



中华人民共和国工业和信息化部
电子计量技术规范

JJFZ(电子) 008—2022

在片电学参数标准件校准规范

Calibration Specification For On-wafer Electrical Parameters Standards

××××-××-××发布

××××-××-××实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

在片电学参数标准件校准 规范

Calibration Specification For On-wafer
Electrical Parameters Standards

JJFZ(电子) 008—2022

归 口 单 位：中国电子技术标准化研究院

主要起草单位：中国电子科技集团公司第十三研究所

本规范技术条文委托起草单位负责解释

本规范主要起草人：

丁 晨（中国电子科技集团公司第十三研究所）
吴爱华（中国电子科技集团公司第十三研究所）
翟玉卫（中国电子科技集团公司第十三研究所）

参加起草人：

乔玉娥（中国电子科技集团公司第十三研究所）
刘 岩（中国电子科技集团公司第十三研究所）
范雅洁（中国电子科技集团公司第十三研究所）

目录

引言	II
1 范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 术语与定义.....	1
4 概述.....	1
5 计量特性.....	1
5.1 在片低值电阻	1
5.2 在片高值电阻	1
5.3 在片电容	1
6 校准条件.....	1
6.1 环境条件	1
6.2 测量标准及其他设备	1
7 校准项目和校准方法.....	2
7.1 校准项目	2
7.2 校准方法	2
8 校准结果表达.....	6
9 复校时间间隔.....	7
10 附录.....	7
附录 A 原始记录格式.....	8
附录 B 校准证书内页格式.....	10
附录 C 测量不确定度评定示例.....	12

引言

本规范依据 JJF 1071-2010 《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1059.1-2012 《测量不确定度评定与表示》编写。

本规范为首次发布。

在片电学参数标准件校准规范

1 范围

本规范适用于低值电阻范围在 $1\ \Omega\sim 1000\ \Omega$ 、高值电阻范围在 $100\ \text{M}\Omega\sim 1\ \text{G}\Omega$ ，电容范围在 $1\ \text{pF}\sim 100\ \text{pF}$ ($1\ \text{kHz}\sim 1\ \text{MHz}$) 的在片电学参数标准件的校准。

2 引用文件

无

3 术语与定义

下列术语和定义适用于本规范。

3.1 在片电学参数标准件 on-wafer electrical parameters standards

用于校准在片测试系统电学参数的量传标准件，为在片形式且赋有标准值，通常包含低值电阻、高值电阻和电容三个参数，也有包含单参数或两个参数的标准件，其中低值电阻包含在片短路器，电容包含在片开路器。

4 概述

在片电学参数标准件是校准在片测试系统电学参数的标准件，一般采用半导体工艺制作，由若干个在片电阻器、在片电容器构成。根据载体材料的不同，在片电学参数标准件通常分为砷化镓 (GaAs)、硅 (Si)、陶瓷 (Al_2O_3) 等多种形式。

5 计量特性

5.1 在片低值电阻

测量范围： $1\ \Omega\sim 1000\ \Omega$ ；

最大允许误差： $\pm 1\%$ 。

5.2 在片高值电阻

测量范围： $100\ \text{M}\Omega\sim 1\ \text{G}\Omega$ ；

最大允许误差： $\pm 2\%$ 。

5.3 在片电容

测量范围： $1\ \text{pF}\sim 100\ \text{pF}$ ($1\ \text{kHz}\sim 1\ \text{MHz}$)；

最大允许误差： $\pm 2\%$ 。

注：以上技术指标不作合格性判断，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

a) 环境温度： $(23\pm 5)\ ^\circ\text{C}$ ；

b) 相对湿度： $30\%\sim 75\%$ ；

c) 供电电源： $(220\pm 22)\ \text{V}$ ； $(50\pm 1)\ \text{Hz}$ ；

d) 周围无影响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 数字多用表

电阻测量范围： $1\ \Omega\sim 1000\ \Omega$ ；

最大允许误差： $\pm (0.002\%\sim 0.1\%)$ 。

6.2.2 高阻计

测量范围： $100\ \text{M}\Omega\sim 1\ \text{G}\Omega$ ；

最大允许误差： $\pm 0.1\%$ 。

6.2.3 标准电容器

测量范围：1 pF~100 pF（1kHz~1MHz）；

最大允许误差：±0.1%。

注：包含开路器。

6.2.4 电容测量仪

测量范围：1 pF~100 pF（1kHz~1MHz）；

最大允许误差：±0.1%。

6.2.5 探针台系统

温度设置范围：18℃~28℃；

最大允许误差：±1℃；

波动度：±0.2℃/min。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

表 1 校准项目一览表

序号	校准项目	校准方法条款
1	在片低值电阻	7.2.2
2	在片高值电阻	7.2.3
3	在片电容	7.2.4

7.2 校准方法

7.2.1 外观和工作正常性检查

- 在片电学参数标准件的外观应完好，表面无影响量值的污垢、水汽等杂质；
- 将在片电学参数标准件在校准环境中放置不小于 2h，使用镊子将其取出并清理表面，校准过程中应有严格的防泄漏措施；
- 将在片电学参数标准件放置在探针台上，所使用的探针卡/探针座的针尖应无磨损和沾污，探针卡各个针尖的坐标位置应与在片电学参数标准件一一对应。探针、探针卡均应定期清洁，必要时应及时更换。

7.2.2 在片低值电阻的示值误差

使用数字多用表，通过探针座或探针卡直接测量在片电学参数标准件中的在片低值电阻值，数字多用表的显示值即为在片低值电阻的实测值。连接如图 1 所示，校准方法如下：

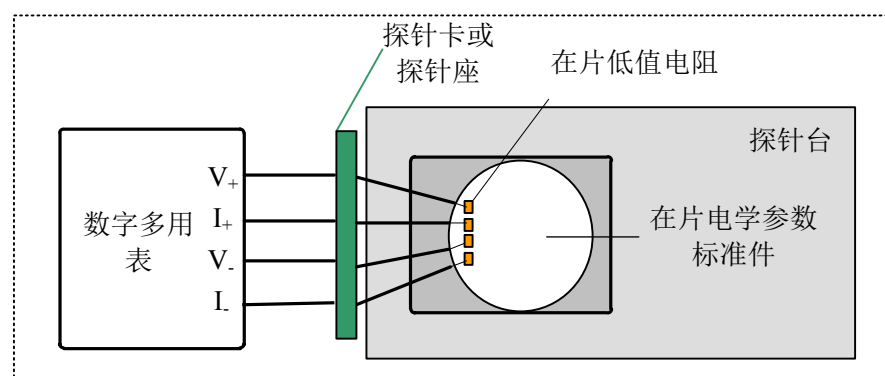


图 1 在片低值电阻连接图

- 将在片电学参数标准件放置于探针台上，通过探针座或探针卡与数字多用表连接；

- b) 设置台温：根据用户要求设置卡盘台温，直至台温稳定。当用户未提出明确要求时，在（18~28）℃温度范围内，以 1℃为步进逐点设置卡盘台温；
- c) 设置数字多用表为电阻测量模式，选择四线测量模式；
- d) 连接在片电学参数标准件中在片短路器进行短路清零；
- e) 选择低值电阻校准点：依次选择在片电学参数标准件的低值电阻校准点，通常从低至高进行；
- f) 根据低值电阻测量点调节数字多用表至合适量程；
- g) 测量所选在片低值电阻，并按公式（1）计算示值误差，记录在附表 A.1 中；

$$\Delta R_L = R_1 - R_0 \quad (1)$$

式中：

ΔR_L ——被校在片低值电阻的示值误差，Ω；

R_1 ——被校在片低值电阻的标称值，Ω；

R_0 ——被校在片低值电阻的实测值，Ω。

- h) 选择其他测量点，直至完成该台温下所有低值电阻的校准；
- i) 设置台温为下一个温度点，重复步骤 c)~h)，直至完成所有台温下低值电阻的校准。

7.2.3 在片高值电阻的示值误差

使用高阻计，通过探针座或探针卡直接测量在片电学参数标准件中的在片高值电阻值，高阻计的显示值即为在片高值电阻的实测值。连接如图 2 所示，校准方法如下：

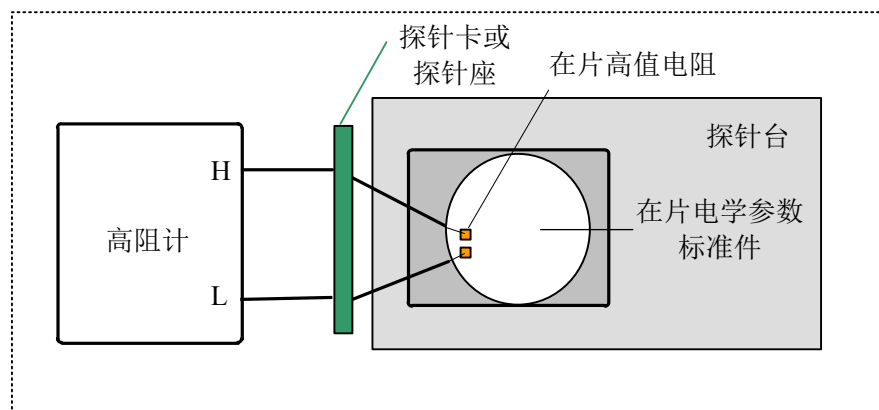


图 2 在片高值电阻连接图

- a) 将在片电学参数标准件放置于探针台上，通过探针座或探针卡与高阻计连接；
- b) 设置台温：根据用户要求设置卡盘台温，直至台温稳定。当用户未提出明确要求时，在（18~28）℃温度范围内，以 1℃为步进逐点设置卡盘台温；
- c) 设置高阻计为电阻测量模式；
- d) 选择高值电阻校准点：依次选择在片电学参数标准件的高值电阻校准点，通常从低至高进行；
- e) 根据高值电阻测量点调节高阻计至合适量程；
- f) 测量所选在片高值电阻，并按公式（2）计算示值误差，记录在附表 A.2 中；

$$\Delta R_H = R_3 - R_2 \quad (2)$$

式中:

ΔR_H ——被校在片高值电阻的示值误差, Ω ;

R_3 ——被校在片高值电阻的标称值, Ω ;

R_2 ——被校在片高值电阻的实测值, Ω 。

g) 选择其他测量点, 直至完成该台温下所有高值电阻的校准;

h) 设置台温为下一个温度点, 重复步骤 c)~g), 直至完成所有台温下高值电阻的校准。

7.2.4 在片电容的示值误差

在片电容的示值误差的校准, 采用直接测量法或间接测量法。

7.2.4.1 直接测量法

使用电容测量仪, 通过探针座或探针卡直接测量在片电学参数标准件中的在片电容值, 电容测量仪的显示值即为在片电容的实测值。连接如图 3 所示, 校准方法如下:

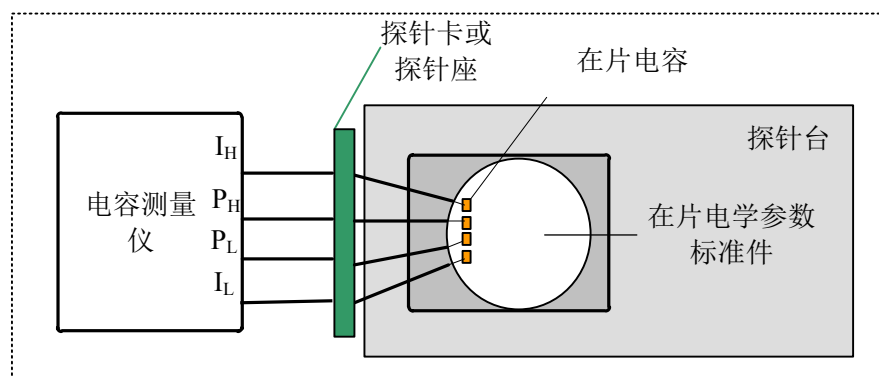


图 3 在片电容直接测量法连接图

- 将在片电学参数标准件放置于探针台上, 通过探针座或探针卡与电容测量仪连接;
- 设置电容测量仪为电容测量模式, 选择测量频率;
- 连接在片电学参数标准件中在片开路器进行开路清零;
- 选择电容校准点和频率点: 依次选择在片电学参数标准件的电容校准点, 通常从低至高进行, 频率点应覆盖 1kHz、10kHz、100kHz、1MHz, 其他频率点按需求进行校准;
- 测量所选在片电容, 并按公式 (3) 计算示值误差, 记录在附表 A.3 中;

$$\Delta C = C_1 - C_0 \quad (3)$$

式中:

ΔC ——被校在片电容的示值误差, pF;

C_1 ——被校在片电容的标称值, pF;

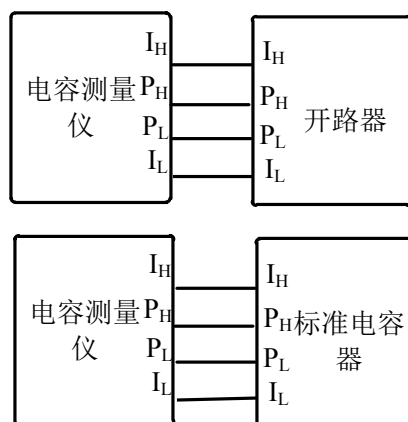
C_0 ——被校在片电容的实测值, pF。

f) 设置其他频率, 重复步骤 c)~e), 直至完成所有校准点。

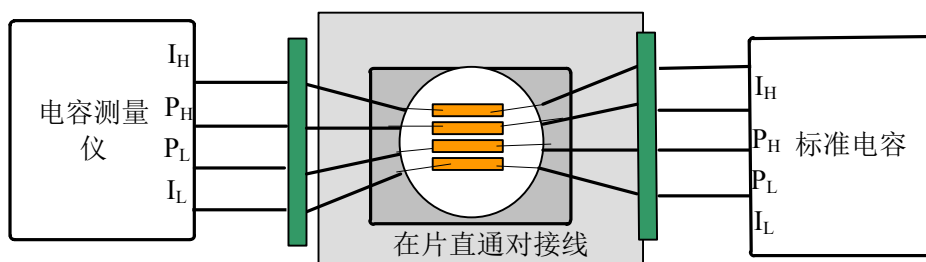
7.2.4.2 间接测量法

- 选择电容校准点: 依次选择在片电学参数标准件的电容校准点, 通常从低至高进行;
- 使用开路器与电容测量仪连接进行开路;

- c) 选择测量频率，使用电容测量仪直接测量与在片电容值同标称值的标准电容得到测量值 C_2 ，连接如图 4 所示；

图 4 C_2 测量连接图

- d) 电容测量仪通过探针卡或探针座与在片直通对接线连接，通过左右对称的另一侧连接至标准电容器，从而建立起一套“同轴-在片-同轴”形式的对称测量回路，得到 C_3 ，连接如图 5 所示；

图 5 C_3 测量连接图

- e) 根据电容并联的测量模型，按公式 (4) 计算测量回路中的分布电容值；

$$C_4 = C_3 - C_2 \quad (4)$$

式中：

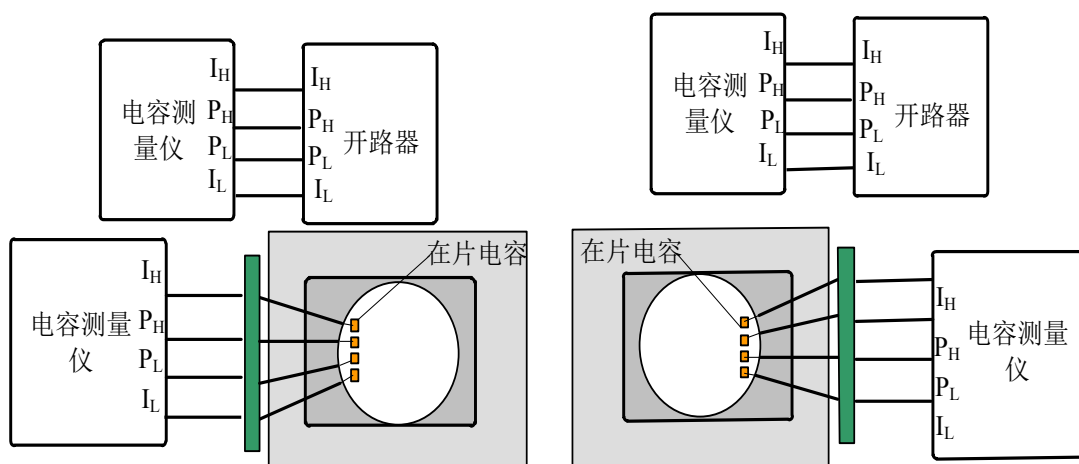
C_4 ——测量回路的分布电容值，pF；

C_3 ——直接测量标准电容器的电容值，pF；

C_2 ——通过对称测量回路测量标准电容器的电容值，pF。

- f) 使用开路器与电容测量仪连接进行开路；

- g) 将在片电学参数标准件放置于探针台上，通过左侧探针座或探针卡与电容测量仪连接，测得电容值 C_L ，对应的将在片电学参数标准件通过右侧探针座或探针卡与电容测量仪连接，测得电容值 C_R ，连接如图 6 所示；

图 6 C_L 和 C_R 测量连接图

- h) 通过分别测量左右两侧的在片电容值 C_L 和 C_R ，以及测量回路的分布电容值 C_4 ，对测得的在片电容值按公式 (5) 进行修正，可得到更准确的在片电容的标准值 C ；

$$C = \frac{1}{2}(C_L + C_R - C_4) \quad (5)$$

式中：

C_4 ——测量回路的分布电容值，pF；

C_L ——左侧回路测得的在片电容值，pF；

C_R ——右侧回路测得的在片电容值，pF；

C ——被校在片电容的标准值，pF。

- i) 按公式 (6) 计算示值误差，记录在附表 A.4 中；

$$\Delta C = C_1 - C \quad (6)$$

式中：

ΔC ——被校在片电容的示值误差，pF；

C_1 ——被校在片电容的标称值，pF；

C ——被校在片电容的实测值，pF。

- j) 设置其他频率，重复步骤 b)~i)，直至完成所有校准点。

8 校准结果表达

校准结束后应出具在片电学参数标准件校准证书。校准证书应准确、客观地报告校准结果，校准结果以校准数据形式给出。校准证书应包括委托方要求的、说明校准结果所必需的和所用方法要求的全部信息。校准证书应至少包含以下信息：

- 标题：“校准证书”；
- 实验室名称和地址；
- 进行校准的地点；
- 证书的唯一性标识（如编号），每页和总页数的标识；
- 客户的名称和地址；
- 被校对象的描述和明确标识；
- 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) 如果与校准结果有效性应用有关时, 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。

9 复校时间间隔

在片电学参数标准件的复校时间间隔一般不超过 12 个月。由于复校时间间隔的长短是由在片电学参数标准件的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的, 因此, 送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

10 附录

附录 A 原始记录格式

附录 B 校准证书内页格式

附录 C 测量不确定度评定示例

附录 A

原始记录格式

一、外观及工作正常性检查：

二、在片低值电阻示值误差

表 A.1 在片低值电阻示值误差

台温 ℃	实测值 R_0/Ω	标称值 R_1/Ω	示值误差 $\Delta R_L/\Omega$	测量不确定度 $U(k=2)$

三、在片高值电阻示值误差

表 A.2 在片高值电阻示值误差

台温 ℃	实测值 R_2/Ω	标称值 R_3/Ω	示值误差 $\Delta R_H/\Omega$	测量不确定度 $U(k=2)$

四、在片电容示值误差

表 A.3 在片电容示值误差（直接测量法）

测试频率	实测值 C_0/pF	标称值 C_1/pF	示值误差 $\Delta C/\text{pF}$	测量不确定度 $U(k=2)$

表 A.4 在片电容示值误差 (间接测量法)

测试频率	左回路 C_L /pF	右回路 C_R /pF	测量回路 分布电容 C_4 /pF	标准值 C /pF	标称值 C_1 /pF	示值误差 ΔC /pF	测量不确定度 U ($k=2$)

附录 B

校准证书内页格式

一、外观及工作正常性检查：

二、在片低值电阻示值误差

表 B.1 在片低值电阻示值误差

台温 ℃	实测值 R_0/Ω	标称值 R_1/Ω	示值误差 $\Delta R/\Omega$	测量不确定度 $U(k=2)$

三、在片高值电阻示值误差

表 B.2 在片高值电阻示值误差

台温 ℃	实测值 R_2/Ω	标称值 R_3/Ω	示值误差 $\Delta R/\Omega$	测量不确定度 $U(k=2)$

四、在片电容示值误差

表 B.3 在片电容示值误差（直接测量法）

测试频率	实测值 C_0/pF	标称值 C_1/pF	示值误差 $\Delta C/\text{pF}$	测量不确定度 $U(k=2)$

表 B.4 在片电容示值误差 (间接测量法)

测试频率	标准值 C/pF	标称值 C_1/pF	示值误差 $\Delta C/\text{pF}$	测量不确定度 $U (k=2)$

附录 C

测量不确定度评定示例

C.1 在片低值电阻不确定度分析

采用直接测量法, 利用数字多用表作为标准, 直接对在片电学参数标准件低值电阻进行校准。

C.1.1 测量模型

测量过程测量模型如 C.1。

$$\Delta R = R_1 - R_0 \quad (\text{C.1})$$

式中:

ΔR ——被校在片低值电阻的示值误差, Ω ;

R_1 ——被校在片低值电阻的标称值, Ω ;

R_0 ——被校在片低值电阻的实测值, Ω 。

C.1.2 不确定度来源

根据测量模型, 分析其测量不确定度来源为:

- a) 由标准仪器(数字多用表低值电阻测量不准确)引入的标准不确定度分量, u_1 ;
- b) 测量过程温度波动引入的标准不确定度分量, u_2 ;
- c) 测量重复性引入的标准不确定度分量, u_3 。

C.1.3 标准不确定度评定(典型点 1Ω)

- a) 数字多用表低值电阻测量不准确引入的标准不确定度分量, u_1

按 B 类方法评定, 假设其服从正态分布, 置信因子 $k=1.96$ 。因此, 查阅其说明书 1Ω 技术指标可得 u_1 :

$$u_1 = \frac{1.7 \times 10^{-5} \times 1\Omega + 2 \times 10^{-6} \times 2\Omega}{1.96} = 1.1 \times 10^{-5} \Omega \quad (\text{C.2})$$

- b) 测量过程温度波动引入的标准不确定度分量, u_2

实际校准过程中, 台温会有微小的变化, 校准过程台温温度波动为 $\pm 0.2^\circ\text{C}/\text{min}$, 1min 变化最大为 0.4°C , 依据在片低值电阻的温度系数考核方法, 得到 1Ω 温度相对变化量为 $0.0035\Omega/^\circ\text{C}$, 按照 B 类方法评定, 测量结果服从均匀分布, 取 $k=\sqrt{3}$ 则 u_2 :

$$u_2 = \frac{0.4^\circ\text{C} \times 0.0035\Omega/^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 8.1 \times 10^{-4} \Omega \quad (\text{C.3})$$

- c) 测量重复性引入的标准不确定度分量, u_3

在重复性测量条件下, 采用贝塞尔公式对 10 次测量数据的标准偏差进行计算。测

量结果见下表 C.1 所示:

表 C.1 重复性测量数据

第 i 次测量	1	2	3	4	5
测量值/ Ω	0.9995	0.9996	0.9998	0.9995	0.9995
第 i 次测量	6	7	8	9	10
测量值/ Ω	0.9997	0.9995	0.9997	0.9998	0.9997

则其标准不确定度计算过程如下:

$$u_3 = s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 1.3 \times 10^{-4} \Omega \quad (\text{C.4})$$

C.1.4 合成标准不确定度

各不确定度分量汇总如表 C.2 所示:

表 C.2 低值电阻标准不确定度分量一览表

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	分布类型	k 值	标准不确定度
u_1	数字多用表低值电阻测量不准确	B 类	正态	1.96	$1.1 \times 10^{-5} \Omega$
u_2	测量过程温度波动	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	$8.1 \times 10^{-4} \Omega$
u_3	测量结果重复性	A 类	/	/	$1.3 \times 10^{-4} \Omega$

上述各分量独立不相关, 则合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 8.2 \times 10^{-4} \Omega \quad (\text{C.5})$$

C.1.5 扩展不确定度

使采用简易法评定扩展不确定度, 取包含因子 $k=2$, 其扩展不确定度为:

$$U = 2 \times u_c = 1.7 \times 10^{-3} \Omega \quad (\text{C.6})$$

C.2 在片高值电阻测量不确定度分析

采用直接测量法, 利用高阻计作为标准, 直接对在片电学参数标准件高值电阻进行校准。

C.2.1 测量模型

测量过程测量模型如 C.7。

$$\Delta R = R_3 - R_2 \quad (\text{C.7})$$

式中:

ΔR ——被校在片高值电阻的示值误差, Ω ;

R_3 ——被校在片高值电阻的标称值, Ω ;

R_2 ——被校在片高值电阻的实测值, Ω 。

C.2.2 不确定度来源

根据测量模型, 分析其测量不确定度来源为:

- a) 由标准仪器 (高阻计测量不准确) 引入的标准不确定度分量, u_1 ;
- b) 测量过程温度波动引入的标准不确定度分量, u_2 ;
- c) 测量重复性引入的标准不确定度分量, u_3 。

C.2.3 标准不确定度评定 (典型点 $1\text{G}\Omega$)

- a) 标准仪器 (高阻计测量不准确) 引入的标准不确定度分量, u_1

该标准仪器在 $1\text{G}\Omega$ 点的技术指标为 $\pm(0.085\%+100\text{k}\Omega)$, 由此引入的分量按照 B 类方法评定, 其测量结果服从均匀分布, 置信因子 $k=\sqrt{3}$, 则 u_1 :

$$u_1 = \frac{0.085\% \times 1\text{G}\Omega + 100\text{k}\Omega}{\sqrt{3}} = 5.5 \times 10^{-4} \text{G}\Omega \quad (\text{C.8})$$

- b) 测量过程温度波动引入的标准不确定度分量, u_2

实际校准过程中, 台温会有微小的变化, 1min 变化最大为 0.4°C , 依据在片高值电阻器标准件的温度系数考核方法, 得到 $1\text{G}\Omega$ 温度相对变化量为 $0.0215\text{G}\Omega/^\circ\text{C}$ 。校准过程台温温度波动为 $\pm 0.2^\circ\text{C}/\text{min}$, 按照 B 类方法评定, 测量结果服从均匀分布, 取 $k=\sqrt{3}$, 则 u_2 :

$$u_2 = \frac{0.4^\circ\text{C} \times 0.0215\text{G}\Omega/^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 5.0 \times 10^{-3} \text{G}\Omega \quad (\text{C.9})$$

- c) 测量重复性引入的标准不确定度分量, u_3

在重复性测量条件下, 采用贝塞尔公式对 10 次测量数据的标准偏差进行计算。测量结果见下表 C.3 所示:

表 C.3 重复性测量数据

第 i 次测量	1	2	3	4	5
测量值/G Ω	0.985	0.986	0.988	0.986	0.988
第 i 次测量	6	7	8	9	10
测量值/G Ω	0.986	0.988	0.985	0.985	0.988

则其标准不确定度计算过程如下:

$$u_3 = s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 1.4 \times 10^{-3} \text{ G}\Omega \quad (\text{C.10})$$

C.2.4 合成标准不确定度

各不确定度分量汇总如表 C.4 所示:

表 C.4 高值电阻标准不确定度分量一览表

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	分布类型	k 值	标准不确定度
u_1	高阻计测量不准确	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	$5.5 \times 10^{-4} \text{ G}\Omega$
u_2	测量过程温度波动	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	$5.0 \times 10^{-3} \text{ G}\Omega$
u_3	测量结果重复性	A 类	/	/	$1.4 \times 10^{-3} \text{ G}\Omega$

上述各分量独立不相关, 则合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 5.2 \times 10^{-3} \text{ G}\Omega \quad (\text{C.11})$$

C.2.5 扩展不确定度

采用简易法评定扩展不确定度, 取包含因子 $k=2$, 其扩展不确定度为:

$$U = 2 \times u_c = 1.1 \times 10^{-2} \text{ G}\Omega \quad (\text{C.12})$$

C.3 在片电容测量不确定度分析

采用直接测量法, 利用电容测量仪作为标准, 直接对在片电学参数标准件在片电容进行校准。

C.3.1 测量模型

测量过程测量模型如 C.13。

$$\Delta C = C_1 - C_0 \quad (\text{C.13})$$

式中:

ΔC ——被校在片电容的示值误差, pF;

C_1 ——被校在片电容的标称值, pF;

C_0 ——被校在片电容的实测值, pF。

C.3.2 不确定度来源

根据测量模型, 分析其测量不确定度来源为:

- a) 由标准仪器 (电容测量仪) 引入的标准不确定度分量, u_1 ;
- b) 测量回路分布电容引入的标准不确定度分量, u_2 ;
- c) 测量重复性引入的标准不确定度分量, u_3 。

C.3.3 标准不确定度评定 (典型点 1pF/1kHz)

- a) 由标准仪器 (电容测量仪) 引入的标准不确定度分量, u_1

查阅其典型点 1pF/1kHz 该频率下的技术指标, 由此引入的分量按照 B 类方法评定, 其测量结果服从均匀分布, 置信因子 $k=\sqrt{3}$, 则 u_1 :

$$u_1 = \frac{1.4 \times 10^{-3} \text{ pF}}{\sqrt{3}} = 7.9 \times 10^{-4} \text{ pF} \quad (\text{C.14})$$

- b) 测量回路分布电容引入的标准不确定度分量, u_2

测量回路主要影响来自于分布电容, 按照并联电容的理论, 增加的直通对接线、右侧探针和右侧线缆只可能使系统误差增大。直接测量法应该考虑其影响量, 1pF/1kHz 时, 其影响量为 $5.3 \times 10^{-4} \text{ pF}$, 则 u_2 :

$$u_2 = \frac{5.3 \times 10^{-4} \text{ pF}}{\sqrt{3}} = 3.1 \times 10^{-4} \text{ pF} \quad (\text{C.15})$$

- c) 测量重复性引入的标准不确定度分量, u_3

在重复性测量条件下, 采用贝塞尔公式对 10 次测量数据的标准偏差进行计算。测量结果见下表 C.5 所示:

表 C.5 重复性测量数据

第 i 次测量	1	2	3	4	5
测量值/ pF	1.0081	1.0079	1.0088	1.0091	1.0093
第 i 次测量	6	7	8	9	10
测量值/ pF	1.0082	1.0081	1.0086	1.0086	1.0094

则其标准不确定度分量计算过程如下:

$$u_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x}_1)^2}{n-1}} = 5.3 \times 10^{-4} \text{ pF} \quad (\text{C.16})$$

C.3.4 合成标准不确定度

各不确定度分量汇总如表 C.6 所示:

表 C.6 在片电容标准不确定度分量一览表

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	分布类型	k 值	标准不确定度
u_1	电容测量不准确	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	$7.9 \times 10^{-4} \text{ pF}$
u_2	测量回路分布电容引入的	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	$3.1 \times 10^{-4} \text{ pF}$
u_3	测量结果重复性	A 类	/	/	$5.3 \times 10^{-4} \text{ pF}$

上述各分量独立不相关, 则合成相对标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 1 \times 10^{-3} \text{ pF} \quad (\text{C.17})$$

C.3.5 扩展不确定度

采用简易法评定扩展不确定度, 取包含因子 $k=2$, 其扩展不确定度为:

$$U = 2 \times u_c = 2 \times 10^{-3} \text{ pF} \quad (\text{C.18})$$