\left. \begin{aligned} \kappa_2 &= \sqrt{k_0^2 n_2^2 - \beta^2} \\ \alpha_3 &= \sqrt{\beta^2 - k_0^2 \epsilon_3} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{TE mode: } \rho &= 0 \\ \text{TM mode: } \rho &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

因为测量使用的样品厚度常常在毫米量级,且采用小角度入射激发的导模模式数都很大,本文称这种模式数大于800的为超高阶导模.在这种条件下,式(1)中右边第二项相对右边第一项来说是个小量,实际计算时完全可以忽略,而不会影响实验结果的准确度.这样式(1)可以改写成偏振不灵敏的双面金属包覆波导的模式本征方程

$$\kappa_2 h = m\pi \quad (4)$$

式中

$$\kappa_2 = \sqrt{k_0^2 n_2^2 - (\beta)^2} \quad (5)$$

对模式本征方程式(4)两边求全微分又可以得到

$$\Delta \kappa_2 \cdot h + \kappa_2 \cdot \Delta h = 0 \quad (6)$$

由式(5)又可以得到

$$\Delta \kappa_2 = \frac{k_0^2 \cdot n_2 \cdot \Delta n_2}{\sqrt{k_0^2 n_2^2 - (\beta)^2}} - \frac{\beta \cdot \Delta \beta}{\sqrt{k_0^2 n_2^2 - (\beta)^2}} = \frac{k_0^2 \cdot n_2 \cdot \Delta n_2}{\kappa_2} - \frac{\beta \cdot \Delta \beta}{\kappa_2} \quad (7)$$

把式(7)代入式(6)得

$$\frac{k_0^2}{\kappa_2} \cdot h \cdot n_2 \cdot \Delta n_2 - \frac{\beta}{\kappa_2} \cdot h \cdot \Delta\beta + \kappa_2 \cdot \Delta h = 0 \quad (8)$$

整理得

$$\Delta\beta = \frac{k_0^2}{\beta} n_2 \cdot \Delta n_2 + \frac{(\kappa_2)^2}{\beta h} \cdot \Delta h \quad (9)$$

由于 PMN-PT 透明陶瓷的非线性效应电光效应和压光效应, 其折射率 n_2 和厚度 h 变化与所加直流电压 U 的关系可以分别表示为^[15-16]

$$\Delta n_2 = -\frac{1}{2} n_2^3 \gamma_{12} \left(\frac{U}{h}\right)^2 \quad (10)$$

$$\Delta h = d_{33} U \quad (11)$$

式中, γ_{12} 、 d_{33} 分别为相应的电光系数和压电系数, U 表示施加在两电极间的电压.

把式(10)和(11)代入到式(9)中可以得到

$$\Delta\beta = \frac{k_0^2}{\beta} n_2 \cdot \left(-\frac{1}{2} n_2^3 \gamma_{12}\right) \cdot \left(\frac{U}{h}\right)^2 + \frac{\kappa_2^2}{\beta h} \cdot d_{33} U \quad (12)$$

由 $\Delta N = \Delta\beta/k_0$, 可以将式(12)整理得

$$\Delta N = AU^2 + BU \quad (13)$$

这里

$$\left. \begin{aligned} A &= -\frac{1}{2} \frac{n_2^4}{N h^2} \gamma_{12} \\ B &= \frac{n_2^2 - N^2}{N h} d_{33} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式(12)中 n_2 和 h 都是已知数, U 是施加的测试直流电压, 由有效折射率 $N = n_{\text{Air}} \sin \theta$ 知

$$\Delta N = n_{\text{Air}} (\sin \theta - \sin \theta') \quad (15)$$

式中 θ 和 θ' 为改变电压前后相邻两吸收峰的共振角, 它可由实验测到. 因此理论上只要测量出两种不同电压下的共振吸收峰, 就可通过解方程组求解出被测材料的电光系数和压电系数. 为了减小实验误差实验上本文是通过实验测量出一组数据拟合出 A 和 B 就可以方便地计算出电光系数和压电系数.

2 样品制备

波导结构的银膜是用真空溅射法获得. 为了保证银膜质量, 需要将 PMN-PT 透明陶瓷玻璃清洗干净. 先用丙酮浸泡并用超声清洗 20 min, 再取出用去离子水冲洗, 然后用滴耳球吹去表面的水珠, 最后放入恒温箱中干燥. 真空镀膜时, 将透明陶瓷玻璃放入溅射镀膜机的真空室内, 抽高真空到 $5 \times 10^{-6} \tau$, 持续通入氩气 45 min, 进一步排出真空室内的杂质气体. 调节真空室内气压到 $5 \times 10^{-4} \tau$ 作为工作气压, 调节溅射功率至 100 W, 预溅靶材 1 min 以去除靶材表面的氧化层和其它杂质. 镀膜时通过控制功率和时间来控制银膜的厚度, 在透明陶瓷玻璃两面分别镀上一层 20 nm 和 300 nm 左右

的金膜. 银膜厚度对双面金属包覆波导的反射性能影响较大, 为获得较为精确的参量, 本文采用的方法是同时镀一块顶角较小的棱镜作为陪片, 用双波长法测陪片上银膜的厚度和介电系数, 即等同于测得双面金属包覆波导中银膜的相应参量.

3 实验与测试

实验装置图如图 3 所示, 激光器出射的波长为 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 的光束经过两个相距约 1 m 左右的小孔以及偏振器变成 TE 偏振后入射到被测样品的表面. 反射光强度由光电探测器进行测量. 为了扫描衰减全发射峰建立适当的工作点, 实验中需要首先零点校准. 具体的操作是把样品放置在 $\theta/2\theta$ 仪的内盘并使之光学面处于竖直状态, 手动 $\theta/2\theta$ 仪的内盘让入射到样品上的反射光按原路返回. 当反射光能恰好通过入射光路中最后一个准直小孔, 也就是反射光路的第一个准直小孔时表明入射光线是垂直入射到样品表面, 也就是入射角为零度, 启动计算机软件零点校准按钮进行零点定标. 接着转动转台扫描 ATR 衰减全反射吸收峰. 选择其中一个超高阶导模, 实验取 $\theta = 4.537^\circ$ 的那个峰, 并在计算机软件中设定扫描范围, 清零后重新在刚刚设置的角度范围内扫描出选准的那个峰. 实验中用直流高压源给样品两极施加不同电压后重新扫描, 总共测试了 8 组数据, 实验扫描曲线如图 4. 实验中为了克服 $\theta/2\theta$ 倍角转台的回程误差, 还必须保证每次测试曲线都是首先让转台回程到设定角的初始位置并朝同方向上扫描.

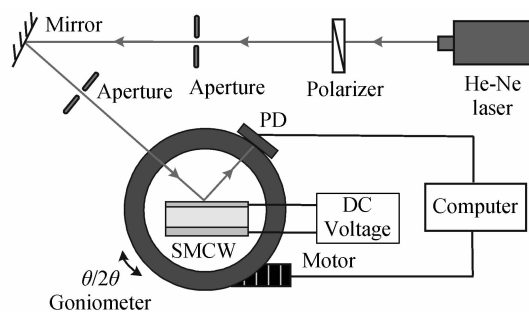


图 3 实验设置

Fig. 3 Experimental setup

根据图 4 提供的数据以及样品材料的基本参量 $n_2 = 2.620$, $h_2 = 3.00 \text{ mm}$, $\theta = 4.537^\circ$ 以及式(15)可计算有效折射率变化与所提供的直流电压间的关系曲线如图 5. 从图 5 可以看出 ΔN 与外加电压之间呈一典型的二次函数关系, 与方程(1)是相吻合的; 并且可以拟合出 $A = 7.5927 \times 10^{-9}$, $B = -2.839 \times 10^{-6}$. 把 A 和 B 的值代入到方程(14)就可计算得到被测样品的电光系数和压电系数分别为

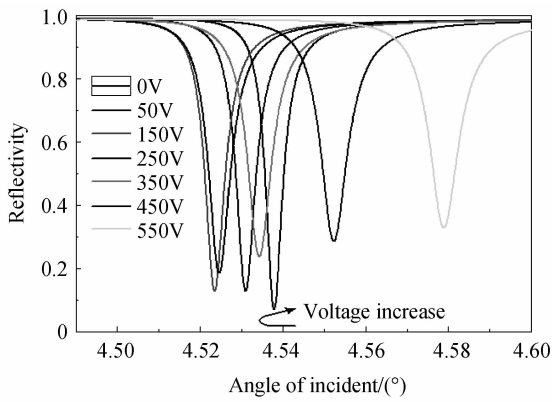


图4 不同电压的反射率曲线测量结果

Fig. 4 Experimental measurements of ATR curve at different applied voltages

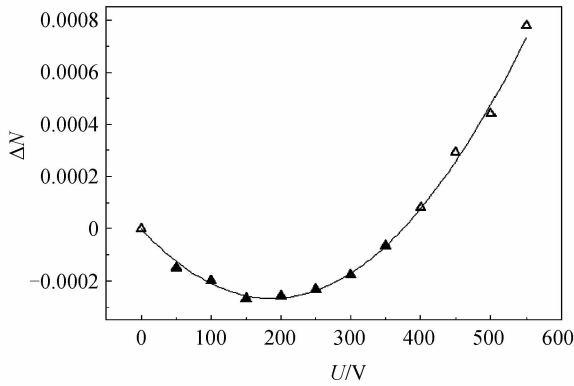


图5 不同电压下有效折射率的变化曲线

Fig. 5 The variation of effective RI related to various applied voltages

$$\gamma_{12} = -2.24 \times 10^{-16} \text{ m}^2/\text{V}^2, d_{33} = -9.6 \times 10^{-11} \text{ m/V.}$$

4 分析讨论

从图4中可以清楚的看出, 当在PMN-PT透明陶瓷玻璃样品两电极间施加的直流电压小于350V时, ATR曲线是向小角度方向即图中向左方向移动, 电压越大, 移动两越小. 当施加的直流电压大于450V时, ATR曲线是向大角度方向移动. 究其原因, 本文认为小角度入射激发的超高阶导模对样品折射率和厚度变化都非常敏感, 由式(10)和(11)看出当施加外电压有

$$\Delta n_2 > 0, \Delta h < 0 \quad (16)$$

当电压较小时压电效应的贡献大于电光效应的贡献所致, 当电压较大时电光效应的贡献大于压电效应的贡献, 结果就会与前相反. 主要是压电系数与电压是一次关系, 而电光系数是平方关系, 故电光效应按平方关系增加, 压电只能按线性增加, 所以电压越大电光效应越占优势. 电压越小压电效应占上峰. 图4中的实验测量曲线还透射出另一信息, 就是当外加直流电压增加时, 衰减吸收峰的半宽度会不断的增大, 这估计时压电陶瓷对入射波

长的光存在一定的吸收^[17-18]所造成的.

5 结论

本文利用双面金属包覆波导结构的模式本征方程推导出了晶体材料电光系数和压电系数内在关系式, 并利用双面金属包覆波导在小角度入射的条件下激发的超高阶导模对导波层介质折射率和厚度变化极其敏感的特性, 对透明陶瓷玻璃的电光系数和压电系数进行了同时测量. 理论与实验研究表明: 这种方法简单, 测量结果可靠, 克服了现有只能单独测量其中一个参量的不足, 为应用压电效应和电光效应制备光电子器件的光学领域提供了一种很好分析技术路线.

参考文献

- [1] KUITIAR P, PRAKASHB C, THAKUR O P, *et al.* Dielectric ferroelectric and pyroelectric properties of PMNT ceramics[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2006, **371**(2): 313-316.
- [2] LAPPALAINEN J, HILTUNEN J, LANTTO V. Characterization of optical properties of nanocrystalline doped PZT thin films[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2005, **25**(12): 2273-2276.
- [3] ZHANG R, JIANG B, CAO W W. Elastic, piezoelectric, and dielectric properties of multidomain 0.67Pb(Mg1/3Nb2/3)O3-0.33PbTiO3(3) single crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, **90**(7): 3471-3475.
- [4] NOHEDA B, COX D E, SHIRANE G, *et al.* Phase diagram of the ferroelectric (1-x)PbMg1/3Nb2/3O3-xPbTiO3[J]. *Physical Review B*, 2002, **66**(5): 054104.
- [5] LU Y L, GAO C. Optical limiting in lead magnesium niobate-lead titanate multilayers[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **92**(12): 121109.
- [6] LIM B C, PHUA P B, LAI W J, *et al.* Fast switchable electro-optic radial polarization retarder[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(9): 950-952.
- [7] RAN Mao-wu, CHEN Xian-feng, CAO Zhuang-qi. Measurement of quadratic electro-optic coefficient of PMN-PT transparent ceramics based on ultrahigh-order guide modes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 111-114. 冉茂武, 陈险峰, 曹庄琪. 利用超高阶导模测量PMN-PT透明陶瓷二次电光系数[J]. *光学学报*, 2011, **31**(10): 111-114.
- [8] LIN Y T, REN B, ZHAO X Y, *et al.* Large quadratic electro-optic properties of ferroelectric base 0.92Pb(Mg1/3Nb2/3)O3-0.08PbTiO3 single crystal[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, **507**(2): 425-428.
- [9] HE C J, GE W W, ZHAO X Y, *et al.* Wavelength dependence of electro-optic effect in tetragonal lead magnesium niobate lead titanate single crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, **100**(11): 113119.
- [10] HE C J, ZHOU Z X, LIU D J, *et al.* Photorefractive effect in relaxor ferroelectric 0.62Pb(Mg1/3Nb2/3)O3-0.38PbTiO3 single crystal[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(26): 261111.
- [11] PARK S E, SHROUT T R. Ultrahigh strain and piezoelectric behavior in relaxor based ferroelectric single crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, **84**(4): 1804-1811.
- [12] XIAO P P. Beam reshaping in the occurrence of the Goos-

Hänchen shift[J]. *JOSA B*, 2011, **28**(8):1895- 1898.

[13] XIAO Ping-ping, HU Hong-wu. Wavelength sensing based on the Goos-Hänchen effect[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(10): 1595-1598.
肖平平, 胡红武. 基于古斯-汉欣位移效应的波长传感的研究[J]. *光子学报*, 2011, **40**(10):1595-1598.

[14] CHEN W P, CHEN J M. Use of surface plasma waves for determination of the thickness and optical constants of thin metallic films[J]. *JOSA*, 1981, **71**(2): 189-191.

[15] LI K K, LU Y, WANG Q. Electro-optic ceramic material and device[P]. U. S. 6 890 874B1, 2005.

[16] RAN Mao-wu, CHEN Xian-feng, CAO Zhuang-qi. Measurement of quadratic electro optic coefficient of PMN-PT transparent ceramics based on ultrahigh-order guide mode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **30**(10): 1012002.
冉茂武, 陈险峰, 曹庄琪. 利用超高阶导模测量 PMN-PT 透明陶瓷二次电光系数[J]. *光学学报*, 2011, **30**(10):1012002.

[17] PONSARD M C, DESVIGNES J M, BELLEMAIN A, et al. Simultaneous characterization of the electro-optic, converse-piezoelectric, and electroabsorptive effects in epitaxial (Sr, Ba) Nb₂O₆ thin films [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, **109**(4): 014107.

[18] KURIHARA K, SUZUKI K. Theoretical understanding of an absorption-based surface plasmon resonance sensor based on Kretschmann's theory[J]. *Analytical Chemistry*, 2002, **74**(3): 696-701.



• 下期预告 •

贝塞尔高斯涡旋光束在大气湍流中的传输特性

王海燕, 陈川琳, 杜家磊, 毕小稳

(南京理工大学 理学院, 南京 210094)

摘要: 基于广义惠更斯-菲涅耳原理, 本文推导出了贝塞尔高斯涡旋光束在湍流大气中传输时系统平均光强的解析表达式, 研究了贝塞尔高斯空心涡旋光束在湍流大气中的光强传输特性, 同时分析了大气湍流的强弱、涡旋光束的拓扑荷等对光束质量的影响. 结果表明: 贝塞尔高斯涡旋光束在大气湍流中传输时, 光强分布经历几个连续的变化, 相位奇异性也会在传输过程中消失, 该过程与涡旋光束拓扑荷的数目、光束的束腰宽度以及大气湍流的强弱等因素密切相关. 拓扑荷数目高的涡旋光束在湍流大气中传输时, 其奇异性的保持较拓扑荷数目低的涡旋光束要好. 另外, 基于桶中功率理论, 分析研究了涡旋光束的拓扑荷数目、大气湍流强弱和束腰宽度对贝塞尔高斯涡旋光束在大气湍流中传输时的光束质量的影响.

关键词: 光学涡旋; 大气湍流; 光束传输; 桶中功率