

光控主动频率选择表面制作及光电性能研究

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, 吉林 长春 130022;

² 辽沈工业集团有限公司, 辽宁 沈阳 110045

摘要 为简化主动频率选择表面(FSS)器件结构,提高其谐振频率的操控性能,提出一种利用光电导薄膜的光照导电特性控制 FSS 结构尺寸变化的光控主动 FSS。从理论角度阐述了 FSS 结构尺寸与中心谐振频率的关系。以十字带通型光控主动 FSS 为例,采用 CST 软件仿真得到光照前后的中心谐振频率,频率由 23 GHz 变为 28 GHz。采用镀膜、电子束蒸发及光刻等工艺制作出光控主动 FSS 样件,分析了光电导薄膜中掺杂成分、退火温度、退火时间及光照频率、光照功率等因素对其光电性能的影响。结果显示:调节 CdS、CdSe 的分子数比(1:1~5:1)可改变敏感波长;调节 CdCl₂、InCl₃、CuCl₂ 的比例可改变亮暗方块电阻比,实验中分子数比为(3.6:2.6:1.3)时效果最佳;退火温度为 750 °C、退火时间为 30 s 时光电导薄膜光电特性与欧姆接触达到峰值。测试结果表明:在功率为 200 mW/cm² 与波长为 0.6 μm 的光照条件下,光控主动 FSS 的中心谐振频率从光照前的 23.8 GHz 变为 28 GHz,与仿真结果一致。

关键词 表面光学; 光控主动频率选择表面; 电子束蒸发; 光电导薄膜

中图分类号 TN713; O472+.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0524002

Fabrication and Photoelectric Properties of Optically Controlled Active Frequency Selective Surface

Wang Jun¹, Sun Yanjun¹, Ji Xuesong², Wang Li¹, Wang Yue¹, Leng Yanbing¹

¹ School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² Liaoshen Industrial Group Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110045, China

Abstract In order to simplify the structure of the active frequency selective surface (FSS) and improve the control performance of its resonant frequency, we propose an optically controlled active FSS that uses the photoconductive properties of the photoconductive thin film to change the structure size of the FSS. The relationship between the structure size of FSS and the center resonant frequency is elaborated in theory. Taking the optically controlled active FSS of cross dipole slot-element as an example, the center resonance frequency is changed from 23 GHz (before illumination) to 28 GHz (after illumination) by software CST simulation. The optically controlled active FSS structure is fabricated by coating, electron beam evaporation and photolithography. The influence of the doping amount, annealing temperature, annealing time, light frequency and light power on the photoelectric properties of the photoconductive thin films is analyzed. The results show that the sensitivity wavelength changes with the molecular number ratio of CdS and CdSe (1:1~5:1); the molar molecular number of CdCl₂, InCl₃ and CuCl₂ could change the ratio of bright square resistance and dark square resistance, and the effect is best when the molecular number ratio is 3.6:2.6:1.3; with annealing temperature of 750 °C and annealing time of 30 s, the photoelectric characteristics and ohmic contact of photoconductive thin film reach peak. The test results show that the center resonance frequency of optically controlled active FSS is changed from 23.8 GHz to 28 GHz before and after illumination in the conditions of 200 mW/cm² light power and 0.6 μm light wavelength, which is consistent with the simulation results.

Key words optics at surface; optically controlled active frequency selective surface; electron beam evaporation;

收稿日期: 2017-10-17; 收到修改稿日期: 2017-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(11474037, 11474041)

作者简介: 王君(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事先进光学系统设计与制造技术方面的研究。E-mail: wjwjun@126.com

导师简介: 孙艳军(1978—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事先进光学系统设计与制造技术方面的研究。

E-mail: custsun@126.com(通信联系人)

photoconductive thin film

OCIS codes 240.6700; 070.2615; 310.6860; 160.5140

1 引 言

频率选择表面(FSS)可分为被动 FSS 和主动 FSS^[1]。相比被动 FSS,主动 FSS 能够实现可调控谐振,可灵活适应复杂多变的电磁环境。目前,常用的主动式 FSS 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等方法实现的。如 Gu 等^[2]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 的有源控制;Huang 等^[3]通过机械扩展或缩小开环谐振器阵列实现可调谐有源 FSS;韩鹏等^[4]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。上述方案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。其缺点是:每个器件需单独集成,工艺十分复杂,且为集成有源器件,FSS 线条需较粗,基片材料只能选用在毫米波段及小于毫米的波段上透射的有机材料,故其只能应用于大型雷达天线罩、飞机蒙皮等场合,而无法用于光学窗口上。因此,本文提出一种光控式主动 FSS,利用光电导薄膜的光照导电特性控制 FSS 结构尺寸的变化,从而改变其中心谐振频率,实现 FSS 的主动调控。

光电导薄膜光电导性能的好坏取决于制作工艺。目前,常见的制备光电导薄膜的方法主要有电子束蒸发^[5]、离子束溅射^[6]、磁控溅射^[7]、脉冲激光沉积法^[8]等。针对该光控主动 FSS 可用于光学窗口的特点,采用真空镀膜法辅以离子浸润掺杂工艺,用电子束蒸发技术制备光电导薄膜 FSS,测试并分析工艺过程中掺杂成分、退火温度及退火时间对光电导薄膜性能的影响。研究光电导薄膜 FSS 与金属 FSS 复合制作工艺,分析光照频率、光照功率对光控 FSS 的影响,从而完成光控主动 FSS 制作及其在谐振频率调控方面的研究。

2 原理分析

电磁波照射 FSS 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^[9]。由 Munk 理论^[10]可知,单元振子的谐振尺寸为入射电

磁波半波长或半波长的整数倍,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,则谐振点发生变化,即 FSS 的中心谐振频率会发生改变。

以贴片型十字交叉单元为例,具体分析不同尺寸下 FSS 谐振特性的变化,如图 1(a)所示,十字交叉振子的长为 L ,宽为 W ,周期为 P ,设置 $W = 0.5 \text{ mm}$, $P = 60 \text{ mm}$,介质介电常数为 1,介质厚度为 0.5 mm ,得到长度分别为 50, 52, 54, 56, 58 mm 时的谐振曲线,如图 1(b)所示。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直接引起其中心谐振频率的变化。因此,通过改变 FSS 的单元结构尺寸来实现中心谐振频率的变化,理论上是可行的。

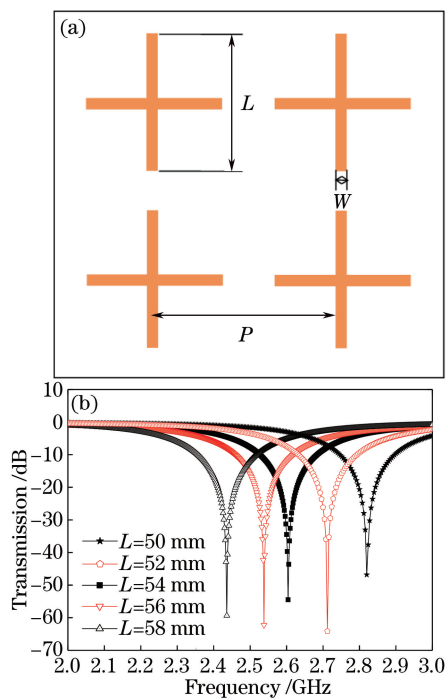


图 1 贴片型十字交叉单元。(a)单元排布方式
(b)不同尺寸的谐振曲线

Fig. 1 Patch element of crossed dipoles. (a) Arrangement of elements; (b) transmission curves with different sizes

3 结构设计及仿真

以十字带通型光控主动 FSS 为例分析其结构特点。图 2 为其一个周期单元的结构示意图,a 为

金属膜, b 为光电导薄膜, c 为通光孔径。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, 不对电磁波起屏蔽作用, 因此此时 FSS 的电磁屏蔽结构等同于图 2 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 形成连通导体, 与金属共同起到屏蔽电磁波的作用, 此时 FSS 的结构可等同于图 2 中 c 为通光区, 即该 FSS 单元结构的十字形振子的长度发生了改变, 从而实现了光调控 FSS 的中心谐振频率。

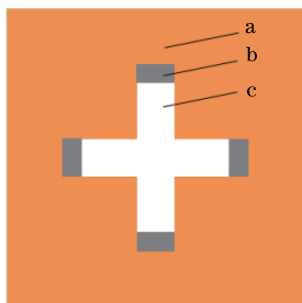


图 2 十字带通型光控主动 FSS 结构

Fig. 2 Optically controlled active FSS structure of cross dipole slot-element

本文设计的光控主动 FSS 单元结构尺寸如图 3(a) 所示, 单元尺寸及排布方式如图 3(b) 所示。

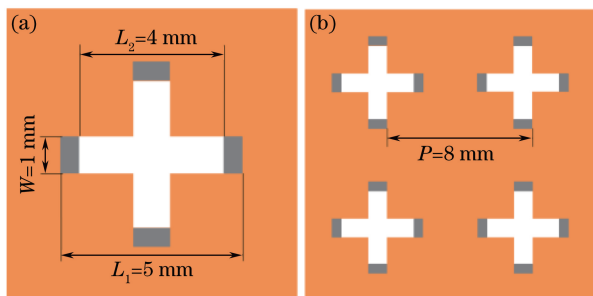


图 3 十字带通型光控主动 FSS。(a) 单元结构尺寸; (b) 单元尺寸及排布方式

Fig. 3 Optically controlled active FSS of cross dipole slot-element. (a) Structure size; (b) size and arrangement of elements

采用 CST 电磁仿真软件, 分别仿真该光控主动 FSS 光照前后的结构。光照前的结构长度为 5 mm, 光照后光电导薄膜导电, 其屏蔽性质可等同或接近金属, 因此在仿真时等效为金属薄膜, 长度为 4 mm。图 4 为光控主动 FSS 光照前后的频谱图, 无光照时中心谐振频率约为 23 GHz, 有光照时约为 28 GHz, 中心谐振频率改变了近 5 GHz。仿真结果表明, 单元结构尺寸变化后中心谐振频率发生了明显变化, 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节性。

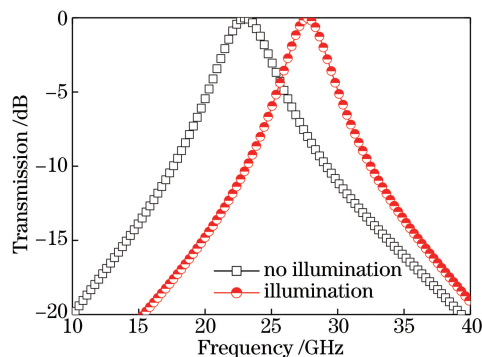


图 4 光控主动 FSS 光照前后的频谱图

Fig. 4 Spectra of optically controlled active FSS before and after illumination

4 光控主动 FSS 制作

制作光控主动 FSS 结构的总工艺流程 (a 为光电导薄膜; b 为石英基片; d 为金属膜) 如图 5 所示。1) 在预处理后的基片上采用电子束蒸发技术镀制适当材料配比的光电导薄膜; 2) 采用刻蚀技术在上述镀制好的光电导薄膜上制备所需的光电导 FSS 图案; 3) 采用光刻技术在该光电导 FSS 图案上制备金属 FSS 图案, 使之与光电导 FSS 共同构成光控主动 FSS 结构, 并高温处理, 使光电导 FSS 与金属 FSS 形成良好的欧姆接触。

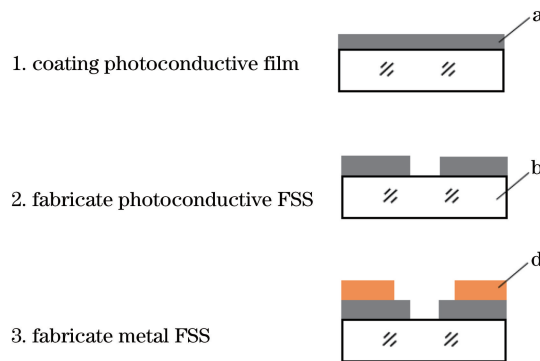


图 5 制备光控主动 FSS 的工艺流程

Fig. 5 Technological process of preparing optically controlled active FSS

4.1 光电导 FSS 的制作

4.1.1 光电导薄膜原理

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, 因而有极小的暗电导率, 在电磁屏蔽领域可忽略不计; 有光照时, 因吸收光子而产生的光生载流子浓度较大, 光照稳定情况下的光电导率^[1]为

$$\Delta\sigma = \sigma - \sigma_0 = q(\Delta N_n\mu_n + \Delta N_p\mu_p) = q\mu_p(b\Delta n + \Delta p), \quad (1)$$

式中: q 表示电子电荷; ΔN_n 表示光生电子浓度; ΔN_p 表示光生空穴浓度; μ_n 表示电子迁移率; μ_p 表示空穴迁移率; $b = \mu_n / \mu_p$ 。在恒定光照下,光生载流子的产生与复合相继发生,稳定情况下的载流子浓度为

$$\Delta N_{p0} = g\tau, \quad (2)$$

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 P_i , V 为材料体积, η 为量子效率,则载流子产生率与入射光功率关系为

$$g = P_i \eta / (h\nu V), \quad (3)$$

式中: h 为普朗克常数; ν 为光子的频率。于是,(2)式可写为

$$\Delta N_{p0} = P_i \eta \tau / (h\nu V)。 \quad (4)$$

可见,入射光功率 P_i 与恒定光照情况下光生载流子浓度 ΔN_{p0} 呈线性关系,也与光电导率 $\Delta\sigma$ 呈线性关系。

4.1.2 光电导 FSS 制备工艺

光电导薄膜组成材料包含 CdS、CdSe、CdCl₂、InCl₃、CuCl₂ 5 种成分,通过调节 CdS、CdSe 的分子数比(1:1~5:1)可改变敏感波长,调节 CdCl₂、InCl₃、CuCl₂ 的分子数比可改变光照与非光照条件下的方块电阻。按照材料组分配比先将高纯基材球磨混合,然后将膜料烧结,将 CdS、CdSe 膜料的混合均匀度提高到 99% 以上。采用 Angstrom 公司生产的 EvoVac 型镀膜机,用真空镀膜法辅以离子浸润掺杂工艺、电子束蒸发技术制备光电导薄膜,利用电子束将水冷坩埚中的膜料由固态加热蒸发至气态,继而蒸镀到石英基片上。然后采用离子浸润方法在薄膜内进行掺杂,即采用 CdCl₂、InCl₃、CuCl₂ 化合物溶液对薄膜进行离子浸润,溶液的配比按照元素掺杂的物理模型进行配置。离子浸润采用超声雾化方法使溶液雾化成微小液滴,微小液滴以一定速度附着于 CdS/CdSe 薄膜表面发生浸润,浸润过程即是溶液中的 Cl⁻、In⁺、Cu²⁺ 向薄膜附着及内部扩散的过程。以上工艺可实现光电导薄膜制备及元素的粗掺杂,此时掺杂均匀度较差。镀制完毕,后续采用高温后处理实现元素在 CdS/CdSe 内部的均匀扩散掺杂。至此完成图 5 所示工艺过程的第一步。之后,利用有掩模光刻法进行匀胶、曝光、显影、烘烤、腐蚀后,去除表面保护胶后得到所需的光电导膜 FSS,工艺流程如图 6(a) 所示(a 为光电导薄膜;b 为石英基片;c 为光刻胶),样件实物如图 6(b) 所示(白色十字部分为背景桌面)。

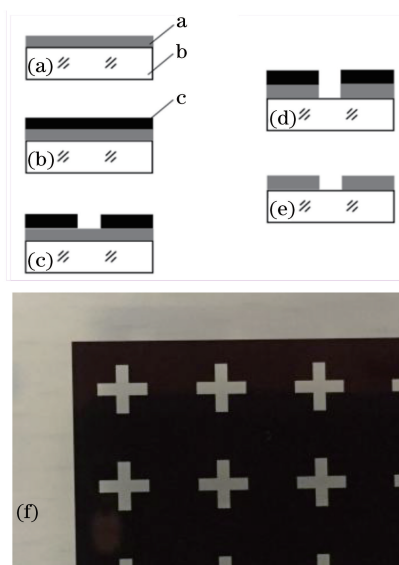


图 6 制备光电导 FSS。(a)镀光导膜;(b)涂胶;(c)曝光和显影;(d)腐蚀;(e)去除保护胶;(f)样件实物图

Fig. 6 Preparation of photoconductive FSS.

- (a) Coating photoconductive film;
- (b) spin coating;
- (c) exposure and development;
- (d) corrosion;
- (e) cleaning the photoresist;
- (f) photo of sample

4.1.3 组成元素对薄膜光电性能的影响

1) CdSe 含量对光电导性能的影响

CdS 和 CdSe 两种材料的感光光谱不同,CdS 材料对波长 500 nm 附近的绿光最敏感,而 CdSe 对波长 700 nm 附近的红光最敏感,CdS 和 CdSe 的比例将影响光电导薄膜的感光光谱。对不同比例(分子数比)的 CdS 和 CdSe 进行光谱实验,对比结果如图 7 所示,对数据点拟合得到的曲线如图中红线所示。从曲线可以看出,随 CdSe 含量增多,感光波长呈线性增长趋势。

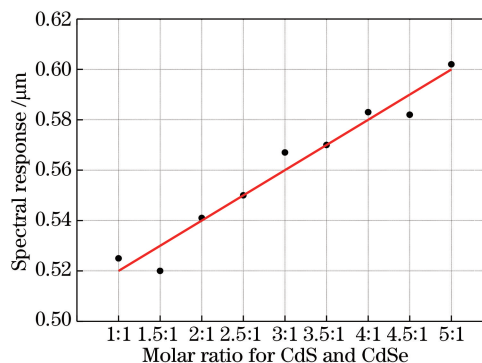


图 7 CdSe 掺杂量对光谱响应的影响

Fig. 7 Effect of doping amount of CdSe on spectral response

2) Cu 掺杂对光电导性能的影响

Cu 掺杂量(指 Cu 的摩尔分数)对光电导性能的影响如表 1 所示,Cu 的加入可改变光电导薄膜的

亮暗方块电阻比。根据数据描绘的曲线如图 8 所示。可见,随 Cu 含量的增多,亮方块电阻增大,变

化趋势较慢,但暗方块电阻持续增加,亮暗方块电阻比逐渐增大,这种趋势对于其应用较有利。

表 1 Cu 含量不同时光电导薄膜的暗/亮方块电阻

Table 1 Dark/bright square resistance of photoconductive thin films at different doping amounts for Cu

Mole fraction of Cu /%	Dark square resistance /($M\Omega \cdot \square^{-1}$)	Bright square resistance /($k\Omega \cdot \square^{-1}$)	Mole fraction of Cu /%	Dark square resistance /($M\Omega \cdot \square^{-1}$)	Bright square resistance /($k\Omega \cdot \square^{-1}$)
0	1.45	1.2	0.007	110.0	3.3
0.001	4.10	1.4	0.008	162.0	3.6
0.002	12.4	1.7	0.009	206.3	3.9
0.003	18.9	2.0	0.010	295.0	4.2
0.004	36.4	2.4	0.011	371.1	4.4
0.005	49.8	2.8	0.012	485.3	4.8
0.006	78.2	3.1	0.013	594.2	5.8

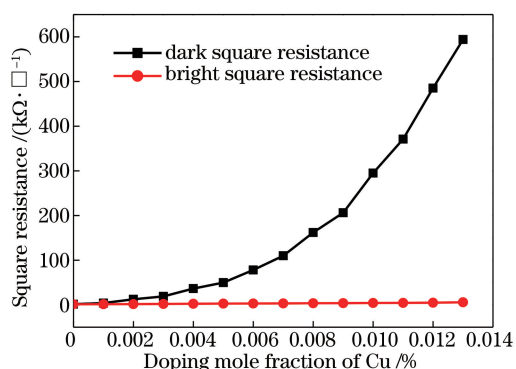


图 8 Cu 掺杂量对 CdS 薄膜的方块电阻的影响

Fig. 8 Effect of doping mole fraction of Cu on square resistance

4.2 光电导 FSS 与金属 FSS 的复合作

采用光刻技术在光电导薄膜相应位置上制备不同尺寸的金属 FSS 图案,工艺流程如图 9(a)~(d)所示(a 为光电导薄膜;b 为石英基片;c 为光刻胶;d 为金属膜)。1)在预处理后的基片上用 Smartcoater100 匀胶机以 3500 r/min 的速度均匀旋涂正性光刻胶;2)采用 TS-VPF32HSF-1 型曝光机,在光刻胶表面根据上述十字带通型金属 FSS 图案进行曝光,这一步涉及光电导薄膜与金属 FSS 掩膜版的对准问题,利用衍射光栅同轴对准光学原理完成对准^[12]并曝光;3)将显影、烘烤后的器件放在 Angstrom 公司生产的 EvoVac 型镀膜机内镀制金属膜(根据需要选用金、银、铜、铝等导电性能较好的金属,为防止高温氧化本实验采用金属金);4)用有机溶剂(酒精、丙酮等)去除镀制在胶面上的金属膜,而镀制在基片上的金属膜得到保留,这些保留的金属膜构成 FSS 图案,与光电导 FSS 共同构成光控主动 FSS,所制样件如图 9(e)所示。

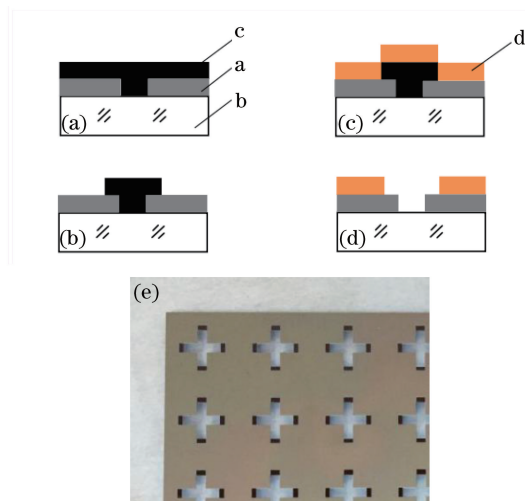


图 9 制备金属 FSS。(a)旋涂光刻胶;(b)曝光和显影;(c)镀金属膜;(d)去除光刻胶;(e)光控主动 FSS 样件实物图

Fig. 9 Preparation of metal FSS. (a)Spin coating; (b) exposure and development; (c) metal plating; (d) cleaning the photoresist; (e)sample of optically controlled active FSS

4.3 高温处理实现光电导性能

由于光电导薄膜的光电导性能和光电导薄膜与金属薄膜之间的接触性能在高温处理后方能产生,因此处理温度及退火过程不仅对光电导性能产生影响,同时也会对金属和光电导材料的欧姆接触性能产生影响。分别在 JQF1100 型高温实验电炉里 N_2 保护下进行退火,退火温度分别为 725,750,775,800 $^{\circ}C$,退火时间为 300 s,然后自然冷却并在相同光照条件下测试,得到电流 I 和电压 V 的关系如图 10所示。

如图 10(a)所示,未经退火的情况下,其电流只有 10^{-12} 量级,说明此时光电导膜方块电阻极大,此时材料光电导性能不佳,金属与光电材料之间未实现欧姆接触。经过退火的光电导薄膜方块电阻急剧

下降,欧姆接触效果良好,在温度为 750 °C 进行退火时效果最佳,最接近理想的欧姆接触。

根据以上实验也可获得退火温度与薄膜接触方块电阻的关系,如图 10(b)所示。从图中可看出,随退火温度的升高,方块电阻先降低后升高,在温度为 750 °C 时得到最佳接触方块电阻为 $5 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

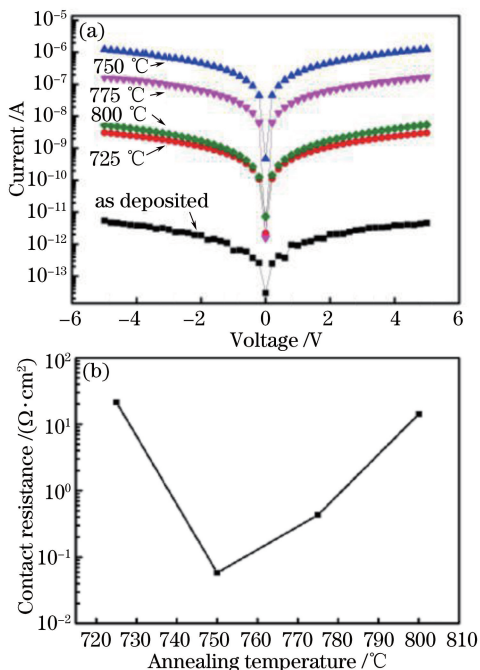


图 10 退火温度对光电导薄膜的影响。(a)不同退火温度下的 I-V 对数曲线;(b)退火温度与薄膜接触方块电阻的关系
Fig. 10 Effect of annealing temperature on photoconductive thin film. (a) I-V logarithmic curves at different annealing temperatures; (b) relationship between annealing temperature and film contact square resistance

另外,退火时间对欧姆接触的效果也有较大影响。当温度为 750 °C 时,分别选取退火时间为 10, 15, 30, 60 s 的接触方块电阻进行测试,结果如图 11(a)、(b)所示。由图可知,温度为 750 °C、退火时间为 30 s 时欧姆接触效果最好,合金化程度较高;退火时间短会导致合金程度有限,影响欧姆接触;退火时间长合金化过量,会向光电导薄膜内部扩散,影响光电导性能。

因此,将上述所制光控主动 FSS 在 750 °C 下退火 30 s,实现光电导薄膜与金属膜之间良好的欧姆接触,从而实现其良好的光电导性能。

5 性能分析与测试

5.1 轮廓测试

采用 ZTM-700 型精密数显测量显微镜对上述所制光控主动 FSS 样件的结构尺寸进行轮廓测试,

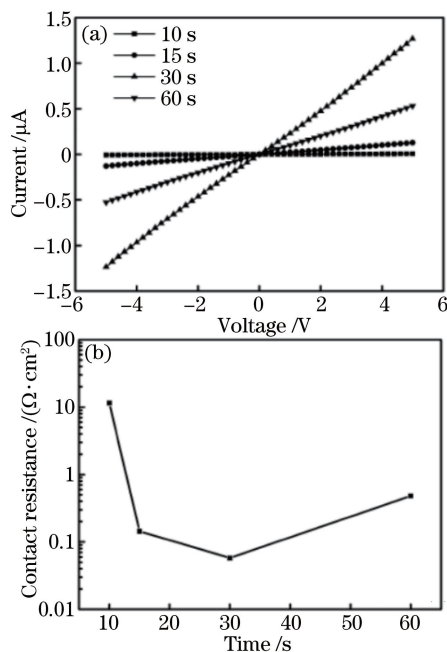


图 11 (a)不同退火时间的 I-V 曲线;(b)退火时间与薄膜接触方块电阻的关系
Fig. 11 (a) I-V curves at different annealing time; (b) relationship between annealing time and film contact square resistance

结构尺寸测试结果与设计值分别为:金属 FSS 结构的设计尺寸长度 $L_1 = 5 \text{ mm}$,宽度 $W = 1 \text{ mm}$,测试结果长度 $L'_1 = 5.005 \text{ mm}$,宽度 $W' = 1.004 \text{ mm}$;光电导 FSS 结构的设计尺寸长度 $L_2 = 4 \text{ mm}$,宽度 $W = 1 \text{ mm}$,测试结果长度 $L'_2 = 4.009 \text{ mm}$,宽度 $W' = 1.004 \text{ mm}$ 。可见,样件的实际尺寸与设计的理论值相比误差极小,对屏蔽效果的影响可以忽略。

5.2 光照频率测试

对上述所制光控主动 FSS 样件进行光照频率测试,分别采用 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 μm 5 种不同波长的 LED 对样件进行照射,用 RTS-8 型四探针测试仪测得样件表面亮方块电阻值,结果如图 12 所示。可见,采用上述材料配比制得的光电导薄膜的最佳敏感波长约为 0.6 μm,与前述 CdSe 掺杂实验结果相匹配。

5.3 光照功率测试

实验中采用光照波长 0.6 μm、光照功率平均密度分别为 50, 100, 150, 200, 250, 300 mW/cm² 的 LED 测试样件中光电导薄膜的暗方块电阻和亮方块电阻,测试仪器为 RTS-8 型四探针测试仪,测试结果如表 2 所示。将亮方块电阻数据绘成曲线如图 13 所示。由曲线图可知,随光功率的增大,150 mW/cm² 之前亮方块电阻急剧减小,150 mW/cm² 之后趋于平缓。

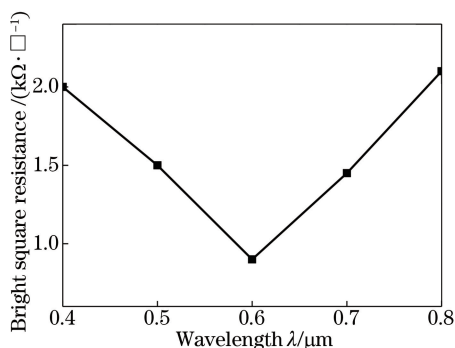


图 12 不同频率光照射下光电导薄膜的亮方块电阻

Fig. 12 Bright square resistance of photoconductive thin film irradiated with different frequencies light

表 2 不同光功率下光电导薄膜暗/亮方块电阻测试结果
Table 2 Test results for dark/bright square resistance of photoconductive thin film in different optical powers

Optical power / (mW · cm ⁻²)	Dark square resistance / (MΩ · □ ⁻¹)	Bright square resistance / (kΩ · □ ⁻¹)
50	29	10
100	29	5
150	29	1
200	29	0.1
250	29	0.09
300	29	0.085

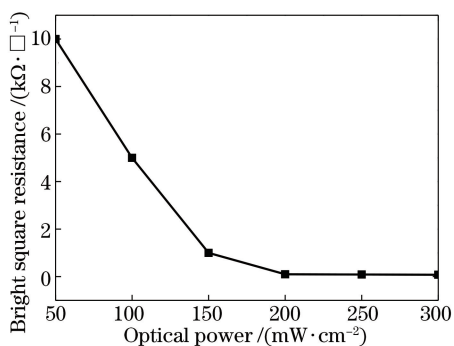


图 13 不同光功率下光电导薄膜的亮方块电阻

Fig. 13 Bright square resistance of photoconductive thin film irradiated with different optical powers

5.4 屏蔽效果测试

将光控主动 FSS 样品置于微波暗室进行测试, 实验仪器有 VectorStar 矢量网络分析仪、南京理工大学微波实验室生产的毫米波测试仪、喇叭天线和光照功率平均密度为 200 mW/cm²、波长为 0.6 μm 的 LED 光源等, 测试装置示意图如图 14 所示。实验变量为有、无光照的控制, 测试光源采用四角照射的方式。

首先在无光照条件下, 由毫米波测试仪的信号发生器产生 10~40 GHz 的电磁波, 通过发射天线

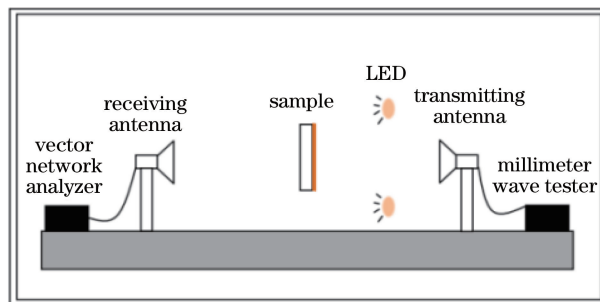


图 14 测试原理图

Fig. 14 Schematic diagram of the measurement

输出, 在自由空间中传播并经过样品, 由接收天线接收信号, 矢量分析仪处理数据得到无光照时的测试曲线; 从上下左右 4 个位置均匀照射样品, 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。图 15 为十字带通型光控主动 FSS 样品的测试谐振曲线。光照前中心谐振频率仿真值与测试值分别为 23 GHz 和 23.8 GHz, 光照后中心谐振频率仿真值与测试值分别为 27.6 GHz 和 28 GHz, 故测试得到的中心谐振频率及趋势与仿真基本一致, 证明利用光电导薄膜实现光主动控制 FSS 的中心谐振频率的方法是可行的。

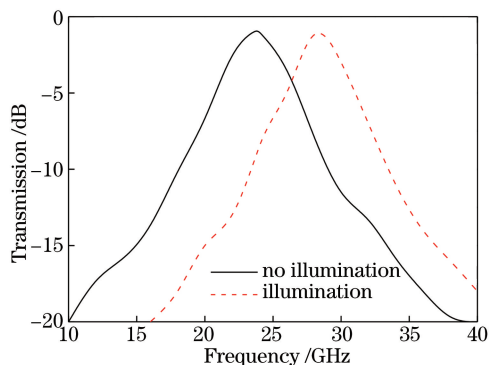


图 15 测试曲线图

Fig. 15 Curves of measurement

为验证光照功率对屏蔽效果的影响, 采用波长为 0.6 μm、光照功率平均密度分别为 50, 100, 150, 200, 250 mW/cm² 的 LED 照射样品, 测得该光控主动 FSS 样品的谐振曲线如图 16 所示。在光频率不变的情况下, 随着光照功率的增加, 薄膜的导电率增强, 屏蔽效率增加并逐渐趋于稳定, 因此对中心频率没有影响。

6 结 论

提出并制作了光控主动 FSS, 重点研究了制作方法以及制作过程中影响其光电性能的因素。以十字带通型光控主动 FSS 为例, 从理论上阐述了利用

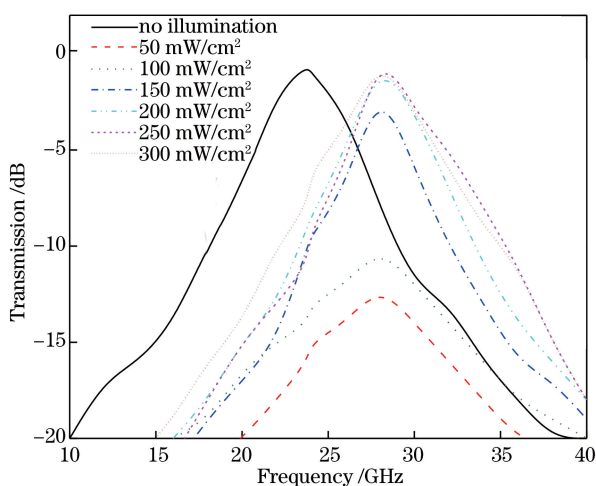


图 16 光照功率对屏蔽效果的影响

Fig. 16 Effect of optical power on shielding

光电导薄膜的光照导电特性控制 FSS 结构尺寸变化的规律,实现了 FSS 结构的中心谐振频率可调。研究采用真空镀膜、电子束蒸发及光刻等技术制作光控主动 FSS,结果表明:调节 CdS、CdSe 的分子数比(1 : 1 ~ 5 : 1)可改变敏感波长;调节 CdCl₂、InCl₃、CuCl₂ 的比例可改变亮暗方块电阻比;工艺过程中退火温度为 750 °C、退火时间为 30 s 时欧姆接触效果最佳。分析了光照频率、光照功率等因素对其光电导性能的影响,最终选用光功率平均密度为 200 mW/cm²、中心波长为 0.6 μm 的 LED 作为测试光源,测试结果表明:光照前后该光控主动 FSS 的中心谐振频率从 23.8 GHz 变为 28 GHz,与仿真变化趋势基本一致。将光电导薄膜与金属 FSS 有效结合,通过控制光照即可对 FSS 谐振频率进行有效调控,与其他主动 FSS 相比,本器件结构简单、工艺难度小、控制方便。因此在军事及工业领域将有更为广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Wu T K. Frequency selective surface and grid array [M]. New York: Wiley-Interscience, 1995: 1-18.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Han P, Wang J, Wang J F, *et al.* Design and research of magnetic tunable frequency selective surface based on dielectric and ferrite[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(19): 197701.
- [5] Wang J X, Hong R J, Tao C X, *et al.* Fabrication and surface enhanced Raman spectroscopy Nano-Cu₂O thin films[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0816004. 王进霞, 洪瑞金, 陶春先, 等. 纳米 Cu₂O 薄膜的制备及其表面增强拉曼光谱[J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0816004.
- [6] Liu H S, Wang L S, Yang X, *et al.* Energy band properties of hafnium oxide thin films fabricated by ion beam sputtering technique[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0231001. 刘华松, 王利栓, 杨霄, 等. 离子束溅射氧化铪薄膜的能带特性[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0231001.
- [7] Zhao Q C, Hao R T, Liu S J, *et al.* Influence of annealing temperature on properties of Cu₂ZnSnS₄ thin films prepared by step sputtering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 091601. 赵其琛, 郝瑞亭, 刘思佳, 等. 退火温度对分步溅射制备铜锌锡硫薄膜性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 091601.
- [8] Liang L R, Wang F, Qiu Z M. Synthesization of (Bi, Er)₂Ti₂O₇ dielectric thin films by pulse laser deposition method and its up-conversion luminescence [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 013101. 梁立容, 王凤, 邱泽敏. 脉冲激光沉积法合成 (Bi, Er)₂Ti₂O₇ 介电薄膜及其上转换发光[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 013101.
- [9] Wang X Z, Gao J S, Xu N X. Quick analysis of miniaturized-element frequency selective surface that loaded with lumped elements by using an equivalent circuit model [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(20): 207301. 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]. 物理学报, 2013, 62(20): 207301.
- [10] Munk B A. Frequency selective surfaces: theory and design[M]. New York: John Wiley & Sons, 2000: 22-45.
- [11] Tang H Y. 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.
- [12] Sun Y J. Study on the infrared focal plane integration technology based on rectangular aperture micro-lens arrays [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014: 92-105. 孙艳军. 基于矩形孔径微透镜阵列的红外焦平面集成技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014: 92-105.