



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 2009—2022

半导体参数精密分析仪校准规范

Calibration Specification for Semiconductor
Parameters Precision Analyzers

2022-12-07 发布

2023-06-07 实施

国家市场监督管理总局 发布

半导体参数精密分析仪
校准规范

Calibration Specification for Semiconductor
Parameters Precision Analyzers

JJF 2009—2022

归口单位：全国无线电计量技术委员会

主要起草单位：中国电子技术标准化研究院

参加起草单位：中国计量科学研究院

中国电子科技集团公司第十三研究所

本规范委托全国无线电计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

徐迎春（中国电子技术标准化研究院）

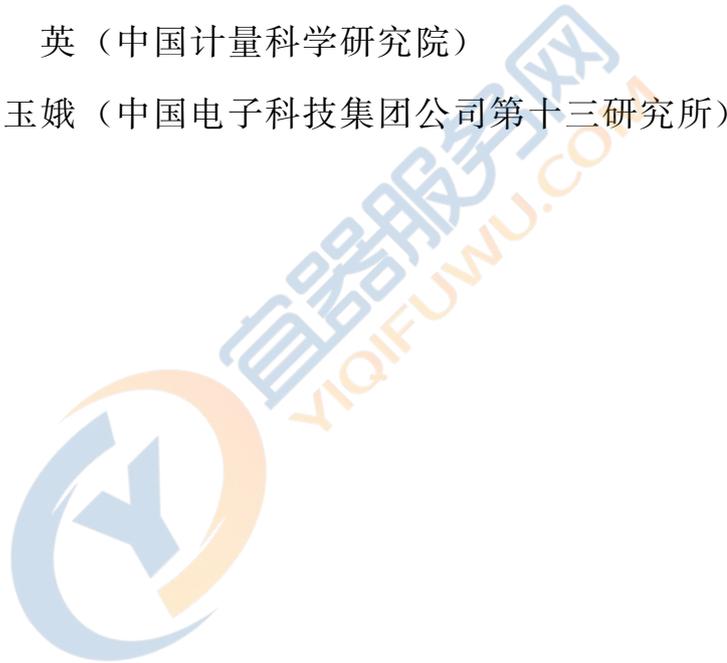
刘 冲（中国电子技术标准化研究院）

于利红（中国电子技术标准化研究院）

参加起草人：

高 英（中国计量科学研究院）

乔玉娥（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 概述	(1)
4 计量特性	(1)
4.1 直流电流输出	(1)
4.2 直流电流测量	(1)
4.3 直流电压输出	(2)
4.4 直流电压测量	(2)
4.5 脉冲电流	(2)
4.6 频率	(2)
4.7 电容测量	(2)
5 校准条件	(2)
5.1 环境条件	(2)
5.2 测量标准及其他设备	(2)
6 校准项目和校准方法	(4)
6.1 校准项目	(4)
6.2 外观和工作正常性检查	(4)
6.3 直流电流输出	(4)
6.4 直流电流测量	(6)
6.5 直流电压输出	(7)
6.6 直流电压测量	(8)
6.7 脉冲电流	(9)
6.8 频率	(10)
6.9 电容测量	(11)
7 校准结果表达	(11)
8 复校时间间隔	(12)
附录 A 原始记录格式	(13)
附录 B 校准证书内页格式	(17)
附录 C 主要项目校准不确定度评定示例	(21)

引 言

JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》和 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。



半导体参数精密分析仪校准规范

1 范围

本规范适用于电压测量范围 $\pm(0.1\text{ V}\sim 3\ 000\text{ V})$ 、电流测量范围 $\pm(1\text{ pA}\sim 1\ 500\text{ A})$ 的半导体参数精密分析仪的校准。

2 引用文件

本规范无引用文件。

3 概述

半导体参数精密分析仪（以下简称被校仪器）主要由大功率电源/测量单元、中功率电源/测量单元、大电流电源/测量单元、高压电源/测量单元、中电流电源/测量单元、多频率电容测量单元、超大电流扩展器等部分组成，通过加压测流和加流测压模式实现 IV、CV 曲线扫描，从而完成二极管、晶体管、场效应晶体管（MOSFET）和绝缘栅双极型晶体管（IGBT）等半导体器件的击穿电压、泄漏电流、结电容等参数的精密测试。原理框图如图 1 所示。

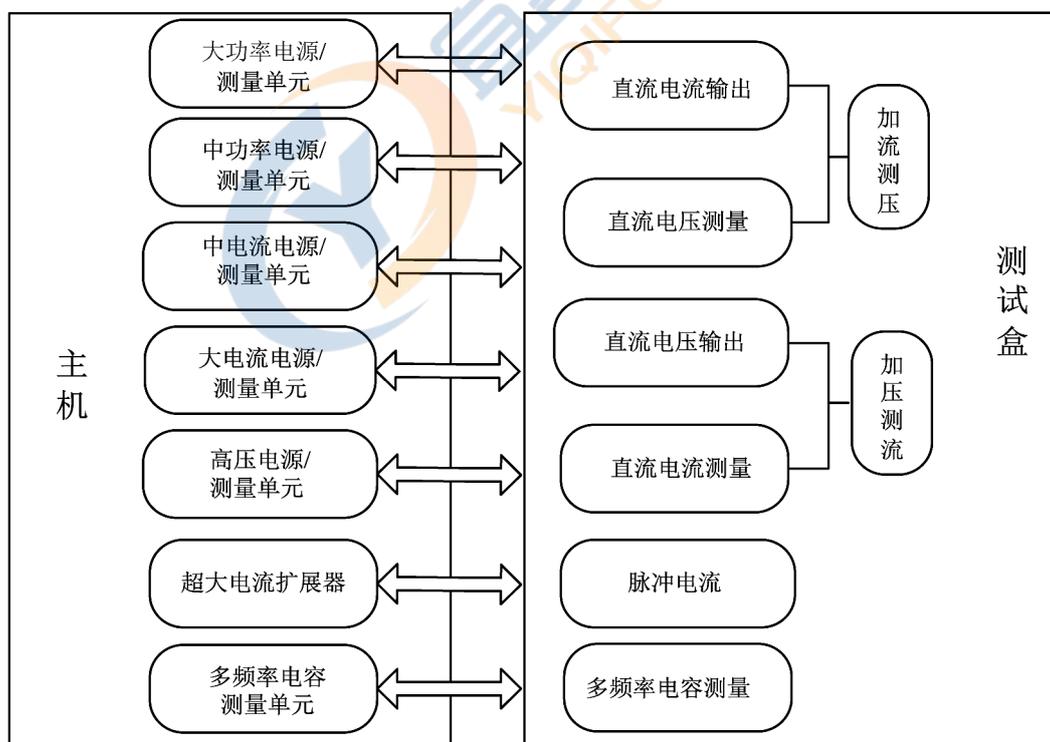


图 1 被校仪器原理框图

4 计量特性

4.1 直流电流输出

4.1.1 输出范围： $\pm(1\text{ pA}\sim 10\ \mu\text{A})$ ；最大允许误差： $\pm(0.3\%\sim 6\%)$ 。

- 4.1.2 输出范围： $\pm(10\mu\text{A}\sim 10\text{A})$ ；最大允许误差： $\pm(0.05\%\sim 0.5\%)$ 。
- 4.2 直流电流测量
- 4.2.1 测量范围： $\pm(1\text{pA}\sim 10\mu\text{A})$ ；最大允许误差： $\pm(0.08\%\sim 6\%)$ 。
- 4.2.2 测量范围： $\pm(10\mu\text{A}\sim 10\text{A})$ ；最大允许误差： $\pm(0.05\%\sim 0.5\%)$ 。
- 4.3 直流电压输出
- 输出范围： $\pm(100\text{mV}\sim 3\ 000\text{V})$ ；
最大允许误差： $\pm(0.05\%\sim 0.2\%)$ 。
- 4.4 直流电压测量
- 测量范围： $\pm(100\text{mV}\sim 3\ 000\text{V})$ ；
最大允许误差： $\pm(0.05\%\sim 1\%)$ 。
- 4.5 脉冲电流
- 测量范围： $\pm(10\text{A}\sim 1\ 500\text{A})$ ；
最大允许误差： $\pm(0.5\%\sim 2\%)$ ；
单脉冲，脉冲宽度： $250\mu\text{s}\sim 10\text{ms}$ 。
- 4.6 频率
- 输出范围： $1\text{kHz}\sim 5\text{MHz}$ ；
最大允许误差： $\pm 0.01\%$ ；
工作电平： $10\text{mV}\sim 10\text{V}$ ；
工作波形：正弦波。
- 4.7 电容测量
- 测量范围： $1\text{pF}\sim 100\text{nF}$ ；
最大允许误差： $\pm(0.1\%\sim 1\%)$ ；
工作电平： $10\text{mV}\sim 10\text{V}$ ；
工作频率： $1\text{kHz}\sim 5\text{MHz}$ 。
- 注：以上技术指标不作合格性判别，仅提供参考。

5 校准条件

5.1 环境条件

- 5.1.1 环境温度： $(23\pm 5)\text{℃}$ 。
- 5.1.2 相对湿度： $\leq 80\%$ 。
- 5.1.3 供电电源： $(220\pm 11)\text{V}$ ， $(50\pm 1)\text{Hz}$ 。
- 5.1.4 周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。

5.2 测量标准及其他设备

5.2.1 直流电压源

- 范围： $\pm(0.1\text{V}\sim 100\text{V})$ ；
最大允许误差： $\pm 0.01\%$ 。

5.2.2 直流电压表

- 测量范围： $\pm(0.1\text{V}\sim 1\ 000\text{V})$ ；
最大允许误差： $\pm 0.01\%$ ；

输入阻抗： $\geq 10\text{ M}\Omega$ 。

5.2.3 直流电流表

测量范围： $\pm(10\text{ }\mu\text{A}\sim 10\text{ A})$ ；

最大允许误差： $\pm(0.01\%\sim 0.1\%)$ 。

5.2.4 指零仪

直流电流测量范围： $\pm(0.1\text{ pA}\sim 10\text{ }\mu\text{A})$ ；

最大允许误差： $\pm(1.5\%\sim 0.3\%)$ 。

20 pA 电流量程固有输入电流 3 fA；

电流短期稳定性：零电流极差在 10 fA（3 min 稳定性测量）。

5.2.5 高压分压器

分压比：500 : 1, 1 000 : 1；

最大允许误差： $\pm 0.1\%$ ；

直流额定电压： $\geq 5\text{ kV}$ 。

5.2.6 数字化仪

脉冲电压测量范围： $\pm(0.1\text{ V}\sim 20\text{ V})$ ；

最大允许误差： $\pm 0.7\%$ ；

带宽： $\geq 1\text{ MHz}$ 。

5.2.7 标准电阻

阻值：0.01 Ω , 0.1 Ω , 1 Ω , 10 Ω , 100 Ω , 1 k Ω , 10 k Ω ；

最大允许误差： $\pm 0.1\%$ 。

5.2.8 高压电阻

阻值：1 M Ω , 工作电压： $\geq 1\text{ kV}$, 最大允许误差： $\pm 0.1\%$ ；

阻值：10 M Ω , 工作电压： $\geq 2\text{ kV}$, 最大允许误差： $\pm 0.1\%$ ；

阻值：100 M Ω , 工作电压： $\geq 3\text{ kV}$, 最大允许误差： $\pm 0.1\%$ 。

5.2.9 高值电阻箱

阻值：10 M Ω , 测量不确定度：0.005% ($k=2$)；

阻值：100 M Ω , 测量不确定度：0.005% ($k=2$)；

阻值：1 G Ω , 测量不确定度：0.01% ($k=2$)；

阻值：10 G Ω , 测量不确定度：0.05% ($k=2$)；

阻值：100 G Ω , 测量不确定度：0.1% ($k=2$)；

阻值：1 T Ω , 测量不确定度：0.2% ($k=2$)。

5.2.10 脉冲分流器

阻值：0.005 Ω , 0.01 Ω , 0.1 Ω , 1 Ω ；

最大允许误差： $\pm 0.15\%$ ；

功率： $\geq 10\text{ W}$ ；

带宽： $\geq 10\text{ kHz}$ 。

5.2.11 频率计

测量范围：1 kHz \sim 5 MHz；

最大允许误差： $\pm 0.001\%$ 。

5.2.12 标准电容

电容值：1 pF，工作频率：1 MHz~5 MHz，测量不确定度：0.05%~0.3% ($k=2$)；

电容值：10 pF，工作频率：100 kHz~5 MHz，测量不确定度：0.02%~0.1% ($k=2$)；

电容值：100 pF，工作频率：100 kHz~5 MHz，测量不确定度：0.02%~0.1% ($k=2$)；

电容值：1 nF，工作频率：100 kHz~5 MHz，测量不确定度：0.02%~0.3% ($k=2$)；

电容值：10 nF，工作频率：1 kHz~100 kHz，测量不确定度：0.02%~0.03% ($k=2$)；

电容值：100 nF，工作频率：1 kHz~10 kHz，测量不确定度：0.02% ($k=2$)。

6 校准项目和校准方法

6.1 校准项目

校准项目见表 1。

表 1 校准项目一览表

编号	项目名称
1	外观和工作正常性检查
2	直流电流输出
3	直流电流测量
4	直流电压输出
5	直流电压测量
6	脉冲电流
7	频率
8	电容测量

6.2 外观和工作正常性检查

6.2.1 接通电源前要检查被校仪器，不应有影响正常工作及读数的机械损伤。要求各旋钮转动灵活、无松动；波段开关跳步清晰，定位正确；琴键开关起跳自如，能自锁互锁。

6.2.2 应附有被校仪器正常工作的必要的附件。

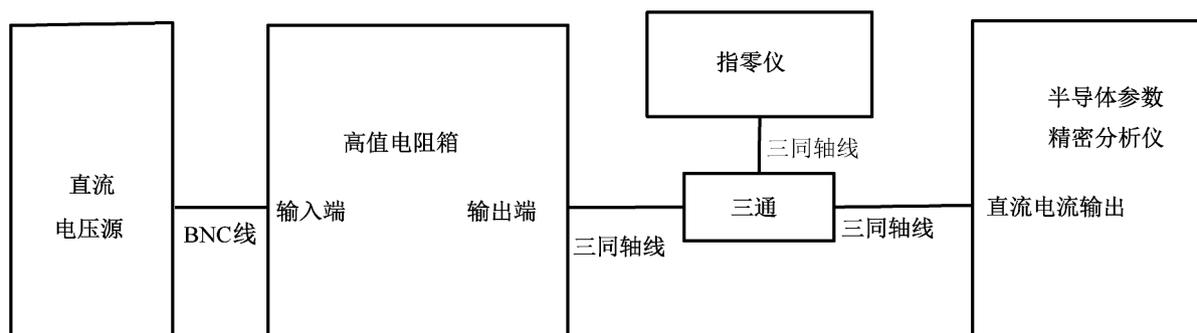
6.2.3 通电预热后，被校仪器应能正常工作。

6.2.4 将检查结果记入表 A.1 中。

6.3 直流电流输出

6.3.1 $\pm(1 \text{ pA} \sim 10 \text{ } \mu\text{A})$

a) 按图 2 连接仪器。

图2 直流电流输出 $\pm(1 \text{ pA} \sim 10 \text{ } \mu\text{A})$ 校准连接框图

- b) 选择被校量程。
- c) 设置输出电流 I_{11} （一般每个量程至少按低、中、高选取三个校准点）。
- d) 选择合适的高值电阻 R_{01} ，设置直流电压源合适的电压。
- e) 开启测试，调节直流电压源输出电压使得指零仪显示值为零。
- f) 读取直流电压源的输出值 V_{01} ，按公式（1）计算直流电流输出的标准值 I_{01} ，按公式（2）计算相对误差 δ_1 ，并将校准结果填入表 A.2 中。

$$I_{01} = \frac{V_{01}}{R_{01}} \quad (1)$$

$$\delta_1 = \frac{I_{11} - I_{01}}{I_{01}} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

δ_1 ——直流电流输出的相对误差；

V_{01} ——直流电压源的输出值，V；

R_{01} ——高值电阻箱电阻标准值， Ω ；

I_{01} ——被校仪器直流电流标准值，A；

I_{11} ——被校仪器直流电流设置值，A。

g) 重复步骤 c) ~f)，完成其他校准点的校准。

h) 改变量程，重复步骤 c) ~g)，完成校准。

6.3.2 $\pm(10 \text{ } \mu\text{A} \sim 10 \text{ A})$

a) 按图 3 连接仪器。

图3 直流电流输出 $\pm(10 \text{ } \mu\text{A} \sim 10 \text{ A})$ 校准连接框图

- b) 选择被校量程。
- c) 设置电流 I_{12} （一般每个量程至少按低、中、高选取三个校准点），开启测试，读取直流电流表的测量值 I_{02} ，按公式（3）计算 δ_2 ，并将校准结果填入表 A.3 中。

$$\delta_2 = \frac{I_{12} - I_{02}}{I_{02}} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

δ_2 ——直流电流输出的相对误差；

I_{12} ——被校仪器直流电流设置值，A；

I_{02} ——直流电流表测量的标准值，A。

d) 重复步骤 c)，完成其他校准点的校准。

e) 改变量程，重复步骤 c) ~d)，完成校准。

6.4 直流电流测量

6.4.1 $\pm(1 \text{ pA} \sim 10 \text{ } \mu\text{A})$

a) 按图 4 连接仪器。

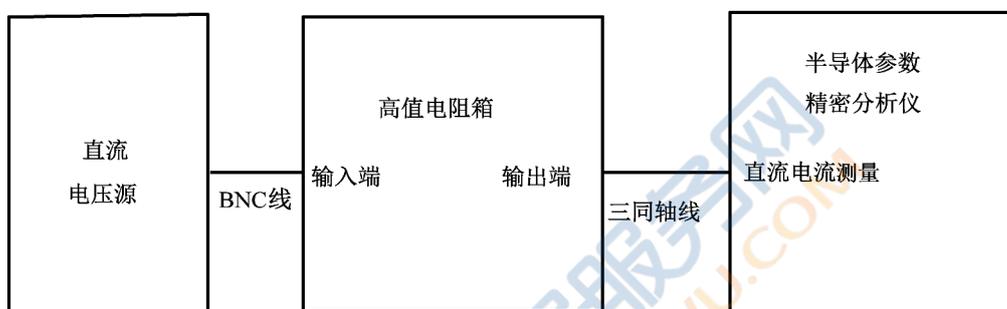


图 4 直流电流测量 $\pm(1 \text{ pA} \sim 10 \text{ } \mu\text{A})$ 校准连接框图

b) 选择被校量程。

c) 根据选择的量程（一般每个量程至少按低、中、高选取三个校准点），选择合适的高值电阻 R_{02} ，设置直流电压源合适的电压。

d) 开启测试，直流电压源输出，读取被校仪器的直流电流测量值 I_{13} ，按公式（4）计算直流电流测量的标准值，按公式（5）计算相对误差 δ_3 ，并将校准结果填入表 A.4 中。

$$I_{03} = \frac{V_{02}}{R_{02}} \quad (4)$$

$$\delta_3 = \frac{I_{13} - I_{03}}{I_{03}} \times 100\% \quad (5)$$

式中：

δ_3 ——直流电流测量的相对误差；

V_{02} ——直流电压源的输出值，V；

R_{02} ——高值电阻箱电阻标准值， Ω ；

I_{03} ——被校仪器直流电流测量标准值，A；

I_{13} ——被校仪器直流电流测量值，A。

e) 重复步骤 c) ~d)，完成其他校准点的校准。

f) 改变量程，重复步骤 c) ~e)，完成校准。

6.4.2 $\pm(10 \text{ } \mu\text{A} \sim 10 \text{ A})$

a) 按图 5 连接仪器。

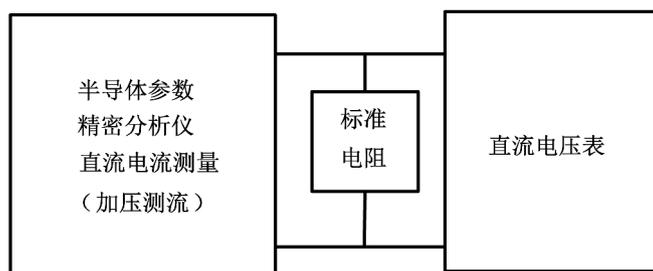


图5 直流电流测量±(10 μA~10 A) 校准连接框图

b) 选择被校量程。

c) 根据选择的量程（一般每个量程至少按低、中、高选取三个校准点），选取合适的标准电阻，设置被校仪器合适的电压值。

d) 开启测试，读取直流电压表的测量值 V_{03} ，读取被校仪器的电流测量值 I_{14} ，按公式（6）计算标准电流值，按公式（7）计算相对误差 δ_4 ，并将校准结果填入表 A.5 中。

$$I_{04} = \frac{V_{03}}{R_{03}} \quad (6)$$

$$\delta_4 = \frac{I_{14} - I_{04}}{I_{04}} \times 100\% \quad (7)$$

式中：

δ_4 —— 直流电流测量的相对误差；

V_{03} —— 直流电压表测量值，V；

R_{03} —— 标准电阻电阻标准值， Ω ；

I_{04} —— 被校仪器直流电流测量标准值，A；

I_{14} —— 被校仪器直流电流测量值，A。

e) 重复步骤 c) ~d)，完成其他校准点的校准。

f) 改变量程，重复步骤 c) ~e)，完成校准。

6.5 直流电压输出

6.5.1 ±(0.1 V~1 000 V)

a) 按图 6 连接仪器。

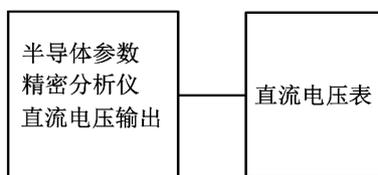


图6 直流电压输出±(0.1 V~1 000 V) 校准连接框图

b) 选择被校量程。

c) 设置输出电压 V_{11} （一般每个量程至少按低、中、高选取三个校准点），开启测试，读取直流电压表的测量值 V_{04} ，按公式（8）计算相对误差 δ_5 ，并将校准结果填入表 A.6 中。

$$\delta_5 = \frac{V_{11} - V_{04}}{V_{04}} \times 100\% \quad (8)$$

式中：

δ_5 ——直流电压输出的相对误差；

V_{11} ——被校仪器直流电压设置值，V；

V_{04} ——直流电压表测得的标准值，V。

d) 重复步骤 c)，完成其他校准点的校准。

e) 改变量程，重复步骤 c) ~d)，完成校准。

6.5.2 ±(1 000 V~3 kV)

a) 按图 7 连接仪器

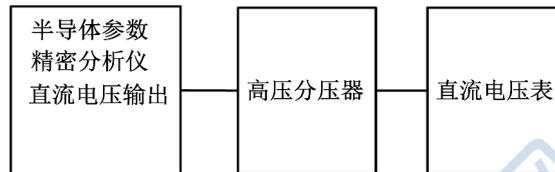


图 7 直流电压输出 ±(1 000 V~3 kV) 校准连接框图

b) 选择被校量程。

c) 设置输出电压 V_{12} （一般每个量程至少按低、中、高选取三个校准点），开启测试，读取直流电压表的测量值 V_{05} ，按公式 (9) 计算相对误差 δ_6 ，并将校准结果填入表 A.7 中。

$$\delta_6 = \frac{V_{12} - V_{05} \times k}{V_{05} \times k} \times 100\% \quad (9)$$

式中：

δ_6 ——直流电压输出的相对误差；

k ——直流高压分压器分压比；

V_{05} ——直流电压表测量值，V；

V_{12} ——被校仪器直流电压设置值，V。

d) 重复步骤 c)，完成其他校准点的校准。

e) 改变量程，重复步骤 c) ~d)，完成校准。

6.6 直流电压测量

6.6.1 ±(0.1 V~100 V)

a) 按图 8 连接仪器。

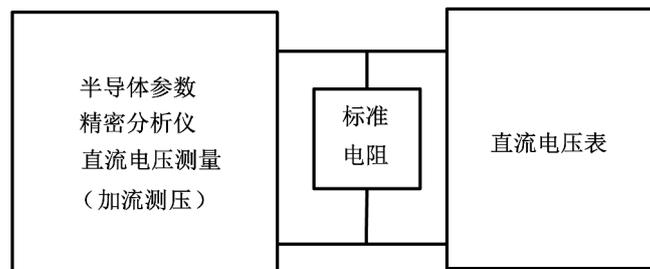


图 8 直流电压测量 ±(0.1 V~100 V) 校准连接框图

b) 选择被校量程。

c) 根据选择的量程（一般每个量程至少按低、中、高选取三个校准点），选取合适

的标准电阻，设置被校仪器合适的电流值。

d) 开启测试，读取直流电压表的测量值 V_{06} ，读取被校仪器直流电压测量值 V_{13} ，按公式 (10) 计算相对误差 δ_7 ，并将校准结果填入表 A. 8 中。

$$\delta_7 = \frac{V_{13} - V_{06}}{V_{06}} \times 100\% \quad (10)$$

式中：

δ_7 —— 直流电压测量的相对误差；

V_{13} —— 被校仪器的直流电压测量值，V；

V_{06} —— 直流电压表测得的标准值，V。

e) 重复步骤 c) ~d)，完成其他校准点的校准。

f) 改变量程，重复步骤 c) ~e)，完成校准。

6.6.2 ±(100 V~3 kV)

a) 按图 9 连接仪器。

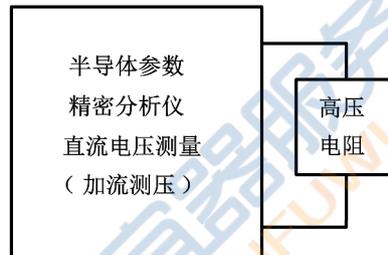


图 9 直流电压测量±(100 V~3 kV) 校准连接框图

b) 选择被校量程。

c) 根据选择的量程（一般每个量程至少按低、中、高选取三个校准点），选取合适的高压电阻，设置被校仪器合适的电流值。

d) 开启测试，读取被校仪器的电压测量值 V_{14} ，按公式 (11) 计算相对误差 δ_8 ，并将校准结果填入表 A. 9 中。

$$\delta_8 = \frac{V_{14} - I_{05} \times R_{04}}{I_{05} \times R_{04}} \times 100\% \quad (11)$$

式中：

δ_8 —— 直流电压测量的相对误差；

R_{04} —— 高压电阻标准值， Ω ；

I_{05} —— 设置被校仪器电流的标准值，A；

V_{14} —— 被校仪器直流电压测量值，V。

e) 重复步骤 c) ~d)，完成其他校准点的校准。

g) 改变量程，重复步骤 c) ~e)，完成校准。

6.7 脉冲电流

a) 按图 10 连接仪器。



图 10 脉冲电流校准连接框图

b) 选择被校量程，选择合适的脉冲宽度。

c) 设置输出脉冲电流 I_{15} （一般每个量程至少按低、中、高选取三个校准点），开启测试，根据数字化仪显示的数据波形，除另有规定外，取中间稳定部分 1/3 的平均值作为电压测量值 V_{07} ，读取被校仪器脉冲电流测量值 I_{16} ，按公式 (12) 计算被校脉冲电流的标准值 I_{05} ，按公式 (13) 计算相对误差 δ_9 ，按公式 (14) 计算相对误差 δ_{10} ，并将校准结果填入表 A.10 中。

$$I_{05} = \frac{V_{07}}{R_{05}} \quad (12)$$

$$\delta_9 = \frac{I_{15} - I_{05}}{I_{05}} \times 100\% \quad (13)$$

$$\delta_{10} = \frac{I_{16} - I_{05}}{I_{05}} \times 100\% \quad (14)$$

式中：

δ_9 —— 脉冲电流输出的相对误差；

δ_{10} —— 脉冲电流测量的相对误差；

I_{05} —— 被校脉冲电流标准值，A；

V_{07} —— 数字化仪电压测量值，V；

R_{05} —— 脉冲分流器电阻标准值， Ω ；

I_{15} —— 被校仪器脉冲电流设置值，A；

I_{16} —— 被校仪器脉冲电流测量值，A。

d) 重复步骤 c)，完成其他校准点的校准。

e) 改变量程，重复步骤 c) ~ d)，完成校准。

注：数字化仪工作于直流电压数据采集模式，采样率大于 5×10^4 Sa/s，采样模式为单次采样，触发电平为被校脉冲电流通过脉冲分流器后电压信号幅度的 90%。

6.8 频率

a) 按图 11 连接仪器。



图 11 频率校准连接框图

b) 选择合适的电平，设置频率值 f_1 （一般每个量程至少按低、中、高选取三个校准点）。

c) 开启测试, 读取频率计的测量值 f_0 , 按公式 (15) 计算相对误差 δ_{11} , 并将校准结果填入表 A. 11 中。

$$\delta_{11} = \frac{f_1 - f_0}{f_0} \times 100\% \quad (15)$$

式中:

δ_{11} ——频率的相对误差;

f_1 ——被校仪器频率设置值, Hz;

f_0 ——频率计测量值, Hz。

d) 其他校准点的校准, 重复 b) ~c) 的操作。

6.9 电容测量

a) 按图 12 连接仪器。

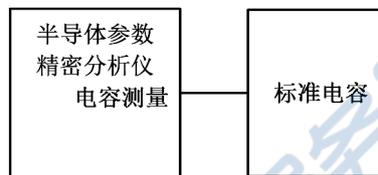


图 12 电容测量校准连接框图

b) 选择被校量程。

c) 根据选择的量程 (一般每个量程至少按低、中、高选取三个校准点), 选取合适的标准电容, 被校仪器设置合适的频率和电平, 开启测试, 读取被校仪器的电容测量值 C_1 , 按公式 (16) 计算电容测量的相对误差 δ_{12} , 并将校准结果填入表 A. 12 中。

$$\delta_{12} = \frac{C_1 - C_0}{C_0} \times 100\% \quad (16)$$

式中:

δ_{12} ——电容测量的相对误差;

C_1 ——被校仪器电容测量值, F;

C_0 ——标准电容的标准值, F。

d) 重复步骤 c), 完成其他校准点的校准。

e) 改变量程, 重复步骤 c) ~d), 完成校准。

7 校准结果表达

半导体参数精密分析仪校准后, 出具校准证书。校准证书至少应包含以下信息:

a) 标题, “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或应用有关时, 应说明被校对象的

接收日期；

- h) 如果与校准结果的有效性或应用有关时，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。

8 复校时间间隔

复校时间间隔由用户根据使用情况自行确定，推荐为1年。



附录 A

原始记录格式

表 A.1 外观和工作正常性检查

项目	检查结果
外观检查	正常 <input type="checkbox"/> 不正常 <input type="checkbox"/> : _____
工作正常性检查	正常 <input type="checkbox"/> 不正常 <input type="checkbox"/> : _____

表 A.2 直流电流输出士(1 pA~10 μA)

模块	量程	设定值	标准值		误差	测量不确定度 $U(k=2)$
			标准电压值	高值电阻值		

表 A.3 直流电流输出士(10 μA~10 A)

模块	量程	设定值	标准值	误差	测量不确定度 $U(k=2)$

表 A.4 直流电流测量士(1 pA~10 μA)

模块	量程	测量值	标准值		误差	测量不确定度 $U(k=2)$	
			标准电压值	高值电阻值			

表 A.5 直流电流测量士(10 μA~10 A)

模块	量程	测量值	标准值		误差	测量不确定度 $U(k=2)$	
			标准电压值	标准电阻值			

表 A.6 直流电压输出士(0.1 V~1 000 V)

模块	量程	设定值	标准值	误差	测量不确定度 $U(k=2)$	

表 A.7 直流电压输出±(1 000 V~3 kV)

模块	量程	设定值	标准值		误差	测量不确定度 $U(k=2)$	
			标准电压值	分压比			

表 A.8 直流电压测量±(0.1 V~100 V)

模块	量程	测量值	标准值	误差	测量不确定度 $U(k=2)$	

表 A.9 直流电压测量±(100 V~3 kV)

模块	量程	测量值	标准值		误差	测量不确定度 $U(k=2)$	
			标准电压值	标准电阻值			

表 A.10 脉冲电流

模块	量程	设定值	标准值		测量值	设定误差	测量误差	测量不确定度 $U(k=2)$
			标准电压值	电阻值				

表 A.11 频率

模块	量程	设定值	标准值	误差	测量不确定度 $U(k=2)$

表 A.12 电容测量

模块	量程	测量值	标准值	误差	测量不确定度 $U(k=2)$

附录 B

校准证书内页格式

表 B.1 外观及工作正常性检查

项目	检查结果
外观检查	正常 <input type="checkbox"/> 不正常 <input type="checkbox"/> : _____
工作正常性检查	正常 <input type="checkbox"/> 不正常 <input type="checkbox"/> : _____

表 B.2 直流电流输出±(1 pA~10 μA)

模块	量程	设定值	标准值	误差	测量不确定度 $U(k=2)$	

表 B.3 直流电流输出±(10 μA~10 A)

模块	量程	设定值	标准值	误差	测量不确定度 $U(k=2)$	

表 B.4 直流电流测量士(1 pA~10 μA)

模块	量程	测量值	标准值	误差	测量不确定度 $U(k=2)$	

表 B.5 直流电流测量士(10 μA~10 A)

模块	量程	测量值	标准值	误差	测量不确定度 $U(k=2)$	

表 B.6 直流电压输出士(0.1 V~1 000 V)

模块	量程	设定值	标准值	误差	测量不确定度 $U(k=2)$	

表 B.7 直流电压输出±(1 000 V~3 kV)

模块	量程	设定值	标准值	误差	测量不确定度 $U(k=2)$	

表 B.8 直流电压测量±(0.1 V~100 V)

模块	量程	测量值	标准值	误差	测量不确定度 $U(k=2)$	

表 B.9 直流电压测量±(100 V~3 kV)

模块	量程	测量值	标准值	误差	测量不确定度 $U(k=2)$	

表 B.10 脉冲电流

模块	量程	设定值	标准值	测量值	设定误差	测量误差	测量不确定度 $U(k=2)$	

表 B.11 频率

模块	量程	设定值	标准值	误差	测量不确定度 $U(k=2)$	

表 B.12 电容测量

模块	量程	测量值	标准值	误差	测量不确定度 $U(k=2)$	

附录 C

主要项目校准不确定度评定示例

C.1 直流电流输出士(1 pA~10 μA) 校准结果不确定度评定

C.1.1 测量模型

根据直流电流输出士(1 pA~10 μA) 校准的工作原理可知, 设被校直流电流输出士(1 pA~10 μA) 在测量环境条件下的输出电流值为 I_x , 多功能校准源的输出电压为 U , 高值电阻为 R , 根据测量方法, 则有:

$$I_x = \frac{U}{R} + I_g + \Delta \quad (\text{C.1})$$

式中:

I_x ——被测电流的标准值;

U ——直流标准电压源的输出电压;

R ——标准电阻的标准值;

I_g ——指零仪的零位电流;

Δ ——测量重复性引入的误差。

C.1.2 合成标准不确定度计算公式

由于以上各分量(互)不相关, 因此可得合成标准不确定度计算公式:

$$u_c^2(I_x) = u^2(U) + u^2(R) + u^2(I_g) + u^2(\Delta) \quad (\text{C.2})$$

C.1.3 标准不确定度评定

C.1.3.1 直流电压源引入的不确定度分量 $u(U)$

按 B 类进行评定。直流电压源在士(0.1 V~1 000 V), 最大允许误差为士 0.01%, 则区间半宽度 α 为 0.01%, 按照均匀分布, $k = \sqrt{3}$, 则 $u(U) = \frac{\alpha}{k} = \frac{0.01\%}{\sqrt{3}} = 0.006\%$ 。

C.1.3.2 高值电阻引入的不确定度 $u(R)$

按 B 类进行评定。高值电阻校准证书给出 1 TΩ 校准结果的相对扩展不确定度为 0.2% ($k=2$), 其引入的不确定度分量为 $u(R) = 0.1\%$ 。

C.1.3.3 指零仪引入的不确定度 $u(I_g)$

a) 由指零仪固有的输入电流引入的不确定度分量 $u_1(I_g)$

按 B 类进行评定。指零仪在 20 pA 电流量程会存在一个固有的输入电流 3 fA, 按照均匀分布, $k = \sqrt{3}$, 按其说明书, 指零仪固有的输入电流引入的不确定度分量 $u_1(I_g) = 1.7 \times 10^{-3}$ 。

b) 指零仪零电流短期稳定性引入的不确定度分量 $u_2(I_g)$

对指零仪进行短期 3 分钟的稳定性测量, 其零电流极差在 10 fA, 相对于 1 pA 而言, 其引入的不确定度分量 $u_2(I_g) = 2.9 \times 10^{-3}$ 。

C.1.3.4 由测量重复性引入的相对不确定度 $u(\Delta)$

由测量重复性引入的不确定度分量按 A 类评定。选取 B1500A 半导体分析仪的小电流源作为被测对象，对 1 pA 电流点进行独立重复测量 10 次，重复性测试数据见表 C.1。

表 C.1 1 pA 电流重复性测试数据

测量次数	测量值/pA
1	1.000 4
2	1.000 3
3	1.000 4
4	1.000 5
5	1.000 8
6	1.000 5
7	1.000 7
8	1.000 3
9	1.000 3
10	1.000 6
平均值 $\bar{\Delta}$	1.000 48
实验标准偏差 $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{(n-1)}} \left \frac{1}{\bar{\Delta}} \right $	1.8×10^{-4}

C.1.4 合成标准不确定度

不确定度分量一览表见表 C.2。

表 C.2 各标准不确定度分量一览表

不确定度分量	来源	评定方法	分布	k	标准不确定度
$u(U)$	直流电压源	B类	均匀	$\sqrt{3}$	6×10^{-5}
$u(R)$	高值电阻	B类	均匀	$\sqrt{3}$	0.1%
$u_1(I_g)$	指零仪固有输入电流	B类	均匀	$\sqrt{3}$	1.7×10^{-3}
$u_2(I_g)$	指零仪零电流短期稳定性	B类	均匀	$\sqrt{3}$	2.9×10^{-3}
$u(\Delta)$	测量重复性	A类	——	——	1.8×10^{-4}

以上各不确定度分量（互）不相关，根据公式（C.3）计算合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u^2(U) + u^2(R) + u_1^2(I_g) + u_2^2(I_g) + u^2(\Delta)} \approx 0.35\% \quad (\text{C.3})$$

C.1.5 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = u_c \times k \approx 0.7\% \quad (\text{C.4})$$

C.2 直流电流测量士（1 pA~10 μA）校准结果不确定度评定

C.2.1 测量模型

根据直流电流测量士（1 pA~10 μA）校准的工作原理可知，设被校直流电流测量士（1 pA~10 μA）在测量环境条件下的直流电流测量值为 I_x ，多功能校准源 5720A 的输出电压为 U ，高值电阻为 R ，根据测量方法，则有：

$$I_x = \frac{U}{R} + \Delta \quad (\text{C.5})$$

式中：

I_x ——被测直流电流测量的标准值；

U ——直流标准电压源的输出电压；

R ——标准电阻的标准值；

Δ ——测量重复性引入的误差。

C.2.2 合成标准不确定度计算公式

由于以上各分量（互）不相关，因此可得合成标准不确定度计算公式：

$$u_c^2(I_x) = u^2(U) + u^2(R) + u^2(\Delta) \quad (\text{C.6})$$

C.2.3 标准不确定度评定

C.2.3.1 直流电压源引入的不确定度分量 $u(U)$

按 B 类进行评定。直流电压源在士（0.1 V~1 000 V），最大允许误差为士 0.01%，则区间半宽度 α 为 0.01%，按照均匀分布， $k=\sqrt{3}$ ，则 $u(U) = \frac{\alpha}{k} = \frac{0.01\%}{\sqrt{3}} = 0.006\%$ 。

C.2.3.2 高值电阻引入的不确定度 $u(R)$

按 B 类进行评定。高值电阻校准证书给出 1 TΩ 校准结果的相对扩展不确定度为 0.2%（ $k=2$ ），其引入的不确定度分量为 $u(R) = 0.1\%$ 。

C.2.3.3 由测量重复性引入的相对不确定度 $u(\Delta)$

由测量重复性引入的不确定度分量按 A 类评定。选取半导体分析仪的小电流表作为被测对象，对 1 pA 电流点进行独立重复测量 10 次，重复性测试数据见表 C.3。

表 C.3 1 pA 电流重复性测试数据

测量次数	测量值/pA
1	1.001 2
2	1.001 5
3	1.000 8
4	1.000 5
5	1.000 6
6	1.000 8
7	1.001 0
8	1.001 3
9	1.000 4
10	1.000 6
平均值 $\bar{\Delta}$	1.000 87
实验标准偏差 $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{(n-1)}} / \bar{\Delta}$	3.7×10^{-4}

C.2.4 合成标准不确定度

不确定度分量一览表见表 C.4。

表 C.4 各标准不确定度分量一览表

不确定度分量	来源	评定方法	分布	k	标准不确定度
$u(U)$	直流电压源	B类	均匀	$\sqrt{3}$	6×10^{-5}
$u(R)$	高值电阻	B类	均匀	$\sqrt{3}$	0.1%
$u(\Delta)$	测量重复性	A类	——	——	3.7×10^{-4}

以上各不确定度分量（互）不相关，根据公式（C.7）计算合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u^2(U) + u^2(R) + u^2(\Delta)} \approx 0.1\% \quad (\text{C.7})$$

C.2.5 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = u_c \times k \approx 0.2\% \quad (\text{C.8})$$

C.3 直流电压输出±(1 000 V~3 kV) 校准结果不确定度评定

C.3.1 测量模型

根据直流电压输出±(1 000 V~3 kV) 校准的工作原理可知，设被校直流电压输出±(1 000 V~3 kV) 在测量环境条件下的直流电压输出值为 V_x ，直流电压表的测量值为 U ，高压分压器分压比为 k ，根据测量方法，则有：

$$V_x = U \times k + \Delta \quad (\text{C.9})$$

式中：

V_x ——被测直流电压输出的标准值；

U ——直流电压表的测量值；

k ——高压分压器分压比；

Δ ——测量重复性引入的误差。

C.3.2 合成标准不确定度计算公式

由于以上各分量（互）不相关，因此可得合成标准不确定度计算公式：

$$u_c^2(V_x) = u^2(U) + u^2(k) + u^2(\Delta) \quad (\text{C.10})$$

C.3.3 标准不确定度评定

C.3.3.1 直流电压表引入的不确定度分量 $u(U)$

按 B 类进行评定。直流电压源在 $\pm(0.1 \text{ V} \sim 1\,000 \text{ V})$ ，最大允许误差为 $\pm 0.01\%$ ，则区间半宽度 α 为 0.01% ，按照均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则 $u(U) = \frac{\alpha}{k} = \frac{0.01\%}{\sqrt{3}} = 0.006\%$ 。

C.3.3.2 高压分压器引入的不确定度 $u(k)$

按 B 类进行评定。分压比 $500 : 1$ ，最大允许误差为 $\pm 0.1\%$ ，则区间半宽度 α 为 0.1% ，按照均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则 $u(R) = \frac{\alpha}{k} = \frac{0.1\%}{\sqrt{3}} = 0.06\%$ 。

C.3.3.3 由测量重复性引入的相对不确定度 $u(\Delta)$

由测量重复性引入的不确定度分量按 A 类评定。选取半导体分析仪的 HVSMU 模块的高压源作为被测对象，对 $1\,000 \text{ V}$ 电压点进行独立重复测量 10 次，重复性测试数据见表 C.5。

表 C.5 1 000 V 电压重复性测试数据

测量次数	测量值/V
1	999.978
2	999.981
3	999.979
4	999.980
5	999.980
6	999.978
7	999.981
8	999.98
9	999.981
10	999.980
平均值 $\bar{\Delta}$	999.979 8
实验标准偏差 $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{(n-1)}} / \bar{\Delta}$	0.1%

C.3.4 合成标准不确定度

不确定度分量一览表见表 C.6。

表 C.6 各标准不确定度分量一览表

不确定度分量	来源	评定方法	分布	k	标准不确定度
$u(U)$	直流电压源	B类	均匀	$\sqrt{3}$	6×10^{-5}
$u(k)$	高值电阻	B类	均匀	$\sqrt{3}$	0.06%
$u(\Delta)$	测量重复性	A类	—	—	0.1%

以上各不确定度分量（互）不相关，根据公式（C.11）计算合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u^2(U) + u^2(R) + u^2(\Delta)} \approx 0.1\% \quad (\text{C.11})$$

C.3.5 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = u_c \times k \approx 0.2\% \quad (\text{C.12})$$

C.4 直流电压测量士（100 V~3 kV）校准结果不确定度评定

C.4.1 测量模型

根据直流电压测量士（100 V~3 kV）校准的工作原理可知，设被校直流电压测量士（100 V~3 kV）在测量环境条件下的直流电压测量值为 V_x ，直流电流源的输出电流为 I ，高压电阻阻值为 R ，根据测量方法，则有：

$$V_x = IR + \Delta \quad (\text{C.13})$$

式中：

V_x ——被测直流电压测量的标准值；

I ——直流电流源的输出电流；

R ——高压电阻的标准值；

Δ ——测量重复性引入的误差。

C.4.2 合成标准不确定度计算公式

由于以上各分量（互）不相关，因此可得合成标准不确定度计算公式：

$$u_c^2(V_x) = u^2(I) + u^2(R) + u^2(\Delta) \quad (\text{C.14})$$

C.4.3 标准不确定度评定

C.4.3.1 直流电流源引入的不确定度分量 $u(I)$

按 B类进行评定。经过半年试验得知 B1505A 直流电流源输出士（0.1 mA~1 mA）在半小时内稳定度为 50 nA。当电流源输出为 0.2 mA 时，区间半宽度 α 为 2.5×10^{-4} ，

按照均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则 $u(I) = \frac{\alpha}{k} = \frac{2.5 \times 10^{-4}}{\sqrt{3}} \approx 1.5 \times 10^{-4}$ 。

C.4.3.2 高压电阻引入的不确定度 $u(R)$

按 B类进行评定。高值电阻阻值 1 M Ω ，最大允许误差为士 0.1%，则区间半宽度 α

为 0.1%，按照均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则 $u(R) = \frac{\alpha}{k} = \frac{0.1\%}{\sqrt{3}} = 0.06\%$ 。

C.4.3.3 由测量重复性引入的相对不确定度 $u(\Delta)$

由测量重复性引入的不确定度分量按 A 类评定。选取半导体分析仪的电压源作为被测对象，对 200 V 电压点进行独立重复测量 10 次，重复性测试数据见表 C.7。

表 C.7 200 V 电压重复性测试数据

测量次数	测量值/V
1	200.003 0
2	200.003 1
3	200.003 0
4	200.002 9
5	200.002 8
6	200.003 2
7	200.002 9
8	200.003 0
9	200.003 1
10	200.003 3
平均值 $\bar{\Delta}$	200.003 03
实验标准偏差 $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{(n-1)}} / \bar{\Delta}$	0.015%

C.4.4 合成标准不确定度

不确定度分量一览表见表 C.8。

表 C.8 各标准不确定度分量一览表

不确定度分量	来源	评定方法	分布	k	标准不确定度
$u(I)$	直流电压源	B类	均匀	$\sqrt{3}$	1.5×10^{-4}
$u(R)$	高值电阻	B类	均匀	$\sqrt{3}$	0.06%
$u(\Delta)$	测量重复性	A类	——	——	0.015%

以上各不确定度分量（互）不相关，根据公式（C.15）计算合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u^2(I) + u^2(R) + u^2(\Delta)} \approx 0.06\% \quad (\text{C.15})$$

C.4.5 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = u_c \times k \approx 0.12\% \quad (\text{C.16})$$

C.5 脉冲电流校准结果不确定度评定示例

C.5.1 测量模型

根据被校仪器使用说明书的要求，将脉冲电流设定为指定校准点，根据欧姆定律，

通过数字化仪测量脉冲分流器上的脉冲电压稳定部分幅度测量值实现脉冲电流的校准。

$$I_x = \frac{U}{R} + \Delta \quad (\text{C.17})$$

式中：

I_x ——被校偏置电流源（脉冲）的电流设定值；

U ——数字化仪脉冲电压稳定部分幅度测量值；

R ——脉冲分流器电阻值；

Δ ——测量重复性引入的误差。

C.5.2 合成标准不确定度计算公式

由于以上各分量（互）不相关，因此可得合成标准不确定度计算公式：

$$u_c^2(I_x) = u^2(U) + u^2(R) + u^2(\Delta) \quad (\text{C.18})$$

C.5.3 标准不确定度评定

C.5.3.1 数字化仪引入的不确定度分量 $u(U)$

按 B 类评定。数字化仪在脉冲电压测量范围 $\pm(0.1\text{ V}\sim 20\text{ V})$ ，最大允许误差为 $\pm 0.7\%$ ，则区间半宽度 α 为 0.7% ，按照均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则 $u(U) = \frac{\alpha}{k} = \frac{0.7\%}{\sqrt{3}} = 0.4\%$ 。

C.5.3.2 脉冲分流器引入的不确定度 $u(R)$

按 B 类评定。 $0.01\ \Omega$ 脉冲分流器阻值的最大允许误差极限为 $\pm 0.15\%$ ，则其区间半宽度 α 为 0.15% ，按照均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，则 $u(R) = \frac{\alpha}{k} = \frac{0.15\%}{\sqrt{3}} = 0.09\%$ 。

C.5.3.3 由测量重复性引入的相对不确定度 $u(\Delta)$

由测量重复性等随机因素引入的不确定度分量按 A 类评定。选取半导体分析仪的脉冲电流源作为被测对象，对 300 A 脉冲电流进行独立重复测量 10 次，重复性测试数据见表 C.9。

表 C.9 脉冲电流幅度 300 A 测试数据

测量次数	测量值/A
1	299.985 0
2	299.986 5
3	299.985 9
4	299.985 5
5	299.985 2
6	299.983 0

表 C.9 (续)

测量次数	测量值/A
7	299.982 2
8	299.984 4
9	299.985 2
10	299.986 8
平均值 $\bar{\Delta}$	299.984 97
实验标准偏差 $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{(n-1)}} / \bar{\Delta}$	0.001 4%

C.5.4 合成标准不确定度

标准不确定度分量一览表见表 C.10。

表 C.10 各标准不确定度分量一览表

不确定度分量	来源	评定方法	分布	k	标准不确定度
$u(U)$	数字化仪脉冲电压测量不准	B类	均匀	$\sqrt{3}$	0.4%
$u(R)$	脉冲分流器阻值不准	B类	均匀	$\sqrt{3}$	0.09%
$u(\Delta)$	测量重复性等随机因素	A类	——	——	0.001 4%

以上各不确定度分量（互）不相关，根据公式（C.19）计算合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u^2(U) + u^2(R) + u^2(\Delta)} \approx 0.2\% \quad (\text{C.19})$$

C.5.5 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = u_c \times k \approx 0.4\% \quad (\text{C.20})$$

C.6 电容测量校准结果不确定度评定

C.6.1 标准不确定度评定

C.6.1.1 标准电容引入的不确定度分量 $u(C)$

按 B 类进行评定。标准电容校准证书给出 10 pF（工作频率 1 MHz）校准结果的相对扩展不确定度为 5×10^{-4} （ $k=2$ ），其引入的不确定度分量为 $u(C) = 2.5 \times 10^{-4}$ 。

C.6.1.2 由测量重复性引入的相对不确定度 $u(\Delta)$

由测量重复性引入的不确定度分量按 A 类评定。选取半导体分析仪的 MFCMU 模块的电容测量作为被测对象，对 10 pF 电容点进行独立重复测量 10 次，重复性测试数据见表 C.11。

表 C.11 10 pF 电容重复性测试数据

测量次数	测量值/pF
1	10.001 0
2	10.000 8
3	10.000 9
4	10.001 2
5	10.001 0
6	10.001 1
7	10.000 9
8	10.001 0
9	10.001 2
10	10.001 1
平均值 $\bar{\Delta}$	10.001 2
实验标准偏差 $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{(n-1)}} / \bar{\Delta}$	0.013%

C.6.2 合成标准不确定度

不确定度分量一览表见表 C.12。

表 C.12 各标准不确定度分量一览表

不确定度分量	来源	评定方法	分布	k	标准不确定度
$u(C)$	标准电容	B类	均匀	$\sqrt{3}$	2.5×10^{-4}
$u(\Delta)$	测量重复性	A类	——	——	0.013%

以上各不确定度分量（互）不相关，根据公式（C.21）计算合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u^2(C) + u^2(\Delta)} \approx 2.8 \times 10^{-4} \quad (\text{C.21})$$

C.6.3 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = u_c \times k \approx 5.6 \times 10^{-4} \quad (\text{C.22})$$