

柔版印刷金属网栅光电性能研究

李 修,王 瑜,徐艳芳,冉 军,莫黎昕,李路海

(北京印刷学院 北京市印刷电子工程技术研究中心,北京 102600)

摘 要:为满足日渐增加的电磁屏蔽要求,设计了一种透明基材上柔版印刷电磁屏蔽用金属网栅,研究了影响金属网栅透光率与电磁屏蔽特性的主要因素。首先从理论分析入手,计算并分析金属网栅结构参数(线宽、周期、占空比)等对透明导电金属网栅透光率及电磁屏蔽效能的影响;接下来利用柔版印刷方式制备周期为 300、400 μm 线宽为 20、30、40 μm 的金属网栅,测试了在 7、10、13 GHz 3 个频点处电磁屏蔽效能以及 300~1 000 nm 波段的紫外-可见透过率。测试与分析结果表明:金属网栅在紫外-可见光波段透过率在 70%~80%之间,且随周期/线宽增大而分别增大/减小,电磁屏蔽效能最高达到了 15 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。

关键词:薄膜; 金属网栅; 电磁屏蔽; 透明导电膜

中图分类号: O484.4; TN972 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)12-3295-05

Photoelectric properties of metallic mesh based on flexographic printing

Li Xiu, Wang Yu, Xu Yanfang, Ran Jun, Mo Lixin, Li Luhai

(Beijing Printed Electronics Engineering Technology Research Center, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

Abstract: In order to meet the increasing requirements of the electromagnetic shielding, the principle and manufacture process of a film-taped metallic mesh were introduced and the influence of the parameters (such as the line width, period, duty ratio, et al) on optical and electromagnetic features were analyzed. By using the flexographic printing technology, the metal mesh film with the line widths of 20, 30, 40 μm and the periods of 300, 400 μm on PET substrate were made, and the maximal electromagnetic shield effectiveness was more than 15 dB, while the UV-Vis transmission of metallic mesh on PET substrate was between 70% and 80%. The results indicate that the optical and electrical performance of metallic mesh film is inconsistent, and it is better to select a thinner line width and smaller period to obtain optimal shielding effectiveness.

Key words: thin film; metallic mesh; electromagnetic shielding; transparent film

收稿日期:2013-03-05; 修订日期:2013-04-11

基金项目:北京市教委专项-青年英才计划(06170113045);北京印刷学院资助课题(23190113074)

作者简介:李修(1981-),女,讲师,博士,主要从事印刷电子相关光电器件方面的研究工作。Email:lixu@bigc.edu.cn

0 引言

金属网栅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^[1-3]。与一般的金属膜相比,金属网栅膜具有更好的品质因数,在实际应用中其重要性不断增长。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;而对于红外及可见波段,周期远大于入射波长,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,还有对可见及红外波段的高透射特性^[4-5]。由于金属网栅膜具有透明导电性,其应用范围很广,如可以作为毫米波天线反射器^[6]、光学耦合器^[7]、太赫兹成像系统滤波^[8-10]等,但它最重要的是在屏蔽电磁干扰方面的应用。文中针对透明导电金属网栅结构参数与其光电特性的关系进行分析讨论,并通过理论计算曲线,对网栅参数设计提出了具体说明。同时,也提出金属网栅的具体制作工艺,并通过实验与理论分析结果进行对比分析。

1 理论分析与设计

1.1 金属网栅结构参数对红外光学性能的影响

在光学波段范围内,金属网栅起衍射光栅的作用,对入射光产生衍射级序。网栅的总透过率是每个衍射级透射率的和,可由遮拦比给出透过率为^[11]:

$$T = [(g-2a)/g]^2 = (1-2a/g)^2 \quad (1)$$

式中: $2a$ 表示网栅线宽; g 为网栅周期。公式(1)说明,线宽越小、周期越大,红外透过率越好。

1.2 金属网栅电磁屏蔽效能分析

关于金属网栅薄膜的电磁屏蔽作用,R Ulrich 等人利用等效电路方法加以了分析,并给出了在自由空间中垂直入射情况下独立金属网栅的电磁透射特性可以表述为^[12]:

$$T_{\text{电}} \approx 4g^2/\lambda^2 \left[\ln \left[\sin \frac{\pi a}{g} \right] \right]^2 \quad (2)$$

将公式(1)代入公式(2)可以得到:

$$T_{\text{电}} \approx 4g^2/\lambda^2 \left[\ln \left[\sin(\pi(1-\sqrt{T})/2) \right] \right]^2 \quad (3)$$

如果以分贝为单位,则电磁屏蔽效率定义为:

$$S = -10 \lg T_{\text{电}} \quad (4)$$

根据公式(1)、(3)及(4),可算出自由空间独立网栅电磁屏蔽效率及光学透过率与网栅周期的关系,计算结果如图 1~3 所示。

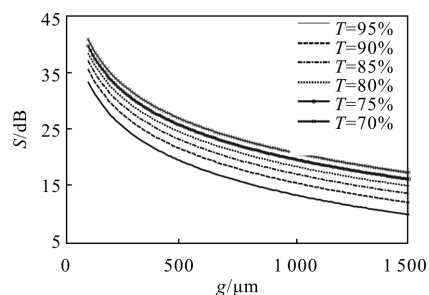


图 1 不同透过率下电磁屏蔽效能与周期关系

Fig.1 SE attenuation vs period with different infrared transmission

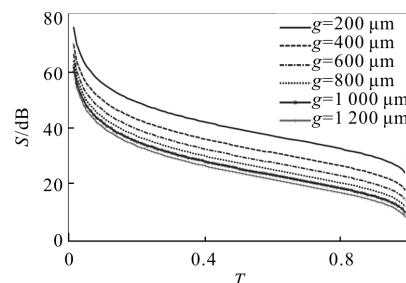


图 2 不同周期下电磁屏蔽效能与透过率关系

Fig.2 SE attenuation vs infrared transmission with different periods

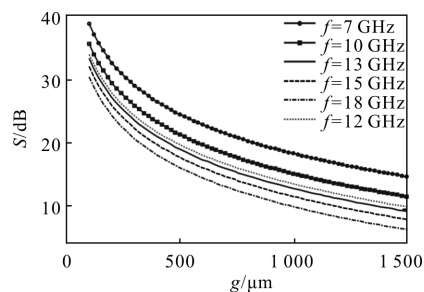


图 3 不同探测频率下电磁屏蔽效能与周期关系

Fig.3 SE attenuation vs period with different frequencies

对于图 1 所示的情况, λ 取 3 cm(即 10 GHz 雷达波),可以看出:对于给定的光学透过率(如 $T=90\%$),电磁屏蔽效能随着周期的增大而减小,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;同时,透过率越高屏蔽效能越小,并且随着周期的增加,透过率的影响有增大的趋势。

对于图 2 所示的情况, λ 取 3 cm(即 10 GHz 雷达波),可以看出:电磁屏蔽效能随着光学透过率的增大而减小;并且周期越小,影响越显著。

对于图 3 所示的情况,光学透过率 T 取 90%,可以看出:电磁屏蔽效能随着探测频率的增大而减小;并且随着周期的增加,频率的影响有逐渐增大的趋势。

综合分析图 1~3,可以看出金属网栅的光电性

能是相互矛盾的, 因此, 在线宽一定的情况下, 应选择合适的周期以兼顾足够的光学透过率和良好的屏蔽效率。

2 实验与测试

2.1 金属网栅的制作

为验证透明导电金属网栅屏蔽及可见光透过效果, 分别制作了周期为 300、400 μm 线宽为 20、30、40 μm 的透明导电金属网栅进行对比实验。金属网栅的制作采取柔版印刷纳米银导电墨水的工艺方法, 其在显微镜下局部图案如图 4 所示(以线宽 20 μm 、周期 400 μm 为例)。

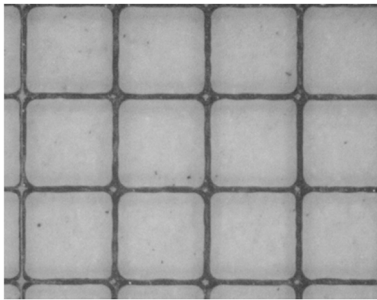


图 4 PET 衬底上金属网栅显微镜照片

Fig.4 Micrograph of metallic mesh on PET substrate

2.2 紫外-可见透过率测试

使用 UV-2501PC 型分光光度计测量样品在 300~1 000 nm 波段的透过率, 得到透过率随波长变化曲线, 如图 5 所示。由图可知, PET 衬底本身透过率 >80%, 在 532 nm 波长处的透过率为 87.802%, 以 PET 为基底的金属网栅样品透过率随着线宽与周期的变化而有不同程度的下降。

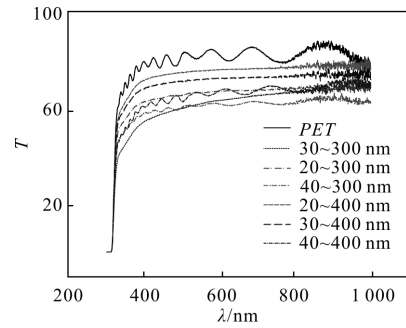


图 5 PET 衬底上金属网栅紫外-可见透过率

Fig.5 UV-Vis transmission of metallic mesh on PET substrate

2.3 典型图元测量算法

2.3.1 测试原理

采用矢量网络分析仪, 自由空间法测试示意图如图 6 所示。测试频点为 7、10、13 GHz, 测量样品平面波垂直入射时的电磁屏蔽效能。

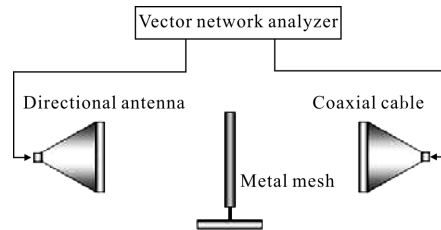


图 6 屏蔽效能测试示意图

Fig.6 Testing system of shielding effect

2.3.2 测试结果

在屏蔽暗室条件下对 PET 衬底上制作的线宽为 20、30、40 μm , 周期为 300、400 μm 的金属网栅分别进行微波段电磁屏蔽效能测试, 实验结果与理论计算如表 1 所示。由表可知周期一定时屏蔽效能随着

表 1 电磁屏蔽效能理论与实验值

Tab.1 Theory and experiment value of shielding effect

Number	$2a/\mu\text{m}$	$g/\mu\text{m}$	S/dB					
			$f=7\text{ GHz}$		$f=10\text{ GHz}$		$f=13\text{ GHz}$	
			Theoretical value	Experimental value	Theoretical value	Experimental value	Theoretical value	Experimental value
1	20	300	33.16	-6.46	30.05	-9.78	27.78	-10.06
2	30	300	35.68	-10.3	32.58	-10.32	30.31	-14.37
3	40	300	38.00	-11.6	34.89	-11.26	32.62	-15.68
4	20	400	29.22	-8.7	26.11	-8.89	23.84	-11.02
5	30	400	31.33	-5.43	28.22	-10.04	25.95	-11.46
6	40	400	33.19	-8.84	30.08	-11.05	27.81	-12.94

线宽的增加而增加,线宽一定时屏蔽效能随着周期增大而减小,相同占空比下,线宽与周期越小,屏蔽效能越高。

3 结果分析与讨论

对测试数据进行分析,可以得出以下的结论:

(1) 采用柔版印刷法制作的金属网栅薄膜在周期与线宽上与理论值较为接近,效果较好。

(2) 电磁屏蔽效果方面,不同结构参数的金属网栅对电磁波的反射率达到 80%以上(7 dB),但通过表 1 中对理论分析数据和实验数据的比较,可以看出电磁屏蔽效果和理论值相差较多。分析后发现造成该现象的主要原因为:工艺误差,印刷过程中压力控制不同导致线条宽度、厚度不均匀,各处表面电阻不同,其电阻对屏蔽效率的影响不能忽略,图 7 为采用 *_FTS-S3c 型膜厚测度仪(台阶仪)测量的 2 mm 范围内金属网栅厚度差异情况,图中尖峰处为线宽约为 20 μm 的金属网栅所在的位置,由图可知,金属网栅厚度存在较大差异,使得网栅各处表面电阻差异较大,而表面电阻是影响屏蔽效果的重要因素之一,此为文中实验中屏蔽效果的实验值与理论值相差较大的原因之一;测量误差,在发射与接收电磁波时会受到其他反射的电磁波干扰,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。

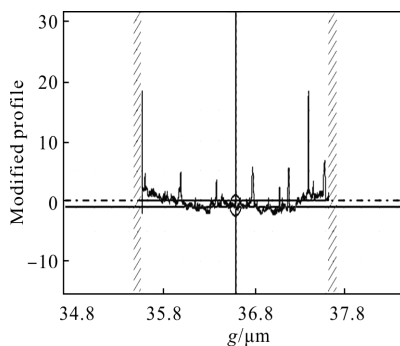


图 7 金属网栅厚度测量

Fig.7 Thickness measurement of the metal mesh

4 结论

从理论入手分别分析了金属网栅电磁屏蔽效率、可见光透过率与线宽、周期、同占空比的关系,同时采用柔版印刷技术制备了纳米 Ag 透

明导电金属网栅样件,通过对如表 1 中的六组实验数据进行对比分析,得出如下结论: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,采用柔版印刷方式制作了 PET 基底的不同结构参数金属网栅膜,在微波暗室条件下测试网栅屏蔽效能,通过实验研究对比得出:在满足高透光率前提下金属网栅周期与线宽越小其屏蔽效能效果越好。

参考文献:

- [1] Zhang Keqian, Li Dejie. Electromagnetic Theory for Microwaves and Optoelectronics [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2001.
张克潜,李德杰.微波与光电子学中的电磁理论[M].北京:电子工业出版社,2001.
- [2] Liu Xiaohan, Xu Nianxi, Zhao Jingli, et al. Method of decreasing surface resistance of inductive mesh [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 966-969. (in Chinese)
刘小涵,徐念喜,赵晶丽,等.降低感性网栅膜表面电阻的方法[J].红外与激光工程,2012,41(4):966-969.
- [3] Zhang Rongshi. Recent advances in infrared window and dome technologies [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S2): 114-119.
张荣实.红外窗口/整流罩技术新进展[J].红外与激光工程,2007,36(S2):114-119.
- [4] Fan Youyu, Yang Yi, Jiang Xiongwei, et al. New mid-infrared material and its radar stealth function [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 13-16. (in Chinese)
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):13-16.
- [5] Shen Zhenfeng, Feng Xiaoguo, Gao Jinsong. The inducting mesh coating used for electromagnetic shielding of the infrared windows [J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(8): 468-471. (in Chinese)
申振峰,冯晓国,高劲松.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.
- [6] Guo G, Sheng Y B. Research on laser direct writing system and its lithography properties [C]//SPIE, 2009, 3550: 409-418.
- [7] 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.

- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Wang H Q. Research on environment of electromagnetic radiation[J]. *Avionics Tech*, 2001, 32(1): 29-34.
- [11] Wang Zhenguo. Progress in research of meta-l based compound transparent conducting multilayers[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2005, 29(2): 1-4. (in Chinese)
王振国. 金属基复合透明导电多层膜的研究进展 [J]. 机械工程材料, 2005, 29(2): 1-4.
- [12] Ulrich R. Far-infrared properties of metallic mesh and its Complementary structure [J]. *Infrared Physics*, 1967, 7: 37-571.