

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1238—2022

集成电路静电放电敏感度 测试设备校准规范

Calibration Specification for Testing Systems of Microcircuits
Electro-static Discharge (ESD) Sensitivity

2022-09-26 发布

2023-03-26 实施

国家市场监督管理总局 发布

集成电路静电放电敏感度

测试设备校准规范

Calibration Specification for Testing Systems of
Microcircuits Electro-static Discharge
(ESD) Sensitivity

JJF 1238—2022

代替 JJF 1238—2010

归口单位：全国无线电计量技术委员会

起草单位：中国电子技术标准化研究院

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：

邢荣欣（中国电子技术标准化研究院）

吴京燕（中国电子技术标准化研究院）

参加起草人：

蔡依林（中国电子技术标准化研究院）



目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语	(1)
4 概述	(1)
5 计量特性	(3)
5.1 人体模型放电	(3)
5.2 机器模型放电	(3)
5.3 门锁模型放电	(4)
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	(5)
7.1 校准项目	(5)
7.2 校准方法	(5)
8 校准结果的表达	(10)
9 复校时间间隔	(11)
附录 A 原始记录格式	(12)
附录 B 校准证书内页格式	(15)
附录 C 主要项目校准不确定度评定示例	(18)

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修订工作的基础性系列规范。

本校准规范参考了 GJB 548B—2005《微电子器件试验方法和程序》、ANSI/ESD STM5.1—2007《静电放电敏感度测试 人体模型（HBM）器件级》、JESD22-A115C—2010《静电放电敏感度测试 机器模型（MM）》和 JESD78E—2016《集成电路闩锁测试》。

本规范是对 JJF 1238—2010《集成电路静电放电敏感度测试设备校准规范》的修订，主要修订内容：

- 增加了机器模型和闩锁模型放电校准。
- 将人体放电电压校准范围由（500~8 000）V 扩展到（100~8 000）V。
- 在人体模型放电参数校准中，增加了 500 Ω 负载下放电电流参数的校准。
- 修订了测量不确定度评定的示例。

本规范历次版本发布情况：

JJF 1238—2010。

集成电路静电放电敏感度 测试设备校准规范

1 范围

本规范适用于集成电路静电放电敏感度测试设备（人体模型、机器模型和闩锁模型）的校准。

2 引用文件

GJB 548B—2005 微电子器件试验方法和程序

ANSI/ESD STM5.1—2007 静电放电敏感度测试 人体模型（HBM）器件级 [For Electrostatic Discharge Sensitivity Testing—Human Body Model (HBM) Component Level]

JESD22-A115C—2010 静电放电敏感度测试—机器模型（MM） [Electrostatic Discharge (ESD) Sensitivity Testing, Machine Mode (MM)]

JESD78E—2016 集成电路闩锁测试（IC Latch-Up Test）

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；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

3.1 （人体模型）脉冲持续时间（Human Body Model） pulse duration

放电电流从 100% 峰值衰减到 36.8% 峰值所需要的时间。

3.2 （机器模型）谐振频率（Machine Model） resonance frequency

放电电流第 1 次过零点与第 3 次过零点时间间隔 t_{fr} 的倒数。

4 概述

集成电路静电放电敏感度测试设备（也称 ESD 设备）主要模拟产生自然界中人体、机器可能带有的静电电压，并将产生的静电电压施加到被测器件上，以考察器件的抗静电能力。

根据放电机理，集成电路静电放电敏感度测试设备（以下简称被校设备）可模拟人体、机器和闩锁三种放电模型。其中，人体模型模拟人体带电后对电子元器件的静电放电，机器模型模拟带静电机器或设备对电子元器件的静电放电，闩锁模型是模拟集成电路中的寄生可控硅结构被导通后对器件造成的放电。人体模型放电的短路电流波形如图 1 所示，机器模型放电的短路电流波形如图 2 所示，闩锁模型放电的电压波形如图 3 所示。

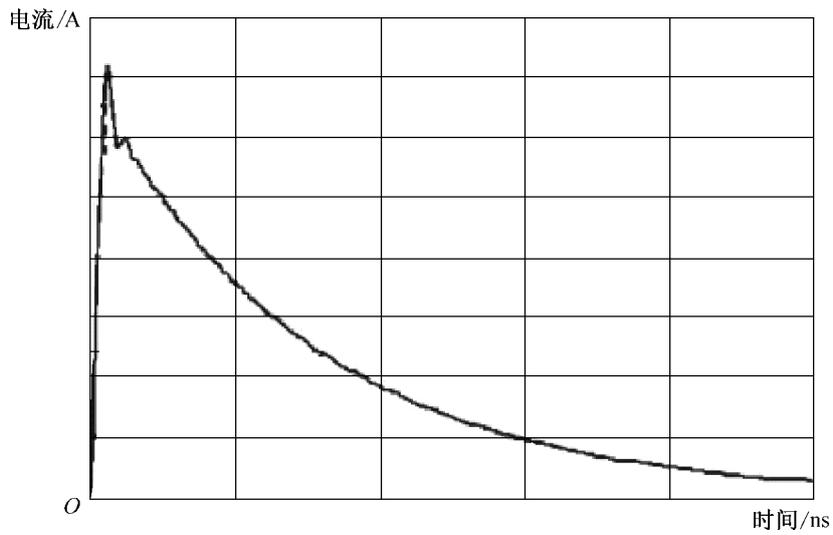


图1 人体模型放电的短路电流波形

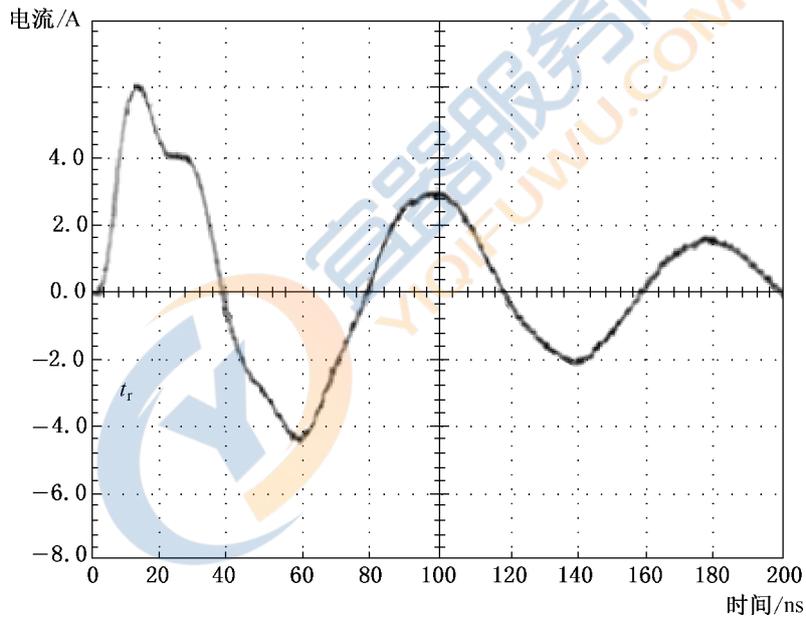


图2 机器模型放电的短路电流波形

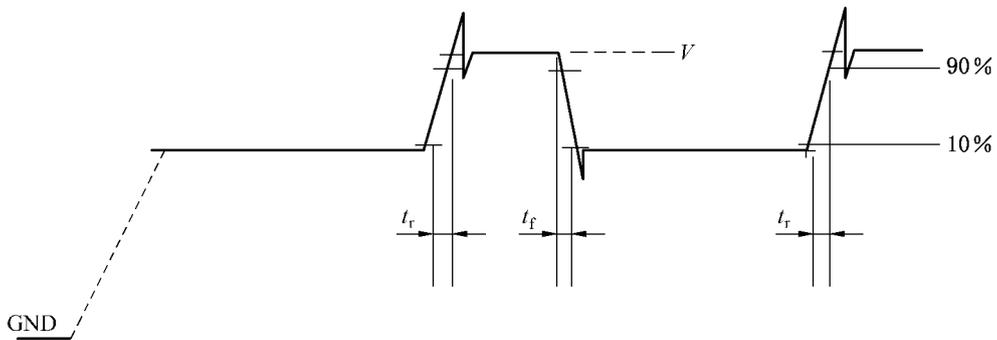


图3 闪电模型放电的电压波形

5 计量特性

5.1 人体模型放电

5.1.1 人体模型放电短路电流

人体模型放电短路电流计量特性，见表 1。

表 1 人体模型放电短路电流计量特性

模拟充电电压/V	短路电流峰值 I_p /A	最大允许误差	上升时间 t_r /ns	脉冲持续时间 t_d /ns
±100	±0.067	±10%	2~10	130~170
±250	±0.165	±10%	2~10	130~170
±500	±0.33	±10%	2~10	130~170
±1 000	±0.67	±10%	2~10	130~170
±2 000	±1.33	±10%	2~10	130~170
±4 000	±2.67	±10%	2~10	130~170
±8 000	±5.33	±10%	2~10	130~170

5.1.2 人体模型 500 Ω 负载放电电流

人体模型 500 Ω 负载放电电流计量特性，见表 2。

表 2 人体模型 500 Ω 负载放电电流计量特性

模拟充电电压/V	负载电流峰值 I_{PR} /A	上升时间 t_r /ns
±1 000	±(0.375~0.550)	5~25
±4 000	±(1.5~2.2)	5~25

5.2 机器模型放电

5.2.1 机器模型放电短路电流

机器模型放电短路电流计量特性，见表 3。

表 3 机器模型放电短路电流计量特性

模拟充电电压/V	短路电流峰值 I_{P1} /A	最大允许误差	电流第二峰与第一峰之比 I_{P2}/I_{P1}	谐振频率 f_R /MHz
±100	±1.75	±10%	67%~90%	11~16
±200	±3.5	±10%	67%~90%	11~16
±400	±7.0	±10%	67%~90%	11~16
±800	±14	±10%	67%~90%	11~16
±2 000	±35	±10%	67%~90%	11~16

5.2.2 机器模型 500 Ω 负载放电电流

机器模型 500 Ω 负载放电电流计量特性，见表 4。

表 4 机器模型 500 Ω 负载放电电流计量特性

模拟充电电压/V	100 ns 处电流值 I_{100}/A	最大允许误差	负载电流峰值 I_{PR}
± 400	± 0.29	$\pm 20\%$	$\leq 4.5 \times I_{100}$

5.3 闩锁模型放电

5.3.1 施加电流：(0.05~5) A。

最大允许误差： $\pm 10\%$ 。

5.3.2 施加电压： $\pm(1\sim 100)$ V。

最大允许误差： $\pm 10\%$ 。

5.3.3 施加电压上升时间：10 μs ~50 ms。

最大允许误差： $\pm 25\%$ 。

注：以上技术指标不做合格性判别，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) $^{\circ}\text{C}$ 。

6.1.2 相对湿度：30%~75%。

6.1.3 电源要求： (220 ± 11) V； (50 ± 1) Hz。

6.1.4 周围无影响正常工作的机械振动和电磁干扰。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 数字示波器

带宽： ≥ 1 GHz；

幅度 (50 Ω)：10 mV~5 V；

直流幅度最大允许误差： $\pm 2\%$ 。

6.2.2 电流探头（用于人体模型）

电流范围：(0.05~12) A；

最大允许误差： $\pm 3\%$ ；

带宽： ≥ 1 GHz；

上升时间： ≤ 1 ns。

6.2.3 电流探头（用于机器模型）

电流范围：(1.0~36) A；

最大允许误差： $\pm 3\%$ ；

带宽： ≥ 200 MHz；

上升时间： ≤ 1 ns。

6.2.4 50 Ω 同轴衰减器

衰减量：20 dB；

最大允许误差： ± 0.2 dB；

带宽： ≥ 2 GHz。

6.2.5 电阻（放电负载）

阻值：500 Ω ；

最大允许误差： $\pm 0.1\%$ ；

极限电压： ≥ 4 kV。

6.2.6 标准电阻器组

阻值：0.1 Ω 、1 Ω 、10 Ω ；

最大允许误差： $\pm 1\%$ ；

额定连续功率： ≥ 20 W。

6.2.7 短路线

截面积为（0.21~0.83） mm^2 的镀锡单芯铜线。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

被校设备校准项目见表 5。

表 5 校准项目

编号	项目名称	条款
1	外观及工作正常性检查	7.2.1
2	人体模型放电短路电流参数	a) 人体模型放电短路电流峰值
		b) 人体模型放电短路电流上升时间
		c) 人体模型放电短路电流脉冲持续时间
3	人体模型 500 Ω 负载放电电流参数	a) 人体模型 500 Ω 负载放电电流峰值
		b) 人体模型 500 Ω 负载放电电流上升时间
4	机器模型放电短路电流参数	a) 机器模型放电短路电流峰值
		b) 机器模型放电短路电流第二峰与第一峰之比
		c) 机器模型放电短路电流谐振频率
5	机器模型 500 Ω 负载放电电流参数	a) 机器模型 500 Ω 负载放电 100 ns 处电流值
		b) 机器模型 500 Ω 负载放电峰值电流
6	闫锁模型放电施加电流	7.2.6
7	闫锁模型放电施加电压/上升时间	a) 闫锁模型放电施加电压
		b) 闫锁模型放电施加电压上升时间

7.2 校准方法

7.2.1 外观及工作正常性检查

7.2.1.1 被校设备应外观完好、应附有设备正常工作的必要的附件。各开关、按键等应安装牢固、调节正常，无影响电气性能的机械损伤。

7.2.1.2 通电预热后，被校设备应能正常工作。

7.2.1.3 启动被校设备自检功能，自检应全部项目合格。

7.2.1.4 将检查结果记录于附录 A 表 A.1 中。

7.2.2 人体模型放电短路电流参数

7.2.2.1 按图 4 连接仪器。

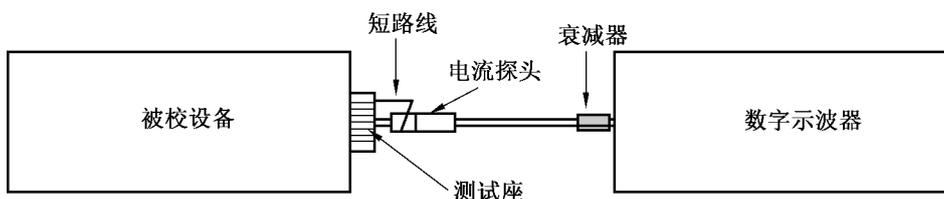


图 4 人体模型放电短路电流参数校准连接框图

7.2.2.2 选择被校设备测试座上引线最长的通道作为校准通道，将被校准通道（设置为放电通道）与地端（设置为地通道）用短路线相连接并接入电流探头，电流探头正端面向放电通道侧。数字示波器通过 20 dB 衰减器与电流探头输出端相连。

7.2.2.3 被校设备设置为人体放电模型，按表 2 设置放电电压。

7.2.2.4 调节数字示波器的垂直刻度和水平刻度，使测量波形位于数字示波器恰当的位置上。按图 5、图 6 所示，测量短路电流峰值 I_{PS} 、上升时间 t_r 、脉冲持续时间 t_d 。其中，峰值电流为数字示波器时间刻度在 5 ns/div 下，波形下降趋势线的向上延伸与波形上升沿的交汇点（图 5 中 A 点）处的电压 V 对应的电流值，短路电流峰值按公式 (1) 计算。将结果记录于附录 A 表 A.2 中。

$$I = \frac{V}{k_{CT} \times k_A} \quad (1)$$

式中：

I —— 短路电流峰值，A；

V —— 数字示波器测量电压值，V；

k_{CT} —— 电流探头的转换因子，A/V；

k_A —— 衰减器衰减比例。

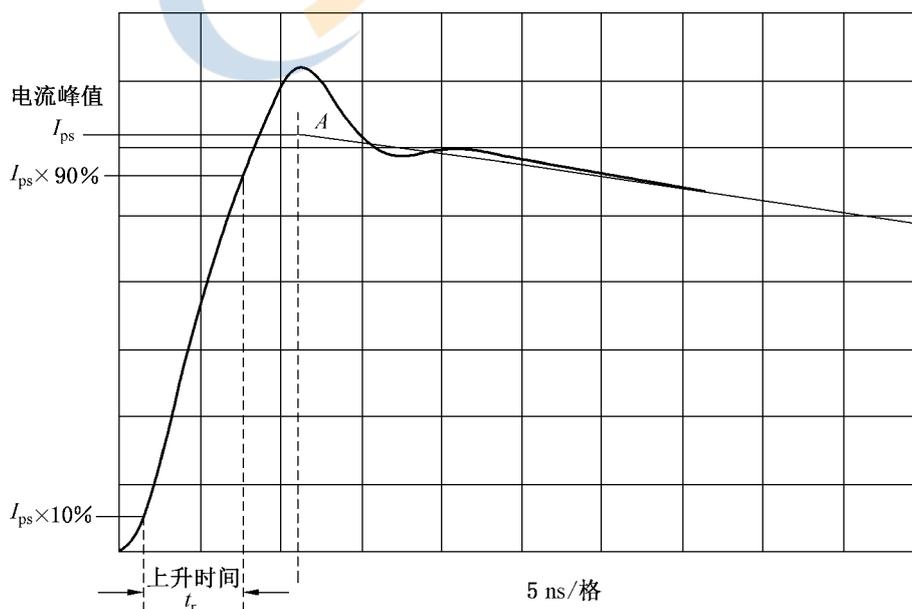


图 5 人体模型放电短路电流峰值和上升时间参数

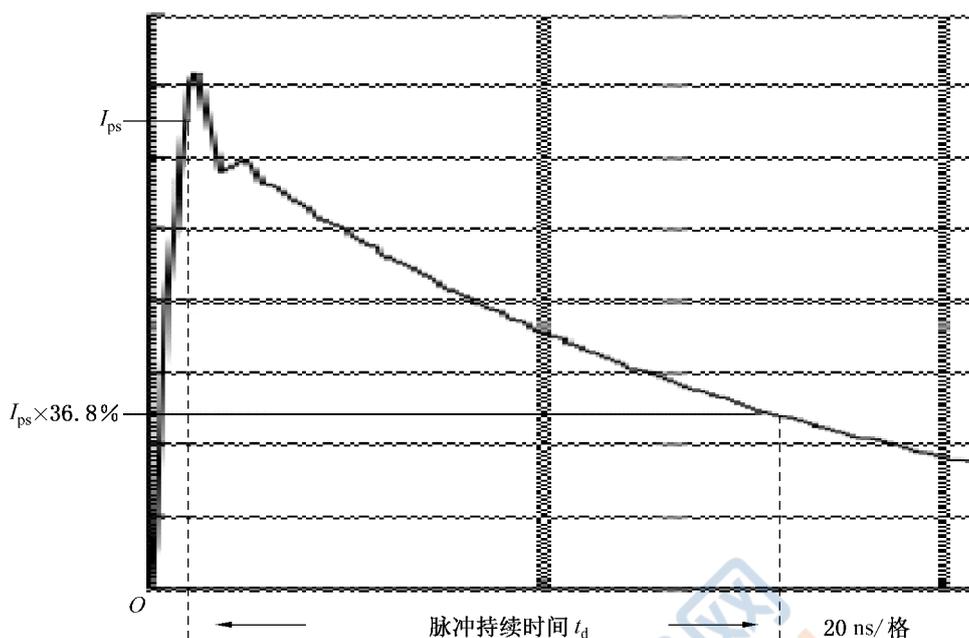


图6 人体模型放电短路电流脉冲持续时间参数

7.2.2.5 对于其他放电电压和极性的校准，重复步骤 7.2.2.4。

7.2.3 人体放电模型 500 Ω 负载放电电流参数

7.2.3.1 校准设备连接如图 7 所示。

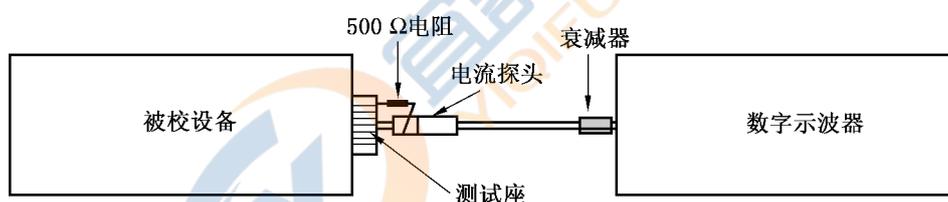


图7 人体放电模型 500 Ω 负载放电电流参数校准连接框图

7.2.3.2 选择被校设备测试座上引线最长的通道作为校准通道，将被校准通道（设置为放电通道）与地端（设置为地通道）用 500 Ω 电阻相连接并接入电流探头，电流探头正端面向放电通道侧。数字示波器通过 20 dB 衰减器与电流探头输出端相连。

7.2.3.3 被校设备设置为人体放电模型，放电电压为 1 000 V。

7.2.3.4 调节数字示波器的垂直刻度和水平刻度，使测量波形位于数字示波器恰当的位置上。按图 8 所示，测量负载电流峰值 I_{PR} 、上升时间 t_r ，其中负载电流峰值按公式 (1) 计算。将测量结果记入附录 A 表 A.3 中。

7.2.3.5 对于其他放电电压和极性的校准，重复步骤 7.2.3.4。

7.2.4 机器模型放电短路电流参数

7.2.4.1 按图 4 所示连接仪器。

7.2.4.2 选择被校设备测试座上引线最长的通道作为校准通道，将被校准通道（设置为放电通道）与地端（设置为地通道）用短路线相连接并接入电流探头，电流探头正端面向放电通道侧。数字示波器通过 20 dB 衰减器与电流探头输出端相连。

7.2.4.3 被校设备设置为机器放电模型，按表 3 设置放电电压。

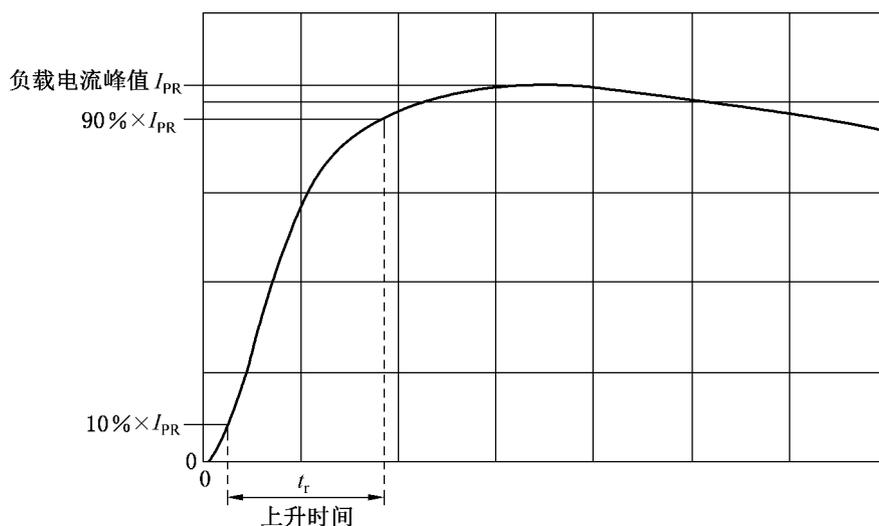


图8 人体模型 500 Ω 负载放电电流参数

7.2.4.4 调节数字示波器的垂直刻度和水平刻度，使测量波形位于数字示波器恰当的位置上。按图9所示，测量短路电流峰值电流 I_{p1} 、电流第二峰与第一峰之比 I_{p2}/I_{p1} (%)、电流谐振频率 f 。短路电流峰值按公式(1)计算，将校准结果记入附录A表A.4中。

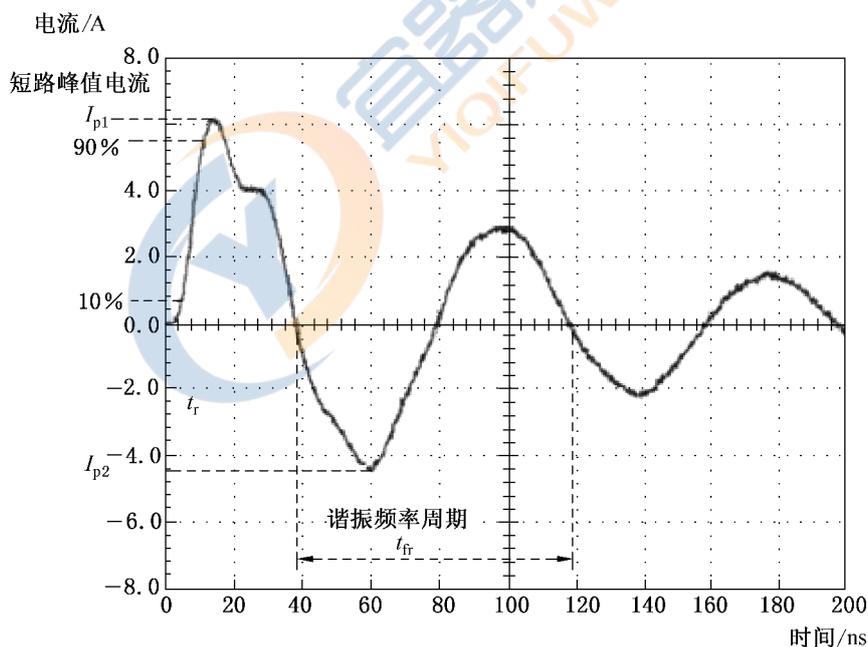


图9 机器模型放电短路电流参数

7.2.4.5 对于其他放电电压和极性的校准，重复步骤7.2.4.3~7.2.4.4。

7.2.5 机器模型 500 Ω 负载放电电流参数

7.2.5.1 校准设备连接如图7所示。

7.2.5.2 选择被校设备测试座上引线最长的通道作为校准通道，将被校准通道（设置为放电通道）与地端（设置为地通道）用500 Ω电阻相连接并接入电流探头，数字示波器通过20 dB衰减器与电流探头输出端相连。电流探头正端面向放电通道侧。

7.2.5.3 被校设备设置为机器放电模型，试验电压设置为 400 V。

7.2.5.4 调节数字示波器的垂直刻度和水平刻度，使测量波形位于数字示波器恰当的位置上。按图 10 所示，测量负载电流峰值 I_{pr} 和 100 ns 处电流值 I_{100} ，并将结果记入附录 A 表 A.5 中。

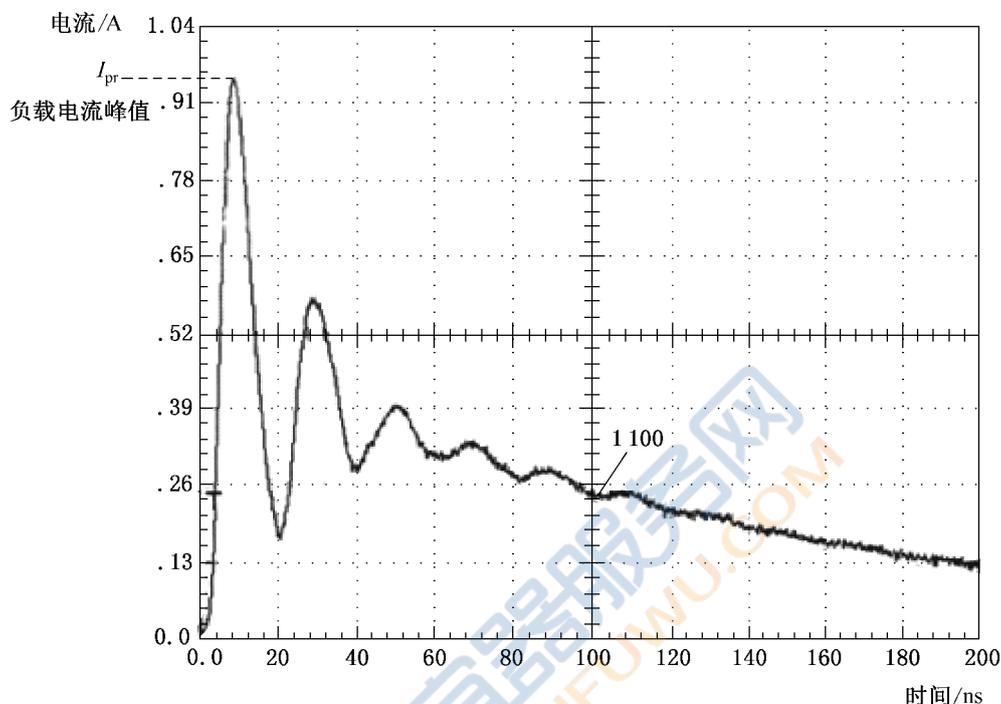


图 10 机器模型 500 Ω 负载放电电流波形参数

7.2.5.5 对于—400 V 放电波形参数的校准，重复步骤 7.2.5.4。

7.2.6 闩锁模型放电施加电流

7.2.6.1 校准设备连接如图 11 所示。

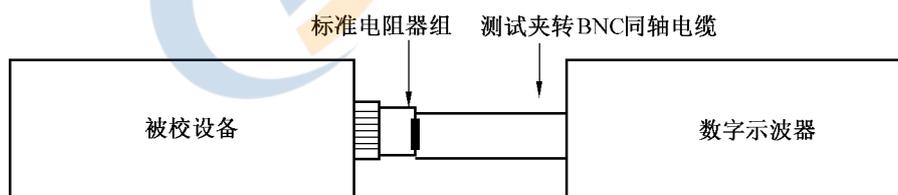


图 11 闩锁模型施加电流校准连接框图

7.2.6.2 选择被校设备测试座上任一通道作为校准通道，将被校准通道设置为放电通道，地端设置为地通道。被校设备设置为闩锁放电电流输出模式。

7.2.6.3 在被校设备输出电流范围内选取电流校准点，一般应包含：最小电流、最大电流以及 50 mA，100 mA，500 mA，1 000 mA。

7.2.6.4 根据设置电流选取标准电阻，阻值选择以保证电流 I 流过该电阻 R 产生电压 V 在 0.1 V~5 V 之间为宜。

7.2.6.5 数字示波器输入阻抗设置为 1 MΩ，并根据电压幅度选择合适的垂直刻度。利用数字示波器测量电阻两端的电压，根据公式 (2) 计算施加电流校准值，将校准结果记入附录 A 表 A.6 中。

$$I = \frac{V}{R} \quad (2)$$

式中：

I ——电流幅值，A；

V ——数字示波器测量电压值，V；

R ——标准电阻阻值， Ω 。

7.2.6.6 对于不同的校准点，重复步骤 7.2.6.4~7.2.6.5。

7.2.7 闩锁模型放电施加电压/上升时间

7.2.7.1 校准设备连接如图 12 所示。

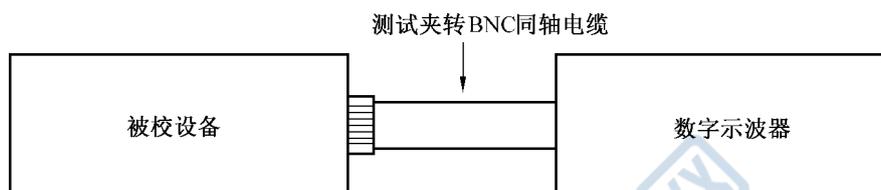


图 12 闩锁模型施加电压/上升时间校准连接框图

7.2.7.2 选取被校设备测试座上任一通道作为被校准通道，该通道设置为放电通道，另任选一通道设置为接地通道。被校设备设置为闩锁放电电压输出模式。

7.2.7.3 在被校设备输出电压范围内选取电压校准点，一般应包含最小电压、最高电压和中间点。

7.2.7.4 数字示波器输入阻抗设置为 $1\text{ M}\Omega$ ，并根据电压幅度和上升时间选择合适的垂直刻度和水平刻度。根据图 3 中的参数定义，利用数字示波器测量放电电压 V 和上升时间 t_r ，将校准结果记入附录 A 表 A.7 中。

7.2.7.5 对于不同的校准点，重复步骤 7.2.7.4。

8 校准结果的表达

集成电路静电放电敏感度测试设备校准后，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；
- 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

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"/> :_____
自校准检验	正常 <input type="checkbox"/> 不正常 <input type="checkbox"/> :_____

表 A.2 人体模型放电短路电流波形参数

设置电压 kV	上升时间/ns		脉冲持续时间/ns		峰值电流/A	
	校准值	测量不确定度 ($k=2$)	校准值	测量不确定度 ($k=2$)	校准值	测量不确定度 ($k=2$)
0.1						
-0.1						
0.5						
-0.5						
1						
-1						
2						
-2						
4						
-4						
8						
-8						

表 A.3 人体模型 500 Ω 负载放电电流波形参数

设置电压 kV	上升时间/ns		峰值电流/A	
	校准值	测量不确定度 ($k=2$)	校准值	测量不确定度 ($k=2$)
1				
-1				
4				
-4				

表 A.4 机器模型放电短路电流波形参数

设置电压 kV	峰值电流/A		I_{P2}/I_{P1}	
	校准值	测量不确定度 ($k=2$)	校准值	测量不确定度 ($k=2$)
0.1				
-0.1				
0.2				
-0.2				
0.4				
-0.4				
0.8				
-0.8				
2				
-2				
设置电压 kV	周期/ns		谐振频率/MHz	
	校准值	测量不确定度 ($k=2$)	校准值	测量不确定度 ($k=2$)
0.1				
-0.1				
0.2				
-0.2				
0.4				
-0.4				
0.8				
-0.8				
2				
-2				

表 A.5 机器模型 500 Ω 负载放电电流波形参数

设置电压 kV	峰值电流 I_{RP}/A		100 ns 处电流值 I_{100}/A	
	校准值	测量不确定度 ($k=2$)	校准值	测量不确定度 ($k=2$)
0.4				
-0.4				

表 A.6 闪烁模型施加电流

电流设置值 mA	脉冲持续 时间	限压	标准电阻	电压 校准值	电流 校准值	测量不确定度 ($k=2$)
50						
-50						
100						
-100						
500						
-500						
1 000						
-1 000						
5 000						
-5 000						

表 A.7 闪烁模型施加电压/上升时间

电压设置值 V	上升时间 校准值	测量不确定度 ($k=2$)	电压 校准值	测量不确定度 ($k=2$)
1				
-1				
5				
-5				
10				
-10				
30				
-30				
100				
-100				

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	
工作正常性检查	
自校准检验	

表 B.2 人体模型放电短路电流波形参数

设置电压 kV	上升时间/ns		脉冲持续时间/ns		峰值电流/A	
	校准值	测量不确定度 ($k=2$)	校准值	测量不确定度 ($k=2$)	校准值	测量不确定度 ($k=2$)
0.1						
-0.1						
0.5						
-0.5						
1						
-1						
2						
-2						
4						
-4						
8						
-8						

表 B.3 人体模型 500 Ω 负载放电电流波形参数

设置电压 kV	上升时间/ns		峰值电流/A	
	校准值	测量不确定度 ($k=2$)	校准值	测量不确定度 ($k=2$)
1				
-1				
4				
-4				

表 B.4 机器模型放电短路电流波形参数

设置电压 kV	峰值电流/A		I_{P2}/I_{P1}	
	校准值	测量不确定度 ($k=2$)	校准值	测量不确定度 ($k=2$)
0.1				
-0.1				
0.2				
-0.2				
0.4				
-0.4				
0.8				
-0.8				
2				
-2				
设置电压 kV	周期/ns		谐振频率/MHz	
	校准值	测量不确定度 ($k=2$)	校准值	测量不确定度 ($k=2$)
0.1				
-0.1				
0.2				
-0.2				
0.4				
-0.4				
0.8				
-0.8				
2				
-2				

表 B.5 机器模型 500 Ω 负载放电电流波形参数

设置电压 kV	峰值电流 I_{RP}/A		100 ns 处电流值 I_{100}/A	
	校准值	测量不确定度 ($k=2$)	校准值	测量不确定度 ($k=2$)
0.4				
-0.4				

表 B.6 闪烁模型施加电流

电流设置值 mA	脉冲持续 时间	限压	标准电阻	电压 校准值	电流 校准值	测量不确定度 ($k=2$)
50						
-50						
100						
-100						
500						
-500						
1 000						
-1 000						
5 000						
-5 000						

表 B.7 闪烁模型施加电压/上升时间

电压设置值 V	上升时间 校准值	测量不确定度 ($k=2$)	电压 校准值	测量不确定度 ($k=2$)
1				
-1				
5				
-5				
10				
-10				
30				
-30				
100				
-100				

附录 C

主要项目校准不确定度评定示例

C.1 短路电流峰值测量不确定度评定

C.1.1 测量模型

根据短路电流峰值的校准原理，电流校准值由电流探头转换为电压参数，经衰减器衰减后输入示波器进行测量。短路电流峰值，即为短路电流幅度的峰值，数学表达式为：

$$I = \frac{V}{k_{CT} \times k_A} \quad (C.1)$$

式中：

V —— 示波器测量电压值，V；

I —— 短路电流值，A；

k_{CT} —— 电流探头的转换因子，A/V；

k_A —— 是衰减器的衰减比例（20 dB，0.1）。

从式（C.1）获得相应变量的灵敏系数如下：

$$c_{k_{CT}} = \frac{\partial I}{\partial k_{CT}} = -\frac{V}{k_{CT}^2 \times k_A} \quad (C.2)$$

$$c_{k_A} = \frac{\partial I}{\partial k_A} = -\frac{V}{k_A^2 \times k_{CT}} \quad (C.3)$$

$$c_V = \frac{\partial I}{\partial V} = \frac{1}{k_A \times k_{CT}} \quad (C.4)$$

对于人体放电模型， $k_{CT} = 5 \text{ V/A}$ ， $k_A = 0.1$ ，有

$$c_{k_{CT}} = \frac{\partial I}{\partial k_{CT}} = -V \times 0.4 \text{ A}^2/\text{V} \quad (C.5)$$

$$c_{k_A} = \frac{\partial I}{\partial k_A} = -V \times 20 \text{ A/V} \quad (C.6)$$

$$c_V = \frac{\partial I}{\partial V} = 2 \text{ A/V} \quad (C.7)$$

C.1.2 标准不确定度评定

以下以 4 kV 为例进行测量不确定度的评定。在人体模型放电电压 4 kV 处，对应的示波器测量值为 1.335 V。

a) 电流探头电流转换因子不准引入的标准不确定度分量 u_1

根据电流探头的技术指标，电流探头转换因子标称值为：5 A/V，最大允许误差为： $\pm 3\%$ 。为均匀分布，因此有：

$$u_1 = |c_{k_{CT}}| \times \frac{5 \text{ A/V} \times 3\%}{\sqrt{3}} = 0.4 \times 1.335 \times \frac{5 \times 3\%}{\sqrt{3}} \text{ A} \approx 0.0462 \text{ A}$$

b) 固定衰减器衰减值不准引入的标准不确定度分量 u_2

根据 50 Ω 同轴衰减器的技术指标，衰减值为：20 dB，换算为线性为：0.1。衰减最大允许误差为 $\pm 3\%$ 。为均匀分布，因此有：

$$u_2 = |c_{kA}| \times \frac{0.1 \times 3\%}{\sqrt{3}} \text{ A} = 1.335 \times 20 \times \frac{0.1 \times 3\%}{\sqrt{3}} \text{ A} \approx 0.0462 \text{ A}$$

c) 数字示波器的电压测量不准引入的标准不确定度分量 u_3

根据数字示波器的技术指标，其电压测量最大允许误差为 $\pm 2\%$ ，服从均匀分布，由数字示波器电压测量不准引入的测量不确定度分量为：

$$u_3 = |c_V| \times u_V = 2 \times \frac{1.335 \times 2\%}{\sqrt{3}} \text{ A} \approx 0.031 \text{ A}$$

d) 由测量重复性引入的标准不确定度分量 u_4

在相同测量条件下，重复测量峰值电流 10 次，得到测量值见表 C.1。

表 C.1 峰值电流测量的 10 次重复测量值

测量次数	峰值电流/A
1	2.81
2	2.82
3	2.80
4	2.83
5	2.79
6	2.80
7	2.81
8	2.80
9	2.84
10	2.81
平均值 \bar{I}	2.811

$$\text{单次测量实验标准偏差: } u_4 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.016 \text{ A}$$

C.1.3 合成标准不确定度

根据上述分析，峰值电流测量不确定度的分量汇总见表 C.2。

表 C.2 人体模型峰值电流测量标准不确定度分量表

不确定度分量符号	不确定度来源	评定方法	不确定度分量/A
u_1	电流探头转换因子不准	B	0.046
u_2	固定衰减器衰减不准	B	0.046
u_3	示波器的电压测量不准	B	0.031
u_4	测量重复性引入	A	0.016

以上四个不确定度分量彼此不相关，所以合成标准不确定度可按下式得到：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 0.074 \text{ A}$$

C.1.4 扩展不确定度

取包含因 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = k u_c = 2 u_c = 2 \times 0.074 \text{ A} \approx 0.148 \text{ A}$$

相对扩展不确定度 $U_{\text{rel}} = 0.148 \text{ A} / 2.81 \text{ A} = 5.3\%$ ($k=2$)

C.2 上升时间 t_R 测量不确定度评定

C.2.1 测量模型

上升时间校准，采用示波器上升时间测量功能直接测量，为峰值电流 10% 和 90% 幅值对应的时间间隔。测量模型为：

$$t_R = t_{90\% \times I_p} - t_{10\% \times I_p} \quad (\text{C.8})$$

式中：

t_R —— 上升时间校准值，ns；

$t_{90\% \times I_p}$ —— 短路电流波形中峰值电流 90% 幅值对应的的时间值，ns；

$t_{10\% \times I_p}$ —— 短路电流波形中峰值电流 10% 幅值对应的的时间值，ns。

示波器电压测量不准会引起上升时间测量的阈值电压判定（10% 和 90% 峰值电压）的不准确，从而引入测量不确定度分量。 c_v 为示波器电压测量不准引起上升时间测量不确定度的灵敏系数，由于短路电流上升时间的斜率基本保持不变，可认为 10% 幅值时测量引入不确定度分量的灵敏度系数均为上升沿斜率倒数，因此阈值电压判定不准确引入不确定度分量的灵敏度系数为：

$$c_v = 2 \times \frac{t_R}{V}, \text{ 其中, } V \text{ 为峰值电压, } t_R \text{ 为上升时间。}$$

C.2.2 上升时间的标准不确定度

a) 由示波器时间测量不准引入的标准不确定度分量 u_1

示波器上升时间测量的水平系数为 5 ns/div，分辨力为 0.5 ns，时间分辨力引入的时间测量不确定度分量为 0.25 ns。10% 电压阈值和 90% 电压阈值电流对应时间引入测量不确定度分量正相关，因此由示波器时间测量不准引入的上升时间测量标准不确定度分量为 $u_1 = 0.5 \text{ ns}$ 。

b) 由示波器电压测量不准引入的标准不确定度分量 u_2

对于人体模型 4 kV，对应的示波器测量电压为 1.335 V，上升时间校准值为

8.12 ns,则:

$$c_v = 2 \times \frac{t}{V} = 2 \times \frac{8.12 \text{ ns}}{1.335 \text{ V}} \approx 12.3 \text{ ns/V}$$

$$u(t_v) = 1.335 \text{ V} \times 1\% \approx 0.014 \text{ V}$$

$$u_2 = c_v \times u(t_v) = 0.17 \text{ ns}$$

c) 由测量重复性引入的标准不确定度分量 u_3

在相同测量条件下,重复测量 10 次,得到的测量值见表 C.3。

表 C.3 上升时间测量的 10 次重复测量值

测量次数	上升时间/ns
1	8.2
2	8.1
3	8.0
4	8.1
5	8.2
6	8.1
7	8.2
8	8.2
9	8.0
10	8.1
平均值 \bar{t}_R	8.12

运用贝塞尔公式计算由重复测量引起的上升时间标准不确定度分量:

$$u_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.097 \text{ ns}$$

C.2.3 合成标准不确定度

根据上述分析,上升时间测量标准不确定度的分量汇总见表 C.4。

表 C.4 人体模型上升时间测量标准不确定度分量表

不确定度分量符号	不确定度来源	评定方法	不确定度分量/ns
u_1	示波器时间测量不准引入	B	0.5
u_2	示波器电压测量不准引入	B	0.17
u_3	测量重复性引入	A	0.097

以上三个不确定度分量彼此不相关,所以合成标准不确定度可按下式得到:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \approx 0.54 \text{ ns}$$

C.2.4 扩展不确定度

取包含因 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = k u_c = 2 u_c = 2 \times 0.54 \text{ ns} = 1.08 \text{ ns}$$

相对扩展不确定度为：14% ($k=2$)

C.3 脉冲持续时间 t_D 测量标准不确定度

C.3.1 测量模型

脉冲持续时间校准，采用示波器时间测量功能直接测量，为峰值电流和 36.8% 峰值电流对应的时间间隔。测量模型为：

$$t_D = t_{I_P} - t_{36.8\% \times I_P} \quad (\text{C.9})$$

式中：

t_D ——持续时间校准值，ns；

t_{I_P} ——短路电流波形中峰值电流对应的时间值，ns；

$t_{36.8\% \times I_P}$ ——短路电流波形中峰值电流 36.8% 幅值对应的时间值，ns。

示波器电压测量不准会引起脉冲持续时间测量的阈值电压判定（100% 和 36.8% 峰值电压）的不确定，从而引入测量不确定度分量。 c_v 为示波器电压测量不准引起脉冲持续时间测量不确定度的灵敏系数，由于短路电流衰减波形斜率基本保持不变，灵敏系数为衰减沿斜率倒数的 2 倍，有： $c_v = 2 \times \frac{t_D}{V}$ ，其中， V 为峰值电压， t_D 为上升时间。

C.3.2 脉冲持续时间测量的标准不确定度

a) 由示波器时间测量不准引入的标准不确定度分量 u_1

示波器进行脉冲持续时间测量的水平系数为 20 ns/div，分辨力为 2 ns，峰值电流和 36.8% 峰值电流对应时间的测量不确定度分量分别为 1 ns。由于两者正相关，因此时间不准引入衰减时间测量标准不确定度分量为 $u_1 = 2 \text{ ns}$ 。

b) 由示波器电压测量不准引入的脉冲持续时间测量不确定度分量 u_2

对于人体模型 4 kV，对应的示波器测量电压为 1.335 V，脉冲持续时间校准值为 138.02 ns，则：

$$c_{kv} = 2 \times \frac{t}{V} = 2 \times \frac{138.02 \text{ ns}}{1.335 \text{ V}} \approx 206.7 \text{ ns/V}$$

$$u(t_{DV}) = 1.335 \text{ V} \times 1\% \approx 0.014 \text{ V}$$

$$u_2 = c_{KV} \times u(t_{DV}) = 2.9 \text{ ns}$$

c) 由测量重复性引入的脉冲持续时间测量不确定度 u_3

在相同测量条件下，重复测量脉冲持续时间 10 次，得到测量值见表 C.5。

表 C.5 脉冲持续时间测量的 10 次重复测量值

测量次数	脉冲持续时间/ns
1	138.2
2	138.0
3	137.8
4	138.1
5	138.2
6	137.8
7	137.9
8	138.4
9	137.8
10	138.1
平均值 \bar{t}_D	138.02

运用贝塞尔公式计算由重复测量引起的上升时间标准不确定度分量：

$$u_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 207 \text{ ps}$$

C.3.3 合成标准不确定度

根据上述分析，脉冲持续时间测量不确定度的分量汇总见表 C.6。

表 C.6 人体模型脉冲持续时间参数主要标准不确定度分量一览表

不确定度分量符号	不确定度来源	评定方法	不确定度分量/ns
u_1	示波器时间测量不准	B	2
u_2	示波器电压测量不准	B	2.9
u_3	测量重复性引入	A	0.207

以上三个不确定度分量彼此不相关，所以合成标准不确定度可按下式得到：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \approx 3.52 \text{ ns}$$

C.3.4 扩展不确定度

取包含因 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 2u_c = 2 \times 3.52 \text{ ns} = 7.04 \text{ ns}$$

相对扩展不确定度为：5.1% ($k=2$)