

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.06.06

基于 Stokes 矢量分析的偏光片光学参数测量

步海军^{1,2}, 黎俊^{1,2}, 夏燕¹, 汤坤^{1,2}, 王攀^{1,2}, 曾婷婷^{1,2}, 江铖¹, 闵林^{1,2}

(1. 苏州市计量测试院, 江苏 苏州 215128; 2. 国家平板显示产业计量测试中心(苏州), 江苏 苏州 215163)

摘要: 目前偏光片透过率的测量方法依赖偏光片的相对转动, 受光源偏振度以及探测器偏振响应的影响大, 测量精度低。为解决上述问题, 本文提出了基于 Stokes 矢量分析的方法, 通过分析入射到偏光片以及从偏光片出射的偏振光的 Stokes 矢量的改变, 结合最优优化算法来解析样品的偏振特性, 从而快速、精确地测量偏光片的透过率。该方法测量速度快、可扩展性强, 对平板显示产业中光学薄膜的偏振特性的测量具有普适性。

关键词: 偏振光; Stokes 矢量; Mueller 矩阵; 偏光片

中图分类号: TB96

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)06-0036-05

Measurement of Polarizer Optical Properties Based on Stokes Vector Analysis

BU Haijun^{1,2}, LI Jun^{1,2}, XIA Yan¹, TANG Kun^{1,2}, WANG Pan^{1,2},ZENG Tingting^{1,2}, JIANG Cheng¹, MIN Lin^{1,2}

(1. Suzhou Institute of Metrology, Suzhou 215128, China;

2. National Measurement and Testing Center for Display Industry, Suzhou 215163, China)

Abstract: The measurement method of the sheet polarizer transmission ratio depends on the relative rotation of the polarizers. It is greatly affected by the light source polarization degree and the detector polarization-dependent response, and its measurement accuracy is low. To solve the above problem, this paper proposes a method based on Stokes vector analysis, which analyses the change of the polarization state between the input and output light and extract the polarization parameters with optimization algorithm. This method has high measurement speed and is universally applicable to the characterization of polarization optical elements used in flat panel display industry.

Key words: polarizing light; Stokes vector; Mueller matrix; sheet polarizer

0 引言

偏光片是平板显示器制造过程中的关键光学材料^[1], 在液晶显示器中, 双层偏光片结构转换并解析偏振光, 产生明暗对比, 从而产生显示画面; 在目前流行的 AMOLED 显示器中, 偏光片的使用有效地降低了 OLED 显示器表面的反射, 提升了显示器视觉效果。

偏光片透过轴和吸收轴的光谱透过率直接影响显示器的视觉效果, 精确测量偏光片透过率对于显示器产品质量管控具有重要意义。偏光片透过率的传统测量方法为: 通过一个已知偏振特性的偏振棱镜(或偏光

片)产生具有特定偏振态的线偏光, 考察其透过相对转动的待测偏光片后光强度的变化来计算偏振参数^[2]。这种方法测量原理较为简单, 所使用的测量仪器结构也不复杂, 因此得到了广泛的应用。然而由于该方法中光源一般具有部分偏振特性, 且探测器光响应存在偏振依赖性, 导致其测量准确性不能满足先进制造的技术要求。而且, 显示产业中所使用的偏光片一般是通过高分子薄膜材料拉伸后吸附碘分子制造的, 在获得偏光特性的同时难免使得材料带有部分二向色性, 即在相互垂直的光轴上存在位相差, 该位相差对显示器的图像质量具有重要影响, 需要对其进行详细表征, 而传统测量方法无法表征该位相差。

收稿日期: 2021-10-15; 修回日期: 2021-10-29

基金项目: 江苏省市场监督管理局科技计划项目(KJ196058)

引用格式: 步海军, 黎俊, 夏燕, 等. 基于 Stokes 矢量分析的偏光片光学参数测量[J]. 计测技术, 2021, 41(6): 36-40.

BU H J, LI J, XIA Y, et al. Measurement of polarizer optical properties based on Stokes vector analysis[J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(6): 36-40.

针对上述问题, 本文提出了基于 Stokes 矢量分析的方法, 通过测量入射到样品以及从样品出射的偏振光的 Stokes 矢量, 分析偏振态的变化, 以此来解析偏振片的偏振光学参数。该方法不依赖于起偏器和检偏器的相对转动, 可以有效避免光源和探测器的偏振特性引起的测量误差; 而且, 对于非理想偏光片, 该方法可以同时测量出样品中可能带有的位相差。对该方法的基本原理、计算公式、装置组成进行详细介绍, 并开展实际测量实验及不确定度分析, 验证该方法的准确性与可靠性, 为显示领域产品后续光学补偿设计提供重要指导。

1 测量原理及装置设计

光是一种电磁波, 其电场分量可以表示为两个相互垂直的分量

$$\begin{aligned} E_x(\mathbf{r}, t) &= E_{0x} \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \delta_x) \\ E_y(\mathbf{r}, t) &= E_{0y} \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \delta_y) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: E_{0x} 和 E_{0y} 分别为 x, y 方向上电场分量的振幅; δ_x 和 δ_y 分别为 x, y 方向上电场分量的初始位相; ω 为圆频率; t 为时间; \mathbf{k} 为波矢; \mathbf{r} 为空间坐标。

光也可以用 Stokes 矢量来表示^[3], 即

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: $S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2$; $S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2$; $S_2 = 2E_{0x}E_{0y} \cos\delta$; $S_3 = 2E_{0x}E_{0y} \sin\delta$; $\delta = \delta_y - \delta_x$ 。对于完全偏振光, $S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$; 对于部分偏振光, $S_0^2 > S_1^2 + S_2^2 + S_3^2$; 对于非偏振光, $S_1 = S_2 = S_3 = 0$ 。

当光经过偏振元件后, 光的偏振状态一般会发生变化, 其 Stokes 分量变为

$$\mathbf{S}' = \begin{pmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{pmatrix} \quad (3)$$

这一光与物质的相互作用过程可以用公式简单描述为

$$\mathbf{S}' = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S} \quad (4)$$

式中: \mathbf{M} 为偏振元件的 4×4 阶 Mueller 矩阵, 其中各矩阵元包含了该元件的偏振光学参数信息, 通过分析入射到偏振元件和从偏振元件出射的光的偏振状态的变化情况, 即可解析得出偏振元件的光学参数。

对于理想偏光片, 相互垂直的两个方向上只存在透过率的差异, 而没有相位差, 其 Mueller 矩阵可以写为

$$\begin{pmatrix} A & B \cos 2\theta & B \sin 2\theta & 0 \\ B \cos 2\theta & A \cos^2 2\theta + C \sin^2 2\theta & (A - C) \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ B \sin 2\theta & (A - C) \sin 2\theta \cos 2\theta & A \sin^2 2\theta + C \cos^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中: $A = \frac{1}{2}(p_x^2 + p_y^2)$; $B = \frac{1}{2}(p_x^2 - p_y^2)$; $C = p_x p_y$; p_x 和 p_y 分别为偏光片透过轴和吸收轴的透过系数; θ 为透过轴相对于 x 轴的夹角。透射光的 Stokes 分量为

$$\begin{cases} S'_0 = AS_0 + BS_1 \cos 2\theta + BS_2 \sin 2\theta \\ S'_1 = BS_0 \cos 2\theta + (A \cos^2 2\theta + C \sin^2 2\theta) S_1 + (A - C) S_2 \sin 2\theta \cos 2\theta \\ S'_2 = BS_0 \sin 2\theta + (A - C) S_1 \sin 2\theta \cos 2\theta + (A \sin^2 2\theta + C \cos^2 2\theta) S_2 \\ S'_3 = CS_3 \end{cases} \quad (6)$$

偏振光 Stokes 矢量的解析通过使光依次通过旋转的 $1/4$ 波片和固定偏振棱镜实现。光的强度^[4]可以表示为

$$I(\theta) = \frac{1}{2} S_0 + \frac{1}{4} S_1 + \frac{\cos 4\theta}{4} S_2 + \frac{\sin 4\theta}{4} S_3 - \frac{\sin 2\theta}{2} S_3 \quad (7)$$

式中: θ 为 $1/4$ 波片快轴相对于 x 轴的角度。测量得到入射光和出射光的 Stokes 矢量后就可以通过最优化算法来计算偏光片的参数^[5]。

基于上述原理, 本文设计的测量装置的光路如图 1 所示, 其中 S 为光源, L 与 L' 为透镜, P 与 P' 为偏振棱镜, R 与 R' 为 $1/4$ 波片, D 为探测器。测量时, 首先不将样品置入光路, 测量入射光的 Stokes 矢量; 再将样品置入光路, 测量从样品出射的光的 Stokes 分量, 此时的光路情况为: 从光源 S (在本文中为卤钨灯) 出射的非偏振光经透镜 L 准直后进入偏振棱镜 P 和 $1/4$ 波片 R 构成的圆偏振器形成近圆偏振光入射到样品 (为了避免待测偏光片随机放置使入射偏振光偏振方向与偏光片吸收轴重合, 导致出射光强度过低, 影响透过率的测量精度, 采用近圆偏振光作为测试光来测量透过率), 之后从样品出射的光依次进入 $1/4$ 波片 R' (R' 在步进电机的驱动下做旋转运动) 和偏振棱镜 P', 在透镜 L' 的作用下汇聚到探测器 D (在本文中为光谱仪)。

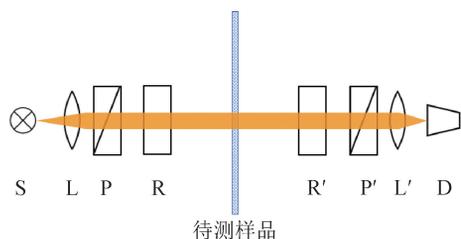


图 1 偏光片测量装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the polarizer measurement device

2 测量结果及不确定度分析

显示器行业中使用的偏光片的一般结构如图 2 所示，其主要由 PVA 膜、TAC 膜、保护膜、离型膜和压敏胶等复合制成，其中 PVA 膜是起偏振作用的核心膜材。

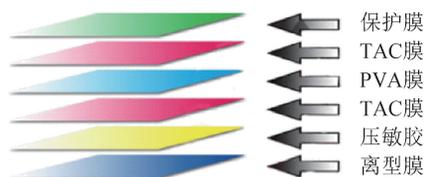


图 2 常见偏光片结构

Fig. 2 Structure of common sheet polarizers

一般情况下，由于光路中光学元件表面的反射、折射、散射等效应，光源并非完全偏振光，偏振度 Pol 计算公式为

$$Pol = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (8)$$

式中： $Pol = 1$ 表示完全偏振光； $Pol = 0$ 表示非偏振光； Pol 介于 0 和 1 之间表示部分偏振光。本实验中光源的偏振度如图 3 所示，可以看出在可见光波段入射光具有非常高的偏振度。

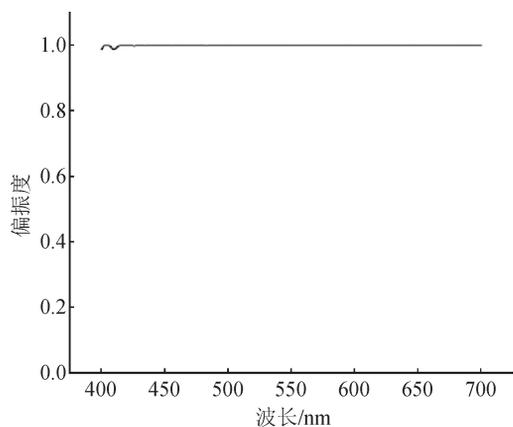


图 3 入射光的偏振度曲线

Fig. 3 Polarization degree of the input light

光源的约化 Stokes 分量的色散曲线如图 4 所示，在本文研究的波段范围内(450 ~ 650 nm)入射光十分接近右旋偏振光(Stokes 矢量为 $(1 \ 0 \ 0 \ 1)^T$)。

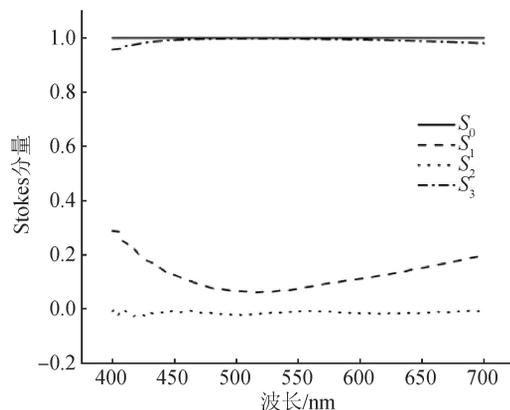


图 4 入射光的 Stokes 分量

Fig. 4 Stokes vector of the input light

经待测偏光片作用后，入射偏振光的偏振度以及约化 Stokes 分量分别如图 5 和图 6 所示。由于高分子材料在短波波段可能存在的散射吸收作用，出射光在短波段的偏振度有所下降，但是在显示器行业比较关注的波段 450 ~ 650 nm 中，偏振度相对较高。出射光的约化 Stokes 矢量表明出射光是椭圆偏振光， $S_3 \neq 0$ ，表明偏光片基材具有轻微的二向色性，这主要是因为偏光片制造过程中需要对基材进行拉伸造成的。

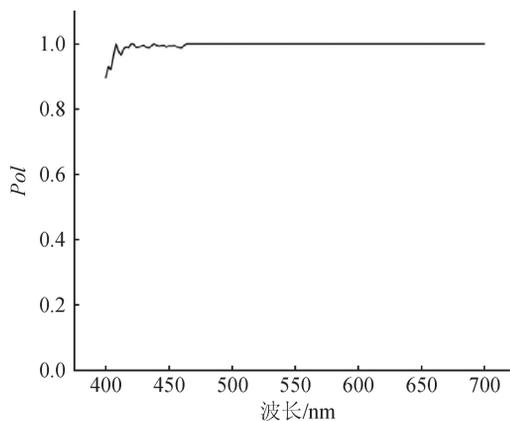


图 5 出射光的偏振度曲线

Fig. 5 Polarization degree of the output light

椭圆偏振光的主轴方向可由公式(9)计算得到，将其代入公式(6)，通过最优化算法，结合输入输出光的 Stokes 分量，计算得出偏光片的透过率。将本方法的测量结果与 Cary5000 分光光度计的测量结果进行对比，如图 7 所示。

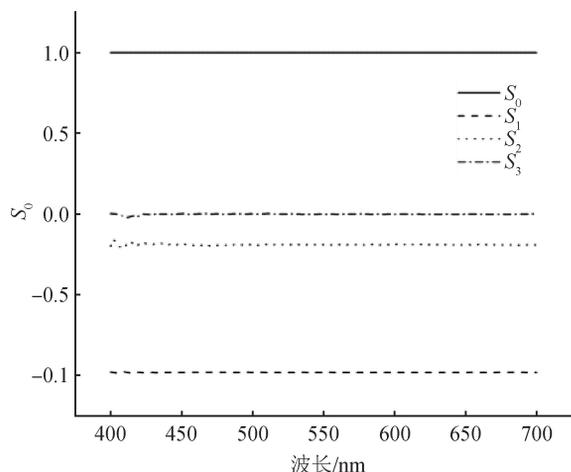


图6 出射光的 Stokes 分量
Fig. 6 Stokes vector of the output light

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{S_2}{S_1} \right) \quad (9)$$

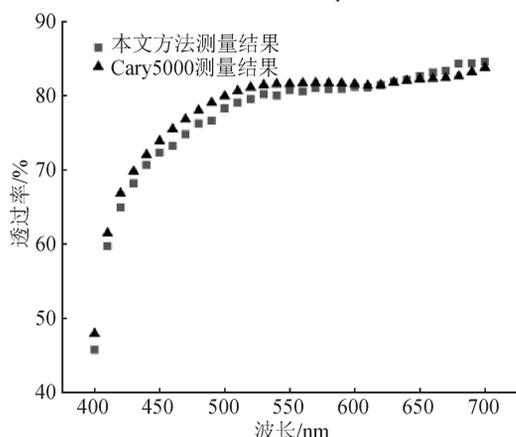


图7 测量结果与 Cary5000 分光光度计测量结果的对比
Fig. 7 Comparison of the measurement result and the result measured by Cary5000 spectrophotometer

图7表明基于 Stokes 矢量分析方法的测量结果误差在2%以内。产生误差的主要原因是光路中偏振棱镜与光轴不完全垂直造成的偏振光成分不单一，经过进一步的光路调整，测量误差可以得到有效降低^[6-9]。

透过率的测量不确定度分析依据 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定和表示》进行^[10]，具体计算过程如下：

1) 光轴偏离中心引起的不确定度分量 u_1

偏振棱镜的接收角有限，具有一定发散角的光源发出的光进入偏振棱镜后，出射光中同时具有寻常光和非寻常光，由此引起的透过率的测量误差为3%，按照均匀分布计算其不确定度分量为

$$u_1 = \frac{3\%}{\sqrt{3}} = 1.7\%$$

2) 偏光片不均匀性引起的不确定度分量 u_2

偏光片测量得到的透过率最大值和最小值之差为0.9%，按照均匀分布计算其不确定度分量为

$$u_2 = \frac{0.9\%}{\sqrt{3}} = 0.5\%$$

3) 测量重复性引起的不确定度分量 u_3

透过率测量重复性引起的不确定度分量按照 A 类不确定度评定方法进行评定，计算结果为

$$u_3 = 0.2\%$$

4) 光谱仪测量误差引起的不确定度分量 u_4

光谱仪测量误差引起的不确定度分量取其溯源标准不确定度

$$u_4 = 0.4\%$$

各不确定度分量之间相互独立，按照标准不确定度的合成原理，透过率的合成不确定度 $u_c = \sqrt{\sum u_i^2} = 1.8\%$ ，取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 $U=3.6\%$ ($k=2$)。

3 结论

平板显示产业对多种偏振光学薄膜材料(例如偏光膜、相位补偿膜等)有着巨大的需求，相关材料的偏振光学性能测试对保障显示器质量具有重要意义。本文提出的基于 Stokes 矢量分析测量偏光片光学参数的方法相较传统测量方法具有更快的速度，更加适用于偏光膜生产线中的质量监控；而且该方法具有很好的普适性及可扩展性，只需要更改最优化算法即可适用于其他种类的偏振光学薄膜测量，例如相位差膜等^[11-12]，为推动平板显示产业高质量发展提供了有力支撑。

参考文献

[1] LEE J, LIU N, WU S. Introduction to flat panel displays[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2008.
 [2] GOLDSTEIN D H. Polarized light[M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.
 [3] CHIPMAN R A, LAM W, YOUNG G. Polarized light and optical systems[M]. Boca Raton: CRC Press, 2019.
 [4] AZZAM R. Stokes-vector and Mueller-matrix polarimetry[J]. Journal of the optical society of America A, 2016, 33(7): 1396-1408.
 [5] ZSOLT U, LASDON L, PLUMMER J, et al. Scatter search and local NLP solvers: a multistart framework for global optimization[J]. INFORMS journal on computing, 2007, 19(3):

328 - 340.

[6] CHIPMAN R. Polarimeter calibration error gets far out of control [J]. Proceedings of the SPIE, 2015, 9583: 95830H.

[7] GOLSTEIN H, CHIPMAN A. Error analysis of a Mueller matrix polarimeter[J]. Journal of the optical society of America A, 1990, 7(4): 693 - 700.

[8] TWIETMEYER K M, CHIPMAN, R A. Optimization of Mueller matrix polarimeters in the presence of error sources[J]. Optics express, 2008, 16(15): 11589 - 11603.

[9] CHIPMAN R A. Precision polarimetry of optical components [J]. Proceedings of the SPIE, 1992, 1720: 325 - 335.

[10] 全国法制计量管理技术委员会. JJF 1059.1 - 2012 测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 中国计量出版社, 2012.

National Legal Metrology Management Technical Committee. JJF 1059.1 - 2012 Evaluation and Expression of Uncertainty of Measurement [S]. Beijing: China Metrology Press, 2012. (in Chinese)

[11] RUBIN N A, D'AVERSA G, CHEVALIER P, et al. Matrix Fourier optics enables a compact full-Stokes polarization camera [J]. Science, 2019, 364(6448): 43.

[12] Kim J, LEE J H. Stokes polarimetry method for measuring in-plane retardation and out-of-plane retardation of optical wave [J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2020, 69(12): 9805 - 9812.



(广告)

欢迎订阅《化学分析计量》

邮发代号 24 - 138

《化学分析计量》为国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物，月刊，大 16 开本，每月 20 日出版。国际刊号：ISSN 1008 - 6145，国内刊号：CN37 - 1315/06。《化学分析计量》是中国科技核心期刊、美国《化学文摘》(CA) 千种表收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊，中国石油和化工行业优秀期刊、中国兵器工业优秀期刊、山东省优秀期刊。您可通过邮局或银行汇款向《化学分析计量》杂志社办理订阅手续，欲订阅过刊或合订本、合订本光盘的读者直接向杂志社订阅。

地址：山东省济南市 108 信箱杂志社 邮编：250031
 电话：(0531)85878132, 85878224, 85878148 E-mail: anameter@126.com 投稿网址：www.cam1992.net

《化学分析计量》2021 年第 11 期目次

标准物质

氮中苯气体标准物质的制备

分析测试

固相萃取 - 高效液相色谱法快速测定烟草用爆珠中 4 种苏丹红
 连续流动分析法快速测定加热不燃烧卷烟专用新型薄片片甲醚、
 乙醚的醛基总含量

超高效液相色谱 - 四极杆静电场轨道阱高分辨质谱法分析莱菔子
 化学成分

高效液相色谱法测定碳纤维凝固浴中二甲基亚砷

超声波萃取 - 气相色谱 - 质谱法测定环境空气颗粒物中的半挥发
 性有机物

高效液相色谱 - 串联质谱法测定果汁及乳饮料中 9 种焦油色素

高效液相色谱 - 串联质谱法测定龙血竭药材中苏丹红 IV

柱前衍生 - 高效液相色谱 - 串联质谱法测定塑料产品中两种苯
 酞化合物

离子色谱法同时检测水产品加工用水中 10 种阴离子

火焰原子吸收光谱法测定变形高温合金 GH4169 中痕量钾、钠
 气相色谱法测定有机肥料中的水分

全自动定氮仪碱解蒸馏法测定植物营养液中硝态氮和铵态氮
 高效液相色谱法同时测定化妆品中的法莫替丁、雷尼替丁和西
 咪替丁

二安替比林甲烷分光光度法测定预熔型精炼渣中的二氧化钛

计量技术

海水电导率仪校准及标准值计算方法

实验室管理

茄子中多种农药残留筛查能力验证

土壤中铅含量的测定能力验证结果分析

不确定度

高效液相色谱法检测化妆品中 4 - 甲基苄基亚樟脑的不确定度
 评定

综述

超高效液相色谱仪的应用及前景展望