Hans汉斯

超表面对垂直入射s、p偏振的操控

李灵姣

上海理工大学理学院,上海

收稿日期: 2024年6月11日; 录用日期: 2024年7月4日; 发布日期: 2024年7月12日

摘要

相比于超材料,二维结构的超表面不仅是体积的压缩,更多的是操控电磁波的相位、振幅和偏振等波前 信息。尤其是相位梯度超表面(Gradient Metasurface, GMS)的出现使得超表面对电磁波的操控达到了一 个新的高度。本文基于金属级联单元和广义Snell定律,设计出三种#字形金属结构单元。在CST仿真中, 中心频率为10 GHz,使用Frequency domain模式进行仿真,边界条件采用的是unit cell边界条件。本文 用三种方式实现了当电磁波垂直入射到超表面上时,达到s、p偏振分离的效果: (1) 在s、p偏振保持高 透射的情况下,根据s、p偏振的透射相位设计了四分之一波片和二分之一波片,进行参数扫描,在满足 对p偏振的相位全覆盖的同时不影响s偏振,实现了p偏振的波束偏转; (2) p偏振反射、s偏振透射: (3) p 偏振透射、s偏振反射。

关键词

超表面,广义Snell定律,偏振分离

Metasurface Manipulation of Vertical Incidence s and p Polarization

Lingjiao Li

College of Science, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jun. 11th, 2024; accepted: Jul. 4th, 2024; published: Jul. 12th, 2024

Abstract

Compared with metamaterials, the two-dimensional structure of the metasurface not only compresses the volume, but also controls the phase, amplitude and polarization of the wave front information of the electromagnetic wave. Especially, the appearance of phase gradient metasurface (Gradient Metasurface, GMS) has led to a new trend in the manipulation of electromagnetic waves by metasurface. In CST simulation, the center Frequency is 10 GHz, the Frequency domain mode is used for simulation, and the boundary condition is unit cell boundary condition. In this paper, three ways are used to achieve the effect of polarization separation of s and p when the electromagnetic wave is vertically incident on the metasurface: (1) Under the condition that s and p polarization maintain high transmission, a quarter wave plate and a half wave plate are designed according to the transmission phase of s and p polarization, and the parameter scanning is carried out to meet the full phase coverage of p polarization without affecting s polarization, and the beam deflection of p polarization is realized; (2) p polarization reflection, s polarization transmission; (3) p polarization transmission, s polarization reflection.

Keywords

Metasurface, Generalized Snell's Law, Separation of Polarization

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/

1. 引言

电磁波传输在通信、雷达方面应用前景广泛。传统光学仪器存在空间占比大,应用范围窄,质量大,不便于高度集成的问题。而我们日常使用的手机、电脑都是靠雷达、无线连接实现电磁波的传输。要操控电磁波,尤其是微波段、可见光和太赫兹波段的电磁波,这就十分需要超表面出手来操控电磁波的相位[1][2]、振幅[3][4]和偏振[5][6]。本文研究的是 s、p 偏振,微波段下的两个相互垂直的线偏振[7][8]。

我们要操控 s、p 偏振,就需要理解什么是 s、p 偏振。从 Brewster 效应入手,当自然光以 $\theta_i = \theta_B \lambda$ 射到两介质交界处,反射光为偏振垂直于入射面的线偏振,透射光为 s 偏振和 p 偏振混合的部分偏振光。所以 s、p 偏振的区别就是偏振与入射面的垂直或平行的线偏振,具体如图 1 和图 2 所示。其中,黑点表示偏振方向与入射面垂直。









根据s偏振的入射电磁波,表达式如下:

$$E^{i}(y) = \hat{y}e^{-jk_{a}(x\sin\theta_{i}+z\cos\theta_{i})}$$

$$H^{i}(x,z) = (-\hat{x}\cos\theta_{i} + \hat{z}\sin\theta_{i})\frac{1}{\eta_{a}}e^{-jk_{a}(x\sin\theta_{i}+z\cos\theta_{i})}$$
(1)

它的反射电磁波,表达式如下:

$$E^{r}(y) = \hat{y}R_{s}e^{-jk_{a}(x\sin\theta_{r}+z\cos\theta_{r})}$$

$$H^{r}(x,z) = (\hat{x}\cos\theta_{r} + \hat{z}\sin\theta_{r})\frac{R_{s}}{\eta_{a}}e^{-jk_{a}(x\sin\theta_{r}+z\cos\theta_{r})}$$
(2)

它的透射电磁波,表达式如下:

$$E^{t}(y) = \hat{y}T_{s}e^{-jk_{b}(x\sin\theta_{t}+z\cos\theta_{t})}$$

$$H^{t}(x,z) = (-\hat{x}\cos\theta_{t} + \hat{z}\sin\theta_{t})\frac{T_{s}}{\eta_{b}}e^{-jk_{b}(x\sin\theta_{t}+z\cos\theta_{t})}$$
(3)

同理, p 偏振的入射电磁波为:

$$E^{i}(x,z) = (-\hat{x}\cos\theta_{i} + \hat{z}\sin\theta_{i})e^{-jk_{a}(x\sin\theta_{i} + z\cos\theta_{i})}$$

$$H^{i}(y) = -\hat{y}\frac{1}{\eta_{a}}e^{-jk_{a}(x\sin\theta_{i} + z\cos\theta_{i})}$$
(4)

p偏振在 x-z 平面发生反射,反射电场和磁场分别表示为:

$$E^{r}(x,z) = -(\hat{x}R_{p}\cos\theta_{r} + \hat{z}R_{p}\sin\theta_{r})e^{-jk_{a}(x\sin\theta_{r}+z\cos\theta_{r})}$$

$$H^{r}(y) = \hat{y}\frac{R_{p}}{\eta_{a}}e^{-jk_{a}(x\sin\theta_{r}+z\cos\theta_{r})}$$
(5)

p偏振的透射电场和磁场分别表示为:

$$E^{t}(x,z) = (-\hat{x}T\cos\theta_{t} + \hat{z}T\sin\theta_{t})e^{-jk_{a}(x\sin\theta_{t}+z\cos\theta_{t})}$$

$$H^{t}(y) = -\hat{y}\frac{T}{\eta_{b}}e^{-jk_{b}(x\sin\theta_{t}+z\cos\theta_{t})}$$
(6)

DOI: 10.12677/mos.2024.134384

根据 Holloway 提出的广义薄层跃迁条件[9] [10]:

$$\chi_{ee}^{xx} = \frac{-\Delta H_y}{j\omega\varepsilon_0 E_{x,av}}, \chi_{mm}^{yy} = \frac{-\Delta E_x}{j\omega\mu_0 H_{y,av}}$$

$$\chi_{ee}^{yy} = \frac{\Delta H_x}{j\omega\varepsilon_0 E_{y,av}}, \chi_{mm}^{xx} = \frac{\Delta E_y}{j\omega\mu_0 H_{x,av}}$$
(7)

其中, $\Delta H = H_t - (H_i + H_r)$, $E_{av} = (E_i + E_r + E_t)/2$, ΔH 和 ΔE 分别表示的是超表面两侧磁场和电场的 差值。 E_{av} 和 H_{av} 分别表示的是超表面两侧电场和磁场的平均值, 下标 *i*, *r*, *t* 分别表示的是入射、反射 和透射场。

本文讨论的是超表面上下两侧介质相同,均为空气($n_i = 1$)时, s、p 偏振的透射情况,所以公式中 $\eta_a = \eta_b$, $\theta_i = \theta_t$,将转换后的透射电场、磁场得到:

$$\chi_{ee}^{xx} = 0, \chi_{mm}^{yy} = 0$$

$$\chi_{ee}^{yy} = 0, \chi_{mm}^{xx} = 0$$
(8)

根据所得极化磁化系数,由于不存在梯度相位,所以广义薄层跃迁条件不适合解决我们提出的问题。 引入广义 Snell 定律(Generalized Snell's law)。将 s、p 极化的电磁波设置不同的相位变化,从而将入射波 按照极化方式的不同发生不同方向的反射或者折射,达到波束分离的效果。

2. 仿真

广义 Snell 定律

传统光学器件是靠传播路径积累相位差,需要涉及特殊光路使得电磁波产生所需的相位差,往往需要很大的体积,由于传播路径的原因,也会造成很大的能量损耗。而广义 Snell 定律则是靠添加单元的梯度相位来实现波束的偏转[11]-[13],图像如图 3 所示。





根据广义 Snell 透射定律:

$$n_t \sin \theta_t - n_i \sin \theta_i = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}x} \tag{9}$$

其中, dφ/dx 就是我们所说的相位梯度。

它将普通的折射定律和反射定律进一步推广,不仅适用于微波、红外波段,还有更广阔的可见光和 太赫兹波段。

当电磁波的传播方向垂直于等相位面,将透射相位由 360°到 0 递减,且透射相位为 360°的单元透射 波在传播了一个完整的波长的位置处,恰好与透射相位 0 处的波处在同一相位面上,以此判断实现了波 束偏转。

基于广义 Snell 定律,我们设计了一个在 10 GHz 频率处, s、p 偏振平面波全透射,并且垂直入射的 p 偏振发生偏振的超表面,其中 s 偏振的相位基本不发生改变。

超表面由三层金属与两层介质相互嵌套组成,最外层金属结构相同,整体呈现出"三明治"的上下 对称结构。考虑到在 9~11 GHz 波段处,之前大家做了很多的仿真结构,比如工字形结构、田字形、十字 架结构,在本文中,我们设计的金属图案是#字形,是基于工字形[13] [14]和双工字型[15]-[17]的变形。 运用的仿真软件是 CST。仿真条件设置如下:使用 Frequencydomain 模式进行仿真,边界条件采用的是 unitcell 边界条件,超表面上下空气层厚度均为三个工作波长(10 GHz 下,电磁波波长 λ 为 3 cm),激励端 口采用的是 Floquet 下的 Z_{min}。

在得到合适仿真结果前,我们设计了#形结构如图4所示,又做了很多的参数扫描,为了在保持高透射的情况下,还能得到全相位的覆盖,进行大量的仿真测试。



Figure 4. # Type metallic structure 图 4. #型金属结构

其中,金属选取的是铜,单层金属厚度为 0.035 mm,它的电导率为 5.96×10⁷ S/m。介质层选取的是 polyimide,电导率为 0.0027 S/m,正切损耗 tan δ 为 0.0025,介质层的厚度为 1.5 mm,根据三明治结构,超表面总厚度为 3 mm 左右(工作波长的十分之一),超表面的整体单元边长为 6 mm (工作波长的五分之一),符合超表面亚波长的结构。

在进行仿真时,根据全透射的特点,我们发现根据 s、p 偏振的透射相位可以进行偏振转换,设计了 了四分之一波片[18]-[20]和二分之一波片[20]-[22]。

首先,四分之一波片指的是控制材料和厚度使电磁波经过波片后,两个不同偏振方向的光产生 1/4 波长(Δφ = ±90°)的相位差,在该相位差下合成的光为圆偏振光,通常,我们通常使用四分之一波片来隔 绝反射光的影响。

当超表面为四分之一波片时,对应的超表面内外层结构参数如下表 1,超表面结构如图 5 所示。仿 真结果如图 6 所示。

Table 1. Structural parameters of quarter wave plate 表 1. 四分之一波片的结构参数(单位:mm)							
参数	D_y	E_y	H_y	E_x	H_x		
外层	0.25	0.75	3.25	3.25	0.75		
内层	0.25	0.75	2	3	0.5		





Figure 5. Metasurface structure of the quarter-wave plate. (a) Inner layer; (b) Outer layer 图 5. 四分之一波片的超表面单元结构。(a) 内层; (b) 外层



Figure 6. Transmission amplitude and phase of a quarter-wave plate 图 6. 四分之一波片的透射振幅和相位

从上图可以看出, Tss 相位为-88°, Tpp 相位为 179°, 相位差 $\Delta \varphi = 267°$, 接近于-90°, 并且从透射 系数的幅度看出, Tss 和 Tpp 在 9~10.5 GHz 一直保持在-2~0 dB 之内, 可以说是 s、p 偏振都达到了全透 射,所以实现了 s、p 偏振转换为圆偏振的效果。

其次,半波片,又被称为二分之一波片,它指的是控制材料和厚度使电磁波经过波片后,两个不同 偏振方向的光产生 1/2 波长(Δφ = ±180°)的相位差,线偏振光经过 λ/2 波片后还是线偏振光。

当超表面为二分之一波片时,对应的超表面内外层结构如下图 7 所示,此时超表面的结构参数如下表 2 所示。仿真条件与四分之一波片相同所得的 s、p 偏振的透射幅度和相位结果如图 8 所示。

从下图可以看出,Tss相位为-80°,Tpp相位为110°,相位差\mathrm{\Delta\varphi} = 190°,接近于180°,并且从透射系数的幅度看出,Tss和Tpp在10GHz附近较窄的区域一直保持在-3dB之内,在这范围内 s、p偏振都达到了高透射,超表面可以作为半波片。

最后,要使得透射波发生偏转,透射系数的幅度基本保持相同且高透射的情况,并且单元之间存在固定的相位差。设计六个超单元单独对 s 极化具有特定的透射梯度相位,使超表面在周期内实现 360°的相位全覆盖。

Table 2. Parameters of the half-wave plate 表 2. 半波片的结构参数							
参数/mm	D_y	E_y	H_y	E_x	H_x		
外层	0.5	1	3.5	2.5	0.75		
内层	0.25	0.75	3.25	3.25	0.5		



Figure 7. Metasurface structure of half wave plate 图 7. 半波片结构



Figure 8. Transmission amplitude and phase of half wave plate 图 8. 半波片的透射幅度和相位

根据公式(9),我们将超表面的上下介质均为空气($n_i = n_i = 1$)公式代入公式(9)得到:当入射角为 0°, 电磁波垂直入射,上式可以简化为:

$$\theta_t = \arcsin\left(\frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{\mathrm{d}\varphi}{\mathrm{d}x}\right) \tag{10}$$

根据超表面周期为 6 mm, dx = 5 mm, 波长为 3 cm, 根据参数扫描, 发现可以覆盖 p 偏振的 2π 相位, 选择了六个单元, 即每个单元相位差为 $\pi/3$, 所以折射角 $\theta_i = 50^\circ$ 左右。

在仿真中,需要进行参数扫描,使得电磁波照射到超表面上各单元时,能保持高透射的同时,还能 超表面在一个周期内实现 2π相位全覆盖。各个单元的 s、p 偏振的透射相位如表 3 所示。实际的相位与 理论的相位比较如图 9 所示。这六个单元的内外层结构如图 10 和图 11 所示,内外层对应的结构如表 4 和表 5 所示。各晶胞对应的 s、p 偏振透射幅度如图 12 所示。

在仿真时,将6个单元按照相位变化排列成一行,由于算力,不能对超表面进行较大的扩充,选取 其中第一行和第一列进行仿真,得到 s、p 偏振的透射结果如图 13 所示。



图 11. 超单元的外层设计

 Table 4. The inner metal structure of the meat surface

 表 4. 超单元的内层金属结构

数量	D_y	E_y	H_y	E_x	H_x
0	0.5	1.25	3.8	2.5	0.8
1	1	1.5	3	4.2	0.8
2	1	1.5	3	3.5	1
3	0.25	0.75	3	3	0.5
4	0.25	0.75	3.5	3	0.5
5	1	2	2.5	4.6	0.5

表 5. 超单元的外层金属结构							
数量	D_y	E_y	H_y	E_x	H_x		
0	1.25	0.75	4.45	4.5	0.25		
1	0.95	1.45	4.5	4	0.25		
2	0.95	1.45	4.5	4	0.25		
3	2	2.5	4	4.25	0.8		
4	1.25	1.75	4	3.75	1		
5	1.25	1.75	4.45	4.5	0.25		

 Table 5. The outer metal structure of the meat surface

 表 5. 超单元的外层金属结构



Figure 12. The transmission amplitude of each unit for s and p polarization 图 12. 各单元的 s、p 偏振透射幅度



Figure 13. Simulation results of beam deflection 图 13. 波束偏折的仿真结果

从上图可以看出,由于相位梯度的关系,10 GHz 时,p偏振的透射幅度降到-12 dB,p偏振的全透 射的频率发生了偏移,到了 9.9 GHz。为了更加清楚地看到 s 偏振保持不变,p偏振发生偏折的结果,偏 移后的电场结果如图 14 所示,其中电磁波垂直向上传播,很明显 s 偏振没有发生偏折,p偏振出现弯曲。 同样在进行参数扫描发现,在某些情况下,s 偏振与p偏振的透射不同步,出现了 s 偏振保持全透射, p 偏振保持全反射的情况。条件设置与之前相同。



Figure 14. The electric field of (a) s and (b) p polarization 图 14. 漂移后, s、p 偏振的电场图

当 s 偏振全反射, p 偏振全透射时, 超表面结构如图 15 所示, 结构参数如表 6 所示。



Figure 15. Metasurface structure of s polarization transmission and p polarization reflection 图 15. 当 s 偏振反射, p 偏振透射时的超表面结构

参数\mm	D_y	E_y	H_y	E_x	H_x
外层	0.25	0.5	3	2	0.5
内层	0.5	1.25	3.75	3.75	0.5

 Table 6. Metasurface structure of polarization separation

 表 6. 偏振分离时超表面单元结构参数

s偏振的透射振幅和p偏振的反射振幅如图 16 所示。

从下图可以看出,10 GHz 时,p 偏振的反射达到了全反射,s 偏振也在 10 GHz 处达到了 0.8 左右,随频率增大而升高,可以认为全透射,总体来看达到了偏振分离的效果。

同样地,为了想要达到另一种偏振分离,即s偏振透射,p偏振反射的情况,对超表面结构做了重新的安排,将原来的#型结构旋转90°,得到了新的超表面结构。并且将超表面的周期由6mm改为7.5mm,变为波长的四分之一。仿真条件与前文相同,在新的超表面结构中,同样在参数扫描中,也发现s偏振的反射幅度和相位基本保持不变,高反射的强度达到了可以视为全反射的结果,p偏振相位变化不多,并且呈现出高透射的结果,所以此时的偏振分离的原因是因为s反射,p透射。

李灵姣



Figure 16. Transmission amplitude of s polarization and reflection amplitude of p polarization 图 16. s 偏振的透射振幅和 p 偏振的反射振幅

在此情况下,超表面的结构如图 17 所示,结构参数如表 7 所示。s 偏振的反射振幅和 p 偏振的透射振幅如图 18 所示。



Figure 17. Metasurface structure of s polarization reflection and p polarization transmission 图 17. s 偏振反射、p 偏振的超表面

Table 7. Metasurface structure of s polarization reflection and p polarization transmission 表 7. s 偏振反射、p 偏振的超表面

参数\mm	D_y	E_y	H_y	E_x	H_x
外层	1	1.5	3.75	3.5	0.25
内层	1	1.4	3.5	4	0.25





从下图可以看出,10 GHz 时,p 偏振的反射高达 0.85,为全透射,s 偏振也达到了 0.9 左右,可以认为全反射,总体来看达到了 s、p 偏振分离的效果。

3. 结论

本文利用 CST 仿真软件进行迭代计算,设计了三种超表面,在上下两侧介质相同的情况下,实现对 s、p 偏振的操控,达到 s、p 偏振分离的效果。

仿真条件是在 CST 的 Frequencydomain 模式条件下进行,周期边界条件是 unit cell,激励源为 Floquet 模式下的 Z_{min}端口,其中电磁波以垂直方式穿过超表面,在仿真过程中主要关注的 s、p 偏振的反射、透射这些参数。

在 s、p 偏振的透射型超表面中,进行了两个偏振转换的应用,包含四分之一波片和二分之一波片。 接着利用广义 Snell 定理,继续参数扫描,设计了 6 个相位梯度单元包含 p 偏振的 2π 相位的覆盖,在 s 偏振透射不变的情况下,实现了 p 偏振的波束偏转,从而达到了对 s、p 偏振的分离。

最后,在观察 s、p 偏振的透射和反射振幅时,发现在垂直入射的情况下,不需要进行相位梯度就可 以实现 s、p 偏振分离的情况,对此进行多次参数扫描,成功设计出可以对 s 偏振透射、p 偏振反射和 s 偏振反射、p 偏振透射的超表面,达到对 s、p 偏振的分离。

致 谢

想说终于到这一步了,真的感觉快要撑不住了,行文至此,所有过往终结,化为句号。希望余生皆 是快意与自由。

参考文献

- Shang, G., Wang, Z., Li, H., Zhang, K., Wu, Q., Burokur, S., *et al.* (2021) Metasurface Holography in the Microwave Regime. *Photonics*, 8, Article No. 135. <u>https://doi.org/10.3390/photonics8050135</u>
- [2] Chen, H., Lu, W., Liu, Z. and Geng, M. (2020) Microwave Programmable Graphene Metasurface. ACS Photonics, 7, 1425-1435. <u>https://doi.org/10.1021/acsphotonics.9b01807</u>
- [3] Lu, Z., Xia, C., Zhang, Y. and Tan, J. (2023) Metasurface with Electrically Tunable Microwave Transmission Amplitude and Broadband High Optical Transparency. ACS Applied Materials & Interfaces, 15, 29440-29448. <u>https://doi.org/10.1021/acsami.3c04030</u>
- [4] 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
- [5] Balthasar Mueller, J.P., Rubin, N.A., Devlin, R.C., Groever, B. and Capasso, F. (2017) Metasurface Polarization Optics: Independent Phase Control of Arbitrary Orthogonal States of Polarization. *Physical Review Letters*, **118**, Article ID: 113901. <u>https://doi.org/10.1103/physrevlett.118.113901</u>
- [6] Shah, S.M.Q.A., Shoaib, N., Ahmed, F., Alomainy, A., Quddious, A., Nikolaou, S., et al. (2021) A Multiband Circular Polarization Selective Metasurface for Microwave Applications. *Scientific Reports*, 11, Article No. 1774. <u>https://doi.org/10.1038/s41598-021-81435-w</u>
- [7] Fu, C., Sun, Z., Han, L., Liu, C., Sun, T. and Chu, P.K. (2019) High-Efficiency Dual-Frequency Reflective Linear Polarization Converter Based on Metasurface for Microwave Bands. *Applied Sciences*, 9, Article No. 1910. <u>https://doi.org/10.3390/app9091910</u>
- [8] Sun, H., Gu, C., Chen, X., Li, Z., Liu, L. and Martín, F. (2017) Ultra-Wideband and Broad-Angle Linear Polarization Conversion Metasurface. *Journal of Applied Physics*, **121**, Article ID: 174902. <u>https://doi.org/10.1063/1.4982916</u>
- [9] Vahabzadeh, Y., Chamanara, N. and Caloz, C. (2018) Generalized Sheet Transition Condition FDTD Simulation of Metasurface. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66, 271-280. <u>https://doi.org/10.1109/tap.2017.2772022</u>
- [10] Shen, S., Ruan, Z., Yuan, Y. and Tan, H. (2021) Conditions for Establishing the "Generalized Snell's Law of Refraction" in All-Dielectric Metasurfaces: Theoretical Bases for Design of High-Efficiency Beam Deflection Metasurfaces. *Nanophotonics*, **11**, 21-32. <u>https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0459</u>

- [11] Li, C.M., Zhang, S., Chen, H. and Ye, W. (2023) On the Generalized Snell's Law for the Design of Elastic Metasurfaces. *Journal of Applied Physics*, 133, Article ID: 095104. <u>https://doi.org/10.1063/5.0139679</u>
- [12] Su, G., Du, Z., Jiang, P. and Liu, Y. (2022) High-Efficiency Wavefront Manipulation in Thin Plates Using Elastic Metasurfaces beyond the Generalized Snell's Law. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **179**, Article ID: 109391. <u>https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109391</u>
- [13] Dharmavarapu, R., Izumi, K., Katayama, I., Ng, S.H., Vongsvivut, J., Tobin, M.J., et al. (2019) Dielectric Cross-Shaped-Resonator-Based Metasurface for Vortex Beam Generation at Mid-Ir and Thz Wavelengths. Nanophotonics, 8, 1263-1270. <u>https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0112</u>
- [14] Wang, H., Qu, S., Yan, M., Zheng, L. and Wang, J. (2019) Design and Analysis of Dual-Band Polarization-Selective Metasurface. *Applied Physics A*, **125**, Article No. 762. <u>https://doi.org/10.1007/s00339-019-3013-y</u>
- [15] Ma, B., Yang, X., Li, T., Du, X., Yong, M., Chen, H., *et al.* (2016) Gain Enhancement of Transmitting Antenna Incorporated with Double-Cross-Shaped Electromagnetic Metamaterial for Wireless Power Transmission. *Optik*, **127**, 6754-6762. <u>https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.04.107</u>
- [16] Shi, K., Bao, F. and He, S. (2018) Spectral Control of Near-Field Thermal Radiation with Periodic Cross Resonance Metasurfaces. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 54, Article ID: 7000107. <u>https://doi.org/10.1109/jqe.2018.2791639</u>
- [17] Liu, Z., Feng, W., Long, Y., Guo, S., Liang, H., Qiu, Z., et al. (2021) A Metasurface Beam Combiner Based on the Control of Angular Response. *Photonics*, 8, Article No. 489. <u>https://doi.org/10.3390/photonics8110489</u>
- [18] Wang, D., Zhang, L., Gu, Y., Mehmood, M.Q., Gong, Y., Srivastava, A., et al. (2015) Switchable Ultrathin Quarter-Wave Plate in Terahertz Using Active Phase-Change Metasurface. Scientific Reports, 5, Article No. 15020. https://doi.org/10.1038/srep15020
- [19] Chen, C., Gao, S., Xiao, X., Ye, X., Wu, S., Song, W., et al. (2021) Highly Efficient Metasurface Quarter-Wave Plate with Wave Front Engineering. Advanced Photonics Research, 2, Article ID: 2000154. https://doi.org/10.1002/adpr.202000154
- [20] Li, Y., Luo, J., Li, X., et al. (2020) Switchable Quarter-Wave Plate and Half-Wave Plate Based on Phase-Change Metasurface. *IEEE Photonics Journal*, **12**, Article ID: 4600410.
- [21] Ding, F., Wang, Z., He, S., Shalaev, V.M. and Kildishev, A.V. (2015) Broadband High-Efficiency Half-Wave Plate: A Supercell-Based Plasmonic Metasurface Approach. ACS Nano, 9, 4111-4119. <u>https://doi.org/10.1021/acsnano.5b00218</u>
- [22] Liu, Z., Li, Z., Liu, Z., Cheng, H., Liu, W., Tang, C., et al. (2017) Single-Layer Plasmonic Metasurface Half-Wave Plates with Wavelength-Independent Polarization Conversion Angle. ACS Photonics, 4, 2061-2069. https://doi.org/10.1021/acsphotonics.7b00491