

〈材料与器件〉

用于红外窗电磁屏蔽的电感性网栅薄膜

申振峰^{1,2}, 冯晓国¹, 高劲松¹, 赵晶丽¹, 王笑夷¹

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2.中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 电感性网栅薄膜可以实现在高效透过红外波的同时高效屏蔽微波的滤波特性, 在红外窗口电磁屏蔽领域有广泛应用前景。平面基底上电感性网栅薄膜的理论探索、实验研究和工程应用已相当成熟, 曲面基底上电感性网栅薄膜的理论和工艺还极少见公开文献报道, 中科院长春光机所经长期探索研究提出了采用以激光直写技术为核心的曲面感性网栅薄膜制作工艺方法。从理论、工艺、测试等多方面对用于红外窗口电磁屏蔽的电感性网栅薄膜进行了介绍和分析。

关键词: 电磁屏蔽; 透明导电膜; 电感性网栅; 红外

中图分类号: TN972; O484.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2008)08-0468-04

The Inducting Mesh Coating Used for Electromagnetic Shielding of the Infrared Windows

SHEN Zhen-feng^{1,2}, FENG Xiao-guo¹, GAO Jin-song¹, ZHAO Jing-li¹, WANG Xiao-yi¹

(1.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: The inducting mesh can be used to transmit IR wave and shield microwave at high efficiency simultaneously. It has extensive prospect in the field of electromagnetic shielding of the infrared windows. The theory investigation, experiment research and engineering application of the inducting mesh on plane substrate are fairly mature and that there are few reports about the theories and technics of the inducting mesh on curved surface. The rearch team of CIOMP has carried out the technics to prepare for the inducting mesh on curved surface by means of Laser direct writing. This article recommended and anlyzed the inducting mesh used for electromagnetic shielding of the infrared windows on the aspects of theory, technics and testing.

Key Words: electromagnetic shielding; transparent conducting film; inductance mesh; infrared

引言

作为一种非连续透明导电薄膜, 电感性网栅薄膜在红外窗口电磁屏蔽方面有广泛应用(如图1)^[1]。电感性网栅薄膜对电磁波的作用相当于一个短波通滤波器(如图2), 并可通过改变周期、线宽、材料等参数来实现特定的滤波范围^[2]。在可见光频段, 一种铟锡氧化物薄膜(ITO)的滤波特性要优于电感性网栅薄膜^[3]; 而在微波频段, 概念更为广泛的频率选择表面(FSS)则更具优势^[4]; 但在红外窗口的电磁屏蔽方面, 电感性网栅薄膜现仍具有其它材料或结构所

不能比拟的优势^[5]。

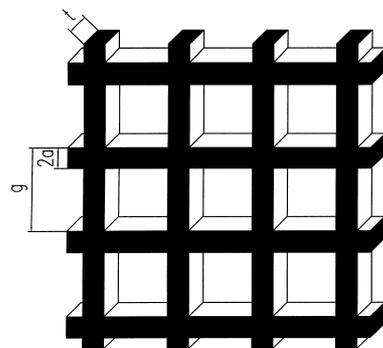


图1 电感性金属网栅结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the inductance mesh

收稿日期: 2008-06-13

作者简介: 申振峰(1977-), 男, 吉林省吉林市人, 博士研究生, 主要从事光学薄膜和SiC表面改性的研究。

基金项目: 中国科学院优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项资金支持项目(O76231J070)

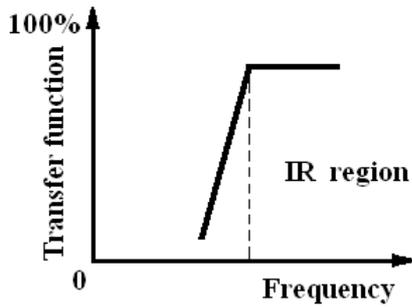


图2 电感性金属网栅滤波特性示意图

Fig.2 Filtering performance of the inductance mesh

1 电感性网栅薄膜的理论发展

在美国、德国、俄罗斯等一些科技发达国家，平面网栅理论及实验研究已相当成熟，并已获得工程应用。

1967年，Ulrich等在Marcuvitz提出的条状网栅的“等效电路模型”的基础上，给出自由空间垂直入射条件下，当 $t \ll 2a$ ， $2a \ll g$ （ $2a$ 为网栅线宽、 g 为网栅格周期， t 为网栅厚度，如图1）时，电感性网栅（无介质基底）在雷达波段的透射率近似等于^[6]：

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

如以分贝为单位，定义屏蔽效率为：

$$S = -10 \ln T \quad (2)$$

网栅对红外透过的影响则可简单地由遮拦比（开口总面积的份额）给出：

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

1976年，Haacke对透明导电膜品质因数的分析得出，在同样的透过率下，材料的面电阻越小越好^[7]。因此，作为一种非连续透明导电膜，网栅厚度对光电特性的影响主要体现在面电阻上。对于同样结构参数，面电阻越小，对雷达波的屏蔽效果越好。

1980年，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^[8]。

1985年，Whitbourn和Compton更是给出了介电材料基底上电感性网栅薄膜的透射公式，并对Ulrich的理论进行了修正^[9]。给出在无损耗（ $R=0$ ）、垂直入射情况下，电介质边界的电感性网栅薄膜透射率为：

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

式中： n_1 为入射媒质折射率， n_2 为出射媒质折射率。

1993年，M. Kohin在“透明导电膜及滤波器的分析与设计”的文章中，细致分析了红外透明导电电感性网栅薄膜（电感型）的光、电、射频特性与入射角及频率的关系，并发表了各种因素对网栅光电特性影响的实验曲线^[10]。

1994年，Noll在电磁屏蔽（EMI）窗口的论述中全面分析了上述结论^[11]。并给出网栅线宽、周期、厚度对其雷达屏蔽效率影响的实验曲线。从论文实验曲线可看出：网栅线宽对系统光电性能影响最大；在一定范围内，薄网栅的厚度变化对光电特性的影响与网栅周期、线宽变化对光电特性的影响比要小。

1997年，Donald Fisher研究了采用导磁材料与导电材料层叠来增强高入射角的微波辐射屏蔽问题^[12]。2002年，C. Mias等在频率选择表面的研究报告中，也采用“等效电路模型”对包括电感型及电容型电感性网栅薄膜作了细致的理论分析，并研究了不同材料（如金、铜、ITO）的电磁屏蔽特性^[3]。

此外，还有各种研究方法及手段被引入，并可给出更精确的分析结果^[13,14]。

在国内，电感性网栅薄膜的理论及实验研究则刚刚起步，与国外差距很大，目前有关这方面报道的文献还很少，并且有关文献多集中在理论研究方面。

从20世纪90年代开始，中科院长春光机所、西北工业大学、北京航空航天大学、哈尔滨工业大学等多家单位就先后开展了初步的理论及实验研究^[15-19]。然而，到目前为止，仅中科院长春光机所一家单位达到了工程应用的水平^[20,21]。

2 电感性网栅薄膜制作工艺选择

由于一般红外窗口以球面或曲面结构居多，且电感性网栅薄膜多应用于红外窗口电磁屏蔽等敏感军事领域，其制作工艺方法很少见公开文献报道，但根据其基本结构工艺要求和长春光机所的长期实验研究结果，也可对其制作工艺方法进行初步探讨。

理论研究表明：电感性网栅薄膜的光电特性（指透红外屏蔽微波）是矛盾的，减小网栅线宽是解决其光电特性矛盾的唯一途径。依目前国内外滤波指标要求，当网栅线宽达到微米级才可有效解决这个难题^[2]。

根据要求，传统的微细图形生成方法已不能满足这种需求^[22]，如丝网漏印法，在大面积平板工艺件上生成的图形线宽也只能达到200~300 μm，精度低；光化学刻蚀法，材料浪费多，环境污染严重，对基底表面物性破坏严重；刀具直刻法一般制作精度只能达到20~30 μm，且非常容易划伤基底。而先进的电子束刻蚀、电子束扫描、离子束扫描法虽然制作精度可

满足要求，但系统焦深太小，甚至小于曲面基底的自重变形量，不能在曲面上生成连续的微细图形线条。况且，丝网漏印法、刀具直刻法、光化学刻蚀法和电子束刻蚀法均需先制作一个高精度的掩模（也就是母版），母版制作存在同样的困难，且复制时掩模与工件曲面形吻合难、光源照度均匀性差，加之球面工件还有对准、光刻时斜面散射等问题。可以说，选择传统的工艺方法在一般的红外窗口上制作电感性网栅薄膜是极其困难的。

直写曝光法是直接采用激光（或电子束、X射线）焦斑进行刻划的一种光化学方法。与掩模投影曝光法相比，直写曝光法精度更高（缺点是生产率低，设备成本昂贵），它又分为激光直写、电子束直写、X射线直写法等。与激光直写比，电子束直写、X射线直写精度更高、技术难度更大，设备成本更为昂贵，不适合国情和实际需要。而激光直写技术与电子束直写和X射线直写比，精度略低（线宽一般大于1 μm），但设备成本很低，国内有成熟技术^[23,24]。因此，在制作小批量、高精度衍射光学元件、微光机电元件及电感性网栅薄膜方面，激光直写工艺是首选光刻工艺。

激光直写工艺又可分为激光化学气相沉积、激光诱导液相化学镀和激光诱导固相反应沉积等几种^[25]。其中，作为激光诱导固相反应沉积法之一的二元光学激光直写技术利用光刻胶的曝光显影特性，将曝光量的空间分布转化为胶表面的三维浮雕轮廓。其工艺过程除了用激光直写曝光取代掩模投影曝光之外，工艺流程与超大规模集成电路制作工艺基本上是相同的。

当然，除激光直写光刻工艺外，电感性网栅薄膜的制作工艺还将涉及涂胶、显影、镀膜、电镀等系列活动^[26-31]。

3 电感性网栅薄膜测试方法

电感性网栅薄膜的测试主要包括网栅结构参数（如线宽、周期、厚度）的测试及电感性网栅薄膜光

电特性的测试。

平面电感性网栅薄膜结构参数测试量程小（一般小于10 mm），原子力显微镜、扫描电镜等仪器均能满足测试要求。而曲面（或球面）基底一般量程（矢高）较大，测试精度与平面网栅相当，目前还很难找到能满足要求的理想测试仪器。

电感性网栅薄膜的测试的核心内容是测试其光电性能。电感性网栅薄膜的光性能，一般是指电感性网栅薄膜对系统红外成像的影响，即降低了系统通光量、调制传递函数（MTF）、信噪比（SNR），增加了杂散光。精确的测试方法是用调制传递函数测试仪测试系统调制传递函数，如图3所示^[32]，但其弊端是测试系统调制传递函数较为复杂。从电感性网栅薄膜造成的MTF降低的计算公式（如下）^[10]：

$$\Delta MTF = 2a / (g - 2a) \quad (2a \leq g/2) \quad (5)$$

可以看出，感性网栅膜造成的MTF降低与其透过率（公式3）之间有确定的函数关系。因此，可采用光谱仪先测试基底的红外透过率，再测试基底加电感性网栅薄膜的红外透过率，然后利用二者的对比来评价电感性网栅薄膜对红外成像的影响。

另外，由于一般光谱仪测试光路与参考光路很近且两光路平行，不适合精确测试大面积曲面电感性网栅薄膜光性能。对于大面积曲面电感性网栅薄膜，精确的测试方法必须采用积分球并构建相应测试光路来实现。

电感性网栅薄膜电磁屏蔽效率的测试，则主要是在相应雷达频段上测试电感性网栅薄膜对雷达散射截面（RCS）的减缩量来评估。

4 结语

电感型电感性网栅薄膜在红外窗口电磁屏蔽领域具有无可替代的优良性能，其在航空航天领域具有重大的应用开发价值，越来越受到各国学者特别是军事专家的重视并正在开展深入研究。

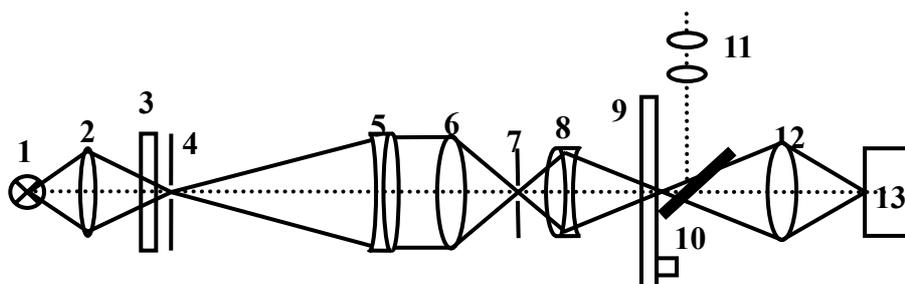


图3 传函仪光学系统基本原理图

Fig.3 The optical system schematic diagram of OTF test instrument

1为光源；2为聚光镜；3为可变滤光片；4为可变狭缝；5为平行光管物镜；6为被测物镜；7为空间频率狭缝；8为透镜；9为旋转光栅扫描器；10为半反半透镜；11为目视观察镜；12为聚光镜；13为光电接收器。

目前,平面电感性网栅薄膜材料特性、环境影响等理论研究尚未完全成熟,制作工艺也很少报道,测试技术仍在深入研究。曲面电感性网栅薄膜的理论研究、制作方法则还极少见公开文献报道。开展电感性网栅薄膜特别是曲面上制作电感性网栅薄膜的理论和制备工艺研究,不仅是制造相关实用元器件的需求,更是提高我国相关技术应用能力、提高我国国防现代化水平的必然要求,并在相关领域有着广阔的应用和发展前景。

同时,电感性网栅薄膜的制作涉及涂胶、光刻、显影、镀膜、电镀等一系列微电子工艺,并需要多种高技术专用设备,因此该领域的发展对于促进我国微电子装备的研制、工艺手段的提高也有相当的促进作用。

参考文献:

- [1] 高劲松, 孙连春, 郑宣明, 等. 红外透明导电金属网栅薄膜[J]. 光学技术, 2001, **27**(6): 558-559.
- [2] 冯晓国, 方梁, 孙连春. 金属网栅薄膜结构参数设计与制作[J]. 光学精密工程, 2005, **13**(1): 59-64.
- [3] C. Mias, C. Tsokonas, and C.Oswald. An investigation into the feasibility of designing frequency selective windows employing periodic structures[R]. Technical Reports AY3922, The Nottingham Trent University, Burton Street, Nottingham, NG1 4BU, U.K., 2002.
- [4] BEN A. MUNK. *Frequency selective surface: theory and design*[M]. A Wiley-Interscience Publication, 2000.
- [5] 孙连春. 雷达隐身滤波材料[J]. 隐身技术, 2007, (1): 44-46.
- [6] R Ulrich. Far-infrared properties of Metallic Mesh and its Complementary structure[A]. *Infrared Physics*, 1967, 7: 37-57.
- [7] G.Haacke. New figure of merit for transparent conductors[J]. *Journal of Applied Physics*, 1976, **47**(9): 4086-4089.
- [8] R.C.McPhedran, et al. *Electromagnetic Theory of Gratings* [M]. Topics in Current Physics, 1980, 22.
- [9] Lewis B.Whitbourn and Richard C.Compton. Equivalent- circuit formulas for metal grid reflectors at a dielectric boundary[J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(2): 217-220.
- [10] M. Kohin, et al. Analysis and design of transparent conductive coatings and filters[J]. *Optical Engineering*, 1993, **35**(5): 911-925.
- [11] Robert J.Noll. Some trade issues for EMI windows[C]//*SPIE*, 1994, **2286**: 403-410.
- [12] Donald Fisher. Design of conductive and magnetic thin films for microwave frequencies[C]//*SPIE*. 1997, **3133**: 132-139.
- [13] Chryssoula A. Kyriazidou et al. Novel Material with Narrow-Band Transparency Window in the Bulk. [C]//*IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION*, 2000, **48**(1): 107-116.
- [14] R. Sauleau, et al. Theoretical reflection coefficient of metal grid reflectors at a dielectric interface[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1999, **20**(2): 325-340.
- [15] 洪伟, 章文勋. 分析无限平面金属栅电磁散射问题的一种新方法[J]. 电子学报. 1992, **20**(3): 47-51.
- [16] 徐则川, 李义兵. 一维周期金属栅的电磁特性[J]. 华中理工大学学报, 1997, **25**(1): 60-62.
- [17] 高翔, 郭其良, 童兴德. 金属栅网的远红外光学特性[J]. 红外技术, 1994, **16**(1): 27-30.
- [18] 新宇, 王伟. 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.
- [19] 陆振刚, 谭久彬, 刘永猛等. 倾斜入射条件下衬底对金属网栅屏蔽特性的影响[J]. 光学精密工程, 2006, **14**(3): 360-367.
- [20] FENG Xiao-guo, ZHAO Jing-li. Key techniques of laser direct writing pattern on a spherical substrate. AOMATT CHINA [C]//*Proc. SPIE*, 2007, **6724**: 67240B-1-67240B-7.
- [21] Fengchao Liang, Jinsong Gao, Xiaoguo Feng, et al. Automatic spin coater for concave spherical substrate. AOMATT CHINA [C]//*Proc. SPIE*, 2007, **6724**: 67240U-1-67240U-5.
- [22] 冯晓国. 凹球面网栅激光直写技术研究[D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2006.
- [23] 赫尔齐克. 微光学元件、系统和应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2002.
- [24] 李凤有. 激光直写光刻工艺研究[D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2002.
- [25] 谢永军. 曲面激光直接写入技术[D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2004.
- [26] 岳宏达. 光盘染料旋涂的流动机制与工艺理论研究[D]. 清华大学博士学位论文, 2003.
- [27] Gale M. T., Lang G. K., Raynor J. M.. The fabrication of fine lens arrays by laser beam writing[C]//*Proc. SPIE*, 1983, **398**: 347-353.
- [28] Gale M. T., Lang G. K., Raynor J. M.. Fabrication of kinoform structures for optical computing” [C]//*Appl. Opt.*, 1992, **31**: 5712-5715.
- [29] Gale M. T., Rossi M., Pedersen J.. Fbrication of continues-relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresist[C]//*Opt. Eng.*, 1994, **33**: 3556-3566.
- [30] J. C. Strieter. The chemical behavior of positive working systems[C]//*Proceedings of Kodak Microelectronics seminar*, 1976: 116-112.
- [31] M.P.C.Watts. Optical Positive Resist Processing: Experimental and analytical model evaluation of process control[C]//*SPIE*, 1985, **539**: 21-28.
- [32] 范志刚. 光电测试技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.