光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250422003

基于SOI超表面的全斯托克斯偏振探测器研究

俞惟明，赵兴岩*

（上海大学 微电子学院，上海 201800）

摘　要： 偏振探测作为表征光与物质相互作用的关键技术手段，近年来在生物医学成像、高精度光学测量及军事目标识别等领域展现出重要的应用前景。针对光电系统集成化与微型化的发展需求，文章提出一种基于绝缘体上硅（SOI）平台的全斯托克斯偏振探测器。该方案通过将SOI器件的500 nm器件层局部设计成超表面结构，并设计为pin型光电探测器以实现单片集成，成功解决了传统偏振探测系统体积庞大、集成度低的技术瓶颈。结果表明，所设计的探测器在780 nm工作波长下展现出优异的性能，手性超表面像素的圆二色性达到42%，线性超表面像素的消光比高达10 dB。值得注意的是，该器件实现了高精度的斯托克斯参数重构，其中S_1，S_2和S_3参数的平均重构误差分别为0.30%，0.85%和11.17%。该研究不仅为集成化偏振探测系统的设计提供了新思路，同时也展现了超表面技术在光电集成领域的巨大应用潜力。

关键词： 全斯托克斯参数；集成光电探测器；SOI超表面；偏振探测

中图分类号： TN215　**文章编号：** 1001－5868(2025)03－0432－06

Study on a Full-Stokes Polarization Photodetector Based on a Silicon-On-Insulator Metasurface

YU Weiming, ZHAO Xingyan

（**School of Microelectronics, Shanghai University, Shanghai 201800, CHN**）

Abstract: Polarimetric detection, a critical technical approach for characterizing light - matter interactions, has been widely applied in biomedical imaging, high-precision optical metrology, and military target identification in recent years. To address and fulfill the development requirements for integration and miniaturization of optoelectronic systems, an innovative full-Stokes polarimetric detector, based on the silicon-on-insulator (SOI) technology, is proposed in this study. In this design, a 500 nm-thick SOI device layer is selectively patterned to form a metasurface structure and simultaneously engineered as a pin photodetector. This approach enables monolithic integration that effectively addresses the critical limitations of conventional polarization detection systems, i.e., their bulky form factors and poor integration capability. The results demonstrate excellent device performance at the operational wavelength of 780 nm, where the chiral metasurface pixels exhibit circular dichroism of 42%, and the linear metasurface pixels achieve an extinction ratio of 10 dB. Notably, high-accuracy Stokes parameter reconstruction is accomplished, with average measurement errors of 0.30%, 0.85%, and 11.17% for the parameters S_1, S_2, and S_3, respectively. This study provides a novel design strategy for integrated polarimetric systems as well as highlights the considerable application potential of metasurface technology in the field of optoelectronic integration.

Key words: Full-Stokes parameter; integrated photodetector; SOI metasurface; polarization detection

收稿日期：2025－04－22.

基金项目：上海市自然科学基金项目（24ZR1425000，24ZR1425000）。

* **通信作者：**赵兴岩

0　引言

光的偏振态是电磁波的基本属性之一，其表征与探测对揭示光与物质相互作用机制具有重要意义。斯托克斯矢量(S_0,S_1,S_2,S_3)作为描述偏振态的完备参数，已经广泛应用于光通信[1-3]、生物传感[4-6]、遥感技术[7-9]等诸多领域，对推动相关技术革新和发展起到了关键作用。传统的全斯托克斯探测系统依赖于偏振片和波片的多次机械旋转，这导致采集时间延长，使其不适合捕获动态的光信息[10]。此外，其庞大的体积与复杂的光路设计严重阻碍了系统集成化发展。

超表面作为一种亚波长人工结构，可以灵活调控光波的振幅、相位及偏振态，为紧凑型偏振探测提供了新的解决方案[11-13]。基于超表面的像素化全斯托克斯偏振探测方案已经被广泛研究，各种集成线性偏振探测光路与圆偏振探测光路的方案已被提出。Basiri等提出一种受昆虫视觉启发的双层手性超表面设计方案，其与线性超表面像素集成，实现了全斯托克斯偏振探测[14]；2019年，Bai等发表一项七像素的全斯托克斯偏振探测超表面设计方案，将“十”字型超表面单元阵列与线性超表面单元阵列堆叠实现了圆偏振探测功能的像素[15]。虽然双层超表面堆叠的结构设计能够实现圆偏振探测光路的片上集成，但是这种三维结构大大增加了制造工艺的难度，三维制造中的对准问题限制了实现双层超表面制造的可能性。

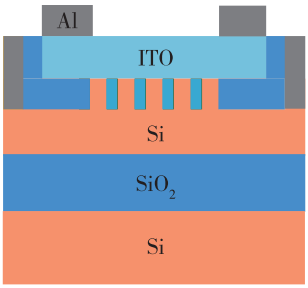
通过二维手性设计超表面单元能够解决三维结构制造困难的问题。2022年，Dai等运用“之”字形的金手性超表面单元结构，实现了左圆偏振光与右圆偏振光的选择性吸收，并通过塞贝克效应实现热电流读出，再通过不同阵列的摆放角度，实现了线性偏振与圆偏振探测的片上集成[16]。Wei等则使用“T”字形的结构，利用塞贝克效应：不同偏振光在金超表面单元上被吸收而且在不同区域产生热量。不同方向的温度梯度在二维材上产生不同方向热电流，最终实现矢量型的全斯托克斯偏振探测[17]。

虽然这类金属超表面在全斯托克斯探测方面已取得进展[14-19]，但其固有的欧姆损耗与低效率问题制约了进一步应用。相比之下，全介质超表面凭借其低损耗的优势已被广泛研究，其中硅材料以其高折射率特性及CMOS工艺兼容性等优势，成为更具潜力的解决方案[20-23]。Zhang等提出一种基于SOI的超表面全斯托克斯偏振探测方案，设计实现了手性圆偏振滤波片与线性线偏振滤波片的光学滤波片功能[21]。2023年，Ren等利用全硅超表面实现了长波红外的偏振分光器件，不同偏振光经过超表面后会被聚焦到特定的位置[24]。然而，现有这些研究多集中于光学滤波功能，仍需依赖片外探测器进行信号读取。虽然，Li等实现了金超表面与石墨烯的集成探测[18]，但其工作波段限于通信波长。鉴于可见光波段在生物荧光探测与偏振成像等领域的重要价值，开发可见光兼容的集成化偏振探测器迫在眉睫。

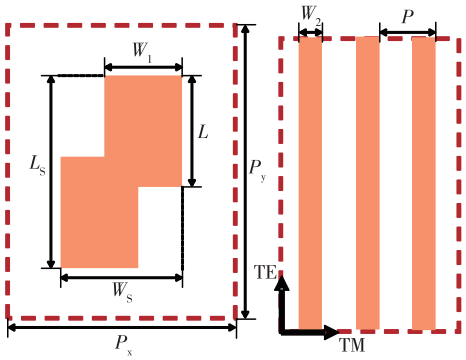
针对上述问题，本研究提出一种基于SOI平台的光电一体的全斯托克斯偏振探测器。通过将SOI的器件层设计为偏振敏感超表面，结合pin型光电二极管结构，实现了780 nm波段下圆二色性高于42%与消光比大于10 dB的偏振敏感探测器设计，为集成偏振探测系统提供了新方案。

1　基于SOI超表面的全斯托克斯偏振探测器设计

基于SOI超表面的全斯托克斯偏振探测器设计结构如图1所示。超表面是对500 nm SOI器件层的部分厚度进行单元结构刻蚀设计，如图1(a)所示。刻蚀形成的硅(Si)纳米柱周围采用二氧化硅(SiO_2)进行填充，硅纳米柱顶部与透明电极氧化铟锡(ITO)接触。图1(b)为超表面单元结构示意图，ITO厚度以及硅纳米柱刻蚀深度分别为t_1和t_2。圆偏振敏感像素采用“之”字形结构设计，针对左圆偏振(LCP)光与右圆偏振光(RCP)有吸收差异。线偏振敏感像素单元则使用传统的线性光栅结构，图1(b)中右图显示了90°线性像素的单元结构。TE光定义为平行于90°像素光栅轴方向偏振的线偏振光；TM光则定义为垂直于90°像素光栅方向偏振的线偏振光。



(a) 探测器结构

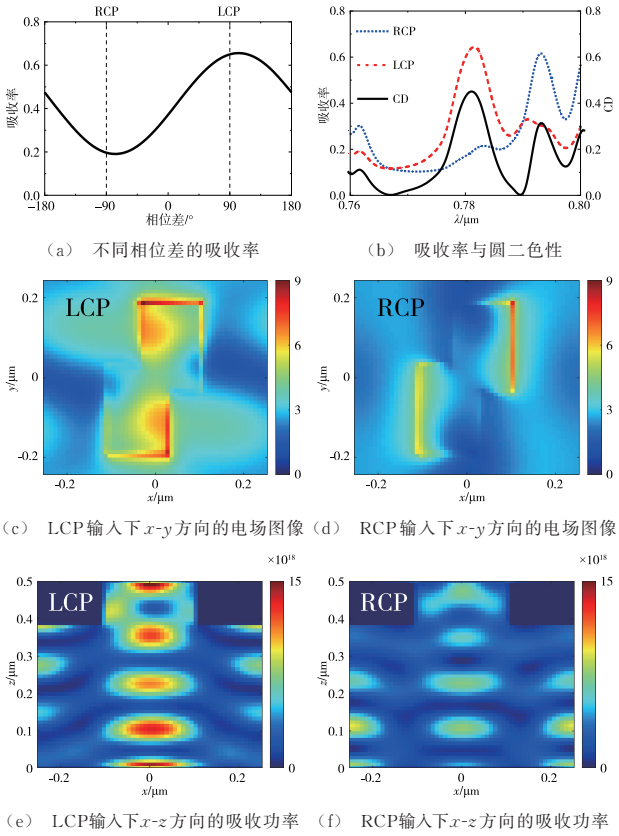


(b)像素单元结构

图1 SOI偏振探测超表面结构示意图

光学仿真采用基于时域有限差分法(FDTD)的仿真方法,在仿真设置中,超表面单元的水平x-y方向设置为周期性边界条件以模拟周期性的超表面阵列,在超表面单元的垂直z方向则选择完美匹配层边界条件(PML)以减少边界反射等带来的影响。优化则采用粒子群优化算法(PSO)进行。线偏振光源采用平面光,圆偏振光源由两束线偏振态正交的线偏振平面光源构成,通过控制两束光的相位差来操纵圆偏振态。经过优化的超表面尺寸参数如下:W_1=140 nm,L=230 nm,W_S=210,L_S=390 nm,P_x=490 nm,P_y=510 nm,W_2=210 nm,P=550 nm,t_1=200 nm,t_2=120 nm。

对于左手性的超表面单元,其对圆偏振光有吸收差异,如图2(a)所示,手性单元在不同相位差的正交线偏振光输入下表现出明显的圆偏振响应,在右圆偏振输入下的吸收率明显低于左圆偏振下的吸收率。图2(b)为不同圆偏振光输入下的吸收率与圆二色性(CD)光谱图,其定义式为$CD=|A_{RCP}-A_{LCP}|$,其中A_{RCP}和A_{LCP}分别为右圆偏振与左圆偏振光输入下的吸收率,左手性像素单元的圆二色性差异达到了42%。图2(c)与图2(d)为位于手性单元上表面,左右圆偏振输入下的电场分布情况,可以明显看到左右圆偏振在超表面单元上引发了不同的共振增强。当左圆偏振光输入时,在超表面单元的y方向引发可强共振,而当右圆偏振光输入时,则是在x方向表面引发了一定的共振。对应于图2(a),左圆偏振引发的共振增强明显,因此其吸收率明显高于右圆偏振输入下的吸收率。图2(e)与(f)展示了左圆偏振与右圆偏振光输入下在器件层内的吸收功率情况,颜色棒的单位为W/m^3。从图中能够明显看出,左圆偏振在超表面经过共振增强后被有效吸收,共振增强方向对应图2(c)中的电场方向,而右圆偏振没有被增强,导致吸收现象不明显。



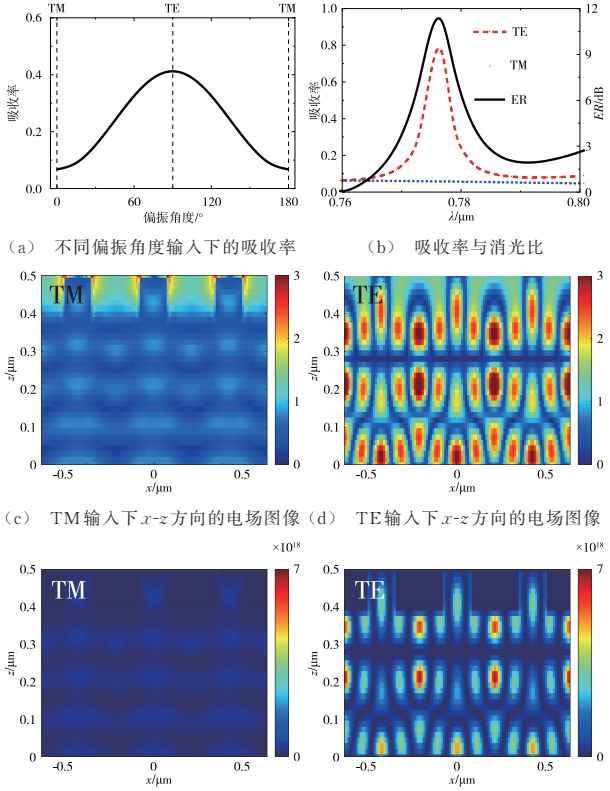
(a) 不同相位差的吸收率 (b) 吸收率与圆二色性

(c) LCP输入下x-y方向的电场图像 (d) RCP输入下x-y方向的电场图像

(e) LCP输入下x-z方向的吸收功率 (f) RCP输入下x-z方向的吸收功率

图2 左手性像素单元性能示意图

线性光栅设计能够满足对线性偏振光的敏感作用。90°线性像素单元吸收率随偏振角度变化曲线如图3(a)所示,可以看到TE光的吸收率明显高于TM光,TM光吸收率接近0,表现出良好的偏振滤波性能,并且在0°到180°的线偏振角度变化区间内,线性光栅有明显的线偏振响应。图3(b)展示了线性像素单元的光谱图像,消光比ER定义为:$ER=-10\times\log(A_{TM}/A_{TE})$,其中$A_{TE}$和$A_{TM}$分别为TE和TM线偏振光的吸收率。可以看到,在设计波长780 nm处存在明显的线性偏振吸收差异,消光比在10 dB左右。从图3(c)与(d)中可以明显看出,当TM光入射时,光在表面发生共振,几乎被阻挡在线性光栅上层;而当TE光入射时,在超表面内出现了明显的电场共振增强。从图3(e)与(f)中能够更加明显地看出,由于TM光在超表面上被阻挡,几乎看不到吸收现象,而TE光在超表面内共振明显,吸收现象显著增强,这进一步体现了超表面的良好的偏振筛选性能。



（a）　不同偏振角度输入下的吸收率　　（b）　吸收率与消光比

（c）　TM输入下x-z方向的电场图像（d）　TE输入下x-z方向的电场图像

（e）　TM输入下x-z方向的吸收功率（f）　TE输入下x-z方向的吸收功率

图3　90°线性像素单元性能示意图

为实现光电一体化，需要进一步对SOI超表面进行探测器集成设计。考虑到pin型探测器高灵敏度、低噪声响应速度快等优势，最终选择采用pin型探测器的设计方案。由图2与3中的吸收功率结果可以看出，光吸收基本分布在整个器件层中。为了使光吸收集中在pin型结构的本征区内，将500 nm的器件层顶部100 nm进行n型高掺杂，掺杂浓度为5×10^{19} cm^{-3}，与透明电极ITO相连构成阴极。器件层中400 nm为1×10^{15} cm^{-3}的n型低掺杂本征区。超表面刻蚀区域边缘的器件层则使用p型高掺杂，掺杂浓度为5×10^{19} cm^{-3}，与金属电极相连构成阳极。硅与电极间，电子空穴的表面复合速率均为1×10^{7} cm/s；硅与氧化硅之间的电子空穴表面复合速率为5×10^{4} cm/s。电学仿真中设置超表面像素大小为5×10 μm，仿真示意图如图4所示。

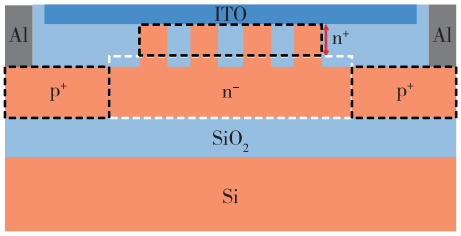


图4　探测器电学仿真结构示意图

电学设计目的是在光在被探测器吸收后能够产生明显的光电流，低噪声的探测器设计可以增加偏振探测的全斯托克斯参数重构精度。基于SOI的超表面偏振探测器I-V曲线如图5所示。可以看到，所设计的SOI超表面探测器产生的光电流明显高于暗电流几个数量级，表现出良好的光响应。此外，当pin反偏时，各种典型的偏振态输入探测器产生的电流有明显差异。由于暗电流大小可以忽略不记，后续电流均为净光电流。

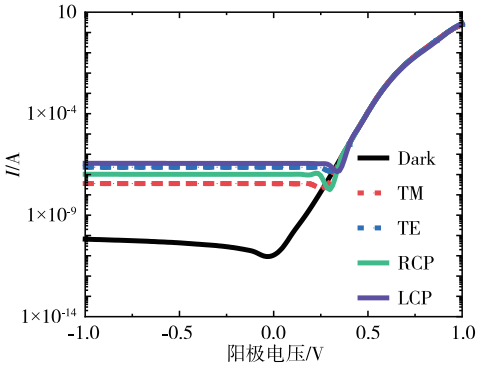
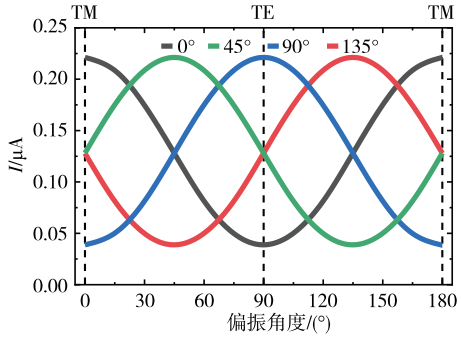


图5　SOI超表面探测器I-V曲线

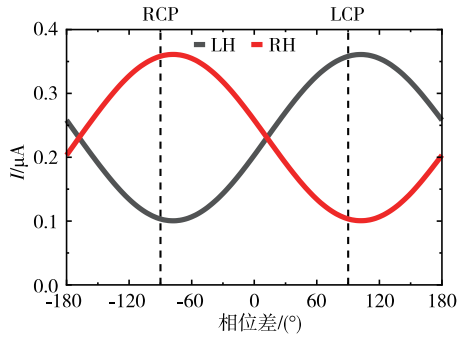
2　全斯托克斯偏振探测结果分析

手性像素单元设计由于其在水平x与y方向的尺寸存在差异，总体上呈现一个长方形结构，这会造成手性像素单元无法避免地存在线偏振响应。为了消除手性像素存在线偏振响应造成计算误差的问题，选择采用六像素全斯托克斯偏振探测方案（0°，45°，90°，135°四个线性像素与左手性、右手性两个手性像素）。六像素的好处在于，对于线性像素，可以增加45°与135°偏振态重构的准确性，减少0°与90°像素值对计算结果的影响；对于手性像素，将两个镜像的手性像素的值相减可以有效抵消线偏振响应造成的影响；并且在实际情况中，将偏振态正交的像素分别进行计算可以减少像素之间差异带来的影响。根据图6所得到的各个像素的电流情况，可以注意到左手性像素并没有在右圆偏振光输入下产生的电流最小，在左圆偏振光输入下产生的电流最大，而是有一定偏移，这在一定程度上会影响后续斯托克斯参数的重构计算。基于SOI的全斯托克斯偏振探测超表面进行斯托克斯参数计算前，需要对得到的电流进行归一化和修正处理，使斯托克斯参数重构计算更加精确。修正后的电流$I_i'=|I_i-I_{TM}|/(I_{TE}-I_{TM})$，其中$I_i$代表各个线性像

素得到的电流值，$i=0°,45°,90°,135°$，I_{TE}和I_{TM}分别为0.22与0.04，代表90°像素下TE与TM光产生的电流；$I'_{jH}=\left|I_{jH}-I_R\right|/(I_L-I_R)$，其中$I_{jH}$代表各个手像素得到的电流值，$j\in\{R,L\}$，$R$与$L$分别代表右手性与左手性手性像素，$I_R$和$I_L$分别为左手性像素下RCP与LCP产生的光电流，取值分别为0.10与0.36。



（a）线性像素电流随偏振角度变化曲线



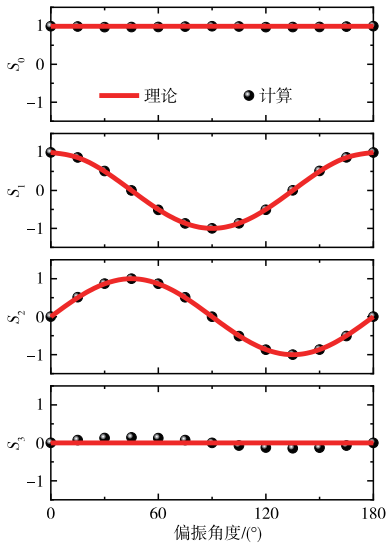
（b）手性像素电流随偏振相位差变化曲线

图6 各像素电流曲线

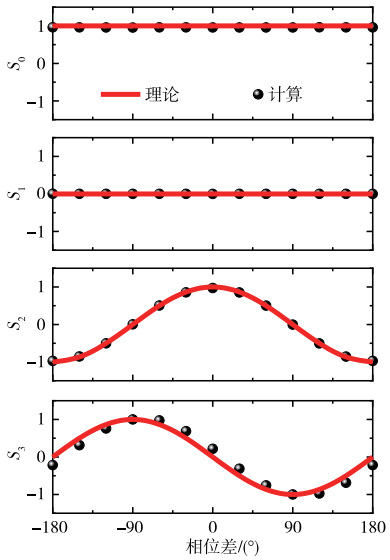
经过修正后，通过下列公式计算斯托克斯参数：

$$S=\begin{bmatrix}S_0\\S_1\\S_2\\S_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}I'_{0°}+I'_{90°}\\I'_{0°}-I'_{90°}\\I'_{45°}-I'_{135°}\\I'_{RH}-I'_{LH}\end{bmatrix}\tag{1}$$

计算得到的重构斯托克斯参数如图7所示。图中展现出的计算结果中，重构的参数与理论参数符合性良好。可以注意到，仅有线偏振输入时，S_3参数不全为0，这是由手性像素设计结构形状固有的线偏振响应没有得到完全消除所致。当输入的光为带有相位差的正交极化偏振光时，S_3参数有误差，这是由设计中手性单元像素引起的偏振响应角度偏移导致，如图2(a)所示。图7中所展示的斯托克斯重建效果在线性参数S_1与S_2上表现出了高度一致性，S_3参数偏移极小，计算值与理论相匹配，表现出优异的全斯托克斯偏振探测性能，实现了高精度的偏振信息重构。S_1，S_2与S_3参数重构平均误差分别为0.30%，0.85%和11.17%。



（a）线性偏振输入



（b）两正交偏振输入

图7 全斯托克斯参数重构结果

3 结论

本文利用粒子群优化算法，设计了基于SOI超表面的全斯托克斯偏振探测器。该方案的应用波长为780 nm，通过对500 nm SOI器件层部分厚度进行超表面设计，实现了手性像素超过42%的圆二色性差异，线性像素超过10 dB的消光比性能。本方案设计的全斯托克斯重构误差主要来源于手性像

素偏振敏感角度偏移以及线性偏振响应，但是在进行参数修正后，理论参数与计算结果表现出较强的一致性。该设计与成熟的CMOS工艺技术兼容，将为集成与紧凑的光电一体化的超表面全斯托克斯偏振探测器设计提供新的思路。

参考文献：

[1] Wang Y, Yang C, Wang Y, et al. Gigabit polarization division multiplexing in visible light communication[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 1823-1826.

[2] Gaiarin S, Perego A M, da Silva E P, et al. Dual-polarization nonlinear Fourier transform-based optical communication system[J]. Optica, 2018, 5(3): 263-270.

[3] Wang X, Hu T, Li D, et al. Performances of polarization-retrieve imaging in stratified dispersion media [J]. Remote Sensing, 2020, 12(18): 2895.

[4] de Boer J F, Milner T E, van Gemert M J, et al. Two-dimensional birefringence imaging in biological tissue by polarization-sensitive optical coherence tomography[J]. Optics Letters, 1997, 22(12): 934-936.

[5] Delalieux S, Auwerkerken A, Verstraeten W W, et al. Hyperspectral reflectance and fluorescence imaging to detect scab induced stress in apple leaves[J]. Remote Sensing, 2009, 1(4): 858-874.

[6] Lu G, Fei B. Medical hyperspectral imaging: a review [J]. Journal of Biomedical Optics, 2014, 19(1): 10901.

[7] Herman M, Deuzé J L, Devaux C, et al. Remote sensing of aerosols over land surfaces including polarization measurements and application to POLDER measurements [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102 (D14): 17039-17049.

[8] Scott Tyo J, 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] 程　峰. 基于偏振和激光雷达遥感的长三角地区气溶胶信息提取及其时空变化研究[J]. 测绘学报, 2019, 48(6): 803.
Cheng Feng. Study on the extraction of aerosol information and its spatial-temporal changes based on PARASOL and CALIPSOL remote sensing data in the Yangtze River Delta [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48 (6): 803.

[10] Berry H G, Gabrielse G, Livingston A E. Measurement of the stokes parameters of light[J]. Applied Optics, 1977, 16 (12): 3200-3205.

[11] Li W, Coppens Z J, Besteiro L V, et al. Circularly polarized light detection with hot electrons in chiral plasmonic metamaterials[J]. Nature Communications, 2015, 6: 8379.

[12] Shi L, Lu L, Chen G, et al. GaAs linear polarizer with a high extinction ratio for extended short-wave infrared detection[J]. Photonics, 2023, 10(5): 489.

[13] Lv T, Chen R, Li W, et al. Switchable multi-wavelength coherent polarization manipulation component based on single-layered hollowed S-shaped metasurface [J]. Optics Communications, 2024, 557: 130330.

[14] Basiri A, Chen X, Bai J, et al. Nature-inspired chiral metasurfaces for circular polarization detection and full-Stokes polarimetric measurements [J]. Light, Science & Applications, 2019, 8: 78.

[15] Bai J, Wang C, Chen X, et al. Chip-integrated plasmonic flat optics for mid-infrared full-Stokes polarization detection [J]. Photonics Research, 2019, 7(9): 1051-1060.

[16] Dai M, Wang C, Qiang B, et al. On-chip mid-infrared photothermoelectric detectors for full-Stokes detection [J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 4560.

[17] Wei J, Chen Y, Li Y, et al. Geometric filterless photodetectors for mid-infrared spin light [J]. Nature Photonics, 2022, 17(2): 171-178.

[18] Li L, Wang J, 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] Bai J, Yao Y. Highly efficient anisotropic chiral plasmonic metamaterials for polarization conversion and detection [J]. ACS Nano, 2021, 15(9): 14263-14274.

[20] Rubin N A, D'Aversa G, Chevalier P, et al. Matrix Fourier optics enables a compact full-Stokes polarization camera[J]. Science, 2019, 365(6448): eaax1839.

[21] Zhang C, Hu J, Dong Y, et al. High efficiency all-dielectric pixelated metasurface for near-infrared full-Stokes polarization detection[J]. Photonics Research, 2021, 9(4): 583-589.

[22] Ren Y, Guo S, Zhu W, et al. Full-stokes polarimetry for visible light enabled by an all-dielectric metasurface [J]. Advanced Photonics Research, 2022, 3(7): 2100373.

[23] Chen C, Xiao X, Ye X, et al. Neural network assisted high-spatial-resolution polarimetry with non-interleaved chiral metasurfaces [J]. Light, Science & Applications, 2023, 12 (1): 288.

[24] Ren Y, Wang J, Huo P, et al. A silicon metasurface for full-Stokes polarimetry of infrared light [J]. Applied Physics Letters, 2023, 122(9): 091103.

作者简介：

俞惟明(1999—)，男，硕士研究生，主要研究基于超表面的全斯托克斯偏振探测器；

赵兴岩(1991—)，女，博士，副教授，主要研究方向为集成光电子器件与芯片。