

文章编号: 0253-2239(2010)09-2766-05

ZnS 光窗上增透与带通频率选择表面组合膜设计

朱华新^{1,2} 冯晓国¹ 赵晶丽¹ 梁凤超¹ 王岩松¹ 陈 新¹ 高劲松¹

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 为满足红外和雷达复合制导飞行器带外隐身的要求,设计了一种 ZnS 基底上的红外高通雷达带通的频率选择表面(FSS)组合膜。设计并分析了作为初始结构的电感性网栅薄膜,运用含阻抗边界条件的谱域 Galerkin 法分析了网栅膜基底上的开孔十字 FSS 结构,该结构谐振频点为 31.75 GHz,透射率为 -0.38 dB,其对应的理想导体(PEC)表面 FSS 的谐振频点为 33 GHz;为提高此组合结构的红外透射率,运用薄膜光学理论设计了由 YbF₃ 与 ZnSe 两种膜料组成的红外增透膜,膜层厚度为 1.085 μm。结合光刻与镀膜工艺制作了实验件,测试表明,该组合薄膜在测试雷达频段平均传输系数小于 -7.51 dB(谐振频点外),在谐振频点 31.5 GHz 的透射率达到了 -0.63 dB;在长波红外平均透射率达到了 87.95%。

关键词 薄膜;滤波器;频率选择表面;透明导电膜;阻抗

中图分类号 TN975 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103009.2766

Design of Antireflection and Band-Pass Frequency Selective Surface Combining Coatings for ZnS Optical Window

Zhu Huaxin^{1,2} Feng Xiaoguo¹ Zhao Jingli¹ Liang Fengchao¹ Wang Yansong¹
Chen Xin¹ Gao Jinsong¹

¹ Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract To shield the detection radar wave for radar/infrared combined guidance weapons, an idea of designing a kind of combining frequency selective surface (FSS) coatings is proposed on ZnS substrate. The coatings are not only infrared transparent, but also have band-pass properties in radar wave band. An inductive mesh which is treated as the initial structure is designed and analyzed. An FSS structure with aperture element of cross shape is designed and analyzed by a so-called Galerkin's method in the spectral domain. The resonance frequency of this FSS structure is 31.75 GHz, whose transmittance is about -0.38 dB. The resonance frequency of FSS on perfect conductor (PEC) surface which has the same parameters is 33 GHz. Antireflection coatings are designed by optical coatings theory with two coating materials to improve the infrared transmittance of this combination structure. The total layers' thickness is 1.085 μm. The sample is fabricated by depositing coatings and lithography. The test results indicate that the transmittance at radar central resonant frequency of 31.5 GHz is about -0.63 dB, and the average transmittance (out of central frequency) is lower than -7.51 dB. The average transmittance is 87.95% in long-wave infrared region.

Key words thin film; filter; frequency selective surface; transparent conductive coating; impedance

收稿日期: 2009-11-06; 收到修改稿日期: 2009-12-17

作者简介: 朱华新(1983—),男,博士研究生,主要从事光学薄膜及隐身材料设计等方面的研究。

E-mail: zhuhuaxing1312@163.com.

导师简介: 高劲松(1968—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学薄膜的设计、制备及隐身材料等方面的研究。

E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn

1 引言

频率选择表面(FSS)是由周期性排列的金属贴片单元(带阻型),或由金属屏上周期性的开孔单元(带通型)构成的一种二维周期阵列结构^[1,2]。FSS能够较好的控制电磁波的传输和散射,能使入射电磁波在谐振频率处发生全反射或全透射。自20世纪70年代以来,国内外学者已经从理论建模、数值计算、工艺实现及其工程应用对其进行了广泛而深入地研究。

传统的孔径型 FSS 通常用于雷达波段^[3,4],实现选择性的全透射,一般的金属屏(如铜)是红外不透明的,而孔径部分面积占金属屏的总面积较少,即使是红外透明的基底,红外透射率仍比较低。为了获得红外透明 FSS 结构,关键在于寻求一种红外透明导电的基底材料,然后在此基础上设置一系列开孔单元,使其在微波频段具有带通滤波器的作用。虽有一些报道能制备出红外透明且导电的薄膜,如掺杂金属的类金刚石薄膜^[5~7],但制作成本较高,加工难度大,因此网栅基底因其优良的红外透明导电特性成为了首选。由于传统网栅只能透过红外屏蔽雷达波,所以在此基底上设置一系列的孔径 FSS 结构单元,在雷达波段呈现出带通滤波特性,使电磁波能在所需频段通过。

本文从网栅的基本理论出发,以谱域 Galerkin 法为基本分析方法,利用电磁场中的二重性原理对含有一层介质衬底的红外透明带通 FSS 进行了分析计算。由于网栅基底表面存在表面电阻,对理想导体表面的谱域方程进行了修正,并求得了此结构的频率响应特性,最终根据光学薄膜的理论,设计了红外增透膜^[8~11]。

2 基本原理

R. Ulrich^[12]给出在自由空间中垂直入射情况下网栅的透射率为

$$T(0,0) \approx \frac{4g^2}{\lambda^2} \left[\ln \left(\sin \frac{\pi a}{g} \right) \right]^2, \quad (1)$$

式中 a 是网格线半宽度, g 是网格周期。L. B. Whitbourn 等^[13]给出了无损耗、垂直入射情况下,电介质边界的金属网栅透射率为

$$T(n_1, n_2) = \frac{n_1 n_2 T(0,0)}{1 + T(0,0) [(n_1 + n_2)^2 / 4 - 1]}, \quad (2)$$

式中 n_1 为入射媒质折射率, n_2 为出射媒质折射率, $T(0,0)$ 由(1)式得。

在光学频率范围内^[14],对于能量系统,网栅格的透射率可简单地由遮拦比(开口总面积的份额)给出

$$T_{\text{total}} = \left(\frac{g - 2a}{g} \right)^2 = \left(1 - \frac{2a}{g} \right)^2. \quad (3)$$

(3)式说明线宽 $2a$ 越小,周期 g 越大,红外透射率越高。由于网栅的光电特性是相互矛盾的,解决该矛盾的途径就是在网栅周期(主要由屏蔽波长决定)一定的情况下, $2a$ 越小越好。

对于 FSS 而言,它是一种周期性排布的结构,利用电磁场中的二重性原理^[15],孔径单元由入射场激励起感应磁流,则单个单元的散射场可以表示为

$$\mathbf{H}^s(x, y) = -j\omega \epsilon_0 \mathbf{F}(x, y) + \nabla [\nabla \cdot \mathbf{F}(x, y)] / (j\omega \epsilon_0), \quad (4)$$

\mathbf{H}^s 为散射波磁场强度, \mathbf{F} 为磁场的矢势。FSS 单元孔径表面切向磁场边界条件为 $\mathbf{H}^{\text{inc}} + \mathbf{H}^s = Z_s \mathbf{M}$, 其中 \mathbf{H}^{inc} 为入射波的磁场强度, \mathbf{M} 为等效磁流, Z_s 为表面电阻,若 FSS 屏为理想导体(PEC),则 $Z_s = 0$ 。应用傅里叶变换,并利用弗洛盖(Floquet)定理则可得谱域表达式为

$$\begin{aligned} & - \begin{bmatrix} H_x^{\text{inc}}(x, y) \\ H_x^{\text{inc}}(x, y) \end{bmatrix} + Z_s \begin{bmatrix} M_x(\alpha_{nm}, \beta_{nm}) \\ M_y(\alpha_{nm}, \beta_{nm}) \end{bmatrix} = \\ & \frac{4\pi}{j\omega\mu_0 ab} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha_{nm}^2 & -\alpha_{nm}\beta_{nm} \\ -\alpha_{nm}\beta_{nm} & k_0^2 - \beta_{nm}^2 \end{bmatrix} \times \\ & G(\alpha_{nm}, \beta_{nm}) \begin{bmatrix} M_x(\alpha_{nm}, \beta_{nm}) & M_y(\alpha_{nm}, \beta_{nm}) \end{bmatrix}^T \times \\ & \exp(j\alpha_{nm}x) \exp(j\beta_{nm}y). \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $G(\alpha_{nm}, \beta_{nm})$ 为谱域并矢格林函数,与 FSS 单元两侧的匹配介质有关。

由于 FSS 阵列是二维周期结构,由傅里叶变换的性质可知, α, β 不再是连续的值,而是取一些离散的值,他们相应的 Floquet 谐波,其表达式为

$$\begin{cases} \alpha_{nm} = \frac{2m\pi}{A} + k_x, \\ \beta_{nm} = \frac{2n\pi}{B \sin \Omega} - \frac{2m\pi}{A} \cot \Omega + k_y, \end{cases} \quad (6)$$

式中 Ω 为 FSS 两个周期方向的倾斜角, A, B 分别为两个周期方向的单元周期值,

$$k_x = k_0 \sin \theta \cos \varphi, \quad k_y = k_0 \sin \theta \sin \varphi, \quad (7)$$

式中 θ, φ 分别为平面波入射角和方位角。

用矩量法求解(5)式,对于一般的规则图形单元可用全域基函数将要求解的感应磁流展开,其他图形单元的基函数选用子域基函数中的 Rooftop 展开,就可以求出等效磁流 M ,进而可以求出反射系数和透射系数^[16]。

3 理论设计

先选择一块平板 ZnS 基底,厚度为 13 mm,在

微波波段介电常数 $\epsilon_r = 4.5$, $\tan \delta = 0.002$, 通过镀膜与光刻手段制作出网栅, 利用 Spectrum GX 傅里叶变换光谱仪测试了其在网栅制作前后长波红外 8~10 μm 透射率, 如图 1 所示。

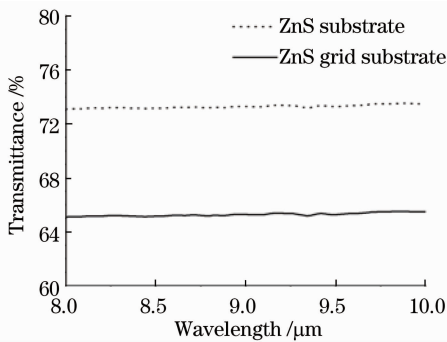


图 1 ZnS 基底和带网栅的 ZnS 基底透射率

Fig. 1 Transmittance curves of ZnS substrate and ZnS grid substrate

网栅周期为 250 μm , 线宽为 15 μm , 第一个表面方块的电阻约为 50 Ω 。从图 1 中看出, ZnS 基底的透射率约为 73%, 其折射率为 2.2 左右, 由于 ZnS 基底在长波红外的色散很小, 因此透射率曲线比较平坦, 网栅基底相对于原基底透射率下降了约 8%, 由(3)式计算得到的网栅透射率下降为 8.76%, 与测试比较接近。但由于未镀制增透膜, 因此整体的透射率较低, 因此增透膜的镀制是必不可少的。采用了 ZnSe 和 YbF₃ 这两种膜料设计了增透膜, 膜层总数为 2 层, 由于 YbF₃ 暴露在空气中易潮解, 因此外层为 ZnSe, 膜层总厚度为 1.085 μm , YbF₃ 和 ZnSe 的厚度分别为 929 nm 和 156 nm, 单面增透膜系的设计透射率曲线如图 2 所示。从图 2 中看出, 设计的单面增透膜平均透射率在 98.5% 以上。

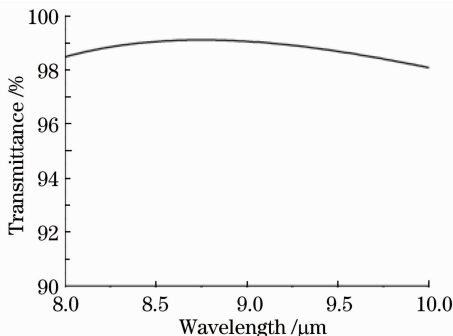


图 2 设计增透膜的透射率曲线

Fig. 2 Transmittance of designed AR coating

网栅对雷达波有屏蔽作用, 根据(2)式其仿真曲线如图 3 所示。由图 3 看出, 对于计算频段的透射率比较低, 均在 -10 dB 以下, 对于更低的频率, 网栅的屏蔽效果更好, 而对于高频屏蔽效能有下降的

趋势, 这也是符合实际情况的。因此要在雷达波段开通一个自身制导波段必须要在网栅基底上设置开孔单元, 如图 4 所示。

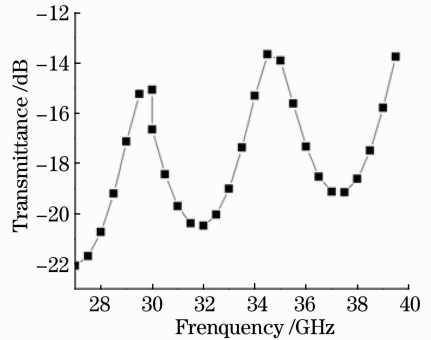


图 3 网栅基底计算频率响应特性

Fig. 3 Calculated transmittance of grid substrate

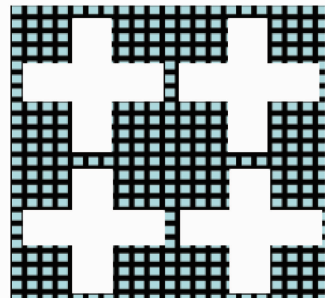


图 4 网栅基底 FSS

Fig. 4 FSS on grid substrate

经参数调整, 十字孔的单元周期为 4 mm, 十字孔长、宽分别为 3.5 mm 和 0.5 mm, 网栅周期为 250 μm , 线宽为 15 μm , 其仿真曲线如图 5 所示。

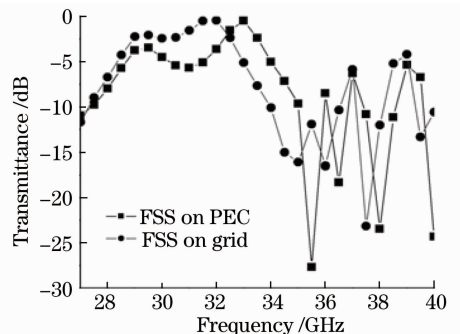


图 5 理想导体表面 FSS 和网栅表面 FSS 频率响应特性

Fig. 5 Comparison of frequency response of FSS on PEC and grid

图 5 中, 两种 FSS 的十字孔结构参数相同, 选频特性有一定的差异, 理想导体表面 FSS 的中心频点高于网栅基底 FSS, 网栅基底 FSS 中心谐振频点为 31.75 GHz, 透射率为 -0.38 dB, 而理想导体表面 FSS 中心谐振频点为 33 GHz, 透射率为 -0.43 dB。引起中心谐振频点以及选频特性存在

差异的原因在于网栅基底表面存在表面电阻,使得两者的边界条件存在差异,由(5)式得出的表面感应磁流不同,进而影响整个结构的选频特性。对于高频处的起伏,分析原因是由于 ZnS 基底厚度相对于此波段较厚,电厚度随波长周期变化较快,使得 ZnS 基底本身的透射率在此波段起伏,受基底透射率的调制,FSS 结构的透射率也有一定起伏。

由于增透膜总厚度仅为 $1.085 \mu\text{m}$,因此对 FSS 而言,起增透作用的介质膜的介质加载效应可以忽略。

4 实验制作及测试

用于实验的热压 ZnS 基底大小为 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$,用有机溶剂擦净表面,继而涂胶,而后进行激光直写,再经过显影,后通过镀膜技术,沉积了 Cr 和 Cu 膜,厚度分别为 30 nm 和 250 nm 左右,Cr 起到连接作用,为一个过渡层,以提高 Cu 膜的附着力,再通过去胶得到图 4 所示的十字孔图形单元,最后镀制双面的增透膜。

将制备好的实验件在微波暗室进行测试,测试系统主要包括矢量网络分析仪和两个测试天线及转台。测试分 2 步:1)测试并记录无实验件时接收信号的幅度和相位,建立参考基准;2)插入实验件,测试接收信号的幅度和相位,将它们分别与参考基准相减得到实验件插入损耗和插入相位移。图 6 为 ZnS 网栅基底 FSS 结构的测试曲线,测试角度为 0° 。从测试曲线可以看出,测试值与计算值基本一致。

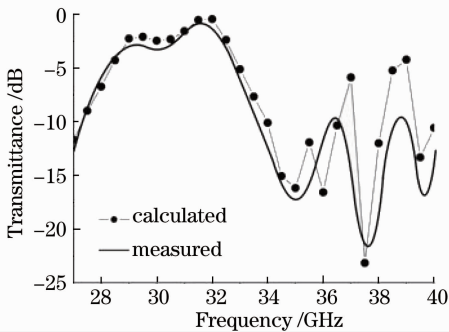


图 6 测试频率响应特性

Fig. 6 Measured frequency response characteristic

从测试曲线中看出,测试中心谐振频点为 31.5 GHz ,透射率为 -0.63 dB ,而理论计算得到的中心谐振频点为 31.75 GHz ,两者相差了 250 MHz ,分析原因主要为:

1) 理论误差:在求解(5)式时,感应磁流基函数的展开模式、基函数的选取及个数以及 Floquet 模

的数目均会产生理论误差;

2) 工艺误差:在工艺上的误差,使得网栅线条宽度存在一定的不均匀性以及线条的厚度不一致,各处的表面电阻有差异,而谱域法是假设周期无限大的情况,利用 Floquet 定理,只需计算一个周期单元,因此与实际模型存在差异;

3) 测试误差:在测试过程中,实验件为有限大平面,其边缘会产生边缘效应,发射天线的波束也只能是一个近似平面波,存在一定的测试误差。但从总体上看理论设计与实际测试还是很接近。

采用傅里叶变换红外光谱仪测试了样片的红外透射率,如图 7 所示。从图 7 得,网栅基底的 FSS 结构平均透射率为 87.95% ,直接镀制双面增透膜的 ZnS 基底的平均透射率为 97.62% ,前者比后者降低了 9.67% 。而网栅基底比纯 ZnS 基底透射率下降约 8% ,两者相差了 1.67% ,原因在于增透膜只是针对纯 ZnS 基底的,因此网栅与该增透膜不匹配,于是网栅和网栅基底上 FSS 结构的透射率都与遮拦比有关,即由(3)式决定,因此两者相差 1.67% 是合理的。

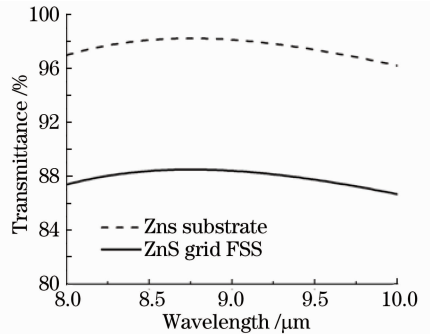


图 7 网栅基底 FSS 红外透射率

Fig. 7 Transmittance of grid surface FSS in infrared region

5 结 论

本文提出了采用网栅基底制作红外透明频率选择表面的思想,从理论上得到了网栅的红外透射率,与实际测试结果进行比较,运用谱域 Galerkin 法,在透明网栅基底表面利用阻抗边界条件,推导出利用该类材料制作的红外透明频率选择表面的电磁场谱域积分方程,并求出其透射率曲线,理论仿真与实际测试基本吻合。与传统的 PEC FSS 相比,ZnS 网栅基底 FSS 结构不仅在雷达波段实现了频率选择特性,而且实现了红外波段的高透射率,镀制红外双层增透膜后的透射率达 87.95% ,测试雷达波段的

谐振中心频点为 31.5 GHz,透射率为-0.63 dB,测试结果表明,在飞行兵器复合制导窗口上,此红外透明频率选择表面有着广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 T. K. Wu. Frequency Selective Surface and Grid Array[M]. New York: John Wiley & Sons, 1995
- 2 B. A. Munk. Frequency Selective Surface: Theory and Design [M]. New York: John Wiley & Sons, 2000
- 3 Lu Jun, Zhang Jing, Sun Lianchun. Experimental comparison of the characteristics of Y element and Y loop element [J]. *Opt. Precision Engng.*, 2005, **13**(2): 219~224
卢俊,张靓,孙连春. Y形和Y环形单元特性的试验对比研究[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(2): 219~224
- 4 R. Mittra, C. H. Chan, T. Cwik. Techniques for analyzing frequency selective surfaces-a review [J]. *Proc. IEEE*, 1988, **76**(12): 1593~1615
- 5 T. Takeno, H. Shiota, T. Sugawara *et al.*. Highly adherent tungsten-containing diamond-like carbon (W-DLC) coating on a NiTi shape memory alloy under 10% tensile strain [J]. *Diamond & Related Materials*, 2009, **18**(2): 403~406
- 6 T. Takeno, H. Miki, T. Takagi *et al.*. Electrically conductive properties of tungsten containing diamond-like carbon films [J]. *Diamond & Related Materials*, 2006, **15**(11): 1902~1905
- 7 T. Takeno, Y. Hoshi, H. Miki *et al.*. Activation energy in metal-containing DLC films with various metals of various concentrations [J]. *Diamond & Related Materials*, 2008, **17**(3): 1669~1773
- 8 Zhu Huaxin, Gao Jinsong, Wang Xiaoyi *et al.*. Design of homogeneous thin film combining with Fourier-transform synthesis method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2436~2440
朱华新,高劲松,王笑夷等. 结合傅里叶变换合成法设计均匀薄膜[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2436~2440
- 9 Chunrong Xue, Kui Yi, Chaoyang Wei *et al.*. Optical constants of DUV/UV fluoride thin film [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(5): 449~451
- 10 Zhao Feifei, Zhao Baosheng, Zhang Xinghua *et al.*. Properties of germanium thin film and its application in photon counting imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3236~3240
赵菲菲,赵宝升,张兴华等. Ge薄膜特性及其在光子计数成像系统中的应用[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3236~3240
- 11 Zhou Ming, Zhao Yuanan, Li Dawei *et al.*. Laser damage of optical film with the combined irradiation of 1064 nm and 532 nm pulse [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 3050~3054
周明,赵元安,李大伟等. 1064 nm和532 nm激光共同辐照薄膜的损伤[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 3050~3054
- 12 R. Urich. Far-infrared properties of metallic mesh and its complementary structure [J]. *Infrared Phys.*, 1967, **7**(1): 37~57
- 13 L. B. Whitbourn, R. C. Compton. Equivalent-circuit formulas for metal grid reflectors at a dielectric boundary [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(2): 217~220
- 14 Feng Xiaoguo, Fang Liang, Sun Lianchun. Characteristic dimension design and fabrication of metallic mesh [J]. *Opt. Precision Engng.*, 2005, **13**(1): 59~64
冯晓国,方梁,孙连春. 金属网栅结构参数设计与制作[J]. *光学精密工程*, 2005, **13**(1): 59~64
- 15 Hou Xinyu, Wan Wei, Tong Mingan *et al.*. Analysis on the loss and bandwidth properties of FSS with multilayer dielectric substrates [J]. *J. Microwave*, 1999, **15**(4): 366~370
侯新宇,万伟,佟明安等. 带有多层介质衬底FSS的损耗和带宽特性分析[J]. *微波学报*, 1999, **15**(4): 366~370
- 16 Li Xiaoqiu, Gao Jinsong, Zhao Jingli *et al.*. A novel element of frequency selective surface for radome [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(6): 3803~3806
李晓秋,高劲松,赵晶丽等. 一种适用于雷达罩的频率选择表面新单元研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(6): 3803~3806