

文章编号: 1672-8785(2023)07-0008-07

ZnS 红外窗口的电磁屏蔽设计 设计及试验验证

黄 畅 杜叶宣 闾家亮 杨百剑

(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘 要: 通过理论计算分析了金属网栅的电磁屏蔽特性与红外透过率之间的关系, 发现金属网栅的电学特性与光学特性是相背离的。为满足镀金属网栅后光学镜片的透过率降幅小于等于 5%、屏蔽效能大于 30 dB(频率范围为 14 kHz~18 GHz)的要求, 首先通过理论计算选用线宽为 10 μm 、周期单元的长度和宽度均为 500 μm 、膜层厚度为 1 μm 的金属网栅(Ni-Ag)。然后采用直流磁控溅射镀膜技术在直径为 100 mm 的硫化锌基片表面成膜。经过曝光、显影、坚膜、腐蚀、剥离等工艺, 获得了镀 Ni-Ag 频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)网栅的红外窗口样片。最后对红外窗口样片进行了透过率和屏蔽效能测试。测试结果满足设计要求。该计算数据可用于预估光学窗口的电磁屏蔽性能, 为后续的设计工作提供参考。

关键词: 电磁屏蔽; 电磁防护; 金属网栅; 红外窗口

中图分类号: O484; TN972 **文献标志码:** A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.07.002

Electromagnetic Shielding Design and Experimental Verification of ZnS Infrared Window

BEN Chang, DU Ye-xuan, CHUANG Jia-liang, YANG Bai-jian

(The 11th Research Institute of China Electronics Technology Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: The relationship between the electromagnetic shielding characteristics and the infrared transmittance of the metal grid is analyzed through theoretical calculation. It is found that the electrical characteristics of the metal grid are contrary to the optical characteristics. In order to ensure that the transmittance of the optical lens decreases by less than or equal to 5% and the shielding effectiveness is greater than 30 dB (frequency range: 14 kHz—18 GHz) after metal grid plating, it was first found through theoretical calculation that selecting a metal mesh (Ni-Ag) with a line width of 10 μm , a period unit length and width of 500 μm , and a film thickness of 1 μm can meet the requirements. Then, using DC magnetron sputtering technology, the surface of the Zinc sulfide substrate with a diameter of 100 mm was filmed. After exposure, development, hardening,

收稿日期: 2022-10-31

作者简介: 黄畅(1988-), 男, 黑龙江人, 工程师, 主要从事光电系统总体设计与应用研究。

E-mail: bc_cetc@sina.com

corrosion, stripping and other processes, the infrared window sample with Ni-Ag frequency selective surface (FSS) grid plating was finally obtained. Finally, the infrared window sample was tested for transmittance and shielding effectiveness. The test results met the design requirements. The calculated data can be used to predict the electromagnetic shielding performance of the optical window and provide a reference for the subsequent design work.

Key words: electromagnetic shielding; electromagnetic protection; metal grid; infrared window

0 引言

随着红外热成像技术的发展, 红外光电系统在现代军事装备的侦察、探测、告警、瞄准和火控引导等方面有越来越广泛的应用。光电系统具有载荷多、控制精度高、信号处理电路复杂、高低频强弱信号交叉等特点, 容易耦合外部电磁干扰而造成系统性能下降, 甚至出现故障。在现今复杂的战场条件下, 光电系统常常受到强电磁干扰, 遭受攻击时会出现性能下降、失效、硬件损坏, 甚至会造成系统性损伤的情况。因此, 开展光电系统的电磁屏蔽防护研究具有重要意义^[1]。

强电磁脉冲可通过光电系统的红外光学窗口、系统结构、电源线缆以及其他信号线缆耦合进系统, 对结构内部的电子设备产生瞬时强干扰。由于光学窗口是电磁辐射的入侵通道和薄弱环节, 如何对其进行合理的屏蔽设计, 建立第一道防线, 对于提高光电系统的抗电磁性能具有重要意义。

本文对金属网栅在红外波段的光学和电学特性进行理论分析, 并通过仿真计算出符合应用要求的金属薄膜网栅的线宽、周期和膜层厚度。然后制备以 ZnS 材料为基底、镀有金属网栅膜的光学镜片, 并在此基础上开展红外透过率和电磁屏蔽效能的测试验证。

1 红外窗口的电磁兼容设计

1.1 金属网栅膜

为保证能透过所需工作波段的红外光, 红外窗口只能选用具有良好透过率的非金属材料, 因此它不具有良好的导电特性。光电系统所处环境的电磁干扰信号会以红外窗口为辐射通道, 辐射至系统内部, 并在成像传感器载

荷、伺服驱动控制单元、图像处理单元、内部线缆等敏感部件上叠加, 形成共模干扰, 影响光电系统的正常功能, 导致系统整体性能降级或失效^[2]。

为减小外部电磁脉冲干扰对光学系统内部的直接影响, 通常会对红外光学窗口进行屏蔽处理。常规的红外屏蔽方法包括采用丝网夹芯和镀膜等, 并要求导电介质层/金属网与金属外壳接触良好。这种屏蔽工艺要求势必会大幅降低窗口的红外透过率, 进而影响光电系统的探测距离、识别能力、定位精度等技术指标。因此, 必须采取其他措施对红外光学窗口进行电磁兼容性设计^[2]。

本文采用新的工艺技术, 即在红外光学窗口表面镀一层感性网栅膜。感性网栅膜是一种非连续性且透明的导电膜层, 在电磁屏蔽设计领域具有广泛应用。采用此方法可以根据所设计的光电系统的电磁干扰频段设计不同的网格尺寸, 同时相对地减小对系统红外透过率的影响。目前已有实践应用证明该技术可在一定程度上提高光电系统红外窗口的屏蔽性能。感性网栅膜的结构如图 1 所示。它具有厚度薄、重量轻、电磁屏蔽频段宽的特点。作为一种薄膜屏蔽材料, 感性网栅膜是目前红外窗口电磁兼容设计的首选屏蔽材料^[1-2]。

1.2 金属网栅膜的红外透过率计算

金属网栅在光学波段对红外光透过率影响很大, 网格对于红外光谱能够起到衍射光栅的作用, 并能使入射光产生多级衍射^[3]。将金属网栅应用于红外光学系统, 并将衍射理论用于红外系统成像计算。光学系统透过率的衰减需利用标量衍射理论进行分析^[4], 其透过率的表达式为

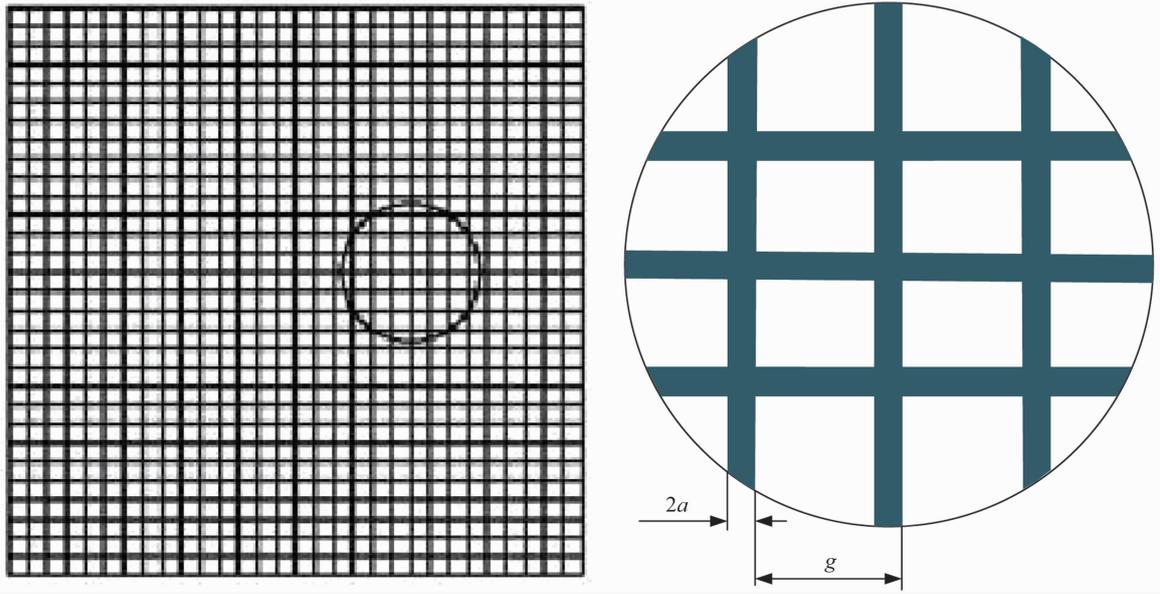


图 1 感性网栅膜的结构示意图

$$t(x, y) = \left[\text{rect}\left(\frac{x}{g-2a}, \frac{y}{g-2a}\right) ** \sum \sum \delta(x-ng, y-mg) \right] \times \text{rect}\left(\frac{x}{Ng}, \frac{y}{Ng}\right) \quad (1)$$

式中, N 为入射光照射的栅格数量; $2a$ 为线宽; n 、 m 为整数序列; g 为周期; $\text{rect}(x, y)$ 为二维矩形透过率函数。

由于衍射序列的中心零级相对而言对成像影响较大, 因此其它级别的衍射序列可忽略不计, 则中心零级光透过率为

$$T(0, 0) = k \frac{E(0, 0)}{E} = k \left(\frac{g-2a}{g}\right)^4 \quad (2)$$

式中, k 为系数, $k=1 \sim 1.5$; $E(0, 0)/E$ 为衍射序列的中心零级占点扩散函数能量的比值。

通过分析以上公式可知, 若要实现高红外透过率, 则线宽 $2a$ 越小越好, 周期 g 越大越好。由于网栅的电学特性与光学特性相互矛盾, 因此在周期一定的情况下, 线宽越小越好^[3-4]。

1.3 金属网栅膜的屏蔽效率计算

金属网栅具有周期性的等间距结构, 其线宽 $2a$ 大于厚度 t , 周期 g 又远大于线宽 $2a$ 。金属网栅的屏蔽作用具有归一化导纳^[4], 其值为

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

式中, f_0 为谐振频率; f 为频率。

只有周期 g 远小于波长 λ , 才能实现长波电磁屏蔽。式(3)中的归一化导纳可近似等于:

$$y = -g \ln\left(\sin \frac{\pi a}{g}\right) / \lambda \quad (4)$$

电磁波进入金属网栅时的透过率为

$$T_E = 4y^2 / (1 + 4y^2) \quad (5)$$

根据等效薄膜理论, 金属网栅的透过率也可为

$$T_E = \frac{4}{2 + 2\cos^2 \beta_e + [(n_e/n_0)^{-2} + (n_e/n_0)^2 + 2]\sin^2 \beta_e} \quad (6)$$

式中, n_e 为等效薄膜的折射率; n_0 为入射媒质的折射率; β_e 为等效薄膜的相位厚度。

对于金属网栅来说, $\cos \theta \approx 1$ 且 $n_e = 1$, $n_p = n_s = n_e$, 因此以任何角度和相位差入射到金属网栅的电磁波对电磁屏蔽效率的影响都很小^[4-5]。电磁屏蔽效率 S 为

$$S = -10 \lg T_E \quad (7)$$

1.4 金属网栅膜制备

光电系统的红外光学窗口材料选择与光学系统所选定的红外工作波段相关。一般来说, 中波红外光学窗口材料选用蓝宝石、氟化镁

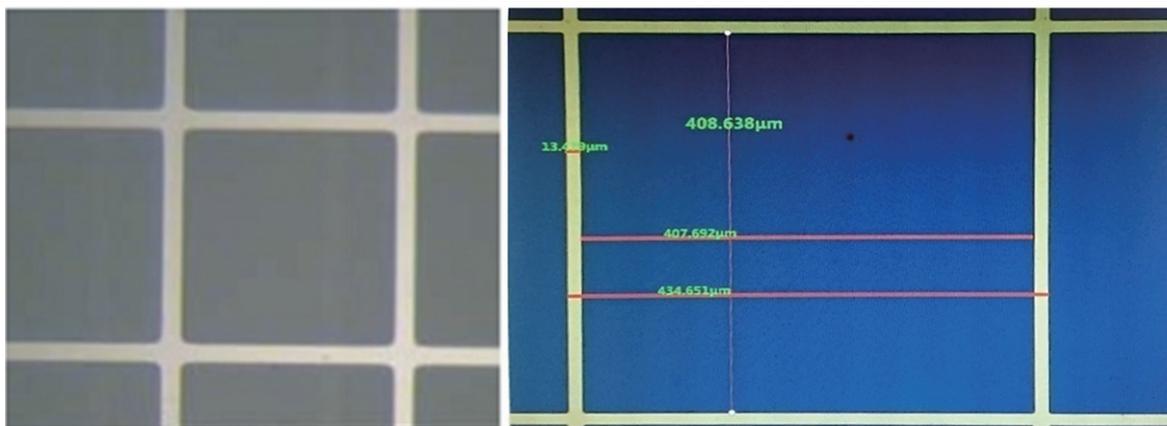


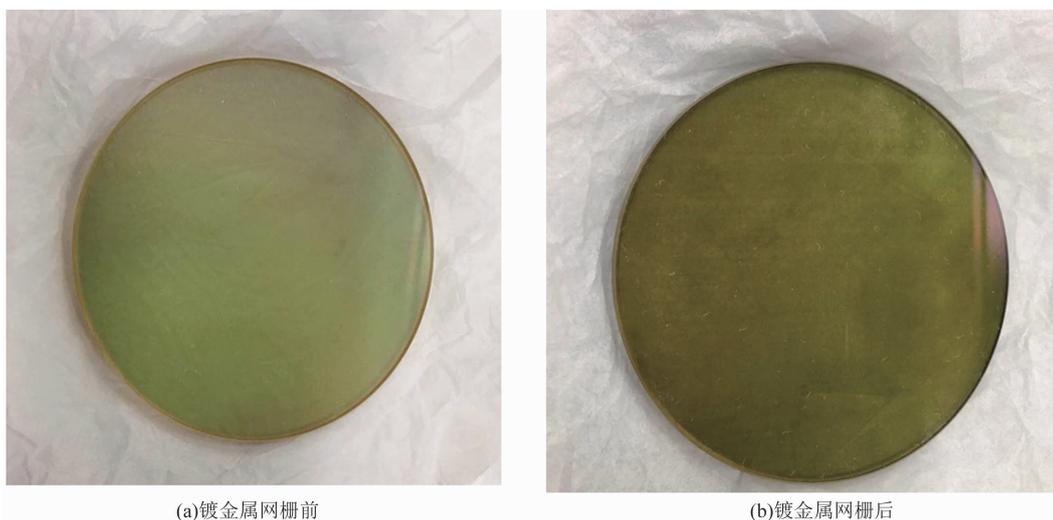
图 2 FSS 结构的显微照片



(a)膜层溅射

(b)刻蚀涂胶

图 3 金属网栅的制备过程图



(a)镀金属网栅前

(b)镀金属网栅后

图 4 镀金属网栅前后的红外窗口样片对比图

(MeF_2)、锗(Ge)和硅(Si)等,长波红外光学窗口材料选用硫化锌(ZnS)、化学气相沉积(Cheical Vapor Deposition, CVD)硒化锌(ZnSe)等^[6]。本文以长波红外材料为光学窗口材

料,在直径为 100 mm 的硫化锌基底上进行金属薄膜网栅镀膜。要求镀金属网栅后光学镜片的透过率降幅小于等于 5%,屏蔽效能大于 30 dB(频率范围为 14 kHz~18 GHz)。

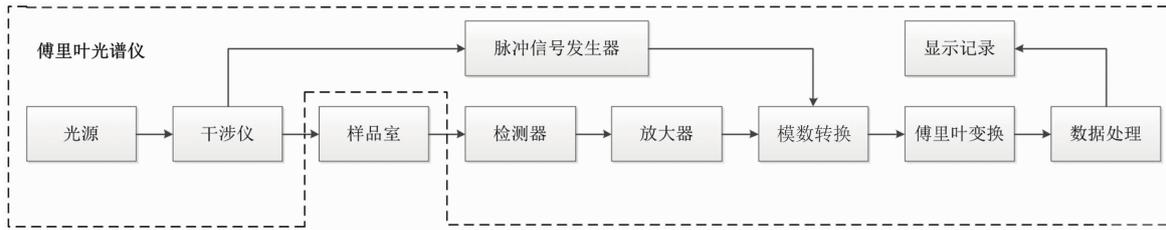


图 5 金属网栅膜透光率测试布置图

经理论计算，选用线宽为 $10\ \mu\text{m}$ 、周期单元的长度和宽度均为 $500\ \mu\text{m}$ 、膜层厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 的金属网栅 (Ni-Ag) 即可满足要求。FSS 结构的显微照片如图 2 所示。

Ni-Ag 金属网栅的制备主要包括镀膜和刻蚀两个主要工序。利用直流磁控溅射镀膜技术在直径为 $100\ \text{mm}$ 的硫化锌基片表面成膜，再采用离心旋涂法在 Ni-Ag 膜表面涂覆厚度为 $1\ \mu\text{m}$ 的负性光刻胶；经过曝光、显影、坚膜、腐蚀、剥离等工艺，最终获得镀 Ni-Ag FSS 网栅的红外窗口样片。金属网栅制备过程如图 3 所示。镀金属网栅前后的红外窗口样片对比如图 4 所示。

2 红外窗口金属网栅膜测试

2.1 红外窗口透过率测试

2.1.1 测试流程

具体的测试流程如下：

- (1) 按照图 5 布置测试系统；
- (2) 将镀有金属网栅膜的光学窗口样片置于样品室中；
- (3) 将傅里叶变换红外光谱仪通电，使其正常工作；
- (4) 按照操作条件，设置傅里叶变换红外光谱仪的波长范围为 $7.7\sim 10.3\ \mu\text{m}$ ；
- (5) 读取透过率数据，对光学窗口金属网栅膜进行测量；
- (6) 将被测样品换成未镀金属网栅膜的光学窗口，重复测试步骤(2)和(3)。

2.1.2 测试结果

对未镀金属网栅膜的光学窗口材料进行测试，得到不同波段的透过率数据。选取 $7.7\ \mu\text{m}$ 、 $9.5\ \mu\text{m}$ 、 $10.3\ \mu\text{m}$ 等 3 个波段，测得

表 1 所示的透过率数据。

表 1 未镀金属网栅膜时的透过率测试结果

| 序号 | 波段 | 透过率 T_0 |
|----|---------------------|-----------|
| 1 | $7.7\ \mu\text{m}$ | 87.8% |
| 2 | $9.5\ \mu\text{m}$ | 95.9% |
| 3 | $10.3\ \mu\text{m}$ | 93.0% |

对镀有金属网栅膜的光学窗口材料进行测试，得到不同波段的透过率数据。选取 $7.7\ \mu\text{m}$ 、 $9.5\ \mu\text{m}$ 、 $10.3\ \mu\text{m}$ 等 3 个波段，测得表 2 所示的透过率数据。

表 2 镀有金属网栅膜时的透过率测试结果

| 序号 | 波段 | 透过率 T_1 |
|----|---------------------|-----------|
| 1 | $7.7\ \mu\text{m}$ | 83.9% |
| 2 | $9.5\ \mu\text{m}$ | 91.1% |
| 3 | $10.3\ \mu\text{m}$ | 88.9% |

根据两次测试得到的透过率数据，选用典型波长的透过率，通过计算得到金属网栅膜材料的透光率变化率 ΔT ：

$$\Delta T = [(T_0 - T_1) / T_0] \times 100\% \quad (8)$$

镀金属网栅前后的透过率测试曲线如图 6 所示。红外透过率测试和计算结果表明，镀膜后透过率下降 5%，满足透过率降幅小于等于 5% 的指标要求。

2.2 红外窗口屏蔽效能测试

2.2.1 测试流程

红外窗口的屏蔽效能测试标准为《电磁屏蔽室屏蔽效能的测试方法》(GB/T12190-2006)。具体的测试流程如下：

- (1) 按照图 7 布置测试系统和被测屏蔽材料；
- (2) 将镀有金属网栅膜的样片装在结构上，然后将被测件安装在测试窗上，并用专用螺钉锁紧；

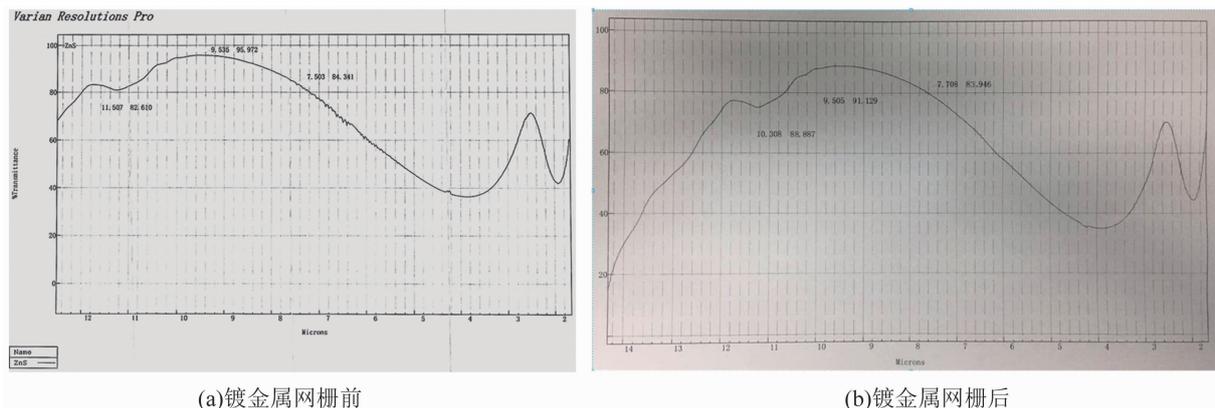


图 6 镀金属网栅前后的透过率曲线对比

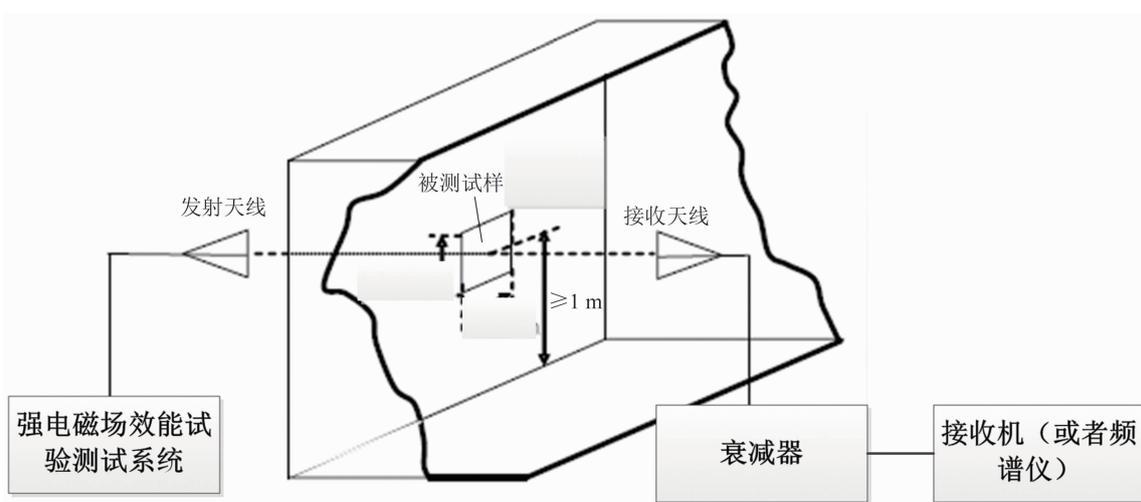


图 7 屏蔽效能测试布置图

表 3 电磁屏蔽效能测试结果

| 频点 | 14 kHz | 150 kHz | 30 MHz | 200 MHz | 450 MHz | 1 GHz | 5 GHz | 10 GHz | 18 GHz |
|------|--------|---------|--------|---------|---------|-------|-------|--------|--------|
| 屏蔽效能 | 34 dB | 41 dB | 46 dB | 56 dB | 59 dB | 44 dB | 57 dB | 42 dB | 33 dB |

(3) 分别设置强电磁场效能试验测试系统的信号发射频率为 14 kHz、150 kHz、30 MHz、200 MHz、450 MHz、1 GHz、5 GHz、10 GHz、18 GHz 等频点, 并打开射频开关, 发射相应频点的信号;

(4) 设置接收机(或者频谱仪)的中心频点分别为 14 kHz、150 kHz、30 MHz、200 MHz、450 MHz、1 GHz、5 GHz、10 GHz、18 GHz 等频点, 读取并记录相应频点的幅度值。

(5) 经对比得到屏蔽效能数据。

2.2.2 测试结果

屏蔽效能测试环境和测试样机如图 8 所

示。屏蔽效能测试结果如表 3 所示。测试结果表明, 在 14 kHz~18 GHz 频段范围内屏蔽效能均大于 30 dB。

3 结束语

本文针对 ZnS 红外窗口的电磁防护需求开展了光学窗口屏蔽膜层的设计。通过对金属网栅膜的光电特性进行理论分析, 设计了一种线宽为 10 μm、周期为 500 μm、厚度为 1 μm 的金属网栅, 并制备了直径为 100 mm 的 ZnS 窗口样片。对镀有金属网栅的光学窗口样片进行了红外透过率对比测试。结果表明, 镀膜后的透过率降幅小于等于 5%。对基于镀有金属网栅的光学窗口样片的光电设备进行了屏蔽效能



图 8 电磁屏蔽效能测试环境和测试样机

的实物测试。数据显示,在 14 kHz~18 GHz 频段范围内屏蔽效能均大于 30 dB。本文提出的网栅镀膜方式具有明显的电磁屏蔽效果,能够满足光电设备对红外窗口的电磁屏蔽要求。未来将对该规格金属网栅膜层在实际强电磁环境下的电磁屏蔽效果进行验证,并根据实际验

证结果对其进行改进。

参考文献

- [1] 李永刚,孙丽娜. 光电侦察平台电磁屏蔽设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 12(8): 2045-2049.
- [2] 李永刚. 机载光电侦察平台环境适应性研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
- [3] 刘小涵,赵晶丽,冯晓国,等. 高透过率感性网栅膜的电磁屏蔽[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 80-87.
- [4] 陈宇. 透红外/可见光学窗的电磁波屏蔽技术[J]. 红外技术, 2012, 34(7): 393-397.
- [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.
- [6] 马礼举,胡博. 光学窗口电磁屏蔽性能分析与验证[J]. 应用光学, 2020, 41(1): 55-59.