



中华人民共和国国家标准

GB/T 43801—2024/IEC 61189-2-721:2015

微波频段覆铜箔层压板相对介电常数和 损耗正切值测试方法 分离介质谐振器法

Measurement of relative permittivity and loss tangent for copper clad laminate
at microwave frequency—Split post dielectric resonator method

(IEC 61189-2-721:2015, Test methods for electrical materials, printed boards
and other interconnection structures and assemblies—Part 2-721: Test methods
for materials for interconnection structures—Measurement of relative
permittivity and loss tangent for copper clad laminate at microwave frequency
using split post dielectric resonator, IDT)

2024-03-15发布

2024-07-01实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会

发布

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 试样 1

5 设备/仪器 3

6 程序 5

7 报告 9

8 附加信息 10

附录 A (资料性) 测试夹具和测试结果的范例 11

附录 B (资料性) $K_{\epsilon}(\epsilon_r, h)$ 和 p_{es} 的一些附加信息 14

参考文献 17

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件等同采用 IEC 61189-2-721:2015《电气材料、印制板和其他互连结构和组装件的测试方法 第2-721部分：互连结构材料测试方法 微波频段覆铜箔层压板相对介电常数和损耗正切值分离介质谐振器测试方法》。

本文件增加了“规范性引用文件”和“术语和定义”两章。

本文件做了下列最小限度的编辑性改动：

- 为与现有标准协调,将标准名称改为《微波频段覆铜箔层压板相对介电常数和损耗正切值测试方法 分离介质谐振器法》；
- 5.3.2、6.2.6、6.2.9增加了注；
- 6.2.11.3增加了注1和注2；
- 6.3.7增加了注1和注2；
- 6.3.10、6.3.13.1、6.3.13.2、6.3.13.3增加了注。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中华人民共和国工业和信息化部提出。

本文件由全国印制电路标准化技术委员会(SAC/TC47)归口。

本文件起草单位：广东生益科技股份有限公司、中国电子技术标准化研究院、西安交通大学、深南电路股份有限公司、江苏生益特种材料有限公司、苏州生益科技有限公司、江西生益科技有限公司、陕西生益科技有限公司、常熟生益科技有限公司、浙江华正新材料股份有限公司、南亚新材料科技股份有限公司、工业和信息化部电子第五研究所、电子科技大学。

本文件主要起草人：葛鹰、刘文龙、刘申兴、曾耀德、何毅、蔡建伟、杨艳、曹易、向锋、戴炯、陆平、叶晓菁、王隼、袁告、罗鹏辉、邢燕侠、王曼曼、沈泉锦、周蓓、粟俊华、贺光辉、何骁、李恩、余承勇、陈泽坚。

微波频段覆铜箔层压板相对介电常数和 损耗正切值测试方法 分离介质谐振器法

1 范围

本文件描述了采用分离式介质谐振器(SPDR)测定层压板 1.1 GHz~ 20GHz范围内离散频率点下的相对介电常数(D_k 或 ϵ_r)和介质损耗角正切(D_f 或 $\tan\delta$)的方法。

本文件适用于印制板用覆铜箔层压板和绝缘介质基材的测试。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

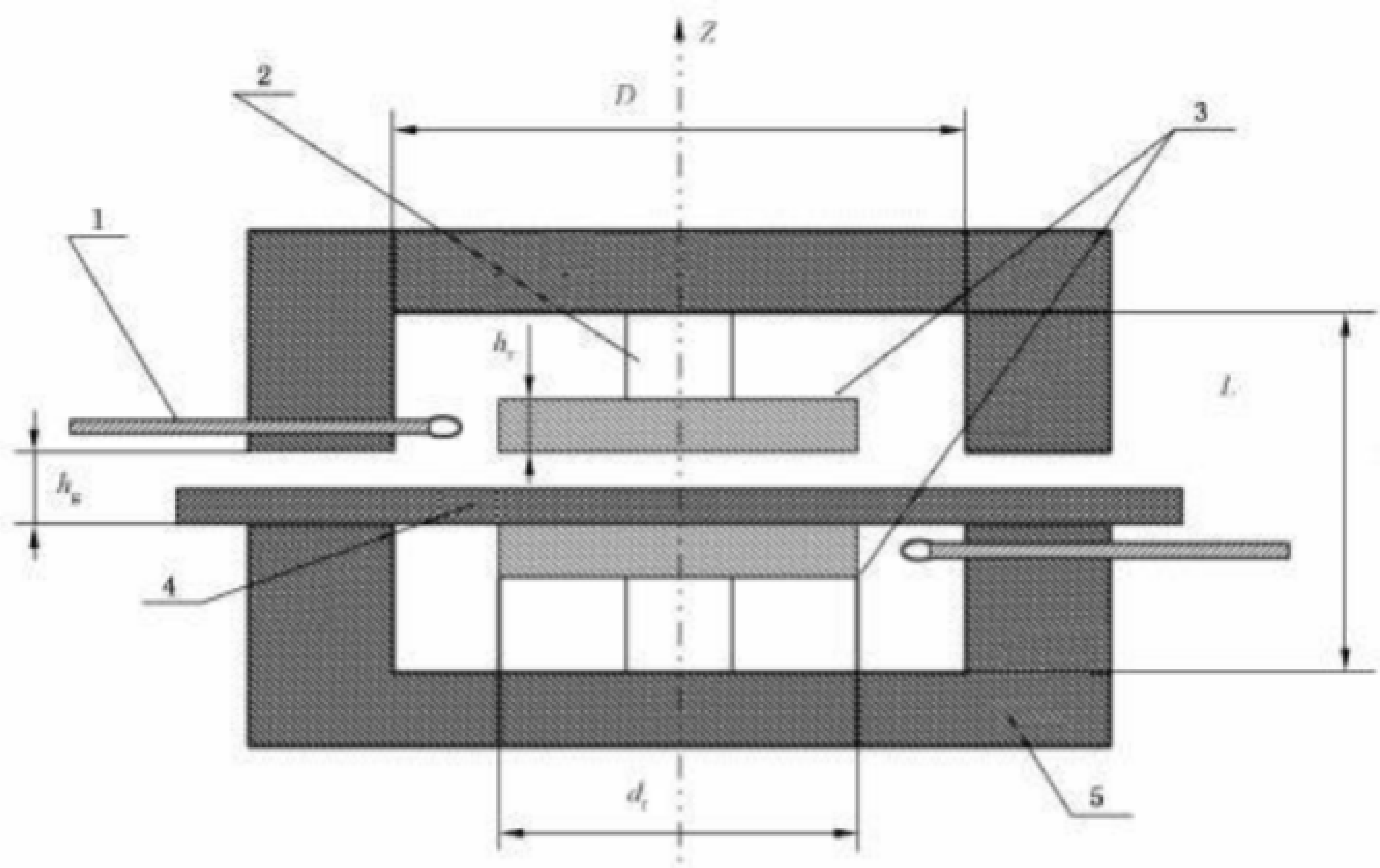
3 术语和定义

本文件没有需要界定的术语和定义。

4 试样

4.1 试样尺寸

试样尺寸应大于金属腔体的内直径(D),并且试样的最大厚度应小于夹具上下金属腔体的间距(h_g),如图 1所示。



- 标引序号说明：
- 1 — 耦合环；
 - 2 — 支柱；
 - 3 — 介质谐振器；
 - 4 — 样品；
 - 5 — 金属腔体；
- h_g — 夹具上下金属腔体的间距；
- D — 金属腔体的内直径；
- L — 金属腔体的内高度；
- d_r — 介质谐振器的直径；
- h_r — 介质谐振器的厚度。

图 1 SPDR测试夹具的示意图

在测试频率下，3块试样用于室温条件下测试，1块试样用于不同温度条件下测试。各常用标称频率夹具的推荐试样尺寸见表 1。

表 1 试样尺寸

SPDR测试夹具的标称频率 GHz	试样最大尺寸 mm	试样最大厚度 mm
1.1	150×150	6.0
3	80×80	3.0
5~6	80×80	2.0
9~10	80×80	0.9
13~16	50×35	0.6
18~20	15×15	0.5

如适用，更小的样品尺寸或者其他形状也是可用的，只要试样的尺寸不大于表 1 的尺寸且能够完全覆盖金属腔体内直径即可。例如：130 mm×130 mm 试样尺寸可用于 1.1 GHz夹具。

4.2 准备

蚀刻去除覆铜箔层压板所有铜箔并且清洗干净。

4.3 标记

使用铅笔或其他合适方式在各个试样的左上角进行标记。

4.4 厚度

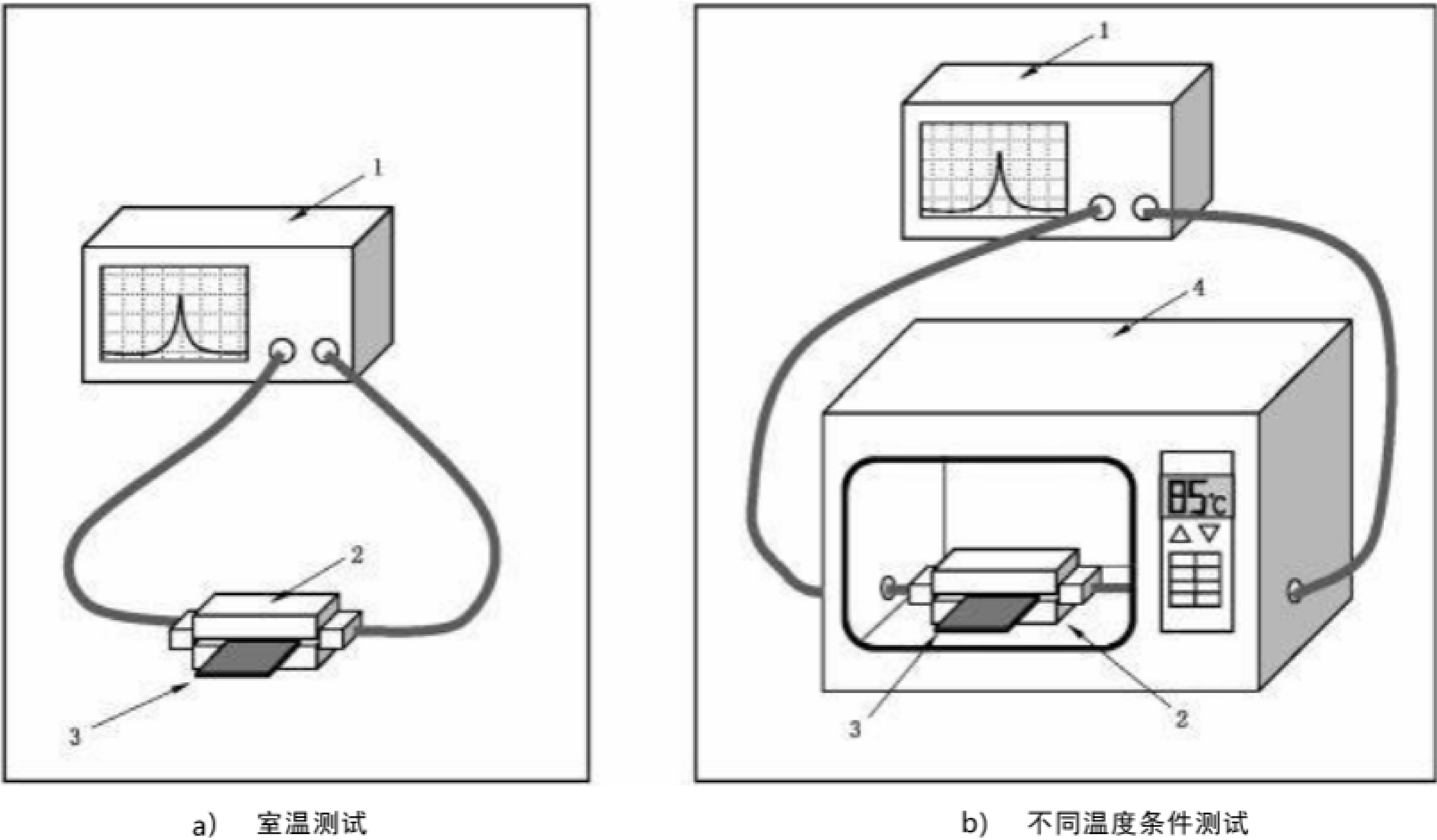
在测试夹具的最大间隙范围内,试样越厚,测量误差越小。薄试样可将试样叠加至最小 0.4 mm 厚度以提高测量精度。

注：叠加样品间的空气间隙对测试结果的影响忽略不计。

5 设备/仪器

5.1 测试系统

测试系统组成如图 2所示。



标引序号说明：

- 1—VNA;
- 2—SPDR测试夹具；
- 3—样品；
- 4—环境试验箱。

图 2 测试系统组成图

5.2 矢量网络分析仪(VNA)

VNA应满足以下要求：

- a) 频率范围至少应为 500 MHz~ 20GHz。

b) 动态跟踪范围应大于 60 dB。

5.3 SPDR测试夹具

5.3.1 测试夹具

图 1 为 SPDR测试夹具的示意图。

5.3.2 参数

表 2列出了常用的 SPDR测试夹具的标称频率、 h_g 和 D 的对应关系。

表 2 SPDR测试夹具推荐的参数

SPDR测试夹具的标称频率 GHz	D mm	h_g mm
1.1	120	6.0
3	50	3.0
5~6	30	2.0
9~10	22	0.9
13~16	15	0.6
18~20	10	0.5

注：SPDR 的夹具是一个夹具对应一个频率点,夹具的标称频率是离散的频率点,夹具是根据用户频率要求定制的,要测试不同频率的 D_k/D_f ,需要选择不同的夹具,并不是一个夹具能测试 1.1 GHz~ 20 GHz的所有频率。夹具的设计值与实际值会有细微差别,例如,向供应商定制一个 5 GHz的夹具,夹具制作出来后,可能是 5.052 GHz或者 5.123 GHz等,而不是刚好 5 GHz。

5.3.3 频率

对于不同的测试频率,使用相应的标称频率的 SPDR 测试夹具。定制夹具时,实际频率与定制目标频率的偏差宜不超过 ± 0.2 GHz。

5.4 校验装置

校验装置包括以下内容：

- a) 标样,例如:单晶石英或等效标样；
- b) VNA校准组件。

5.5 千分尺

千分尺的分辨率达到或优于 0.001 mm,允许误差达到或优于 ± 0.002 mm。

5.6 循环式烘箱

循环式烘箱的温度能稳定在 105^{+5}_{-2} ℃。

5.7 试验箱

用于不同温度条件下试验的环境试验箱应符合下列要求：

- a) 温度范围： -125 ℃ ~ $+110$ ℃,其他温度范围由供需双方协商；

b) 温度设定值与实际值偏差不超过 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

6 程序

6.1 预处理

所有试样蚀刻后应先在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的循环式烘箱中干燥 2 h,然后在 $(23\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和相对湿度 $(50\pm 5)\%$ 下处理至少 24h。

6.2 室温下相对介电常数和介质损耗角正切的测试

6.2.1 测试条件

测试条件温度应为 $(23\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度应为 $(50\pm 5)\%$ 。试验过程中环境温度的波动不应超过 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

6.2.2 仪器预热

矢量网络分析仪至少预热 30 min,使其达到稳定。

6.2.3 夹具的选择

按照要求的测试频率选择 SPDR测试夹具。试样尺寸和厚度应符合表 1 的要求。例如,如果测试频率为 10GHz,应选择标称频率为 10GHz的 SPDR测试夹具。试样尺寸应为 $80\text{ mm}\times 80\text{ mm}$,试样最大厚度不超过 0.9 mm。

6.2.4 连接 VNA

连接 VNA 和 SPDR测试夹具。测试夹具应水平放置。

6.2.5 VNA参数的设定

根据仪器设备供应商的说明书及所用夹具的标称频率设置 VNA参数。

6.2.6 空载时谐振频率和品质因数的测定

测量 SPDR测试夹具的空腔谐振频率(f_0)和品质因数(Q_0)值。当测量品质因数值时,VNA 的频率带宽(span)应调节为谐振曲线半高宽度的 110%~200%。

注:空腔谐振频率(f_0)和品质因数(Q_0)值能从网络分析仪上直接读取,仪器设置参照设备供应商的说明文件,见 6.2.5。

6.2.7 试样厚度测量

使用千分尺测量试样厚度并记作 h 。

6.2.8 放入试样

将试样插入测试夹具,试样的标记面朝上放置并且试样边缘和夹具边缘对齐。

6.2.9 加载样品后谐振频率和品质因数的测定

测量 SPDR测试夹具的有载谐振频率(f_s)和品质因数(Q_s)值。当测量品质因数值时,VNA 的频率带宽(span)应调节为谐振曲线半高宽度的 110%~200%。

注：有载谐振频率(f_s)和品质因数(Q_s)值能从网络分析仪上直接读取,仪器设置参照设备供应商的说明文件,见 6.2.5。

6.2.10 比较

无样品和加载样品的谐振峰频率的变化示意图,如图 3 所示。

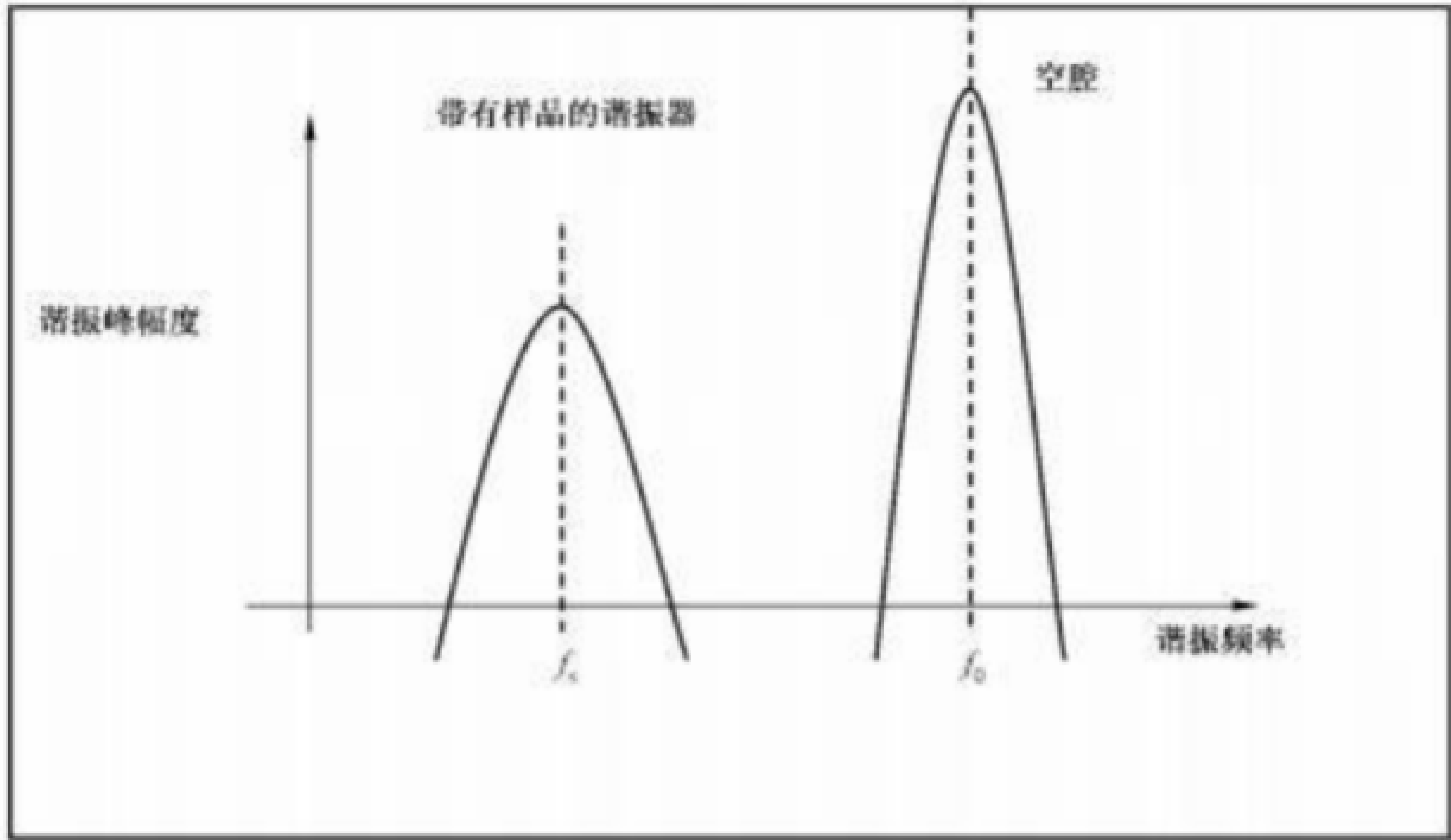


图 3 无样品和加载样品的谐振峰频率的变化示意图

6.2.11 计算

6.2.11.1 通则

室温下相对介电常数和介质损耗角正切应按照以下步骤计算。宜使用设备供应商提供的计算机软件进行计算。

6.2.11.2 相对介电常数

相对介电常数(ϵ_r)按公式(1)进行计算：

$$\epsilon_r = 1 + \frac{f_0 - f_s}{hf_{0K_e(\epsilon_r, h)}} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- ϵ_r — 相对介电常数；
- h — 样品的厚度,单位为毫米(mm)；
- f_0 — 空载 SPDR 的谐振频率,单位为兆赫兹(MHz)；
- f_s — 插入样品后的谐振频率,单位为兆赫兹(MHz)；
- $K_e(\epsilon_r, h)$ — 与 ϵ_r 和 h 有关的函数,对于一个给定的谐振器,它的物理参数(尺寸,谐振器的相对介电常数 ϵ_r) 是确定的。 $K_e(\epsilon_r, h)$ 由严格的瑞利-里兹(Rayleigh-Ritz)方法计算得出的。将空载 SPDR 的谐振频率(f_0)、插入样品后的谐振频率(f_s)以及样品的厚度(h)带入公式(1)。样品相对介电常数相近的任意数值,采用逐步逼近的算法,经多次迭代后,当最后两次计算出的相对介电常数相对误差小于 0.1%,即认为运算结束,最后一次计算所得的相对介电常数即为测试样品的相对介电常数。更多信息参考附录 B。

6.2.11.3 介质损耗角正切

介质损耗角正切由公式(2)得出：

$$\tan\delta = \frac{(Q_s^{-1} - Q_{nr}^{-1} - Q_c^{-1})}{D_m}$$

.....(2)

- $\tan\delta$ —介质损耗角正切；

Q_s —加载了样品的谐振器的 Q 值；

Q_c —有载时,基于谐振器中的金属的损耗的 Q 值；

Q_{DR} —有载时,基于谐振器中的电介质的损耗的 Q 值；

p_{es} —样品的电磁能量填充因子。当谐振器的物理参数确定之后,电磁能量填充因子 p_{es} 可通过电磁场仿真得到。对于一个给定的谐振器, p_{es} 是一个常量。更多的信息参考附录 B。

注 1: Q_c 通过公式 $Q_c = Q_{c0}K_2(\epsilon r, h)$ 得到, Q_{c0} 是腔体结构相关的参数,更多的信息参考附录 B。

注 2: Q_{DR} 通过公式 $Q_{DR} = Q_{DR0}(f_0/f_s)(p_{eDR0}/p_{eDR})$ 得到, p_{eDR} 和 p_{eDR0} 分别是加载样品和空腔的分裂式谐振器介质的电磁能量填充因子, Q_{DR0} 是空腔的介质谐振器损耗引起的 Q 值,通过公式 $Q_{DR0} = (Q_0^{-1} - Q_c^{-1})^{-1}$ 得到,更多的信息参考附录 B。

6.2.12 更换试样

对其余两个样品重复 6.2.6~ 6.2.11的步骤。

6.2.13 更换频率

如果选择其他测试频率,在更换对应频率的 SPDR夹具后,重复 6.2.3~ 6.2.12步骤。

6.3 不同温度条件下相对介电常数和介质损耗角正切的测试

6.3.1 测试环境条件

环境温度应为 23 °C ±2 °C。试验过程中环境温度的波动不应超过 1 °C。

6.3.2 仪器预热

矢量网络分析仪至少预热 30 min,使其达到稳定。

6.3.3 夹具的选择

按照要求的测试频率选择 SPDR测试夹具。试样尺寸和厚度应符合表 1 的要求。例如,如果测试频率为 10GHz,应选择标称频率为 10GHz的 SPDR测试夹具。试样尺寸应为 80 mm×80 mm,试样最大厚度不超过 0.9 mm。

6.3.4 连接 VNA

连接 VNA 和 SPDR测试夹具。测试夹具应水平放置。

6.3.5 VNA参数的设定

根据供应商的说明书及所用夹具的标称频率设置 VNA参数。

6.3.6 试验箱温度

设置试验箱的测试温度,当达到设置的测试温度(T)的时候,保温至少 15 min。

设置试验箱的测试温度 T 时,一般先设置为基准温度 T_{ref} ,测试基准温度下的相对介电常数和介质损耗角正切,宜使用的基准温度为 $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

6.3.7 空载时谐振频率和品质因数的测定

测量 SPDR测试夹具的空腔谐振频率 $f_0(T)$ 和品质因数 $Q_0(T)$ 值。

注 1: 空腔谐振频率 $f_0(T)$ 和品质因数 $Q_0(T)$ 值能从网络分析仪上直接读取,仪器设置参照设备供应商的说明文件,见 6.3.5。

谐振峰的峰值应在 -40 dB 至 -45 dB 范围内,调节耦合环的位置使得耦合的位置是对称的。

当测量 Q 值时,VNA 的频率带宽(span)应调节为谐振曲线半高宽度的 $110\% \sim 200\%$ 。

注 2: “谐振曲线半高宽度”也指“谐振峰的 -3 dB 带宽”。

6.3.8 试样厚度测量

使用千分尺测量试样厚度并记作 h 。

6.3.9 放入试样

环境试验箱应恢复到室温,将试样插入测试夹具。试样的标记面朝上放置并且试样边缘和夹具边缘对齐。

6.3.10 加载样品后谐振频率和品质因数的测定

重复步骤 6.3.6,测量在温度 T 时,加载了样品的谐振器的谐振频率 $f_s(T)$ 和品质因数 $Q_s(T)$ 值。

注: 有载谐振频率 $f_s(T)$ 和品质因数 $Q_s(T)$ 值能从网络分析仪上直接读取,仪器设置参照设备供应商的说明文件,见 6.3.5。

当测量 Q 值时,VNA 的频率带宽(span)应调节为谐振曲线半高宽度的 $110\% \sim 200\%$ 。

6.3.11 计算

按照步骤 6.2.11,计算在 T 温度下的相对介电常数 $\epsilon_r(T)$ 和介质损耗角正切 $\tan\delta(T)$ 。

6.3.12 选择

选择其他测试温度点,重复步骤 6.3.6~6.3.11。

6.3.13 温度系数

6.3.13.1 概述

相对介电常数和介质损耗角正切与温度有关,其随温度变化呈现出稳定的系数关系,即为相对介电常数温度系数和介质损耗角正切温度系数。

注: 通常“温度系数”也叫“温漂系数”。

6.3.13.2 相对介电常数温度系数

相对介电常数 ϵ_r 的温度系数(简称 $TC\epsilon_r$) 是每升高或降低 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相对介电常数的变化。 $TC\epsilon_r$ 的单位为 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。通常使用试样在基准温度 T_{ref} 为 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的相对介电常数作为基准相对介电常数 $\epsilon_r(T_{ref})$,对于在 T 温度, $TC\epsilon_r$ 应通过公式(3)计算。

$$TC\epsilon_r = \frac{\epsilon_r(T) - \epsilon_r(T_{ref})}{(T - T_{ref}) \times \epsilon_r(T_{ref})} \times 10^6 \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- $TC\epsilon_r$ — 相对介电常数 ϵ_r 的温度系数,单位为十的负六次方每摄氏度($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) ;
- T — 测试温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$) ;
- T_{ref} — 基准温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$) ;
- $\epsilon_r(T)$ — 在 T 温度下的相对介电常数 ;
- $\epsilon_r(T_{ref})$ — 在 T_{ref} 温度下的相对介电常数。

注：经核实,IEC 61189-2-721:2015的公式(3)少乘以一个 10^6 ,本文件的公式(3)已补上。

6.3.13.3 介质损耗角正切温度系数

介质损耗角正切 $\tan\delta$ 温度系数($TC \tan\delta$)是每升高或降低 1°C 介质损耗角正切的变化。 $TC \tan\delta$ 的单位为 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。通常使用试样在基准温度 T_{ref} 为 23°C 的介质损耗角正切作为基准介质损耗角正切 $\tan\delta(T_{ref})$,对于在 T 温度, $TC \tan\delta$ 应通过公式(4)计算。

$$TC \tan\delta = \frac{\tan\delta(T) - \tan\delta(T_{ref})}{(T - T_{ref}) \times \tan\delta(T_{ref})} \times 10^6 \dots\dots\dots (4)$$

式中：

- $TC \tan\delta$ — 介质损耗角正切 $\tan\delta$ 的温度系数,单位为十的负六次方每摄氏度($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) ;
- T — 测试温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$) ;
- T_{ref} — 基准温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$) ;
- $\tan\delta(T)$ — 在 T 温度下的介质损耗角正切 ;
- $\tan\delta(T_{ref})$ — 在 T_{ref} 温度下的介质损耗角正切。

注：经核实,IEC 61189-2-721:2015的公式(4)少乘以一个 10^6 ,本文件的公式(4)已补上。

6.3.14 更换频率

如果选择其他测试频率,在更换对应频率的 SPDR 夹具后,重复步骤 6.3.3~6.3.13。

7 报告

7.1 室温下的测试

对于室温下的测试,报告以下内容：

- a) 测试环境(温度、湿度) ;
- b) 测试频率 ;
- c) 测试频率下的相对介电常数和介质损耗角正切的单个值以及平均值 ;
- d) 试样预处理 ;
- e) 试验中的异常情况或与规定程序的差异和偏差 ;
- f) 样品信息。

7.2 不同温度条件下的测试

对于不同温度条件下的测试,报告以下内容：

- a) 测试温度(T)和基准温度(T_{ref}) ;
- b) 测试频率 ;
- c) 测试温度(T)下的相对介电常数 $\epsilon_r(T)$ 和介质损耗角正切 $\tan\delta(T)$;
- d) $TC\epsilon_r$ 和 $TC \tan\delta$;
- e) $\epsilon_r(T_{ref})$ 和 $\tan\delta(T_{ref})$;

- f) 如果需要多个测试温度,报告相对介电常数和介质损耗角正切的随温度变化的曲线图;
- g) 试样预处理;
- h) 试验中的异常情况或与规定程序的差异和偏差;
- i) 样品信息。

8 附加信息

8.1 精度

对于试样厚度 h 的测量精度对测试结果的影响:
介电常数测量 $\Delta\epsilon/\epsilon = \pm (0.0015 + \Delta h/h)$ 。
介质损耗角正切 $\Delta\tan\delta = +2 \times 10^{-5}$ 或 $\pm 0.03 \times \tan\delta$,取较大者。

8.2 维护

定期清洁测试头、标样、夹具。

8.3 注意事项

为了预防不同温度测试对测试夹具造成的损坏,应定期用标样对测试系统进行校验。例如:使用 0.4 mm 厚度的单晶石英标样进行校验,标样的标称相对介电常数与实测值之差应不超过 $\pm 0.7\%$,介质损耗角正切应不超过 $\pm 2 \times 10^{-5}$ 。

8.4 关于夹具和结果的附加信息

附录 A描述了一个测试夹具和测试结果的范例。

8.5 关于 $K_\epsilon(\epsilon_r, h)$ 和 p_{es} 的附加信息

附录 B描述了 $K_\epsilon(\epsilon_r, h)$ 和 p_{es} 的一些附加信息。

附录 A
(资料性)
测试夹具和测试结果的范例

A.1 测试夹具的范例

图 A.1 是一个在 5 GHz 的 SPDR 夹具设备图。采用 3.5 mm 母头转母头的适配器连接同轴电缆和 SPDR 测试夹具。

SPDR 夹具左右两端各有一个调节耦合系数的耦合环。此夹具的最大样品厚度为 2 mm。

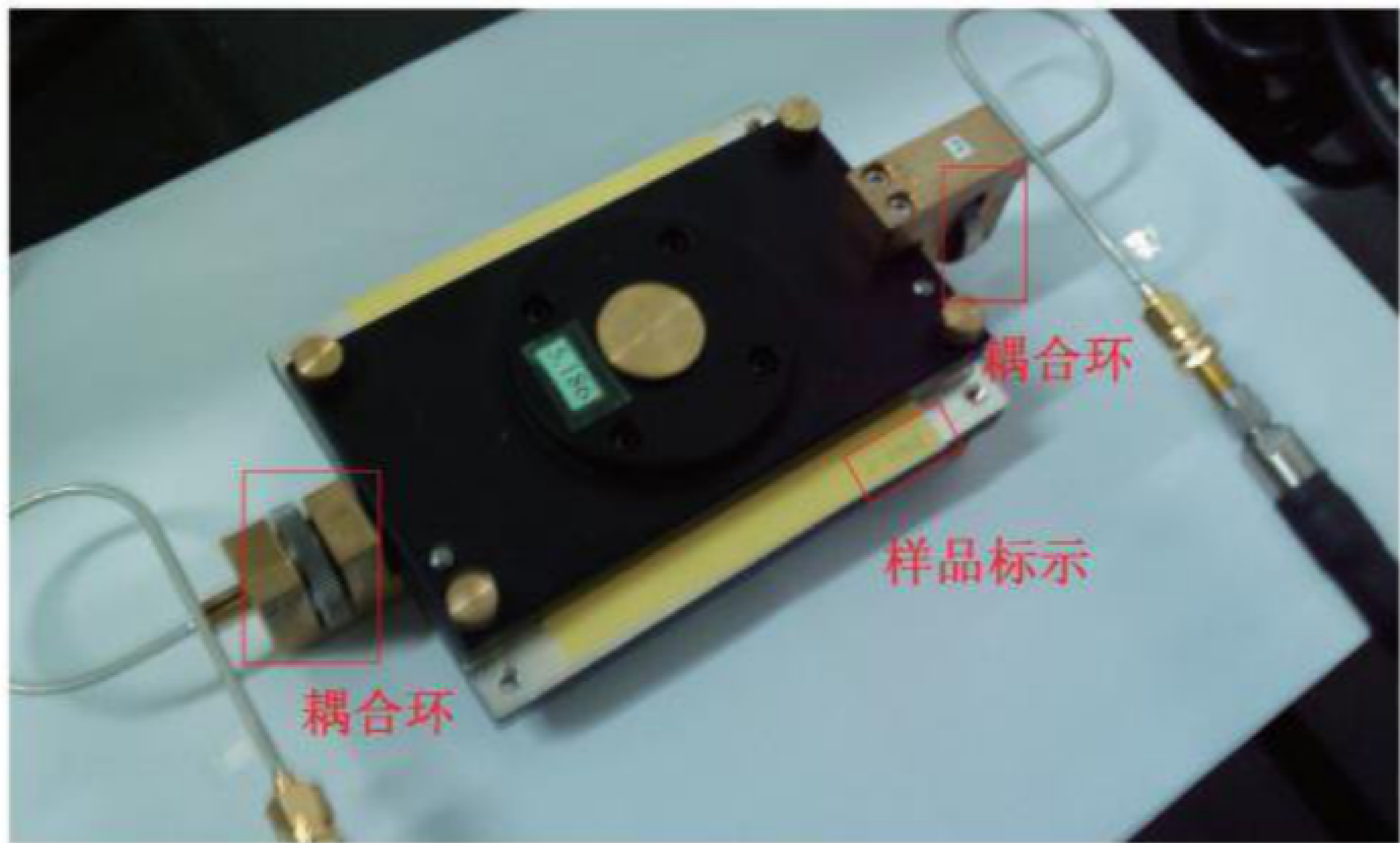


图 A.1 测试夹具

A.2 测试结果的范例

图 A.2 和图 A.3 显示了相对介电常数为 3.8 的覆铜箔层压板在 1.1 GHz~19 GHz 微波频率下的相对介电常数和介质损耗角正切的典型测量值变化曲线。图 A.4 显示相对介电常数为 3.8 的覆铜箔层压板的相对介电常数和介质损耗角正切随温度变化(-125 °C ~ 110 °C)的曲线图。

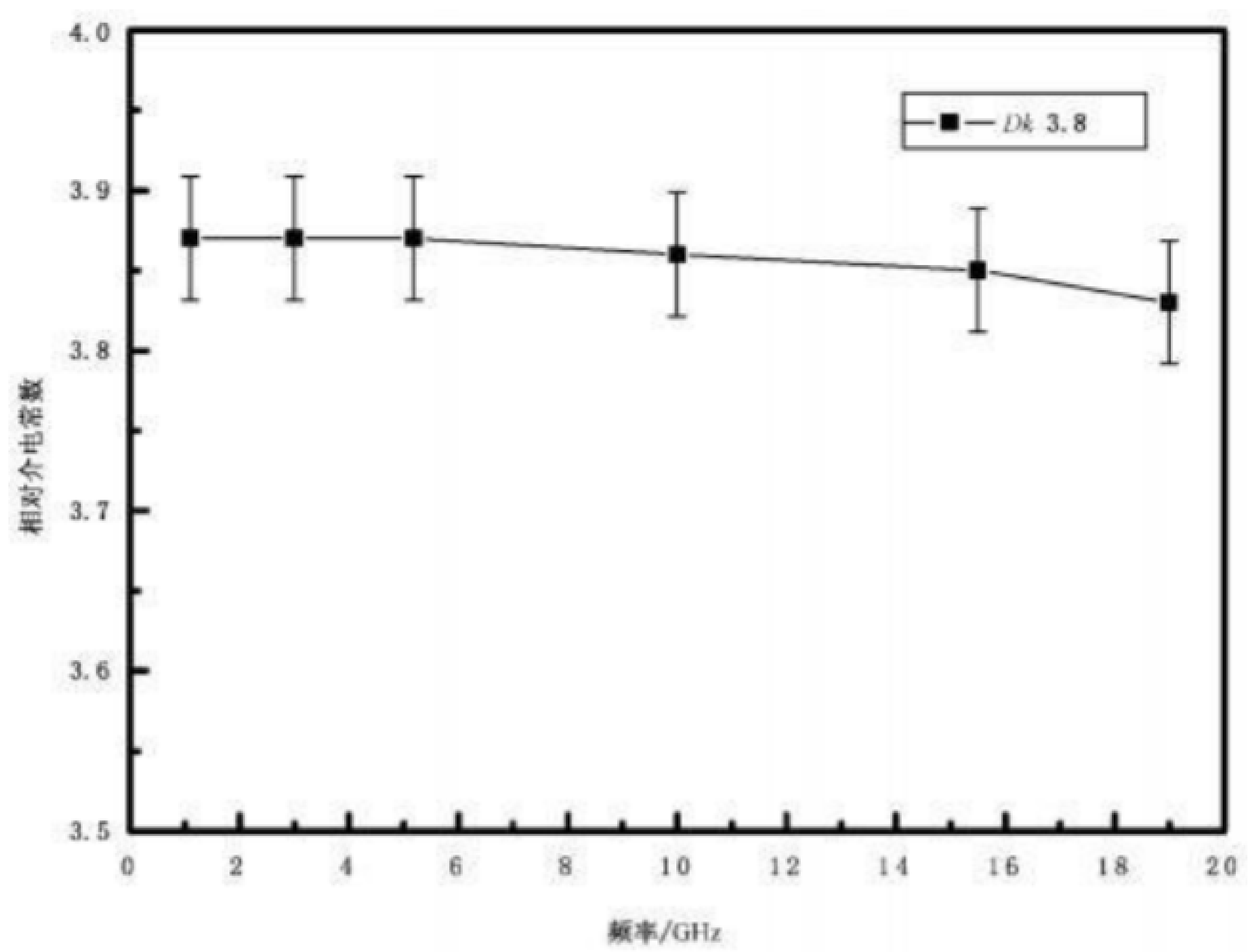


图 A.2 相对介电常数-频率
(相对介电常数为 3.8、厚度为 0.51 mm 的覆铜板基材)

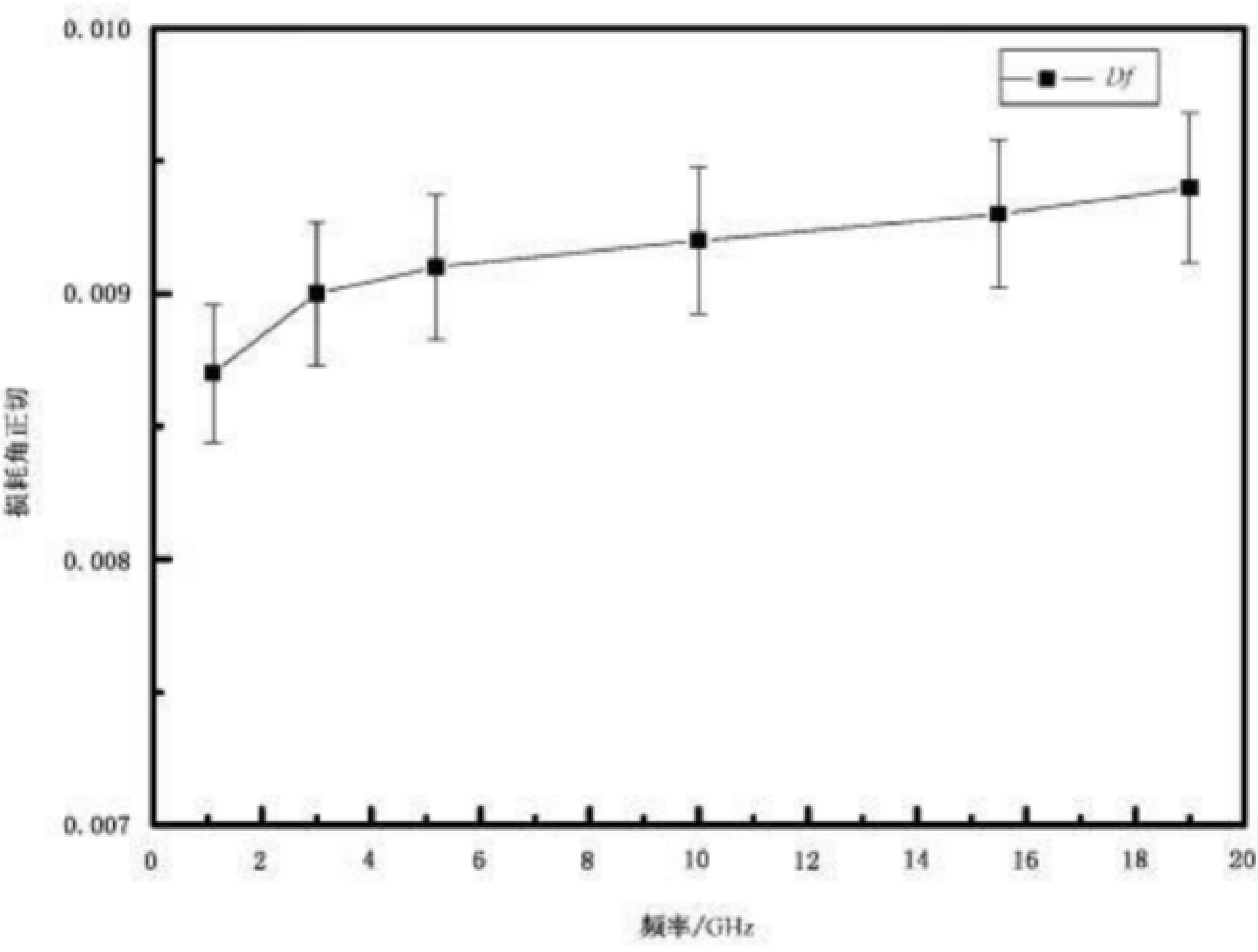


图 A.3 介质损耗角正切-频率
(相对介电常数为 3.8、厚度为 0.51 mm 的覆铜板基材)

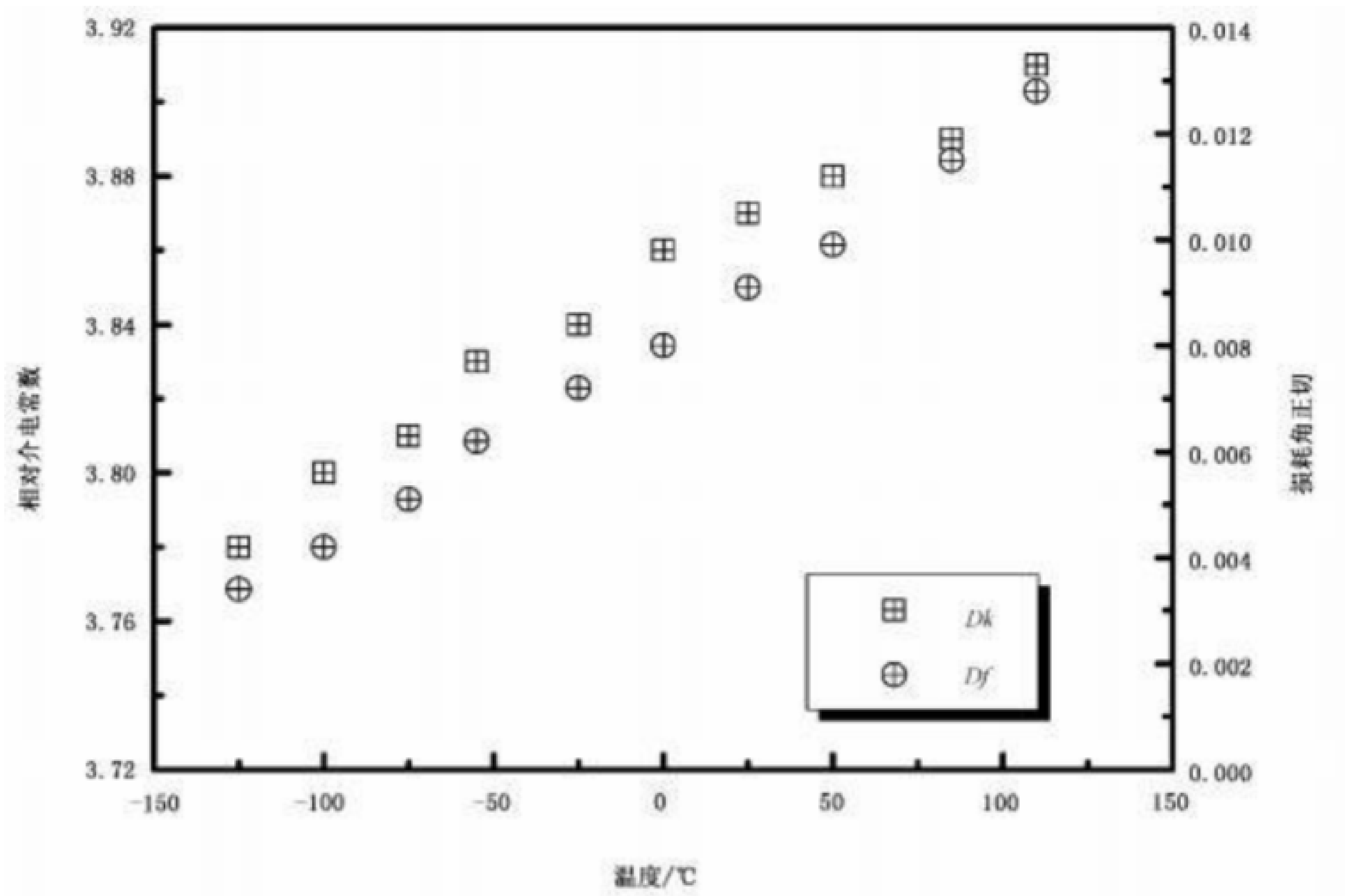


图 A.4 不同温度条件下的相对介电常数和介质损耗角正切变化
(相对介电常数为 3.8、厚度为 0.51 mm 的覆铜板基材)

附 录 B

(资料性)

$K_{\epsilon}(\epsilon_r, h)$ 和 p_{es} 的一些附加信息

对于一个给定的谐振器以及已知的 ϵ_r 和 h 值, $K_{\epsilon}(\epsilon_r, h)$ 函数值可从下列公式得出:

$$K_{\epsilon}(\epsilon_r, h) = \frac{f_0 - f_s}{(\epsilon_r - 1)hf_0} \dots\dots\dots (B.1)$$

对每个给定的 SPDR 夹具, 计算和制表得到 $K_{\epsilon}(\epsilon_r, h)$ 函数。通过精确的谐振频率, 一系列的 ϵ_r 和 h 制表得出 $K_{\epsilon}(\epsilon_r, h)$ 。用插值法计算其他 ϵ_r 和 h 下的 $K_{\epsilon}(\epsilon_r, h)$ 值。 $K_{\epsilon}(\epsilon_r, h)$ 的初始值由介电常数为 $\epsilon_r = 1$ 和给出的 h 计算得出, 后续的 $K_{\epsilon}(\epsilon_r, h)$ 值可以由后续的介电常数通过迭代的方法获得。因为 $K_{\epsilon}(\epsilon_r, h)$ 为 ϵ_r 和 h 的缓慢变换函数, 使用公式(1)进行迭代将迅速收敛。图 B.1 显示了在不同样品厚度下 $K_{\epsilon}(\epsilon_r, h)$ 与相对介电常数的曲线图。

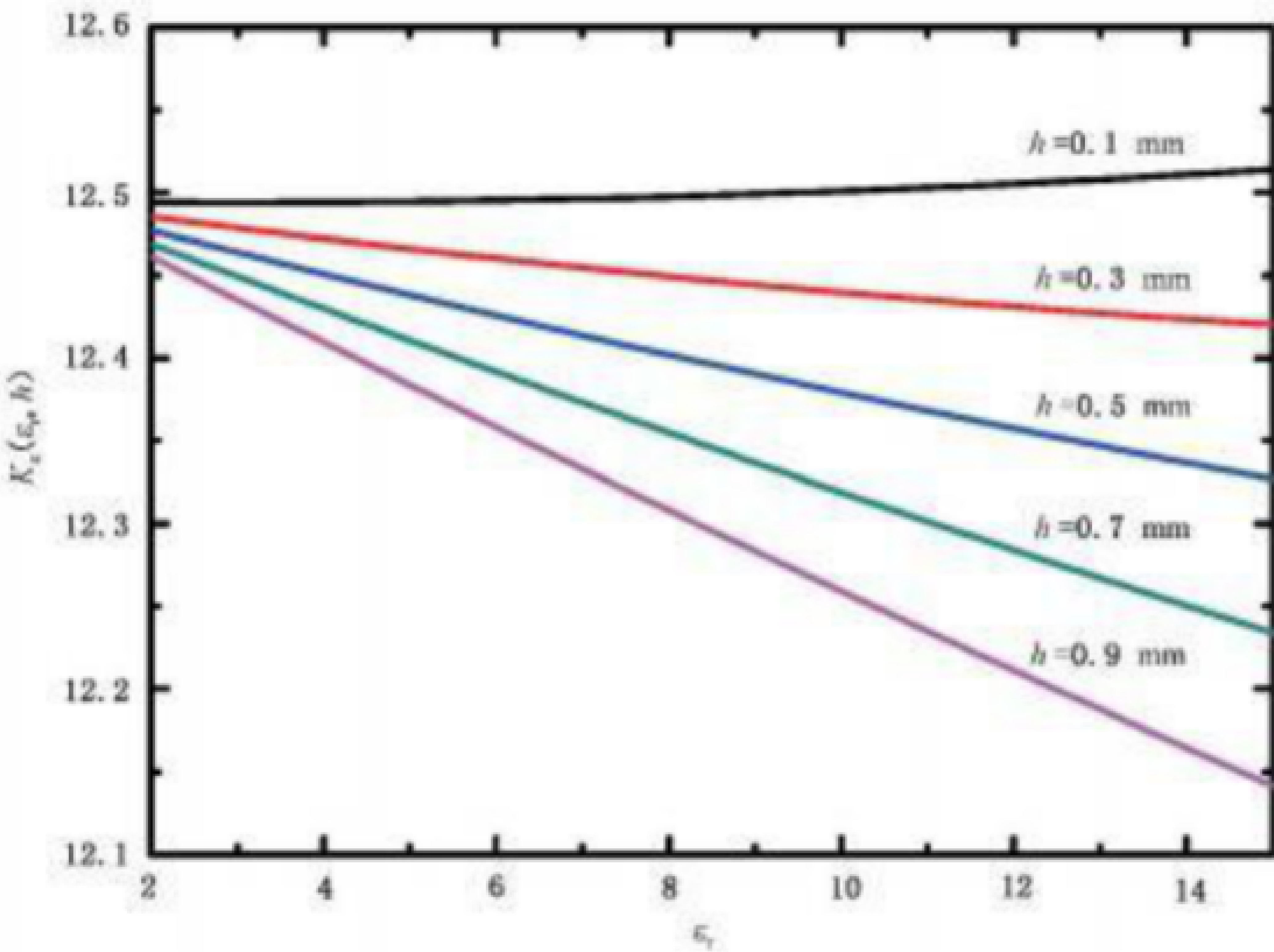


图 B.1 在不同样品厚度下 $K_{\epsilon}(\epsilon_r, h)$ 与相对介电常数的曲线图

$$p_{es} = h\epsilon_r K_1(\epsilon_r, h) \dots\dots\dots (B.2)$$

式中:

- ϵ_r — 相对介电常数;
- h — 试样的厚度, 单位为毫米(mm);
- $K_1(\epsilon_r, h)$ — ϵ_r 和 h 的有关函数。

瑞利-里兹(Rayleigh-Ritz)方法可以对给定的谐振腔体结构计算 p_{es} 值。通过一系列的 h 和 ϵ_r 计算出这些参数。

对于一个 10GHz 的 SPDR 夹具, 其谐振腔体结构为 $D = 16.5\text{ mm}$ 、 $L = 9\text{ mm}$ 、 $dr = 8\text{ mm}$ 、 $hr = 1\text{ mm}$ 、 $hg = 1\text{ mm}$ 以及介质谐振器的相对介电常数为 3.8, 其分离式介质谐振器工作在标称频率(没有放入样品)的电场参数 E 的分布如图 B2 和图 B3 所示。

图 B.4 显示在不同样品厚度下 p_{es} 与相对介电常数的曲线图。

对于使用 10GHz SPDR 测量不同材料, 参数如表 B.1 所示。

表 B.1 使用 10GHz SPDR测量不同材料的结果

ϵ_r	$\tan\delta$	厚度 mm	p_{es}	$K_\epsilon(\epsilon_r, h)$	Q_C	Q_{DR}	材料
2.05	0.000 3	0.3	8.3×10^{-4}	12 477	$>10^5$	16 000	PTFE
3.0	0.003 0	0.3	1.2×10^{-3}	12412	$>10^5$	16 000	Low-Dk FR4
3.8	0.009 0	0.3	3×10^{-3}	12 364	$>10^5$	16 000	Low-loss FR4
4.5	0.015 0	0.3	4.2×10^{-3}	12 332	$>10^5$	16 000	Halogen-free FR4

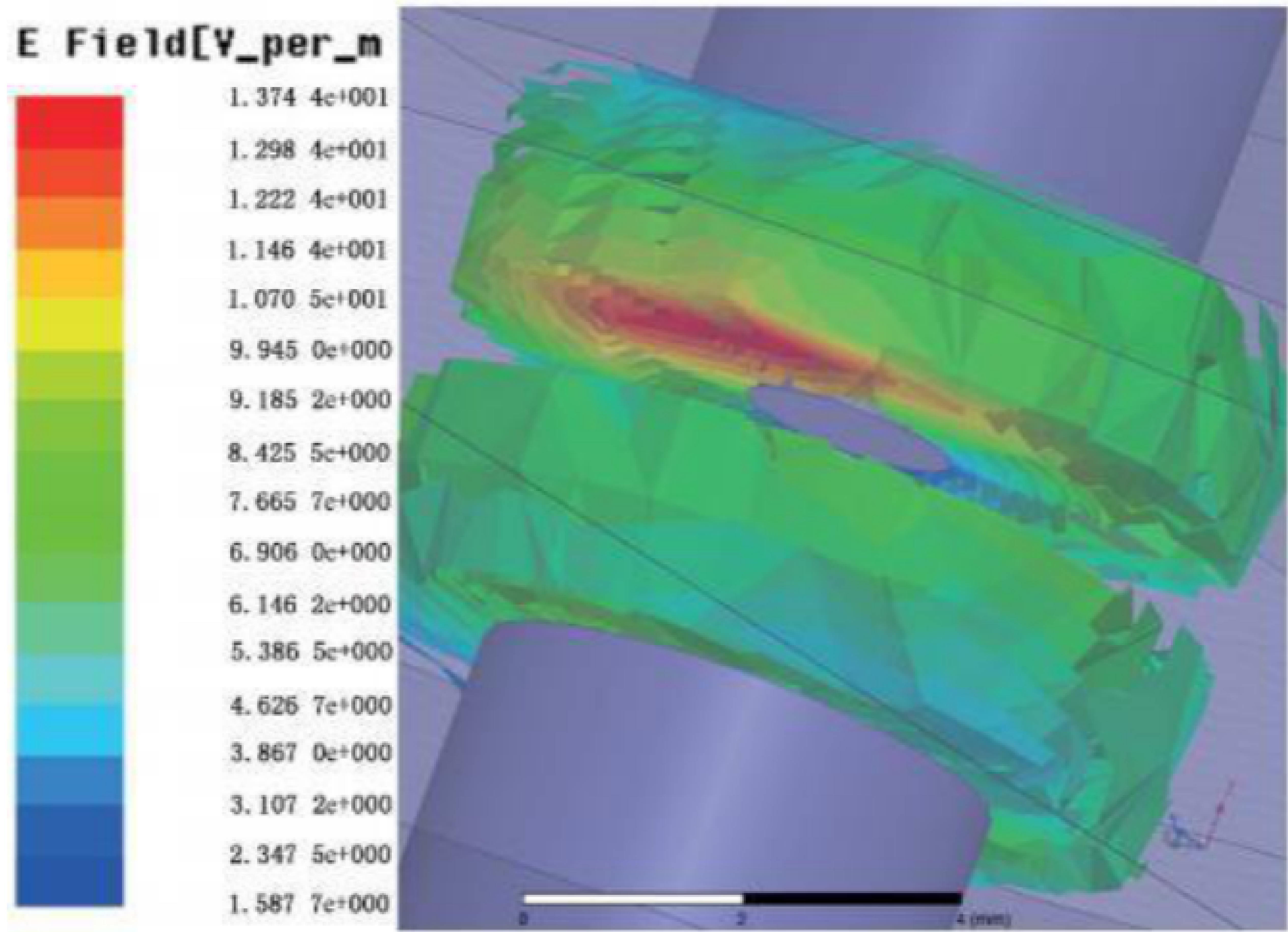


图 B.2 分离式介质谐振器的电场分布(介质谐振器的侧视图)

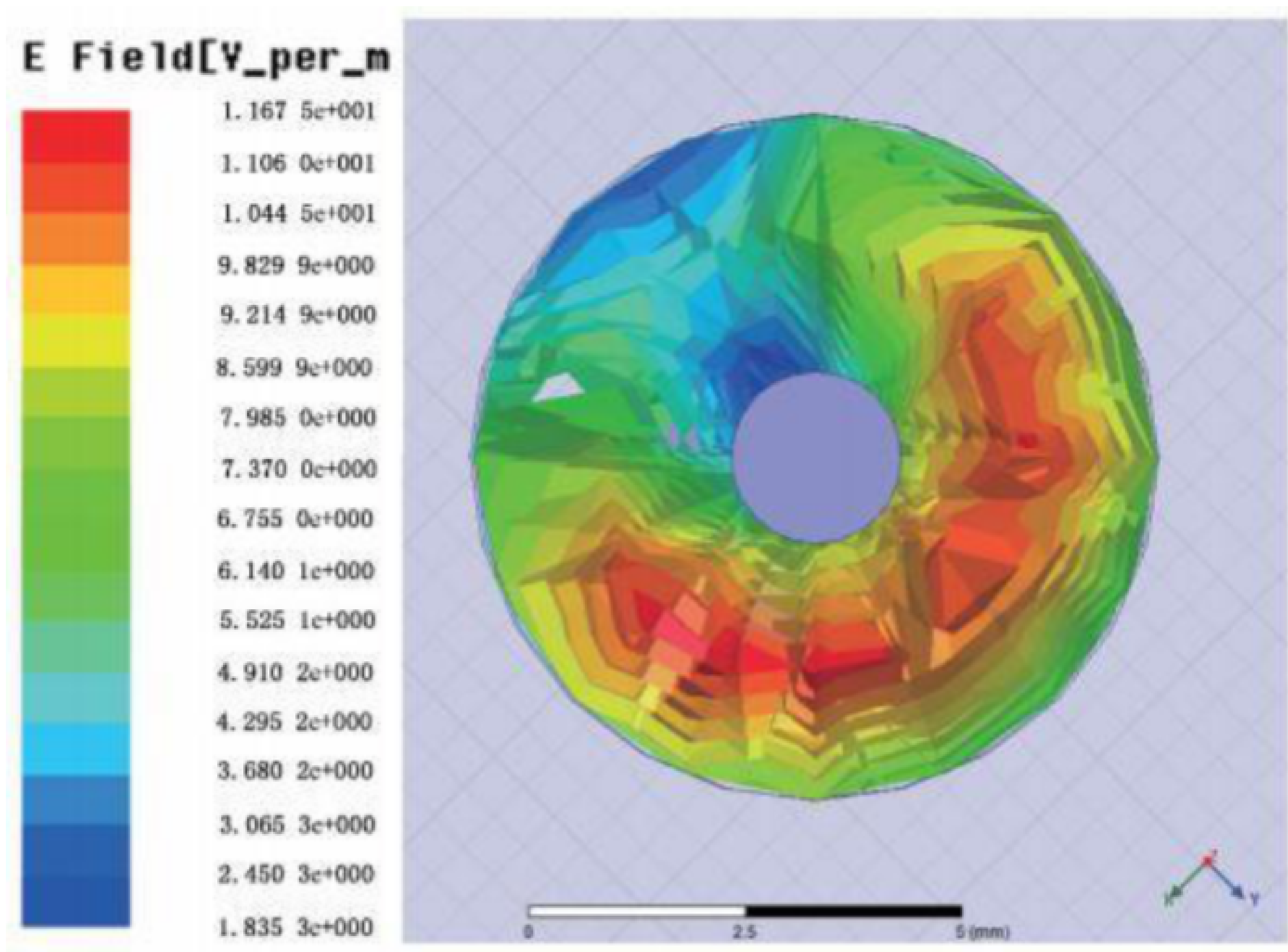


图 B.3 分离式介质谐振器的电场分布(介质谐振器的俯视图)

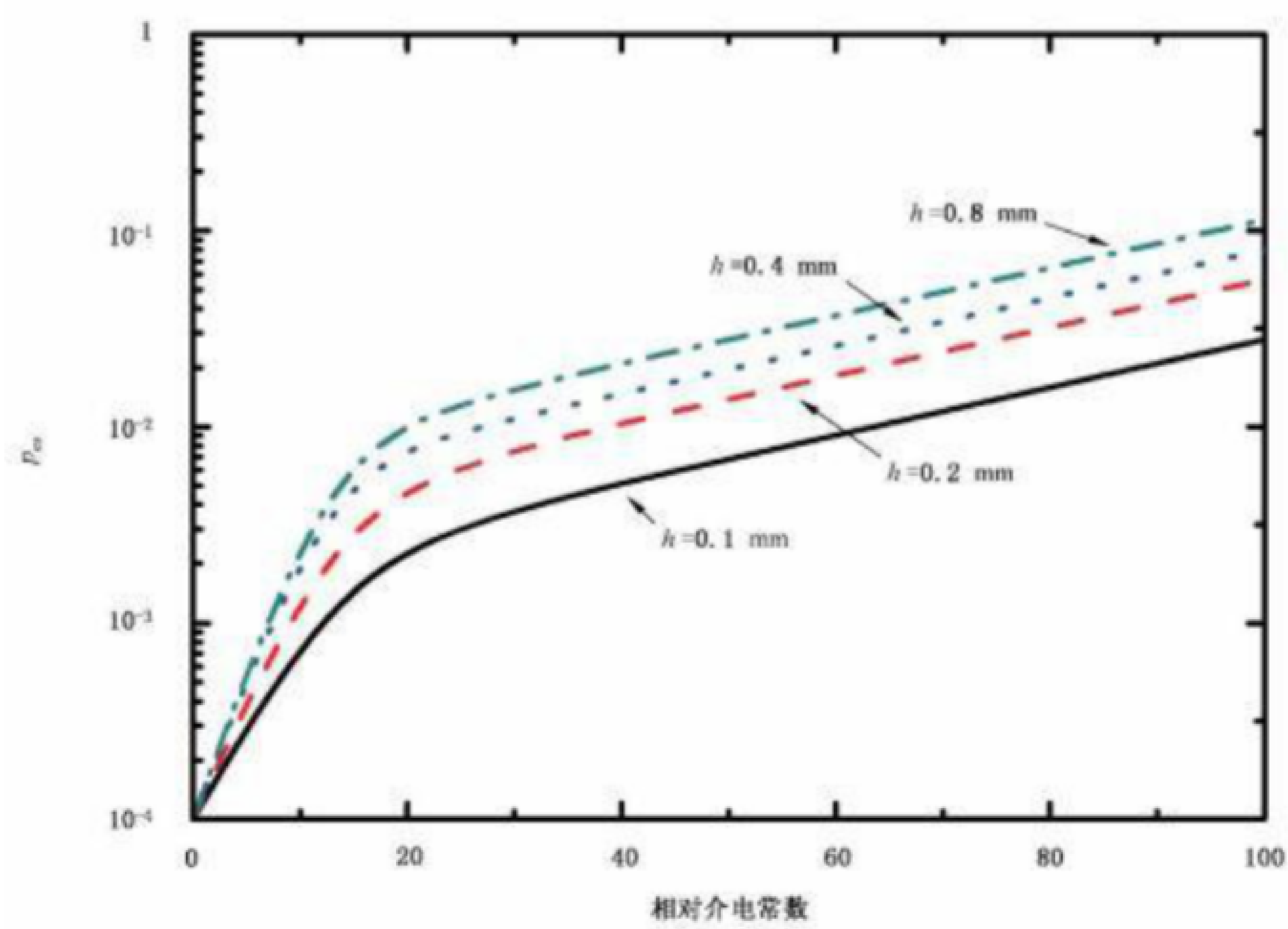


图 B.4 在不同样品厚度下 p_{es} 与相对介电常数的曲线图

参 考 文 献

- [1] Nishikawa T, Wakino K, Tanaka H, Ishikawa Y. "Dielectric Resonator Method for Nondestructive Measurement of Complex Permittivity of Microwave Dielectric Substrates", Microwave Conference, 1990. 20th European, vol.1, pp.501-506, 1990
- [2] Mazierska J, Krupka J, Jacob M. V, Ledenyov D. "Complex permittivity measurements at variable temperatures of low loss dielectric substrates employing split post and single post dielectric resonators", Microwave Symposium Digest, 2004 IEEE MTT-S International, vol. 3, pp. 1825-1828, 2004
- [3] Mazierska J. , Jacob Mohan V, Harring A, Krupka J, Barnwell P, Sims T, "Measurements of loss tangent and relative permittivity of LTCC ceramics at varying temperatures and frequencies", Journal of the European Ceramic Society, vol. 23, issue 14, pp.2611-2615, 2003
- [4] Krupka J, Clarke R N, Rochard O C, Gregory A P. "Split post dielectric resonator technique for precise measurements of laminar dielectric specimens-measurement uncertainties", Microwaves, Radar and Wireless Communications, 2000. MIKON-2000. 13th International Conference, vol.1, pp.305-308, 2000
- [5] Krupka J, Gregory A. P, Rochard O. C, Clarke R. N, Riddle B, Baker-Jarvis, J. , "Uncertainty of complex permittivity measurements by split-post dielectric resonator technique", Journal of the European Ceramic Society, vol. 21, issue 15, pp.2673-2676, 2001
- [6] Krupka J, Geyer R. G, Baker-Jarvis J, Ceremuga J, "Measurements of the complex permittivity of microwave circuit board substrates using split dielectric resonator and reentrant cavity techniques", Seventh International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications, (Conf. Publ. No. 430) , pp. 21-24, 1996
-