

文章编号 1004-924X(2015)03-0686-06

薄膜型金属网栅的电磁屏蔽特性

冯晓国*, 张 舸, 汤 洋

(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)

摘要: 为寻求准确评估薄膜型金属网栅电磁屏蔽效能的方法, 探索了薄膜型金属网栅在某频段可达到的电磁屏蔽效能。首先, 分析了金属网栅膜光电特性常用的计算公式, 指出电特性公式中材料无限导电的假定条件与客观事实不符, 故其无法准确预估薄膜型金属网栅的电磁屏蔽效能。然后, 根据屏蔽效能受感应电压和电阻比控制的理论, 借鉴连续导电膜用方块电阻计算屏蔽效能的方法, 提出了预估薄膜型金属网栅屏蔽效能的方法并给出了具体步骤。最后, 采用激光直写工艺流程制备了薄膜型金属网栅, 验证了理论计算结果与实验检测结果的一致性。检测结果显示: 薄膜型金属网栅试片在 30~1 500 MHz 的屏蔽效能最高为 30 dB; 用检测方块电阻并代入连续膜经验公式计算得到的屏蔽效能为 31.2 dB, 用金属网栅膜常用公式计算得到的屏蔽效能为 75 dB。数据显示用金属网栅膜常用电特性公式无法准确评估薄膜型金属网栅的电磁屏蔽效能, 而本文所提方法便捷、准确、可行。

关键词: 透明导电膜; 金属网栅; 电磁屏蔽; 方块电阻

中图分类号: TB43; O484.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152303.0686

Electromagnetic shielding properties of metallic mesh coatings

FENG Xiao-guo*, ZHANG Ge, TANG Yang

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

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

Abstract: To find a suitable method for evaluating electromagnetic shielding properties of metallic mesh coatings, the shielding effectiveness of a general metallic mesh coating was explored. Firstly, a set of the formulas commonly used to calculate the photoelectric characteristics of metallic mesh was analyzed. It points out that the infinite conductive material assumption of formulas is not reasonable, and these formulas can not accurately forecast the electromagnetic shielding effectiveness of thin-film metallic mesh. Then, according to the theory that the shielding effectiveness is associated with the ratio of induction voltage to resistance, a method to estimate the shielding effectiveness of thin-film metallic mesh was proposed by using the shielding effectiveness calculation formula of the continuous conductive film with the square resistance, and the estimation concrete steps were given. Finally, three specimens of thin-film metallic meshes were prepared by the laser direct writing process to test the validity of the method. The results for 30 MHz to 1 500 MHz band show that the highest

收稿日期: 2014-05-19; 修订日期: 2014-07-10.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (No. 61172012)

electromagnetic shielding efficiency of specimens is 30 dB by the coaxial test method, and the calculation value is 31.2 dB by using the method proposed in this paper, as the calculation value is 75 dB by commonly used method. These data indicate that the commonly used electrical characteristic calculation formula of metallic mesh can not accurately evaluate the electromagnetic shielding effectiveness of thin-film metallic mesh, and the method proposed in paper is convenient, accurate and feasible.

Key words: transparent conductive coating; metallic mesh; electromagnetic shielding; square resistance

1 引言

用金属网栅来实现光学透明且屏蔽长波电磁干扰的历史由来已久,其原理是用网栅的开孔部分透光,用网栅导电(或导磁)材料来屏蔽电磁干扰(MHz及GHz频段)。与普通金属板相比,虽然孔隙会显著降低屏蔽效能,但基于光学透明的需求,金属网栅在很多场合仍是必不可少的,且保持了较好的屏蔽效能^[1-3]。近年来,在透可见光且屏蔽长波电磁干扰方面,一种连续透明导电膜——铟锡氧化物薄膜(ITO膜)已经可以替代金属网栅膜;但在透红外光且屏蔽长波电磁干扰方面,由于通阻带更为接近、基底材料透过率低、连续膜材料受限等原因,目前金属网栅仍是唯一的选择^[4]。

在红外窗电磁屏蔽的应用中,网栅对中、长波红外系统的影响较小,对GHz频段(窗口尺度一般小于米级)的屏蔽较高^[5],因此,通常采用镀膜与光刻结合的布线技术来制作网栅。该技术选择高导电率的金属材料,将网栅的线宽和厚度制成微米量级,故称之为薄膜型金属网栅^[6-7]。理论上,与传统金属网栅相比,在空占比(开口面积占总面积的份额,也称遮拦比)、材料相同的情况下,薄膜型金属网栅的线宽更窄、屏蔽效能更高^[8]。然而,从工程实践的角度看,窄的线宽意味着薄的厚度,对应小的截面面积(线宽×厚度)和高的电阻值^[9]。因此,在材料确定的前提下,金属网栅的结构参数(主要是线宽)设计须认真平衡工艺(材料)和指标的关系。

通常依据光电指标的检测结果来评价金属网栅膜设计的优劣^[10]。其光学特性主要包括由网栅引起的光学透过率和调制传递函数(MTF)的下降,这可通过光谱仪、传函仪等仪器并应用常规手段检测。由于存在空占比,检测结果与理论计算结果一般很接近。但是,薄膜型金属网栅电特

性(电磁屏蔽效能)的评估却相对困难。从理论计算来说,薄膜型金属网栅材料不能假定为理想材料(无限导电),因此不能应用传统的感性网栅电磁屏蔽计算公式,同时大尺寸器件与微结构的融合也增大了电磁分析计算的困难。从检测手段来说,常用的暗室法测试不仅昂贵,也不便捷,不适用于批量生产的快速性能评估。

本文提出了一种操作便捷、可准确评估薄膜型金属网栅电磁屏蔽性能的方法,将该检测手段与相关的理论公式相结合,可用于工程实践。

2 金属网栅光电特性理论

2.1 金属网栅光学特性理论

金属网栅的光学特性主要指它对光学系统成像特性的影响。在光学频率内,网栅起衍射光栅的作用,对入射光产生多级衍射。网栅透过率等效于每个衍射级次透射率的总和,可简单地由空占比表示^[11]:

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

式中: $2a$ 是网格线宽, g 是网格周期。

成像时仅中心衍射级是有用的,其它级次衍射只会增加系统杂散光、减少系统MTF、降低系统信噪比。中心级能量与点扩散函数(PSF)总能量之比为:

$$T_m(0,0) = \left[1 - \frac{2a}{g} \right]^4, \quad (2)$$

式中:线宽 $2a$ 越小,周期 g 越大,衍射到中心级的能量份额越大,网栅对其成像系统性能的影响越小。

利用式(1)和式(2)计算薄膜型金属网栅的光学透过率,计算结果与检测结果基本一致。

2.2 金属网栅电学特性理论

用等效电路法定量分析金属网栅的电特性,

该方法将网栅用电抗元件(电感、电容和电阻)组成的等效电路来表示。本文所述的金属网格(金属上开孔)结构又称为感性网栅,在自由空间垂直入射情况下,当 $t \ll 2a$ (t 代表网栅厚度), $2a \ll g$, 感性网栅具有归一化导纳^[12]:

$$y = f_0 \left[\ln \left[\sin \frac{\pi a}{g} \right] \right] \left[\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right]^{-1}, \quad (3)$$

式中: $f = g/\lambda$, f_0 为归一化谐振频率, λ 为欲屏蔽电磁波的波长。当 $\lambda \gg g$ 时, 归一化导纳近似为:

$$y \approx -\frac{g}{\lambda} \left[\ln \left[\sin \frac{\pi a}{g} \right] \right]. \quad (4)$$

则垂直入射时, 独立网栅(无基底)的透射率为:

$$\tau = \frac{4y^2}{1+4y^2}. \quad (5)$$

镀在基底上的感性网栅的屏蔽效能会下降, 其原因是基底第一个界面反射的电磁波与从第二个界面反射的电磁波相互干涉, 与感性网栅构成新的膜系组合。利用等效膜法把薄膜型金属网栅看成一个等效金属膜, 即相当于存在透射效应。如果基底的光学厚度(nd)是屏蔽电磁波半波长的整数倍, 则相当于基底不存在; 当基底的光学厚度是屏蔽电磁波四分之一波长($\lambda/4$)的奇数倍时, 屏蔽效能将减到最小值。

在无损耗(无限导电)、垂直入射情况下, 介质边界感性网栅的透射率为^[13]:

$$\tau(n_1, n_2) = \frac{n_1 n_2 \tau}{1 + \tau[(n_1 + n_2)^2/4 - 1]}, \quad (6)$$

式中: n_1 代表入射媒质折射率, n_2 代表出射媒质折射率。

如以分贝为单位定义屏蔽效能, 有:

$$S = -20 \times \lg \tau. \quad (7)$$

利用式(3)~式(7)可评价不同线宽和周期下金属网栅的电磁屏蔽特性, 也可准确预测金属网栅在某电磁屏蔽频段($\lambda \gg g$)随频率的变化趋势, 还可较准确地预估基底对金属网栅屏蔽特性的影响。然而, 式(3)~式(7)是在假定材料为无限导电的理想条件下导出的, 当网栅截面积太小以至电阻值较大时, 其计算结果与检测结果会有明显的差异。

2.3 薄膜型金属网栅电磁屏蔽效能评估

决定屏蔽效能的一个基本参数是与趋肤深度相关的屏蔽厚度, 当屏蔽厚度远大于趋肤深度时, 很容易得到大的屏蔽效能。然而, 当屏蔽厚度小于趋肤深度时, 虽然屏蔽效果不如前一种那么好,

但受到感应电压和电阻比的控制, 高度导电材料也能提供较大的电磁衰减^[14]。

工艺不同, 材料电参数也不同, 导电膜膜厚与电阻值往往是一种非线性关系, 因此评估连续导电膜电磁屏蔽效能经常依据电阻值。连续导电膜一般采用四探针法测出膜层面电阻(也称“方块电阻”), 在不考虑吸收的条件下, 可用下述经验公式来近似算出电磁透射率:

$$\tau = \frac{2}{2 + Z_0/R_s}, \quad (8)$$

式中: $Z_0 = 377 \Omega$, R_s 代表膜层面电阻。

利用式(7)可将电磁透射率转换为电磁屏蔽效能。

薄膜型金属网栅是一种非连续薄膜结构, 因此无法直接用四探针面电阻测量仪来测量面电阻。但是, 在网栅中取一个正方形区域, 然后在这个正方形相对两条边上镀制连续金属电极(一般线宽达 $10 \mu\text{m}$ 即可), 再使用万用表来测量两电极间的电阻, 也可得到四探针法中的方块电阻(也就是面电阻)。然后, 就可根据连续膜电磁屏蔽效能计算式(7)和式(8)来预估薄膜型金属网栅的屏蔽效能。

对于正式器件, 由于不能在网栅中制作电极, 往往是在网栅边缘制作电极, 然后将电极合理分段来得到电极间电阻; 或者直接在网栅区测出一段距离两点间的网格电阻(用铝箔及万用表), 然后将电极间电阻或网格电阻与同参数下实验件的方块电阻比对, 建立对应表格, 最后再利用式(7)和式(8)来预估网栅的电磁屏蔽效能。

3 实验与检测

实验选择 K9 玻璃材料为基底, 基底尺寸为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。先采用洁净剂清洁基底, 然后在基底上旋涂正性光刻胶, 前烘后用自行研制的平面激光直写设备直写刻划, 用显影液显影后得到网栅图形, 视频显微镜检测网栅线宽约为 $12 \mu\text{m}$ 、周期为 $400 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ 。将实验片放入镀膜机镀厚度约为 $0.5 \mu\text{m}$ 的 Cu, 再将实验件放入丙酮中浸泡去除残余的光刻胶, 就得到了薄膜型金属网栅。为了加强薄膜型金属网栅的电磁屏蔽效果, 验证不同面电阻下金属网栅的电磁特性差异, 通过电镀 Ni 对金属网栅膜层增厚, 详细工艺流程如图 1 所示。

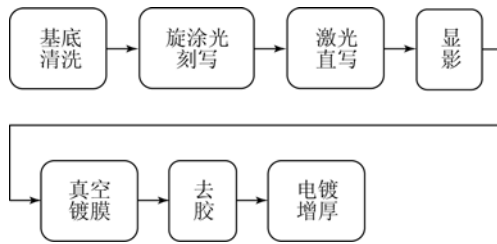


图 1 金属网栅膜制作工艺

Fig. 1 Process of inductive mesh fabrication

实验中,每种参数规格的试片均制作 2 片。其中 1 片先用光谱仪测出光学透过曲线,然后按 2.3 节方法制备电极,最后用万用表测出金属网栅的方块电阻。另外一片不制作电极,直接用同轴法测出其电磁屏蔽效能,同轴法测试系统如图 2 所示。

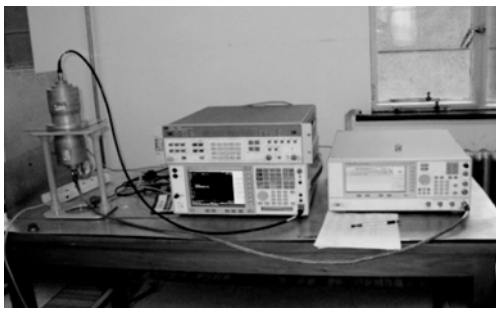


图 2 电磁屏蔽效能同轴法测试系统

Fig. 2 Coaxial test system of electromagnetic shielding

测试曲线如图 3 所示,检测频段为 30 ~ 1 500 MHz。图 3 中,K9 曲线代表基底本身的电磁屏蔽效能;K9+mesh 曲线代表基底上已制备薄膜型金属网栅的电磁屏蔽效能。

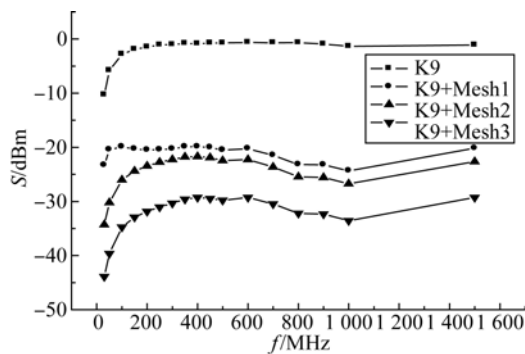


图 3 薄膜型金属网栅电磁屏蔽效能测试曲线

Fig. 3 Test curves of electromagnetic shielding properties of metallic mesh coating

用万用表检测已制备电极的同规格试片, Mesh1 的面电阻为 15 Ω , Mesh2 的面电阻为 7.5 Ω , Mesh3 的面电阻为 3.5 Ω 。取 K9 玻璃折射率 n 为 1.52,利用式(6)~式(8)计算得到K9+Mesh1, K9+Mesh2, K9+Mesh3 的电磁屏蔽效能分别为 19.4, 24.9 和 31.2 dB。在图 3 中,取 K9 曲线中某一频率下的电磁屏蔽效能值,分别减去 K9+Mesh1, K9+Mesh2, K9+Mesh3 曲线同一频率下对应的电磁屏蔽效能,可得到薄膜型金属网栅的电磁屏蔽效能。显然,上述 3 个计算结果与测试结果基本一致。而根据式(3)~式(7)计算(取 500 MHz 点)的 K9 基底上金属网栅的屏蔽效能可以达到 75 dB,这与实验测量结果的差异较大。实验结果表明:采用前述工艺制造的薄膜型金属网栅虽然达到了较好的屏蔽效能,但与理想情况相比,在工艺和材料方面仍有较大的提升空间。

4 结 论

即便采用电导率较高的金属材料,在 20 GHz 以下的频段,薄膜型金属网栅的厚度也难以达到材料的趋肤深度。而且,为了结合牢固,薄膜型金属网栅往往与光学基底间有连接层(电导率相对很低的 Ni 或 Cr),金属网栅的外层也须制作环境保护层(或氧化层),镀膜工艺形成的金属层与块状材料电导率的差异较大。因此,用材料无限导电的理论模型准确预估薄膜型金属网栅的电磁屏蔽效能是极其困难的。

本文采取在网栅方形区域制备电极、测方块电阻并借用连续膜电磁透射率计算经验公式的方法,较准确地预估了薄膜型金属网栅的电磁屏蔽效能。实验试片 K9+Mesh3 在 30~1 500 MHz 的电磁屏蔽效能达到了 30 dB(这里给出的测试频段较窄,事实上薄膜型金属网栅在 2~18 GHz 频段的屏蔽效果也很好,请参考文献[10]),与采用面电阻法的计算结果 31.2 dB 极为接近,而与理想假定条件下金属网栅屏蔽效能的计算结果 75 dB(500 MHz 点)差异很大。

实验显示:利用高电导率的金属材料来满足电磁屏蔽效能的需求,通过网线间的空隙来透射光学波段,薄膜型金属网栅已兼具了材料与结构两方面的设计优势,目前可满足多数光电指标需求。但是,由于金属线条对光学频段遮拦,金属材料

抗激光损伤阈值低,网栅还不能实现位相光栅的衍射条件,制造工艺也有待进步,这些都限制着电感性网栅膜的进一步发展。未来只有在材料、图形、工艺等方面取得进一步突破,电感性网栅膜才会有更好的发展空间。

参考文献:

- [1] 刘顺华,刘军民,董星龙,等. 电磁波屏蔽及吸波材料 [M]. 北京:化学工业出版社,2007.
LIU SH H, LIU J M, DONG X L, *et al.*. *Electromagnetic Wave Shield and Absorbing Material* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [2] 张兴德,刘琳,李荣刚. 机载光电设备红外窗口技术 [J]. 红外与激光工程,2010,39(4):600-606.
ZHANG X D, LIU L, LI R G. Infrared optical window for airborne photoelectric equipments [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4):600-606. (in Chinese)
- [3] 范有余,羊毅,姜雄伟,等. 一种新型中红外材料及其隐身功能研究 [J]. 红外与激光工程,2010,39(1):12-16.
FAN Y Y, YANG Y, JIANG X W, *et al.*. New mid-infrared material and its radar stealth function [J]. *Infrared and Laser Engineering*. 2010, 39(1):12-16. (in Chinese)
- [4] 余怀之. 红外光学材料 [M]. 北京:国防工业出版社,2007.
YU H ZH. *Infrared Optical Material* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [5] 王长伟. 金属网栅用于隐身技术的研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
WANG CH W. *Research on the metallic mesh for stealth technology* [D]. Harbin: Harbin institute of Technology, 2006. (in Chinese)
- [6] 申振峰,冯晓国,高劲松,等. 用于红外窗电磁屏蔽的电感性网栅薄膜 [J]. 红外技术,2008,30(8):468-471.
SHEN ZH F, FENG X G, GAO J S, *et al.*. The inducting mesh coating used for electromagnetic shielding of the infrared windows [J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(8):468-471. (in Chinese)
- [7] 陈赞,李艳茹,张红胜. 基于 ZnS 金属网栅制作工艺的改进 [J]. 中国光学,2014,7(1):131-136.
CHEN Y, LI Y R, ZHANG H SH. Improvement on fabrication technology of metallic mesh based on ZnS [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1):131-136. (in Chinese)
- [8] 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.
FENG X G, FANG L, SUN L CH. Characteristic dimension design and fabrication of metallic mesh [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1):59-64. (in Chinese)
- [9] 刘小涵,冯晓国,赵晶丽,等. K9 基底细薄铜网上化学镀镍 [J]. 光学精密工程,2010,18(10):85-91.
LIU X H, FENG X G, ZHAO J L, *et al.*. Research of nickel-plating for copper mesh on K9 [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10):85-91. (in Chinese)
- [10] 刘小涵,赵晶丽,冯晓国,等. 高透光率感性网栅膜的电磁屏蔽 [J]. 光学精密工程,2012,20(1):80-87.
LIU X H, ZHAO J L, FENG X G, *et al.*. Electromagnetic shielding of highly transparent inductive mesh [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012,20(1):80-87. (in Chinese)
- [11] 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)
- [12] KOHIN M, WEIN S J, TRAYLOR J D, *et al.*.

- Analysis and design of transparent conductive coatings and filters [J]. *Optical Engineering*, 1993, 35(5): 911-925.
- [13] WHITBOURN L B, COMPTON R C. Equivalent-circuit formulas for metal grid reflectors at a dielectric boundary [J]. *Applied Optics*, 1985, 24 (2): 217-220.
- [14] CELOZZI S, ARANEO R, LOVAT G [意]. 电磁屏蔽原理与应用 [M]. 郎为民,等译. 北京:机械工业出版社,2009.
- CELOZZI S, ARANEO R, LOVAT G. *Principle and Application of Electromagnetic Shielding* [M]. LANG W M, trans.. Beijing: China Machine Press, 2009. (in Chinese)

作者简介:



冯晓国(1974—),男,吉林长春人,博士,研究员,1998年于吉林工业大学获得学士学位,2006年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事电磁滤波结构材料设计及光学仪器研制。E-mail: fxcg74@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)