



# 福建省地方计量技术规范

JJF(闽)1120-2021

---

## 少子寿命测量仪校准规范

Calibration Specification for Minority Carrier Lifetime Tester

2021-07-19 发布

2021-10-19 实施

---

福建省市场监督管理局 发布



# 少子寿命测量仪校准规范

Calibration Specification for Minority  
Carrier Lifetime Tester

JJF (闽) 1120-2021

归口单位：福建省市场监督管理局

主要起草单位：福建省计量科学研究院

本规范委托福建省计量规范技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

陈彩云（福建省计量科学研究院）

罗海燕（福建省计量科学研究院）

黎健生（国家光伏产业计量测试中心）

参加起草人：

杨爱军（福建省计量科学研究院）

何 翔（国家光伏产业计量测试中心）

## 目 录

引言 .....	( II )
1 范围 .....	( 1 )
2 引用文件 .....	( 1 )
3 术语和计量单位 .....	( 1 )
3.1 载流子 .....	( 1 )
3.2 少数载流子 .....	( 1 )
3.3 复合寿命 .....	( 1 )
3.4 注入水平 .....	( 1 )
4 概述 .....	( 2 )
5 计量特性 .....	( 2 )
5.1 载流子复合寿命相对示值误差 .....	( 2 )
5.2 载流子复合寿命测量重复性 .....	( 2 )
6 校准条件 .....	( 3 )
6.1 校准环境条件 .....	( 3 )
6.2 测量标准及其他设备 .....	( 3 )
7 校准项目和校准方法 .....	( 3 )
7.1 校准项目 .....	( 3 )
7.2 校准方法 .....	( 3 )
8 校准结果表达 .....	( 5 )
9 复校时间间隔 .....	( 5 )
附录 A 少子寿命测量仪校准证书内页 (式样) .....	( 6 )
附录 B 少子寿命测量仪校准记录 (式样) .....	( 7 )
附录 C 少子寿命测量仪测量结果不确定度评定 (示例) .....	( 9 )



## 引 言

本规范依据 JJF 1001-2011 《通用计量术语及定义》和 JJF1071-2010 《国家计量校准规范编写规则》编制，并按照 JJF1059.1-2012 《测量不确定度评定与表示》构成基础性的要求。

参考了 GB/T26068-2018 《硅片和硅锭载流子复合寿命的测试 非接触微波反射光电导衰减法》编制而成。

本规范为首次发布。





# 少子寿命测量仪校准规范

## 1 范围

本规范适用于无接触微波光电导衰减 (microwave photo conductivity decay,  $\mu$ -PCD) 测试方法、测量范围在  $0.5\mu\text{s} \sim 40\mu\text{s}$  的少子寿命测量仪的校准。对于某些多功能的、但包含该方法的少子寿命测量仪同样适用。

本规范不适用于直流光电导衰减 (photo conductivity decay, PCD) 法、高频光电导衰减 (high frequency photo conductivity decay, hfPCD) 法、表面光电压 (surface photoelectric voltage, SPV) 法、微波探测光电导 (microwave-detected photo-conductance, MDP) 法及准稳态光电导 (quasi-steady-state photo-conductance, QSSPC) 法的少子寿命测量仪的校准。

## 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 1553-2009 硅和锗体内少数载流子寿命测定光电导衰减法

GB/T 14264-2009 半导体材料术语

GB/T 26068-2018 硅片和硅锭载流子复合寿命的测试 非接触微波反射光电导衰减法

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 术语和计量单位

### 3.1 载流子 carrier [GB/T 14264-2009, 3.26]

一种能携带电荷通过固体的载体。例如,半导体中价带的空穴和导带的电子。

### 3.2 少数载流子 minority carrier [GB/T 14264-2009, 3.159]

在非本征半导体中，少于载流子总浓度半数的载流子，例如，p型半导体中的电子。

### 3.3 复合寿命 recombination lifetime [GB/T 26068-2018, 3.2]

在均匀半导体内电子-空穴对的产生和复合的平均时间间隔。

### 3.4 注入水平 injection level [GB/T 26068-2018, 3.1]

在非本征半导体晶体或晶片内，由光子或其他手段产生的过剩载流子浓度与多数载流子的平衡浓度之比。

注：注入水平与激发脉冲停止后立即产生的初始过剩载流子浓度有关。

## 4 概述

基于无接触微波反射光电导衰减测试法的少子寿命测量仪是用来测试半导体材料的载流子复合寿命的测量仪器，其工作过程主要包括激光注入产生电子-空穴对和微波反射信号的变化两个过程。激光注入产生电子-空穴对，导致样品电导率的增加，当撤去外界光注入时，电导率随时间指数衰减，这一趋势间接反映载流子的衰减趋势，从而通过观测由电导率随时间变化的趋势就可以得到载流子的寿命。用微波反射信号来监测电导率的变化，是依据微波反射信号的变化量与电导率的变化量成正比的原理。其测试系统主要由脉冲光源、光子监测器、微波采样系统、样品台、衰减信号分析系统以及计算机系统组成，其原理图如图 1 [GB/T 26068-2018，定义 6.1] 所示。

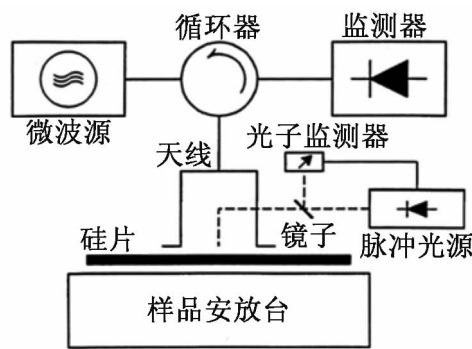


图 1 脉冲光和微波系统方框图

## 5 计量特性

### 5.1 载流子复合寿命相对示值误差

参考片在被检仪器上的测量值与其参考值的误差规定为被检仪器载流子复合寿命的相对示值误差，具体指标见表 1。

表 1 被检仪器载流子复合寿命的相对示值误差

参考片的载流子复合寿命参考值	相对示值误差
0.5 $\mu$ s ~ 1 $\mu$ s	$\leq 20\%$
1 $\mu$ s ~ 5 $\mu$ s	$\leq 10\%$
5 $\mu$ s ~ 40 $\mu$ s	$\leq 5\%$

### 5.2 载流子复合寿命测量重复性

参考片在被检仪器上同一个测量区域内的测量重复性一般不大于 0.1 $\mu$ s。

注：以上指标不适用于合格性判别，仅供参考。

## 6 校准条件

### 6.1 校准环境条件

- 6.1.1 校准时环境温度： $(23\pm 2)$  °C。
- 6.1.2 相对湿度： $\leq 80\%$ 。
- 6.1.3 电网电压波动应符合少子寿命测量仪的使用要求。
- 6.1.4 校准地点周围无影响仪器正常工作的磁场干扰和机械振动。

### 6.2 测量标准及其他设备

#### 6.2.1 参考片及其性能要求

- 6.2.1.1 外观要求：参考片的表面应没有明显划痕、崩边、缺口，表面没有沾污；
- 6.2.1.2 表面处理及保存条件要求：参考片的表面处理会影响测试结果，应通过钝化、热氧化或者表面持续电晕充电的方法来消除硅片表面复合所产生的影响。使用的钝化方法应确保获得稳定的表面以保证测试结果的可靠性。参考片应独立封装，存放于恒温恒湿柜中。
- 6.2.1.3 参考片的电性能要求：通常，参考片的室温电阻率下限在  $(0.05\sim 10)$   $\Omega \cdot \text{cm}$  之间，由检测系统的灵敏度极限确定。
- 6.2.1.4 参考片应附有下列参数值：直径值、导电类型、中心厚度值、中心电阻率值、表面钝化情况、结晶取向、测试的表面状态等；
- 6.2.1.5 参考片的载流子复合寿命值测量范围应在  $0.5\mu\text{s} \sim 40\mu\text{s}$ ，根据实际需求选择适合档位的载流子复合寿命参考片进行设备的校准。参考片的载流子复合寿命标称值见表 2。

表 2 参考片的载流子复合寿命标称值

序号	1	2	3	4	5	6
载流子复合寿命标称值( $\mu\text{s}$ )	1	5	10	20	30	40

- 6.2.1.6 参考片中心半径 5 mm 区域内的载流子复合寿命值均匀性应优于 6%；
- 6.2.1.7 参考片载流子复合寿命参考值的年稳定性应优于 3%。

## 7 校准项目和校准方法

### 7.1 校准项目

- 7.1.1 载流子复合寿命相对示值误差
- 7.1.2 载流子复合寿命测量重复性

### 7.2 校准方法

#### 7.2.1 校准前检查

参考片表面应光洁无尘埃及明显油污、指纹等。应有 6.2.1.4 中的相关信息。

少子寿命测量仪应附带使用和维护说明书，工作正常，无影响性能的机械损伤。

仪器预热：测试前需至少预热 30 min。

### 7.2.2 载流子复合寿命相对示值误差

设定好关键测试参数，根据被检仪器的实际使用情况在参考片的载流子复合寿命标称值范围内选取三个校准点，将所选取的参考片分别放置在样品台上，对于有自动扫描功能的设备，以软件自动设置整面扫描的平均值作为被检仪器的载流子复合寿命示值，以  $N$  次重复测量结果的平均值作为被检仪器的载流子复合寿命示值。对于没有自动扫描功能的单点测量设备，手动定位使其落在中心点半径 5 mm 的范围内且尽量靠近中心点的位置，定位好后，在同一个测试位置重复测量，将  $N$  次重复测量结果的平均值作为被检仪器的载流子复合寿命示值。

采用式 (1) 计算被检仪器的载流子复合寿命相对示值误差：

$$\delta_{\tau} = \frac{\left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i \right] - \tau_s}{\tau_s} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

$\delta_{\tau}$  ——载流子复合寿命相对示值误差；

$N$  ——测量次数， $N=6$ ；

$\tau_i$  ——载流子复合寿命第  $i$  次测量值， $\mu\text{s}$ ；

$\tau_s$  ——载流子复合寿命参考值， $\mu\text{s}$ 。

### 7.2.3 载流子复合寿命测量重复性

同 7.2.2 中设定好关键测试参数，将 7.2.2 中选取的参考片分别放置在样品台上，对于有自动扫描功能的设备，以软件自动识别中心点位置后重复测量  $N$  次。对于没有自动扫描功能的单点测量设备，手动定位使其落在中心点半径 5 mm 的范围内且尽量靠近中心点的位置，定位好后，在同一位置重复测量  $N$  次。

采用式 (2) 计算实验标准偏差作为被检仪器载流子复合寿命测量重复性：

$$s(\tau) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\tau_i - \bar{\tau})^2}{N-1}} \quad (2)$$

式中：

$s(\tau)$  ——载流子复合寿命测量重复性， $\mu\text{s}$ ；

$N$  ——测量次数， $N=6$ ；

$\tau_i$  ——载流子复合寿命第  $i$  次测量值， $\mu\text{s}$ ；

$\bar{\tau}$ ——载流子复合寿命  $N$  次的测量平均值,  $\mu\text{s}$ 。

## 8 校准结果表达

校准证书应包含以下信息内容:

- a) 标题:“校准证书”;
- b) 实验室名称和地址;
- c) 进行校准的地点;
- 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) 本次校准所用的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

复校时间间隔建议不超过 1 年,更换重要部件、维修或对仪器性能有怀疑时,应随时校准。

## 附录 A

## 少子寿命测量仪校准证书内页 (式样)

校 准 结 果																																									
1. 载流子复合寿命相对示值误差及测量重复性 载流子复合寿命参考值: _____	2. 载流子复合寿命相对示值误差及测量重复性 载流子复合寿命参考值: _____																																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">序 号</th> <th style="width: 70%;">测量值(<math>\mu\text{s}</math>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">1</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">2</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">3</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">4</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">5</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">6</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">平均值</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">相对示值误差(%)</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">重复性(<math>\mu\text{s}</math>)</td><td></td></tr> </tbody> </table>	序 号	测量值( $\mu\text{s}$ )	1		2		3		4		5		6		平均值		相对示值误差(%)		重复性( $\mu\text{s}$ )		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">序 号</th> <th style="width: 70%;">测量值(<math>\mu\text{s}</math>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">1</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">2</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">3</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">4</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">5</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">6</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">平均值</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">相对示值误差(%)</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">重复性(<math>\mu\text{s}</math>)</td><td></td></tr> </tbody> </table>	序 号	测量值( $\mu\text{s}$ )	1		2		3		4		5		6		平均值		相对示值误差(%)		重复性( $\mu\text{s}$ )	
序 号	测量值( $\mu\text{s}$ )																																								
1																																									
2																																									
3																																									
4																																									
5																																									
6																																									
平均值																																									
相对示值误差(%)																																									
重复性( $\mu\text{s}$ )																																									
序 号	测量值( $\mu\text{s}$ )																																								
1																																									
2																																									
3																																									
4																																									
5																																									
6																																									
平均值																																									
相对示值误差(%)																																									
重复性( $\mu\text{s}$ )																																									
3. 载流子复合寿命相对示值误差及测量重复性载 流子复合寿命参考值: _____																																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 30%;">序 号</th> <th style="width: 70%;">测量值(<math>\mu\text{s}</math>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">1</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">2</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">3</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">4</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">5</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">6</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">平均值</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">相对示值误差(%)</td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">重复性(<math>\mu\text{s}</math>)</td><td></td></tr> </tbody> </table>	序 号	测量值( $\mu\text{s}$ )	1		2		3		4		5		6		平均值		相对示值误差(%)		重复性( $\mu\text{s}$ )																						
序 号	测量值( $\mu\text{s}$ )																																								
1																																									
2																																									
3																																									
4																																									
5																																									
6																																									
平均值																																									
相对示值误差(%)																																									
重复性( $\mu\text{s}$ )																																									
不确定度: $U =$          																																									
说明:																																									

## 附录 B

## 少子寿命测量仪校准记录 (式样)

							记录编号	
送 检 信 息								
送检单位					送检单位地址			
设备名称					出厂编号			
仪器型号规格					制造厂			
校 准 使 用 设 备								
标 准 器	名称	规格型号	编号	测量范围	不确定度或准确度等级 或最大允许误差	证书编号	有效期至	
技术依据								
校准地点					环境温度		环境湿度	
测 量 条 件								
激光波长					扫描分辨率			
光斑大小					探头与样品间距			
激光功率/光子密度					测量位置			
激光脉宽					算 法			
本次校准的不确定度 $U =$					证书编号			
说明								
校准员					核验员			
校准日期					核验日期			

测 量 结 果			
1 样品编号		2 样品编号	
参考值( $\mu\text{s}$ )		参考值( $\mu\text{s}$ )	
中心点厚度( $\mu\text{m}$ )		中心点厚度( $\mu\text{m}$ )	
中心点电阻率( $\Omega\cdot\text{cm}$ )		中心点电阻率( $\Omega\cdot\text{cm}$ )	
直径值(mm)		直径值(mm)	
导电类型	<input type="checkbox"/> p 型 <input type="checkbox"/> n 型	导电类型	<input type="checkbox"/> p 型 <input type="checkbox"/> n 型
晶 型	<input type="checkbox"/> 单晶 <input type="checkbox"/> 多晶	晶 型	<input type="checkbox"/> 单晶 <input type="checkbox"/> 多晶
表面状态	<input type="checkbox"/> 正面 <input type="checkbox"/> 背面	表面状态	<input type="checkbox"/> 正面 <input type="checkbox"/> 背面
表面钝化情况		表面钝化情况	
序号	载流子复合寿命值( $\mu\text{s}$ )	序号	载流子复合寿命值( $\mu\text{s}$ )
1		1	
2		2	
3		3	
4		4	
5		5	
6		6	
平均值		平均值	
相对示值误差(%)		相对示值误差(%)	
重复性( $\mu\text{s}$ )		重复性( $\mu\text{s}$ )	
3 样品编号			
参考值( $\mu\text{s}$ )			
中心点厚度( $\mu\text{m}$ )			
中心点电阻率( $\Omega\cdot\text{cm}$ )			
直径值(mm)			
导电类型	<input type="checkbox"/> p 型 <input type="checkbox"/> n 型		
晶 型	<input type="checkbox"/> 单晶 <input type="checkbox"/> 多晶		
表面状态	<input type="checkbox"/> 正面 <input type="checkbox"/> 背面		
表面钝化情况			
序号	载流子复合寿命值( $\mu\text{s}$ )		
1			
2			
3			
4			
5			
6			
平均值			
相对示值误差(%)			
重复性( $\mu\text{s}$ )			



## 附录 C

## 少子寿命测量仪测量结果不确定度评定 (示例)

## C.1 概述

C.1.1 测量依据: JJF (闽) 1120-2021 《少子寿命测量仪校准规范》

C.1.2 测量环境条件: 环境温度:  $(23\pm 2)$  °C, 相对湿度:  $\leq 80\%$ ;

C.1.3 测量用标准器: 载流子复合寿命参考片

C.1.4 测量对象: 少子寿命测量仪

## C.2 测量模型

$$\delta_{\tau} = \frac{\bar{\tau} - \tau_s}{\tau_s} \times 100\% \quad (\text{C1})$$

式中:

$\delta_{\tau}$ ——载流子复合寿命相对示值误差;

$\bar{\tau}$ ——载流子复合寿命 6 次测量的算术平均值,  $\mu\text{s}$ ;

$\tau_s$ ——载流子复合寿命参考值,  $\mu\text{s}$ 。

灵敏系数:

$$c_{\bar{\tau}} = \frac{\partial \delta_{\tau}}{\partial \bar{\tau}} = \frac{1}{\tau_s}, \quad c_{\tau_s} = \frac{\partial \delta_{\tau}}{\partial \tau_s} = -\frac{\bar{\tau}}{\tau_s^2} \quad (\text{C2})$$

## C.3 标准不确定度分量的评定

C.3.1 载流子复合寿命测量重复性引入的标准不确定度分量  $u_1(\bar{\tau})$

设定好关键测试参数, 将参考片 (参考值为  $8.998\mu\text{s}$ ) 放置在样品台上, 手动定位使测量点位落在中心半径 5 mm 的范围内且尽量靠近中心点的位置, 定位好后, 在同一个测试位置重复测量 6 次, 数据见表 C1, 通过式 (C3) 计算实验标准偏差作为载流子复合寿命重复性引起的标准不确定度分量  $u_1(\bar{\tau})$ 。

表 C1 少子寿命测量仪载流子复合寿命测量重复性引入的标准不确定度分量

序号	载流子复合寿命值( $\mu\text{s}$ )
1	8.7174
2	8.7456
3	8.8504
4	8.7499
5	8.7283
6	8.7316
平均值( $\mu\text{s}$ )	8.7539
$S(\tau)(\mu\text{s})$	0.049

测量时采用 6 次测量数值的平均值作为测量结果, 因此, 由重复性引入的标准不确定度分量为  $u_{(\bar{\tau})}$ 。

$$u_{(\bar{\tau})} = \frac{S(\tau)}{\sqrt{6}} = 0.02\mu\text{s} \quad (\text{C3})$$

C.3.2 载流子复合寿命参考片校准引入的标准不确定度分量  $u_{(\tau_s)}$

C.3.2.1 载流子复合寿命参考片校准引入的标准不确定度分量  $u_{1(\tau_s)}$

载流子复合寿命参考片测试报告中的标准偏差为 0.02%, 按照均匀分布考虑, 因此由载流子复合寿命参考片校准引入的标准不确定度分量为

$$u_{1(\tau_s)} = \frac{0.02\% \times 8.7539}{\sqrt{3}} = 0.0011\mu\text{s} \quad (\text{C4})$$

C.3.3.2 测试温度引入的标准不确定度分量  $u_{2(\tau_s)}$

测试温度需要控制在  $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 硅载流子复合寿命参考片的温度系数为  $1.09\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ , 用于测温的仪器的校准不确定度为  $0.1^\circ\text{C}$ ,  $k=2$ , 因此, 由测试温度引入的不确定度为

$$u_{2(\tau_s)} = 0.1/2 \times 1.09\% \times 8.7539 = 0.0048\mu\text{s} \quad (\text{C5})$$

C.3.2.3 脉冲激光功率的标准值引入的标准不确定度分量  $u_{3(\tau_s)}$

用于监测脉冲激光的标准器的上一级监测器存在非线性问题, 在同一量程档位内随入射能量变化, 其响应度的变化的不确定度分量与被测功率和定标点有关。如果标准器非线性优于  $\pm 0.5\%$ , 当被测能量小于该档位量程的  $1/3$  时可取  $0.6\%$ , 因此, 由脉冲激光功率的标准值引入的标准不确定度分量为

$$u_{3(\tau_s)} = 0.6\% \times 8.7539 = 0.053\mu\text{s} \quad (\text{C6})$$

C.3.2.4 激光光斑大小引入的不确定度分量  $u_{4(\tau_s)}$

由于参考片校准时激光光斑直径设定为  $1\text{ mm}$ , 实际测量中以  $0.1\text{ mm}$  的直径大小偏差计算激光光斑大小引入的误差为  $U_{\text{rel}}(\text{Spot size}) = 0.8\%$ , 按均匀分布考虑, 取  $k = \sqrt{3}$ , 则:

$$u_{4(\tau_s)} = \frac{U_{\text{rel}}(\text{Spot size})}{k} \times 8.7539 = 0.040\mu\text{s} \quad (\text{C7})$$

C.3.2.5 载流子复合寿命参考片不均匀性引起的标准不确定度分量  $u_{5(\tau_s)}$

载流子复合寿命参考片中心半径  $5\text{ mm}$  区域的不均匀性为  $3\%$ , 按照均匀分布考虑, 则被测载流子复合寿命参考片不均匀性引起的标准不确定度分量为

$$u_{5(\tau_s)} = \frac{3\% \times 8.7539}{\sqrt{3}} = 0.15\mu\text{s} \quad (\text{C8})$$

C.3.2.6 载流子复合寿命参考片参考值引入的合成标准不确定度计算

由于各影响量彼此独立不相关, 因此  $u_{(\tau_s)}$  为

$$u_{(\tau_s)} = \sqrt{u_{1(\tau_s)}^2 + u_{2(\tau_s)}^2 + u_{3(\tau_s)}^2 + u_{4(\tau_s)}^2 + u_{5(\tau_s)}^2} = 0.16\mu\text{s} \quad (\text{C9})$$

#### C.4 少子寿命测量仪校准结果的合成标准不确定度计算

按式 (C2) 计算,

$$c_{\bar{\tau}} = \frac{\partial \delta_{\tau}}{\partial \bar{\tau}} = \frac{1}{\tau_s} = 0.111 \mu\text{s}^{-1}, \quad c_{\tau_s} = \frac{\partial \delta_{\tau}}{\partial \tau_s} = -\frac{\bar{\tau}}{\tau_s^2} = -0.108 \mu\text{s}^{-1}$$

$$u(\delta_{\tau}) = \sqrt{(c_{\bar{\tau}} \cdot u(\bar{\tau}))^2 + (c_{\tau_s} \cdot u(\tau_s))^2} = 1.7\% \quad (\text{C10})$$

#### C.5 扩展不确定度

$$U_{\text{rel}} = k \times u(\delta_{\tau}) = 3.4\%, \quad k = 2。$$

#### C.6 测量结果及其不确定度报告

载流子复合寿命测量相对示值误差校准结果相对扩展不确定度:

$$\delta_{\tau} = 2.7\%, \quad U_{\text{rel}} = k \times u(\delta_{\tau}) = 3.4\%, \quad k = 2。$$