第48卷第2期

2021年3月

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1191.U.20201202.1420.016.html

金属栅格和透明导电膜混合结构的设计及电磁屏蔽效能分析

张家豪¹,官继红²,刘长军¹

四川大学 电子信息学院,四川 成都 610064
 深圳麦格米特电气股份有限公司,广东 深圳 518057

摘 要:为了实现可视化的电磁屏蔽,提出了一种金属栅格和透明导电薄膜混合的平面屏蔽结构。该屏蔽结构由金属栅格、透明导电膜和玻璃组成。金属栅格屏蔽层栅格边长为4mm,具有良好的可视性。在金属栅格与玻璃之间引入一层透明导电薄膜结构,使透过的电磁波能够在导电膜与金属栅格之间进行多次反射和吸收,从而提高了其电磁屏蔽效能。该结构可应用于大功率电磁环境。在 2.45 GHz 时,屏蔽效能达到 24.1 dB。其屏蔽效果优于普通金属栅格的屏蔽结构,并且具有更好的可视性。该屏蔽结构便于加工,在电磁屏蔽可视窗等领域具有潜在的应用价值。

关键词:电磁屏蔽;电磁兼容;屏蔽效能;透明导电薄膜;金属栅格;层状结构;反射;可视性
 中图分类号:TN03
 文献标志码:A
 文章编号:1009-671X(2021)02-0029-04

Design of a hybrid structure of metal grid and transparent conductive film and its electromagnetic shielding effectiveness

ZHANG Jiahao¹, GUAN Jihong², LIU Changjun¹

School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China
 Shenzhen Megmeet Electric Co., Ltd., Shenzhen 518057, China

Abstract: In order to realize an electromagnetic shielding with visual performance, a hybrid planar shielding structure with metal grid and transparent conductive film is proposed. The shielding structure is composed of a metal grid, a conductive film, and a layer of glass. The metal grid shielding is with a mesh of side length of 4 mm. It has good visibility. A transparent conductive film structure is introduced between the metal grid and glass. The transmitted electromagnetic waves are reflected and absorbed multiple times between the conductive film and metal grid. Thus, the electromagnetic shielding effectiveness is greatly improved. The structure can be used in high-power environments. The shielding effectiveness is 24.1 dB at 2.45 GHz, which is better than conventional shielding structures. The shielding structure is easy to fabricate. It has potential applications in electromagnetic shielding with visual windows.

Keywords: electromagnetic shielding; electromagnetic compatibility; shielding effectiveness; transparent conductive film; metal grid; layered structure; reflection; visibility

随着现代技术的发展,电磁波引起的电磁干扰 (electromagnetic interference, EMI) 和电磁兼容 (electromagnetic compatibility, EMC) 问题日益严重,另外电磁波泄漏也会干扰其他设备^[1]。为了减小或避免电磁辐射造成的影响,通常在设备中引入电磁屏蔽结构。镀金属膜屏蔽玻璃在低频时

通信作者: 刘长军, B, 教授, 博士生导师.

通信作者: 刘长军, E-mail: cjliu@scu.edu.cn.

具有良好的屏蔽效能,在100 MHz时可达到36 dB^[2]。 在机箱的通风孔采用金属丝网和电磁密封衬垫结 合加装的方式,同时在窗口箱体板开设通风孔 洞,在保证通风效果的条件下,提高机箱的屏蔽 效能^[3]。

透明导电薄膜是实现电磁屏蔽和可视兼容的 常用材料,由于其在光学和电子设备中的广泛应 用而备受关注^[4]。近些年,许多新型材料的导电 薄膜被广泛研究,采用特殊的制备方法,可以有 效提高薄膜的质量和性能^[5-7]。超薄金属导电薄 膜具有柔性好、导电性好、成本低和可大规模制 备等优点,有望成为替代氧化铟锡 (Indium Tin

收稿日期:2020-03-15. 网络出版日期:2020-12-02.

基金项目:国家自然科学基金项目(62071316);四川省科技厅项目(2021YFH0152). 作者简介:张家豪,男,硕士研究生.

Oxide, ITO) 的理想材料^[8]。对具有透明导电薄膜 的多层屏蔽结构的屏蔽效能进行探究,常用的屏 蔽效能测量方法有同轴传输线法、法兰同轴法、 喇叭天线法等^[9-10]。本文所提出的屏蔽系统工作 频率为S波段,因此采用喇叭天线法,通过测试有 无屏蔽体时的电场强度,根据屏蔽效能公式得出 该屏蔽体的屏蔽效能。

本文研究了有透明导电膜的多层平面结构的 电磁性能,分析了层状结构的电磁屏蔽机理,以 及仿真与测试的结果,对于如何选取合适的导电 膜提出了依据,对于电磁兼容和电磁屏蔽领域具 有潜在的应用价值。

1 屏蔽结构设计及原理

电磁屏蔽效能是在电磁场中同一地点无屏蔽时的电磁场强度与加屏蔽体后的电磁场强度之比,常用 *E*_s表示:

$$E_{\rm s} = 20 \log \left(\frac{|E_0|}{|E|} \right)$$

式中: E₀是无屏蔽材料时该点场强; E是有屏蔽体 后该点场强。

本文中屏蔽体的第一层结构为金属栅格,金 属栅格的直径和目数对屏蔽效果有直接影响^[11]。 每个金属栅格都可以看作为小波导,当电磁波频 率大于截止频率时,电磁波可在波导内传输,衰 减常数表达式为

$$\alpha_{\rm c} = \frac{R_s}{a^3 b\beta k\eta} \left(2b\pi^2 + a^3k^2\right)$$

式中: *R*s为波导内表面的表面电阻; β为相位常数; k为传播常数; η为波导波阻抗; a、b分别为波导的宽边和窄边尺寸。当电磁波频率小于截止频率时,此时所有的场分量会随离激励源的距离增加而指数衰减。

根据文献 [12], 金属栅格的屏蔽效能为

 $E_{\rm s} = A_a + R_a + B_a + K_1 + K_2 + K_3$

式中: *A*_a 为栅格的传输损耗; *R*_a 为反射损耗; *B*_a 为 多次反射损耗; *K*₁ 为单位面积内孔系数的修正系 数; *K*₂ 为低频穿透修正系数; *K*₃ 为栅格间的耦合 系数。根据金属栅格的参数估算出, 4 mm 金属栅 格的屏蔽效能约为 17 dB。

电磁波在屏蔽体内经过第一次传播到达第二 分界面时,场强已很小,再由此返回第一界面,电 磁波能量就更小了。经过多次反射后场强变得极 小。根据传输线原理,多次反射的总反射系数可 以表达为^[13]

$$\Gamma = \Gamma_1 + T_1 T_2 \Gamma_3 \sum_{n=0}^{\infty} \left(\Gamma_2 \Gamma_3 \right)^n$$

式中:**Г**为反射系数;**T**为传输系数。

因此在屏蔽结构中增加一层或多层透明导电 薄膜,可以提高屏蔽体的屏蔽效能。

2 屏蔽结构及仿真

本文仿真采用周期结构,对一个单元进行仿 真,大大提高了仿真速率,能够更深层次地研究 其特性。通过对透明导电薄膜屏蔽效能的分析, 最终确定了导电膜的参数:屏蔽体金属栅格厚度 为 0.4 mm,透明导电膜厚度为 0.001 mm,玻璃厚 度为 5.0 mm,金属栅格与导电膜之间为空气层, 导电膜贴在玻璃的内侧。图 1 为屏蔽体的分层结 构图,通过仿真分析确定了金属栅格的参数,金 属栅格的边长为 4 mm,厚度为 0.4 mm,栅格大小 适中,具有良好的可视性以及一定的屏蔽效果。 屏蔽体中的玻璃起到支撑作用,可将透明导电膜 贴在玻璃两侧。



图1 含导电膜的多层屏蔽结构

本文应用 CST 仿真软件模拟平面波垂直入 射,测试有无屏蔽体时待测点的场强。在同样的 条件下,分别仿真屏蔽体有无导电膜结构时的屏 蔽效能,仿真结果如图2所示。



图2 有无导电膜屏蔽体的屏蔽效能对比

金属栅格结构的屏蔽效能取决于金属栅格的 直径与数目,其对屏蔽效能的影响由图 3 和图 4 所示。当引入透明导电薄膜时,导电膜具有一定 效果的屏蔽作用,电磁波在金属栅格和导电膜间 进行多次反射,由此产生的损耗,有效提高了屏 蔽效能。



图4 金属栅格开孔大小对屏蔽效能的影响

通过进一步研究发现,导电膜处于屏蔽体的 不同界面处时,会影响屏蔽体的屏蔽效能。如图 5 所示,仿真结果表明,当导电膜在玻璃外侧时,系 统的屏蔽效果更好。但是导电膜暴露在大气之中 会受环境腐蚀,容易损坏,导电性能会随时间而 变差,从而会影响其电磁性能。综合考虑将导电 膜置于玻璃内侧。





通过仿真可知,透明导电薄膜的屏蔽效果与 其方阻的大小有关。在本文结构中,透明导电薄 膜方阻值的变化与屏蔽体的屏蔽效能的关系仿真 结构如图6所示。随着方阻阻值逐渐变小,系统 的屏蔽效能也随之变大。根据此结果可以按照需 求选取合适的透明导电薄膜。



图6 导电膜屏蔽效能随方阻的变化关系

该屏蔽结构中金属网栅的厚度、金属栅格的 大小与数目会影响其屏蔽效能, 网栅厚度越厚、 栅格越小, 屏蔽结构的屏蔽效能越高。本文在确 保具有良好可视度的条件下, 选取了合适的金属 栅格参数, 分析了导电膜方阻和导电膜位置变化 对屏蔽效能的影响。并对引入不同参数导电膜进 行仿真分析, 使其具有较好的屏蔽效果, 最后对 该结构的屏蔽效能进行测试。

3 测试结果分析

屏蔽板的实物和测试系统如图 7 所示。采用 Analog Devices 公司的 HMC-T2220 型号信号源、 固态放大器、喇叭天线、功率计和 Narda EP600 场 强探头进行测试。测试距离是 3 m,发射天线为 标准喇叭天线,接收为场强探头,监测有无屏蔽 体的场强值,测试在微波暗室进行。



图7 测试系统

搭建测试系统,应用场强探头测试有无屏蔽 体时待测点的电场强度,根据屏蔽效能公式计算 出屏蔽效能。仿真与实测的结果对比如图 8 所示。 此时在 2.45 GHz 屏蔽板的屏蔽效能为 22.53 dB。 实测时由于环境的背景噪声影响,会有电磁波从 屏蔽板的上方传播,导致屏蔽板的屏蔽效能比仿 真值偏低。从仿真与实测的结果可以看出,屏蔽 效能随着频率的增加而逐渐降低,与理论结果基 本吻合。 应



图8 屏蔽效能仿真与实测对比

对普通的商用金属栅格进行实测电磁屏蔽测 试。此金属栅格边长比本文屏蔽结构的更小,采 用同样的方法测得屏蔽效能如图 8 所示。本文中 带有透明导电薄膜的屏蔽体结构,比更小栅格的 屏蔽结构的屏蔽效能高,也具有较好的可视性, 便于观察屏蔽板后面的情况。表1为屏蔽结构对 比,相比于文献中所提到的屏蔽结构,本文的双 层混合结构具有更好的应用效果和前景^[14-15]。

	_			
对比方案	工作频率/GHz	屏蔽结构	屏蔽效能/dB	可承受功率
文献[2]	1	导电玻璃	12.0	中
文献[7]	_	透明导电薄膜	10.0~30.0	低
文献[11]	1~10	金属栅格	20.0	高
本文	2.45	混合结构	24.1	高

表1 屏蔽结构对比

4 结论

本文设计了一种带有透明导电薄膜的多层结构屏蔽板。该屏蔽板在 2.45 GHz 时的屏蔽效能 为 22.53 dB。

 估真应用周期性结构,对一个单元进行仿真, 大大提高了仿真速率,便于更深层次的研究其特性。

2)相比于普通单层金属栅格的屏蔽结构,本 文结构提高了系统的屏蔽效能,同时金属栅格增 大,提高了可视度,便于观察屏蔽板后的情况。

3)该屏蔽板结构简单、便于加工,可根据实际要求选择合适的透明导电薄膜,在电磁兼容、电磁屏蔽等领域具有潜在的应用价值。

参考文献:

[1] 陈炜峰, 刘伟莲, 周香. 电磁兼容及其测试技术 [J]. 电子

测量技术, 2008, 31(1): 101-104.

- [2] 林鸿宾, 陆万顺. 电磁屏蔽原理及电磁屏蔽玻璃 [J]. 玻 璃, 2008, 35(3): 39-42.
- [3] 侯扬,李伟. 电子设备机箱的电磁屏蔽结构设计及仿 真 [J]. 光电技术应用, 2018, 33(2): 59-62.
- [4] ZHOU Bing, LI Yahong, ZHENG Guoqiang, et al. Continuously fabricated transparent conductive polycarbonate/carbon nanotube nanocomposite films for switchable thermochromic applications[J]. Journal of materials chemistry C, 2018, 6(31): 8360–8371.
- [5] LEE G H. Effect of growth interruption on the crystalline quality and electrical properties of Ga-doped ZnO thin film deposited on quartz substrate by magnetron sputtering[J]. Thin solid films, 2013, 534: 282–285.
- [6] WANG Ke, YANG Xing, LI Zhiling, et al. Flexible transparent conductive film based on silver nanowires and reduced graphene oxide[J]. Optoelectronics letters, 2018, 14(3): 195–199.
- [7] 江自然. ITO 透明导电薄膜的制备方法及研究进展 [J]. 材料开发与应用, 2010, 25(4): 68-71, 86.
- [8] 许君君, 黄金华, 盛伟, 等. 超薄金属透明导电膜及其应 用研究进展 [J]. 材料导报, 2019, 33(6): 1875–1881.
- [9] XIAO Peixiao, DU Pingan, ZHANG Bingxue. An analytical method for radiated electromagnetic and shielding effectiveness of braided coaxial cable[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2019, 61(1): 121–127.
- [10] SARTO M S, TAMBURRANO A. Innovative Test Method for the shielding effectiveness measurement of conductive thin films in a wide frequency range[J]. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, 2006, 48(2): 331–341.
- [11] 徐福平, 冯晨, 王以伦, 等. 电磁屏蔽技术与结构设 计[J]. 应用科技, 2005, 32(11): 28-29, 33.
- [12] 杨克俊. 电磁兼容原理与设计技术 [M]. 北京: 人民邮电 出版社, 2004.
- [13] 刘长军, 黄卡玛, 朱铧丞. 射频通信电路设计 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2017.
- [14] 赵应盛, 刘长军. 微波无线能量传输中基于旋转矢量法 的发射天线阵相位快速优化 [J]. 应用科技, 2018, 45(05): 26-32.
- [15] 位宇, 陈潇杰, 刘臻龙, 等. 两路 15 kW 连续波微波磁控 管相干功率合成技术 [J]. 应用科技, 2018, 45(02): 34-37.

本文引用格式:

张家豪, 官继红, 刘长军. 金属栅格和透明导电膜混合结构的设计及电磁屏蔽效能分析 [J]. 应用科技, 2021, 48(2): 29–32. ZHANG Jiahao, GUAN Jihong, LIU Changjun. Design of a hybrid structure of metal grid and transparent conductive film and its electromagnetic shielding effectiveness[J]. Applied science and technology, 2021, 48(2): 29–32.