

doi:10.3788/gzxb20184703.0324002

光电可调控频率选择表面

王君¹, 孙艳军¹, 纪雪松², 王丽¹, 王越¹, 冷雁冰¹

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 辽沈工业集团有限公司, 沈阳 110045)

摘 要:为实现频率选择表面(FSS)谐振频率的光电可调控特性,提出一种光电可调控频率选择表面.利用光电导薄膜光照导电特性控制金属 FSS 结构尺寸变化,实现 FSS 的主动可调.理论阐述了光电导及 FSS 选频特性原理,采用 CST 软件分别仿真了“Y”形带通型、“圆”形带通型和“Y”形带阻型三种 FSS 在光照时的选频特性.结果表明:随着结构尺寸变化,FSS 的中心谐振频率分别从 18 GHz、25 GHz、20.5 GHz 变为 20.5 GHz、29 GHz、16.5 GHz.采用镀膜、刻蚀及电子束蒸发等技术分别制作了单元结构尺寸变化前的金属 FSS,以及变化后的金属与光电导薄膜结合的 FSS,并对样件进行测试,结果表明:中心谐振频率分别从 18 GHz、24 GHz、20 GHz 变为 20 GHz、28 GHz、17 GHz,与仿真变化趋势基本一致.采用该方法既可实现 FSS 中心谐振频率的可调控,也可从结构上实现 FSS 带通型和带阻型的转变.

关键词:表面光学;频率选择表面;光电导薄膜;光电调控

中图分类号: TN713; O472+.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)03-0324002-9

Photoelectric Controllable Frequency Selective Surface

WANG Jun¹, SUN Yan-jun¹, JI Xue-song², WANG Li¹, WANG Yue¹, LENG Yan-bing¹

(1 *The School of Photo-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)

(2 *Liaoshen Industrial Group Co.,Ltd., Shenyang 110045, China*)

Abstract: To achieve the photoelectric controllable characteristics of Frequency Selective Surface (FSS) resonant frequency, a photoelectric controllable FSS is put forward in this paper. The photoconductive thin film is used to control the change of the structure size of FSS, so as to realize the controllability of FSS. This thesis starts from the theory of the photoconductive thin film and the principle of the characteristics that FSS can select frequency. The CST software was used to simulate three kinds of FSS: “tripole” slot-element, “circular” slot-element, “tripole” patch-element, and get the selecting frequency characteristics of different structure sizes. The simulation result shows that, with the changing structure size, the center resonant frequency of the FSS changes from 18 GHz, 25 GHz, and 20.5 GHz to 20.5 GHz, 29 GHz, and 16.5 GHz respectively. Finally, the metallic FSS with the unchanged structure size, and the FSS of the metal and the photoconductive thin film combined, were fabricated by coating, etching, electron beam evaporation and so on. Test the samples and the result shows that the center resonant frequency changes from 18 GHz, 24 GHz, 20 GHz into 20 GHz, 28 GHz, 17 GHz. Compared with the simulation results, the trend is about the same. Ultimately, we can draw the conclusion; in this way, not only can we realize the characteristic of controlling the center resonant frequency, but also we can achieve the conversion of slot-element or patch-element in the structure of FSS.

Key words: Optics at surface; Frequency selective surface; Photoconductive thin film; Photoelectric controllable

基金项目: 总装预研基金(No.9140A10011515BQ03135)资助

第一作者: 王君(1992-),女,硕士研究生,主要研究方向为先进光学系统设计与制造技术.Email:wjwjun@126.com

导师(通讯作者): 孙艳军(1978-),男,副教授,博士,主要研究方向为先进光学系统设计与制造技术.Email:custsun@126.com

收稿日期: 2017-10-16; **录用日期:** 2017-12-01

<http://www.photon.ac.cn>

OCIS Codes: 240.5440; 240.6700; 070.2615; 310.6860; 160.5140

0 引言

频率选择表面(Frequency Selective Surfaces, FSS)是一种由周期排列的金属贴片或金属屏上周期排列的开孔单元构成的二维阵列结构,在工业产品、军事通信、电磁隐身等领域应用广泛^[1-3]。目前,根据 FSS 工作机制的不同,将 FSS 分为被动 FSS 和主动 FSS。滤波特性无法改变的 FSS 称为无源被动 FSS。被动 FSS 是根据所要实现的滤波特性被直接设计成确定的结构,有特定的工作频率,不能灵活地适应复杂多变的电磁环境,在实际应用中有一定的局限性。为解决被动 FSS 的局限性,有源可重构主动频率选择表面(Active Frequency Selective Surface, 简称:主动 FSS)的概念被提出,该主动 FSS 是指在外界激励的控制下,其工作频点、通带宽度等滤波特性可调控的一种有源空间滤波结构,通常由滤波结构和激励源构成^[4-5]。相对被动 FSS,主动 FSS 可通过调控滤波特性满足多种工作状态间变化的需求,能较灵活地适应外界复杂多变的电磁环境,可在单模制导雷达、多模复合制导雷达、捷变频雷达等的带内隐身问题上有所应用。目前,常见的方法是在被动 FSS 结构中加入有源器件、使用电磁特性可变的介质材料、控制不同层间的耦合方式。例如,Gu C 等^[6]提出了一种基于圆柱形有源 FSS 的电子束切换天线,通过控制 PIN 二极管的直流偏置电压来实现 FSS 有源控制;Huang B C 等^[7]提出通过机械扩展或缩小开环谐振器阵列实现的可调谐有源 FSS;韩鹏等^[8]研究了基于介质与铁氧体的通阻捷变磁可调 FSS,利用电磁特性可变的铁氧体材料实现谐振可调;焦健等^[9]研究了基于互补屏的主动 FSS,通过控制不同层间耦合方式实现频率可变。它们的优点是可通过控制开关、外加磁场、增加层数或加载电感元件等来实现 FSS 的主动控制。其缺点,加入有源器件的 FSS,每个器件需单独集成,工艺十分复杂,且为集成有源器件,使得 FSS 线条制作得较粗,基片材料只能选用透毫米波段以上的有机材料,导致其只能应用在大型雷达天线罩、飞机蒙皮等场合;使用电磁特性可变的介质材料的 FSS,其材料本身对于可见、红外等波段的不透明性也导致其应用范围存在局限;通过控制不同层间耦合方式的 FSS,在调节的过程中难以保证两层之间的对准精度。总体来说,结构都较为复杂,甚至要复合一些外部线路,工艺难度大,应用场合有限。

鉴于以上,本文提出一种光电可调控 FSS。采用具有光电导特性的材料制成光电导薄膜,使其与金属 FSS 有效连接,利用光电导薄膜光照导电特性控制金属 FSS 结构尺寸变化,从而实现 FSS 的调控。当无光照时,光电导薄膜导电能力接近于零,只有金属 FSS 实现特性频选作用;当有光照射时,光电导薄膜具有很好的导电能力,与金属 FSS 共同构成新结构尺寸的 FSS,其中心谐振频率将发生变化。与其它主动 FSS 相比,该光电可调控 FSS 结构简单、制作工艺难度小,仅通过控制光照即可实现 FSS 的频率可调,且采用光刻技术可将线条做得很细^[10],在屏蔽的同时,满足可见、红外等光波段的透过,因此不仅可以用在飞机蒙皮上,也可用在光学窗口上,在工业等领域会有广泛的应用前景。

1 原理分析

1.1 FSS 单元结构尺寸与中心谐振频率的关系

FSS 有电磁波照射时,其各个单元结构上都会产生感应电流,该感应电流的大小与 FSS 单元和入射电磁波耦合能量的大小有关,当 FSS 单元结构尺寸刚好为谐振尺寸时,感应电流具有最大值^[11]。由 MUNK 理论^[12]可知,“Y”形振子的两枝节长度之和、“圆”形半环的长度为入射电磁波半波长或半波长的整数倍时,刚好为谐振尺寸,此时的谐振频率即为中心谐振频率。因此,当改变 FSS 的单元结构尺寸时,结构尺寸与入射电磁波波长的关系发生变化,其发生谐振的谐振点便会发生变化,即 FSS 的中心谐振频率发生改变。

以贴片型十字交叉单元为例,分析在不同尺寸下 FSS 谐振特性的变化,如图 1,十字交叉振子的长为 L ,宽为 W ,周期为 P ,设置宽 $W=0.5$ mm,周期 $P=60$ mm,介质介电常数为 1,介质厚度为 0.5 mm。得到长度分别为 50 mm、52 mm、54 mm、56 mm、58 mm 时的谐振曲线,如图 2。可以看出,FSS 的中心谐振频率随单元长度的变化逐渐变化,且其他谐振特性变化均不明显。由此可知,FSS 单元结构尺寸的变化可以引起其中心谐振频率的变化。因此,本文通过改变 FSS 的单元结构尺寸来实现中心谐振频率的变化,在理论上是可行的。

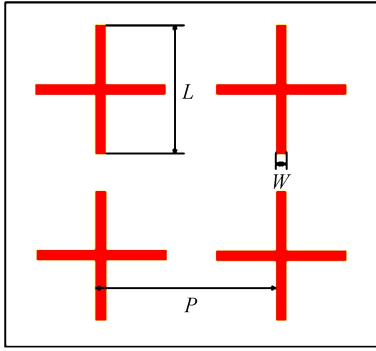


图1 贴片型十字交叉单元

Fig.1 Patch element of crossed dipoles

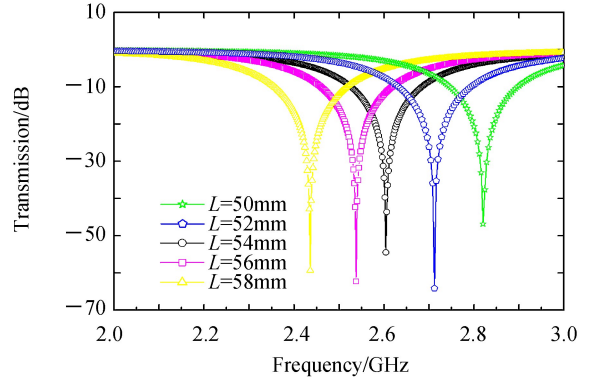


图2 不同单元尺寸 FSS 的谐振曲线

Fig.2 Different transmission curves in different sizes of FSS

1.2 光电导薄膜的原理

光电导薄膜的原理是光电导效应,能够发生光电导效应的半导体薄膜,在无光照时,具有极少量的热激发载流子,因而有一定的暗电导率,即

$$\sigma_0 = q(n_0\mu_n + p_0\mu_p) \quad (1)$$

式中, q 为电子的电荷, n_0 为电子浓度, p_0 为空穴浓度,但暗电导率值极小,在电磁屏蔽领域忽略不计,而当有光照时,因吸收光子而产生的光生载流子浓度较大,分别用 Δn 和 Δp 表示, Δn 表示光生电子, Δp 表示光生空穴,则光照稳定情况下的电导率为

$$\sigma = q[(n_0 + \Delta n)\mu_n + (p_0 + \Delta p)]\mu_p \quad (2)$$

由式(1)和式(2)得到的光电导率^[13]为

$$\Delta\sigma = \sigma - \sigma_0 = q(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_p) = q\mu_p(b\Delta n + \Delta p) \quad (3)$$

式中, μ_n 表示电子迁移率, μ_p 表示空穴迁移率, $b = \mu_n/\mu_p$,若恒定光照下,光生载流子的产生与复合相继发生,则稳定情况下的载流子浓度为

$$\Delta p_0 = g\tau \quad (4)$$

式中, g 为载流子产生率, τ 为载流子寿命,若入射光功率恒为 Φ_s ,LWD 为材料体积, η 为效率,则载流子产生率与入射光功率关系为

$$g = \frac{\Phi_s \eta}{h\nu(LWD)} \tau \quad (5)$$

因此,当有恒定光谱照射光电导薄膜时,薄膜具有恒定的电导率,可以起到与金属相同的对电磁信号进行屏蔽的作用。

2 结构设计及仿真

以“Y”形带通型光电可控 FSS 为例分析其结构特点,图 3 为其一个周期单元的结构示意图, a 为金属铜膜, b 为光电导薄膜, c 为通光孔径。根据所设计的结构,当没有光照时,镀有光电导薄膜的 b 区域载流子极少,趋近于绝缘状态,对电磁屏蔽不起作用,此时 FSS 的电磁屏蔽结构等同于图 3 中 b 和 c 都为通光区;当有光照射时,镀有光电导薄膜的 b 区域载流子激增,与金属区域 a 形成联通导体,与金属铜共同起到屏蔽电磁波的作用,此时 FSS 的结构等同于图 3 中 c 为通光区,即该 FSS 单元结构的“Y”形振子的长度发生了改变,从而实现了光电调控 FSS 的中心谐振频率。

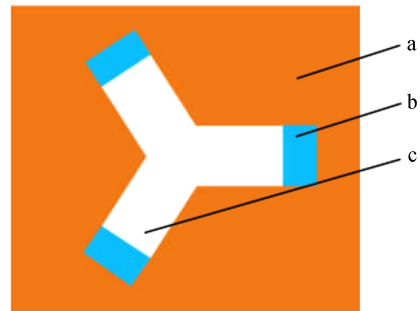


图3 “Y”形带通型光电调控 FSS 结构

Fig.3 The photoelectric controllable FSS structure of “tripole” slot-element

同理,“圆”形带通型和“Y”形带阻型的光电可调控 FSS 也可实现其各自的中心谐振频率可调节的性能,其结构图如图 4 所示(d、e 区域表示镀光电导薄膜的位置)。

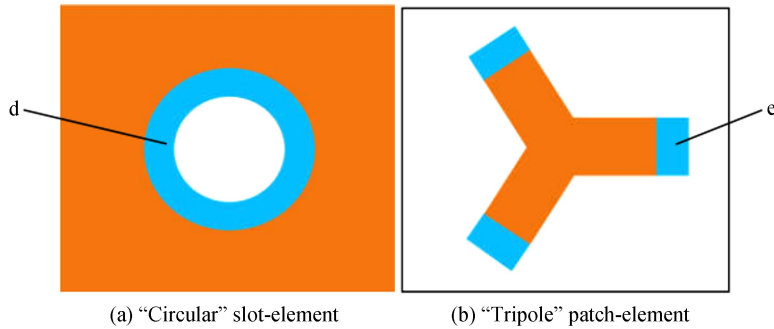


图 4 光电可调控 FSS 结构
Fig.4 The structure of photoelectric controllable FSS

本文设计的光电可调控 FSS 单元结构尺寸(“Y”形振子长度 L 、宽度 W ，“圆”形振子半径 R)分别如图 5 (a)、(b)、(c)所示,单元尺寸及排布方式以“Y”形带阻型为例说明,如图 6。

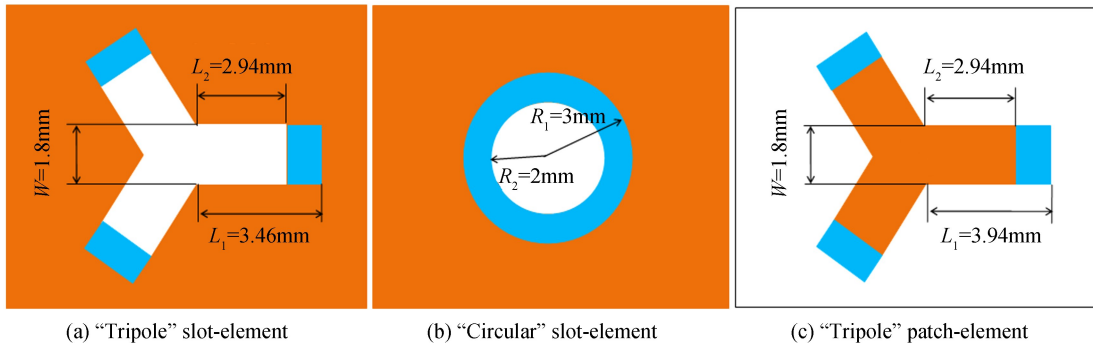


图 5 三种光电可调控 FSS 的单元结构尺寸
Fig.5 Structure sizes for three kinds of photoelectric controllable FSS

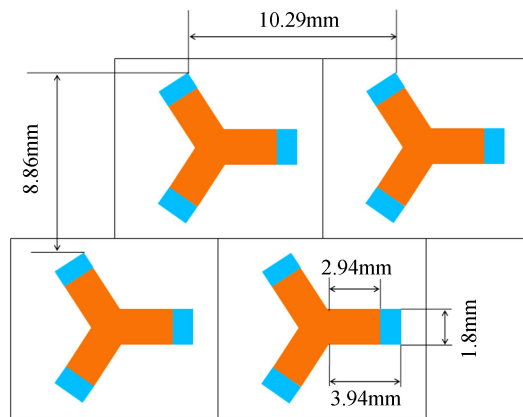


图 6 单元尺寸及排布方式
Fig.6 Element size and the arrangement of elements

仿真过程:首先仿真“Y”形带通型光电可调控 FSS 光照前的结构,输入图 5(a)的尺寸参数,长度输入 3.46 mm,设置单层介质,介电常数为 3,磁导率为 1,厚度为 0.5 mm.设置频率范围为 9~30 GHz,定义好边界条件、监视器后,采用频域求解器进行仿真计算,图 7 为无光照时的仿真曲线,可见中心谐振频率在 18 GHz 左右.然后,仿真光照时的结构,由于光电导薄膜光照后导电,其屏蔽性质等同或接近金属,因此在仿真时等效为金属薄膜,可直接图 3 的 c 尺寸参数进行仿真,即长度输入 2.94 mm,得到图 7 所示有光照时的仿真曲线,中心谐振频率约为 20.5 GHz.可见,中心谐振频率改变了近 2.5 GHz.同理得到“圆”形带通型 FSS 和“Y”形带阻型 FSS 在光照前后的仿真曲线分别如图 8、图 9.“圆”形带通型 FSS 光照前后中心谐振频率分别为 25 GHz、29 GHz 左右,“Y”形带阻型 FSS 光照前后中心谐振频率分别为 20.5 GHz、16.5 GHz 左右.

根据仿真曲线图 8 可知,“圆”形带通型光电可控 FSS 光照前后的仿真曲线形状差别较大,分析其原因主要是单元间距对频率带宽的影响^[14],在只改变单元尺寸而其他结构参数不变的情况下,单元间距随单元尺寸的变化而变化,因此,出现了光照前后两曲线频率带宽有所变化的情况.而对于“Y”形单元,单元尺寸包括臂长及臂宽,臂长决定中心谐振频率,臂宽决定带宽^[15],仿真过程只改变了臂长而没有改变臂宽,因此图 7 和图 9 显示“Y”形光电可控 FSS 光照前后的仿真曲线的带宽变化不大.仿真结果表明,不论是“圆”形还是“Y”型,单元结构尺寸变化后中心谐振频率均发生了明显变化,说明采用光电方法调控 FSS 单元结构尺寸可以实现中心谐振频率的可调谐性.

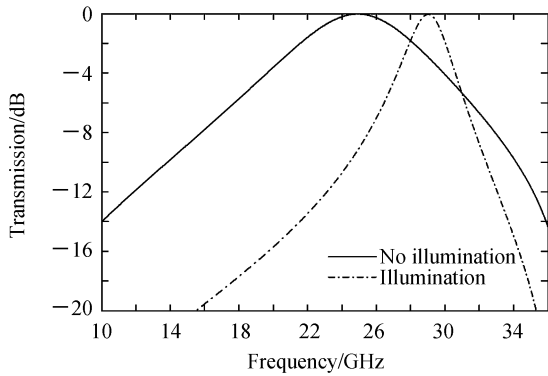


图 8 “圆”形带通型 FSS 单元尺寸变化前后曲线
Fig.8 Different curves in different sizes of “circular” slot-element

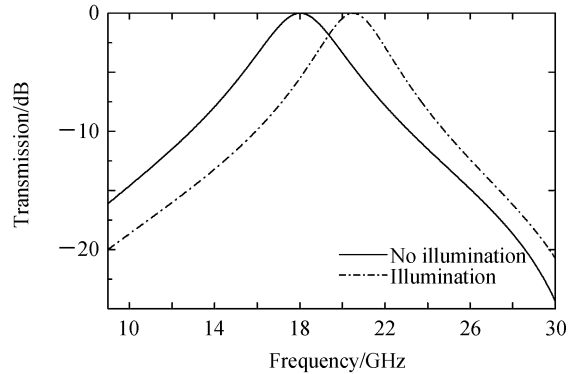


图 7 “Y”形带通型 FSS 单元尺寸变化前后曲线
Fig.7 Different curves in different sizes of “tripole” slot-element

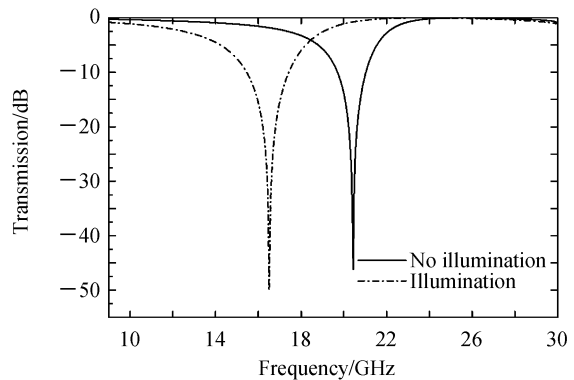


图 9 “Y”形带阻型 FSS 单元尺寸变化前后曲线
Fig.9 Different curves in different sizes of “tripole” patch-element

3 实验与测试

3.1 实验

采用镀膜、刻蚀,并结合电子束蒸发技术分别制作上述三种单元结构的光电可控 FSS,样品基底尺寸为 50 mm×50 mm.以“Y”形带通型 FSS 为例说明制作的工艺过程,具体流程如图 10.对基片预处理后,采用真空镀膜技术在基底表面镀铜金属,厚度控制在 300 nm.用 Smartcoater100 匀胶机以 3500 r/min 均匀旋涂正性光刻胶.利用有掩模光刻法进行曝光、显影、烘烤后,用相应腐蚀液对铜膜进行腐蚀.去除表面保护胶后得到金属 FSS 的结构,如图 11.最后在 900-SA 型真空镀膜机上采用模板遮挡法在该 FSS 结构的相应位置上

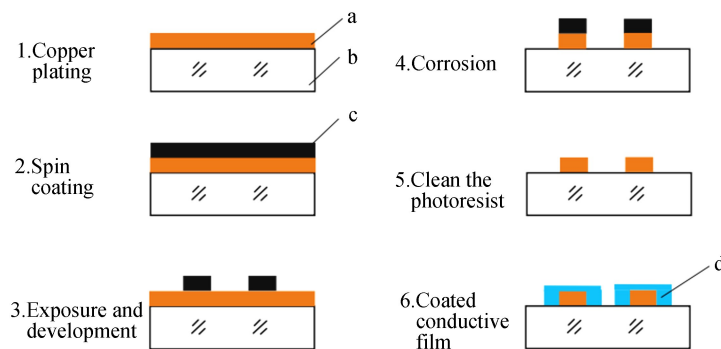


图 10 制备工艺流程
Fig.10 The technological process of preparation

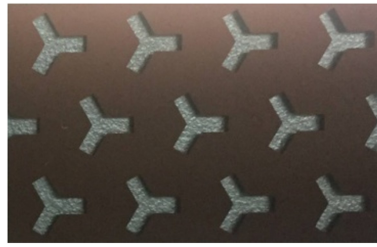


图 11 金属 FSS
Fig.11 Metallic FSS

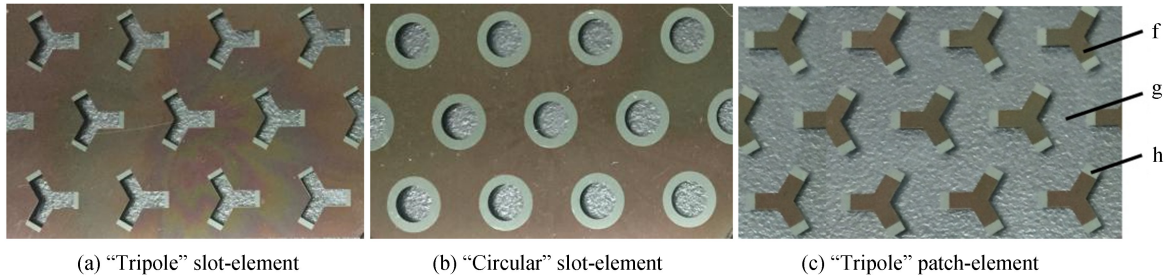


图 12 光电可调 FSS 样品

Fig.12 Samples of photoelectric controllable FSS

镀光电导薄膜,以 CdS、CdCl₂、CuCl₂ 混合物为材料,制备 Cl 掺杂摩尔分数为 0.1% 的 CdS 薄膜,厚度控制在 $1.2 \pm 0.1 \mu\text{m}$ ^[16-17].至此便得到“Y”形带通型光电可调 FSS 的实验样品.同样方法制得“圆”形带通型和“Y”形带阻型光电可调 FSS,图 12 分别为“Y”形带通型、“圆”形带通型、“Y”形带阻型三种光电可调 FSS 的样品图,其中 f 为金属铜膜,g 为透光区(图中为背景桌面),h 为光电导薄膜.

3.2 测试

对制作的三种光电可调 FSS 样品的结构尺寸(“Y”形振子长度 L 、宽度 W ，“圆”形振子半径 R)进行测试,测试采用精密数显测量显微镜,将测试结果与设计值对比,如表 1 所示.

表 1 结构尺寸的设计及测试结果

Table 1 Design and measurement results of structure size

Element shape	Structure size of metallic FSS/mm		Structure size of FSS with photoconductive thin film/mm	
	Design	Measurement	Design	Measurement
“Tripole” slot-element	$L_1 = 3.46$ $W = 1.8$	$L_1' = 3.455$ $W' = 1.803$	$L_2 = 2.94$ $W = 1.8$	$L_2' = 2.949$ $W' = 1.803$
“Circular” slot-element	$R_1 = 3$	$R_1' = 3.008$	$R_2 = 2$	$R_2' = 2.011$
“Tripole” patch-element	$L_1 = 2.94$ $W = 1.8$	$L_1' = 2.944$ $W' = 1.794$	$L_2 = 3.94$ $W = 1.8$	$L_2' = 3.932$ $W' = 1.794$

由表 1 可知,样品的实际尺寸与设计理论值相比,存在一定误差,对屏蔽效果会略有影响.

对样品的屏蔽效果进行测试.将三种光电可调 FSS 样品置于微波暗室进行测试,实验仪器有矢量网络分析仪、毫米波测试仪、喇叭天线和光源等,测试装置示意图如图 13.实验变量为有、无光照的控制,测试光源为白光发光二极管(LED),四角照射,光功率平均密度为 150 mW/cm^2 .

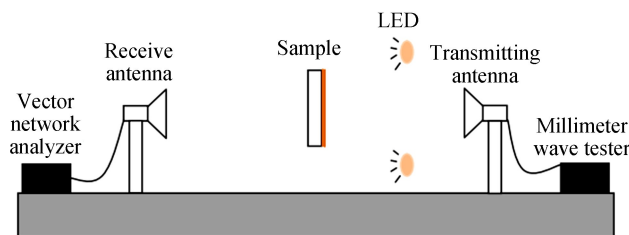


图 13 测试原理图

Fig.13 The schematic diagram of the measurement

首先在无光照条件下,由毫米波测试仪的信号发生器产生 9~30 GHz 的电磁波,通过发射天线输出,在自由空间中传播并经过样件,由接收天线接受信号,矢量分析仪处理数据得到无光照时的测试曲线;然后用光功率密度为 150 mW/cm² 的白光发光二极管(LED)分别从上下左右四个位置均匀照射样件,示波器显示的数值发生变化,调整测试仪后,得到有光照时的测试曲线.如此分别得到“Y”形带通型、“圆”形带通型和“Y”形带阻型三种不同单元结构的光电可控 FSS 样件的谐振曲线,如图 14.

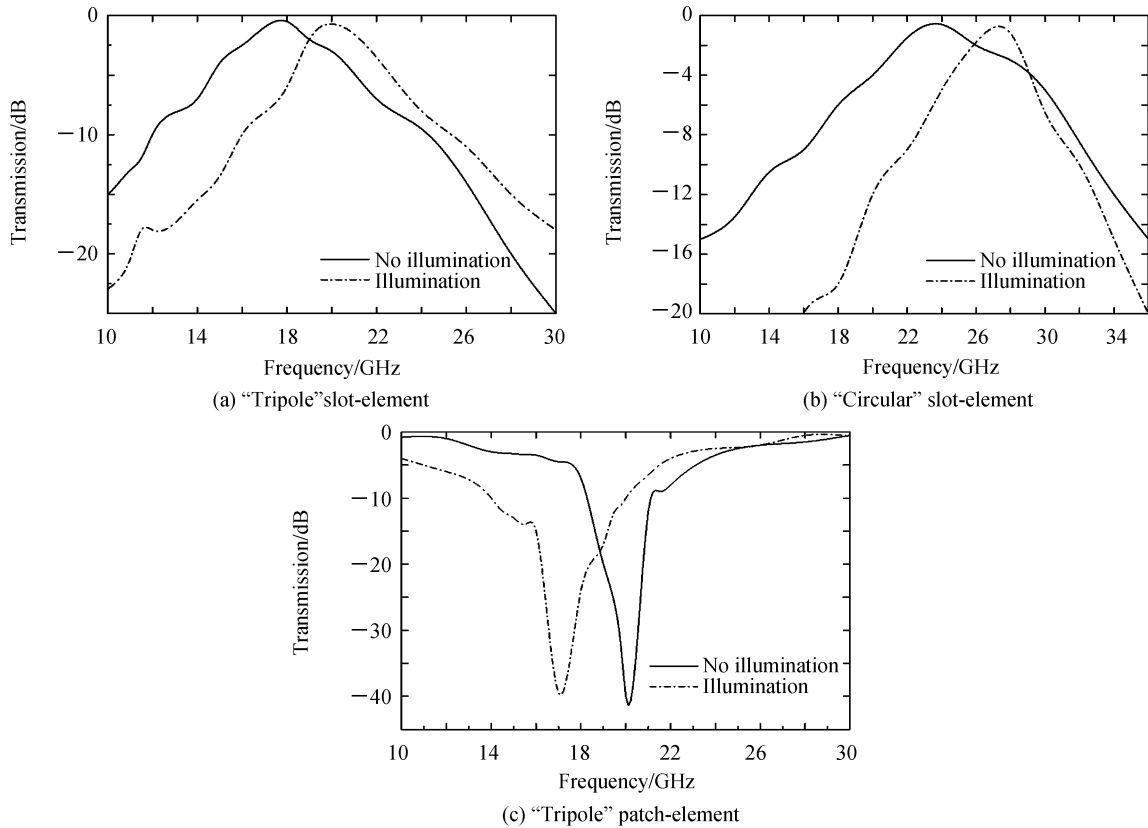


图 14 三种光电可控 FSS 样件的测试曲线

Fig.14 Three kinds of measurement curves for Samples of photoelectric controllable FSS

将仿真与测试结果汇总如表 2.

表 2 屏蔽效果的仿真及测试结果

Table 2 Simulation and measurement results of shielding effect

Element shape	The center resonant frequency before illumination/GHz		The center resonant frequency when illuminated/GHz	
	Simulation	Measurement	Simulation	Measurement
	"Tripole" slot-element	18	18	20.5
"Circular" slot-element	25	24	29	28
"Tripole" patch-element	20.5	20	16.5	17

由表 2 可知,测试与仿真得到的中心谐振频率及趋势基本一致,证明利用光电导薄膜实现光电调控 FSS 的中心谐振频率的方法是可行的.另外,该方法不仅可实现中心谐振频率的可调控,通过图案的设计也可从结构上实现带通、带阻特性的相互转换,如图 15 所示, a 为金属铜膜, b 为光电导薄膜, c 为通光孔径.与上述光电可控 FSS 类似,没有光照时,镀有光电导薄膜的 b 区域电阻极大,对电磁屏蔽不起作用,此时的结构相当于图 15(b)所示的“Y”形带阻型 FSS,呈现带阻特性;当有光照射时,镀有光电导薄膜的 b 区域载流子激增,与金属区域形成联通导体,此时的结构相当于图 15(c)所示的六边形带通型 FSS,呈现带阻特性.从结构上看,光照前后,实现了带阻结构和带通结构的相互转换,但其图案的形状、尺寸等参数与 FSS 频选特性的关系有待进一步研究.

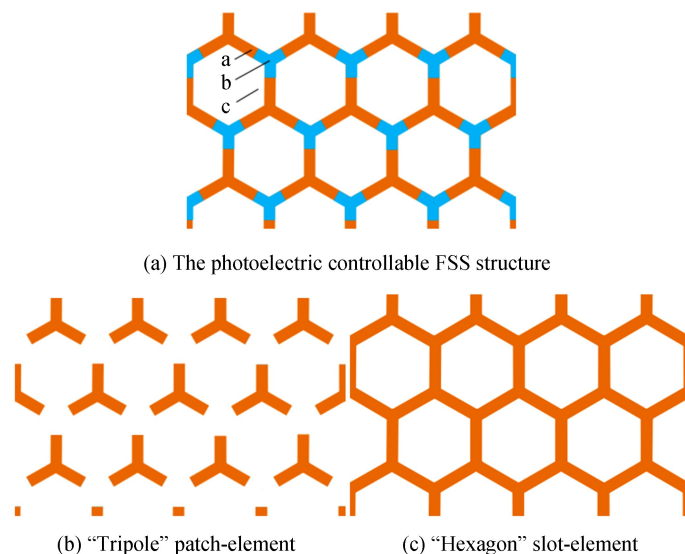


图 15 带通带阻特性转换结构
Fig.15 The structure of the patch and slot characteristic conversion

4 结论

提出并制作了光电可控 FSS, 分析了该光电可控 FSS 的结构特点, 利用光电导薄膜光照导电的特性, 控制 FSS 单元结构尺寸的变化, 使该光电可控 FSS 透过或反射波的频率发生变化. 对“Y”形带通型、“圆”形带通型和“Y”形带阻型三种不同单元结构的光电可控 FSS 分别进行了仿真, 无光照时, FSS 的中心谐振频率分别为 18 GHz、25 GHz、20.5 GHz; 有光照时频率变为 20.5 GHz、29 GHz、16.5 GHz 左右. 且制作并测试了上述三种光电可控 FSS, 测试曲线与仿真曲线基本一致. 仿真及测试结果表明, 上述实现光电可控 FSS 中心谐振频率可调节的方法可行, 且无论是带通型还是带阻型, 单元结构是“Y”形、“圆”形或其它形状, 都可实现其中心谐振频率的可调性. 光电可控 FSS 仅通过控制光照, 即可实现 FSS 的主动控制, 且不仅可实现中心谐振频率可调控, 也可实现带通、带阻特性的相互转换, 与其他主动 FSS 相比, 结构简单且制作工艺难度小, 在工业等领域有潜在的应用前景.

参考文献

- [1] WUT K. Frequency selective surface and grid array[M]. New York: Wiley-Interscience, 1995: 1-18.
- [2] YU Miao, GAO Jin-song, XU Nian-xi. Diffractive characteristics of optically transparent frequency selective surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(8): 317-322.
于淼, 高劲松, 徐念喜. 光学透明频率选择表面的衍射特性[J]. *光学学报*, 2013, **33**(8): 317-322.
- [3] JIA Hong-yan, GAO Jin-song, FENG Xiao-guo, et al. Novel composite element frequency selective surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, (8): 1596-1600.
贾宏燕, 高劲松, 冯晓国, 等. 一种新型组合单元频率选择表面[J]. *光学学报*, 2008, (8): 1596-1600.
- [4] CHANG T K, LANGLEY R J, PARKER E A. Active frequency-selective surfaces[J]. *IEEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation*, 1996, **143**(1): 62-66.
- [5] LOCKYER D S, VARDAXOGLU J C, SIMPKIN R A. Complementary frequency selective surfaces[J]. *IEEE Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation*, 2000, **147**(6): 501-507.
- [6] GU C, IZQUIERDO B S, GAO S, et al. Dual-band electronically beam-switched antenna using slot active frequency selective surface[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, **65**(3): 1393-1398.
- [7] HUANG B C, HONG J W, LO C Y. Mechanical stress-controlled tunable active frequency-selective surface[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, **110**(4): 044101.
- [8] HAN Peng, WANG Jun, WANG Fu-jia, et al. Design and research of magnetic tunable frequency selective surface based on dielectric and ferrite[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(19): 256-265.
韩鹏, 王军, 王甲富, 等. 基于介质与铁氧体的通阻捷变磁可调频率选择表面设计研究[J]. *物理学报*, 2016, **65**(19): 256-265.
- [9] JIAO Jian, XU Nian-xi, FENG Xiao-guo, et al. Tunable complementary frequency selective surface based on cross-elements[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(06): 1430-1437.
焦健, 徐念喜, 冯晓国, 等. 基于十字单元的可调谐互补屏频率选择表面[J]. *光学精密工程*, 2014, **22**(06): 1430-1437.

- [10] LOU Qi-hong, YUAN Zhi-jun, ZHANG Hai-bo. History and current status of lithography[J]. *Science*, 2017, **69**(3): 32-36.
楼祺洪,袁志军,张海波.光刻技术的历史与现状[J]. *科学*, 2017, **69**(03): 32-36.
- [11] WANG Xiu-zhi, GAO Jin-song, XU Nian-xi. Quick analysis of miniaturized-element frequency selective surface that loaded with lumped elements by using an equivalent circuit model[J/OL]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **62**(20):1-5.
王秀芝,高劲松,徐念喜. 利用等效电路模型快速分析加载集总元件的微型化频率选择表面[J/OL]. *物理学报*, 2013, **62**(20):1-5.
- [12] MUNK B A. Frequency selective surfaces: theory and design[M]. New York: John Wiley, 2000.
- [13] TANG Hai-yan. Experiment of college physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011: 247-249.
唐海燕. 大学物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 247-249.
- [14] QU Bao-long, LI Xu-dong, ZHU Peng-gang. Design of frequency selective surface with double bands[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(08): 218-223.
曲宝龙,李旭东,朱鹏刚. 双带频率选择表面设计[J]. *光学学报*, 2012, **32**(08): 218-223.
- [15] WANG Li-chao. Study on design and application of frequency selective surface[D]. Nanjing University of Science and Technology, 2012: 42-44.
王立超. 频率选择表面设计与应用研究[D]. 南京理工大学, 2012: 42-44.
- [16] ZHANG Xue-qian, ZHANG Hui-fang, TIAN Zhen, *et al.* Simultaneous control of terahertz amplitude and phase with dielectric metamaterials[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0425004.
张学迁,张慧芳,田震,等. 利用介质超材料控制太赫兹波的振幅和相位[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(4): 0425004.
- [17] CHEN Zhe, DONG Lian-he, SUN Yan-jun, *et al.* Investigation on properties of the Cl⁻ doped CdS thin films deposited by electron beam evaporation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(06): 325-329.
陈哲,董连和,孙艳军,等. 电子束蒸发沉积 CdS 掺 Cl 薄膜及其性能研究[J]. *光学学报*, 2014, **34**(06): 325-329.