

中华人民共和国国家标准

GB/T 1553—XXXX
代替 GB/T 1553-2009

硅和锗体内少数载流子寿命测定 光电导 衰减法

Test methods for minority carrier lifetime in bulk silicon and
germanium—measurement of photoconductivity decay

(预审稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

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。

本文件代替GB/T 1553-2009《硅和锗体内少数载流子寿命测定光电导衰减法》，与GB/T 1553-2009相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- 由于现在国内厂家普遍使用高频光电导法，高频光电导和直流光电导方法测量少子寿命的地位相当，只是两个测试方法中样品的要求不同，因此除保留直流光电导测试方法之外，将附录中的高频光电导方法移至正文中；
- 封面标准的英文名称将“silicon”和“germanium”的顺序颠倒，删除“by”，增加“——”。
- 范围中增加了适用于直流光电导衰减方法的样品要求“具有特殊的尺寸和欧姆接触的长方体及圆柱体单晶样品”。（见第1章）。
- 范围中增加了硅单晶及锗单晶的适用范围。硅单晶：电阻率（ 10^5 ~5000） $\Omega \cdot \text{cm}$ ，寿命100~5000 μs ；锗单晶：（范围待定）。（见第1章）。
- 规范性引用文件中将GB/T 1551-2009《硅、锗单晶电阻率测定 直流两探针法》替换为GB/T 2021《硅单晶电阻率的测定 直排四探针法和直流两探针法》；增加了GB/T 26074-2010《锗单晶电阻率直流四探针测量方法》。（见第2章）
- 修改了少数载流子寿命的定义，删除了表观寿命；增加了灯丝寿命、少数载流子寿命、注入水平的定义；并且修改了体寿命的定义。（见第3章）
- 干扰因素是针对测试中可能碰到的问题提出的，是从人、机、料、法、环五个方面出发，结合多年来实践中的经验积累，甚至是经验教训提出的，是对依据本标准得到具有很好重复性、稳定性的正确测试结果的提示。将原标准的8.9加入本标准干扰因素4.1陷阱效应的影响中，删除“沿衰减曲线进一步延伸，由衰减曲线……，消除方法见8.9”。（见第4章）
- 干扰因素中增加了“注入比”对测试结果的影响。
- 干扰因素中增加了“电阻率”对测试结果的影响。
- 干扰因素中修改了滤波片对测试结果的影响，删除了“应选择厚度1 mm、与被测样品材料相同”滤波片的限定条件。并增加了在直流光电导-脉冲光法测试时才使用滤波片，目的是来增加注入载流子密度的均匀性。
- 干扰因素中增加了“样品尺寸及表面”对测试结果的影响。
- 干扰因素中增加了“研磨材料”对测试结果的影响。
- 干扰因素修改了“电场”对测试结果的影响。对于直流光电导衰减法来说，少数载流子被电流产生的电场扫出样品的一端，少数载流子就不会形成衰减曲线。而高频光电导测试方法却不受电流产生的电场影响。
- 干扰因素讲“注入量的影响”修改为“电导率调幅效应”
- 调整了“本标准可测的最低寿命值为10 μs ，取决于光源的内在特性……”及“本标准不适用于抛光片的验收测试”位置，将其归入直流光电导衰减法的方法原理一章。（见第5章）
- 改了试剂和材料中研磨材料的要求（见7.1.2，2009版的7.1.2），改为“氧化铝粉或合适的研磨材料”。
- 修改了测试装置中的光源要求（见6.2，2009版的6.2），增加了“用于硅样品测量的光源光谱分布的最大值应在波长范围1.0 μm -1.1 μm 、锗样品的波长1.5 μm -1.8 μm 。用单色光源时，无需再光源前增加滤光片及矩形窗孔膜片”。

- 修改了示波器面板上指数衰减曲线的公式 $y=6e^{(-x/2.5)}$ （见6.7.2，2009版的6.7.2）。增加了式中字母含义的解释“x表示寿命时间，单位为微秒（ μs ）；y表示为光电导电压，单位为伏特（V）”。
- 测试装置中增加了“计算机及软件系统（含高速数据采集卡、计算机）代替示波器。增加了数据采集卡和计算机的要求：“数据采集卡：采样频率 ≥ 10 MHz，输入范围 $\pm 5V$ ，精度DC ± 1 LSB；计算机：配置能够满足检测要求”。
- 删除了清洗和干燥、研磨等设备。（见7.6、7.7，2009年版的7.6、7.7）
- 将“欧姆接触材料”和“欧姆接触”揉和为“制备欧姆接触”
- 增加了测试条件，温度、湿度、大气压的限制条件。
- 重新进行了单个实验室及多个实验室巡回测试，计算了硅样品、锗样品的相对标准偏差作为直流光电导测试-脉冲光法的精密度。
- 针对高频光电导测试方法，高电阻和低电阻的样品对小注入满足的条件不一样。在本方法中明确满足小注入条件的要求，同时规定测试样品的电阻率范围。
- 在高频光电导测试方法原理中，增加了“计算机的显示”
- 修改了高频光电导测试方法的电路图，电路图中增加了红外发光管或激光器等光源、数字存储示波器/计算机专用软件系统（包含告诉数据采集卡及工控机）；删除了硅滤光片的示意图；同时取样电阻修改为取样器
- 修改了高频电源的内容，电源频率由原来的“25MHz~35MHz”修改为“频率30MHz，频率精度不低于 10^{-4} ”，还增加了“当负载小于 100Ω 时，输出功率不低于1W”
- 扩大了检波器的频率响应范围，由“2Hz~1MHz”扩大到“2Hz~2MHz”。
- 增加了高频光电导的精密度，希望帮助使用者对误差的了解。
 - 在附录增加了直流光电导-斩波光测试方法，涉及到斩波光法测试的范围、干扰因素、测试设备、测试步骤、测试条件，计算方法等。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件所代替文件的历次版本发布情况为：

——GB 1553-1979、GB 5257-1985；

——GB/T 1553-1997；

——GB/T 1553-2009。

硅和锗体内少数载流子寿命测定 光电导衰减法

1 范围

本标准适用于非本征硅和锗单晶体内载流子复合过程中非平衡少数载流子寿命的测试。

本标准包含了适用于具有特殊尺寸和欧姆接触的长方体或圆柱体硅和锗单晶样品的直流光电导衰减-脉冲光法和适用于硅单晶锭或块的高频光电导衰减方法。

硅单晶的测试范围：电阻率（ $10^{\sim}5000$ ） $\Omega \cdot \text{cm}$ ，寿命 $100 \sim 5000 \mu\text{s}$ 。

2 规范性引用文件

下列文件中对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1550 非本征半导体材料导电类型测试方法

GB/T 1551 硅单晶电阻率的测定 直排四探针法和直流两探针法

GB/T 14264 半导体材料术语

GB/T 26074 锗单晶电阻率直流四探针测量方法

3 术语

GB/T 14264界定的术语和定义适用于本文件。

3.1

灯丝寿命 filament lifetime

从光导电压峰值或饱和电压到光导电压衰减等于 $\Delta V_0/e$ 的时间。

3.2

体寿命 bulk lifetime

在空穴-电子对的表面复合可以忽略不计的情况下，只是通过晶体内杂质和缺陷的复合作用所决定的寿命。

注：体寿命可以是少数载流子寿命也可以是载流子复合寿命，区别以表面复合为主的表面寿命。

3.3

少数载流子寿命 minority carrier lifetime

均匀半导体中非平衡少数载流子由产生到复合存在的平均时间间隔。

注：在满足小注入条件下，其数值等于非平衡少数载流子浓度衰减到起始值的 $1/e$ ($e=2.718$) 所需的时间。

3.4

注入水平 injection level

在非本征半导体晶体或晶片内，由光子或其他方式产生的非平衡少数载流子浓度与多数载流子的热平衡浓度之比。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 干扰因素

4.1 陷阱效应影响

4.1.1 对于室温下的硅和低温下的锗而言，载流子陷阱会对载流子寿命产生影响。如果样品中存在陷阱效应，脉冲光停止后，非平衡少数载流子将保持较高浓度并维持相当长一段时间，光电导衰减曲线会出现一条长长的尾巴。在这段衰减曲线上进行测试将错误的导致少数载流子寿命值增大。

4.1.2 样品是否存在陷阱效应由灯丝寿命值的变化来确定。寿命值从小于衰减曲线峰值 (ΔV_0) 的 25% 的曲线部分来确定。若寿命值在沿曲线更低处测试时反而增加，则存在陷阱。此外，把样品加热到 50 °C~70 °C 或用一稳定的本底光照射样品，可消除陷阱效应。若陷阱的影响超过曲线总幅度的 5%，则该样品不适于用直流光电导-脉冲光法测试。

4.2 注入比的影响

注入比严重影响测试结果，少数载流子寿命测试需要保证在小注入条件下进行。由于不同电阻率时符合小注入的条件不同，可以通过改变光强观察寿命值的变化来初步判断，当少子寿命不随注入比而改变时，就可以大致判断测试结果为少数载流子寿命。

4.3 电阻率的影响

为保证少数载流子测试的小注入条件，当电阻率较低时，往往很难得到较好的少子寿命值。因此，测试时需在测试方法及使用设备要求的范围内。

4.4 光生伏特效应影响

样品内部电阻率不均匀会产生使衰减信号扭曲的光电压——光生伏特效应。为了消除此影响，测试的时候还需注意避免光照。在没有电流通过时就呈现光电压的样品不适宜用本方法测试。

4.5 温度影响

半导体中杂质的复合特性会受温度的强烈影响，在测试时控制温度就相当重要。在相同温度下进行的测试才可以做比较。

4.6 杂质复合中心的影响

不同的杂质中心具有不同的复合特性，当样品中存在一种以上类型的复合中心时，观察到的衰减曲线可能包含两个或多个具有不同时间常数的指数曲线，诸曲线合成结果也不呈指数规律，测试不能得出单一寿命值。

4.7 研磨材料的影响

样品的体寿命也会受研磨材料的影响，选择适宜的研磨材料相当重要。

4.8 样品尺寸及表面的影响

最短的寿命值由光源的关断特性决定，最长的寿命值则主要是由样品尺寸决定。样品的大小和表面状态对直流光电导测试-脉冲法检测结果有直接影响，则样品要求具有特殊的尺寸和研磨的表面，见表1及表2。

表1 长方体样品尺寸及测试类型

单位：毫米

类型	长度	宽度	厚度
A	15.0	2.5	2.5
B	25.0	5.0	5.0
C	25.0	10.0	10.0

表2 圆柱体样品尺寸

单位：厘米

样品类型	长度 L	截面 a×b
1	5	0.5×0.5
2	5	1.0×1.0
3	8	1.5×1.5
4	8	2.0×2.0

4.9 表面复合影响

4.9.1 表面复合会影响寿命测试，特别是使用小块样品时。表3给的推荐样品尺寸对应的表面复合率 R_{sf} ，在“计算”一章中也给出了表面复合修正的一般公式，当样品表面积与体积之比很大时，更有必要进行修正。

表3 直流光电导-脉冲光法推荐样品尺寸对应的表面复合率 R_{sf}

材料	类型A μs^{-1}	类型B μs^{-1}	类型 C μs^{-1}
p型锗	0.0323	0.00813	0.00215
n型锗	0.01575	0.00396	0.00105
p型硅	0.0112	0.00282	0.00075
n型硅	0.0042	0.00105	0.00028

注：类型指样品的尺寸，详见表1。

4.9.2 若对表面复合修正太大，会严重降低测试的准确性。建议对测试值的修正不要超过测试值倒数的1/2（即灯丝寿命须大于体寿命的一半，或表面复合率不大于体寿命的倒数，见公式（8））。**标准长方体样品所测定的最大体寿命值列于表3。**

4.10 电导率调幅效应

直流光电导-脉冲光法和高频光电导法测试时样品电导率调幅必须很小，这样样品上电势差的衰减才等价于光生载流子的衰减。当样品上最大直流电压调幅 $\frac{\Delta V_0}{V_{dc}}$ 超过0.01时，允许进行修正。

4.11 电场影响

对于直流光电导衰减法来说，如果少数载流子被电流产生的电场扫出样品的一端，少数载流子就不会形成衰减曲线。因此，需要用一块挡光板遮挡样品端面，使测试中扫出效应不显著。

4.12 光源波长的影响

光生载流子大幅度衰减会影响曲线的形状，尤其在衰减初期使用脉冲光时，这种现象更为显著。因为脉冲光源注入的载流子初始浓度一致性差，要求使用滤光片以增加注入载流子浓度的一致性，并在衰减曲线峰值逐渐减弱之后进行测试。或用单色激光作光源。

4.13 滤光片的影响

滤光片本身有信号，它和样品信号叠加产生测试误差。因此使用直流光电导-脉冲光法测试时应选择厚度1mm、与被测样品材料相同、信号较弱（低寿命值）的滤光片，来增加注入载流子密度的均匀性。

4.14 加水的影响

使用高频光电导方法测试时，一般电极加水测试。对于电阻率比较高的样品，测试时水可能会使样品与测试仪器之间形成一个导电通路，得到的少子寿命值比较低。对于电阻率比较低的样品，寿命值不会受电极加水的影响。因此在测试高阻样品的过程中要注意加水对测试结果的影响。

方法1：直流光电导衰减-脉冲光法

5 方法原理

在具有欧姆接触的单一导电类型长方体或者圆柱体单晶样品上通一直流电，用示波器观察样品上的电压降。在短时间内对样品施一能量接近禁带能量的短脉冲光，在样品中产生非平衡少数载流子，同时触发示波器扫描。从脉冲光停止起电压衰减的时间常数可由示波器扫描测得。当样品中电导率调幅非常小时，所观察到的电压衰减等价于光生载流子的衰减，因此电压衰减的时间常数就等于非平衡少数载流子衰减的时间常数，少数载流子寿命即由该时间系数确定，由公式（1）表示。必要时，应消除陷阱效应对表面复合及过量电导率调幅进行修正。

$$\Delta V = \Delta V_0 e^{\left(-\frac{t}{\tau_F}\right)} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

ΔV ——光电导电压，单位为伏特（V）；

ΔV_0 ——光电导电压的峰值或初始值，单位为伏特（V）；

t ——时间，单位为微秒（ μs ）；

τ_F ——灯丝寿命，单位为微秒（ μs ）。

5.1 本标准可测的最低寿命值为 $1 \mu s$ ，取决于光源的余辉，而可测的最高寿命值主要取决于样品的尺寸，见表4。

表4 直流光电导对锗、硅样品的最高测试寿命值

单位：微秒

材料	类型A	类型B	类型 C
p型锗	32	125	460
n型锗	64	250	950
p型硅	90	350	1300
n型硅	240	1000	3800

注：类型指样品的尺寸，详见表1。

5.2 本方法不适用于测试条件下呈非指数规律变化信号的样品，也不适用于抛光片的验收测试。

6 试剂和材料

6.1 去离子水

温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 时，电阻率大于 $2M\Omega \cdot \text{cm}$ 的去离子水。

6.2 研磨材料

氧化铝粉或其他合适的研磨材料，粒径为 $5 \mu m \sim 12 \mu m$ 。

7 仪器设备

7.1 测试电路图

测试电路图见图1

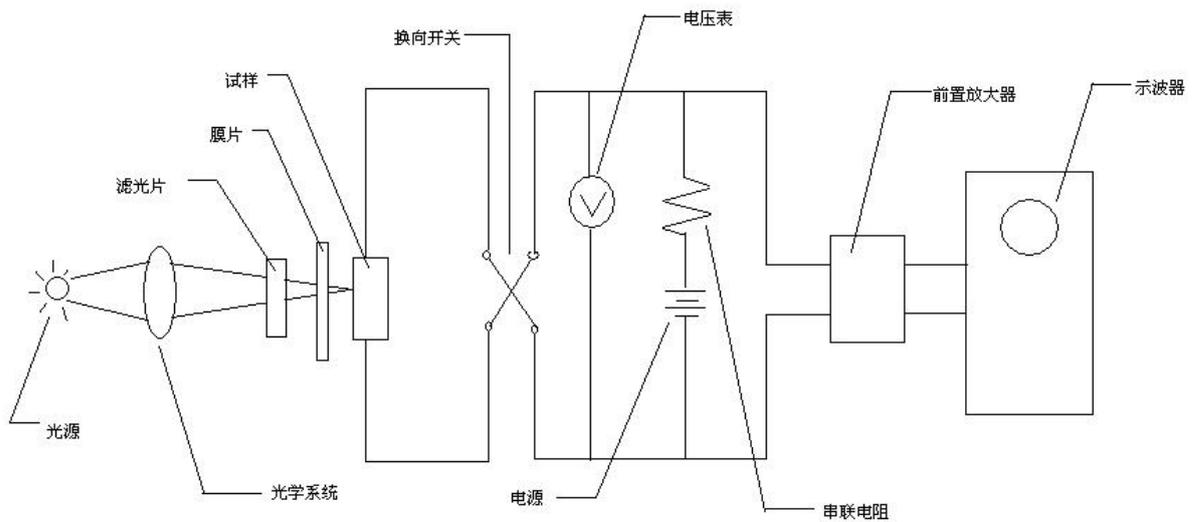


图1 直流光电导衰减-脉冲光法测试少数载流子寿命电路示意图

7.2 测试装置。

7.2.1 光源

脉冲光源应在光强从最大值减小到其 10% 时关断，或关断时间小于所测样品寿命时间的 1/5 或更少。用于硅样品测量的光源光谱分布的最大值应在波长范围 $1.0 \mu\text{m}$ — $1.1 \mu\text{m}$ 、锗样品的波长范围 $1.5 \mu\text{m}$ — $1.8 \mu\text{m}$ 。使用单色光源时，无需在光源前增加滤光片及矩形窗孔膜片

氙灯或放电管，配备 $0.01 \mu\text{F}$ 的电容器以及可提供频率为 2Hz ~ 60Hz 脉冲的高压电源。光源应在 $0.3 \mu\text{s}$ 内达到最大光强，并在小于 $0.5 \mu\text{s}$ 内光强由最大值下降不大于 5%（待确认）。采用更小的电容可获得更短的脉冲宽度，适合测试灯丝寿命低于 $5 \mu\text{s}$ 的样品。

7.2.2 电源

电源应稳定并经过良好滤波，应在样品上产生不低于 5V 的直流电压。电路中串联电阻 R_s 值至少是样品电阻 R 及接触电阻 R_c 之和的 20 倍，电路中还应有的对样品电流换向及切断电流的开关装置。

7.2.3 样品夹具及恒温器

隔热样品夹具及恒温器应使样品处于规定温度 $27 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ，夹具与样品的整个端面应保持欧姆接触，并至少应使样品四个侧面中的一个侧面处于光照下。

注：制作与样品端面成欧姆接触的样品夹具的方法较多，建议使用金属带或纤维的压力接触，也可用厚铅板或铜板。

7.2.4 滤光片

滤光片应双面抛光，由与样品相同的材料制成，厚度为 1mm ，放置在矩形窗孔膜片的上方。

7.2.5 矩形窗孔膜片

放置于靠近样品的光照表面，光透过矩形窗孔膜片，只能照射到样品的部分区域。光照区域的长度 $L_i = \frac{L}{2}$ 、宽度 $W_i = \frac{W}{2}$ ；光照部位都在样品中央位置。

7.2.6 电信号测试线路

7.2.6.1 前置放大器——具有可调的高、低频频带范围，低频截止频率从 0.3Hz~30Hz 可调，高频截止频率应大于 2MHz。

7.2.6.2 显示方式——示波器具有适合的时间扫描和信号灵敏度及经校准的时间基线，其精度和线性度都优于 3%并能被试验信号或外部信号触发，还应配备有助于分析衰减曲线的透明屏幕，其要求如下：

规定屏幕尺寸在 10 cm×10 cm 以内，该尺寸有利于减小视差。屏幕上刻有一条曲线，在基线上方的高度沿横坐标的距离呈指数衰减，由公式 (2) 表示：

$$y = 6e^{\left(\frac{-x}{2.5}\right)} \dots\dots\dots (2)$$

式中：x——寿命时间，单位为微秒 (μs)；
 y——光电导电压，单位为伏特 (V)；
 x和y都是以刻度盘的刻度划分。

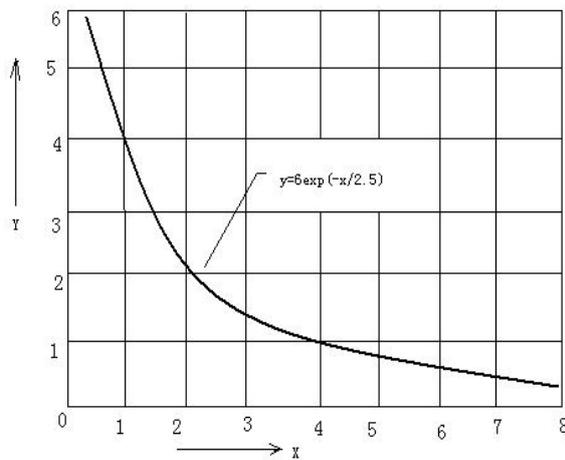


图2 示波器面板上的指数曲线

7.2.6.3 计算机及软件系统（含高速数据采集卡、计算机）代替示波器。其中数据采集卡：采样频率 ≥ 10MHz，输入范围±5V，精度 DC±1LSB；计算机：配置能够满足检测需求。

7.2.7 测试电路要求

- 7.2.7.1 校正垂直扫描灵敏度至少 0.1 mV/cm 或更优；
- 7.2.7.2 校正垂直增益和扫描线性度不大于 3%；
- 7.2.7.3 响应时间：输入信号以步进方式变化时，输出信号的衰减不超过所测最小灯丝寿命值的 1/5；
- 7.2.7.4 脉冲没有明显的变坏现象，如过冲或阻尼效应。

8 样品制备

8.1 取样

从晶体上指定区域长方体（长度为L，厚度为T，宽度为W）或者圆柱体样品。记录所有尺寸，精确到 0.1mm。较低寿命值的材料测试宜使用较小尺寸的样品。直拉法制备的硅单晶测试常用类型 B，区熔法制备的硅单晶测试建议采用类型 C，见表 1。

8.2 研磨

测试前，用氧化铝粉研磨样品，使样品六个表面成为平滑磨面。

8.3 清洗

将研磨后的样品用超声清洗或用水冲洗，用干燥氮气吹干。样品端面应清洁干净，有利形成良好的欧姆接触。

8.4 制备欧姆接触

在样品的两个端面上制作欧姆接触。锗样品可使用镍、铯或金电镀浴，要避免铜沾污。硅样品使用加热盘将样品加热至35℃，同时研磨端面，防止滴在金刚砂布上的镓形成镓污点，或用电阻率小于0.01 Ω·cm 的银粉导电橡胶做紧压欧姆接触。也可在n型硅样品端面镀镍，在p型硅样品端面镀铯。

8.5 测试样品尺寸

使用精度为0.01 mm的千分尺或游标卡尺测试样品尺寸。

8.6 测试接触点

将样品置于夹具中，以一个方向接通电流，在样品上形成2V~5V的电压，记录该电压降 V_1 。改变电流方向，记录样品上电压降 V_2 。如果 V_1 与 V_2 的差小于5%，则样品具有欧姆接触。

8.7 测试和记录

按 GB/T 1551 或 GB/T 26074 测试和记录并修正样品电阻率。如果样品导电类型是未知的，可按 GB/T 1550 测定。

9 实验条件

测试宜在下列环境中进行：

- a) 测试仪器需电磁屏蔽充分
- b) 温度：27℃±1℃；
- c) 湿度：不大于60%；
- d) 大气压：860hpa-1060hpa。

10 测试步骤

10.1 用样品夹具夹紧样品，定位于膜片的矩形窗孔处，使样品的中央处于光照下。测试并记录样品夹具的温度，取值27℃±1℃。

10.2 开启光源，将前置放大器与示波器接通。

10.3 接通电源，调整电流，在样品上产生2V~5V电压。

10.4 使观察到的衰减曲线与画在示波器透明屏上的标准指数曲线一致（见图2），方法如下：

10.4.1 调节垂直位移旋钮，使观察到的衰减曲线的基线与标准指数曲线的基线重合。调节时间基准扫描速度于一较低值，使屏幕横向上出现多个衰减曲线，以易于调节。

10.4.2 延长时间基准以产生一个单周期信号图样，调节水平位移、垂直放大和时间基准扫描速度，直至观察到的曲线与标准指数曲线尽可能吻合，脉冲峰值 ΔV_0 与标准曲线左上方点一致。

10.5 测试样品是否存在光生伏特效应。关断电流，保持光照，其他旋钮不动，观察示波器是否检测到一个光电压信号。如果检测到一个超过脉冲峰值1%的信号，则样品中存在光生伏特效应，该样品不适合用本方法测试。

10.6 若未观察到上述光电压信号且衰减曲线呈指数曲线，则由公式（3）确定灯丝寿命 τ_F （ μs ）：

$$\tau_F = 2.5 \cdot S_1 \dots\dots\dots (3)$$

式中：

S_1 ——时间基准扫描速度，单位为微秒每厘米（ $\mu\text{s}/\text{cm}$ ）。

10.7 若示波器时间基准未经校准，则标准指数曲线不适用，灯丝寿命可如下确定：旋转时间基准扫描速度至一合适分度值 S_2 （ $\mu\text{s}/\text{cm}$ ），测试衰减曲线上任意两点间幅度比为 2:1 的水平距离 M （ cm ），由公式（4）计算 τ_F ：

$$\tau_F = 1.44 \cdot M \cdot S_2 \dots\dots\dots (4)$$

当不具备屏幕标准曲线（见图2）时，也可用该步骤。

10.8 当观察到的屏幕衰减曲线呈非纯指数曲线但接近于纯指数曲线时，灯丝寿命可由曲线底端的几对点确定。

10.8.1 当样品的一半或少于一半的宽度已受光照，灯丝寿命从信号衰减到其峰值的 60% 以后的曲线部分来测定；

10.8.2 当样品的一半以上的宽度已受光照，灯丝寿命从信号衰减到其峰值的 25% 以后的曲线部分来测定；

10.8.3 上述两种情况都要增加垂直增益以延长衰减曲线，使指定部分达到屏幕垂直满刻度，调节时间基准扫描到一合适分度值 S_2 （ $\mu\text{s}/\text{cm}$ ），使衰减曲线的指定部分尽可能达到屏幕水平满刻度，测试曲线上幅度比为 2:1 的任意两点间水平距离 M （ cm ），由公式（5）计算灯丝寿命：

$$\tau_{F1} = 1.44 \cdot M \cdot S_2 \dots\dots\dots (5)$$

重复上述过程两遍以上，得到 τ_{F2} 、 τ_{F3} 等；

10.8.4 确定和记录平均灯丝寿命 τ_F ，即 τ_{Fi} 的平均值。若 τ_{Fi} 之间差值超过 10%，则该样品不适合用本方法测试。

注：特别是在 p 型硅的情况下，寿命随载流子浓度函数变化非常迅速，在较宽范围内取得的平均值产生的误差可能很大。

10.9 检查是否满足扫出条件

10.9.1 关断光源，测试样品上直流电压 V_{dc} ；

10.9.2 计算 V_{dc} 与 $\sqrt{\tau_F}$ 的积，若乘积不大于表 5 给出的对应常数，则满足扫出条件，即扫出效应不显著，进行 10.10 操作；

10.9.3 表 5 给出的常数，仅用于推荐长度的样品，其他长度的样品，其条件由公式（6）给出：

$$V_{dc} \cdot \sqrt{\tau_F} \leq \frac{30L}{\sqrt{\mu}} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

L ——样品长度，单位为毫米（ mm ）

μ ——少数载流子迁移率，单位为平方厘米每伏秒（ $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ）（见表5）；

τ_F ——灯丝寿命，单位为微秒（ μs ）。

10.9.4 若不满足扫出条件，可降低样品电流来减小 V_{dc} ，这将会改变曲线形状， τ_F 值也将发生变化

10.9.5 重复从 10.4~10.9.4 的操作，直至 τ_F 值是一个常数且满足扫出条件。

表 5 锗、硅样品的迁移率

材料	迁移率 $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$	类型 A	类型 B 和 C
p 型锗	3800	7.3	12
n 型锗	1800	11	18
p 型硅	1400	12	20
n 型硅	470	20	35

10.10 按下列步骤检查是否满足小注入条件。

- a) 使用满足扫出条件相同的电流值。开启光源，测试脉冲峰值， ΔV 。
- b) 若 $\frac{\Delta V_0}{V_{dc}} \leq 0.01$ ，则满足小注入条件。
- c) 若 $\frac{\Delta V_0}{V_{dc}} > 0.01$ ，则按公式（7）修正灯丝寿命：

$$\tau_F = \tau_{Fmes} \left[1 - \left(\frac{V_0}{V_{dc}} \right) \right] \dots\dots\dots (7)$$

式中：

- τ_{Fmes} ——10.6中测试或10.7中计算的灯丝寿命值；
- τ_F ——灯丝寿命修正值。

11 计算

11.1 小注入条件下的少数载流子体寿命由公式（8）计算。

$$\tau_b = (\tau_F^{-1} - R_{SF})^{-1} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

- τ_b ——体少数载流子寿命，单位为微秒（ μs ）；
- τ_F ——灯丝寿命，单位为微秒（ μs ）；
- R_{SF} ——表面复合率；标准样品的 R_{SF} 由表3给出，单位为微秒⁻¹（ μs^{-1} ）。

注：注意4.10表面复合影响及表4规定的可测最大体寿命。

11.2 对长度为L，宽为W，厚为T的长方体样品， R_{SF} 由公式（9）求得：

$$R_{SF} = \pi^2 D (L^{-2} + W^{-2} + Y^{-2}) \dots\dots\dots (9)$$

11.3 对长度为L，半径为r的圆柱体样品样品， R_{SF} 由公式（10）求得：

$$R_{SF} = \pi^2 D \left[L^{-2} + \left(\frac{9}{16R^2} \right) \right] \dots\dots\dots (10)$$

12 报告

试验报告应包括如下内容

- a) 样品编号；
- b) 样品尺寸；
- c) 样品导电类型和电阻率；
- d) 样品上测试点及其光照区域的长（ L_i ）、宽（ w_i ）；
- e) 光源种类；
- f) 直流电压降 V_{dc} ，电压幅度峰值或饱和值；
- g) 是否使用了幅度修正；
- h) 灯丝寿命 τ_F 测试值；
- i) 计算的体少数载流子寿命 τ_b 。
- j) 本标准编号；
- k) 测试人员和日期

13 精密度

本标准测试棒状（多晶磷检棒）样品，样品寿命在 $1000\ \mu\text{s}\sim 3000\ \mu\text{s}$ 。单家实验室选取了 3 个标准样品，同一个样品、同一测试区域多次测试时，相对标准偏差 $<1.76\%$ 。

本标准还使用其他方法比对，使用高频光电导法与直流光电导-脉冲光法比对，测试同一个圆形块状标准样品时，在相同的测试区域多次测试，两种方法相对标准偏差 $<10.27\%$ ；同一个棒状（多晶磷检棒），在相同的测试区域，相对标准偏差 $<8.69\%$ 。

方法2：高频光电导衰减法

14 方法原理

本方法以直流光电导衰减法原理为基础，用高频电场代替直流电场，以阻容耦合代替欧姆接触，以检测样品上电流的变化代替检测样品上电压的变化。不光照时，由高频源产生等幅高频正弦电流，通过样品与取样器，在取样器两端产生高频电压。样品受光照时，产生附加光电导，流过样品到取样器的高频电流幅值也相应增加。光照停止后，在小注入条件下，附加光电导按指数规律衰减，高频电流幅值增加部分指数规律衰减，取样器上形成的高频调幅信号经检波和滤波、宽频放大器放大输入示波器或计算机，屏上显示一条指数衰减曲线，其时间常数 τ 即为非平衡少数载流子寿命。

15 仪器设备

15.1 测试电路图

测试电路图见图3

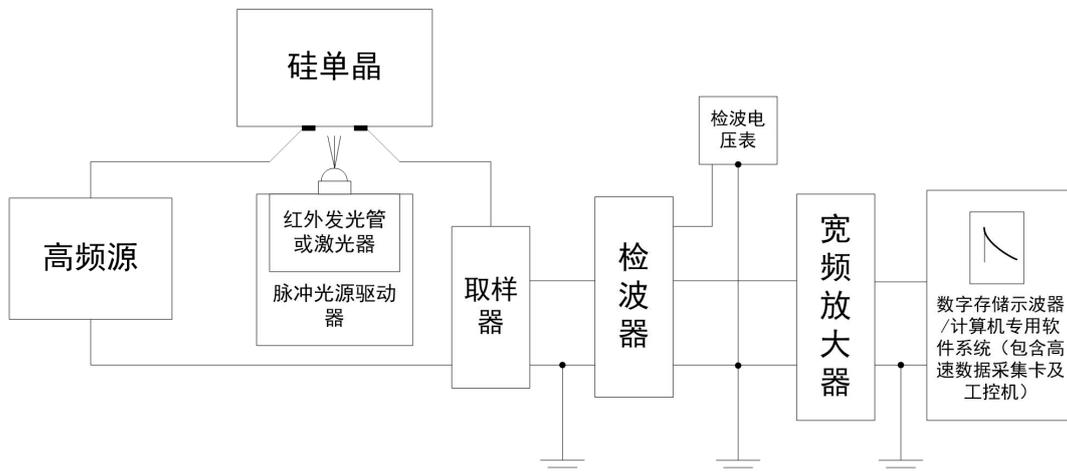


图3 高频光电导衰减法少数载流子寿命测试电路示意图

15.2 测试装置由以下几部分组成。

15.2.1 光脉冲发生装置

光脉冲关断时间应小于所测寿命值的一半，重复频率为1~5次/s。

注：当采用发光二极管或激光器作光源时，重复频率可达30—50次/s。

15.2.2 光学系统

使用氙灯光源时，需要透镜和滤光片分别构成聚光和滤光系统，聚光是只改变光强而不改变光照面积，保证区域内光照均匀。滤光片由电阻率大于 $10\ \Omega\cdot\text{cm}$ 的硅单晶片制成，厚度不小于1 mm，表面抛光至镜面。

使用波长为 $1.06\ \mu\text{m}$ 的红外发光二极管或激光器时，无需使用上述光学系统。

15.2.3 高频电源

频率30 MHz，频率精度不低于 10^{-4} 。低输出阻抗，小于 $10\ \Omega$ ；当负载小于 $100\ \Omega$ 时，输出功率不低于1W。

15.2.4 检波器

保证信号不畸变，频率响应2Hz~2MHz。

15.2.5 放大器

低频截止频率从 0.3Hz~2Hz，高频截止频率应大于 2MHz。放大倍数 10-30 倍，带宽 2Hz-2MHz。

15.2.6 取样器

取样器为电流互感器或者磁环取样器。

15.2.7 示波器或计算机及软件系统

示波器：带宽大于25MHz，实时采样率不低于500MSa/s，存储深度不小于4Kpts。垂直响应（分辨率不低于5mV/div。通道耦合方式有直流、交流，当寿命值大于500命值时需用直流耦合，有良好的同步性能。

计算机及软件系统（含高速数据采集卡、计算机）代替示波器。

数据采集卡：采样频率不小于 10MHz，输入范围±5V,精度 DC范围z/B；计算机：配置能够满足检测需求。

16 样品制备

16.1 样品形状：整根单晶棒，圆柱体或具有平面的单晶锭亦可。

16.2 样品处理：研磨、喷砂或者腐蚀去除氧化层，表面清洁，不得有沾污。

16.3 接触材料：样品与焊接有铜或铜镓合金的电极接触，在电极上加水做耦合剂。对于较轻的样品可用固定的砝码加压。

17 测试步骤

17.1 测试环境

测试宜在下列环境中进行：

- a) 测试仪器电磁屏蔽充分，工作电源应有滤波装置。
- b) 温度：23℃±2℃；
- c) 相对湿度：不大于65%；

17.2 测试条件

17.2.1 应保证在小注入条件下测量，满足式（11）要求，也可以通过把取样电阻上的高频电压变化值控制在一定范围内来保证小注入条件：

$$\left(\frac{1}{M}\right) \times \left(\frac{\Delta V}{V}\right) \leq 1\% \dots\dots\dots (11)$$

式中：

M—修正因子，当忽略回路中感抗、容抗以及样品电阻比取样电阻大得多时，M近似于1；

ΔV—光照时，取样电阻上电压变化值；

V—无光照时，取样电阻上电压降。

当光强减弱时寿命值无明显变化，此值可视为少子寿命，因为少子寿命的特征是不随注入水平的变化而改变。

- 17.2.2 样品的光生伏特效应小于光电导信号的5%。
- 17.2.3 测试时，样品应避免环境光照的影响。
- 17.2.4 信噪比应小于10%，测试信号应上下波动小于5%。

17.3 仪器的校准

17.3.1 使用标准样块校准仪器是最切实可行的方法；

17.3.2 在有校准样块情况下可按以下程序调试寿命仪

17.3.2.1 使用波长为 $1.06\ \mu\text{m}$ 红外发光二极管光源时，光强指示调到 3-4V。测不同电阻率产品时，可适当增减光源电压（光强指示），达到校准样块寿命值即可进行测试。国产红外发光二极管阈值电压 $\geq 1.8\ \text{V}$ 才发光。

17.3.2.2 在产品电阻率低于 $2\ \Omega \cdot \text{cm}$ 时启用波长为 $1.06\ \mu\text{m}$ 脉冲激光器光源，并将光强指示调到 8V，达到校准样块寿命值即可进行测试。激光器阈值电压 $\geq 5\ \text{V}$ 才发光。

17.3.2.3 上述两种光源，如有需要均可将光源电压调到最大值。如光电导信号仍然过小，可加大光注入量（增加光源驱动器脉冲宽度）。

17.4 调试步骤

17.4.1 调节光强及示波器有关旋钮，在满足测试条件下，使示波器屏幕上观察到的光电导信号 ΔV 与示波器上的标准指数曲线 $y = y_0 e^{-\frac{x}{L}}$ 相重合，读出X轴上长度L所对应的时间值，即为灯丝寿命 τ_F （见图4）。

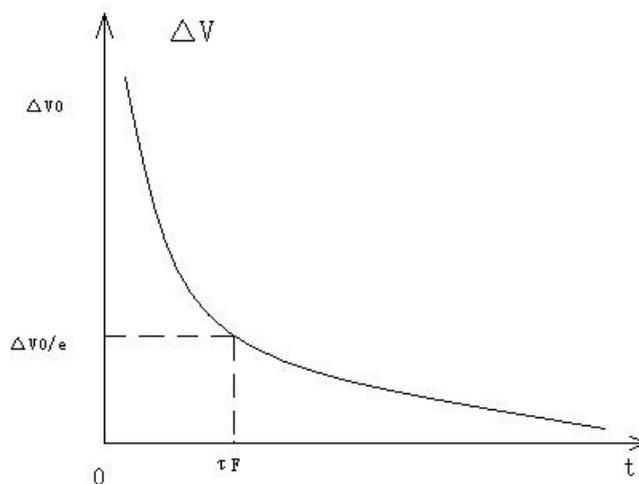


图4 $\Delta V - \tau_F$ 曲线

17.4.2 若光电导信号 ΔV 部分偏离指数曲线，则应作如下处理。

17.4.2.1 若曲线初始部分衰减较快（表面复合效应），则由曲线较后部分测试，一般取下降到60%以后的部分读数也可以用更厚的硅滤光片测试（见图5）。

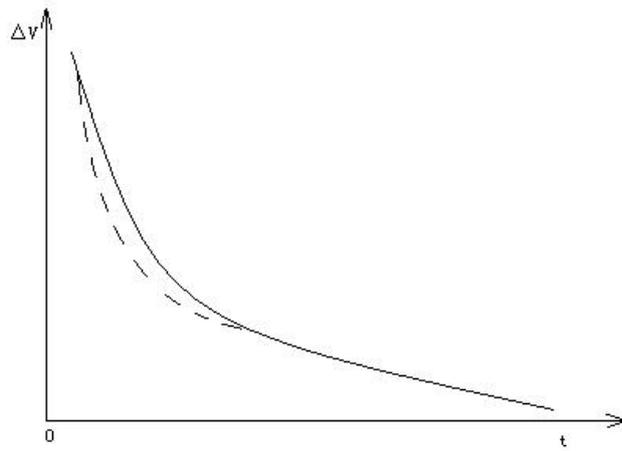


图5 表面复合

17.4.2.2 若曲线后部不与基线重合, 则用弱的稳定光照消除陷阱效应进行测试。当陷阱幅度大于20% (与曲线的最大值比较) 时, 则不予报数 (见图6)。

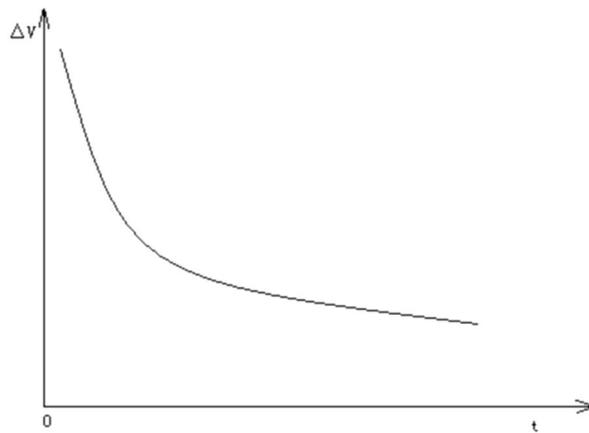


图6 陷阱效应

17.4.2.3 若曲线头部出现平顶现象, 说明信号太大, 应减弱光强及倍数在小信号下进行测试 (见图7)。

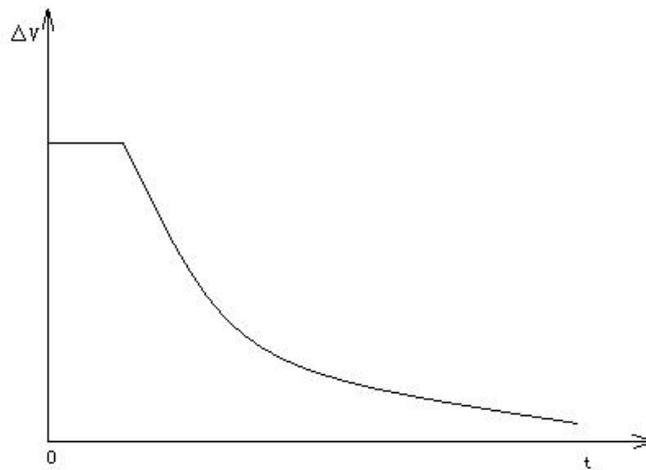


图7 信号限幅

17.5 快速测试方法

在使用计算机及软件测试系统时，当光电导衰退信号传输到数据采集卡，计算机软件将记录和计算光电导电压衰减到40%和14.7%之间的时间差，迅速给出寿命值。如下图所示。

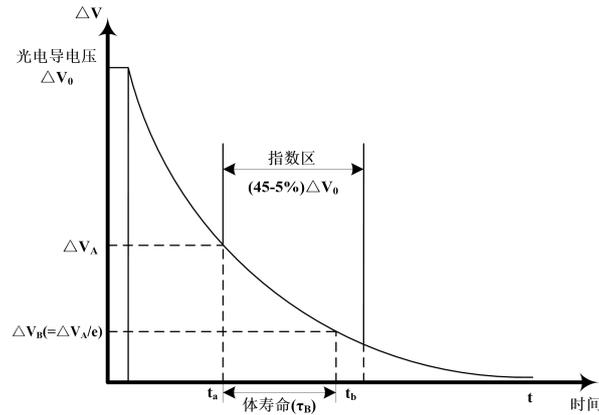


图8 寿命值测量

18 计算

18.1 注入水平的计算公式为：

$$\eta = \frac{\Delta V_0}{V_{dc}} = \frac{\Delta V}{A \times V_{dc}} \dots\dots\dots (12)$$

式中： ΔV_0 ——样品上的光电导电压

ΔV —— ΔV_0 被放大器放大 A 倍后，示波器或专用计算机测试软件上读取到的电压幅值

A——放大器放大倍数

V_{dc} ——30MHz载波检波后的电压（反映加载在样品上的恒定的高频电压），由检波电压表读数。

由于不同电阻率的样品测试少数载流子寿命所需的小注入水平数值不等，因此不宜做简单的规定。不同单位用同一注入水平测试相同的单晶寿命时，会得到比较接近的寿命值。

18.2 小注入条件下的体少数载流子由 $\tau_b = (\tau_F^{-1} - R_{SF})^{-1}$ 公式（8）计算，考虑到表面复合作用，对灯丝寿命应作修正：

$$\text{对长方形样品: } \frac{1}{\tau_B} = \frac{1}{\tau_F} - \pi^2 \left(\frac{1}{L^2} + \frac{1}{W^2} + \frac{1}{T^2} \right) \dots\dots\dots (13)$$

$$\text{对圆柱形样品: } \frac{1}{\tau_B} = \frac{1}{\tau_F} - \pi^2 D \left(\frac{1}{L^2} + \frac{9}{4\phi^2} \right) \dots\dots\dots (14)$$

式中： τ_B —体寿命， μs ；

τ_F —灯丝寿命， μs ；

D—少数载流子扩散系数，电子扩散系数 $D_n=36\text{cm}^2/\text{s}$ ，空穴扩散系数 $D_p=13\text{cm}^2/\text{s}$ ；

L、W、T、 ϕ —分别为样品长、宽、厚、直径，cm.

18.3 样品的最小尺寸与可测试最高寿命值（理论值）见表6。表6供制作样品时参考，若直接测得的灯丝寿命大于表中值的一半时，则尺寸必须增大。

表6 样品尺寸与寿命理论值

长度 cm	截面积或直径	体寿命 μs	
		n 型	p 型
1.5	$0.25 \times 0.25 \text{ cm}^2$	240	90

2.5	$0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$	950	350
2.5	$1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$	3600	1300
1.5	$\phi 0.25 \text{ cm}$	220	80
2.5	$\phi 0.5 \text{ cm}$	860	310
2.5	$\phi 1.0 \text{ cm}$	3300	1200

19 报告

试验报告应包括以下内容：

- a) 样品编号；
- b) 样品尺寸；
- c) 样品导电类型和电阻率；
- d) 灯丝寿命 τ_p 测试值；
- e) 计算的体少子寿命 τ_B ；
- f) 本标准编号
- g) 测试人员和日期。

20 精密度

本标准测试圆形块状规格的标准样品，样品的少数载流子寿命在1000 μs –3000 μs 。单个实验室在同一衰减比例、电极加水的条件下，同一个标准样品，在相同的测试区域内多次测试，相对标准偏差 < 7.61%。多个实验室测试21个标准样品，在同一测试条件下，同一个标准样品最少测试3次，相对标准偏差 < 6.51%。

本标准测试棒状（多晶磷检棒）规格的标准样品，样品的寿命在1000 μs –3000 μs 。单个实验室在同一衰减比例、电极加水的条件下，同一个标准样品，在相同的测试区域内多次测试，相对标准偏差 < 5.97%；多个实验室测试3个标准样品，在同一测试条件下，同一个标准样品测试5次，相对标准偏差 < 16.28%。

附录 A
(资料性附录)
直流光电导测试方法-斩波光法

A. 1 范围

本方法只适用于电阻率 $\geq 1 \Omega \cdot \text{cm}$ 的硅单晶样品的测试。

本文件包含了适用于具有特殊的尺寸和欧姆接触的长方体或圆柱体硅单晶样品的直流光电导衰减-斩波光法。

A. 2 干扰因素

本方法除受直流光电导-脉冲法和高频光电导测试方法共同干扰因素的限制外，还存在其本身特有的干扰因素。

A. 2.1 若样品少数载流子寿命测试的衰减曲线是非指数型的，则不能用直流光电导测试方法-斩波光法。

A. 2.2 斩波光法不能使用脉冲光表面复合的方法进行修正。本测试方法小注入水平的条件：恒定光照下样品中注入的处于稳态少数载流子密度与平衡多数载流子密度之比小于 0.001。若光注入不能降低到小注入水平值，则样品不适合用本方法测试。

A. 2.3 样品的大小和表面状态对检测结果有直接影响。直流光电导测试-斩波光法要求样品具有特殊的尺寸和研磨的表面，见表 A1 及 A2。

表A1 圆柱体样品尺寸

单位：厘米

样品类型	长度 L	截面 a×b
1	5	0.5×0.5
2	5	1.0×1.0
3	8	1.5×1.5
4	8	2.0×2.0

表A2 长方体样品尺寸及测试类型

单位：毫米

类型	长度	宽度	厚度
A	15.0	2.5	2.5
B	25.0	5.0	5.0
C	25.0	10.0	10.0

A. 3 方法原理

在具有欧姆接触的单一导电类型的硅单晶样品上通一直流电流，用示波器观察样品上的电压降。在小注入水平下，在样品中施一波长在 $1.0 \mu\text{m}$ - $1.1 \mu\text{m}$ 的斩波光源产生非平衡少数载流子，同时触发欧姆点接触程序及示波器；从斩波光停止起电压衰减的时间常数可由示波器扫描测得；示波器上的衰减曲线必须呈指数型时，所观察到的电压衰减等价于光生载流子的衰减，因此电压衰减的时间常数就等于非平衡少数载流子衰减的时间常数，少数载流子寿命即由该时间系数确定。必要时，应消除陷阱效应和对表面复合。

A. 3.1 对于厚度为0.1mm、长度 ≥ 10 mm、宽 ≥ 4 mm的长方体硅单晶样品既可以使用直流光电导测试-斩波光法也可以使用直流光电导测试-脉冲光法。

A. 3.2 本方法不适用于测试条件下呈非指数规律变化信号的样品。本标准不适用于抛光片的验收测试。

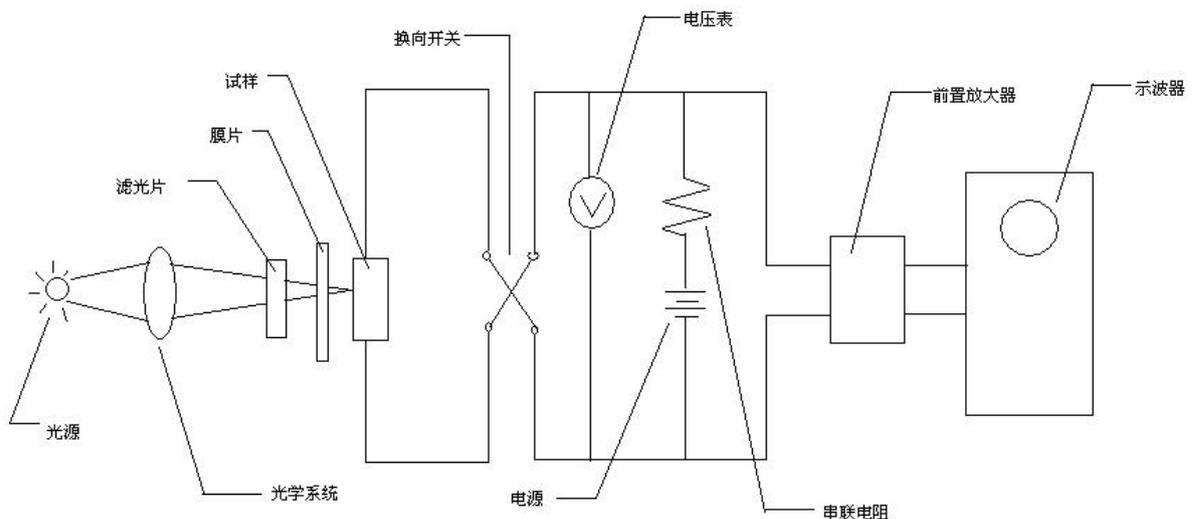
A. 4 试剂及材料

直流光电导-脉冲光法测试时使用的试剂和材料同样也适用于本方法。

A. 5 仪器设备

A. 5.1 测试电路图

测试电路图见图A1



图A1 直流光电导衰减-斩波光法测试少数载流子寿命电路示意图

A. 5.2 测试设置

A. 5.2.1 光源

带脉冲发生器的光源-用于产生周期性矩形光脉冲。脉冲幅度、脉冲高度和脉冲间隔必须分别可调整。脉冲长度和间隔的调整范围应分别至少为5 μ s 到 20 ms。光源发出的最大辐射功率应足够大且被测信号至少为 1 mV。光脉冲上升和下降边缘的时间常数应小于待测灯丝最短寿命的 0.2 倍。脉冲发生器必须为后续的信号调节器和示波器提供触发信号。

硅单晶选用波长为 (1.0-1.1) μ m 的掺硅、砷化镓发光二极管 (LED)，关断时间约为 0.1 μ s；斩波频率在 15、45 或者 75 Hz 的 6-V、8-A 的钨丝带灯也可用于测量灯丝寿命 ≥ 5 μ s 的样品。

A. 5.2.2 电源

电源应稳定并经过良好滤波，应在样品上产生不低于 5 V 的直流电压。电源可以采用恒流源，也可以采用恒压源与无反应串联电阻电路中 R_s 相结合的形式。 R_s 值至少是样品电阻 R 及接触电阻 R_c 之和的 20 倍，电路中还应具有对样品电流换向及切断电流的开关装置。

A. 5.2.3 保温样品夹具及恒温器

隔热样品夹具及恒温器应使样品处于规定温度 $27\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，夹具与样品的整个端面应保持欧姆接触，并至少应使样品四个侧面中的一个侧面处于光照下。

注：制作与样品端面成欧姆接触的样品夹具的方法较多，建议使用金属带或纤维的压力接触，也可用厚铅板或钢板。

A. 5. 2. 4 矩形窗孔膜片

放置于靠近样品的光照表面，光透过矩形窗孔膜片，只能照射到样品的部分区域。光照区域的长度 $L_1=3.0\pm 0.1\text{ mm}$ 、宽度 $W_1=W$ ；光照部位都在样品中央位置。

A. 5. 2. 5 电信号测试线路

A. 5. 2. 5. 1 前置放大器——具有可调的高、低频频带范围，低频截止频率从 $0.3\text{ Hz}\sim 30\text{ Hz}$ 可调，高频截止频率应大于 2 MHz 。

A. 5. 2. 5. 2 信号调节器——用于改善小信号信噪比的箱式仪器或者波形诱导器，仅在有必要降低光照强度来确保满足低注入水平条件时才需要。

A. 5. 2. 5. 3 示波器——具有适合的时间扫描和信号灵敏度及经校准的时间基线，其精度和线性度都优于 3% 并能被试验信号或外部信号触发，还应配备有助于分析衰减曲线的透明屏幕，

规定屏幕尺寸在 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 以内，该尺寸有利于减小视差。屏幕上刻有一条曲线，在基线上方的高度沿横坐标的距离呈指数衰减，由公式(A. 1)表示：

$$y = 6e^{-\frac{x}{2.5}} \dots\dots\dots (A. 1)$$

式中： x ——寿命时间，单位为微秒($\mu\text{ s}$)；
 y ——光电导电压，单位为伏特(V)；

屏幕在 y 最大值为 0.37 处有一条额外的水平线。并且此测试方法也可以用 $x-y$ 或 $x-t$ 记录器进行信号记录。

A. 5. 2. 6 计算机及软件系统(含高速数据采集卡、计算机)代替示波器。其中数据采集卡：采样频率 $\geq 10\text{ MHz}$ ，输入范围 $\pm 5\text{ V}$ ，精度 $\text{DC}\pm 1\text{ LSB}$ ；计算机：配置能够满足检测需求。

A. 5. 2. 7 测试电路要求

A. 5. 2. 7. 1 校正垂直扫描灵敏度至少 0.1 mV/cm 或更优；

A. 5. 2. 7. 2 校正垂直增益和扫描线性度不大于 3% ；

A. 5. 2. 7. 3 响应时间：输入信号以步进方式变化时，输出信号的衰减不超过所测最小灯丝寿命值的 $1/5$ ；

A. 5. 2. 7. 4 脉冲没有明显的变坏现象，如过冲或阻尼效应。

A. 6 样品制备

A. 6. 1 取样

从晶体上所需区域切取长方体(长度为 L ，厚度为 T ，宽度为 W)或者圆柱体样品。记录所有尺寸，精确到 0.1 mm 。只建议类型B和类型C样品使用此方法。

A. 6. 2 研磨

测试前，用氧化铝粉研磨样品，使样品六个表面成为平滑磨面。

A. 6.3 清洗

将研磨后的样品用超声清洗或用水冲洗，用干燥氮气吹干。样品端面应清洁干净，有利形成良好的欧姆接触。

A. 6.4 制备欧姆接触

在样品的两个端面上制作欧姆接触。使用加热盘将样品加热至35℃，同时研磨端面，防止滴在金刚砂布上的镓形成镓污点，或用电阻率小于0.01 Ω·cm的银粉导电橡胶做紧压欧姆接触。也可在n型硅样品端面镀镍，在p型硅样品端面镀铱。

A. 6.5 测试样品尺寸

使用精度为0.01 mm的千分尺或游标卡尺测试样品尺寸。

A. 6.6 测试接触点

将样品置于夹具中，以一个方向接通电流，在样品上形成2V~5V的电压，记录该电压降 V_1 。改变电流方向，记录样品上电压降 V_2 。如果 V_1 与 V_2 的差小于5%，则样品具有欧姆接触。

A. 6.7 测试和记录

按GB/T 1551或GB/T 26074测试和记录并修正样品电阻率。如果样品导电类型是未知的，可按GB/T 1550测定。

A. 7 实验条件

测试宜在下列环境中进行：

- a) 测试仪器电磁屏蔽充分
- b) 温度：27℃±1℃；
- c) 湿度：不大于60%；
- d) 大气压：860hpa-1060hpa

A. 8 测试步骤

A. 8.1 用样品夹具夹紧样品，定位于膜片的矩形窗孔处，使样品的中央处于光照下。测试并记录样品夹具的温度，取值27±1℃。

A. 8.2 开启光源，将前置放大器与示波器接通。

A. 8.3 接通电源，调整电流，在样品上产生2V~5V电压。

A. 8.4 调节垂直位移旋钮，使观察到的衰减曲线的基线与标准指数曲线的基线重合。调节时间基准扫描速度于较低值，使屏幕横向上出现多个衰减曲线，以易于调节。

A. 8.5 在关断前调整脉冲持续时间，使脉冲幅度达到其饱和值 ΔV_0 ，并调整脉冲关闭时间，使信号达到脉冲之间的基线(直流电压值)。

A. 8.6 调整示波器的时间基准扫描速度控制及电流和脉冲幅度，以便在示波器上看到振幅较大的单个周期的轨迹，直流电压不允许超过5V。调节水平位移、垂直放大和时间基准扫描速度，直到观察到的曲线与标准指数曲线尽可能吻合，如图所示。

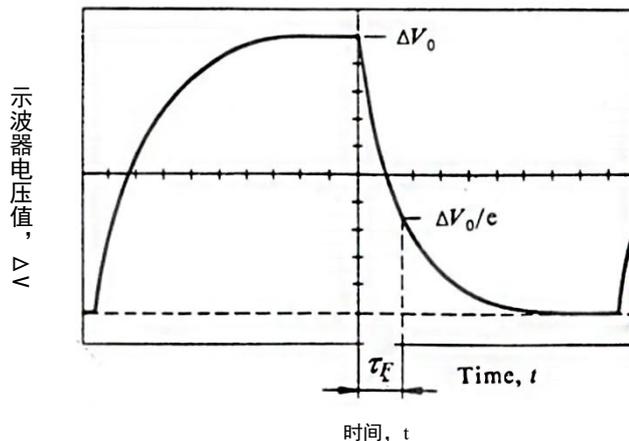


图 A.3 示波器电压变化曲线图

A. 8. 7 测试样品是否存在光生伏特效应：关断电流，保持光照，其他旋钮不动，观察示波器是否检测到一个光电压信号。如果检测到一个超过脉冲峰值 1% 的信号，则样品中存在光生伏特效应。则停止测试，并记录由于不均匀性的存在，该样品不适合用本方法。

A. 8. 8 若未观察到上述光电压信号，则确定灯丝寿命的第一个近似值 τ_F 。从光导信号开始衰减到衰减曲线上光导信号为饱和值 0.37 的点之间的时间。

A. 8. 9 提高前置放大器的低频截止值（最高为 $\frac{10}{\tau_F}$ ），以消除低频噪声。若不增加低频截止点，衰减曲线则显示一个正增加。

A. 8. 10 确定扫出条件

A. 8. 10. 1 关断或遮挡光源，测试样品得直流电压 V_{dc} 。

A. 8. 10. 2 当 n 型 硅样品 $V_{dc} \leq \frac{1170}{\tau_F}$ 或 P 型 硅样品 $V_{dc} \leq \frac{390}{\tau_F}$ ，则满足扫出条件，即进下一步操作。

注：常数适用于扩散长度满足 3.0 mm 的 B 和 C 尺寸的样品。其他长度的样品，则应满足以下公式：

$$V_{dc} \leq \frac{2 \times 10^4 \times l_c \times l}{\mu \times \tau_F} \dots\dots\dots (A. 2)$$

l_c 指的是被光源照射的区域与负触点 (n 型硅) 或正触点 (P 型硅) 之间的距离，mm；

l 指的是被测样品的长度，mm；

μ 指得是少数载流子的迁移率， $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ；

τ_F 指的是灯丝寿命， μs ；

A. 8. 10. 3 若不满足扫出条件，则通过减小流过样品的电流来减小 V_{dc} 。

A. 8. 10. 4 由于改变了衰减曲线的形状，因此也改变了 τ_F 的值，所以重复 A. 8. 8 到 A. 8. 10. 3 步骤，直到 τ_F 的值是常数并且满足扫出条件。

注：如果样品被照射分布相对于中心是不对称的（例：被照射区域的一端位于样品的中心），当通过样品的电流极性反转时， τ_F 测试值变化不超过 5%，则满足扫出条件。

A. 8. 11 确定小注入条件

A. 8. 11. 1 在满足扫出条件并电流值相同的情况下，打开光源，测量光电导电压的饱和值 ΔV_0 。

A. 8. 11. 2 当n型 硅样品 $\frac{\Delta V_0}{V_{dc}} \leq 1.6 \times 10^{-4}$ 或P型 硅样品 $\frac{\Delta V_0}{V_{dc}} \leq 4.8 \times 10^{-4}$ ，则满足小注入条件，即进行下一步操作。

注：常数适用于扩散长度满足3.0 mm的B和C尺寸的样品。其他长度的样品，则应满足以下公式：

$$\frac{\Delta V_0}{V_{dc}} \leq 10^{-3} \left[1 + \frac{\mu_{min}}{\mu_{max}} \right] \cdot \left(\frac{L_l}{L} \right) \dots\dots\dots (A. 3)$$

ΔV_0 是指光导电压V的峰值或者饱和值；

V_{dc} 是指直流电压V。

μ_{min} 是指少数载流子的迁移率， $cm^2/V \cdot s$ ；

μ_{maj} 是指多数载流子的迁移率， $cm^2/V \cdot s$ ；

l 是指样品长度，mm；

A. 8. 11. 3 若不满足小注入条件，则减少光照强度。重复A.8.9到A.8.11.2操作直到满足小注入条件。

注：当必须减少光照强度时，建议使用信号调节器，以提高信噪比。

A. 8. 12 当能既能满足小注入条件又能满足扫出条件时，调整示波器的时间基准扫描速度，以便在屏幕上看到脉冲光的末端。

注：此过程需要的时间基准扫描速度大约是第一个灯丝寿命 τ_F 值的5-10倍。

A. 8. 13 在 $0.9 \Delta V_0$ 和 $0.1 \Delta V_0$ 之间等距测试衰减曲线上至少5个点的的振幅和相关衰减时间。

A. 8. 14 将样品旋转 90° ，并达到 $27^\circ C \pm 1^\circ C$ 温度平衡；

A. 8. 15 重新更换位置，在相同条件下，再次在 $0.9 \Delta V_0$ 和 $0.1 \Delta V_0$ 之间等距间隔测试衰减曲线上至少五个点的的振幅和相关衰减时间。

A. 8. 16 收集样品的每个位置记录的点，在半对数曲线图上绘制对应时间的振幅（ $\log \Delta V = f(t)$ ）。

A. 8. 17 若测试结果出现线性衰减，继续到下一步；否则停止测试，此样品不适合少数载流子寿命的测试。

A. 8. 18 若得到线性衰减，则根据在横坐标上读取的 ΔV_0 与 $0.37 \Delta V_0$ 对应值之间的时间差，确定从斜率开始的每个样品位置的灯丝寿命 τ_{F0} 。

A. 8. 19 求两个 τ_{F0} 值得的平均值。

A. 9 计算

A. 9. 1 计算小注入条件下体少数载流子寿命， τ_0

$$\tau_0 = \frac{1}{\tau_F^{-1} - R_s} \dots\dots\dots (A. 4)$$

式中： R_s 表示表面复合率，不同类型的样品表面复合率不同；

τ_F 表示灯丝寿命；

A. 9.2 考虑到表面复合作用，对灯丝寿命应作修正：

$$\text{对长方形样品: } \frac{1}{\tau_B} = \frac{1}{\tau_F} - \pi^2 \left(\frac{1}{L^2} + \frac{1}{W^2} + \frac{1}{T^2} \right) \dots\dots\dots (A. 5)$$

$$\text{对圆柱形样品: } \frac{1}{\tau_B} = \frac{1}{\tau_F} - \pi^2 D \left(\frac{1}{L^2} + \frac{9}{4\phi^2} \right) \dots\dots\dots (A. 6)$$

式中： τ_B —体寿命， μs ；

τ_F —灯丝寿命， μs ；

D —少数载流子扩散系数，电子扩散系数 $D_n=36 \text{ cm}^2/s$ ，空穴扩散系数 $D_p=13 \text{ cm}^2/s$ ；

L 、 W 、 T 、 ϕ —分别为样品长、宽、厚、直径， cm 。

A. 10 实验报告

试验报告应包括以下内容：

- a) 样品编号；
- b) 样品尺寸；
- c) 样品导电类型和电阻率；
- d) 样品上测试点及其光照区域的长、宽；
- e) 光源种类；
- f) 直流电压降 V_{dc} ，电压幅度峰值或饱和值；
- l) 灯丝寿命 τ_F 测试值；
- m) 计算的体少数载流子寿命 τ_b 。
- n) 本标准编号；
- o) 测试人员和日期
- p) 是否使用信号调节装置。