

文章编号: 1001-4888(2022)04-0447-08

基于碳纳米管薄膜的偏振成像实验研究^{*}

王怡彬^{1,2,3}, 张辉^{1,2,3}, 张鹏^{1,2,3}, 赵旻^{1,2,3}

(1. 中国科学院 材料力学行为和 Design 重点实验室, 安徽合肥 230026; 2. 中国科学技术大学 精密机械与精密仪器系, 安徽合肥 230026;
3. 中国科学技术大学 精密科学仪器安徽普通高校重点实验室, 安徽合肥 230026)

摘要: 碳纳米管由于其特殊的一维中空管状结构, 因此具有强烈的光学各向异性。顺排碳纳米管薄膜由平行生长的碳纳米管排列组成, 通过化学气相沉积法制备得到。本文通过偏振性能测试实验证明了薄膜在可见、红外多个波长具有较高的偏振度; 将薄膜作为偏振材料应用在可见光和红外光的分时偏振成像实验中, 基于斯托克斯矢量的偏振描述方法得到了偏振度图像。与直接获得的光强度图像相比, 利用碳纳米管薄膜得到的偏振度图像对材料或粗糙度不同的表面具有更强的区分和增强效果, 表明碳纳米管薄膜作为宽光谱的偏振材料, 可以很好地应用于偏振成像领域。本文还针对薄膜偏振度的误差进行了测量矫正, 进一步提高了薄膜偏振成像的增强效果。

关键词: 偏振片; 偏振成像; 碳纳米管薄膜; 光学各向异性

中图分类号: O436.3

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-21-222

0 引言

偏振性作为光波的一大特性, 包含了很多重要信息。物质对光波的反射、折射等相互作用都会改变光波的偏振态, 因此从物体表面产生的反射、折射光包含物质本身材料、纹理、粗糙度等表面特征的信息, 并且物体本身产生的红外辐射也具有其特有的偏振特性^[1], 因此对光波偏振特性的测量可以补充得到普通强度图像所不能包含的信息。偏振成像技术作为探测目标偏振特性的技术, 近些年不论是技术实现方案还是具体的应用均得到了飞速的发展。偏振成像技术在众多领域有很大的应用研究价值, 例如, 可以应用于目标检测识别领域, 用于增强图像细节特征^[1]、凸显自然背景中的人造物体^[2], 可以应用于雾天、水下成像, 降低介质散射作用的影响^[3-5], 以及可以用于物体应力的检测^[6]、遥感^[7,8]等领域。

偏振成像技术通常通过在相机前放置检偏器件获得四个偏振相位的图像, 并将四幅图合成为一张最终的偏振图像, 所以其关键是选择构成检偏器件的偏振材料。检偏器件常用的偏振材料有二向色性薄膜、液晶材料、金属线栅等, 这些传统材料偏振度很高, 但应用的波段范围较窄。其中二向色性薄膜材料受潮后易发生退偏, 稳定性较差。液晶材料有很高的偏振性, 但在红外波段偏振性能迅速衰减^[9]。金属线栅可以针对应用波段进行设计^[10,11], 但工艺较复杂、造价昂贵, 因此在偏振成像器件方面没有得到大规模的应用。碳纳米管由于其特殊的线状一维管状结构, 具有强烈的各向异性特性, 对光的吸收也同样具有各向异性, 因此, 由平行排列的碳纳米管组成的碳纳米管薄膜具有光学偏振特性, 具体表现为振动方向与碳纳米管轴向平行的偏振态被薄膜吸收, 而垂直振动的偏振态可以通过薄膜^[12]。图 1 是碳纳米管薄膜偏振特性的示意图。并且由于其极精细的纳米结构(直径为 2~20nm), 相较传统材料, 碳纳米管薄膜在紫外、可见光、直至红外、太赫兹波段的很宽的光谱范围均具有不错的偏振性能^[13-15]。同

^{*} 收稿日期: 2021-09-19; 修回日期: 2022-02-18

基金项目: 国家自然科学基金(11772321, 51732006)资助

通信作者: 赵旻(1972-), 女, 博士, 教授。主要从事微纳材料和热界面材料的研究。Email: yangz1@ustc.edu.cn

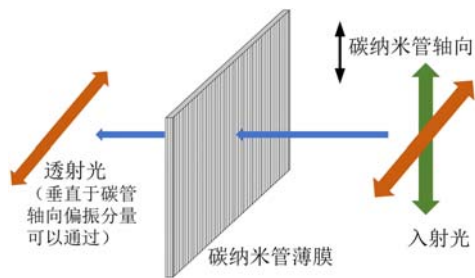


图1 碳纳米管薄膜透偏特性示意图

Fig.1 Schematic of polarization characteristics of carbon nanotube film

时,碳纳米管薄膜材料还具有易于集成、热膨胀系数低、不易氧化变质等特点,作为一种工艺相对简单、可应用于全光谱的新型偏振材料在偏振成像领域具有很好的应用前景。在此背景下,本文采用将阵列化的顺排碳纳米管铺倒的方式制备碳纳米管薄膜,并测试了它在多个波段的偏振特性;并且将薄膜作为偏振材料,用于可见光、红外的偏振成像中,获得了具有增强效果的偏振度图像。考虑到碳纳米管薄膜的偏振特性对薄膜厚度、碳纳米管排列形貌比较敏感,本文通过在后处理图像中引入偏振矫正参数,进一步提高了偏振图像质量,验证了碳纳米管薄膜在宽光谱中作为偏振材料实现偏振图像增强的可行性。

1 碳纳米管薄膜样品的制备及性能测试

1.1 样品制备

碳纳米管薄膜的偏振性能受其厚度影响,薄膜厚度增加,偏振度会有所提高^[14,16],但同时透过率会下降,薄膜厚度为 700~800nm 时可以在保证透过率的同时使得偏振度达到最大^[16]。薄膜的厚度可以通过控制催化剂窄条的宽度来控制,宽度越大,薄膜厚度越厚。另外,碳纳米管生长过程中会产生缺陷以及无定形碳,适当温和的加热氧化可以使无定形碳含量下降,从而提高薄膜的偏振度^[16]。

碳纳米管薄膜采用化学气相沉积法(CVD)制备得到^[17-19],薄膜铺展在衬底上,衬底对薄膜起到支撑固定的作用。考虑到石英衬底在可见光波段透过率极高,硅片衬底在红外波段透过率极高,故可见光的测试采用石英作为衬底,红外波段采用硅片作为衬底。样品制备流程(图2)具体可以分为四步:(1)采用石英片或硅片用作衬底,在其上使用原子层沉积技术(ALD)镀上一层 10nm 厚的氧化铝,用作隔离保护。使用电子束蒸镀的方法沉积一层 2nm 厚的铁颗粒作为催化剂。将催化剂薄膜利用紫外光刻图形化为间隔 500 μm 、宽 30 μm 的窄条,用于碳纳米管的生长。(2)将沉积了催化剂的衬底放入加热炉中,通入氩气加热到 550 $^{\circ}\text{C}$ 后通入氢气,加热到 760 $^{\circ}\text{C}$ 通入乙烯作为碳源,同时通入极少量水蒸气($\approx 10\text{ppm}$),生长出垂直排列的碳纳米管阵列,生长时长控制为 20min。(3)在异丙醇溶液中浸泡提拉,在毛细力的作用下顺排碳纳米管首尾相接,铺展在基底上形成薄膜。(4)薄膜干燥后在 300 $^{\circ}\text{C}$ 的加热板上烘烤 10min 去除无定型碳,得到最终用于实验的碳纳米管薄膜样品。台阶仪测试得到薄膜样品厚度在 700nm 左右。

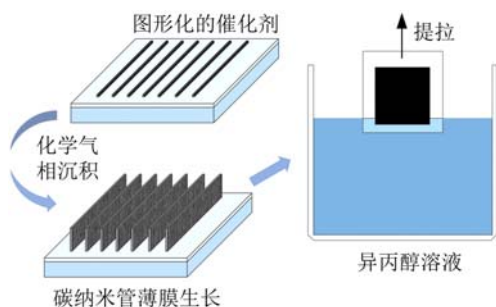


图2 样品制备示意图

Fig.2 The preparation of samples

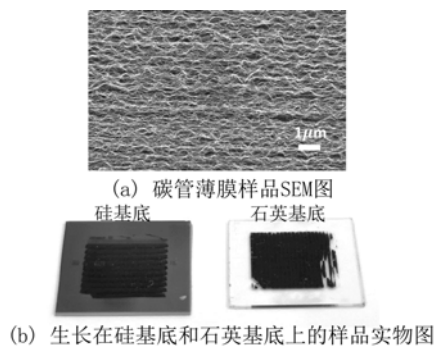


图3 碳纳米管样品 SEM 图及实物图

Fig.3 SEM and physical images of carbon nanotube samples

从样品薄膜的扫描电子显微镜(SEM)图(图3(a))中可以看出碳纳米管薄膜的一维取向。图3(b)是硅基底和石英基底的样品薄膜实物图。

1.2 不同波长薄膜偏振性能测试

图4展示了样品薄膜偏振性能的测试光路系统。系统中采用激光器作为测试光源,使用扩束镜(DHC GCO-2503)对激光扩束。起偏偏振片(GCL-050003)固定在电控旋转位移平台(PRM1Z8)上,通过软件可以精确控制偏振片旋转角度,激光穿过旋转到不同角度的偏振片可以获得不同角度相同光强的线偏振光。电控旋转平台以每秒 1° 的速度旋转,CCD(MV-CA050-11UM)以每秒1张的速度采集图片。经起偏偏振片调制后的偏振光经过碳纳米管薄膜偏振片,由CCD靶面接收。CCD靶面接收到的光强随起偏偏振片旋转角度的变化而变化,由此可以得到碳纳米管薄膜偏振片的偏振特性。

图5展示了在532nm、632nm及808nm三种激光波长下测试到的透射光强随入射光偏振角度 θ 变化的数据(圆圈),以及测量数据基于 $\cos^2\theta$ 最小二乘法获得的拟合曲线(线条)。为了方便比较,对三个波长下光强的测试数据分别进行了归一化处理,使其均值各自为1。理想偏振片的偏振特性符合 Malus 定律:

$$I_{\text{透射光}} = I_{\text{入射线偏光}} \cos^2 \theta \quad (1)$$

即透射光强 $I_{\text{透射光}}$ 正比于入射光强 $I_{\text{入射线偏光}}$ 及入射光偏振角度 θ 的余弦平方。由图5可以清楚地看出实验数据的趋势与 Malus 定律是一致的。

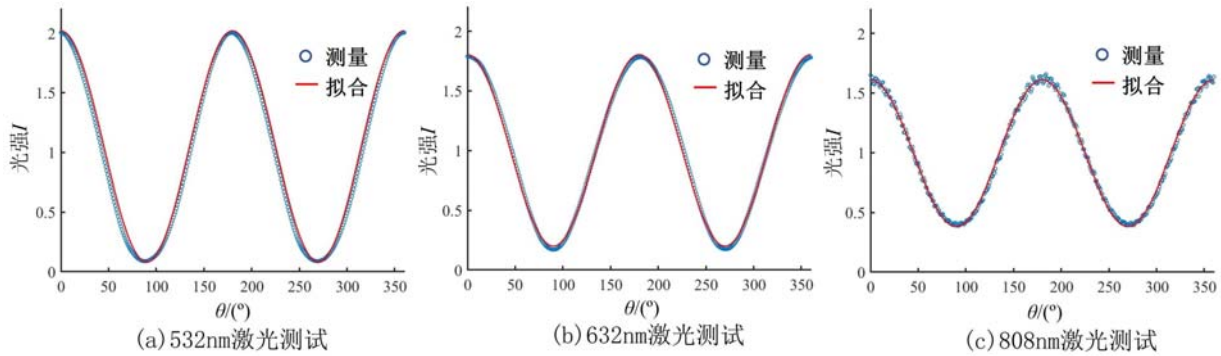


图5 薄膜偏振透射光强的测量数据及拟合曲线

Fig. 5 Metrical datas and fitting curves of polarization transmitted light intensity of CNT film

偏振度 DoP (degree of polarization) 是评估偏振器件偏振性能的参数:

$$\text{DoP} = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min}) \quad (2)$$

式中: $I_{\max}$ 为最大透射光强; $I_{\min}$ 为最小透射光强。理想偏振片的偏振度等于1,无偏物体偏振度等于0,商用偏振片的线偏振度可以达到0.999。由式(2)计算得出碳纳米管薄膜在532nm、632nm、808nm波长的偏振度分别为0.863、0.825、0.624。可见用上述方法制备得到的碳纳米管薄膜具有一定的偏振性能,且在可见光与红外波段分别可以实现偏振调制。

2 基于碳纳米管薄膜的偏振成像实验

2.1 偏振成像原理分析

偏振成像技术通常采用斯托克斯参量 $S^{[20]}$ 来描述光波及偏振图像的偏振态:

$$\mathbf{S} = [S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T \quad (3)$$

式中: S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 是 $\mathbf{S}$ 的四个分量。其中 S_3 与圆偏振分量相关。由于在自然场景条件下,仪器捕捉到的光波的圆偏振分量极少,一般假定 $S_3 = 0$ 。 S_0 、 S_1 、 S_2 的获得需要至少三个不同角度的偏振分量强度,比如将图像在 0° 、 45° 、 90° 、 135° 的偏振分量记为 I_0 、 I_{45} 、 I_{90} 、 I_{135} ,则斯托克斯参量可以表示为

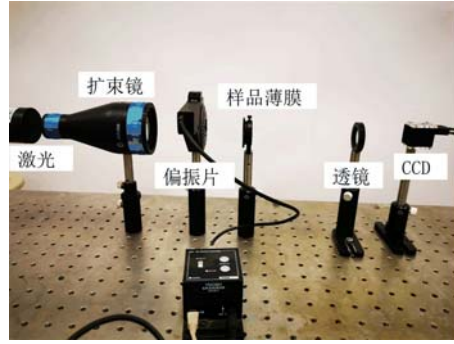


图4 偏振性能测试光路系统

Fig. 4 Polarization test optical system

$$\begin{aligned} S_0 &= I_0 + I_{90} \\ S_1 &= I_0 - I_{90} \\ S_2 &= I_{45} - I_{135} \end{aligned} \quad (4)$$

不考虑圆偏振分量的情况下,通常使用线偏振度 DoLP(degree of linear polarization)来描述场景的偏振态:

$$\text{DoLP} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2} / S_0 \quad (5)$$

2.2 实验

根据获得偏振图像的方式,偏振成像系统分为时间分割型、振幅分割型、孔径分割型和焦平面分割型^[21-23]。时间分割型在不同时间获得同一场景不同偏振角度的图像,其系统结构简单,易于搭建,适合于对静态物体偏振图像的测试。本文拍照目标为静止物体,目标反射的光信息不随时间发生变化,所以采用时间分割型的测试光路。

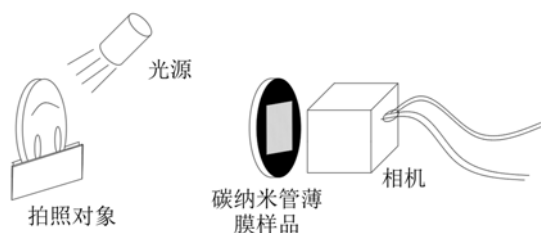


图 6 偏振成像光路示意图

Fig. 6 Diagram of polarization imaging optical system

本文实验中分别搭建了可见光、红外波段的偏振成像光路系统。可见光偏振实验选用一组有着不同材料、不同粗糙度表面的静物作为偏振度图像的拍照对象,采用灯光照明。光路系统如图 6 所示,将固定在电控旋转平台上的碳纳米管薄膜样品作为检偏偏振片放置在相机镜头前,同时将电控旋转平台初始角度记为 0° 。在薄膜旋转到 0° 、 45° 、 90° 、 135° 时,拍摄得到 I_0 、 I_{45} 、 I_{90} 、 I_{135} 。根据式(4)、式(5)计算得到拍摄图像的斯托

克斯参量及线偏振度。

红外图像采用 $8\sim 14\text{mm}$ 的红外热像仪(TiX660)拍摄得到。红外偏振实验选用正在加热的局部表面生锈的电烙铁作为拍照对象。碳纳米管薄膜的固定和控制与可见光的系统相同。同样拍照得到 I_0 、 I_{45} 、 I_{90} 、 I_{135} ,计算得到图像的斯托克斯参量及线偏振度。

2.3 实验结果分析

图 7、图 8 分别为实验获得的可见光及红外波段的原始 I_0 图像及偏振度图像。偏振度图像的灰度值代表偏振度的大小。图像背景区域到达相机的光没有偏振性,在偏振度图像中显示为黑色。由于不同材料反射光的偏振态受物体表面特征的影响会有不同,所以相较于强度图像,偏振度图像中不同材料表面间的对比会更加明显。可见光图像(图 7)中由于表盘与其外框的金属材料不同,在偏振度图像中两者的对比相较于 I_0 图像更加明显。红外波段图像(图 8)中电烙铁生锈部分的偏振度明显高于其他部分,在偏振度图像中呈现为白色,在背景中突显出来,而这在 I_0 图像中是不明显的。实验结果说明利用碳纳米管薄膜作为偏振元件可以实现良好的图像偏振增强效果。

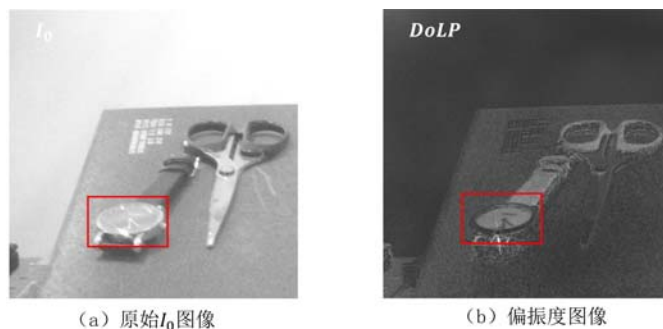
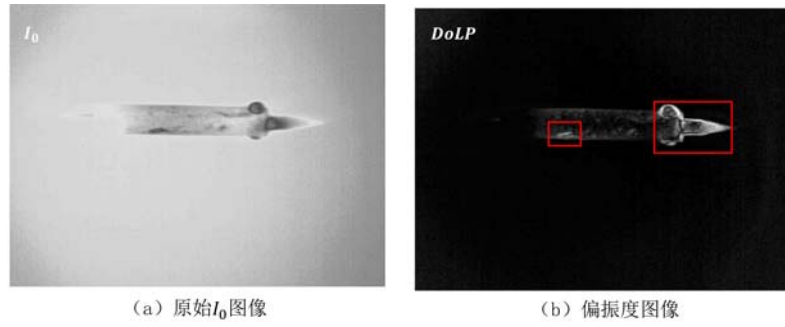


图 7 可见光原始 I_0 图像及偏振度图像

Fig. 7 Original I_0 image and Polarization image at visible light

图8 红外波段原始 I_0 图像及偏振度图像Fig. 8 Original I_0 image and Polarization image at infrared light

3 对偏振测试系统非理想性矫正标定

3.1 矫正原理

为了进一步提高偏振成像质量,增加对比度,需要考虑作为检偏元件的碳纳米管薄膜自身偏振度的非理想性,以及其他光学系统元件带来的偏振误差对实验结果的影响^[24,25]。

偏振成像光学系统的偏振特性可以采用穆勒矩阵 $\mathbf{M}^{[20]}$ 来描述,表达式为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & (k_1 - k_2) \cos 2\theta & (k_1 - k_2) \sin 2\theta & 0 \\ (k_1 - k_2) \cos 2\theta & (k_1 + k_2) \cos^2 2\theta + 2 \sqrt{K_1 K_2} \sin^2 2\theta & \frac{1}{2} (\sqrt{K_1} - \sqrt{K_2})^2 \sin 4\theta & 0 \\ (k_1 - k_2) \sin 2\theta & \frac{1}{2} (\sqrt{K_1} - \sqrt{K_2})^2 \sin 4\theta & (k_1 + k_2) \sin^2 2\theta + 2 \sqrt{K_1 K_2} \cos^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \sqrt{K_1 K_2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: k_1 和 k_2 分别是偏振系统最大、最小光强透过率; θ 是透偏角度。

系统对入射光的作用可以表示为

$$\mathbf{S}' = \mathbf{M} \times \mathbf{S} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{S} = [S_0 \ S_1 \ S_2 \ S_3]^T$ 和 $\mathbf{S}' = [S'_0 \ S'_1 \ S'_2 \ S'_3]^T$ 分别表示系统入射光和出射光的斯托克斯参量。由斯托克斯参量的定义可知, S_0 、 S'_0 分别表示入射光和出射光的强度。故由式(6)、式(7)可得系统输出强度

$$I' = S'_0 = \frac{1}{2} (k_1 + k_2) S_0 + \frac{1}{2} (k_1 - k_2) S_1 \cos 2\theta + \frac{1}{2} (k_1 - k_2) S_2 \sin 2\theta = m_0 S_0 + m_1 S_1 + m_2 S_2 \quad (8)$$

式中: m_0 、 m_1 、 m_2 为系统的偏振调制参数^[24]。

实验测试中,使用一组已知斯托克斯参量的线偏振光获得出射光强,并基于此拟合得出系统的偏振调制参数。

3.2 成像修正实验

与 2.2 节相同,搭建偏振成像的光路系统(图 6),拍摄得到 I_0 (图 9(a))、 I_{45} 、 I_{90} 、 I_{135} 。由式(4)、式(5)计算得到处理前的偏振度图像(图 9(b))。

采用一组已知偏振方向和强度的线偏振光,分别测试当薄膜样品旋转到 0° 、 45° 、 90° 、 135° 时系统的偏振调制参数 m_0 、 m_1 、 m_2 。测试所用线偏振光由 632nm 的激光经过扩束镜扩束,并且通过固定在电控旋转平台上的偏振片起偏得到,可以由电控旋转平台精确控制测试偏振光的偏振方向,测试时需保持系统中的碳纳米管薄膜样品及相机的空间位置与成像时不发生变化。

以薄膜样品旋转到 0° 的系统为例,将测试线偏振光的偏振方向与薄膜方向(0°)的夹角记为 θ ,将这组线偏振光的斯托克斯参量记为

$$\mathbf{S}_\theta = [S_{0\theta} \ S_{1\theta} \ S_{2\theta} \ S_{3\theta}]^T \quad (9)$$

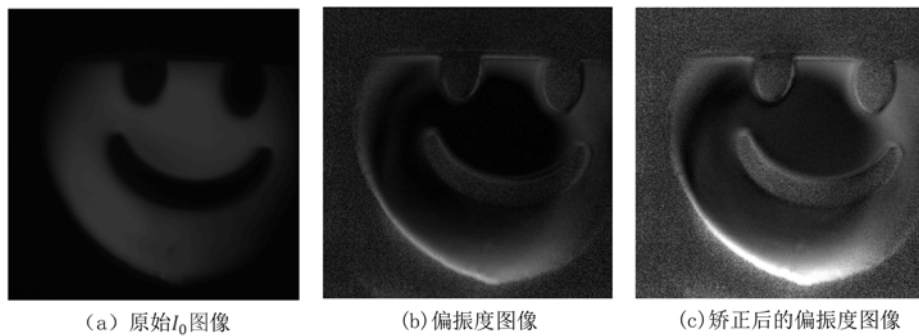


图 9 原始图像、偏振度图像及修正后的偏振度图像

Fig. 9 Original image, polarization degree image and corrected polarization degree image

式中:各斯托克斯分量可以由线偏振光的强度和偏振角度计算得到

$$\begin{aligned} S_{0\theta} &= I \\ S_{1\theta} &= I \cos 2\theta \\ S_{2\theta} &= I \sin 2\theta \end{aligned} \quad (10)$$

代入式(8)可得

$$I'_{\theta} = m_0 I + m_1 I \cos 2\theta + m_2 I \sin 2\theta \quad (11)$$

式中: I'_{θ} 为相机接收到的输出光强数据。控制电控旋转平台每隔 20° 测得一组 I'_{θ} , 代入式(11), 由最小二乘拟合的方法得到薄膜 0° 时的 m_0 、 m_1 、 m_2 。用同样的方法得到薄膜在另外三个方向时的偏振调制参数, 结果见表 1。

表 1 偏振调制参数测试结果

Tab. 1 Polarization modulation parameter test results

	m_0	m_1	m_2
0°	0.950622	0.546456	0.000479
45°	1.014608	0.589566	-0.02387
90°	1.037150	0.572689	-0.01358
135°	0.997625	0.570170	-0.02965

将拍摄得到的 I_0 、 I_{45} 、 I_{90} 、 I_{135} 以及拟合得到的 m_0 、 m_1 、 m_2 代入式(8), 并写为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_{45} \\ I_{90} \\ I_{135} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{10} & m_{20} \\ m_{045} & m_{145} & m_{245} \\ m_{090} & m_{190} & m_{290} \\ m_{0135} & m_{1135} & m_{2135} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

由最小二乘法可以拟合得到修正后的 S'_0 、 S'_1 、 S'_2 。将 S'_0 、 S'_1 、 S'_2 代入式(5)计算得到修正后的偏振度图像, 如图 9(c)。对比图 9(b)、(c)可以看出, 修正后的偏振度图像相较修正前在图像边缘处的增强效果更明显。

为了对修正效果做出评价, 采用一束标准偏振光照射系统, 测得四个角度的透射光强; 采用拟合得到的 m_0 、 m_1 、 m_2 值修正计算, 得到修正前后的斯托克斯值, 代入式(5)计算得到测试所用薄膜的偏振度从修正前的 0.57 提高到修正后的 0.98。理想材料的偏振度为 1, 传统材料的偏振度一般高于 0.99, 修正后的薄膜偏振度接近于传统材料, 说明虽然碳纳米管薄膜的偏振度略低于传统偏振材料, 但是经过修正, 可以弥补这一缺点。

4 结论

本文测试了采用化学气相沉积法制备的碳纳米管薄膜样品在可见光、红外多个波段的偏振性能, 通

过分时偏振光路验证了碳纳米管薄膜在偏振成像增强上的应用,并测试了光路的偏振调制参数,对偏振度图像进行了矫正。实验结果表明,碳纳米管薄膜具有很好的偏振性能,在 532nm、632nm、808nm 激光测试下的偏振度分别为 0.863、0.825、0.624。作为偏振材料,碳纳米管薄膜在可见光和红外波段均具有很好的性能,可以通过基于碳纳米管薄膜的偏振成像系统获得具有增强效果的偏振度图像。此外,成像修正实验的结果表明,虽然薄膜的偏振性略低于常用偏振材料,但是通过对薄膜偏振参数的标定,可以对系统进行修正,从而弥补碳纳米管薄膜偏振性能不理想的不足。矫正后偏振度图像的增强效果有进一步的提高,证明碳纳米管薄膜作为一种宽光谱的偏振材料,在偏振成像器件的设计与制造方面具有重要的应用价值。

致谢 本研究由国家自然科学基金(No. 51732006 & No. 11772321)资助。感谢中国科学技术大学微纳研究与制造中心提供设备支持。

参考文献:

- [1] Gurton K P, Yuffa A J, Videen G W. Enhanced facial recognition for thermal imagery using polarimetric imaging[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(13):3857—3859.
- [2] Connor B, Carrie I, Craig R, et al. Discriminative imaging using a LWIR polarimeter[C]. *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications V*, 2008:71130K.1-71130K.11.
- [3] Schechner Y Y, Narasimhan S G, Nayar S K. Instant dehazing of images using polarization[C]//*Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2001.
- [4] Treibitz T, Schechner Y Y. Active polarization descattering[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2009, 31(3):385—399.
- [5] Han J, Yang K, Min X, et al. Resolution enhancement in active underwater polarization imaging with modulation transfer function analysis[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(11):3294—3302.
- [6] York T, Marinov R, Gruev V. 260 frames-per-second 648×488 resolution division-of-focal-plane polarimeter with structural dynamics and tracking applications[J]. *Optics Express*, 2016, 24(8):8243—8252.
- [7] Deuzé J L, Bréon F M, Devaux C, et al. Remote sensing of aerosols over land surfaces from POLDER-ADEOS-1 polarized measurements[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2001, 106(D5):4913—4926.
- [8] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22):5453—5469.
- [9] Zhao X, Boussaid F, Bermak A, et al. High-resolution thin “guest-host” micropolarizer arrays for visible imaging polarimetry[J]. *Optics Express*, 2011, 19(6):5565—5573.
- [10] 张娜, 褚金奎, 赵开春, 等. 基于严格耦合波理论的亚波长金属光栅偏振器设计[J]. *传感技术学报*, 2006, 19(5):1739—1743 (ZHANG Na, CHU Jinkui, ZHAO Kaichun, et al. The design of the subwavelength wire-grid polarizers based on rigorous couple-wave theory[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(5):1739—1743 (in Chinese))
- [11] Zhang Z, Dong F, Teng C, et al. Nano-fabricated pixelated micropolarizer array for visible imaging polarimetry[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(10):105002.
- [12] 刘鑫, 王玥, 张丽颖, 等. 多壁碳纳米管薄膜在 THz 波段的传输与偏振特性[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(12):238—244 (LIU Xin, WANG Yue, ZHANG Liying, et al. Transmission and polarization properties of multi-walled carbonnanotubes film in terahertz waveband[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12):238—244 (in Chinese))
- [13] Jiang K, Li Q, Fan S. Nanotechnology: spinning continuous carbon nanotube yarns[J]. *Nature*, 2002, 419(6909):801.
- [14] Kyoung J, Jang E Y, Lima M D, et al. A reel-wound carbon nanotube polarizer for terahertz frequencies[J]. *Nano letters*, 2011, 11(10):4227—4231.
- [15] Jung M, Noh Y, Suh D, et al. Flexible and thermally stable optical polarizers based on highly aligned carbon nanotube sheets for the visible spectral range[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 3(12):1800203.
- [16] Zhang H, Wang Y, Zhang P, et al. Investigation and optimization of polarization properties of selfassembled

- carbon nanotube films[J]. *Nanotechnology*, 2022, 33(19):195702.
- [17] Im J, Lee I H, Lee B Y, et al. Direct printing of aligned carbon nanotube patterns for high-performance thin film devices[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(5):053109.
- [18] Min Y S, Bae E J, Oh B S, et al. Low-temperature growth of single-walled carbon nanotubes by water plasma chemical vapor deposition[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2005, 127(36):12498—12499.
- [19] Zhang P, Guo J, Hou H, et al. Highly aligned carbon nanotube-based Bi-material microactuators with reduced intertube slipping[J]. *Chemnanomat*, 2020, 6 (3):404—411.
- [20] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京:科学出版社, 2003 (LIAO Yanbiao. *Polarization optics*[M]. Beijing: Science Press, 2003 (in Chinese))
- [21] Pezzaniti J L, Chenault D B. A division of aperture MWIR imaging polarimeter[J]. *Polarization Science and Remote Sensing II*, 2005, 44(3):515—533.
- [22] 赵劲松. 偏振成像技术的进展[J]. 红外技术, 2013, 35(12):743—750, 772 (ZHAO Jinsong. Developments of polarization imaging technology[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(12):743—750, 772 (in Chinese))
- [23] Farlow C A, Chenault D B, Pezzaniti J L, et al. Imaging polarimeter development and applications[J]. *Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering*, 2002, 4481:118—125.
- [24] Jiang Z, Zhang Q, Wu S, et al. Reconstructing stokes parameters from non-uniform division-of-focal-plane modulation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134:106199.
- [25] 杨洁, 金伟其, 裘溯, 等. 考虑偏振片非理想性的可见光偏振成像修正模型[J]. 光学精密工程, 2020, 28(2):79—84 (YANG Jie, JIN Weiqi, QIU Su, et al. Correction model for visible light polarization imaging considering non-ideality of polarizers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(2):79—84 (in Chinese))

Experimental study of polarization imaging based on carbon nanotube films

WANG Yibin^{1,2,3}, ZHANG Hui^{1,2,3}, ZHANG Peng^{1,2,3}, ZHAO Yang^{1,2,3}

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Hefei 230026, Anhui, China; 2. Department of Precision Machinery & Precision Instrumentation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China; 3. Key Laboratory of Precision Scientific Instrumentation of Anhui Higher Education Institutes, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

Abstract: Carbon nanotubes (CNTs) possess apparent anisotropy for light propagation due to their unique one-dimensional characteristic. Moreover, the super-aligned CNT film can be easily synthesized by chemical vapor deposition (CVD), a relatively low-cost method. It can be verified by polarization performance test, the excellent polarimetric capacities of super-aligned CNT film in a broad range from visible to infrared. Furthermore, following the Stokes theory, the images describing the degree of linear polarization (DOLP) were captured in visible and infrared wavelength range, respectively. The DOLP images obtained with CNT film exhibit typical capacities in distinguishing the objective differences, such as the divergences in material, roughness, structure, etc. The correction of the non-uniformity through calibration further enhanced the image quality greatly. This work demonstrated the great potential of the applications of CNT film in polarimetric regions.

Keywords: polarizer; polarization imaging; CNT film; optical anisotropy