

专题: 光学超构材料

空域模拟光学计算器件的研究进展*

周毅 陈瑞 陈雯洁 马云贵†

(浙江大学光电科学与工程学院, 现代光学仪器国家重点实验室, 国际先进光子学研究中心, 杭州 310058)

(2020年2月25日收到; 2020年3月23日收到修改稿)

空域模拟光学计算器件具备高通量、实时性和低能耗的信息处理能力. 光学超构材料结构紧凑、对光波具有强大调控能力, 可被用于构建小型化、集成化的空域模拟光学计算器件. 目前空域模拟光学计算器件的研究根据设计方法主要分为4F系统法和格林函数法两类. 4F系统法需要两个傅里叶变换透镜和一个空间频率滤波器, 实际模拟计算过程是在空域完成的, 结构较为庞大复杂. 格林函数法直接利用特别设计的光学材料的非局域响应在空间频率域实现模拟计算过程, 不需要额外的傅里叶变换组件, 结构简单. 本文按照这两种设计方法介绍了近几年来空域模拟光学计算器件的研究进展, 根据计算功能又分为微分器、积分器、方程求解器和空间频率滤波器, 阐述了这些器件的设计方法. 其后介绍了新近提出的利用自旋轨道耦合作用实现空域模拟一阶微分的计算器件. 最后对空域模拟光学计算器件应用场景和研究前景进行了讨论和分析.

关键词: 空域模拟光学计算, 光学信息处理, 超构材料, 多层膜**PACS:** 78.67.Pt, 42.79.Ta, 98.52.Cf, 78.66.-w**DOI:** 10.7498/aps.69.20200283

1 引言

数字计算已发展了近百年来, 成为了现今计算领域的主要应用方法. 得益于半导体工艺的快速发展, 数字计算机的集成度和运算能力越来越高, 但其具有诸多缺点, 如功耗较高、响应速度较慢、器件尺寸较大. 模拟光学计算的作用域主要分为时域和空域, 其中空域模拟光学计算是对输入光场在空间频率域进行调制以实现特定空域数学运算. 空域模拟光学计算的出现弥补了数字计算的诸多缺陷, 其响应速度接近瞬时、功耗很低甚至可以达到零, 并且借助于新发展起来的微纳光子学技术, 其器件尺寸可以到光波长量级. 空域模拟光学计算器件的理论基础最早可追溯至十九世纪末 Abbe 提出的空域成像理论^[1]. 基于此成像理论, 4F 光学空域滤波系统被发展起来, 这个系统由前后两个傅里叶变

换 (Fourier transform, FT) 透镜和中间的空间频率滤波器构成. 早期的空域模拟光学计算器件基本基于 4F 系统, 但由于其采用厚重的光学元件, 整个系统较为庞大, 难以满足现代集成化、小型化的应用需求.

光学超构材料由周期性排布的亚波长共振单元组成, 其可对入射光场的相位、幅度和偏振状态实现亚波长尺度的精确灵活调控^[2]. 其二维形式光学超构表面已经发展近十年, 在诸多领域如成像透镜^[3]、全息术^[4]、非线性器件^[5]等做出了重要贡献. 相对于传统折射式光学器件, 光学超构材料的结构尺寸可以达到亚波长尺度, 其性能可以达到甚至超过传统器件. 利用其对光场的灵活调控能力, 可以实现传统器件难以实现的多功能或可调谐性能.

2013 年, Silva 等^[6]首次提出了基于微纳光学材料的空域模拟光学计算器件的概念. 他们给出了两种器件设计方法: 4F 系统法和格林函数 (Green's

* 国家自然科学基金 (批准号: 61775195)、浙江省自然科学基金 (批准号: LZ17A040001) 和国家重点研发计划 (批准号: 2017YFA0205700) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yungui@zju.edu.cn

function) 法. 和早期 4F 系统相比, 他们利用亚波长超构材料替换传统的傅里叶变换折射式透镜和空间频率滤波器, 器件得以紧凑化与小型化. Silva 等提出的格林函数法是利用特别优化以满足所需空间频率域传递函数的光学材料来直接实现空域模拟光学计算功能. Silva 等做出的早期理论仿真工作基本奠定了此后基于微纳光学材料的空域模拟光学计算器件的设计基础. 随后, Pors 等^[7]首次利用 4F 系统法实验论证了基于超构材料的空域模拟光学计算器件的可行性; Zhu 等^[8]首次利用格林函数法实验制备了空域模拟一阶微分器; Estakhri 等^[9]设计了基于超构材料的积分方程求解器并完成了相关实验. 本文概述了空域模拟光学计算器件的近年进展, 按照这两种设计方法分别介绍了多种功能器件如微分器、积分器、方程求解器和空间频率滤波器, 阐述了它们的结构机理和技术特点. 随后介绍了新近提出的利用自旋轨道耦合作用实现空域模拟一阶微分的计算器件. 最后, 讨论分析了空域模拟光学计算器件未来可能的应用场景和研究思路.

2 4F 系统法

图 1 给出了 Silva 等^[6]提出的利用 4F 系统法设计的超构材料空域模拟光学计算器件示意图, 他们用平面化的梯度折射率 (graded-index, GRIN) 透镜替代传统的折射式透镜, 空间频率滤波器由超构表面 (metasurface) 或者超构透射阵列 (meta-transmit-array) 等超透材料实现. 对于具备线性横向不变性的 4F 系统, 入射光场 $f(x, y)$ 与出射光场 $g(x, y)$ 的关系通过下述卷积关系表示^[10]:

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y), \quad (1)$$

其中 $h(x, y)$ 为系统的脉冲响应函数. 利用傅里叶变换, 在空间频率域 (1) 式可表示为

$$G(k_x, k_y) = H(k_x, k_y) F(k_x, k_y), \quad (2)$$

式中 $G(k_x, k_y)$, $H(k_x, k_y)$, $F(k_x, k_y)$ 分别对应 $g(x, y)$, $h(x, y)$, $f(x, y)$ 的空间傅里叶变换; (k_x, k_y) 为二维空间频率分量, 其中 $H(k_x, k_y)$ 被称为系统的传递函数或格林函数. 入射光场经过前后三个部分: 傅里叶变换透镜、经特别设计的超构材料、傅里叶逆变换透镜. 借助于傅里叶变换透镜, 这里超构材料对光场的空间频率域调制实际是在空间域 (x, y)

作用的. 4F 系统法中最为关键的是其空间频率滤波器的设计, 根据傅里叶变换性质, 一维空域 n 阶微分器的格林函数满足:

$$H(k_x) = (ik_x)^n. \quad (3)$$

一维空域 n 阶积分器的格林函数满足:

$$H(k_x) = (ik_x)^{-n}. \quad (4)$$

一般超构材料的结构单元需要具备对入射光波的相位和幅度同时调控的能力.

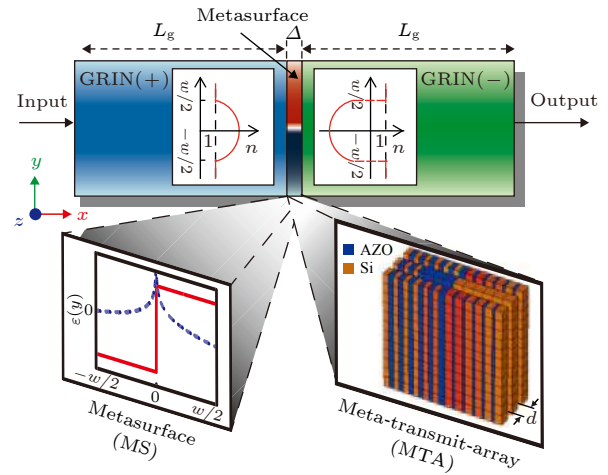


图 1 利用 4F 系统法设计的超构材料空域模拟光学计算器件示意图^[6]

Fig. 1. Metamaterial spatial analog optical computing device designed by 4F system method^[6].

Silva 等^[6]利用掺铝氧化锌 (aluminum-doped zinc oxide, AZO) 和硅具有不同空间填充比交替而成的三层超构透射阵列, 实现对入射光波的振幅和相位同时调控, 并采用 GRIN 作为傅里叶变换透镜, 基于 4F 系统设计了针对中红外光波的一阶空域模拟微分器、二阶空域模拟微分器、一阶空域模拟积分器, 理论仿真结果表明其光学计算结果精度较高. 2015 年, Pors 等^[7]利用金属-介质-金属 (metal-insulator-metal, MIM) 中的间隙-表面等离子 (gap-surface plasmon) 共振模式, 通过改变最上层的金纳米矩形棒共振结构的横向尺寸, 对波长为 800 nm 的近红外光的反射系数实现了 $0, \pi$ 相位和反射幅度的独立调控 (图 2(a)), 根据 (3) 式和 (4) 式, 这足以满足微分或积分器件所需的自由度. 他们首次从实验中论证了基于超构材料的空域模拟光学微分/积分器的可行性 (图 2(b)), 由于加工误差, 实际实验结果相比理论有一定误差. 利用类似 MIM 结构, Chen 等^[11]通过改变最上面的树

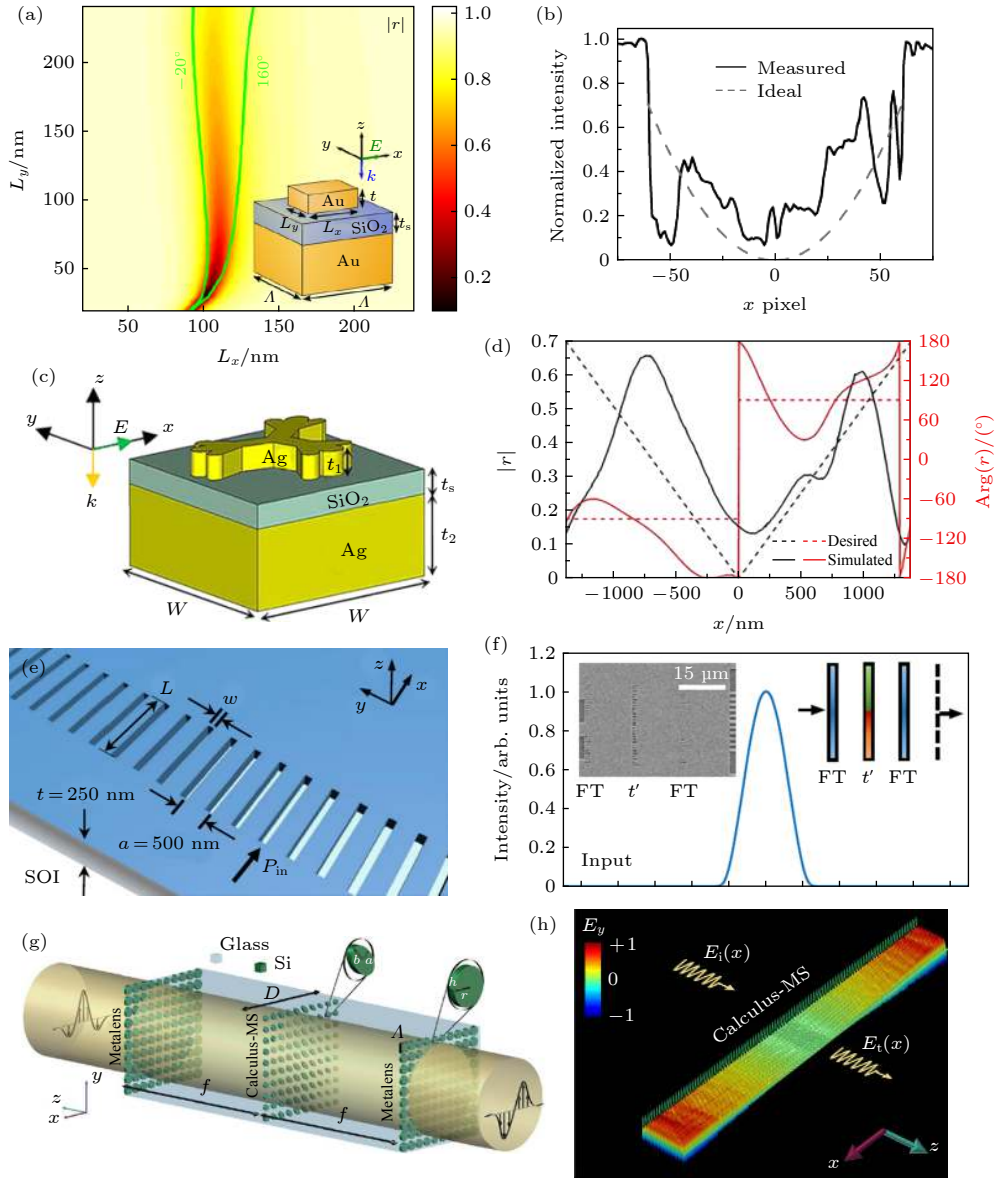


图 2 利用 4F 系统法设计的超构材料空域模拟光学计算器件 (a), (b) MIM 等离子超构表面和对应反射强度分布^[7]; (c), (d) 树枝状等离子超构表面和对应反射强度分布^[11]; (e), (f) SOI 片上超构表面结构和对应一阶微分器^[12]; (g), (h) 硅超构表面 ODE、IDE 求解器和对应电场仿真结果^[16]

Fig. 2. Metamaterial spatial analog optical computing devices designed by 4F system method: (a), (b) MIM plasmon metasurface and corresponding reflective intensity distribution^[7]; (c), (d) dendritic plasmon metasurface and corresponding reflective intensity distribution^[11]; (e), (f) schematic of unit cell of SOI-based on-chip metasurface and corresponding first-order differentiator^[12]; (g), (h) ODE and IDE solvers based on silicon metasurfaces and corresponding electric field simulation results^[16].

枝状纳米金属共振结构的横向尺寸 (图 2(c)), 对入射可见光的反射系数实现相位和幅度调控, 随后设计并仿真实现了针对绿光和红光的一阶空域模拟微分器 (图 2(d)). 2019 年, Wang 等^[12] 充分运用单层高对比度透射阵列超构表面 (图 2(e)) 的集成化和与传统半导体加工工艺高度兼容性的优势, 将 4F 系统的三个组件集成在一个 SOI (silicon-on-insulator) 基片上, 如图 2(f) 所示, 实验实现了高精度、高透射率 (< 1 dB 损耗)、光谱带宽

200 nm 的近红外一阶空域模拟微分功能. 借鉴 Silva 等^[6] 的工作, Sajjad 等^[10] 基于石墨烯引入的超构线阵列 (metalines) 将傅里叶变换透镜和空间频率滤波器紧凑地结合成一体, 理论实现了针对中红外光波的一阶空域模拟微分、二阶空域模拟微分和二阶空域模拟积分运算, 整个器件长度缩短为波长的 1/60, 具备高紧凑性、高集成度等优势. 2018 年, Wu 等^[13] 将 Silva 等^[6] 的工作拓展到任意多路数学运算器件, 设计了中红外多输入-多输出的光

学计算器件并给出了仿真验证. 还有一些基于 4F 系统的超构材料空域模拟微分/积分器件研究得以理论验证^[14,15].

前述研究均着力于空域模拟微分器/积分器, 光学计算另一个较为重要的方面是求解方程. 利用傅里叶变换的性质, 常微分方程 (ordinary differential equation, ODE) 和积分-微分方程 (integro-differential equation, IDE) 所对应的传递函数可以计算得到. 对于普通二阶 ODE^[16]:

$$\alpha d^2g(x)/dx^2 + \beta dg(x)/dx + \gamma g(x) = f(x), \quad (5)$$

式中, $f(x)$ 为输入信号, $g(x)$ 为方程的解, (α, β, γ) 为常数. 利用傅里叶变换, 传递函数可表示为

$$H(k_x) = G(k_x)/F(k_x) = 1/(\gamma + i\beta k_x - \alpha k_x^2), \quad (6)$$

式中, $G(k_x)$ 和 $F(k_x)$ 分别对应 $g(x)$ 和 $f(x)$ 的空间傅里叶变换, k_x 为空间频率分量. 对于一阶 IDE^[16]:

$$\alpha dg(x)/dx + \beta \int g(x) dx + \gamma g(x) = f(x). \quad (7)$$

传递函数可表示为

$$H(k_x) = G(k_x)/F(k_x) = ik_x/(i\gamma k_x + \beta - \alpha k_x^2). \quad (8)$$

目前已有基于 4F 系统的超构材料方程求解器研究做出^[16,17]. 2017 年, Sajjad 等^[16] 采用硅椭圆纳米共振结构对入射近红外光波的强度和相位独立调控, 在构建一阶空域模拟微分/积分器的基础上设计了近红外 ODE 和 IDE 求解器, 如图 2(g) 所示, 仿真结果 (如图 2(h) 所示) 与分析解的误差很小.

上述研究者设计的光学计算器件根据工作方式可以分为透射式^[6,10,12,13,15-17] 和反射式^[7,11,14]. 4F 系统法工作原理清晰, 可重组性和可缩放性强, 设计思路普适, 但由于需要引入傅里叶变换透镜, 结构较复杂和庞大.

3 格林函数法

格林函数法利用巧妙设计的光学材料的非局域 (依赖波矢的) 响应直接在空间频率域对入射光场进行调制, 以期实现特定空域模拟计算功能^[6]. 相对于 4F 系统法, 格林函数法不需要傅里叶变换透镜对入射光场和出射光场进行空域和空间频率域之间的变换, 超构材料本身非局域响应满足所期望的传递函数. 针对不同计算功能如一阶微分、二阶微分、一阶积分、方程求解和空间频率滤波, 有

诸多实践思路.

3.1 空域模拟光学一阶微分器

空域模拟光学一阶微分器在边缘检测、机器视觉、信息处理等领域有着广泛的运用. 根据 (3) 式, 空域模拟光学一阶微分器的传递函数为 $H(k_x) = ik_x$, 这表明传递函数幅度随横向波矢模 $|k_x|$ 线性变化, 相位在横向波矢 k_x 为 0 附近经历 π 相位突变. 这需要沿着 x 轴和 z 轴的镜像对称同时被打破, 由于结构的互易性, 一般的光学材料无法实现^[18]. 为实现一阶微分, 研究者提出了两种思路: 同时打破结构的横纵向对称性^[18-20]、使器件工作在倾斜入射角下^[8,21-31]. 根据工作方式这些器件可分为透射式^[18,20,24-26] 和反射式^[8,19,21-23,27-31]. 所采用的器件类型包括非超构材料^[8,21-23,28,29,31] 和超构材料^[18-20,24-27,30].

研究者利用平板、单层/多层薄膜等非超构材料实现了空域模拟光学一阶微分功能, 根据工作原理可大致分为多层膜逆向设计^[21,31]、布鲁斯特角效应^[23]、表面等离激元 (surface plasmon polariton, SPP) 共振^[8,22,29] 和半波板干涉共振^[28]. 2014 年, Doskolovich 等^[21] 发现对于多达 9—17 层的相移布拉格光栅 (phase-shifted Bragg grating, PSBG), 波长 1500 nm 的横电 (transverse electric, TE) 波反射系数在入射角 30° 附近可近似为一阶微分器的传递函数, 如图 3(a) 所示, 对高斯入射光的仿真结果进一步证实了该器件的微分能力. 对于 PSBG, 层数也多, 共振模式的品质因数越高, 对应传递函数的线性范围也越小^[21]. Zhou 等^[31] 利用大量样本训练了一个可高精度预测 12 层 $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ 交替多层膜反射系数的神经网络, 结合梯度下降法设计了可见光一阶微分器, 相对传统优化方法速度加快 3 倍, 可对倾斜入射 TE 波取得高精度的光学计算结果. Youssefi 等^[23] 发现横磁 (transverse magnetic, TM) 波在介质平板上的反射系数在布鲁斯特 (Brewster) 角附近可用一阶微分器的传递函数近似表示, 如图 3(b) 所示, 并针对高斯光束仿真验证其计算能力. 2015 年, Ruan^[22] 利用 SPP 共振激发设计了可见光一阶微分器件, 引入增益介质后可实现一阶积分. 两年后, Zhu 等^[8] 同样基于 SPP 共振模式制备了针对 TM 偏振可见光的一阶微分器件, 如图 3(c) 所示, 传递函数测量结果与理论吻合, 对多种不同宽度的边缘检测结果显示其分

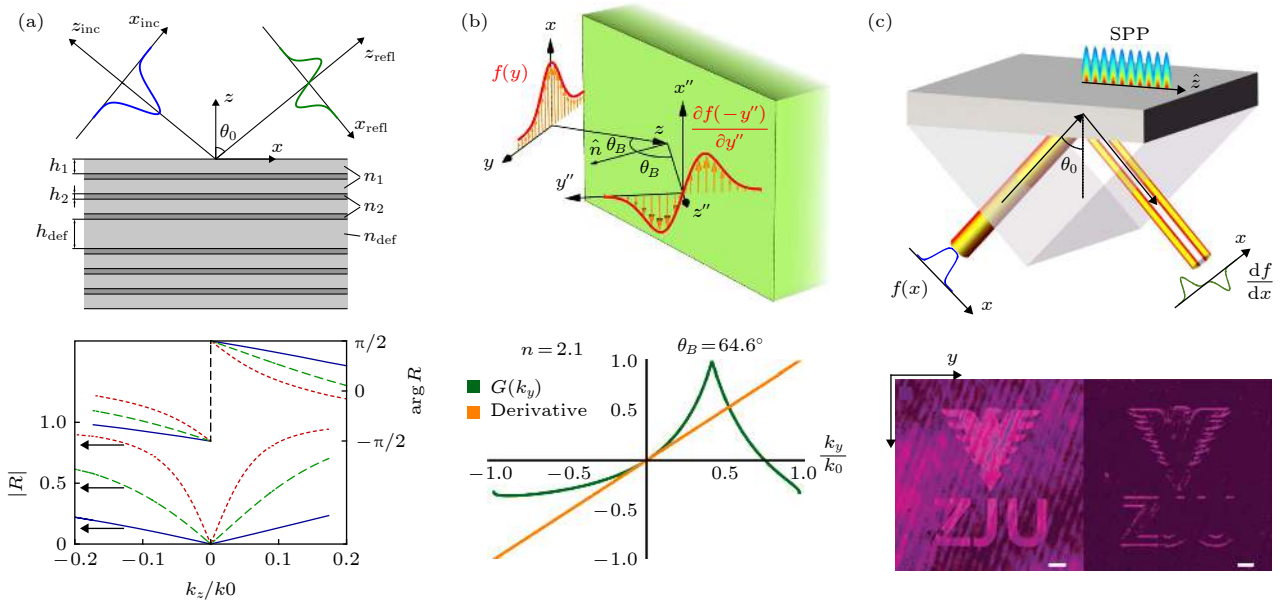


图3 基于平板或多层膜的空域模拟一阶微分器 (a) PSBG微分器和对应传递函数^[21]; (b)工作在Brewster角的介质平板微分器和对应传递函数^[23]; (c)基于SPP的微分器和边缘检测实验结果^[8]

Fig. 3. Spatial analog first-order differentiator based on plates and multilayer films: (a) PSBG differentiator and corresponding transfer function^[21]; (b) dielectric plate differentiator working at Brewster's angle and corresponding transfer function^[23]; (c) SPP-based differentiator and experimental results of edge detection^[8].

分辨率可达 $7.2 \mu\text{m}$, 并利用复杂图像验证其通用微分能力. 随后, Zhang 等^[29] 仿真研究了这种 SPP 一阶微分器的时间响应, 他们发现对于脉冲宽度 100 fs 以上的脉冲光, 依然具备一阶微分能力. 前述平板或多层膜器件对入射光的偏振态有一定要求, 为此 Zangeneh-Nejad 等^[28] 利用半波板实现了偏振不敏感的一阶微分功能, 并借助石墨烯的可调谐特性设计了工作角度可调的一阶微分器. 前述平板或多层膜计算器件均是反射式工作模式.

超构材料中介质光栅和介质脊的波导共振模式^[24-27] 和光子晶体的准导波模式^[20] 也可被用于实现空域模拟光学一阶微分功能. 2018年, 基于玻璃基底上的亚波长硅高对比度光栅, Dong 等^[26] 制备出针对 TM 斜入射近红外光的透射式空域模拟光学一阶微分器, 如图 4(a) 所示, 根据周期波导理论分析了它的空间频率域传递函数, 发现它在某角度附近可激发出波导模式, 传递函数近似一阶微分形式, 实验结果表明其具备边缘检测能力. 同年, Bykov 等^[25] 同样基于 TiO_2 亚波长高对比度光栅设计了针对 TM 斜入射可见光的透射式空域模拟光学一阶微分器, 高斯光束的微分实验结果和理论一致. 利用介质脊的类 TM 本征波导模式, Bezus 等^[24] 设计了透射式可见光空域模拟光学一阶微分器, 通过高斯光束的仿真结果验证了其计算功能,

该器件在反射端可实现一阶积分功能. 前述光栅微分器工作在零阶透射式, Fang 和 Ruan^[27] 则提出了不同的思路——利用光栅空域模式的耦合和干涉效应来实现一阶微分. 他们通过空域耦合波理论分析 Si-SiO₂-Au 反射式光栅, 发现对于 TE 斜入射光束正一级出射光的传递函数可近似为一阶微分情形, 利用光栅的色散特性, 将不同波长信道复用理论上实现了近红外三维光场计算. 目前大部分空域模拟光学计算器件是针对相干光的. 最近, Wang 等^[20] 发现对于两层交错排布的光子晶体的导波共振模式, 两相近频率对应的光学传递函数的差值可近似为二阶微分传递函数, 从理论上探讨了其非相干图像一阶微分计算功能.

利用超构材料的磁共振模式^[18,30], 研究者构建了空域模拟光学一阶微分器. 2018年, Kwon 等在传统的金属环谐振器 (split-ring resonator, SRR) 阵列的纵向上增加一个错位的金属线阵列, 以期同时在横向和纵向打破结构对称性, 如图 4(b) 所示, 利用 SRR 激发出的磁偶极子共振模式, 其对 TM 波的透射系数在 0° 附近即可近似于一阶微分形式, 仿真结果验证了该结构的一阶微分作用^[18]. 最近, Zhou 等^[30] 利用金背板上硅柱阵列在斜入射 TM 偏振近红外光情况下激发起光栅耦合的高品质因数磁共振和经典表面波杂交模式, 如图 4(c) 所示,

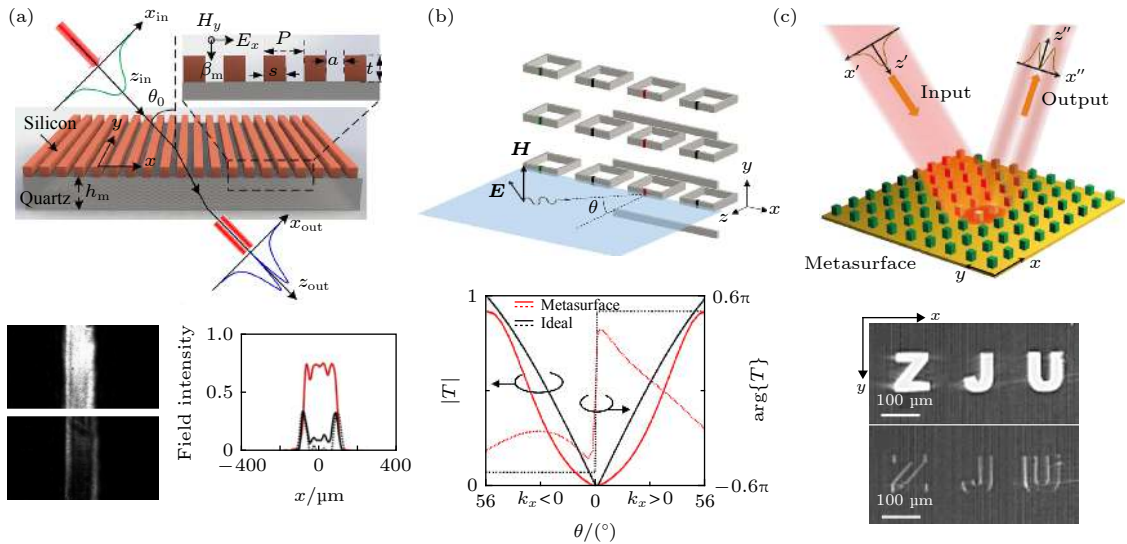


图4 基于光栅和普通超材料的空域模拟一阶微分器 (a) 基于全介质光栅的微分器和边缘检测实验结果^[26]; (b) 基于结构对称性破缺 SRR 的微分器和对应传递函数^[18]; (c) 介质-金属超构表面微分器和边缘检测实验结果^[30]

Fig. 4. Grating/metamaterial-based spatial analog first-order differentiator: (a) Differentiator based on all-dielectric grating and experimental results of edge detection^[26]; (b) differentiator based on structure-symmetry-broken SRRs and corresponding transfer function^[18]; (c) dielectric-metal metasurface differentiator and experimental results of edge detection^[30].

仿真结果显示反射系数可用一阶微分器传递函数近似, 对一些图像和字母的实验结果表明其边缘检测分辨率可达 $31 \mu\text{m}$. Momeni 等^[19] 则从理论上推导构建一层具有各向异性电极化率和磁极化率的超构表面以实现一阶微分、一阶积分等功能, 通过巧妙设计结构参数, 可以实现不同运算子的角度或偏振复用.

3.2 空域模拟光学二阶微分器

空域模拟光学二阶微分器也可用于边缘检测. 根据 (3) 式, 空域模拟光学二阶微分器的传递函数为 $H(k_x) = -k_x^2$, 这表明传递函数的幅度随横向波矢模 $|k_x|$ 有着抛物线关系, 而相位保持不变. 相对于一阶微分器, 一般的光学材料不打破镜面对称性即可实现二阶微分. 根据工作方式, 空域模拟光学二阶微分器可以分为透射式^[6,18,20,32–35] 和反射式^[21,31,36–38]. 这些工作中所采用的器件类型包括非超构材料^[6,21,31,36,38] 和超构材料^[18,20,32–35,37].

研究者通过多层膜逆向设计^[6,21,31,36,38] 实现了空域模拟二阶微分器. Silva 等^[6] 提出了基于多层膜的光学计算器件, 通过优化算法设计了透射式空域模拟二阶微分器. 借鉴 Silva 等^[6] 的思路, Wu 等^[38] 利用最多达 20 层的 Si/SiO₂ 交叠全介质薄膜优化设计了针对不同空间频谱范围的近红外反射式二阶微分器, 波动光学仿真结果证实这个器件对

于任意波前都具备计算功能. 利用神经网络的强大能力, Zhou 等^[30] 实现了多层膜可见光二阶微分器的快速设计. 由于具备各向同性, 多层膜器件可实现偏振不敏感各向同性拉普拉斯算子. 2014 年, Bykov 等^[36] 和 Doskolovich 等^[21] 利用 PSBG 设计了近红外反射式二阶微分器, 由于所用多层膜具备各向同性, 其对偏振不敏感, 该二阶微分器所实现的功能又被称为拉普拉斯算子.

利用超构材料的 SPP 共振模式^[33,37]、磁共振模式^[18]、光栅波导共振模式^[34] 和光子晶体的准导波模式^[20,32,35], 研究者构建了各式各样的二阶空域微分器. Fang 等^[37] 提出了一种光栅石墨烯复合纳米结构以期在太赫兹波段实现反射式二阶空域微分计算, 如图 5(a) 所示, 这一微分计算能力基于直接反射场和沿石墨烯薄膜表面两相反传播 SPP 激发的泄漏波的干涉效应, 利用空域耦合模理论, 其推导出二阶微分可以在 TM 波临界耦合条件实现, 该器件结构紧凑, 厚度小于 1/10 工作波长. 利用由近场倏逝耦合的 5 个金属纳米天线组成的等离激元电路, Hwang 等设计了一个厚度仅为 20 nm 的可见光深亚波长二阶空域微分器 (图 5(b))^[33], 通过电静态本征模分析方法推导出交叉偏振透射光强度与理想二阶微分器输出场强度成正比, 并用全波仿真方法验证其有效性. Kwon 等^[18] 利用传统 SRR 超构表面激发出的磁偶极子共振模式设计

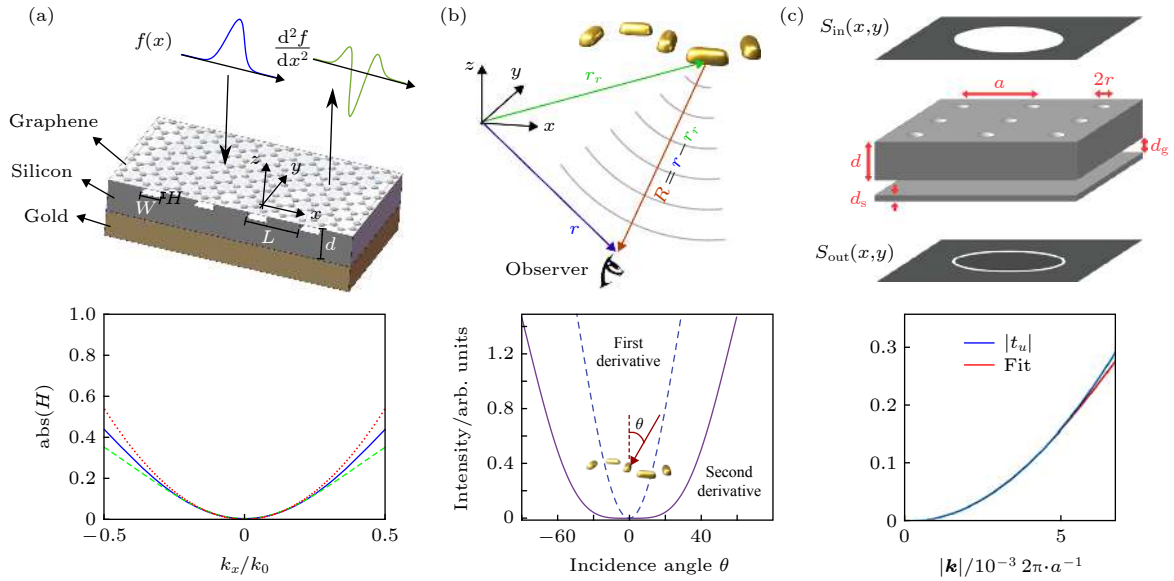


图 5 超构材料空域模拟二阶微分器 (a) 光栅石墨烯复合微分器和对应传递函数幅度^[37]; (b) 基于等激元电路的微分器和对应交叉偏振散射强度随入射角度的函数关系^[33]; (c) 基于光子晶体的微分器和对应传递函数幅度^[32]

Fig. 5. Metamaterial spatial analog second-order differentiator: (a) On-grating graphene differentiator and magnitude of corresponding transfer function^[37]; (b) differentiator based on plasmonic circuit and corresponding cross-polarized scattering intensity as function of incident angle^[33]; (c) differentiator based on photonic crystal slab and magnitude of corresponding transfer function^[32].

了二阶空域微分器, 并通过数值仿真验证其计算能力. 前述基于超构表面的二阶微分器件由于其采用结构的偏振敏感性, 只能在某个横向方向对于某一入射光偏振态实现计算功能. 2015年, Saba等^[34]利用二维全介质光栅中的导波模式, 实现了针对TE波的可见光透射式拉普拉斯算子, 即二阶微分具有各向同性. 如3.1节所述, Wang等^[20]利用光子晶体的导波共振模式实现了非相干一维二阶微分运算. 最近, Zhou等^[35]借助于光子晶体的准导波模式实现了针对TM波的工作在可见光和红外光的透射式拉普拉斯算子计算器件, 实验结果表明这种器件的边缘检测分辨率可达 $4\ \mu\text{m}$, 随后他们将此器件与传统显微成像系统或超构透镜结合, 使得整个系统更加紧凑轻便. 为了进一步将二维拉普拉斯算子推广到偏振不敏感, Guo等^[32]利用精密设计的光子晶体平板实现空域光学计算, 他们发现对于具有 Γ 点附近非平凡各向同性带结构的光子晶体其透射系数与二维拉普拉斯算子成比例, 如图5(c)所示, 对图像和边缘的处理结果显示其具有边缘检测功能.

3.3 空域模拟光学一阶积分器

空域模拟光学一阶积分器在图像模糊、信息处理、全光计算等领域有着广泛的运用. 根据(4)式,

空域模拟光学一阶积分器的传递函数为 $H(k_x) = -i/k_x$. 与一阶微分器类似, 也需要打破对称性. 目前空域模拟光学一阶积分器均是通过使器件工作在倾斜入射角下来实现的. 根据工作方式分为透射式^[19,39,40]和反射式^[22,24]. 所采用的器件类型包括非超构材料^[22,39,40]和超构材料^[19,24].

研究者利用可产生SPP共振的金属薄膜^[22]、巧妙设计的多层膜^[39,40]和可激发波导共振模式的超构材料^[24]实现了一阶积分功能. 如3.1节所述, Ruan^[22]通过在SPP共振器件中引入增益介质实现一阶积分, Momeni等^[19]从理论上推导构建一层各向异性超构表面实现一阶积分, Bezus等^[24]利用介质脊的类TM本征波导模式设计了反射式一阶积分器. 2015年, Golovastikov等^[39]发现在高达9层的PSBG的透射端斜入射光波的传递函数可以近似于一阶积分形式, 此前他们研究了基于PSBG的反射式一阶微分器^[21]. Zangeneh-Nejad和Khavasi^[40]则只用三层薄膜在倾斜入射条件下实现了一阶积分(图6(a)和图6(b)), 为进一步小型化此器件, 他们给出了基于石墨烯的等价器件.

3.4 空域模拟方程求解器和空间频率滤波器

空域模拟方程求解器也是光学计算的一个重要应用, 目前基于格林函数的空域模拟方程求解器

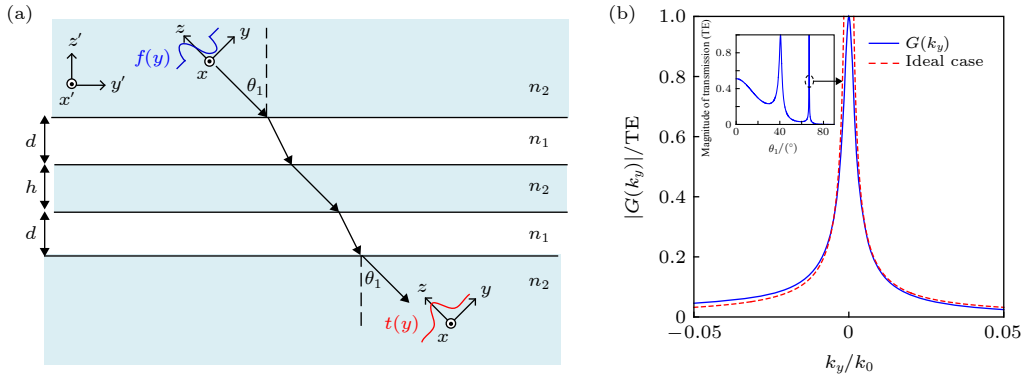


图 6 多层膜空域模拟一阶积分器^[40] (a) 积分器结构示意图; (b) 对应传递函数

Fig. 6. Multilayer spatial analog first-order integrator^[40]: (a) Schematic of integrator; (b) corresponding transfer function.

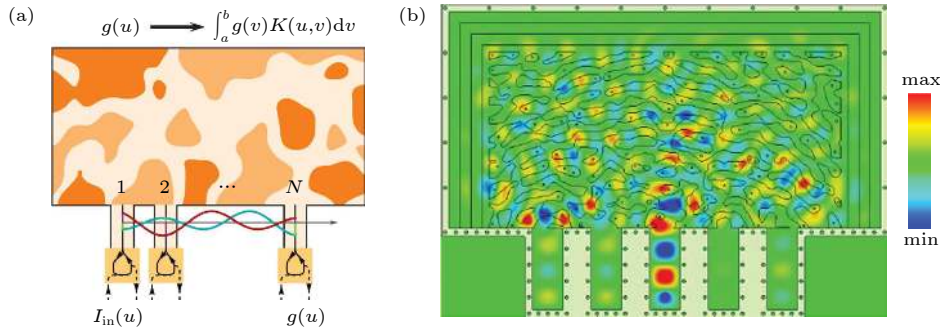


图 7 利用格林函数法设计的超构材料空域模拟方程求解器^[9] (a) 结构示意图; (b) 端口 3 激发的电场分布仿真结果

Fig. 7. Metamaterial spatial analog equation solver using Green's function^[9]: (a) Schematic diagram; (b) simulation result of electric field distribution when excited at Port 3.

研究较少,这是由于此方法对光学材料的电磁学性质要求较之微分/积分器更为苛刻,需要采用经繁琐优化设计的超构材料.最近,Abdolali等^[41]从理论上探讨了利用互易双各向异性超构表面来求解积分-微分方程的可行性,利用广义表面过渡条件 (generalized sheet transition conditions) 分析为实现所需积分-微分方程对应传递函数超构表面的理论电极化率和磁极化率张量. Estakhri等^[9]采用拓扑优化算法设计聚苯乙烯超构材料使得其传递函数满足第二类 Fredholm 积分方程 ($g(u) = I(u) + \int_a^b K(u,v)g(v)dv$, $g(u)$ 为输入函数为 $I(u)$ 时方程的解) 的核函数 $K(u,v)$, 如图 7(a) 所示, 实际加工出一个五端口反射式超构材料, 其端口 3 激发的本征解 (图 7(b)) 与理论解接近. 尽管为了简化样品制备测试实验是在微波段执行的, 但 Estakhri等^[9]提到该结构可以被移植到光波段.

滤波器是信号处理中的重要器件, 前述的空域微分/积分器也可称为空间频率滤波器. 目前光学空间频率滤波器基本都是基于超构材料来实现的.

通过选取不同光频率和工作模式 (透射式/反射式), Guo等^[42]在前期工作^[32]基础上同样利用光子晶体平板实现了各向同性的高通、低通、带阻和带通空间频率滤波器. Roberts等^[43]利用等离激元惠斯通电桥微纳结构和完美电导体薄膜上环形孔径对于垂直入射光会激发起暗模式设计了空间频率高通滤波器. Davis等^[44]则利用同样的等离激元惠斯通电桥微纳结构^[43]实现了反对称光学传递函数.

4 基于光的自旋霍尔效应的一阶微分器

光的自旋霍尔效应 (spin Hall effect of light, SHEL) 是指当光与光学材料相互作用时, 由于自旋角动量与轨道角动量的相互耦合作用, 出射光的左旋圆偏振 (left-handed circularly polarization, LHCP) 和右旋圆偏振 (right-handed circularly polarization, RHCP) 分量发生相反的横向位移^[45]. 当线偏振光通过具有 SHEL 的光学材料时, 其

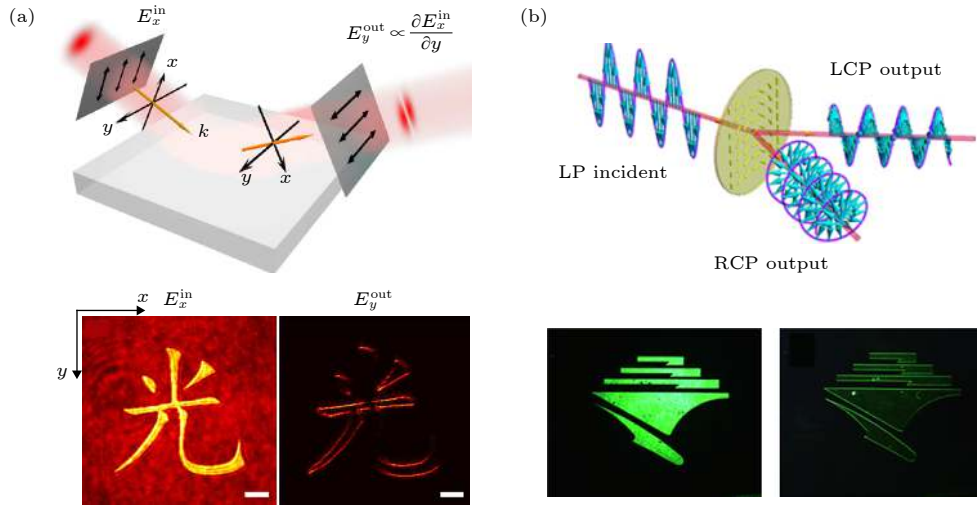


图 8 基于 SHEL 的一阶微分器 (a) 介质平板微分器和边缘检测实验结果^[45]; (b) PB 相位超构表面微分器和边缘检测实验结果^[49]

Fig. 8. SHEL-based first-order differentiator: (a) Dielectric plate differentiator and experimental results of edge detection^[45]; (b) differentiator based on PB-phase metasurface and experimental results of edge detection^[49].

LHCP 和 RHCP 分量在某一横向上产生相反位移, 考虑位移距离足够小的情况, 中间重叠部分同时包含 LHCP 和 RHCP 分量, 输出光中与输入线偏振光的正交偏振成分将是输入光场的一阶差分计算结果^[45]. 而当偏移量远小于图像细节尺度时, 一阶差分可近似为一阶微分.

当相干傍轴线偏振光倾斜入射到任何两个各向同性的界面间时, 出射光 (不管是反射光还是透射光) 会发生 SHEL 效应^[45]. 2019 年, Zhu 等^[45] 通过实验利用简单玻璃平板中的 SHEL 效应在反射端实现了可见光波段的一阶微分运算, 如图 8(a) 所示, 对汉字和图样的实验结果显示其边缘检测分辨率可达 $3.2 \mu\text{m}$, 另外他们还通过改变入射倾角和界面材料验证了这种几何效应的普适性. 通过改变上述微分器中入射/输出端偏振片的偏振方向, 可以调节微分运算作用的方向. Zhu 等^[46] 利用这种可变空域微分器, 通过分析从单层介质板反射光的偏振态, 实现了对透明物体高达 0.05λ 均方差的光学相位分布探测. 利用同样的思路, He 等^[47] 实验上验证由于平板界面上的 SHEL 效应是纯几何的, 此一阶微分运算是宽波段的. 最近, He 等^[48] 进一步实验证实这种器件可以工作在透射式.

利用 Pancharatnam-Berry (PB) 相位人工构造的相位梯度超构表面也可以产生 SHEL 效应. Zhou 等^[49] 利用这种 PB 相位梯度超构表面实现高效率的一阶微分运算功能, 如图 8(b) 所示, 他们

加工的微分器工作在正入射透射式, 比之前的平板微分器更为方便易用, 实验结果显示其具备高分辨率的边缘检测能力. 为了将边缘检测维度拓宽到二维, 谢智强等^[50] 将 PB 相位梯度推广到二维, 利用环形光栅相位理论上实现了拉普拉斯算子运算功能.

利用 SHEL 构建的一阶微分器结构简单方便, 易于实现宽波段运算需求, 这给超快信息处理提供了新思路.

5 总结与展望

空域模拟光学计算器件由于其天然并行处理能力、计算速度快、低能耗等优势具有的研究前景, 在机器视觉、目标识别、图像处理等方面有着重要贡献. 超构材料的引入有助于使空域模拟光学计算器件朝着更加小型化、集成化的方面发展. 本文根据空域模拟光学计算器件的两种常见设计方法, 即 4F 系统法和格林函数法, 对近年来空域模拟光学计算器件如微分器、积分器、方程求解器和空间频率滤波器的工作做了简要介绍. 之后介绍了基于 SHEL 的一阶微分器, 这种器件由于其结构简单高效、工作频段较宽, 将有可能成为以后空域模拟光学计算的一个重要方向.

进一步小型化、集成化将是空域模拟光学计算器件的未来发展方向. 和之前利用相变材料^[51,52]

和超构单元本身偏振自由度^[53,54]设计的可调谐/多功能超构材料类似,可调谐/多功能的空域模拟光学计算器件也将进一步推动这个领域朝着实用化和产业化方向发展.近年来深度学习神经网络的广泛应用推动了图像识别、机器翻译和智能驾驶等技术的蓬勃发展,空域模拟光学计算器件可作为神经网络的前端或后端进一步拓宽人工智能的应用方向.借助于新进开发部署的5G网络的快速信息传输速度,空域模拟光学计算有助于大数据、云计算和物联网的发展完善.在未来,相信随着微纳加工工艺和超构材料设计方法的进一步发展,空域模拟光学计算器件的精度和运算速度等得到进一步改善,在某些领域可以替代传统的电子计算器件而得到更广泛的运用.

参考文献

- [1] Goodman J W 2005 *Introduction to Fourier Optics* (3rd Ed.). (Englewood: Roberts & Company Publishers)
- [2] Staude I, Schilling J 2017 *Nat. Photonics* **11** 274
- [3] Aieta F, Kats M A, Genevet P, Capasso F 2015 *Science* **347** 1342
- [4] Zheng G, Mühlenbernd H, Kenney M, Li G, Zentgraf T, Zhang S 2015 *Nat. Nanotech.* **10** 308
- [5] Liu S, Vabishchevich P P, Vaskin A, Reno J L, Keeler G A, Sinclair M B, Staude I, Brener I 2018 *Nat. Commun.* **9** 2507
- [6] Silva A, Monticone F, Castaldi G, Galdi V, Alù A, Engheta N 2014 *Science* **343** 160
- [7] Pors A, Nielsen M G, Bozhevolnyi S I 2015 *Nano Lett.* **15** 791
- [8] Zhu T, Zhou Y, Lou Y, Ye H, Qiu M, Ruan Z, Fan S 2017 *Nat. Commun.* **8** 15391
- [9] Estakhri N M, Edwards B, Engheta N 2019 *Science* **363** 1333
- [10] Sajjad A R, Arik K, Khavasi A, Kavehvash Z 2015 *Opt. Lett.* **40** 5239
- [11] Chen H, An D, Li Z, Zhao X 2017 *Opt. Express* **25** 26417
- [12] Wang Z, Li T, Soman A, Mao D, Kananen T, Gu T 2019 *Nat. Commun.* **10** 3547
- [13] Wu Y, Zhuang Z, Deng L, Liu Y A, Xue Q, Ghassemlooy Z 2018 *Plasmonics* **13** 599
- [14] Chizari A, Sajjad A R, Jamali M V, Salehi J A 2016 *Opt. Lett.* **41** 3451
- [15] Dai C L, Zhao Z G, Li X L, Yang H W 2016 *Phys. Lett. A* **380** 3942
- [16] Sajjad A R, Chizari A, Dorche A E, Jamali M V, Salehi J A 2017 *Opt. Lett.* **42** 1197
- [17] Zhang W X, Qu C, Zhang X D 2016 *J. Opt.* **18** 075102
- [18] Kwon H, Sounas D, Córdaro A, Polman A, Alù A 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 173004
- [19] Momeni A, Rajabalipanah H, Abdolali A, Achouri K 2019 *Phys. Rev. Appl.* **11** 064042
- [20] Wang H W, Guo C, Zhao Z X, Fan S H 2020 *ACS Photonics* **7** 338
- [21] Doskolovich L L, Bykov D A, Bezuš E A, Soifer V A 2014 *Opt. Lett.* **39** 1278
- [22] Ruan Z C 2015 *Opt. Lett.* **40** 601
- [23] Youssefi A, Zangeneh-Nejad F, Sajjad A R, Khavasi A 2016 *Opt. Lett.* **41** 3467
- [24] Bezuš E A, Doskolovich L L, Bykov D A, Soifer V A 2018 *Opt. Express* **26** 25156
- [25] Bykov D A, Doskolovich L L, Morozov A A, Podlipnov V V, Bezuš E A, Verma P, Soifer V A 2018 *Opt. Express* **26** 10997
- [26] Dong Z W, Si J N, Yu X Y, Deng X X 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 181102
- [27] Fang Y S, Ruan Z C 2018 *Opt. Lett.* **43** 5893
- [28] Zangeneh-Nejad F, Khavasi A, Rejaei B 2018 *Opt. Commun.* **407** 338
- [29] Zhang J, Ying Q, Ruan Z 2019 *Opt. Lett.* **44** 4511
- [30] Zhou Y, Wu W, Chen R, Chen W, Chen R, Ma Y 2020 *Adv. Opt. Mater.* **8** 1901523
- [31] Zhou Y, Chen R, Chen W, Chen R P, Ma Y 2020 *Opt. Commun.* **458** 124674
- [32] Guo C, Xiao M, Minkov M, Shi Y, Fan S 2018 *Optica* **5** 251
- [33] Hwang Y, Davis T J, Lin J, Yuan X C 2018 *Opt. Express* **26** 7368
- [34] Saba A, Tavakol M R, Karimi-Khoozani P, Khavasi A 2018 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **30** 853
- [35] Zhou Y, Zheng H, Kravchenko I I, Valentine J 2020 *Nat. Photonics* **14** 316
- [36] Bykov D A, Doskolovich L L, Bezuš E A, Soifer V A 2014 *Opt. Express* **22** 25084
- [37] Fang Y, Lou Y, Ruan Z 2017 *Opt. Lett.* **42** 3840
- [38] Wu W, Jiang W, Yang J, Gong S, Ma Y 2017 *Opt. Lett.* **42** 5270
- [39] Golovastikov N V, Bykov D A, Doskolovich L L, Bezuš E A 2015 *Opt. Commun.* **338** 457
- [40] Zangeneh-Nejad F, Khavasi A 2017 *Opt. Lett.* **42** 1954
- [41] Abdolali A, Momeni A, Rajabalipanah H, Achouri K 2019 *New J. Phys.* **21** 113048
- [42] Guo C, Xiao M, Minkov M, Shi Y, Fan S 2018 *J. Opt. Soc. Am. A* **35** 1685
- [43] Roberts A, Gómez D E, Davis T J 2018 *J. Opt. Soc. Am. A* **35** 1575
- [44] Davis T J, Eftekhari F, Gómez D E, Roberts A 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 013901
- [45] Zhu T F, Lou Y J, Zhou Y H, Zhang J H, Huang J Y, Li Y, Luo H L, Wen S C, Zhu S Y, Gong Q H, Qiu M, Ruan Z C 2019 *Phys. Rev. Appl.* **11** 034043
- [46] Zhu T F, Huang J Y, Ruan Z C 2020 *Adv. Photonics* **2** 016001
- [47] He S, Zhou J, Chen S, Shu W, Luo H, Wen S 2020 *APL Photonics* **5** 036105
- [48] He S, Zhou J, Chen S, Shu W, Luo H, Wen S 2020 *Opt. Lett.* **45** 877
- [49] Zhou J, Qian H, Chen C F, Zhao J, Li G, Wu Q, Luo H, Wen S, Liu Z 2019 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **116** 11137
- [50] Xie Z Q, He Y L, Wang P P, Su M Y, Chen X Y, Yang B, Liu J M, Zhou X X, Li Y, Chen S Q, Fan D Y 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 014101 (in Chinese) [谢智强, 贺炎亮, 王佩佩, 苏明祥, 陈学钰, 杨博, 刘俊敏, 周新星, 李瑛, 陈书青, 范滇元 2020 物理学报 **69** 014101]
- [51] Folland T G, Fali A, White S T, et al. 2018 *Nat. Commun.* **9** 4371
- [52] Tian J, Luo H, Yang Y, Ding F, Qu Y, Zhao D, Qiu M, Bozhevolnyi S I 2019 *Nat. Commun.* **10** 396
- [53] Wen D, Yue F, Li G, et al. 2015 *Nat. Commun.* **6** 8241
- [54] Maguid E, Yulevich I, Veksler D, Kleiner V, Brongersma M L, Hasman E 2016 *Science* **352** 1202

SPECIAL TOPIC—Optical metamaterials

Advances in spatial analog optical computing devices*

Zhou Yi Chen Rui Chen Wen-Jie Ma Yun-Gui †

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, International Research Center for Advanced Photonics,
College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

(Received 25 February 2020; revised manuscript received 23 March 2020)

Abstract

Spatial analog optical computing devices possess the capability of high-throughput, real-time and low-energy information processing. Optical metamaterials, which are ultracompact in structure and possess powerful ability to control the light, can be utilized to establish miniaturized and integrated spatial analog optical computing devices. The methods of designing the spatial analog optical computing devices could be mainly classified as two kinds—4F system method and Green's function method. The 4F system method requires two Fourier transform lenses and a spatial frequency filter, where the actual computing procedure is performed in the spatial domain. The 4F system is usually bulky and complicated. The Green's function method directly leverages the nonlocal response of the carefully tailored optical materials to implement analog computing procedure in the spatial frequency domain and its structure is compact without extra Fourier transform components. Research advances in spatial analog optical computing devices by using these two methods for the last few years are introduced in this paper. These researches could be classified as differentiators, integrators, equation solvers and spatial frequency filters according to the standard of computing functions. The approaches to designing these devices are further demonstrated. Then, computing devices which could realize spatial analog first-order difference by use of the spin-orbit interaction proposed recently are introduced. Finally, application fields and study prospects of spatial analog optical computing devices are discussed and summarized.

Keywords: spatial analog optical computing, optical information processing, metamaterial, multilayer film

PACS: 78.67.Pt, 42.79.Ta, 98.52.Cf, 78.66.–w

DOI: 10.7498/aps.69.20200283

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61775195), the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant No. LZ17A040001), and the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2017YFA0205700).

† Corresponding author. E-mail: yungui@zju.edu.cn