

文章编号 1004-924X(2012)01-0080-08

高透光率感性网栅膜的电磁屏蔽

刘小涵^{1,2}, 赵晶丽¹, 冯晓国^{1*}, 申振峰¹, 高劲松¹, 张红胜¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 在确保制作感性网栅膜后光学窗红外透射率下降小于5%的前提下, 研究了影响感性网栅膜电磁屏蔽特性的主要因素。归纳了感性网栅膜红外透射率公式, 运用含阻抗边界条件的谱域 Galerkin 法推导了周期结构金属网栅的电磁场积分方程, 用周期矩量法计算出网栅的反射系数及透射系数, 进而求出其电磁屏蔽效能; 计算并分析了采用不同线宽、周期、衬底材料、衬底厚度时透明导电光窗(金属网栅膜)的电磁屏蔽效能。最后, 采用激光直写、真空镀膜等工艺在 ZnS 基底上制作了周期为 $360\ \mu\text{m} \times 360\ \mu\text{m}$ 、线宽为 $12\ \mu\text{m}$ 、方块电阻分别为 $13\ \Omega$ 、 $25\ \Omega$ 的样片, 采用自由空间法测试了 2~18 GHz 频段的电磁屏蔽效能。测试与分析结果表明: 当感性网栅膜在 $8\sim 10\ \mu\text{m}$ 波段引起的平均透射率下降小于 2% 的情况下, 电磁屏蔽效能平均达到了 20 dB 以上。结果显示网栅的光电特性是矛盾的, 线宽与周期越小电磁屏蔽效果越好, 同时应尽量降低网栅的表面电阻。

关键词: 高透射率网栅膜; 感性网栅膜; 电磁屏蔽; 矩量法

中图分类号: O484.43; TN972 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122001.0080

Electromagnetic shielding of highly transparent inductive mesh

LIU Xiao-han^{1,2}, ZHAO Jing-li¹, FENG Xiao-guo^{1*}, SHEN Zhen-feng¹, GAO Jin-song¹, ZHANG Hong-sheng¹

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

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: fxg74@163.com

Abstract: This paper studies the influencing factors on the electromagnetic shielding of an inductive metallic mesh when the infrared transmission reduction of optical window caused by the mesh is less than 5%. The infrared transmission formulas of the inductive mesh are summarized, then, the electromagnetic field integral equation for the periodic structure of metallic mesh is built based on Galerkin's method in the spectral domain. The transmission and reflection coefficients are derived by the Moment of Method(MOM). After that, the electromagnetic shield effectiveness of the mesh is calcu-

收稿日期: 2011-11-08; 修订日期: 2011-12-15.

基金项目: 国防科技预研基金资助项目(No. 10.4.2.ZK1001)

lated and the effects of different line widths, periods, substrate materials, substrate thicknesses on the electromagnetic shielding of the transparent conductive optical window (with metallic mesh) are calculated and analyzed. Finally, metallic mesh samples with a line width of $12 \mu\text{m}$, a period of $360 \mu\text{m} \times 360 \mu\text{m}$ and the surface resistance of $13 \Omega, 25 \Omega$ are fabricated on a ZnS substrate by the laser direct writing figure, vacuum coating, *et al.*. The electromagnetic shield effectiveness from 2 GHz to 18 GHz is tested by a free space method. Results indicate that the average electromagnetic shield effectiveness is more than 20 dB when the infrared transmission reduction caused by the metallic mesh is less than 2% in $8 - 10 \mu\text{m}$. Experiments indicate that the optical and electrical performance of metallic mesh film is inconsistent. The main solution method is to select a thinner line width and smaller period and to reduce the surface resistance value of the mesh as low as possible at the same time.

Key words: highly transparent mesh; inductive mesh; electromagnetic shielding; Moment of Method (MOM)

1 引 言

网栅膜作为一种非连续的透明导电膜,可以通过改变结构、材料参数来实现特定的滤波功能。目前,主要有两种结构可以实现滤波功能:一种是网格连通结构,对电磁波的作用等效于一个简单的电感电容并联振荡电路,其电纳是电感性的,称为电感性网栅(因目前工艺等条件限制,多采用金属材料,也称为金属网栅膜)。另一种是它的互补结构,称为电容性网栅。由于金属网栅膜的周期远小于微波波长,具有较高的反射率;而对于红外或可见波段,周期远大于入射波长,网栅线宽达到了微米级,可以得到较高的透射率,因此高透光率金属网栅不仅具有对微波的高反射特性,还有对红外信号的高透射特性。由于金属网栅膜具有透明导电性,其应用范围很广,如毫米波和亚毫米波天线的反射器^[1]、光学耦合器^[2]、准光子系统分束器^[3]等;另外,金属网栅在通电后还具有除霜、除雾的性能。近年来,其在红外波段的应用也有了很大的进展,如红外激光泵浦中的模选择器^[4]、红外滤波器^[5]等。但它最重要的是在电磁屏蔽方面的应用,如飞机座舱、整流罩、观察窗等为了实现特定的观测和探测功能的高透明性光学窗,以及处于复杂电磁环境中的精密光电仪器的光学窗。

在国外,平面金属网栅理论研究已有较大发展, Ulrich 在 1967 年首先提出了二维金属网栅的等效电路模型^[6]; Whitbourn^[7], Klein^[8] 等深化了 Ulrich 的理论; Kohin 在前人工作的基础

上,提出了等效膜法^[9],使等效电路法的应用由电磁波垂直入射拓展到了任意方向入射。国内这方面的研究刚起步,主要是利用等效电路法来研究单层平面金属网栅膜的电磁屏蔽特性^[10-12]。

本文取金属网栅膜周期阵列单元构建积分方程,以谱域 Galerkin 法为基本分析方法,应用矩量法求出金属网栅的透射系数和反射系数,进而求出其电磁屏蔽效能。由于金属网栅存在表面电阻,因此对理想导体的谱域方程进行了修正,并在此基础上开展了理论分析与实验研究。

2 金属网栅的理论分析

2.1 金属网栅红外透过率计算

在光学频率范围内,网格起衍射光栅的作用,对入射光产生多级衍射。Kohin 研究表明,金属网栅的零级透光率为:

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

上式说明,线宽 $2a$ 越小,周期 g 越大,红外透射率越好,由于网栅的光电特性是相互矛盾的,所以在周期(屏蔽波长决定)一定情况下,线宽越小越好。

McPhedran 等人的精确计算显示,对于无限导电网栅格,透射曲线陡度随厚度增加而增加,但变化很小^[13],因此可以不考虑网栅厚度对透射率的影响。

2.2 微波屏蔽理论计算

金属网栅属于周期结构,取其中一个周期单元如图 1 所示,由于金属网栅存在表面电阻 Z_s ,

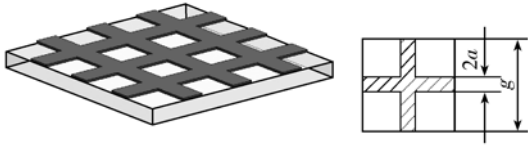


图 1 透明基底感性网栅膜示意图及周期单元

Fig. 1 Inductive mesh with transparent substrate and periodic unit

在金属栅格应用电磁边界条件时还要考虑表面电阻的作用,即: $E^s + E^i - Z_s J = 0$ 。对周期结构不同区域场进行 Floquet 模展开,通过满足单元结构的电磁场连续边界条件形成电场积分方程,矩阵形式为:

$$-\begin{bmatrix} E_x^{\text{inc}} \\ E_y^{\text{inc}} \end{bmatrix} = \frac{-Z_s j \omega \mu_0}{k_0^2} \begin{bmatrix} k_0^2 + \frac{\partial^2}{\partial x^2} & \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} & k_0^2 + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中, $A_x = G \cdot J_x$, $A_y = G \cdot J_y$, $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$, G 为自由空间 Green 函数,为金属栅格表面感应电流,上标对应入射场,对式(2)进行 Fourier 变换得到:

$$-\begin{bmatrix} E_x^{\text{inc}}(x, y) \\ E_y^{\text{inc}}(x, y) \end{bmatrix} + Z_s \begin{bmatrix} J_x(\alpha_{nm}, \beta_{nm}) \\ J_y(\alpha_{nm}, \beta_{nm}) \end{bmatrix} = \frac{2\pi}{j\omega\epsilon_0 ab} \sum_{-\infty}^{\infty} \sum_{-\infty}^{\infty} \begin{bmatrix} k_0^2 - \alpha_{nm}^2 & -\alpha_{nm}\beta_{nm} \\ -\alpha_{nm}\beta_{nm} & k_0^2 - \beta_{nm}^2 \end{bmatrix} \times G(\alpha_{nm}, \beta_{nm}) \begin{bmatrix} J_x(\alpha_{nm}, \beta_{nm}) \\ J_y(\alpha_{nm}, \beta_{nm}) \end{bmatrix} \times e^{j\alpha_{nm}x} e^{j\beta_{nm}y}. \quad (3)$$

式中 $G(\alpha_{nm}, \beta_{nm})$ 为谱域格林函数。由于金属网栅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,而是一些离散的值,其表达式为:

$$\begin{cases} \alpha_{nm} = \frac{2\pi m}{g_x} + k_x \\ \beta_{nm} = \frac{2\pi n}{g_y} + k_y \end{cases}. \quad (4)$$

g 为网栅周期,一般制作金属网栅时,两方向的周期相同,属于正方形结构,即 $g_x = g_y$, m, n 为 Floquet 模谐因子, $m, n = -\infty, \dots, -1, 0, 1, \dots + \infty$,将表面电流用一组基函数展开,用周期矩量法对式(3)求解,根据所得矩阵方程求出基函数的系数,进而可推出金属网栅的反射系数及透射系数,最后,根据 $SE = 20 \times \log(T)$ 算出微波段电磁屏蔽效能。

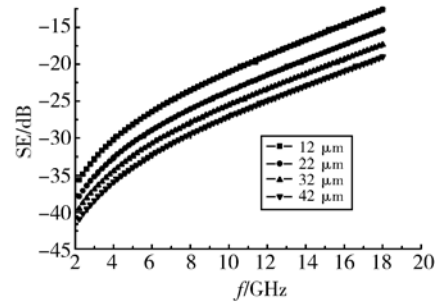
2.3 理论仿真

依据上述理论编制软件,利用谱域法进行金属网栅电磁屏蔽效能仿真计算。计算条件为:假设周期无限大,金属网栅为理想薄导体,利用 Floquet 只计算一个周期单元,采用周期矩量法进行数值计算分析。

2.3.1 线宽对电磁屏蔽效能的影响

取衬底厚度为 1 mm,则衬底材料的介电常数为 $\epsilon_r = 6.5$, $\tan \delta = 0.002$,周期为 $360 \mu\text{m} \times 360 \mu\text{m}$,线宽分别取 12, 22, 32, 42 μm 时进行电磁屏蔽效能计算,得到的拟合曲线如图 2 所示。

从图 2 可以看出:当周期一定时,随着线宽 $2a$ 的增加,屏蔽效能上升,并且随着频率的增加,线宽的影响有增大的趋势。根据公式(1)可知网栅的红外透射率却在下降,因此金属网栅的光电特性是相互矛盾的。

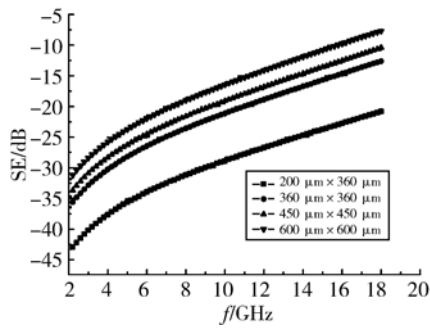
图 2 周期 $360 \mu\text{m}$,电磁屏蔽效能与线宽的关系Fig. 2 SE attenuation vs. line width with period of $360 \mu\text{m}$

2.3.2 周期对电磁屏蔽效能的影响

取衬底厚度为 1 mm,则衬底材料的介电常数为 $\epsilon_r = 6.5$, $\tan \delta = 0.002$,线宽取 12 μm 时,周期分别为 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$, $360 \mu\text{m} \times 360 \mu\text{m}$, $450 \mu\text{m} \times 450 \mu\text{m}$, $600 \mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$ 时电磁屏蔽效能如图 3 所示。

从图 3 可以看出:随着周期的增大,电磁屏蔽效能下降,并且周期增大到一定值时,对屏蔽效能的影响越来越小,主要原因是当波长越来越接近周期尺寸时,易产生谐振。根据式(1)得出当周期增加时,提高了金属网栅的红外透射率。

综上所述,金属网栅膜的光电特性是相互矛盾的,不能孤立分析,需要综合分析线宽、周期对电磁屏蔽效能的影响,才能在确保高透光率的同时

图 3 线宽 $12 \mu\text{m}$, 电磁屏蔽效能与周期的关系Fig. 3 SE attenuation vs. period with line width of $12 \mu\text{m}$

时达到强电磁屏蔽特性。

2.3.3 同占空比金属网栅的屏蔽效能对比

根据式(1)算出独立网栅的红外透射率,线宽与周期的比值为 $1:30$ 时,透光率为 93.4% 。在满足高透射率不变的前提下,达到强电磁屏蔽性能,金属网栅的周期与线宽对电磁屏蔽效率的影响结果如图 4 所示。

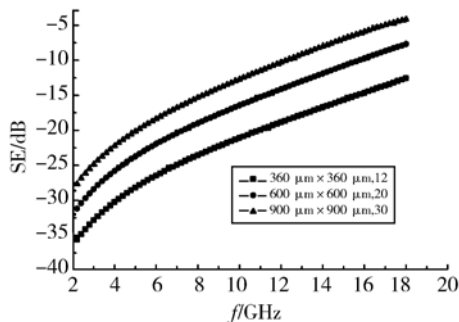


图 4 同占空比金属网栅屏蔽效能对比曲线

Fig. 4 Comparison of shield effectiveness with same duty ratio

从图 4 可以看到,相同占空比也就是说具有相同的透射率时,最下面的曲线(周期为 $360 \mu\text{m} \times 360 \mu\text{m}$,线宽为 $12 \mu\text{m}$)的电磁屏蔽效果最好,也就是说满足高透射率的情况下,金属网栅的周期与线宽越小越好。

从图 2、图 3、图 4 中曲线的变化趋势来看,屏蔽性能均随着频率的增加而下降。主要是因为金属网栅的电阻和电抗随着频率的增大而增大,所以反射能力在减弱。另外,每个网栅可看作一段小波导管,因此金属网栅存在一个截止频率,在向截止频率靠拢的过程中,电磁波通过金属网栅的数量在增加,使得屏蔽性能降低^[14]。

2.3.4 衬底材料对电磁屏蔽效能的影响

对于相同结构参数(周期、线宽相同)的金属网栅,衬底材料的介电常数分别为 $\epsilon_r = 6.5, \tan \delta = 0.002$; $\epsilon_r = 5.1, \tan \delta = 0.001$; $\epsilon_r = 2.3, \tan \delta = 0.001$ 时,电磁屏蔽效能曲线如图 5 所示。

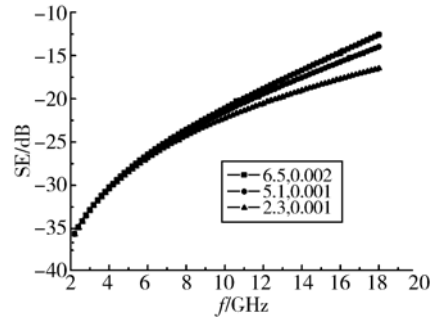


图 5 衬底材料对屏蔽效能的影响

Fig. 5 SE attenuation with different substrate materials

从图 5 可以看出:衬底材料对电磁屏蔽的影响,随着频率的升高越来越大。主要因为低频波段波长相对于周期比值较大,网栅等效为理想导体,透射率非常小,所以电磁屏蔽效果好;高频时随着介电常数的增大,其屏蔽效能下降,因此在低频时可以不考虑衬底材料的影响,只考虑其对透射率的影响。

2.3.5 衬底厚度对金属网栅屏蔽效能的影响

相同结构网栅参数(周期 $360 \mu\text{m} \times 360 \mu\text{m}$,线宽为 $12 \mu\text{m}$)下,衬底厚度分别为 $1, 3, 5, 7 \text{ mm}$ 时, $2 \sim 18 \text{ GHz}$ 波段的电磁屏蔽效率如图 6 所示。

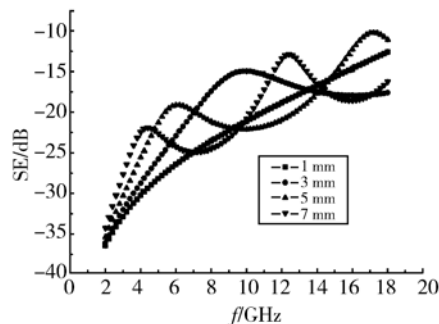


图 6 衬底厚度对屏蔽效能的影响

Fig. 6 SE attenuation with different substrate thicknesses

从图 6 可以看出:随着衬底厚度增加,曲线的波动性增加。根据薄膜反射理论,频率在 $2 \sim$

18 GHz, 曲线波动, 衬底为 3 mm 厚时在 10 GHz 出现极值情况; 5 mm 厚时在 6.2, 17.2 GHz 出现极值情况; 7 mm 时出现极值的次数大于 2 次, 即: 随着厚度增加波动次数增加, 在低频段屏蔽效能随着厚度增加而减小。

3 实验与测试

3.1 金属网栅的制作

为了验证理论仿真的正确性, 选取在微波段介电常数 $\epsilon_r \approx 6.5$, $\tan \delta \approx 0.002$, 厚 1 mm 的两块 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的平板 ZnS。先在 ZnS 样件上旋涂正性光刻胶, 然后采用激光直写技术进行刻划, 用显影剂显影后利用电子束蒸镀铬、铜, 用丙酮去胶, 制成周期为 $360 \mu\text{m} \times 360 \mu\text{m}$, 线宽为 $12 \mu\text{m}$ 的金属网栅膜, 方块电阻分别为 13, 25 Ω 。其在显微镜下局部图案如图 7 所示(由于实验条件限制, 不能够制作各种结构参数网栅逐一验证, 只能制作具有代表性的样件, 验证理论分析的有效性)。

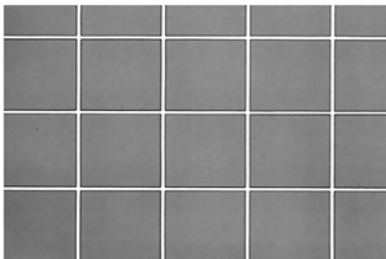


图 7 ZnS 衬底上的金属网栅膜的显微镜照片 (30 \times)

Fig. 7 Micrograph of metallic mesh on a ZnS substrate (30 \times)

3.2 电磁屏蔽效能测试

3.2.1 测试原理

采用 DNA-XN5244A 矢量网络分析仪, 自由空间法测试示意图如图 8 所示。测试频段为 2~18 GHz, 测量样件平面波垂直入射时的电磁屏蔽效能。

3.2.2 电磁屏蔽效能测试结果

采用自由空间法对 ZnS 基底上制作的周期为 $360 \mu\text{m} \times 360 \mu\text{m}$, 线宽为 $12 \mu\text{m}$ 的金属网栅(方块电阻为 13, 25 Ω 的样件)分别进行微波段电

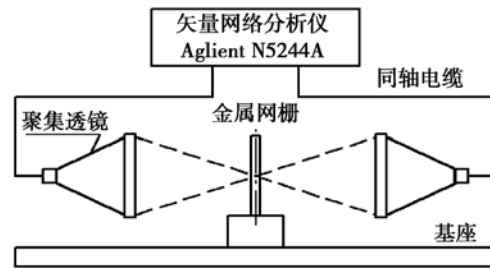


图 8 自由空间法测试示意图

Fig. 8 Testing system of free space method

磁屏蔽效能测试, 测试结果如图 9、图 10 所示。

从图 9 可以看出: (1) 理论值与测试值有一定的误差, 主要是没有考虑网栅电阻的影响, 根据制作网栅的面电阻对理想谱域方程修正后得到曲线与测试值基本吻合, 说明经过修正后的谱域公式是正确的, 与实际测试相符, 可以用于金属网栅的

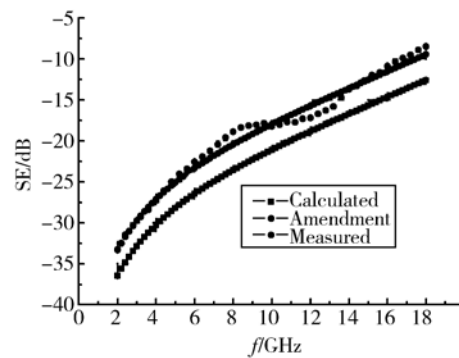


图 9 网栅的理论值、测试值与修正值的关系曲线

Fig. 9 Curves of SE attenuation of calculation, amendment and measurement

分析设计。(2) 测试值与理论值有偏差, 但变化趋势是一致的。其原因主要有: (a) 理论误差: 在求解式(3)时, 感应电流基函数的选取形式及个数均会产生理论误差; (b) 工艺误差: 涂胶厚度不均匀, 激光直写曝光不同导致线条宽度、厚度不均匀, 各处表面电阻不同。而谱域法是假设周期无限大, 应用 Floquet 模时只计算一个周期单元, 与实际金属网栅存在差异; (c) 测量误差: 由于是在自由空间测试, 而非屏蔽暗室, 在发射与接收电磁波时会受到其它反射的电磁波干扰, 同时发射天线的波束也只能近似平面波, 存在一定的测试误差。

根据 Haacke 对透明导电膜品质因数的分析得出, 在同样的透射率下, 金属网栅的面电阻越小

越好^[15]。因此,网栅厚度对光电特性的影响主要体现在面电阻上。对于结构参数相同的金属网栅,面电阻越小,对微波的屏蔽效果越好。为了研究网栅电阻对电磁屏蔽的影响,试验制作了相同结构参数($360\ \mu\text{m}\times 360\ \mu\text{m}$,线宽为 $12\ \mu\text{m}$),方块电阻不同($13, 25\ \Omega$)的金属网栅,采用自由空间法测试电磁屏蔽效能,结果如图 10 所示。

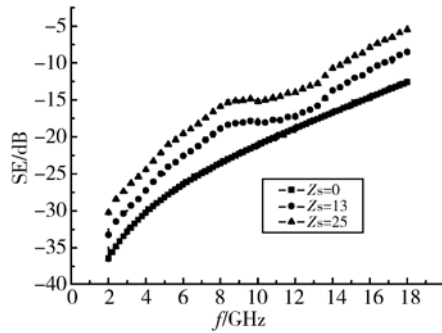


图 10 不同面电阻金属网栅电磁屏蔽效能对比曲线
Fig. 10 Comparison of SE attenuation of mesh with different surface resistances

从图 10 可以看出:面电阻越小屏蔽效果越好。但进一步实验研究表明,随着金属网栅膜的增厚,网栅面电阻并非线性减少,所以没有必要无限制地增厚。主要原因有:(1)网栅太厚,与基底的结合力不牢固易脱落;(2)在制作金属网栅膜时,由于线宽非常细(微米级)及微观金属沉积缺陷等造成断线如图 11 所示,也会导致面电阻增大(金属网栅厚度为 $0.3\ \mu\text{m}$ 时,电阻达到了 $50\ \Omega$)。

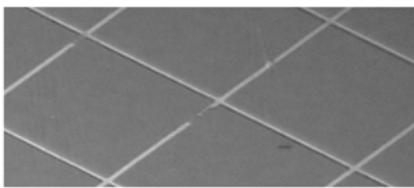


图 11 金属网栅膜的显微镜照片($100\times$)
Fig. 11 Micrograph of metallic mesh film($100\times$)

上述实验研究表明:在减小线宽的同时,进一步提高金属网栅的加工质量,使其没有断线网格连续,可明显减小电阻(一般为 $8\ \Omega$ 左右),但由于受到目前工艺条件的限制,网栅表面电阻的进一步降低还比较困难。

3.2.3 金属网栅红外透过率测试

采用 Spectrum GX 傅里叶变换红外光谱仪

测试了 ZnS 在网栅制作前后,在长波红外 $8\sim 10\ \mu\text{m}$ 样片的透射率,如图 12 所示。

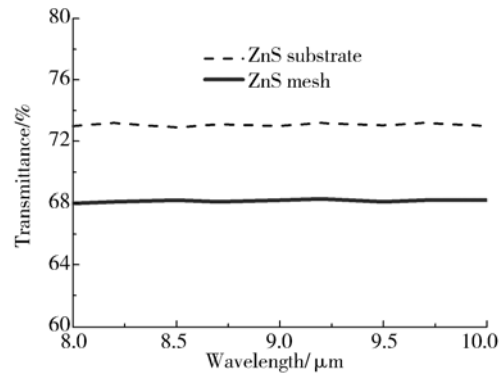


图 12 ZnS 和 ZnS 基底金属网栅的透射率
Fig. 12 Transmittance curves of ZnS substrate and ZnS mesh

从图 12 可以看出,ZnS 的透过率平均约为 73%,由于 ZnS 基底在长波红外的色散比较小,因此透过率曲线比较平坦。以 ZnS 为基底的金属网栅透过率为 68.1%,二者相差 4.9%。根据公式(1)可知不透明材料制作网栅引起光学透过率下降约为 6.7%(理论值),实际测试结果与理论相差小于 2%。

4 结 论

本文从红外透过率公式出发,对影响高通光率感性网栅膜电磁屏蔽效能的主要因素进行了计算与分析;运用含阻抗边界条件的谱域 Galerkin 法,推导出透明导电感性网栅膜的电场积分方程,用矩量法求出反射系数及透射系数,进而求出电磁屏蔽效能。依据谱域理论编制软件进行仿真计算,分析了不同线宽、周期、同占空比、衬底材料及衬底厚度对电磁屏蔽效能的影响。根据理论分析得出:在满足高透射率的前提下,金属网栅膜的周期与线宽越小,电磁屏蔽效果越好。为了验证理论分析的有效性,制作了 ZnS 基底的相同结构参数(电阻不同)的金属网栅膜,通过采用自由空间法测试,理论仿真与实际测试基本相符。通过实验研究对比得出:金属网栅的电阻越小,其屏蔽效能效果越好。并用傅里叶变换光谱仪测试了 ZnS 基底与制作网栅的红外透射率,得出金属网栅膜对透过率的下降影响小于 2%的结论。进一步提

高金属网栅加工质量及红外镀膜技术可以更好地提高其微波屏蔽效能及红外透射率。这为今后红

外材料上制作高透光率、强电磁屏蔽效率的金属网栅膜奠定了技术基础。

参考文献:

- [1] SAULEAU R. Beam focusing using 60 GHz fabry-perot resonators with uniform and non-uniform metal grids [J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(4): 341-342.
- [2] BAE J, CHIAO D B. Metal mesh couplers using evanescent waves at millimeter and sub millimeter wavelengths microwave symposium digest [J]. *IEEE*, 1995(2): 597-600.
- [3] DICKIE R. Multilayer mesh filter for quasi-optical beamsplitting applications[J]. *IEEE*, 1995(2): 597-600.
- [4] SCHUBERT M R. Diffraction limited cw optically pumped lasers[J]. *IEEE*, 1997, 13(6): 455-459.
- [5] DRUPP R P. Multiband planar metallo-dielectric photonic crystals using frequency selective surface techniques[J]. *IEEE*, 2004(2): 1907-1910.
- [6] URICH R. Far-infrared properties of metallic mesh and its complementary structure [J]. *Infrared Physics*, 1967(7): 37-57.
- [7] WHITBOURN L B, COMPTON R C. Equivalent-circuit formulas for metal grid reflectors at a dielectric boundary[J]. *Appl. Opt.*, 1985, 24(2): 217-220.
- [8] KLEIN R C. Microwave shielding effectiveness of EC-coated dielectric slabs[J]. *IEEE*, 1990, 38(3): 321-324.
- [9] KOHIN M, WEIN S J, TRAYLOR J D, *et al.*. Analysis and design of transparent conductive coatings and filters[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1993, 32(5): 911-925.
- [10] 冯晓国, 方梁, 孙连春, 等. 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. FENG X G, FANG L, SUN L CH, *et al.*. Characteristic dimension design and fabrication of metallic mesh[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1): 59-64. (in Chinese)
- [11] 刘永猛, 谭久彬, 刘俭, 等. 高透光率金属网栅微波/红外二色波组合器[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4): 786-791. LIU Y M, TAN J B, LIU J, *et al.*. Microwave/infrared dichroic beam combiner using high transparent metallic mesh[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 786-791. (in Chinese)
- [12] 陆振刚, 谭久彬, 金鹏, 等. 高通光率金属网栅屏蔽效率的等效折射率模型[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(6): 949-954. LU ZH G, TAN J B, JIN P, *et al.*. Equivalent refractive index model on shielding effectiveness analysis of high transparency metallic mesh[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 949-954. (in Chinese)
- [13] MCPHEDRAN R C. *Electromagnetic Theory of Gratings*[M]. Topics in Current Physics, 1980.
- [14] 赖祖武. 电磁干扰防护与电磁兼容[M]. 北京: 原子能出版社, 1993. LAI Z W. *Shielding Electromagnetic Interference and Electromagnetic Compatibility*[M]. Beijing: Atomic energy Press, 1993. (in Chinese)
- [15] HAACKE G. New figure of merit for transparent conductors [J]. *Journal of Applied Physics*, 1976, 47(9): 4086-4089.

作者简介:



刘小涵(1978—),女,吉林长春人,博士研究生,主要从事雷达隐身薄膜材料的研究。E-mail: liuxiaohancimp@sohu.com



赵晶丽(1962—),女,吉林长春人,高级实验师,主要从事光刻复制工艺研究。E-mail: fxg74@163.com



申振峰(1977—),男,吉林吉林人,博士,助理研究员,2000年于东北师范大学获得学士学位,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学薄膜理论和制备以及 SiC 表面改性方面的研究。E-mail: zf_shen@163.com.cn



高劲松(1968—),男,吉林白城人,博士,研究员,博士生导师,1989年于浙江大学获得学士学位,2005年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学薄膜前沿技术的研究。E-mail: gaojs@ciomp.ac.cn



张红胜(1961—),男,吉林长春人,实验师,主要从事光学码盘刻划检测。E-mail: xnxlzhzy999@126.com



冯晓国(1974—),男,吉林长春人,博士,副研究员,1998年于吉林工业大学获得工学学士学位,2006年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得理学博士学位,主要从事光学精密仪器设计和雷达隐身薄膜材料的研究。E-mail: fxg74@163.com

(本栏目编辑:严寒)

●下期预告

半导体激光器应用于鼓膜造孔术的光学系统设计

郝明明^{1,2},朱洪波^{1,2},王彪¹,曹军胜¹,
彭航宇^{1,2},付喜宏¹,单肖楠¹,郜峰利³,王立军¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激发态物理实验室,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院,北京 100039;3. 吉林大学 电子科学与工程学院,吉林 长春 130012)

为了将半导体激光直接应用于鼓膜造孔术,设计并研制了一套可在视频监控和红光指示下实施激光鼓膜造孔术的光学系统。首先,利用光束整形和波长合束技术将半导体激光单管出射的 650 nm 激光和半导体激光阵列出射的 810 nm 激光耦合到芯径为 200 μm , NA=0.22 的光纤中;然后,将光纤出射的双波长激光利用消色差透镜准直,再利用另一个消色差透镜聚焦到耳鼓膜上,该聚焦镜通过机械部件可沿光轴方向移动,从而调节鼓膜上光斑的大小;成像部分则直接使用商用视频眼镜;热反射镜可使激光和成像光成为同轴光束。根据测量结果可知:该系统出光孔处激光功率可在 0~13.3 W 连续调节;造孔直径可在 1~3 mm 连续可调;在显示器上,可以根据红色指示光斑确定造孔位置。本系统可以缩短手术时间,从而减少并发症;儿童患者无需全身麻醉;还具有整机体积小、重量轻、电光转换效率高等优点。