

## 狭缝型全介质共振单元频率选择超表面

孙海竹<sup>1</sup>, 张建心<sup>1,2</sup>, 樊心民<sup>1,2</sup>, 孙永志<sup>2</sup>, 李森森<sup>3</sup>

- (1. 潍坊学院 物理与光电工程学院, 山东 潍坊 261061;
2. 潍坊学院 新型电磁材料研究所, 山东 潍坊 261061;
3. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308)

**摘要:** 为了使频率选择超表面获得新的共振模式, 在全介质共振单元内部引入了狭缝, 利用狭缝对电磁场的局域特性设计了基于该种共振单元的频率选择超表面。模拟其传输特性后发现, 当狭缝的长边和入射电场方向相同时, 可以在低频处出现一个阻带, 电磁场主要分布在共振单元之间。当狭缝的长边和入射电场方向垂直时, 可以在高频处出现一个阻带和一个通带, 同时随着共振频率的增大, 电磁场的局域特性更加明显, 被更好地限制在狭缝内部。通过调整狭缝的宽度、数量和间距可以在比较大的频率范围内调整超表面的工作频段。同时, 也可以通过旋转改变狭缝和入射电场的相对位置, 实现该频率选择超表面的可重构。这些理论结果为以狭缝为基础设计更复杂结构的共振单元提供了重要的理论指导。

**关键词:** 频率选择超表面; 全介质; 狭缝型共振单元

**中图分类号:** TN713+.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200108

## All-dielectric frequency selective metasurface based on slotted resonance unit

Sun Haizhu<sup>1</sup>, Zhang Jianxin<sup>1,2</sup>, Fan Xinmin<sup>1,2</sup>, Sun Yongzhi<sup>2</sup>, Li Sensen<sup>3</sup>

- (1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Weifang University, Weifang 261061, China;
2. Institute of New Electromagnetic Materials, Weifang University, Weifang 261061, China;
3. Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300308, China)

**Abstract:** In order to obtain new resonance modes for frequency selection of the metasurface, one or two slits were introduced into the all-dielectric resonance unit, all-dielectric frequency selective metasurface based on this type resonance unit was designed by using the local characteristics of electromagnetic field by slit. After simulating its transmission characteristics, it was found that when the long side of the slit and the direction of the incident electric field were the same, a stop band could appear at the low frequency, and the electromagnetic field was mainly distributed between the resonance units. When the long side of the slit was perpendicular to the direction of the incident electric field, a stopband and a passband could appear at the high frequency. Meanwhile, with the increase of the resonance frequency,

收稿日期: 2020-05-01; 修订日期: 2020-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(61701349); 山东省高校科研计划(J18KB110)

作者简介: 孙海竹(1986-), 女, 讲师, 硕士, 主要从事电磁超表面的模拟与设计方面的研究。Email: 442598491@qq.com

通讯作者: 张建心(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事超表面方面的研究。Email: zhjx\_aa@126.com

孙永志(1976-), 男, 教授, 博士, 主要从事新型电磁材料方面的研究。Email: nanshen01@126.com

the local characteristics of the electromagnetic field were more obvious and were better limited within the slit. By adjusting the width, number and spacing of slits, the operating frequency of the metasurface could be adjusted in a large frequency range. At the same time, the relative position of the slit and incident electric field could be changed by rotation to realize the reconfiguration of the metasurface. These theoretical results provide important theoretical guidance for the design of more complex resonant units based on slit.

**Key words:** frequency selective metasurface; all-dielectric; slotted resonance unit

## 0 引言

超表面因其优越的电磁波调控能力使得它在光频到微波频段得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。超表面为光的波前调制<sup>[3]</sup>、曲面全息<sup>[4]</sup>、微纳滤波<sup>[5]</sup>以及超表面吸收器<sup>[6]</sup>等提供了一个良好的平台。在微波频段,超表面的一个重要应用就是实现入射电磁波的频率选择<sup>[7]</sup>。为了克服电场集中点的电弧和导体中的加热,University of Texas at El Paso 的 J. H. Barton 把全介质频率选择超表面应用到了高功率微波领域<sup>[8]</sup>。空军工程大学的屈绍波团队报道了利用高介电常数的共振单元设计的全介质频率选择超表面。这些频率选择超表面大多是基于 Mie 共振和等效媒介理论设计的,通过调谐介质共振单元的共振模式来设计其传输特性。不同的介质共振单元可以在设计的频率上激发不同的共振模式,通过调整共振单元的形状,把共振单元设计成矩形、十字形、工字形等等<sup>[9]</sup>,可以任意改变有效相对介电常数和磁导率的值,在此基础上,设计出与周围环境阻抗匹配或不匹配的有效阻抗,进而设计出带通或带阻型频率选择超表面<sup>[9]</sup>。因此,设计频率选择超表面的一个重要因素是如何设计新型的共振单元,以期激励不同的共振模式。Vladimir R. Tuz 等人研究了空腔的偏心位移导致的共振单元几何形状的不对称性和 Mie 型及局域模的形成之间的相关性<sup>[10]</sup>。Yuanqing Yang 等人证明了单个的全介电纳米结构,引入了具有高折射率差的狭缝区域的硅纳米磁盘,通过合理的设计,可以产生强度增强超过三个数量级的强电场<sup>[11]</sup>。电磁场在共振单元或波导内部受到强烈的局域,因此可以显著地增强吸收、非线性和介质增益特性。清华大学周济院士研究组利用具有偏心圆孔的纳米盘在圆孔内产生

磁热点,从理论上证明了全介质超表面可以通过陷模的局域作用大大增强磁场。在纳米盘的偏心圆孔内可以放置与电磁场相互作用的额外材料<sup>[12]</sup>。同时,在基于金属材料的微型化的频率选择表面中,狭缝(或者是金属单元之间的空隙)也是其重要和基本的构成单元<sup>[13]</sup>。因此,文中把狭缝引入到共振单元的设计中,利用狭缝对电磁场的局域作用改变共振单元内部电磁场的分布,获得不同的共振模式。结果发现,当不同极化的电磁波入射时,可以分别激励起新的具有局域特性的共振模式,这些共振模式之间相互耦合使得频率选择超表面工作在不同的频段。这就为以狭缝为基础组合成包含十字形、井字形或其他复杂的分形<sup>[14]</sup>狭缝的共振单元提供了理论上的可能,拓宽了设计频率超表面以及光频段全反射超表面的思路。

## 1 理论模拟

首先模拟由如图 1 所示的包含一个狭缝的共振单元按照正方晶格排列构成的频率选择超表面。共振单元沿  $z$  轴方向的高度  $d$  为 4 mm,宽度和长度为 2 mm,按照周期为 3 mm 的正方晶格排列<sup>[15]</sup>。共振单元中狭缝沿  $x$  轴方向的宽度为 0.2 mm, $y$  轴方向的长度为 1.8 mm,高度和共振单元相同。共振单元的相对电容率为 115,背景材料为空气。为了获得文中所需的高介电常数的共振单元,可以选用  $0.7\text{Ba}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{TiO}_3-0.3\text{La}(\text{Mg}_{0.5}\text{Ti}_{0.5})\text{O}_3$  陶瓷。该种陶瓷的制作工艺大体分为两种。一种是用固体烧结法或带铸法制成陶瓷块,然后把陶瓷块切成大小相同或不同的小颗粒。将小颗粒均匀放置,形成阵列,就制作成了频率选择超表面样品。此外,可以把不同大小的小颗粒拼接在一起,形成一个具有复杂几何形状的

共振单元<sup>[9]</sup>。另外一种是把陶瓷粉末放入各种形状的模具中,加高压将陶瓷粉末在模具中压紧,然后再将陶瓷粉末烧结成陶瓷单元。对陶瓷单元进行封装,制作出频率选择超表面。参考文献[15]即采用的第二种制作工艺。根据文献报道<sup>[15]</sup>,该种方式制作的频率选择超表面可以和理论拟合的非常好。

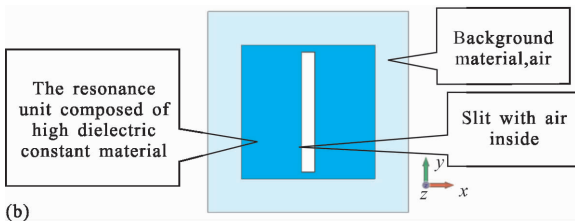
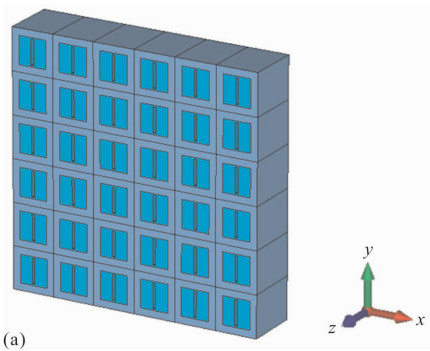


图 1 (a)由多个包含狭缝的共振单元周期性排布构成的全介质频率选择超表面,(b)超表面的一个周期单元,包括背景材料空气以及高介电常数的共振单元,共振单元的内部包含一个矩形的狭缝

Fig.1 (a) All-dielectric frequency selective metasurface is composed of several arranged periodically resonant units containing one slit, (b) a unit cell of the metasurface, including the background material air and high dielectric constant resonance unit, the inside of the resonance unit contains a rectangular slit

通过 CST Microwave Studio 的频域模块计算得到的传输特性如图 2 所示。入射电磁波的电场、磁场和传播方向相互垂直。 $S_{11}$  对应于反射谱, $S_{21}$  对应于透过谱。如图 2(a)所示,当入射电磁波的电场沿着  $y$  轴方向,也就是和狭缝的长边平行时, $S_{21}$  出现两个共振峰, $S_{21}$  取极小值,对应于电磁场的透过率达到极小,共振频率分别为 10.256 GHz 和 11.104 GHz,  $-10$  dB 阻带宽度为 1.6 GHz (11.344~9.744 GHz),相

对带宽  $\Delta\omega/\omega$  为 0.152。如图 2(b)所示,当入射电磁波的电场沿着  $x$  轴方向,也就是和狭缝的长边垂直时, $S_{21}$  的两个共振峰频率分别为 12.832 GHz 和 14.64 GHz,  $-10$  dB 阻带宽度为 3.024 GHz (15.072~12.048 GHz),相对带宽  $\Delta\omega/\omega$  为 0.223。可以看出,如果入射电磁波的电场方向保持不变,让整个频率选择超表面沿着  $z$  轴方向旋转  $90^\circ$ ,那么,该超表面就可以工作在不同的频率范围,实现工作频率的可重构。图 3(a)、(b)为入射电场方向沿  $y$  轴时,在  $S_{21}$  的共振频率 10.256 GHz 和 11.104 GHz 处共振单元内部  $z=0$  处  $E_{xy}$  的绝对值,从中可以看出,电场主要是集中在共振单元之间。图 3(c)、(d)为入射电场方向沿  $x$  轴时,在  $S_{21}$  的共振频率 12.832 GHz 和 14.64 GHz 处处共振单元内部  $z=0$  处的  $E_{xy}$  的绝对值,从中可以看出,电场主要是集中在狭缝内部和共振单元之间,狭缝发挥了对电磁场的局域作用。因此,当入射电磁波的电场方向由  $y$  轴方向旋转变为  $x$  轴方向时,可以分别激励起不同的共振模式,入射电场方向沿  $x$  轴对应的共振模频率高于入射电场方向沿  $y$  轴对应的共振模频率。

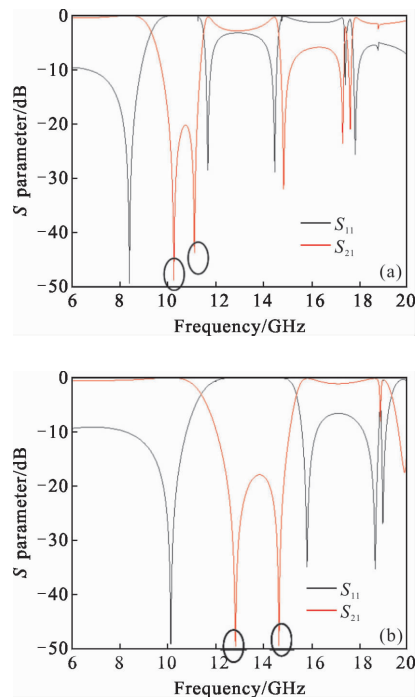


图 2 狭缝的长边和电场的方向平行(a)和垂直(b)时的传输特性  
Fig.2 Transmission characteristics when the long side of the slit is parallel (a) and perpendicular (b) to the direction of the electric field

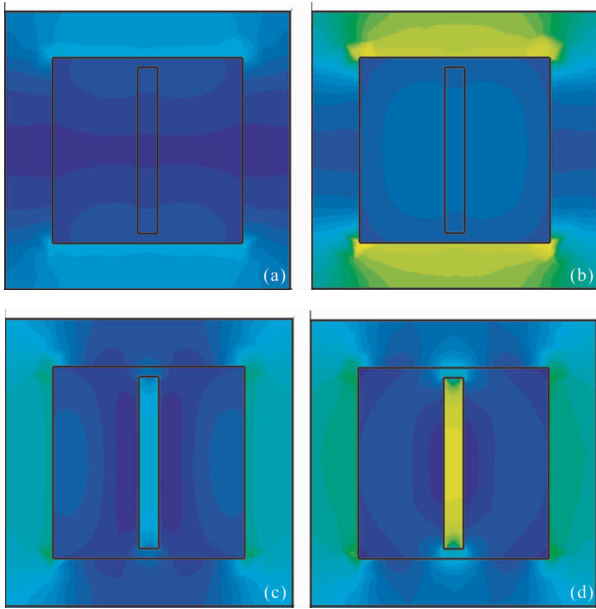


图 3 当入射电场方向沿  $y$  轴时,在  $S_{21}$  的共振频率 10.256 GHz (a)和 11.104 GHz(b)处共振单元内部  $z=0$  处  $E_{xoy}$  的绝对值;当入射电场方向沿  $x$  轴时,在  $S_{21}$  的共振频率 12.832 GHz(c)和 14.64 GHz(d)处共振单元内部  $z=0$  处的  $E_{xoy}$  的绝对值

Fig.3 When the direction of the incident electric field is along the  $y$ -axis, the absolute value of  $E_{xoy}$  at  $z=0$  inside the resonance unit at the resonance frequencies of 10.256 GHz (a) and 11.104 GHz(b) of  $S_{21}$ ; when the direction of the incident electric field is along the  $x$ -axis, the absolute value of  $E_{xoy}$  at  $z=0$  inside the resonance unit at the resonance frequencies of 12.832 GHz(c) and 14.64 GHz (d) of  $S_{21}$

其次改变狭缝的宽度为 0.4 mm,模拟得到的传输特性如图 4 所示。当入射电磁波的电场沿着  $y$  轴方向, $S_{21}$  在共振频率分别为 10.944 GHz 和 11.552 GHz 处出现尖峰,-10 dB 阻带宽度为 1.616 GHz(11.904~10.288 GHz),相对带宽  $\Delta\omega/\omega$  为 0.146,有所变小。当入射电磁波的电场沿着  $x$  轴方向, $S_{21}$  在共振峰频率分别为 14 GHz 和 16.032 GHz 处出现尖峰,-10 dB 阻带宽度为 3.456 GHz(16.544~13.088 GHz),相对带宽  $\Delta\omega/\omega$  为 0.233,有所变大。可以看出,狭缝宽度变宽使得共振频率向高频方向移动。当入射电磁波的电场沿着  $y$  轴方向,只有靠近狭缝的电场线受到影响,而当入射电磁波的电场沿着  $x$  轴方向,几乎所有的电场线都受到狭缝变宽的影响,所以此时共振频率的偏移量较大。同时当入射电磁波的电场沿着  $x$  轴

方向时,反射谱  $S_{11}$  在 17.504 GHz 和 19.072 GHz 处存在两个共振尖峰,形成了一个-3 dB 带宽 2.512 GHz (19.424~16.912 GHz)的通带,相对带宽为 0.138。也就是说,当入射电磁波的电场沿着  $x$  轴方向,可以同时存在较宽的阻带和通带。图 5 为当入射电磁波的电场沿着  $x$  轴方向,共振频率 14 GHz(a)、16.032 GHz (b)、17.504 GHz(c)和 19.072 GHz(d)处共振单元内部  $z=0$  处的  $E_{xoy}$  的绝对值。从中可以看出,共振频率为 17.504 GHz 的电场更加局域于狭缝当中,如图中红框所示。

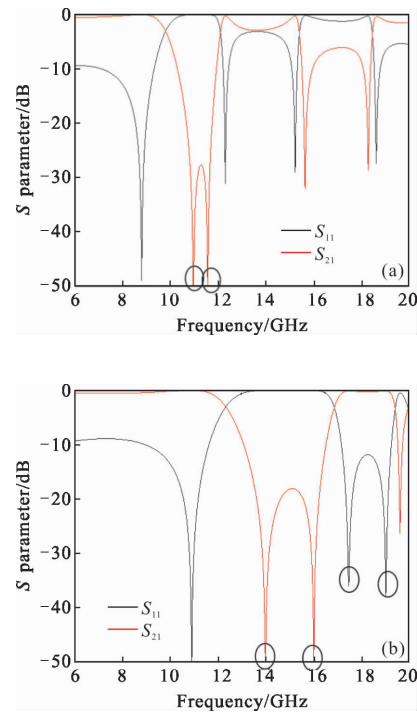
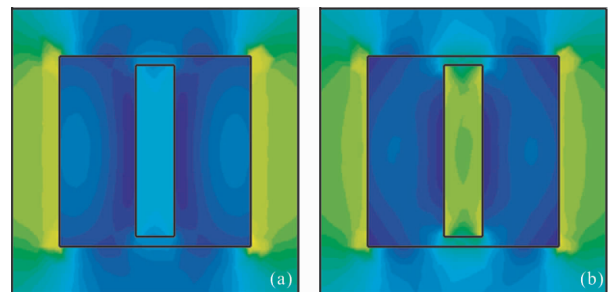


图 4 狭缝宽度为 0.4 mm 时,狭缝的长边和电场的方向平行 (a)或垂直(b)时传输特性

Fig.4 When the width of the slit is 0.4 mm, transmission characteristics when the long side of the slit is parallel (a) or perpendicular (b) to the direction of the electric field



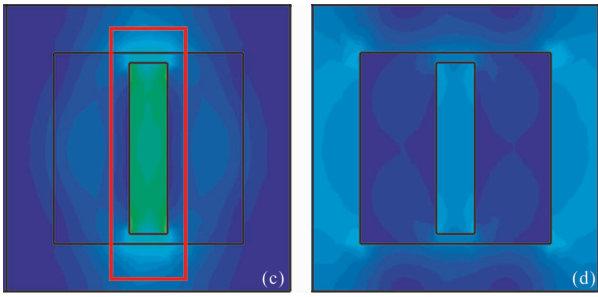


图 5 当入射电场方向沿  $x$  轴时, 在  $S_{21}$  的共振频率 14 GHz(a)、16.032 GHz(b)、17.504 GHz(c) 和 19.072 GHz(d) 处共振单元内部  $z=0$  处的  $E_{wy}$  的绝对值

Fig.5 When the direction of the incident electric field is along the  $x$ -axis, the absolute value of  $E_{wy}$  at  $z=0$  inside the resonance unit at the resonant frequencies of 14 GHz(a), 16.032 GHz(b), 17.504 GHz(c) and 19.072 GHz(d) of  $S_{21}$

然后模拟由包含两个狭缝的共振单元构成的频率选择超表面, 如图 6 所示。假定狭缝中心与  $y$  轴的间距为  $d$ , 则两个狭缝之间的间距为  $2 \times d$ 。  $d$  为 0 时, 两个狭缝合而为一。  $d$  为 0.1 时, 两个狭缝组合成前

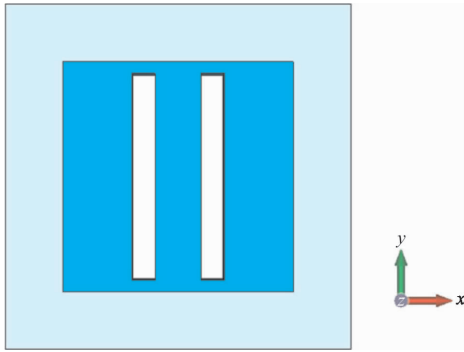


图 6 包含两个狭缝的共振单元

Fig.6 Unit cell containing two slits

面所述的宽度为 0.4 mm 的狭缝。当  $d$  等于 0.3 mm 时, 模拟得到的传输特性如图 7 所示。当入射电磁波的电场沿  $y$  方向时, 超表面的透过谱  $S_{21}$  的 -10 dB 阻带宽度为 1.648 GHz, 相对带宽为 0.139, 共振峰的位置分别为 11.008 GHz 和 11.584 GHz。当入射电磁波的电场沿  $x$  方向时, 超表面的透过谱  $S_{21}$  的 -10 dB 阻带宽度可达到 4.34 GHz, 相对带宽为 0.274, 共振峰的位置分别为 14.596 GHz 和 17.494 GHz, 阻带带宽明显增大。当入射电磁波的电场沿  $x$  方向时, 超表面的反射谱  $S_{11}$  -3 dB 通带的带宽为 2 GHz (20.426~18.426 GHz), 相对带宽为 0.103,  $S_{11}$  在 19.167 GHz 和 20.022 GHz 处存在两个共振峰, 通带带宽变窄。图 8

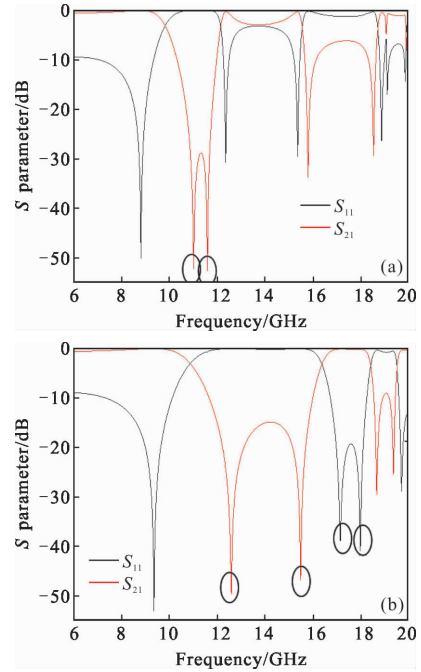


图 7 两狭缝间距为 0.6 mm 时, 狭缝的长边和入射电场的方向平行(a)或垂直(b)时传输特性

Fig.7 Transmission characteristics when the long side of the slit is parallel (a) or perpendicular (b) to the direction of the incident electric field when the spacing between two slits is 0.6 mm

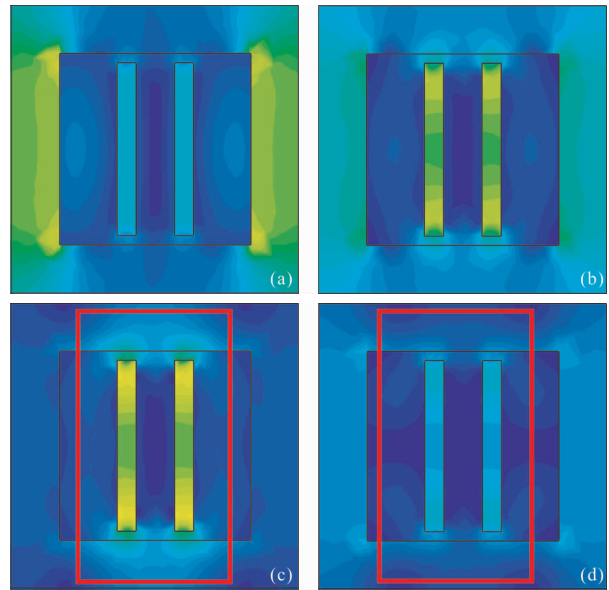


图 8 当入射电场方向沿  $x$  轴时, 在  $S_{21}$  的共振频率 14.596 GHz (a)、17.494 GHz(b)、19.167 GHz(c) 和 20.022 GHz(d) 处共振单元内部  $z=0$  处的  $E_{wy}$  的绝对值

Fig.8 When the direction of the incident electric field is along the  $x$ -axis, the absolute value of  $E_{wy}$  at  $z=0$  inside the resonance unit at the resonant frequencies of 14.596 GHz(a), 17.494 GHz(b), 19.167 GHz(c) and 20.022 GHz(d) of  $S_{21}$

给出了对应的共振频率处的电场分布的绝对值。可以看出,与狭缝宽度为 0.4 mm 时的情形类似,狭缝同样使得共振频率为 19.167 GHz 和 20.022 GHz 的电场更加局域,如图中红框所示,共振单元之间的电磁场分布有所减弱。

表 1 给出了狭缝与 y 轴的间距为 0.3、0.5、0.7、0.9 mm,入射电磁波的电场方向沿 y 轴、x 轴时,超表面的透过谱  $S_{21}$  的-10 dB 阻带共振峰的位置、阻带宽度和相对带宽。从中可以发现,当入射电磁波的电场方向沿 y 轴,超表面  $S_{21}$  的共振尖峰的位置向低频方向移动,阻带宽度、相对带宽变化不大。当入射电磁

波的电场方向沿 x 轴,超表面  $S_{21}$  的共振尖峰的位置向低频方向移动,阻带宽度迅速变小,相对带宽变化也比较大。当  $d$  等于 0.3 mm 时,超表面的透过谱  $S_{21}$  的-10 dB 阻带的频率间隔最大。当  $d$  为 0.7 mm 时,超表面的透过谱  $S_{21}$  的两个共振尖峰甚至出现了简并的现象。由于两个狭缝的尺寸没有发生改变,也就是说共振单元的占空比没有发生改变,造成这些现象的原因只能是狭缝相对位置的改变造成了共振单元内部电磁场的重新分布,形成不同的共振模式,因此,可以通过调整狭缝之间的间距来调整频率选择超表面的工作频段和带宽。

表 1 狭缝与 y 轴的间距为 0.3、0.5、0.7、0.9 mm,入射电磁波的电场方向沿 y 轴、x 轴时,超表面的透过谱  $S_{21}$  的共振峰的频率以及阻带宽度和相对带宽

Tab.1 Frequency of the resonance peak, stopband width and relative bandwidth of the transmission spectrum  $S_{21}$  of the metasurface when the spacing between the slit and the y-axis is 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 mm, the electric field direction of the incident electromagnetic wave is along the y-axis or the x-axis

Electric field of the incident electromagnetic wave is along the y-axis				
Distance between the slit and the y-axis/mm	Resonance peak 1	Resonance peak 2	Stopband width	Relative bandwidth
0.3	11.008	11.584	1.648	0.148
0.5	10.816	11.504	1.618	0.1469
0.7	10.496	11.312	1.536	0.1426
0.9	10.208	11.088	1.648	0.156
Electric field of the incident electromagnetic wave is along the x-axis				
Distance between the slit and the x-axis/mm	Resonance peak 1	Resonance peak 2	Stopband width	Relative bandwidth
0.3	14.596	17.494	4.34	0.274
0.5	13.966	15.576	3.038	0.2086
0.7	12.804	12.804	1.568	0.11
0.9	11.236	11.81	1.218	0.097

## 2 结论

文中在全介质共振单元引入狭缝,分析了狭缝对电磁场的局域特性,对比了狭缝宽度的改变以及两条狭缝之间的间距改变对频率选择超表面传输特性的影响。模拟结果表明,当狭缝的长边和电场方向

相同时,频率选择超表面在低频处可以出现一个阻带。当狭缝的长边和电场方向相互垂直时,频率选择超表面在高频处可以出现带宽较宽的一个阻带和一个通带,通过调整狭缝的宽度和间距可以在比较大的频率范围内调整超表面的工作频段。因此,可以通过旋转频率选择超表面,改变狭缝和入射电磁波的

相对位置,实现该频率选择超表面的可重构。同时,文中对共振单元包含狭缝的全介质频率选择超表面性能的研究为设计包含十字形、井字形或其他复杂图形狭缝的共振单元提供了重要的理论指导,同时狭缝的存在为填充其他具有非线性或增益介质特性的材料以扩展频率选择超表面的功能提供了可能性。

#### 参考文献:

- [1] Li Tianyou, Huang Lingling, Wang Yongtian. The principle and research progress of metasurfaces [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(5): 523–540. (in Chinese)
- [2] Zhang Yan, Li Chun, Bian Borui, et al. Design of new terahertz beam splitter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(5): 20190290. (in Chinese)
- [3] Huang Lingling, Wei Qunshuo, Wang Yongtian. Development and applications of wavefront modulation technology based on new functional metasurfaces (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(10): 1002001. (in Chinese)
- [4] Han Na, Huang Lingling, Lin Zemeng, et al. Curved holography based on  $\Omega$ -shaped conformal metasurfaces [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 0702002. (in Chinese)
- [5] Yu Xiaochang, Zhao Jiancun, Yu Yiting. Research progress of pixel-level integrated devices for spectral imaging [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27 (5): 999–1012. (in Chinese)
- [6] Luo Yi, Liang Zhongzhu, Meng Dejie, et al. Study on long wavelength infrared broadband metasurface absorber via hybrid resonant mode [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 131–139. (in Chinese)
- [7] Xu Yang, Gao Jinsong, Xu Nianxi, et al. A frequency-selective surface structure arbitrarily switched between band-pass and band-stop responses at low frequency [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26 (1): 142–149. (in Chinese)
- [8] Barton J H, Garcia C R, Berry E A, et al. All-dielectric frequency selective surface for high power microwaves [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62 (7): 3652–3656.
- [9] Wang Jun, Qu Shaobo, Li Liyang, et al. All-dielectric metamaterial frequency selective surface [J]. *Journal of Advanced Dielectrics*, 2017, 7(4): 1730002.
- [10] Tuz V R, Khardikov V V, Kupriianov A S, et al. High-quality trapped modes in all-dielectric metamaterials [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2905–2916.
- [11] Yang Y, Zenin V A, Bozhevolnyi S I. Anapole-assisted strong field enhancement in individual all-dielectric nanostructures [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(5): 1960–1966.
- [12] Zhang Guanqiao, Lan Chuwen, Gao Rui, et al. Trapped-mode-induced giant magnetic field enhancement in all-dielectric metasurfaces [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2019, 123(47): 28887–28892.
- [13] Oraizi H, Khajevandi S, Amini A, et al. Design of a miniaturized-element FSS based on 2.5-dimensional closed loop hilbert fractal [J]. *IET Microwaves Antennas & Propagation*, 2019, 13(6): 742–747.
- [14] Anwar R S, Wei Y, Mao L, et al. Miniaturised frequency selective surface based on fractal arrays with square slots for enhanced bandwidth [J]. *IET Microwaves Antennas & Propagation*, 2019, 13(11): 1811–1819.
- [15] Li Liyang, Wang Jun, Wang Jiafu, et al. All-dielectric metamaterial frequency selective surfaces based on high-permittivity ceramic resonators [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(21): 212904.