

实现偏振转换的超薄单层介电超表面

刘迪凯

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2024年4月30日; 录用日期: 2024年5月22日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

光学界对光偏振态的任意控制充满了兴趣, 因为这种控制能够为广泛的现代光学应用提供可能性。然而, 传统的偏振控制装置通常体积庞大, 并且在操作时通常受限于较窄的波长范围, 这限制了光学系统的小型化和集成化进程。在本文中, 我们提出了一种高性能偏振光转换器, 它由总厚度仅为波长的70分之一的单层金纳米棒阵列组成。这种转换器能够将入射线偏振光束转换为圆偏振光束。通过有限时域差分法(FDTD)的理论仿真、模拟演示和深入分析, 验证了所提出结论的准确性。通过对超表面的精心设计, 我们将入射的线偏振光束转换为圆偏振光束, 通过调整微元的取向角度, 可以调制出射圆偏振光的手性。这大大扩展了偏振控制的应用范围, 有望替代传统光学器件, 比如在光通信领域, 偏振控制可以用于提高通信速率和数据传输质量, 在光学传感领域, 偏振控制能够用于设计高灵敏度和高分辨率的传感器。

关键词

偏振转换, 时域有限差分模拟, 超薄介电超表面

Ultrathin Monolayer Dielectric Metasurface for Polarization Conversion

Dikai Liu

College of Optical-Electrical Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 30th, 2024; accepted: May 22nd, 2024; published: May 31st, 2024

Abstract

The optical community is interested in the arbitrary control of the polarization state of light, as such control can open up possibilities for a wide range of modern optical applications. However, conventional polarization control devices are usually bulky and are limited to a narrow wave-

length range in operation, which limits the miniaturization and integration process of optical systems. In this paper, we present a high-performance polarized light converter, which consists of a single-layer array of gold nanorods with a total thickness of only one-70th of the wavelength. This converter is capable of converting an incident ray-polarized beam into a circularly polarized beam. The accuracy of the proposed conclusions is verified by theoretical simulations, analog demonstrations and in-depth analysis of the finite time domain difference (FDTD) method. By carefully designing the metasurface, we have converted the incident linearly polarized beam into a circularly polarized beam, and the chirality of the incident circularly polarized light can be modulated by adjusting the orientation angle of the microelement. This greatly expands the range of applications of polarization control, which is expected to replace conventional optics, such as in the field of optical communication, where polarization control can be used to improve the communication rate and the quality of data transmission, and in the field of optical sensing, where polarization control can be used to design sensors with high sensitivity and high resolution.

Keywords

Polarization Conversion, Time-Domain Finite-Difference Simulation, Ultrathin Dielectric Metasurface

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

偏振现象最早可以追溯到 17 世纪, 当时光学家发现光线在透过某些材料或反射时会发生偏振现象。然而, 对于偏振现象的真实本质和原理直到 19 世纪才开始得到更深入的理解。19 世纪末和 20 世纪初, 科学家们开始研究如何制造和控制偏振光。最早的偏振器件包括偏振片和偏振镜, 它们能够通过吸收或反射特定方向的光来实现偏振控制[1]。波片是一种能够改变光的偏振状态的典型光学元件, 波片的主要功能是改变光波的偏振状态[2]; 它们可以将线偏振光转换为椭圆偏振光或圆偏振光, 也可以改变光波的相位, 使得相邻波前之间的相位差发生变化。最早的波片可以追溯到 17 世纪, 但直到 20 世纪中叶, 随着技术的进步和对偏振光更深入的理解, 波片的设计和制造变得更加精确和可靠。近年来, 随着纳米技术的发展, 人们开始利用纳米结构来实现对光的更精细控制。例如, 利用超表面等结构可以实现高效的偏振转换[3], 为光学器件的小型化和集成化提供了新的可能性。

超表面(metasurface)是一种具有特殊的二维或近二维结构的人造材料, 用于控制光波的传播和特性。超表面可以通过精确设计其结构和周期性来实现对光的高度控制, 包括偏振[4]、相位[5]和振幅[6]等。超表面的概念最早可以追溯到 20 世纪 60 年代和 70 年代的工作, 当时研究人员开始探索使用周期性结构来控制微波和毫米波波束的传播。随着对人造材料(metamaterial)研究的兴起, 人们开始意识到可以利用这些结构来设计超表面, 以控制光的传播; 超材料是一种具有非常特殊的电磁性质的材料, 可以通过其微观结构来控制电磁波的行为[7]。近年来, 随着纳米技术和制造技术的发展, 人们开始能够制造具有纳米尺度结构的光学超表面。这些超表面可以在可见光范围内实现对光的高度控制。基于超表面的偏振转换器是一种利用超表面结构来实现对光偏振状态转换的器件。通过精确设计超表面的结构和周期性, 可以实现对入射光的偏振状态进行高效、可控的转换。这种转换器在光学通信[8]、成像[9]、激光器[10]等领域具有重要应用价值。超表面的偏振转换器通常由一系列微小的结构单元组成, 这些结构单元的尺寸远

小于光波长，因此可以被看作是一个有效介质，具有特定的电磁响应。通过合理设计这些结构单元的几何形状、大小和排列方式，可以实现对入射光偏振状态的精确控制。相比于传统的偏振转换器件，如波片、液晶等；超表面的偏振转换器具有以下优点：超表面结构可以设计为非常薄的平面结构，因此具有很高的紧凑性，适合集成到微型光学系统中。通过精确设计超表面的结构，可以实现高效率的偏振转换，使得转换器具有优异的性能。超表面的结构可以通过调节器件的几何参数或者控制器件周围的介质来实现对偏振转换的实时调节，具有很高的灵活性。超表面的设计可以使其在宽波段内工作，从可见光到微波波段都有可能。

在这项研究中，我们提出了一种创新的方法，利用超表面金纳米棒的各向异性光学共振模式，实现了对亚波长尺度光干涉的精确控制，从而实现了光偏振态的操纵。我们通过设计超薄单层超表面，成功实现了将线偏振光转换为左旋和右旋圆偏振光。

2. 原理

2.1. 偏振转换原理

我们首先考虑线偏振到圆偏振偏振转换器的理论分析。让我们考虑一个沿+z方向传播的入射平面波，其电场可以表示为：

$$\mathbf{E}_i(\mathbf{r}, t) = \begin{pmatrix} I_x \\ I_y \end{pmatrix} e^{i(kz - \omega t)} \quad (2.1)$$

其中， ω 表示频率， k 表示波矢量， I_x 和 I_y 表示复振幅。 $\mathbf{J} = \begin{pmatrix} I_x \\ I_y \end{pmatrix}$ 为琼斯矢量，它决定了偏振状态和波的总强度。线性偏振光和左右圆偏振光束的琼斯矢量可以写为 $\begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{pmatrix}$ ， $\frac{\sqrt{2}}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ \pm i \end{pmatrix}$ 。 θ 代表 x 轴与线性偏振光束的电分量之间的角度，出射电场随后可描述为：

$$\mathbf{E}_t(\mathbf{r}, t) = \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \end{pmatrix} e^{i(kz - \omega t)} \quad (2.2)$$

入射和透射电场通过琼斯矩阵 \mathbf{T} 相关联，这一关系可表示为：

$$\begin{pmatrix} T_x \\ T_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_x \\ I_y \end{pmatrix} = \mathbf{T}_{lin}^f \begin{pmatrix} I_x \\ I_y \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

指数 f 和 lin 分别表示正向传播(+z 方向)和基向量平行于坐标轴的特殊线性基。对于没有线性偏振转换效应的介质(T_{xy} 和 T_{yx} 等于零)，传输场可表示为：

$$\begin{pmatrix} T_x \\ T_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{xx} I_x \\ T_{yy} I_y \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

根据公式(2.4)以及线性偏振波和左右圆偏振波的琼斯矢量形式可以确定，对于具有线性偏振波的高性能线偏振到圆偏振的偏振转换器来说， T_{xx} 和 T_{yy} 之间的相位差必须等于 $n\pi/2$ ，其中 n 代表奇数。此外，还必须满足条件： $|T_{xx}|/\sin\theta = |T_{yy}|/\cos\theta$ ，这是为了保持出射光振幅的一致性。

2.2. 仿真算法的原理

有限差分域(FDTD)算法用于求解时变电磁场问题，基于离散化空间和时间连续性方程。通过在离

散网格点上进行差分运算逼近偏微分方程的解[11]。该算法主要用于求解 Maxwell 方程组，描述电磁场行为的基本方程。空间被离散化为三维网格，每个网格点嵌入一个电场向量和一个磁场向量。利用 Maxwell 方程组的差分形式得到电场和磁场在时间和空间上的更新方程。这些方程包括电场和磁场在网格点之间相互作用的项，以及源项，用于描述外部激励或边界条件。在每个时间步长中，先更新电场，然后根据电场的新值更新磁场。最后，计算任意位置的电磁场分布。通过迭代这个过程，可以模拟出电磁场在空间中的传播和相互作用。FDTD 算法的优点是简单直观，易于实现。它能够处理复杂的电磁场问题，包括波的传播、反射、折射等现象[12]。然而，FDTD 算法也有一些缺点，如对计算资源要求较高、边界处理较为复杂等。因此，在实际应用中需要根据问题的特点选择合适的数值方法。

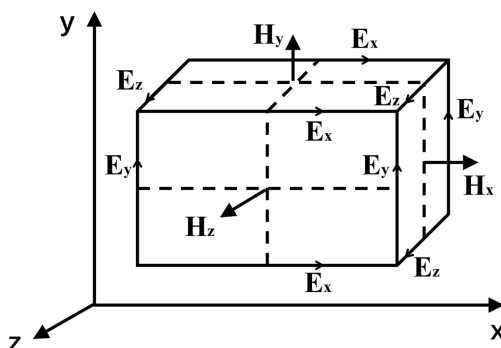


Figure 1. Yee cell diagram of the FDTD algorithm
图 1. FDTD 算法的 Yee 元胞图

如图 1 所示，FDTD 算法采用 Yee 元胞图来描述空间的离散化结构。在这个图中，空间被划分为一个个立方体的网格单元，每个网格单元包含了电场分量和磁场分量。这种网格的布置方式使得电场和磁场的更新方程可以简洁地表示为差分形式，从而实现了 Maxwell 方程组的离散化求解。在 Yee 元胞图中，电场分量和磁场分量被交错排列，即电场分量位于网格的边上，而磁场分量位于网格的面上。这种交错排列的布局有利于电磁场在空间中的传播和相互作用的模拟，同时也符合 Maxwell 方程组中电场和磁场的耦合特性。通过在 Yee 元胞图上进行差分运算，FDTD 算法可以准确地模拟出电磁波在空间中的传播和相互作用。这种基于 Yee 元胞图的离散化方法是 FDTD 算法能够广泛应用于电磁场计算和仿真领域的重要原因之一。

3. 实验

如图 2 所示，我们设计了一种用于偏振转换的超表面结构。这个超表面能够将线偏振光转换为圆偏振光。超表面由金纳米棒组成，这些纳米棒的厚度约为入射光波长的 $1/70$ 。超表面的设计基于金纳米棒的特殊形状和排列方式，通过调节纳米棒的长度、宽度和间距等参数，可以实现对入射光偏振态的有效控制。当线偏振光入射到超表面上时，金纳米棒的结构会导致光的偏振方向发生改变，最终实现线偏振到圆偏振的转换。基底层材料为 SiO_2 ，基底为 SiO_2 的超表面结构具有一些特殊的优势。 SiO_2 是一种常见的二氧化硅材料，具有优异的光学和电学性能，同时具有良好的化学稳定性和机械强度。作为超表面的基底材料， SiO_2 具有以下特点：1) SiO_2 在可见光和近红外光谱范围内具有很高的透明性，能够有效传递和控制光波。2) 其具有良好的化学稳定性，能够抵抗许多化学腐蚀和氧化反应，从而保证超表面的长期稳定性。3) 其具有一定的机械强度和硬度，能够作为超表面的稳定支撑结构。4) SiO_2 是一种常见且制备成本较低的材料，在大规模制备超表面结构时具有一定的优势。

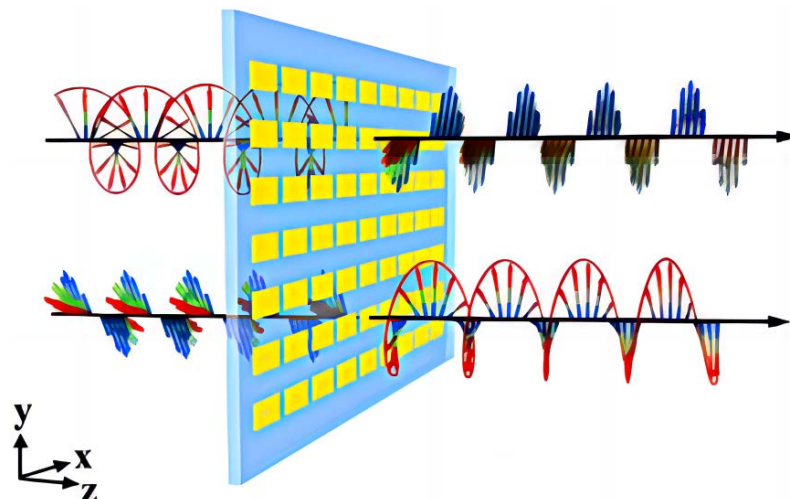


Figure 2. Polarization conversion dielectric metasurface of linear polarization to circular polarization

图 2. 线偏振转换为圆偏振的偏振转换介电超表面

图 2 展示的超表面不仅可以在线偏振光转换为圆偏振光，而且由于琼斯矩阵的可逆性，它还可以将入射的圆偏振光转换为线偏振光。这意味着超表面具有双向偏振转换的能力，可以在线偏振和圆偏振之间实现双向转换。这种双向转换的特性使得超表面在光学器件和通信系统中具有更广泛的应用前景，可以灵活地适应不同偏振光信号的需求。随后我们利用 FDTD 算法构建超表面阵列进行了仿真。图 3 展示了 FDTD 仿真的基本步骤。

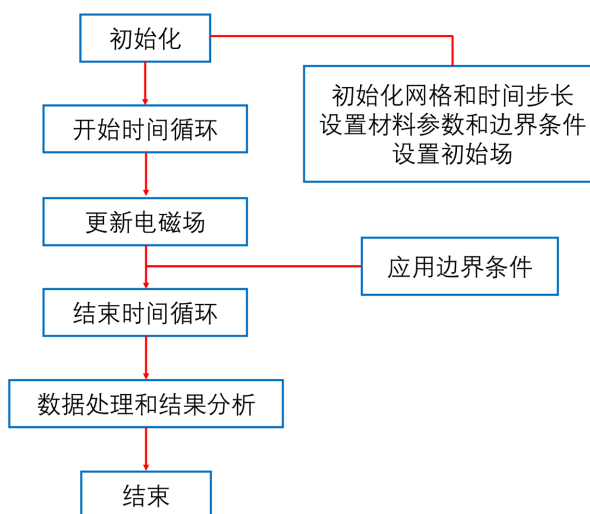


Figure 3. Basic simulation steps for FDTD

图 3. FDTD 的基本仿真步骤

我们基于以下步骤进行仿真：

- 1) 建立仿真模型：确定仿真区域的几何形状和边界条件。根据具体问题确定空间的离散化网格，包括确定网格的尺寸和形状。
- 2) 初始化场量：将电场和磁场在整个仿真区域内的初始值设置为零或根据问题设定合适的初始值。

3) 时间步进: 按照一定的时间步长 Δt , 依次进行以下步骤:

更新电场: 根据电场的更新方程, 计算下一个时间步长时刻的电场值。这一步通常需要使用上一个时间步长时刻的磁场值。

更新磁场: 根据磁场的更新方程, 计算下一个时间步长时刻的磁场值。这一步通常需要使用当前时间步长时刻的电场值。

边界处理: 根据设定的边界条件对边界上的场量进行处理, 通常采用吸收边界条件(如 PML)或反射边界条件。

4) 重复步骤 3: 不断重复时间步进的过程, 直到达到设定的仿真时间。

5) 结果分析: 根据仿真结果, 分析电磁场在空间中的分布和变化规律, 得出对应的物理结论或优化设计方案。

在进行 FDTD 仿真时, 需要注意选择合适的时间步长和空间网格尺寸, 以保证仿真结果的准确性和稳定性。此外, 还需考虑边界条件的选择和处理, 以及仿真模型的合理简化, 以提高仿真效率和减少计算资源的消耗。

根据图 4 展示的监视器的结果图, 超表面成功地将线偏振光转换为了圆偏振光。通过观察图中的偏振态分布, 可以明显看出入射光束的线偏振特性在超表面作用下发生了改变, 变为了具有圆偏振性质的光束。这表明超表面具有出色的偏振转换功能, 能够高效地调控光的偏振态, 为光学信号处理和传输提供了新的可能性。这种对偏振态的精确控制使得超表面在光学成像、通信系统和传感器等领域具有广泛的应用前景。

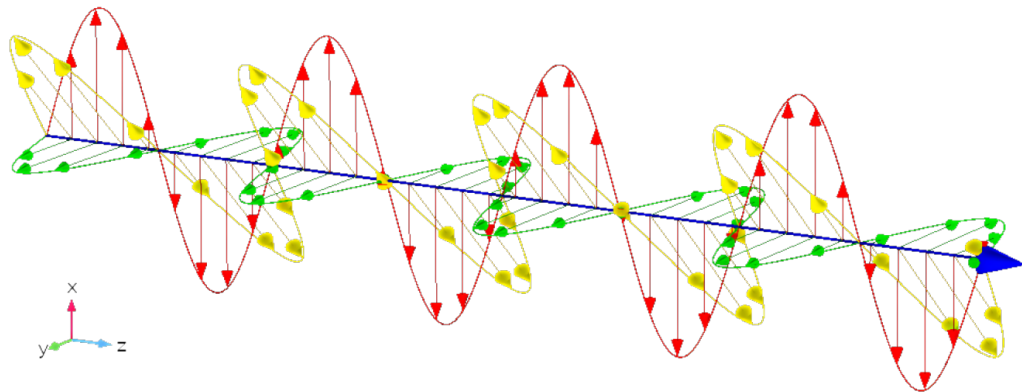


Figure 4. The polarization state of the outgoing beam

图 4. 出射光束的偏振态

图 5 展示了出射光束的透射率和光强分布, 值得注意的是, 在入射波长处透射率均大于 0.75。这表明单层超薄介电超表面在转换光偏振态的同时, 保持了较高的光透过率, 具有良好的光学传输性能。这种特性对于光学器件和通信系统至关重要, 保证了信号传输时的高效率和稳定性。

通过对原理的进一步延伸, 我们发现当微元设计为半波片, 并且微元的取向角度发生改变时, 单层超薄介电超表面能够将入射的线偏振光束转换为径向偏振或角向偏振光束。具体操作为将微元的取向角度设定为径向偏振或是角向偏振在该坐标处的极化角度, 极化角度为柱坐标系下的角度。这种转换后光束的偏振态分布如图 6 所示; 这一发现揭示了超薄介电超表面在偏振光控制方面的更广泛应用, 能够实现对光偏振态的高度可控性。这种功能性扩展为光学器件和通信系统的设计提供了更多选择, 也为光学信号处理和成像技术的发展带来了新的可能性。

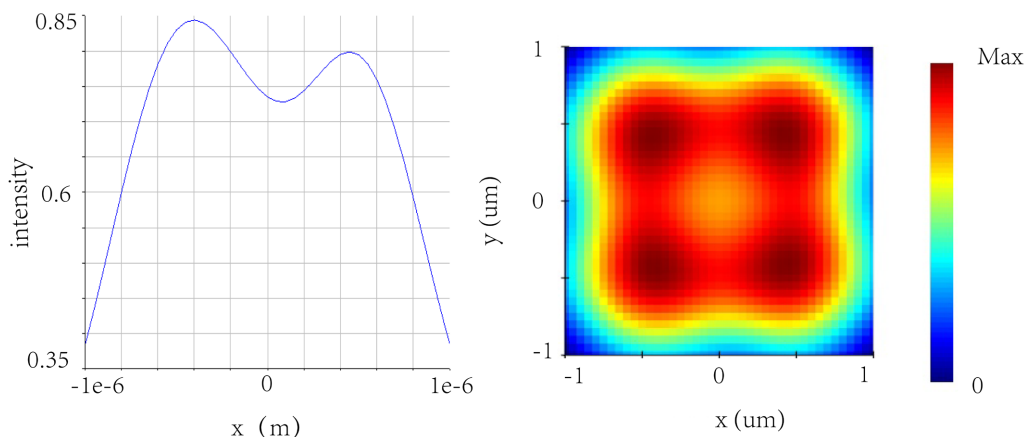


Figure 5. Transmittance and light intensity distribution
图 5. 透过率和光强分布

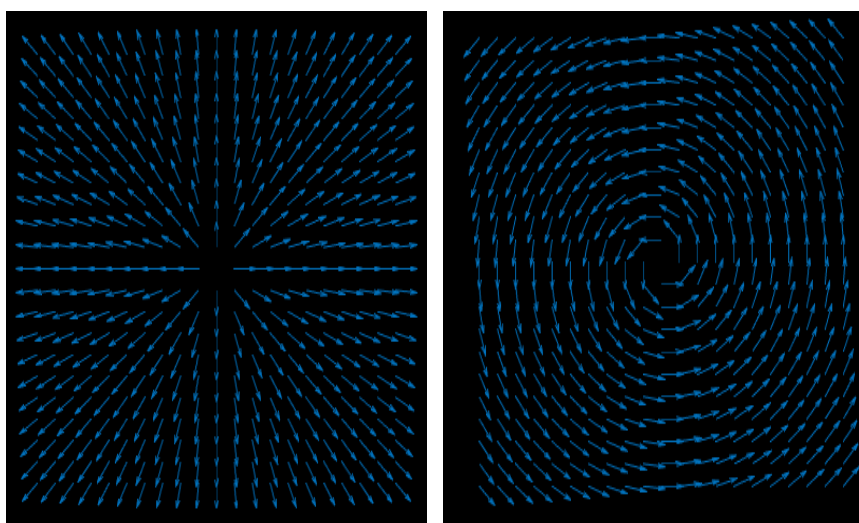


Figure 6. Polarization state distribution of radial and angular polarization
图 6. 径向偏振和角向偏振的偏振态分布

4. 结论

本文基于超表面的琼斯矩阵理论构建了偏振转换超表面，并成功实现了将线偏振光束转换为圆偏振光束。转换得到的圆偏振光束偏振分布均匀，透射率高。通过精心设计超表面的结构和参数，以及根据琼斯矩阵理论对光场的数学描述，实现了对入射光的精确控制和调制。随后进一步实现了线偏振到径向偏振和角向偏振的转换，径向偏振和角向偏振在光学紧聚焦领域具有潜在的应用性。这一成果为光学偏振控制领域的研究提供了新的思路和方法，也为偏振光在光通信、光学成像和传感器等领域的应用提供了新的可能性。

参考文献

- [1] Wang, S., Wen, S., Deng, Z.L., Li, X. and Yang, Y. (2023) Metasurface-Based Solid Poincaré Sphere Polarizer. *Physical Review Letters*, **130**, Article ID: 123801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.130.123801>
- [2] Ichikawa, H., Takeya, K. and Tripathi, S.R. (2023) Linear Dichroism and Birefringence Spectra of Bamboo and Its Use as a Wave Plate in the Terahertz Frequency Region. *Optical Materials Express*, **13**, 966-981.

- <https://doi.org/10.1364/OME.485119>
- [3] Qi, Y., Zhang, B., Liu, C. and Deng, X. (2020) Ultra-Broadband Polarization Conversion Meta-Surface and Its Application in Polarization Converter and RCS Reduction. *IEEE Access*, **8**, 116675-116684. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3004127>
- [4] Huang, X., Ma, X., Li, X., Fan, J., Guo, L. and Yang, H. (2022) Simultaneous Realization of Polarization Conversion for Reflected and Transmitted Waves with Bi-Functional Metasurface. *Scientific Reports*, **12**, Article No. 2368. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06366-6>
- [5] Abdollahramezani, S., Hemmatyar, O., Taghinejad, M., Taghinejad, H., Krasnok, A., Eftekhari, A.A., Teichrib, C., Deshmukh, S., El-Sayed, M.A., Pop, E. and Wuttig, M. (2022) Electrically Driven Reprogrammable Phase-Change Metasurface Reaching 80% Efficiency. *Nature Communications*, **13**, Article No. 1696. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29374-6>
- [6] Ren, H., Fang, X., Jang, J., Bürger, J., Rho, J. and Maier, S.A. (2020) Complex-Amplitude Metasurface-Based Orbital Angular Momentum Holography in Momentum Space. *Nature Nanotechnology*, **15**, 948-955. <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0768-4>
- [7] Valipour, A., Kargozarfard, M.H., Rakhshi, M., Yaghootian, A. and Sedighi, H.M. (2022) Metamaterials and Their Applications: An Overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, **236**, 2171-2100. <https://doi.org/10.1177/1464420721995858>
- [8] Thureja, P., Sokhoyan, R., Hail, C.U., Sisler, J., Foley, M., Grajower, M.Y. and Atwater, H.A. (2022) Toward a Universal Metasurface for Optical Imaging, Communication, and Computation. *Nanophotonics*, **11**, 3745-3768. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2022-0155>
- [9] Zhang, S., Wong, C.L., Zeng, S., Bi, R., Tai, K., Dholakia, K. and Olivo, M. (2020) Metasurfaces for Biomedical Applications: Imaging and Sensing from a Nanophotonics Perspective. *Nanophotonics*, **10**, 259-293. <https://doi.org/10.1515/nanoph-2020-0373>
- [10] Sroor, H., Huang, Y.W., Sephton, B., Naidoo, D., Vallés, A., Ginis, V., Qiu, C.W., Ambrosio, A., Capasso, F. and Forbes, A. (2020) High-Purity Orbital Angular Momentum States from a Visible Metasurface Laser. *Nature Photonics*, **14**, 498-503. <https://doi.org/10.1038/s41566-020-0623-z>
- [11] McCoy, D.E., Shneidman, A.V., Davis, A.L. and Aizenberg, J. (2021) Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Optical Simulations: A Primer for the Life Sciences and Bio-Inspired Engineering. *Micron*, **151**, Article ID: 103160. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2021.103160>
- [12] Zeng, Z., Venuthurumilli, P.K. and Xu, X. (2021) Inverse Design of Plasmonic Structures with FDTD. *ACS Photonics*, **8**, 1489-1496. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.1c00260>