



北京市地方计量校准规范

JJF (京) XXXX-XXXX

基于金属矩形波导的石墨烯材料吸 波和屏蔽效能校准规范

Calibration Specification for Absorbing and Shielding Effectiveness of
Graphene Based on Metal Rectangular Waveguide
(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

北京市市场监督管理局 发布

基于金属矩形波导的石墨烯
材料吸波和屏蔽效能
校准规范

Calibration Specification for Absorbing and Shielding
Effectiveness of Graphene Based on Metal Rectangular
Waveguide

JJF(京) XX-XXXX

归口单位：北京市市场监督管理局

主要起草单位：北京市计量检测科学研究院

参加起草单位：北京理工大学

合肥工业大学

本规范委托 xxxx 负责解释

目 录

引言.....	(II)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 术语及定义.....	(1)
4 概述.....	(2)
5 计量特性.....	(3)
6 校准条件.....	(4)
6.1 环境条件.....	(4)
6.2 测量标准及其他设备.....	(4)
7 校准项目和校准方法.....	(4)
7.1 校准项目.....	(5)
7.2 校准方法.....	(5)
7.2.1 外观和工作正常性检查.....	(5)
7.2.2 复介电常数.....	(6)
7.2.3 复磁导率.....	(8)
7.2.4 反射损耗.....	(8)
7.2.5 导电率.....	(9)
7.2.6 屏蔽效能.....	(9)
8 校准结果表达.....	(10)
9 复校时间间隔.....	(10)
附录 A 原始记录格式.....	(11)
附录 B 校准证书内页格式.....	(13)
附录 C 测量结果的不确定度评定示例.....	(14)

引 言

JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF1001《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范编制工作的基础性系列规范

本规范为首次发布。

基于金属矩形波导的石墨烯材料吸波和屏蔽效能校准规范

1 范围

本规范适用于频率为 8.2GHz~12.4GHz(X 波段), 采用金属矩形波导对石墨烯材料吸波和屏蔽效能的校准, 其它类型材料及频段也可参照本规范校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件:

GB/T 35679-2017 固体材料微波频段使用波导装置的电磁参数测量方法

JBT 13535-2018 电磁屏蔽 吸波片

GB/ T25471 - 2010 电磁屏蔽涂料的屏蔽效能测量方法

GB/ T12190- 2021 电磁屏蔽室屏蔽效能的测量方法

凡是注日期的引用文件, 仅注日期的版本适用于该规范; 凡是不注日期的引用文件, 其最新版本(包括所有的修改单)适用于本规范。

3 术语及定义

3.1 反射损耗 (RL) (playback carrier noise ratio offset)

反射损耗是指电磁波射入吸波材料表面后, 发生反射的能量与入射的能量之比。

3.2 屏蔽效能 (SE) (shielding effectiveness)

没有屏蔽体时接收到的信号值与在屏蔽体内接收到的信号值的比值, 即发射天线与接收天线之间存在屏蔽体以后所造成的插入损耗。

[来源: GB/T 12190-2021 05.21]

3.3 复相对介电常数(Complex permittivity)

复相对介电常数表示为:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' = \frac{\vec{D}}{\varepsilon_0 \vec{E}} \quad (1)$$

式中:

ε_r - 复相对介电常数;

ε_r' - 实相对介电常数, 复相对介电常数的实部;

ε_r'' -介电损耗指数，复相对介电常数虚部的负值；

ε_0 -真空介电常数，等于 $8.85 \times 10^{-12} F/m$ ；

\bar{D} -电位移矢量，单位为库伦每平方米 (C/m^2)；

\bar{E} -电场强度矢量，单位为伏每米 (V/m)。

注：固体材料的复相对介电常数由材料的分子极化特性、电荷移动特性等确定。本方法中针对的固体材料为各向同性固体材料，因此每一个频率点的复相对介电常数为单一复数。在各向异性介质中，复相对介电常数为三维空间张量。

[来源：GBT35679-2017 12.29]

3.4 复相对磁导率(Complex permeability)

复相对磁导率表示为：

$$\mu_r = \mu_r' - j\mu_r'' = \frac{\bar{B}}{\mu_0 \bar{H}} \quad (2)$$

式中：

μ_r -复相对磁导率；

μ_r' -实相对磁导率，复相对磁导率 \bar{H} 的实部；

μ_r'' -磁损耗指数，复相对磁导率虚部的负值；

μ_0 -真空磁导率，等于 $4\pi \times 10^{-7} H/m$ ；

\bar{B} -磁感应强度矢量，单位为特斯拉 (T)；

\bar{H} -磁场强度矢量，单位为安培每米 (A/m)。

注：固体材料的复相对磁导率由材料的磁力矩特性、磁化范围特性等确定。本方法中针对的固体材料为各向同性固体材料，因此每一个频率点的复相对磁导率为单一复数。在各向异性介质中，复相对磁导率为三维空间张量。

[来源：GBT35679-2017 12.29]

4 概述

石墨烯作为一种新型碳基材料，具有良好的导电性及特殊的边界效应，被广泛应用于电磁波吸收与屏蔽。吸波要求材料尽可能地吸收电磁波，要同时降低材料对电磁波的反射和透射。电磁屏蔽要求材料对电磁波的透射尽可能低，要提高材料对电磁波的反射性能，石墨烯材料的吸波和电磁屏蔽性能实质上就是对电磁波的反射和衰减特性。

测量原理见图 1，将一个被测样品放置在波导测量装置内，波导装置两端通

过波导同轴转换器连接至矢量网络网络分析仪。分别测量 S_{11} 、 S_{21} 、 S_{12} 、 S_{22} 参数。选择合适的数据处理方法(见附录)代入 S 参数值计算复相对介电常数、复相对磁导率、屏蔽效能，吸波性能和导电率。

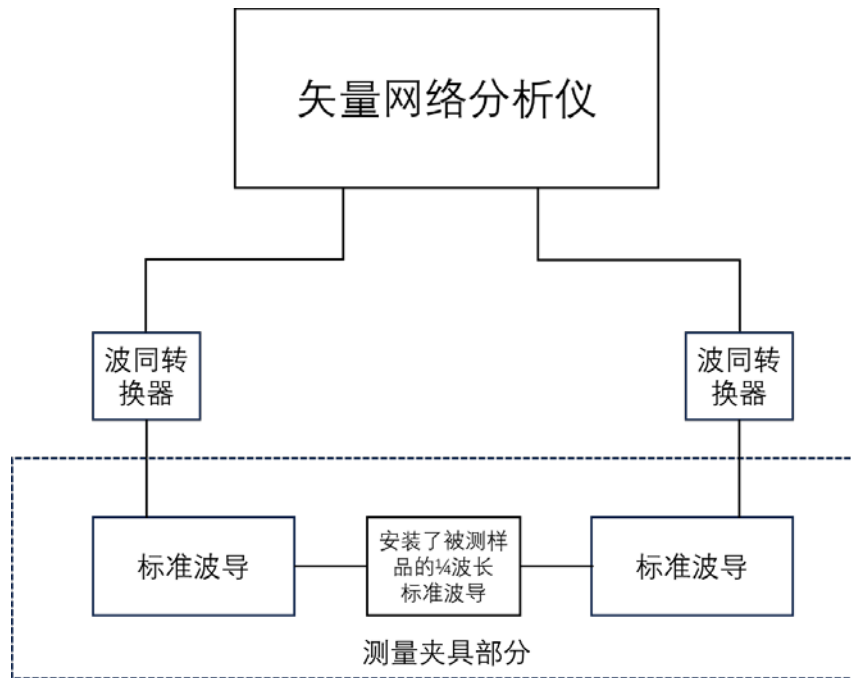


图 1 测量原理图

5 计量特性

5.1 复相对介电常数（介电常数、损耗角正切）

频率范围：8.2GHz~12.4GHz；

介电常数 ϵ' ：1~50； $|\Delta r' / r'| \leq 5\%$ ；

介电损耗角正切 $\tan\delta\epsilon$ ：0.01~1； $|\Delta \tan\delta\epsilon| \leq 10\% \times \tan\delta\epsilon + 0.05$ ；

5.2 复相对磁导率（磁导率、磁损耗角正切）

频率范围：8.2GHz~12.4GHz；

磁导率 $\mu r'$ ：0.3~10； $|\Delta \mu r' / \mu r'| \leq 5\%$ ；

磁损耗角正切 $\tan\delta\mu$ ：0.01~1.5； $|\Delta \tan\delta\mu| \leq 10\% \times \tan\delta\mu + 0.05$

5.3 反射损耗（RL）

频率范围：8.2GHz~12.4GHz；

反射损耗(RL)：0dB~50dB； $|\Delta RL / RL| \leq 2\text{dB}$ 。

5.4 导电率(σ)

频率范围：8.2GHz~12.4GHz；

导电率： $\geq 10^6 \text{ S/m}$ ； $|\Delta\sigma/\sigma| \leq 10\%$ 。

5.5 屏蔽效能(SE)

频率范围：8.2GHz~12.4GHz；

屏蔽效能 (SE)：0dB~100dB； $|\Delta SE/SE| \leq 2\text{dB}$

注：以上技术指标不做合格性判定，仅提供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：(23±5)℃。

6.1.2 相对湿度： $\leq 80\%$ 。

6.1.3 电源电压及频率：电压(220±11)V，频率(50±1)Hz。

6.1.4 周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 矢量网络分析仪

频率范围：8.2GHz~12.4GHz；

模值动态范围：-70dBm~0dBm，最大允许误差： $\pm 1\text{dB}$ ；

散射参数范围：单端模值0~1，双端模值：0dB~70dB；

相位： $-180^\circ \sim 180^\circ$ 。

6.2.2 波导夹具

频率范围：8.2GHz~12.4GHz；

反射损耗 (RL)： $\geq 40\text{dB}$ ；

长度：1/4波长片。

6.2.3 波导校准件

频率范围：8.2GHz~12.4GHz；

短路片反射系数： ≥ 0.99 ；

波导延迟片：1/4波长片。

6.2.4 千分尺

长度范围：(1~10) mm；

最大允许误差： $\pm 0.010\text{mm}$ 。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目及对应校准方法见表1。

表 1 校准项目及对应校准方法一览表

序号	校准项目名称	校准方法对应条款
1	外观及功能检查	7.2.1
2	复相对介电常数	7.2.2
3	复相对磁导率	7.2.3
4	反射损耗	7.2.4
5	导电率	7.2.5
6	屏蔽效能	7.2.6

7.2 校准方法

7.2.1 外观和工作正常性检查

7.2.1.1 材料尺寸

被测材料为固体材料，可依据金属矩形波导内壁尺寸加工为固定长宽高立方体，X 波段宽高为 22.86mm×10.16mm，加工公差 (-0.15~-0.05) mm，长度范围 (2~6) mm，用千分尺测量其长度 L。

7.2.1.2 矢量网络分析仪及波导夹具自校准

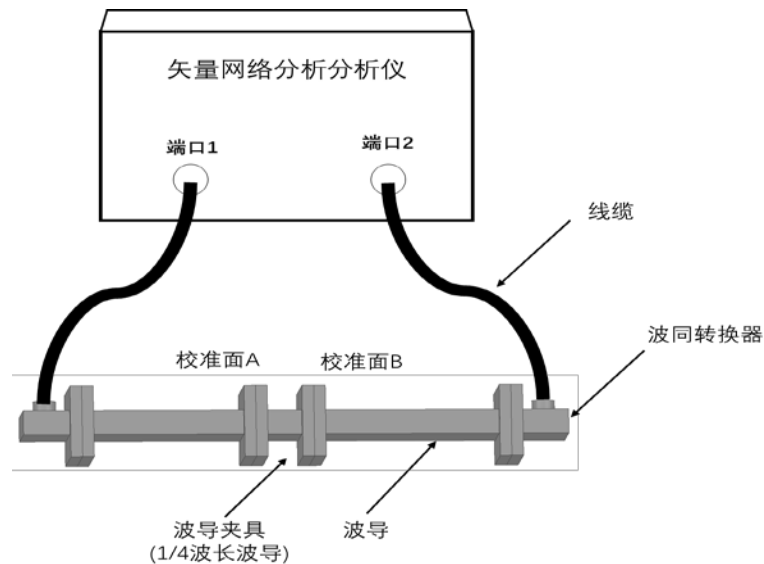


图 2 网络分析仪连接图

a) 矢量网络分析仪按说明书要求预热，按图2所示连接同轴线缆和波导同轴转换器。

b) 矢量网络分析仪的设置。

系统搭建完整，矢量网络分析仪进行预热之后，在这部分对其进行设置，按

照如下步骤操作。

(I) 设置频率：选 X 波段的波导为测量夹具，设置起始频率为 8.2GHz，终止频率为 12.4GHz；根据需要在设定频率范围内设置测量的点数，比如每隔 10MHz 采集一个点的数据设置 421 个点，20MHz 则设置 211 个点，50MHz 则设置 85 个点，即：需要测量的点数 = $\frac{\text{终止频率}-\text{起始频率}}{\text{需要间隔的频率}}+1$

(II) 中频带宽的设置：中频带宽(IFBW)是指网络分析仪接收机内部中频滤波器的带宽，设置 IFBW 一般需要平衡动态范围和测量速度两个因素。根据所用是网络分析仪的配置，结合测量精度与速度，在材料测量中设置，100Hz 到 1KHz 之间均可。

(III) 输出功率的设置：输出功率反映了矢量网络分析仪中的信号发生器对被测材料的信号激励功率。材料测量一般在矢量网络分析仪的 power 量程之内即可，但对于大动态范围，采用-10dBm，0dBm。

c) 系统校准。

测量系统采用精度更高的校准方式TRL校准，校准操作步骤如下：

(I) 首先所用校准件的校准数据植入到矢量网络分析仪中，矢量网络分析仪一般会带有不同波段的TRL校准件校准参数。系统中采用MEMF-WR90波导，则按照如下操作植入。

在矢量网络分析仪中找到校准功能 (Cal)，然后选择校准套件 (Calkit)，进入校准套件后找到导入 (Import)，再选择所用的校准数据 (MEMF-WR90)，最后确定即可。

(II) 在矢量网络分析中对系统进行TRL校准。

在矢量网络分析仪中找到校准功能 (Cal)，然后进行开始校准 (Start Cal)，然后选择波导 (Waveguide) 和MEMF-WR90校准数据，按照提示步骤进行校准。

依次在校准面A连接短路器，在校准面B连接短路器，在校准件A和B之间连接1/4波长波导片，校准面A和校准面直接连接，分别完成各项校准。

7.2.2 复相对介电常数

a) 设备连接如图 1，把被测材料装入测试矩形波导中，样品一侧表面与波导法兰平面齐平，安装过程要避免损坏被测材料。

b) 把装有被测材料的矩形波导固定在校准面 A、B 之间，使矩形波导之间

对齐且连接紧密。

c) 设置矢量网络分析仪分别测试 S_{11} 、 S_{21} ，按式 (3) ~ (10) 计算复相对介电常数。

按式 (3)、(4) 计算修正后的传输系数 S'_{21} 。

$$\gamma_0 = \sqrt{k_c^2 - k_0^2} \quad (3)$$

$$S'_{21} = S_{21} \times e^{-\gamma_0 L} \quad (4)$$

式中：

S'_{21} —因被测样品长度而修正后的传输系数；

S_{21} —矢量网络分析仪直接测量被测样品的传输系数；

k_c — π/a ， a 矩形波导横截面内壁的宽，单位米 (m)；

k_0 — $2\pi/\lambda_0$ ， λ_0 测量频率对应的波长，单位米 (m)；

L —被测样品的长度，单位米 (m)。

按式 (5)、(6) 计算中间变量 X 、 Γ ，(6) 式中存在“±”，可得到 2 个计算结果，只选取 $|\Gamma| \leq 1$ 的结果。

$$X = \frac{S_{11}^2 - S_{21}'^2 + 1}{2S_{11}} \quad (5)$$

$$\Gamma = X \pm \sqrt{X^2 - 1} \quad (6)$$

式中：

X 、 Γ —中间变量；

S_{11} —矢量网络分析仪直接测量被测样品的反射系数；

按式 (7)、(8) 计算中间变量 T 、 Λ 。

$$T = \frac{S_{11} + S_{21}' - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21}')\Gamma} \quad (7)$$

$$\Lambda^2 = -\left[\frac{2\pi L}{\ln(T)}\right]^2 \quad (8)$$

式中：

T 、 Λ —中间变量。

按式 (9) 和式 (10) 计算复相对磁导率 μ_r 和复相对介电常数 ϵ_r 。

$$\mu_r = \frac{2\pi}{\Lambda} \sqrt{k_0^2 - k_c^2} \left(\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}\right) \quad (9)$$

$$\epsilon_r = \frac{1}{\mu_r k_0^2} \left(\frac{4\pi^2}{\Lambda^2} + k_c^2\right) \quad (10)$$

按式 (11)、(12) 计算实介电常数 ε_r' ，介质损耗指数 ε_r'' 。

$$\varepsilon_r' = \mathcal{R}\left(\frac{1}{\mu_r k_0^2} \left(\frac{4\pi^2}{\Lambda^2} + k_c^2\right)\right) \quad (11)$$

$$\varepsilon_r'' = -\mathcal{I}\left(\frac{1}{\mu_r k_0^2} \left(\frac{4\pi^2}{\Lambda^2} + k_c^2\right)\right) \quad (12)$$

式中：

$\mathcal{R}\left(\frac{1}{\mu_r k_0^2} \left(\frac{4\pi^2}{\Lambda^2} + k_c^2\right)\right) - \frac{1}{\mu_r k_0^2} \left(\frac{4\pi^2}{\Lambda^2} + k_c^2\right)$ 的实部；

$\mathcal{I}\left(\frac{1}{\mu_r k_0^2} \left(\frac{4\pi^2}{\Lambda^2} + k_c^2\right)\right) - \frac{1}{\mu_r k_0^2} \left(\frac{4\pi^2}{\Lambda^2} + k_c^2\right)$ 的虚部。

介电损耗角正切 $\tan\delta\varepsilon$

$$\tan\delta\varepsilon = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad (13)$$

7.2.3 复相对磁导率

a) 设备连接如图1，按7.2.2 a)~b)步骤装入材料。

b) 设置矢量网络分析仪分别测试 S_{11} 、 S_{21} ，按式(3)~(8)计算中间变量，按(9)计算复相对磁导率 μ_r 。

按式(14)、(15)计算实磁导率 μ_r' ，磁损耗指数 μ_r'' 。

$$\mu_r' = \mathcal{R}\left(\frac{2\pi}{\Lambda\sqrt{k_0^2 - k_c^2}} \left(\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}\right)\right) \quad (14)$$

$$\mu_r'' = -\mathcal{I}\left(\frac{2\pi}{\Lambda\sqrt{k_0^2 - k_c^2}} \left(\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}\right)\right) \quad (15)$$

式中：

$\mathcal{R}\left(\frac{2\pi}{\Lambda\sqrt{k_0^2 - k_c^2}} \left(\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}\right)\right) - \frac{2\pi}{\Lambda\sqrt{k_0^2 - k_c^2}} \left(\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}\right)$ 的实部；

$\mathcal{I}\left(\frac{2\pi}{\Lambda\sqrt{k_0^2 - k_c^2}} \left(\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}\right)\right) - \frac{2\pi}{\Lambda\sqrt{k_0^2 - k_c^2}} \left(\frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}\right)$ 的虚部。

磁损耗角正切 $\tan\delta\mu$

$$\tan\delta\mu = \frac{\mu_r''}{\mu_r'} \quad (16)$$

7.2.4 反射损耗

a) 设备连接如图1，按7.2.2 a)~b)步骤装入材料。

b) 设置矢量网络分析仪分别测试 S_{11} 、 S_{21} 、 S_{12} 、 S_{22} ，首先依据7.2.2、7.2.3计算复相对介电常数、复相对磁导率校准结果，再按式(17)、(18)计算反射损耗RL。

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[j \left(\frac{2\pi f d}{c} \right) \sqrt{\mu_r \epsilon_r} \right] \quad (17)$$

$$RL(dB) = 20 \log \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (18)$$

式中：

Z_{in} —输入阻抗；

Z_0 —自由空间阻抗；

j —虚数单位；

c —自由空间电磁波的速度，等于 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ ；

f —频率；

d —样品厚度。

7.2.5 导电率

a) 设备连接如图 1，按 7.2.3 a)~b) 步骤装入材料。

b) 设置矢量网络分析仪分别测试 S_{11} 、 S_{21} 、 S_{12} 、 S_{22} ，首先依据 7.2.2、7.2.3 计算复相对介电常数、复相对磁导率校准结果，根据麦克斯韦方程与介电函数方程按式 (19) 计算导电率。

$$\sigma = \epsilon_r'' \omega \epsilon_0 \quad (19)$$

式中：

ω —角速度；

ϵ_0 —真空介电常数，等于 $8.85 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ；

7.2.6 屏蔽效能

a) 设备连接如图1，按7.2.3 a)~b)步骤装入材料。

b) 设置矢量网络分析仪分别测试 S_{11} 、 S_{21} ，根据 Schelkunoff 电磁屏蔽理论，按公式 (20)、(21) 计算屏蔽效能。

$$R = |S_{11}|^2 \quad (20)$$

$$T = |S_{21}|^2 \quad (21)$$

$$SE_{ref}(dB) = -10 \log(1 - R) \quad (22)$$

$$SE_{abs}(dB) = -10 \log \left(\frac{T}{1-R} \right) \quad (23)$$

$$SE_{total}(dB) = SE_{ref} + SE_{abs} \quad (24)$$

式中：

SE_{ref} —反射损耗；

SE_{abs} —吸收损耗；

SE_{total} —总电磁屏蔽效能；

8 校准结果表达

校准后，出具校准证书。校准结果应在校准证书上反映，校准证书应至少包括以下信息：

- a) 标题，如“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点(如果与实验室的地址不同)；
- d) 证书的唯一性标识(如编号)，每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性和应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；
- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

校准原始记录格式见附录A，校准证书内页格式见附录B、校准结果不确定度评定示例见附录C。

9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素所决定，送校单位可根据实际使用情况去确定复校时间间隔。建议复校时间间隔为1年。

附录 A

原始记录格式

原始记录格式

委托单位	
被校设备	
校准地点	
环境条件	
校准时间	
校准人员	
核验人员	
校准依据	
校准仪器	
校准项目	<input type="checkbox"/> 外观及工作正常性检查 <input type="checkbox"/> 复相对介电常数 <input type="checkbox"/> 复相对磁导率 <input type="checkbox"/> 反射损耗 <input type="checkbox"/> 导电率 <input type="checkbox"/> 屏蔽效能

A.1 外观和工作正常性检查

外观： <input type="checkbox"/> 完好 <input type="checkbox"/> 损坏
工作正常性检查： <input type="checkbox"/> 正常 <input type="checkbox"/> 异常

A.2 复相对介电常数

样品编号	复相对介电常数 (F/m)	测量不确定度 (F/m)

A.3 复相对磁导率

样品编号	复相对磁导率 (H/m)	测量不确定度 (H/m)

A.4 反射损耗 (RL)

样品编号	反射损耗 (dB)	测量不确定度 (dB)

A.5 导电率

样品编号	导电率 (S/m)	测量不确定度 (S/m)

--	--	--

A.6 屏蔽效能 (SE)

样品编号	屏蔽效能 (dB)	测量不确定度 (dB)

附录 B

校准证书内页格式

校准证书内页格式

B.1 外观和工作正常性检查

外观： <input type="checkbox"/> 完好 <input type="checkbox"/> 损坏
工作正常性检查： <input type="checkbox"/> 正常 <input type="checkbox"/> 异常

B.2 复介电常数

样品编号	复介电常数 (F/m)	测量不确定度 (F/m)

B.3 复磁导率

样品编号	复磁导率 (H/m)	测量不确定度 (H/m)

B.4 反射损耗 (RL)

样品编号	反射损耗 (dB)	测量不确定度 (dB)

B.5 导电率

样品编号	导电率 (S/m)	测量不确定度 (S/m)

B.6 屏蔽效能 (SE)

样品编号	屏蔽效能 (dB)	测量不确定度 (dB)

概述

本规范给出了基于金属矩形波导的石墨烯材料的复介电常数、复磁导率、反射损耗、导电率和屏蔽效能的校准方法。下面对 1PPS 时间偏差、NTP 时间偏差、PTP 偏差的测量不确定度给出评定示例。石墨烯材料吸波和屏蔽测量的不确定度来源

- 矢量网络分析仪和附件引入的不确定度
- 样品不规则造成气隙引入的不确定度
- 样品夹具不规则造成气隙引入的不确定度
- 样品在夹具中位置引入的不确定度
- 样品厚度误差引入的不确定度
- 样品厚度不均匀引入的不确定度

C.1 矢量网络分析仪和附件引入的不确定度

矢量网络分析仪测量的不确定度是仪器和线缆出厂时固有的，一般矢量网络分析仪测量引入的最大不确定度为 $U =$

C.2 样品不规则造成气隙引入的不确定度

C.2.1 测量模型

通过对材料复介电常数（介电常数和介电损耗正切角）测量，对标准样和不规则的样品的复介电常数进行测量，获得结果后用如下标准不确定度方法计算出来。

$$U_A = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(s_i - \bar{s})^2}{n(n-1)}}$$

式中：

C.2.2 标准不确定度的来源及评定

不确定度来源主要有样品高度方向尺寸引入的不确定度、样品宽度方向尺寸引入的不确定度。

C.2.2.1 样品高度方向引入的不确定度

以样品高度方向不规则样品为例，气隙宽度假设为 1mm，标准不确定度分量为：1.05%

C.2.2.2 样品宽度方向引入的不确定度

以样品宽度方向不规则样品为例，气隙宽度假设为 1mm，标准不确定度分量为：1.87%

C.2.2.3 标准不确定度一览表

不确定度来源	分布	包含因子	不确定度分量
样品高度方向 u_1	均匀	$\sqrt{3}$	1.05%
样品宽度方向 u_2	均匀	$\sqrt{3}$	1.87%

C.2.3 不确定度分量之间相关性

估计各不确定度分量之间无相关性。

C.2.4 合成标准不确定度

当各不确定度分量彼此不相关时，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \approx 2.15\%$$

C.2.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c \approx 4.3\%$$

样品不规则造成气隙引入的不确定度为 $U = 4.3\%$ ($k=2$)

C.3 样品夹具不规则造成气隙引入的不确定度

C.3.1 测量模型

通过对材料复介电常数（介电常数和介电损耗正切角）测量，对标准样和不规则的样品的复介电常数进行测量，获得结果后用如下标准不确定度方法计算出来。

$$U_A = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(s_i - \bar{s})^2}{n(n-1)}}$$

C.3.2 测量不确定度来源

不确定度来源主要有样品夹具高度方向尺寸引入的不确定度、样品夹具宽度方向尺寸引入的不确定度。

C.3.3 标准不确定度分量的评定

C.3.3.1 样品夹具高度方向引入的不确定度

以样品夹具高度方向不规则样品为例，气隙宽度假设为 0.1mm，标准不确定度分量为：0.35%

C.3.3.2 样品夹具宽度方向引入的不确定度

以样品夹具宽度方向不规则样品为例，气隙宽度假设为 0.1mm，标准不确定度分量为：0.73%

C.3.3.3 标准不确定度一览表

不确定度来源	分布	包含因子	不确定度分量
样品夹具高度方向 u_1	均匀	$\sqrt{3}$	0.35%
样品夹具宽度方向 u_2	均匀	$\sqrt{3}$	0.73%

C.3.4 不确定度分量之间相关性

估计各不确定度分量之间无相关性。

C.3.5 合成标准不确定度

当各不确定度分量彼此不相关时，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \approx 0.81\%$$

C.3.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c \approx 1.62\%$$

样品不规则造成气隙引入的不确定度为 $U = 1.62\%$ ($k=2$)

C.4 ——样品在夹具中位置引入的不确定度

C.4.1 测量模型

通过对材料复介电常数（介电常数和介电损耗正切角）测量，对标准样和不规则的样品的复介电常数进行测量，获得结果后用如下标准不确定度方法计算出

来。

$$U_A = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(s_i - \bar{s})^2}{n(n-1)}}$$

C.4.2 测量不确定度来源

不确定度来源主要有样品在夹具中的误差引入的不确定度。

C.4.3 标准不确定度分量的评定

C.4.3.1 样品在夹具中的位置引入的不确定度

以样品在夹具位置偏离参考面位置 1mm 为例，标准不确定度分量为：1.13%

C.4.3.2 标准不确定度一览表

不确定度来源	分布	包含因子	不确定度分量
样品夹具高度方向 u_1	均匀	$\sqrt{3}$	1.13%

C.4.4 不确定度分量之间相关性

估计各不确定度分量之间无相关性。

C.4.5 合成标准不确定度

当各不确定度分量彼此不相关时，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2} \approx 1.13\%$$

C.4.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c \approx 2.26\%$$

样品不规则造成气隙引入的不确定度为 $U = 2.26\%$ ($k=2$)

C.5 ——样品厚度误差引入的不确定度

C.5.1 测量模型

通过对材料复介电常数（介电常数和介电损耗正切角）测量，对标准样和不规则的样品的复介电常数进行测量，获得结果后用如下标准不确定度方法计算出来。

$$U_A = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(s_i - \bar{s})^2}{n(n-1)}}$$

C.5.2 测量不确定度来源

不确定度来源主要有样品厚度误差引入的不确定度。

C.5.3 标准不确定度分量的评定

C.5.3.1 样品在夹具中的位置引入的不确定度

以样品厚度偏差 1mm 为例，标准不确定度分量为：1.13%

C.5.3.2 标准不确定度一览表

不确定度来源	分布	包含因子	不确定度分量
样品厚度误差 u_1	均匀	$\sqrt{3}$	0.34%

C.5.4 不确定度分量之间相关性

估计各不确定度分量之间无相关性。

C.5.5 合成标准不确定度

当各不确定度分量彼此不相关时，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2} \approx 0.34\%$$

C.5.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c \approx 0.68\%$$

样品不规则造成气隙引入的不确定度为 $U = 0.68\%$ ($k=2$)

确定度为 $U = 0.50\text{MHz}$ ($k=2$)

C.6 ——样品厚度不均匀引入的不确定度

C.6.1 测量模型

通过对材料复介电常数（介电常数和介电损耗正切角）测量，对标准样和不规则的样品的复介电常数进行测量，获得结果后用如下标准不确定度方法计算出来。

$$U_A = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(s_i - \bar{s})^2}{n(n-1)}}$$

C.6.2 测量不确定度来源

不确定度来源主要有样品高度方向不均匀引入的不确定度、样品夹具宽度方

向不均匀引入的不确定度。

C.6.3 标准不确定度分量的评定

C.6.3.1 样品夹具高度方向引入的不确定度

以样品高度方向不均匀样品为例，曲面高度假设为 0.1mm，标准不确定度分量为：0.33%

C.6.3.2 样品夹具宽度方向引入的不确定度

以样品宽度方向不均匀样品为例，曲面高度假设为 0.1mm，标准不确定度分量为：0.85%

C.6.3.3 标准不确定度一览表

不确定度来源	分布	包含因子	不确定度分量
样品高度方向 u_1	均匀	$\sqrt{3}$	0.33%
样品宽度方向 u_2	均匀	$\sqrt{3}$	0.85%

C.3.4 不确定度分量之间相关性

估计各不确定度分量之间无相关性。

C.3.5 合成标准不确定度

当各不确定度分量彼此不相关时，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \approx$$

C.3.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c \approx$$

样品不规则造成气隙引入的不确定度为 $U = 0.91\%$ ($k=2$)

