

文章编号: 1001-3806(2018)06-0822-05

## 一种波束扫描固态等离子体超表面的设计

李文煜, 章海锋\*, 刘婷, 马宇

(南京邮电大学 电子与光学工程学院 光电信息科学与工程系, 南京 210023)

**摘要:** 为了实现空间中波束的动态扫描, 设计了一款基于固态等离子体的超表面。采用阵列单元相位曲线拼接的技术, 通过拼接介质基板厚度不同的阵列单元的相位曲线来实现  $0^\circ \sim 360^\circ$  的相位补偿, 并用数值插值的方式建立超表面参变量与相位补偿角之间的映射。结果表明, 超表面的反射主波束方向  $\theta$  分别为  $15^\circ$ ,  $25^\circ$  和  $30^\circ$ , 计算结果与设计相符合, 通过改变固态等离子体的激励区域来重构阵列单元, 实现了空间中波束在  $\theta$  为  $15^\circ$ ,  $25^\circ$  和  $30^\circ$  时的动态扫描。此反射型超表面阵列单元的普适性设计方法, 降低了阵列单元的设计难度, 并通过固态等离子体的可调谐特性实现了空间波束扫描超表面的设计。

**关键词:** 光学设计; 固态等离子体; 超表面; 相位补偿

**中图分类号:** O436; O53

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.06.018

## Design of the metasurface based on solid-state plasma for beam scanning

LI Wenyu, ZHANG Haifeng, LIU Ting, MA Yu

(Department of Optoelectronic Information Science and Engineering, School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** In order to realize dynamic scanning of beam in space, metasurface based solid plasma was designed. Phase compensation of  $0^\circ \sim 360^\circ$  was realized by splicing phase curve of array element of dielectric substrate with different thickness. The mapping between metasurface parameter and phase compensation angle was established by numerical interpolation. The results show that the reflecting main beam direction of the metasurface is  $\theta = 15^\circ$ ,  $\theta = 25^\circ$  and  $\theta = 30^\circ$  respectively. The calculated results are in agreement with the designed results. Array elements are reconstructed by changing the excitation region of solid plasma, and dynamic scanning of the beam in the space is achieved in the space of  $\theta = 15^\circ$ ,  $\theta = 25^\circ$  and  $\theta = 30^\circ$ . The universal design method of reflective metasurface array unit reduces the design difficulty of array unit, and realizes the design of space beam scanning metasurface by the tunable characteristic of solid plasma.

**Key words:** optical design; solid-state plasma; metasurface; phase compensation

### 引言

超表面<sup>[1-4]</sup>是一种特殊形式的人工电磁材料<sup>[5-6]</sup>, 它既保留了3维超材料的奇异特性, 又克服了3维超材料在制备上所面临的困难, 在操控电磁波传播方面

表现出了非凡的特性。在超表面的概念被提出之后, 迅速得到了学界的关注, 并成为了研究热点。目前在微波波段、红外波段、光学频段<sup>[7-11]</sup>均有超表面器件被提出。2012年, AIETA课题组<sup>[12]</sup>利用V形金属微结构实现了对入射光波<sup>[13-16]</sup>的全相位调制。同年, SUN课题组<sup>[17]</sup>用理论和实验展示了一种利用相位梯度结构在近红外波段实现高效反常反射功能的超表面器件。相位梯度超表面<sup>[18]</sup>是一种通过将等梯度相位差的不同尺寸结构单元有顺序地在空间排布所得到的一种表面器件, 在表面形成相位梯度的各向异性, 可以更加自由地控制反射波或透射波束的传播方向, 实现对反射波束和折射波束的自由控制。上述常规超表面都很难实现对波束的动态调谐性。实现对电磁波的动态调控也是超表面的另外一个研究热点, 而基于固态等

基金项目: 中国博士后特优资助项目(2016T90455); 中国博士后面上资助项目(2015M581790); 江苏省博士后面上资助项目(1501016A); 南京邮电大学引进人才科研启动基金(高水平师资)资助项目(NY217131); 南京邮电大学校级大学生创新训练计划支持项目

作者简介: 李文煜(1997-), 男, 大学本科生, 现主要从事周期性介质结构电磁特性的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: hanlor@163.com

收稿日期: 2017-12-20; 收到修改稿日期: 2018-01-16

离子体的超表面就能很好地解决这一问题。

固态等离子体<sup>[19-20]</sup>具有隐身、快速重构和高功率等特性,是一种全新的介质。固态等离子体构成的谐振单元未激励时,表现出介质特性,在激励时,表现为类似金属的特性。控制固态等离子体的激励区域,可以使得固态等离子体构成不同尺寸、位置的超表面阵列单元。在馈源的照射下,由于超表面上的阵列单元结构在尺寸上存在着偏差,所以必须对每个阵列单元进行相应的相位补偿,才能在远场获得等相位面,实现同相相加,得到所需方向上的辐射波束<sup>[21-24]</sup>。在此基础上再利用固态等离子体的快速重构特性,可以实现空间中波束的动态扫描。

另一方面,设计超表面的另外一个关键性技术是相位补偿。通常实现相位补偿的方法有 3 种:(1) 通过在每个阵列单元结构末端增加一小段传输线,由增加的传输线长短来实现相位补偿;(2) 主要用于设计圆极化<sup>[25]</sup>超表面,即通过调整每个阵列单元的旋转角度来实现相位补偿;(3) 通过改变每个阵列单元的物理尺寸大小实现相位补偿。上述 3 种传统的相位补偿方法一般都要要求超表面结构单元的相位特性曲线有较好的线性度,而且补偿范围必须完全覆盖  $0^\circ \sim 360^\circ$ ,而在实际的工程应用中,要设计出满足线性度好且相位特性曲线能够完美覆盖  $0^\circ \sim 360^\circ$  的超表面结构单元较为困难。

本文中的目标在于提出一种普适性的设计方法,这种普适性的方法是指在获取相位补偿曲线上,可以适用于任何条件,没有条件限制。用相位特性曲线拼接和插值技术来实现对超表面的设计工作,并用固态等离子体的快速重构特性实现空间中波束的动态扫描。

## 1 设计原理

图 1 中给出了构成作者所设计的固态等离子体超表面的两种阵列单元结构示意图。图 1a 是单元结构 A 的示意图,图 1b 是单元结构 B 的示意图。坐标轴的设定如图 1 所示。单元结构 A 和 B 都由 3 层组成,分别为固态等离子体层(最上层部分),介质基板(中间层部分)和铜质背板(最底层部分)。单元结构 A 的介质基板厚度为 3mm,单元结构 B 的介质基板厚度为 1.6mm。单元结构 A 和 B 的大小相等,都是边长为  $L$  的正方形,且  $L = 12\text{mm}$ 。构成单元结构 A 和 B 介质基板的材料都为 Rogers5880,介电常数为 2.2,损耗角正切值为  $9 \times 10^{-4}$ 。上层固态等离子体的介电常数可用

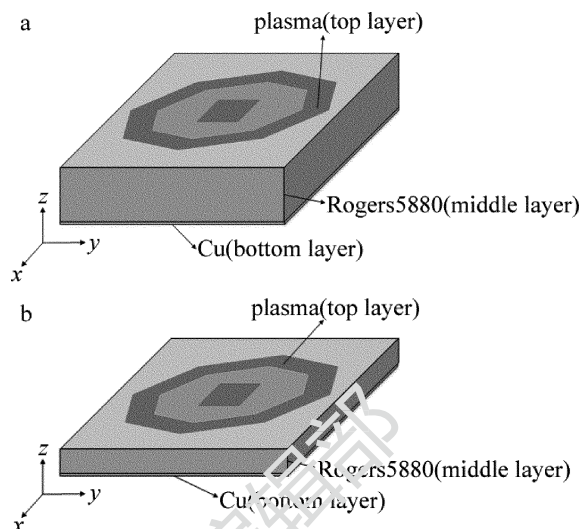


Fig. 1 Structure schematic of unit cell for the proposed metasurface  
a—the structure of unit cell A b—the structure of unit cell B

Drude 模型来描述,即:

$$\epsilon_p(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + j\omega\omega_c} \quad (1)$$

式中,等离子体频率  $\omega_p = 2.9 \times 10^{15} \text{rad/s}$ ,碰撞频率  $\omega_c = 1.65 \times 10^{14} \text{rad/s}$ , $\omega$  为角频率。显然,可以人为地改变激励固态等离子体的区域来实现对单位结构 A 和 B 反射相位的调控。

图 2 是固态等离子体超表面的单元结构示意图。图 2 中最上层的部分为固态等离子体,其中央是边长为  $a$  的正方形。正方形的外面有一个八边形环带,八边形外边缘距离中心的距离为  $R_2$ ,内边缘距离中心的距离为  $R_1$ ,其值分别为  $0.7\sqrt{2}a$  和  $0.55\sqrt{2}a$ 。介质基板的厚度为  $h$ 。本文中设计的超表面由  $30 \times 30$  即 900 个阵列单元组成。馈源喇叭的工作频段为 X 波段,位于超表面其中一边中心的正上方距反射阵列表面 360mm 处,倾斜角为  $10^\circ$ 。

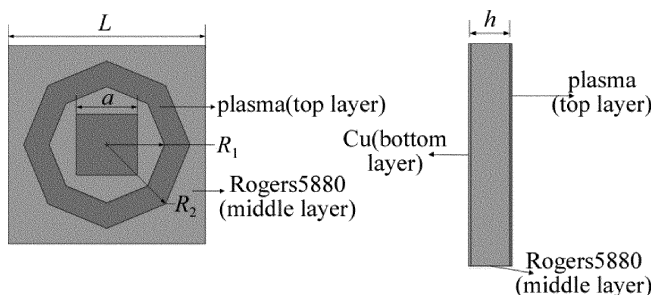


Fig. 2 Overlook and side views of unit cell for the proposed metasurface

## 2 结果分析与讨论

图 3 中给出了单元结构 A 和 B 在入射电磁波为 10.3GHz,改变参变量  $a$  时的反射相位曲线。由图 3a

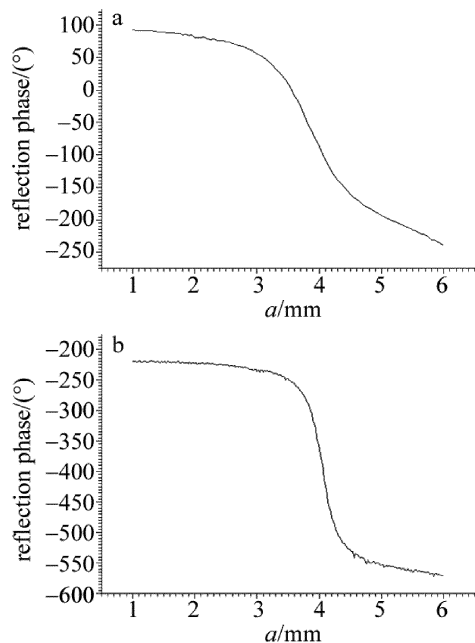


Fig. 3 Relationship between reflection phase and parameter  $a$   
a—the structure of unit cell A b—the structure of unit cell B

可知,当  $h = 3\text{mm}$  时,改变参变量  $a$  能够都到一条相位特性曲线。当  $a$  由  $1\text{mm}$  增加到  $6\text{mm}$  时,得到的相位特性曲线能够覆盖  $0^\circ \sim 340^\circ$ , 相位补偿范围是  $-250^\circ \sim 90^\circ$ 。由图 3b 可知,当  $h = 1.6\text{mm}$  时,当  $a$  由  $1\text{mm}$  增加到  $6\text{mm}$  时,得到的相位特性曲线能够覆盖  $0^\circ \sim 350^\circ$ , 相位补偿范围是  $-217^\circ \sim -567^\circ$ 。显然,单元结构 A 和 B 的相位特性曲线都没有完全覆盖  $0^\circ \sim 360^\circ$ , 且线性度都较差。显然,这两条相位特性曲线都很难满足超表面的设计要求。但是,可以采用相位特性曲线拼接的技术来实现对超表面的设计,即将两条相位特性曲线分段取值,使得拼接后的相位特性曲线能够完全覆盖  $0^\circ \sim 360^\circ$  的补偿范围。并采取数值插值技术来建立超表面单元参变量  $a$  与相位补偿角之间的映射,从而解决了相位特性曲线线性度差的难题。

根据上述原理,设计了一款基于固态等离子体的超表面,其反射波的主波束方向与  $z$  轴的夹角  $\theta = 15^\circ$  (主波束在  $x$ - $O$ - $z$  平面内的指向角为  $\theta$ )。图 4 中给出了采用插值技术得到的相位补偿曲线与单元结构 A 和 B 相位曲线间的关系。由图 4 可知,选取单元结构 A 相位特性曲线中  $-240^\circ \sim 0^\circ$  的部分,而用单元结构 B 相位特性曲线中  $-360^\circ \sim -240^\circ$  的部分。显然,将上述两部分的相位特性曲线拼接在一起就能很好地实现  $-360^\circ \sim 0^\circ$  范围内的相位补偿,既满足了超表面的设计要求,同时也降低了超表面的阵列单元结构的难度。由图 4a 可知,空心圆“C”表示使用数值插值技术

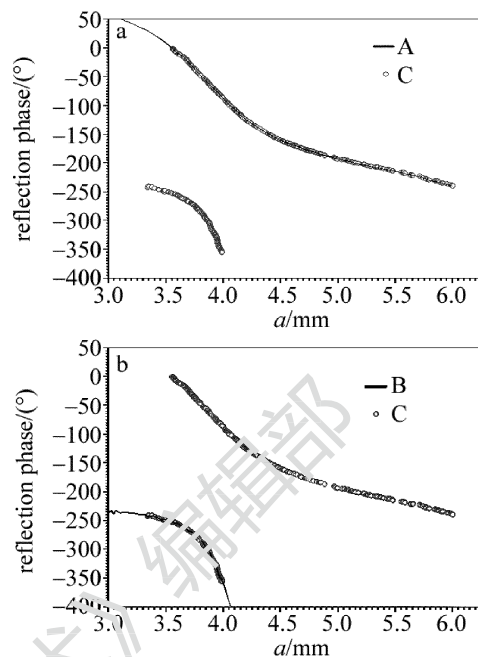


Fig. 4 Relationships between reflection phase and parameters  
a— $h = 3\text{mm}$  b— $h = 1.6\text{mm}$

计算得到的反射相位和  $a$  的映射关系,而实线部分则是用全波仿真计算得出的结构单元 A 的相位特性曲线。比较两个结果可知,数值插值技术得到的相位特性曲线与全波仿真计算得到的相位特性曲线吻合度较好。类似的结果也能从图 4b 中得到,实线是用全波仿真计算得出的结构单元 B 的相位特性曲线。由图 4 中的结果可知,用数值插值技术建立反射相位和参变量  $a$  间的映射关系是正确、可行和有效的。

为了使得设计的固态等离子体超表面能够实现入射电磁波在空间中的动态波束扫描,在特定反射电磁波的主波束方向下,每个超表面的阵列单元需要补偿的相位大小为<sup>[26]</sup>:

$$\Phi_l = K_0 [d_l - (x_l \cos \varphi_0 + y_l \sin \varphi_0) \sin \theta_0] \quad (2)$$

式中,  $\Phi_l$  为超表面阵列单元需要补偿的相位值,下标  $l$  表示不同的反射阵列 ( $l = 1, 2, 3, \dots$ ),  $K_0$  为真空的电磁波波数,  $d_l$  为超表面阵列单元到馈源的距离,  $x_l$  和  $y_l$  为超表面阵列单元相对馈源中心的相对坐标值,  $\theta_0$  为反射主波束与  $+z$  轴的夹角,  $\varphi_0$  为反射波束的方位角。根据(2)式,设计了一款能够工作在  $10.3\text{GHz}$  下,实现反射电磁波的主波束方向分别指向  $15^\circ, 25^\circ$  和  $30^\circ$  的固态等离子体超表面。图 5 是反射电磁波的主波束方向分别为  $15^\circ, 25^\circ$  和  $30^\circ$  时,超表面的 900 个结构单元的位置与参变量  $a$  的关系图。图 5 中的横纵坐标表示超表面阵列单元的位置编号(无量纲)。由图 5a 可知,超表面的中心区域  $a$  具有较大的值。随着反射电



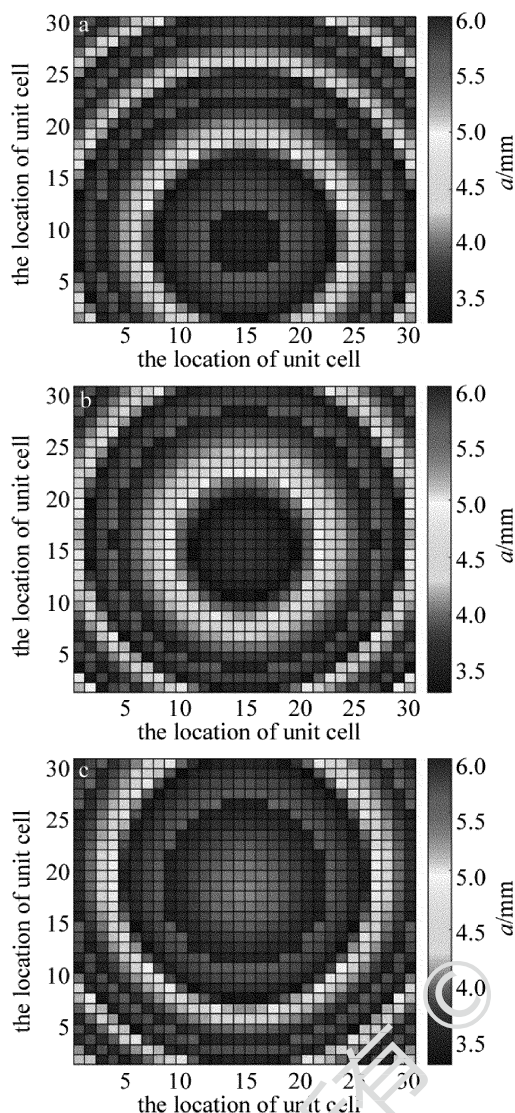


Fig. 5 Relationship between the location of 900 structural elements of metasurface and parameter  $a$  with different main beam direction angles  $\theta$  of the reflected electromagnetic wave  
a— $\theta = 15^\circ$  b— $\theta = 25^\circ$  c— $\theta = 30^\circ$

磁波的主波束指向角度的增加(如图 5b 和图 5c 所示),超表面中心区域的  $a$  的大小将发生明显的变化,但其大小的位置分布都是关于  $x$  轴对称。由图 5 可知,只要人为动态地改变上层等离子体的激励区域(改变每个阵列单元中  $a$  的值),就能实现空间中反射电磁波的主波束在不同角度( $15^\circ$ ,  $25^\circ$  和  $30^\circ$ )下的集中,即能实现空间中波束的动态扫描。

图 6 是  $\theta$  为  $15^\circ$ ,  $25^\circ$  和  $30^\circ$  时,反射波束的辐射方向图。由图 6 可知,采用相位特性曲线拼接和数值插值技术能够很好地实现对反射型超表面的设计,其全波仿真计算的结果与设计预期相符合。由图 6 还可知,  $\theta = 15^\circ$  时,主波束和副瓣相差 20dB 以上。 $\theta$  分别为  $25^\circ$  和  $30^\circ$  时,主波束和副瓣分别相差 19dB 和 18dB

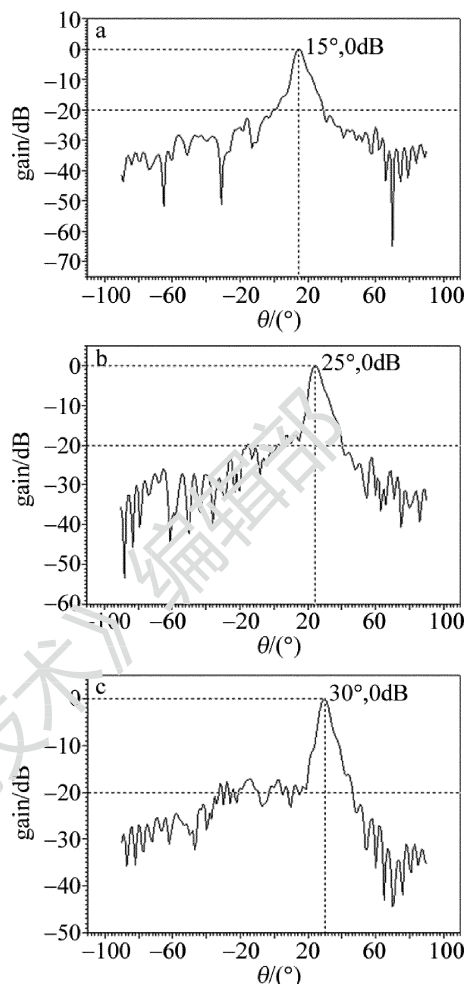


Fig. 6 Radiation patterns of metasurface with reflective beam for different  $\theta$   
a— $\theta = 15^\circ$  b— $\theta = 25^\circ$  c— $\theta = 30^\circ$

以上。可以看出,在设定的  $\theta$  分别为  $15^\circ$ ,  $25^\circ$  和  $30^\circ$  这 3 个角度下,反射电磁波的波束指向性比较好,能量比较集中。同理,采用类似的技术,分时动态地改变该超表面上每个结构单元的固态等离子体激励区域就能够实现反射电磁波在空间中的动态扫描。

### 3 结 论

本文中设计了一款波束扫描固态等离子体超表面,采用相位特性曲线拼接和数值插值映射技术,使得设计反射型超表面变得简单。该方法具有普适性,能将线性度差、相位补偿曲线不能完全覆盖  $0^\circ \sim 360^\circ$  的任意结构单元拼接起来组成反射型超表面,降低了设计难度。通过改变固态等离子体激励区域来实现阵列单元结构的重构,实现反射电磁波在空间中的动态扫描。此研究结果为设计新型超表面和反射阵列天线提供了设计思路。

### 参 考 文 献

- [1] HUANG L L, CHEN X Zh, MUEHLENBERND H, *et al.* Dispersionless phase discontinuities for controlling light propagation[J]. Nano Letters, 2012, 12(11): 5750-5755.
- [2] HE J W, WANG X K, HU D, *et al.* Generation and evolution of the terahertz vortex beam[J]. Optics Express, 2013, 21(17): 20230-20239.
- [3] LI Y, MO W Ch, YANG Zh G, *et al.* Generation of terahertz vortex beams base on metasurface antenna array[J]. Laser Technology, 2017, 41(5): 644-648 (in Chinese).
- [4] JIANG X X, WANG J M, HUANG X, *et al.* Complex amplitude pupil filters based on metasurface with subwavelength slot antenna[J]. Laser Technology, 2017, 41(6): 807-811 (in Chinese).
- [5] TAN L R, WU R X, WANG C Y, *et al.* Magnetically tunable ferrite loaded SIW antenna[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2013, 12(3): 273-275.
- [6] WANG Y, LIU Y, DU H, *et al.* A frequency reconfigurable microstrip antenna based on (Ba, Sr)TiO<sub>3</sub> substrate[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(2): 770-775.
- [7] WU Sh, ZHANG Zh, ZHANG Y, *et al.* Enhanced rotation of the polarization of a light beam transmitted through a silver film with an array of perforated S-shaped holes[J]. Physical Review Letters, 2013, 110(20): 207401.
- [8] MA X L, HUANG Ch, PU M B, *et al.* Multi-band circular polarizer using planar spiral metamaterial structure[J]. Optics Express, 2012, 20(14): 16050-16058.
- [9] GRADY N, HEYES J, CHOWDHURY D, *et al.* Terahertz metamaterials for linear polarization conversion and anomalous refraction[J]. Science, 2013, 340(6138): 1304-1307.
- [10] CHIN J, GOLLUB J, MOCK J, *et al.* An efficient broadband metamaterial wave retarder[J]. Optics Express, 2009, 17(9): 7640-7647.
- [11] HAN J F, CAO X Y, GAO J, *et al.* Design of broadband reflective 90° polarization rotator based on metamaterial[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(4): 044201 (in Chinese).
- [12] AIETA F, GENEVET P, KATS M A, *et al.* Aberration free ultrathin flat lenses and axicons at telecom wavelengths based on plasmonic metasurfaces[J]. Nano Letters, 2012, 12(9): 4932-4936.
- [13] YU N, GENEVET P, KATS M A, *et al.* Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction[J]. Science, 2011, 334(6054): 333-337.
- [14] GERMAIN D, SEETHARAMDOO D, BUROKUR S N, *et al.* Phase-compensated metasurface for a conformal microwave antenna[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(12): 124102.
- [15] WONJPS G, SELVANAYAGAM M, ELEFThERIADES G V. Design of unit cells and demonstration of methods for synthesizing Huygens metasurfaces[J]. Photonics and Nanostructures- Fundamentals and Applications, 2014, 12(4): 360-375.
- [16] ZHU B O, ZHAO J, FENG Y. Active impedance metasurface with full 360 reflection phase tuning[J]. Scientific Reports, 2013, 3(3): 3059.
- [17] SUN S, YANG K Y, WANG C M, *et al.* High-efficiency broadband anomalous reflection by gradient metasurfaces[J]. Nano Letters, 2012, 12(12): 6223-6229.
- [18] WEI Z Y, CAN Y, SU X P, *et al.* Highly efficient beam steering with a transparent metasurface[J]. Optics Express, 2013, 21(9): 10739-10745.
- [19] ZHANG L W, GONG R K, WANG X L, *et al.* Influence of particle size on plasma characters of laser-induced pulverized coal flow[J]. Laser Technology, 2017, 41(3): 438-441 (in Chinese).
- [20] LI K, XIN T, XIA J B, *et al.* Research of rapid annealing of fiber Bragg gratings based on arc plasma[J]. Laser Technology, 2017, 41(5): 649-653 (in Chinese).
- [21] GU M Q, TANG W X, MA H F, *et al.* Suppressing side-lobe radiation of horn antenna by loading metamaterial lens[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 9113.
- [22] WEE F H, MALEK F, ALAMANI A U, *et al.* Effect of two different superstrate layers on Bismuth Titanate (BiT) array antennas[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 3709.
- [23] RUI G H, ZHAN Q W. Highly sensitive beam steering with plasmonic antenna[J]. Scientific Reports, 2014, 4: 5962.
- [24] ZHU H L, LIU X H, CHEUNG S W, *et al.* Frequency-reconfigurable antenna using metasurface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(1): 80-85.
- [25] SUN W J, HE Q, HAO J M, *et al.* A transparent metamaterial to manipulate electromagnetic wave polarizations[J]. Optics Letters, 2011, 36(6): 927-929.
- [26] JOSÉ A. Encinar, design of two-layer printed reflect arrays using patches of variable size[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001, 49(10): 1403-1410.