

文章编号 1004-924X(2025)07-1042-09

基于神经网络的全斯托克斯光电探测器

王守桐¹, 张 然^{1,2*}, 褚金奎^{1,2}, 蒙海龙¹, 蔡德好¹

(1. 大连理工大学 辽宁省微纳米系统重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 宁波研究院, 浙江 宁波 315020)

摘要:传统的全斯托克斯探测方法都是基于分时或分空间形式, 有着设备体积大、装备困难以及无法时空一致探测等缺点。二维材料以及超材料的最新发展使得基于亚波长尺寸的偏振敏感结构的超紧凑时空一致全斯托克斯探测器实现成为可能。提出了一种基于石墨烯-金属纳米天线的偏振探测器, 利用石墨烯上矢量光电流以及神经网络方法解算, 可实现全斯托克斯参数时空一致探测。通过 FDTD 仿真获得不同偏振态入射光下的矢量光电流, 然后根据神经网络算法建立全斯托克斯参数 $\hat{S}$ 和记录的矢量光电流 $\hat{I}$ 之间的映射关系 $\hat{S}=f(\hat{I})$, 成功检测了全斯托克斯参数, 在 4 μm 波段下均方误差为 0.007 69, 入射光实际值和预测值的斯托克斯参数的最小包围球相对半径差为 7.68%。该探测器克服了分时与分空间机制固有的技术限制, 为实现集成化、小型化的时空一致全斯托克斯探测提供了新的思路。

关键词: 偏振光电探测器; 全斯托克斯; 时空一致; 神经网络; 石墨烯

中图分类号: TN967.2; U666.1 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253307.1042

CSTR: 32169.14.OPE.20253307.1042

Full-stokes photodetector based on neural networks

WANG Shoutong¹, ZHANG Ran^{1,2*}, CHU Jinkui^{1,2}, MENG Hailong¹, CAI Dehao¹

(1. Liaoning Provincial Key Laboratory of Micro Nanosystems,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Ningbo Research Institute, Dalian University of Technology, Ningbo 315020, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangr@dlut.edu.cn

Abstract: Traditional Full-Stokes detection methods are based on time-division or spatial-division approaches, which suffer from drawbacks such as large device size, challenging integration, and inability to detect consistently in space and time. Recent advancements in two-dimensional materials and metamaterials have made it possible to realize ultracompact, spatiotemporally coherent Full-Stokes detectors based on well-defined polarization-sensitive structures at subwavelength scales. This study proposes a polarization detector based on graphene-metal nanoantennas, which leverages vector photocurrents generated on graphene and a neural network algorithm for reconstruction, enabling spatiotemporally coherent Full-Stokes parameter detection. Vector photocurrents under different polarization states of incident light were obtained through FDTD simulations. Subsequently, a mapping relationship $\hat{S}=f(\hat{I})$ between the Full-Stokes parameters $\hat{S}$ and the recorded vector photocurrents $\hat{I}$ was established using a neural network algo-

收稿日期: 2025-01-11; 修订日期: 2025-02-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 52275281, No. 52175265)

rithm, successfully enabling the detection of Full-Stokes parameters. At a wavelength of 4 μm , the mean square error was 0.007 69. The relative radius difference of the minimum enclosing spheres for the actual and predicted Stokes parameters of the incident light is 7.68%. This detector design offers a new approach for achieving more integrated and miniaturized spatiotemporally coherent Full-Stokes detection. This detector effectively overcomes the inherent technical bottlenecks of time-division and spatial-division mechanisms, offering a novel approach for achieving more integrated and miniaturized spatiotemporally consistent full-Stokes detection.

Key words: polarization photodetector; full-Stokes; spatiotemporal consistency; neural network; graphene

1 引言

光波包含相位、振幅、频率和偏振等丰富的信息,其中偏振是光的一维固有属性,在光学技术中发挥着至关重要的作用。当光照射到物体表面与物质发生作用后,光的多种属性都会发生变化,其中光的偏振属性可以表征物体的表面粗糙度、介质材料和表面纹理等表面信息^[1-2],因此,偏振探测在医疗诊断^[3-4]、目标识别^[5]、图像处理^[6-7]等领域具有重要的应用。光的偏振信息通常用四维全斯托克斯向量 $\hat{S}=(S_0, S_1, S_2, S_3)^T$ ^[8]来表示,将光从相位、振幅和频率三个维度提高到七个维度,能够提供多维感知信息。

传统的全斯托克斯偏振探测方法可分为分时型探测和分空间型探测。其中,分时型探测^[9-10]是在光学相机中引入可调制的偏振光学器件,在时间上依次获取不同的偏振态信息,这种方法原理简单、易于实现,但是系统误差较大,只适用于静态场景。分空间型主要分为分振幅型、分孔径型和分焦平面型3种。分振幅型探测^[11]是利用分光棱镜将光束分为多路,通过偏振器件和探测器分别进行不同偏振分量的探测,该方法可实现全斯托克斯探测,但是系统复杂、体积较大,无法满足集成化、小型化的要求;分孔径型探测^[12]采用偏心离轴将入射光分为4束,分别透过不同方位的偏振器件,在同一探测器焦平面的不同区域同时探测,该方法设备体积较小,光学系统相对稳定,但是装配困难,对装配精度要求高;分焦平面探测^[13-14]是在传感器成像面上集成微偏振阵列,单次成像即可获得多个偏振分量,该方法进一步缩小了设备尺寸,但是存在瞬时视场误差的不足。

传统的分时与分空间探测方法存在一定的技术限制,迫切需要时空一致的全斯托克斯探测方法。二维材料具有优越的光电特性,在小型化、集成化的光电器件中显示出巨大的潜力。其中,石墨烯是一种具有宽带吸收的无间隙二维材料,并且具有柔韧性、透明性、制备简单等优势。Ma等^[15]利用扭曲双层石墨烯和卷积神经网络,实现了对全斯托克斯偏振测量和波长检测,但是扭曲双层石墨烯的制备十分具有挑战性。由于石墨烯不具备各向异性,以及固有的低吸收和超短载流子寿命,石墨烯光电探测器响应度低,并且具有偏振敏感的石墨烯材料制备困难。超材料的发展为石墨烯光电探测器带来了新的契机。超材料是人工亚波长周期性结构,将超材料作为石墨烯光电探测器的纳米天线,可以实现极端的光约束,增强局域电场几个数量级,从而增强吸收和光与物质的相互作用^[16-17]。纳米天线可以作为小型金属电极来收集载流子,从而产生光电流。因此,通过设计纳米天线的形状,可以实现无滤光片偏振敏感的有效检测^[18-19]。目前,石墨烯-纳米天线混合结构在偏振探测领域主要集中在在线偏振和圆偏振的单一探测。Wei等^[20]利用非中心对称金属纳米天线辅助的体光伏效应实现对线偏振敏感的光检测,在4 μm 的线偏振光均匀照明下,观察到室温下零偏置响应度为16.6 mA/W;通过改变纳米天线形状和分布排列,还分别实现了极化比从负无穷到正无穷的线偏振检测^[21]和有效的圆偏振检测^[22],但是还未实现时空一致的全斯托克斯探测。

针对传统全斯托克斯探测方法体积较大、整体结构复杂、无法完成时空一致的小型化、集成化探测,基于石墨烯-纳米天线集成的偏振探测

器研究大都集中在线偏振或者圆偏振的单一探测等问题上。本文提出了一种基于神经网络的时空一致全斯托克斯光电探测器,采用基底-石墨烯-金属纳米天线的三层结构,4个外围电极用于收集平面内4个方向的光响应电流,金属纳米天线结构对线偏振和圆偏振都产生可检测响应。此种响应不是简单的一阶响应^[23],无法通过建立系统矩阵求解,需要采用神经网络来建立映射关系。神经网络方法可以学习探测器结构和被测系统的所有特征,因此可以有效提高检测精度。仿真设计将探测波段设计在中红外波段,该波段广泛应用于遥感、大气监测、气体检测、医学成像以及材料分析等多个领域。仿真分析在 $4\ \mu\text{m}$ 波段下进行,其他波段可通过改变纳米天线的结构尺寸来完成探测。

2 探测器结构与仿真

探测器整体示意图如图1所示,包括 SiO_2 绝缘基底、石墨烯、金属纳米天线以及四周的金属大电极。石墨烯上沉积倒T形微纳结构阵列,微纳结构单元的垂直和水平长度分布为 $0.75\ \mu\text{m}$ 和 $1.35\ \mu\text{m}$,相邻微纳结构之间的距离保持在 $300\ \text{nm}$ 以上,以避免近场耦合。倒T形微纳结构设计为在 $4\ \mu\text{m}$ 波段下对偏振敏感,在均匀照明和零外部偏压下,石墨烯上生成的光电载流子在水平空间中移动,电流的方向和大小由光的偏振控制。四周大电极会收集光响应电流,分离 x 和 y 方向的电流分量, x 方向上电流由左右两个电极

获得, y 方向上电流由上下两个电极获得,两电极极性互换获取反向电流,确保回路闭合,分时切换极性完成4个电流的测量。根据电极收集到的电流差异性,通过神经网络建立入射光偏振态和矢量电流的映射关系,进而可以解算出入射光的全斯托克斯参数。

探测器中光响应的来源是石墨烯-金属纳米天线界面处产生的局部光电流^[20]。当石墨烯与金属纳米天线沉积时变得掺杂^[24],因此其塞贝克系数也被调整,在石墨烯-纳米天线界面处形成塞贝克梯度。入射光照射下,由于金属纳米天线等离子体激元局域化,入射光集中在纳米天线的边缘;此外,由于金属纳米天线设计成对偏振敏感的结构形状,所以,由此产生的等离子体激元和入射光的偏振态强相关。最终,热载流子被纳米天线等离子体增强激发,然后由塞贝克系数梯度驱动,形成与入射光偏振态强相关的局部定向光电流。当产生局部定向光电流后,石墨烯中局部激发的光电流以全局的方式被周围的电极有效收集^[25-26]。理论研究表明,局部光电流可以同时在整个无间隙材料中建立电场,驱动环境载流子接触电极,由肖克利-拉莫型框架^[27-28]捕获,从而形成全局光电流。根据肖克利-拉莫定理,增加金属纳米天线阵列规模可提升整体光电流,但是石墨烯中金属纳米天线接触引起的非均匀流场与矢量载流子运输不匹配,导致载流子运输中产生阻尼和损失。优化阵列规模可平衡光电流累积与传输损耗,从而提高器件的响应度和偏振分辨率。现有研究表明,最优阵列规模为 5×5 ^[29],但是考虑到实验测量的准确性及测量设备的限制,增大阵列规模可使电流值尽可能接近仪表的满量程,减小测量误差,这里同时制作 20×20 阵列规模的器件,用于初步实验验证。

该器件最终是根据石墨烯上产生的矢量光电流来表示不同的光响应,因此,通过石墨烯中电流流向可以更加直观地观察和入射光偏振态强相关的光响应,同时也可以指导后续的超表面设计。探测器主要工作在室温下,为了模拟整体器件中的全局光响应,应考虑石墨烯中载流子的集体行为。根据相关研究,采用流体力学方程对石墨烯中载流子流动进行建

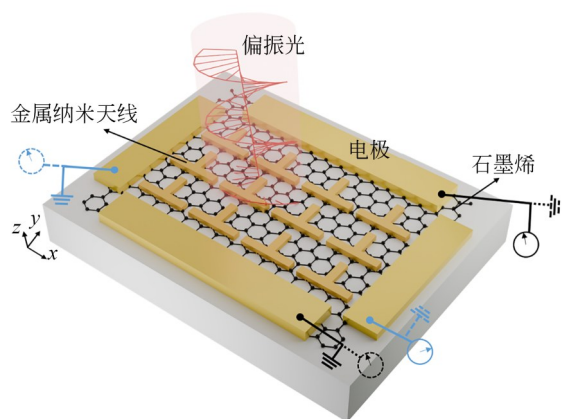


图1 光电探测器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of photodetector

模^[21,30-31],得到:

$$\frac{\partial u(r)}{\partial t} = -\gamma u(r) - (u(r) \cdot \nabla) u(r) + \nu \nabla^2 u(r) - \frac{1}{\rho} \nabla \phi(r) + F(r), \quad (1)$$

其中: $u(r)$ 是载流子的速度, ϕ 是二维平面中的电势, γ 表示欧姆阻尼因子, ν 和 ρ 分别表示石墨烯中电子的黏度和密度。对于石墨烯中给定的电荷密度 n ,可以进一步推导出电流密度 $J(r) = u(r)n$ 。 $F(r)$ 表示石墨烯-金属纳米天线界面处的局部光响应成比例的空间分布驱动力,正比于电场强度和塞贝克系数的梯度,即:

$$F \propto \nabla S \cdot |E|^2, \quad (2)$$

其中 S 表示塞贝克系数,根据式(3)计算。然后,可以根据纳米天线的几何形状来估计轮廓,进而进行塞贝克梯度, E 表示电场强度,可利用时域有限差分法(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)仿真获得。

$$S = -\frac{\pi^2 k_B^2 T}{3e} \frac{1}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \phi}, \quad (3)$$

其中 k_B , T , σ 和 e 分别表示玻尔兹曼常数、温度、石墨烯电导率以及基本电荷。代入计算出的二维驱动力,并根据以前的研究文章和教程作品对式(1)用Python进行数值求解^[32-34],可绘制出石墨烯上的电流流向,如图2所示。

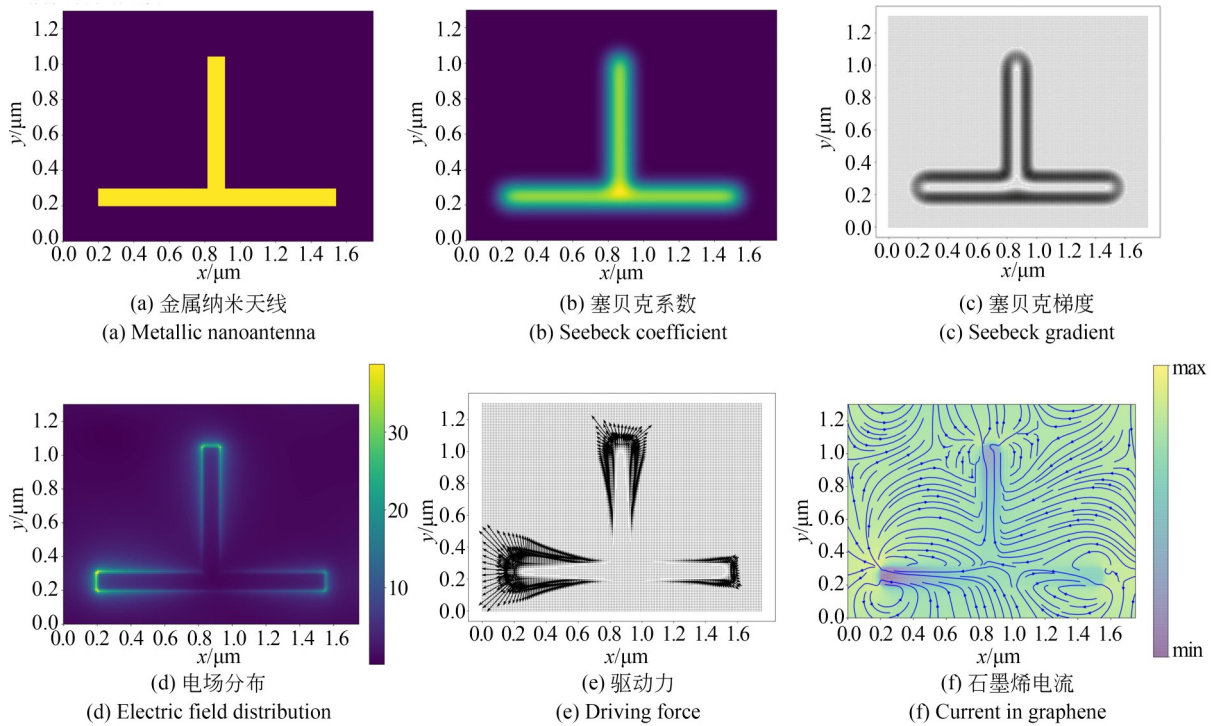


图2 石墨烯电流仿真示意图

Fig. 2 Schematic diagram of graphene current simulation

采用FDTD对金属结构单元在 $4 \mu\text{m}$ 波长下进行优化。其中,用 h 和 v 分别表示金属结构单元的水平 and 垂直长度。由于结构的周期性,沿 x 和 y 方向采用周期性边界条件,沿 z 方向采用完美匹配层(Perfect Matched Layer, PML),石墨烯层数设置为3层,模拟区域的网格精度设置为 10 nm ,采用Palik给出的金参数进行模拟。圆偏振入射光源是由两个相位差为 $\pi/2$ 的线性偏振光源构成的。最优尺寸通过扫描的方法获得,通过

自动化脚本逐一改变参数 h 和 v ,分别设置 h 和 v 的线性变化尺寸,可以得到 h 和 v 不同尺寸组合下的响应结果。

对全斯托克斯参数进行探测需要同时考虑微纳结构在线偏振和圆偏振下的响应。首先,确定对线偏振响应的尺寸范围,在入射波长为 $4 \mu\text{m}$,T形微纳结构厚度为 60 nm ,宽度为 100 nm 的前提下,对T字形结构的长度进行扫描。 h 的扫描范围是 $1000 \sim 1700 \text{ nm}$, v 的扫描

范围是 500~1 000 nm, 得到单一波长下不同尺寸的 T 形微纳结构所对应的吸收率。对 90°线偏

振光和 0°线偏振光下的吸收率进行扫描, 结果分别如图 3(a)和 3(b)所示。

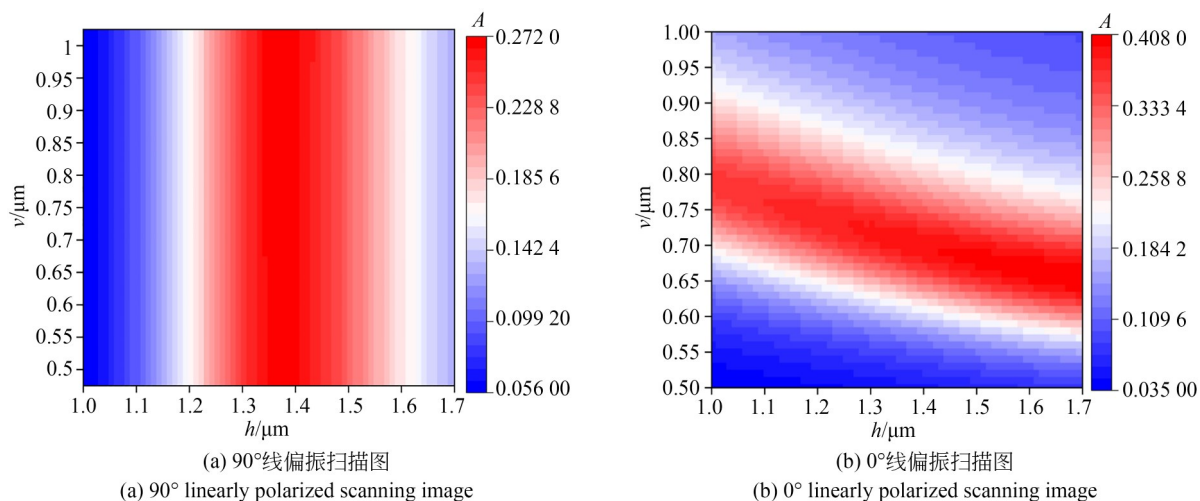


图 3 线偏振响应

Fig. 3 Linear polarization response

90°线偏振下吸收率只跟随 h 变化, 0°线偏振下吸收率随 h, v 变化, 每个 h 下对应一个高吸收率的 v 尺寸, 初步选取 h 在 1.25~1.55, v 在 0.65~0.8 之间, 保证线偏振下有较高的响应, 在此基础上进行圆偏振响应的扫描优化。

通过计算 x 方向上的电流值来判断圆偏振的响应强度, 电流值越大, 说明对圆偏振响应越强, 反之越弱。通过这种方法能够得到不同 h 和 v 尺寸下电流值的热力图, 进而反映圆偏振响应的强弱。利用 FDTD 仿真生成的电场和 Python 建模计算出的矢量电流, 对微纳结构的圆偏振响应进行扫描分析, 结果如图 4 所示。

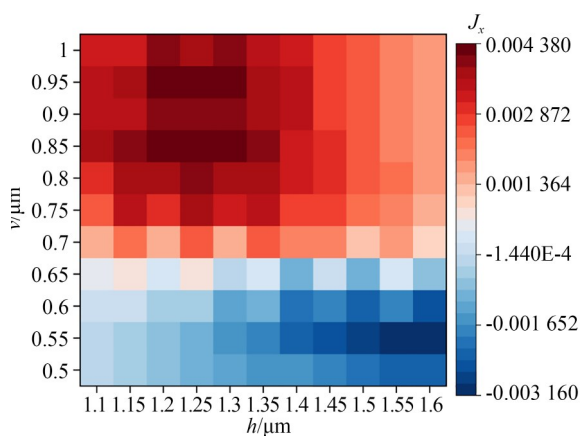


图 4 圆偏振响应扫描图

Fig. 4 Scanning image of circular polarization response

将得到的线偏振和圆偏振响应赋予相同的权重, 求取加权和, 得到对线偏振和圆偏振同时响应的最优尺寸, 结果如图 5 所示。4 μm 波长下, 最优尺寸为 $h=1.35, v=0.75$ 。

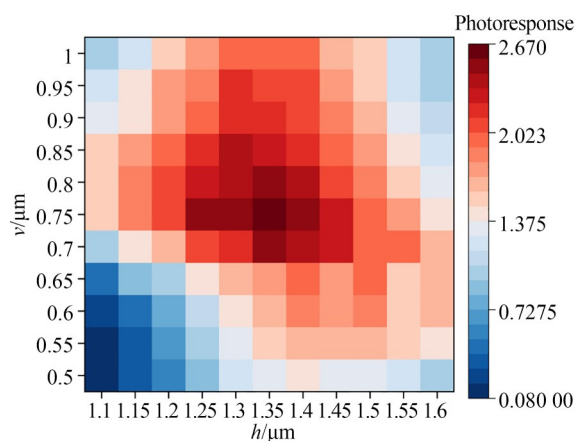


图 5 线偏振和圆偏振的加权和

Fig. 5 Weighted sum of linear and circular polarization responses

3 神经网络解算

探测器依赖矢量光电流来解算出入射光偏振态信息, 但是基于塞贝克效应的光响应是非线性高阶响应^[23], 通过数学方法来建立矢量光电流和入射光偏振态信息并非易事。本器件中, 未知

入射光的偏振态信息都隐藏在矢量光电流 $(I_1, I_2, I_3, I_4)^T$ 数组信息中,利用BP神经网络建立映射关系 $\hat{S}=f(\hat{I})$,如图6(a)所示。BP神经网络作为应用较为广泛的神经网络之一,拥有非线性映射强,以及学习自适应和自学习能力较好的优点^[35]。BP神经网络通常由输入层、隐含层和输出层3部分组成。训练所用数据集中,通过FDTD仿真软件中更改入射光振幅和相位来获

得不同入射光的偏振参数,通过Python建模仿真石墨烯光电流来获得矢量光电流输入,80%和20%的数据集分别作为训练和验证数据集。

本研究建立的全斯托克斯参数解算神经网络模型由输入层(4个神经元)、隐藏层和输出层(4个神经元)组成,如图6(b)所示。输入层和输出层分别代表4个测量的矢量光电流(I_1-I_4)和4个斯托克斯参数(S_0-S_3)。经过反复调试,选择隐含层节点数为10,Leaky ReLU作为隐含层中的非线性激活函数,学习率设置为0.001。神经网络模型解算的具体流程如图7所示。

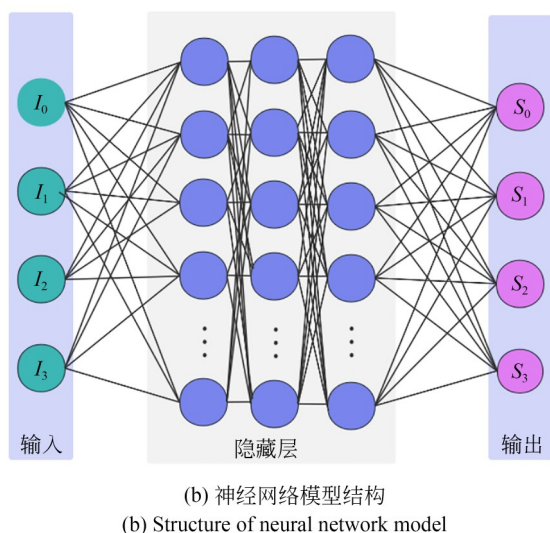
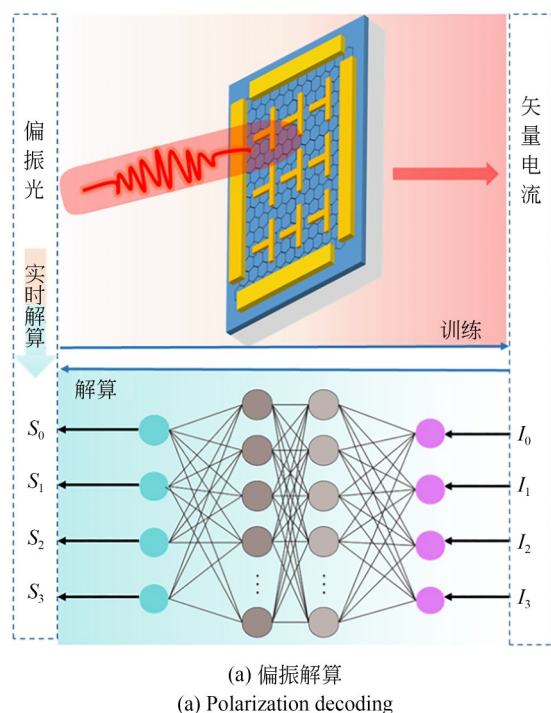


图6 神经网络解算示意图

Fig. 6 Schematic diagram of neural network solving

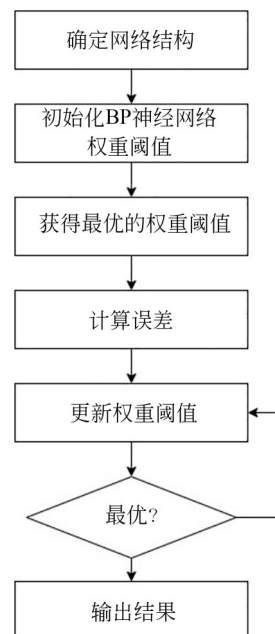


图7 神经网络解算流程

Fig. 7 Neural network solving flowchart

将实际值与预测值之间的均方误差(Mean Square Error, MSE)作为评价网络有效性验证的指标,其数学表达式为:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2, \quad (4)$$

其中: $\hat{y}_i$ 为训练样本对应的实际值, y_i 为样本的预测值, n 为样本个数。

如图8所示,学习曲线表明网络模型可以快速地收敛。经过系统的优化,使用BP神经网络预测的斯托克斯参数与输入值高度一致,整体真实值和预测值之间的MSE为0.007 69, S_0, S_1, S_2 和 S_3 在4 μm 处的MSE分别为0.000 82,

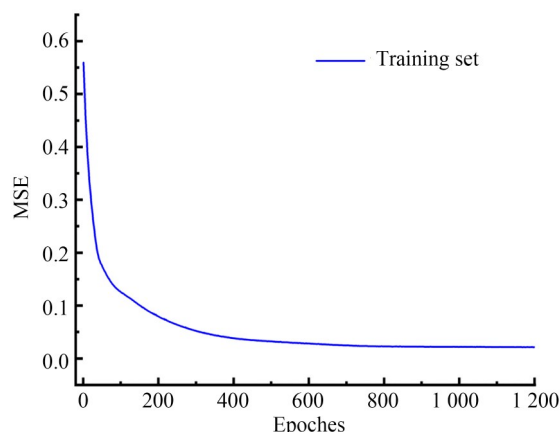


图8 神经网络学习曲线

Fig. 8 Learning curve of neural network

0.000 76, 0.017 29 和 0.011 89。

利用最小包围球可以更清晰地观测到入射光全斯托克斯参数实际值和预测值在空间分布上的差异,将 S_1 , S_2 和 S_3 参数作为一个整体来评估误差。利用相对半径差 R_r 表示入射光斯托克斯参数实际值和预测值最小包围球之间的分布差异,表达式如下:

$$R_r = \frac{|R_1 - R_2|}{\max(R_1, R_2)}, \quad (5)$$

其中: R_1 表示入射光实际值斯托克斯参数的最小包围球半径, R_2 表示入射光预测值斯托克斯参数的最小包围球半径。

如图9所示,入射光实际值和预测值斯托克斯参数的最小包围球半径分别为1和1.083 2,相对半径差为7.68%。结合上述计算的MSE,单独和组合的斯托克斯参数反演误差都较小,满足探测器要求,证明了利用神经网络来解算全斯托克斯参数的可行性,该方法具有潜在的应用前景。

4 结 论

本文通过仿真验证了一种在中红外波段可实现时空一致的全斯托克斯检测石墨烯-金属纳米天线光电探测器。该探测器通过设计金属纳

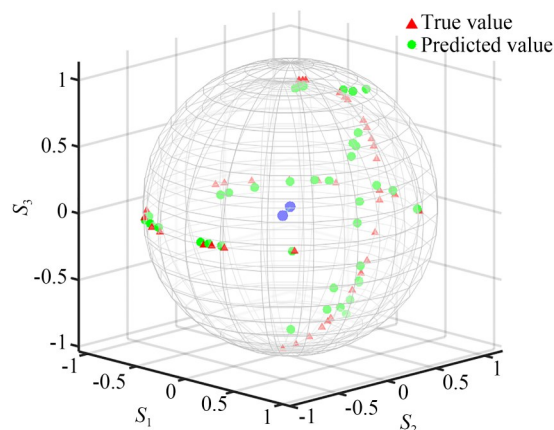


图9 斯托克斯参数最小包围球

Fig. 9 Schematic diagram of minimum enclosing sphere for Stokes parameters

米天线实现对不同入射光的偏振敏感响应,利用神经网络模型建立入射光偏振态和矢量光电流之间的映射关系,无需额外的时间和空间调制,具备时空一致的优良特性。经过仿真实验验证,反演全斯托克斯误差分别为0.000 82, 0.000 76, 0.017 29 和 0.011 89,入射光实际值和预测值斯托克斯参数的最小包围球相对半径差为7.68%,可实现对全斯托克斯参数的有效探测。因其时空一致特性,有效克服了分时与分空间探测机制所固有的显著系统误差、系统复杂度高以及装备困难等技术瓶颈,器件更加集成化和小型化,并且通过设计金属纳米天线的结构,可以扩展到其他波段的探测,有望在偏振探测领域得到更广泛的应用。

作者贡献说明:

王守桐:器件整体设计,仿真分析,结构优化及论文撰写;

张然:实验方案的提出,项目管理,调查研究及技术指导;

褚金奎:方案优化及技术支持;

蒙海龙:神经网络算法优化;

蔡德好:工艺制作验证。

参考文献:

- [1] 张弛, 吴鑫, 谢建. 基于双向反射分布函数的海面红外偏振特性表征模型[J]. 光学精密工程,

2020, 28(6): 1303-1313.

ZHANG CH, WU X, XIE J. Infrared polarization characteristics on sea surface based on bidirectional reflection distribution function [J]. Opt. Precision

- Eng.*, 2020, 28(6): 1303-1313. (in Chinese)
- [2] GIAKOS G C. Multifusion, multispectral, optical polarimetric imaging sensing principles [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2006, 55(5): 1628-1633.
- [3] CHEN Y T, CHU J K, LIN F L, *et al.* Polarization clustering of biological structures with Mueller matrix parameters [J]. *Journal of Biophotonics*, 2023, 16(2): e202200255.
- [4] 褚金奎, 丁晓涵, 陈永台, 等. 硬化性腺病和浸润性导管癌组织的 Mueller 矩阵表征 [J]. *中国激光*, 2024, 51(21): 2107203.
- CHU J K, DING X H, CHEN Y T, *et al.* Mueller-matrix characterization of sclerosing adenosis and invasive ductal carcinoma tissues [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(21): 2107203. (in Chinese)
- [5] DONG Z M, ZHENG D F, HUANG Y T, *et al.* A polarization-based image restoration method for both haze and underwater scattering environment [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 1836.
- [6] 褚金奎, 张培奇, 成昊远, 等. 基于特定偏振态成像的水下图像去散射方法 [J]. *光学精密工程*, 2021, 29(5): 1207-1215.
- CHU J K, ZHANG P Q, CHENG H Y, *et al.* De-scattering method of underwater image based on imaging of specific polarization state [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(5): 1207-1215. (in Chinese)
- [7] 王楚宁, 赵开春. 基于暗通道先验原理的偏振图像去雾 [J]. *光学精密工程*, 2023, 31(23): 3474-3481.
- WANG CH N, ZHAO K CH. Polarization image defogging based on dark channel prior principle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(23): 3474-3481. (in Chinese)
- [8] CARDOSO S S S, CARTWRIGHT J H E, HUPPERT H E, *et al.* Stokes at 200: a celebration of the remarkable achievements of Sir George Gabriel Stokes two hundred years after his birth [J]. *Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 2020, 378(2174): 20190505.
- [9] 韩勇, 赵开春, 尤政. 快速旋转式偏振成像探测装置的设计 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(10): 2345-2354.
- HAN Y, ZHAO K CH, YOU ZH. Developement of rapid rotary polarization imaging detection devices [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(10): 2345-2354. (in Chinese)
- [10] 张海洋, 李颐, 颜昌翔, 等. 分时偏振光谱测量系统的起偏效应校正 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(2): 325-333.
- ZHANG H Y, LI Y, YAN CH X, *et al.* Calibration of polarized effect for time-divided polarization spectral measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(2): 325-333. (in Chinese)
- [11] 褚金奎, 林威, 张然, 等. 偏振探测系统的图像配准 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(5): 1181-1190.
- CHU J K, LIN W, ZHANG R, *et al.* Image registration of polarimeters [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(5): 1181-1190. (in Chinese)
- [12] REN Z G, LI X Y, NI D W, *et al.* Design of polarization imaging optical system with divided aperture [C]. *9th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies*. June 26-29, 2018. Chengdu, China. SPIE, 2019: 84.
- [13] 马一哲, 王世勇, 雷腾, 等. 分焦平面红外偏振微扫描图像超分辨率重建 [J]. *光学精密工程*, 2023, 31(16): 2418-2429.
- MA Y ZH, WANG SH Y, LEI T, *et al.* Super-resolution reconstruction of infrared polarization microscan images in focal plane [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(16): 2418-2429. (in Chinese)
- [14] 朱树旺, 赵开春. 分焦平面偏振图像传感器信噪比标定 [J]. *光学精密工程*, 2023, 31(7): 1012-1021.
- ZHU SH W, ZHAO K CH. Calibration of signal-to-noise ratio of sub focal plane polarization image sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(7): 1012-1021. (in Chinese)
- [15] MA C, YUAN S F, CHEUNG P, *et al.* Intelligent infrared sensing enabled by tunable moiré quantum geometry [J]. *Nature*, 2022, 604(7905): 266-272.
- [16] PINES D. Collective energy losses in solids [J]. *Reviews of Modern Physics*, 1956, 28(3): 184-198.
- [17] JIANG Q B, PHAM A, BERTHEL M, *et al.* Directional and singular surface plasmon generation in chiral and achiral nanostructures demonstrated by leakage radiation microscopy [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(6): 1116-1124.
- [18] LI L F, WANG J Z, KANG L, *et al.* Monolithic

- full-stokes near-infrared polarimetry with chiral plasmonic metasurface integrated graphene-silicon photodetector [J]. *ACS Nano*, 2020, 14 (12) : 16634-16642.
- [19] DAI M J, WANG C W, QIANG B, *et al.* On-chip mid-infrared photothermoelectric detectors for full-Stokes detection[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 4560.
- [20] WEI J X, LI Y, WANG L, *et al.* Zero-bias mid-infrared graphene photodetectors with bulk photoreponse and calibration-free polarization detection[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 6404.
- [21] WEI J X, XU C, DONG B W, *et al.* Mid-infrared semimetal polarization detectors with configurable polarity transition [J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(8): 614-621.
- [22] WEI J X, CHEN Y, LI Y, *et al.* Geometric filterless photodetectors for mid-infrared spin light [J]. *Nature Photonics*, 2023, 17(2): 171-178.
- [23] YANG M-M, KIM D J, ALEXE M. Flexo-photovoltaic effect [J]. *Science*, 2018, 360 (6391) : 904-907.
- [24] GIOVANNETTI G, KHOMYAKOV P A, BROCKS G, *et al.* Doping graphene with metal contacts [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101 (2): 026803.
- [25] WOESSNER A. Near-field photocurrent nanoscopy on bare and encapsulated graphene [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 10783.
- [26] LUNDEBERG M B, GAO Y D, WOESSNER A, *et al.* Thermoelectric detection and imaging of propagating graphene plasmons [J]. *Nature Materials*, 2017, 16(2): 204-207.
- [27] HE Z. Review of the Shockley-Ramo theorem and its application in semiconductor gamma-ray detectors [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2001, 463(1/2): 250-267.
- [28] SONG J C W, LEVITOV L S. Shockley-Ramo theorem and long-range photocurrent response in gapless materials [J]. *Physical Review B*, 2014, 90(7): 075415.
- [29] CHEN H Y, ZHENG Y S, JIN C Q, *et al.* Geometric configuration for maximizing photocurrent collection in bulk photovoltaic effect devices [J]. *Optics Letters*, 2025, 50(1): 85-88.
- [30] BANDURIN D A, SHYTOV A V, LEVITOV L S, *et al.* Fluidity onset in graphene [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 4533.
- [31] BARBA, LORENA, FORSYTH G. CFD Python: the 12 steps to Navier-Stokes equations [J]. *Journal of Open Source Education*, 2018, 1(9): 21.
- [32] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, *et al.* Electric field effect in atomically thin carbon films [J]. *Science*, 2004, 306 (5696) : 666-669.
- [33] KIM S, NAH J, JO I, *et al.* Realization of a high mobility dual-gated graphene field-effect transistor with Al_2O_3 dielectric [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(6): 062107.
- [34] ZUEV Y M, CHANG W, KIM P. Thermoelectric and magnetothermoelectric transport measurements of graphene [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(9): 096807.
- [35] XIAN S L, HUANG S S, QIU K H, *et al.* Highly precise and broadband full-stokes polarimeter based on a deep learning algorithm [J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(7): 2432-2439.

作者简介:



王守桐(1998—),男,河南濮阳人,硕士研究生,2022年于湖北工业大学获得学士学位,主要从事全斯托克斯偏振光电探测器的研究。E-mail: shoutongwang@mail.dlut.edu.cn

通讯作者:



张然(1984—),男,辽宁锦州人,博士,副教授,博士生导师,2007年、2013年于大连理工大学分别获得学士和博士学位,主要从事仿生偏振光导航、仿生视觉认知技术、亚波长光学结构设计、微纳传感器、执行器等方面的研究。E-mail: zhangr@dlut.edu.cn