

ICS 29.045
H 80



中华人民共和国国家标准

GB/T 1553-200×
代替GB/T 1553-1997

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 germanium and silicon
by measurement of photoconduetivity decay

(报批稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局

中国国家标准化管理委员会

发布

前 言

本标准代替GB/T 1553-1997《硅和锗体内少数载流子寿命测定光电导衰减法》。

本标准与原标准相比，主要有如下变化：

本标准由中国有色金属工业协会提出。

本标准由全国半导体设备和材料标准化技术委员会材料分技术委员会归口。

本标准起草单位：

本标准主要起草人：。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为：

——GB/T 1553-1997；

——GB 1553-1979、GB 5257-1985。

本标准按照 GB/T 1.1—2009给出的规则起草。

本标准代替GB/T 1553-2009《硅和锗体内少数载流子寿命测定光电导衰减法》。本标准与GB/T 1553-2009相比，除编辑性修改外主要技术变化如下：

- 在原标准“4 干扰因素”基础上增加了“4.10 电阻率的影响”和“4.11 试样应具有特殊条形尺寸和研磨表面”两节。
- 在原标准“7 样品制备”基础上增加了“7.12 测量环境”一节。
- 将原标准中规范性附录的“硅单晶少数载流子寿命测定高频光电导衰减法”修改为正式标准。将原标准中的“光电导衰减法”改为“直流光电导衰减法”，修改为方法一；附录中的“高频光电导衰减法”修改为方法二。
- 硅行业现已发行标样，用标样标准值统一寿命测试简便易行。
- 高频光电导法测试电路中不再使用电阻取样，采用灵敏度更高的电流互感器（磁环）取样。
- 高频光电导法中确定了用铟做电极材料，并用自来水作耦合剂。
- 除保留用对标准曲线的方法测量寿命，增加了用计算机软件测量寿命的方法。
- 在方法二附录中增加了注入比的计算公式以及寿命与注入比的关系式。明确规定了要在相同的注入比下比较寿命值；
- 因近10年来出现了新的先进的光源及测试仪器，在原标准中未能采用，例如波长1.06μm的固体激光器。脉冲功率可达数十至数百瓦。由于波长正处于国际标准规定的1.0-1.1μm范围内，因此无需再加滤光片及矩形窗孔膜片，光源可以做得体积小，结构简单，同时新的发光器件闪光频率高，余辉短，寿命测量范围更广。
- 测试设备方面，出现了采样频率达到30MHz的高速数据采集卡以及工控机，对光电导指数衰减信号可以高速采集与工控机中安装的专用软件相结合，在显示屏界面上可以迅速看到测试结果，并可大量存储数据，与网络联接，便于未来实现万物互联。对操作人员来说免去了示波器的繁琐操作。在新标准中将推出这些新的设备和技术。

硅和锗体内少数载流子寿命测定 光电导衰减法

1 范围

本文件规定了硅和锗单晶体内少数载流子寿命的测量方法。

本文件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量。本文件包含了直流光电导和高频光电导两种方法。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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	硅单晶电阻率的直排四探针和直流两探针法
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规定的以及下列术语适用于本标准。

3.1

表观寿命 filament lifetime

光电导衰减到初始值的 $1/e$ 时的时间常数 τ_F (μs)。

3.2

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，它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。又称少数载流子寿命，体寿命。

3.3

体寿命 Bulk recombination lifetime

晶体中非平衡载流子由产生到复合存在的平均时间间隔，它等于非平衡载流子浓度衰减到起始值的 $1/e$ ($e=2.718$) 所需的时间，又称少数载流子寿命。

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过剩的少数载流子浓度与多数载流子的平衡浓度之比。

4 干扰因素

4.1 陷阱效应影响

室温下的硅和低温下的锗，载流子陷阱会对载流子寿命产生影响。如果试样中存在电子或空穴陷阱，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量将错误的导致少数载流子寿命值增大。

4.1.1 沿衰减曲线进一步延伸，由衰减曲线高端至低端进行测量，若时间常数增加，可判定存在陷阱效应，消除方法见 8.9。

4.1.2 当试样中陷阱效应超过衰减曲线总幅度的 5%，就不能用本方法测量少数载流子寿命。

4.2 表面复合影响

4.2.1 表面复合会影响寿命测量，特别是使用小块试样时。表1给出了直流光电导方法推荐试样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，当试样表面积与体积之比很大时，更有必要进行修正。

表1 直流光电导方法推荐试样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

4.2.2 若对表面复合修正太大，会严重降低测量的准确性。建议对测量值的修正不要超过测量值倒数的 1/2 (即表观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 9 章公式(8))。

标准条形试样所测定的最大体寿命值列于表 2。

4.3 注入量的影响

测量时试样电导率调幅必须很小，这样试样上电势差的衰减才等价于光生载流子的衰减。当试样上最大直流电压调幅 $\Delta V_0/V_{dc}$ 超过0.01时，允许进行修正。

4.4 光生伏特效应影响

试样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。在没有电流通过时就呈现光电压的试样不适宜用本方法测量。测量时避免光照。

4.5 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量。或用单色激光作光源。

4.6 电场影响

如果少数载流子被电流产生的电场扫出试样的一端，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试样端面，使测试中扫出效应不显著。

4.7 温度影响

半导体中杂质的复合特性受温度的强烈影响，控制测量时的温度就相当重要。在相同温度下进行的测量才可以做比较。

4.8 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，当试样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，测量不能得出单一寿命值。

4.9 滤光片的影响

滤光片本身有信号，它和试样信号叠加产生测试误差。因此应选择厚度1mm、与被测试样材料相同、信号较弱（低寿命值）的滤光片。

4.10 试样尺寸及表面的影响

直流光电导方法要求试样具有特殊的尺寸和研磨的表面，见表2。

表2 样品尺寸

单位为厘米

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

5 方法一：直流光电导的方法原理及测试范围

5.1 方法原理

在两端面为研磨表面并具有欧姆接触的单一导电类型的半导体单晶试样上通一直流电流，用示波器观察试样上的电压降。对试样施一脉冲光，在试样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。当试样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，用公式（1）表示。必要时，应消除陷阱效应和对表面复合及过量电导率调幅进行修正。

$$\Delta V = \Delta V_0 \exp(-t/\tau_F) \dots\dots\dots (1)$$

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 ——表观寿命，单位为微秒（ μs ）。

5.2 本标准可测的最低寿命值为10 μs ，取决于光源的余辉，而可测的最高寿命值主要取决于试样的尺寸，见表3。

表3 直流光电导对锗、硅样品的最高测量寿命值

单位为微秒

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

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

6 测量仪器

6.1 测试电路图

测试电路图见图1

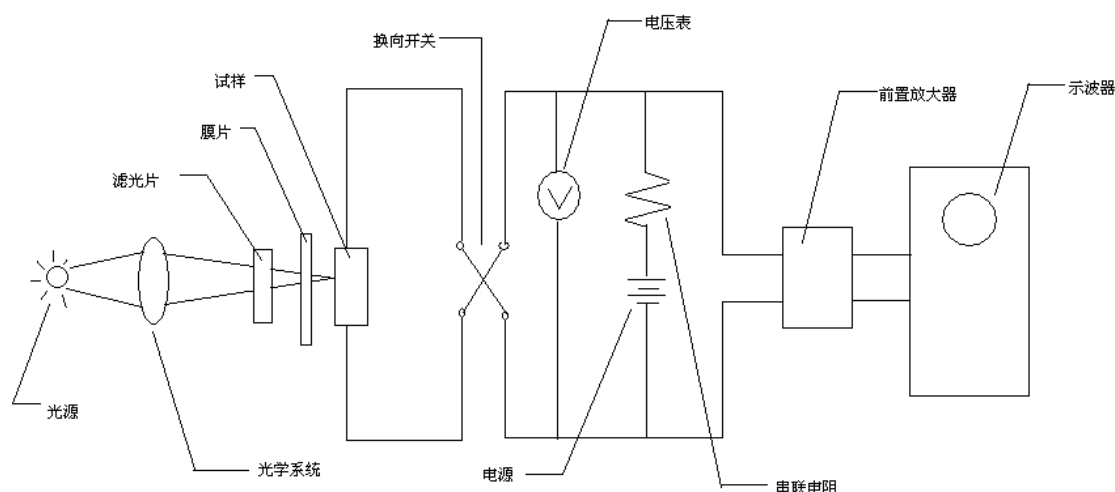


图1 直流光电导测量少数载流子寿命电路示意图

6.2 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试样寿命时间的 1/5 或更少。用于硅试样测量的光源光谱分布的最大值应在波长 $1.0 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 以内。

6.2.1 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 $2 \sim 60 \text{ Hz}$ 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 %。采用更小的电容可获得更短的脉冲宽度, 适合测量寿命低于 $5 \mu\text{s}$ 的试样。

6.2.2 单色光源, 硅单晶选用波长为 $1.0 \sim 1.1 \mu\text{m}$, 锗单晶选用波长为 $1.5 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 的红外发光二极管或激光器。余辉小于 $0.5 \mu\text{s}$, 可提供的频率为 $30 \text{ Hz} \sim 50 \text{ Hz}$ 。使用此类发光器件时, 无需在光源前增加滤光片及矩形窗孔膜片。

6.3 电源

电源应稳定并经过良好滤波, 应在试样上产生不低于 5 V 的直流电压。电路中串联电阻 R_s 值至少是试样电阻 R_t 及接触电阻 R_c 之和的 20 倍, 电路中还应具有对试样电流换向及切断电流的开关装置。

6.4 试样夹具及恒温器

隔热试样夹具及恒温器应使试样处于规定温度 $27 \pm 1^\circ\text{C}$, 夹具与试样的整个端面应保持欧姆接触, 并至少应使试样四个侧面中的一个侧面处于光照下。

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

6.5 滤光片

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

6.6 矩形窗孔膜片

放置于靠近试样的光照表面, 光透过矩形窗孔膜片, 只能照射到试样的部分区域。光照区域的长度 $L_i = L/2$, 宽度 $W_i = W/2$; 光照部位都在试样中央位置。

6.7 电信号测量线路

6.7.1 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 。

6.7.2 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 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 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 (2) 表示:

$y=6\exp (-x/2.5)$ (2)

式中：x和y都是以刻度盘的刻度划分。

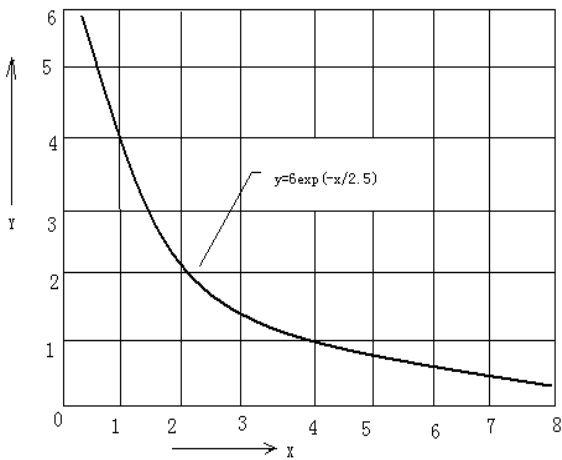


图2 示波器面板上的指数曲线

6.7.3 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/S，输入范围 ±5V,精度 DC±1LSB；计算机。

6.7.4 对电路总体要求：

6.7.4.1 校正垂直扫描灵敏度至少 0.1mV/cm 或更低；

6.7.4.2 校正垂直增益和扫描线性度在 3%以内；

6.7.4.3 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表观寿命值的 1/5；

6.7.4.4 脉冲没有明显的变坏现象，如过冲或阻尼效应。

7 样品制备

7.1 试剂和材料

7.1.1 去离子水

温度为25℃时电阻率大于2MΩ·cm的去离子水。

7.1.2 研磨材料

氧化铝粉，粒径为5μm～12μm。

7.2 取样

从晶体上指定区域切取试样，长度为 L，厚度为 T，宽度为 W，如表 1 所示。记录所有尺寸，精确到 0.1mm。较低寿命值的材料测量宜使用较小尺寸的试样。直拉法制备的硅单晶测量常用类型 B，区熔法制备的硅单晶测量建议采用类型 C，见表 4。

表4 直流光电导试样尺寸及测量类型 单位为毫米

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

7.3 研磨

测量前，用氧化铝粉研磨试样，使试样六个表面成为平滑磨面。

7.4 清洗

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

7.5 欧姆接触材料

在试样端面应形成欧姆接触，可使用镍、铈或金电镀浴，要避免铜沾污。对硅试样，可用一小滴镓滴在金刚砂布上，并使用加热盘将试样加热至35℃。亦可用电阻率小于 $0.01 \Omega \cdot \text{cm}$ 的银粉导电橡胶做紧压欧姆接触。

7.6 研磨设备

能把试样的所有表面加工成光滑、平整的表面。

7.7 清洗和干燥设备

可用水冲洗或超声清洗。干燥设备提供干燥氮气吹干试样。

7.8 试样尺寸测量工具

精度为0.01mm的千分尺或游标卡尺。

7.9 欧姆接触

在试样的两个整个端面上制作欧姆接触。推荐在锗试样的断面镀镍、铈或金，镀膜过程中应避免铜沾污；对硅试样最好办法是把试样加热到35℃，同时研磨端面，防止滴在金刚砂布上的镓形成镓污点。也可在n型硅试样端面镀镍，在p型硅试样端面镀铈。

7.10 测试接触点

将试样置于夹具中，以一个方向接通电流，在试样上形成2~5V的电压，记录该电压降 V_1 。改变电流方向，记录试样上电压降 V_2 。如果 V_1 与 V_2 的差小于5%，则试样具有欧姆接触。

7.11 测量和记录

按GB/T 1551或GB/T 26074测量和记录并修正样品电阻率。如果试样导电类型时未知的，可按GB/T 1550测定。

7.12 测量环境

测量仪器电磁屏蔽充分，测试温度 $24 \pm 1^\circ\text{C}$ ，相对湿度不超过60%，大气压为860hpa-1060hpa。

8 测量步骤

8.1 用试样夹具夹紧试样，定位于膜片的矩形窗孔处，使试样的中央处于光照下。测量并记录试样夹具的温度，取值 $\pm 1^\circ\text{C}$ 。

8.2 开启光源，将前置放大器与示波器接通。

8.3 接通电源，调整电流，在试样上产生2V~5V电压。

8.4 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6.7.2），方法如下：

8.4.1 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。

8.4.2 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，直到观察到的曲线与标准指数曲线尽可能吻合，脉冲峰值 ΔV_0 与标准曲线左边上方点一致。

8.5 测试试样是否存在光生伏特效应：关断电流，保留光照，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，则试样中存在光生伏特效应，该试样不适合用本方法测量。

8.6 若未观察到上述光电压信号且衰减曲线呈指数曲线，则可由（3）式确定表观寿命 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（ $\mu\text{s}/\text{cm}$ ）。

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

$$\tau_F = 1.44MS_2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

当不具备屏幕标准曲线 (见 6.7.2.1) 时,也可用该步骤。

8.8 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,表观寿命可由曲线低端的几对点确定。

8.8.1 当试样的一半或少于一半的宽度已受光照,表观寿命从信号衰减到其峰值的 60% 以后的曲线部分来测定;

8.8.2 当试样的一半以上的宽度已受光照,表观寿命从信号衰减到其峰值的 25% 以后的曲线部分来测定;

8.8.3 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,测量曲线上幅度比为 2:1 的任意两点间水平距离 M (cm),由 (5) 式计算表观寿命:

$$\tau_{F1} = 1.44MS_2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

重复上述过程两遍以上,得到 τ_{F2} 、 τ_{F3} 等;

8.8.4 确定和记录平均表观寿命 τ_F ,即 τ_{Fi} 的平均值。若 τ_{Fi} 之间差值超过 10%,则该试样不适合用本方法测量。

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,在宽范围内取得的平均值产生的误差可能很大。

8.9 试样是否存在陷阱效应由表观寿命值的变化来确定。诸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量时反而增加,则存在陷阱。把试样加热到 50~70°C 或用一稳定的本底光照射试样,可消除陷阱效应。若陷阱的影响超过曲线总幅度的 5%,则该试样不适用于用本方法测量。

8.10 检查是否满足扫出条件

8.10.1 关断光源,测量试样上直流电压 V_{dc} ;

8.10.2 计算 V_{dc} 与 τ_F 的积,若乘积不大于表 4 给出的对应常数,则满足扫出条件,即扫出效应不显著,进行 8.11 操作;

8.10.3 表 5 给出的常数,仅用于推荐长度的试样,其他长度的试样,其条件由 (6) 式给出:

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

式中:

L ——试样长度,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 ——表观寿命,单位为微秒 (μs)。

8.10.4 若不满足扫出条件,可降低试样电流来减小 V_{dc} 。这将会改变曲线形状, τ_F 值也将发生变化;

8.10.5 重复从 8.4~8.10.4 的操作,直至 τ_F 值是一个常数且满足扫出条件。

表 5 锗、硅试样的迁移率

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
------	-----	----	----

8.11 检查是否满足小注入条件。

8.11.1 用满足扫出条件相同的电流值，开启光源，测量脉冲峰值， ΔV 。

8.11.2 若 $\Delta V_0 / V_{dc} \leq 0.01$ ，则满足小注入条件，进行“计算”。

8.11.3 若 $\Delta V_0 / V_{dc} > 0.01$ ，则按 (7) 式修正表观寿命：

$$\tau_F = \tau_{Fmeas} [1 - (V_0 / V_{dc})] \dots\dots\dots (7)$$

式中：

τ_{Fmeas} ——8.6中测量或8.7中计算的表观寿命值；

τ_F ——表观寿命修正值。

9 计算

9.1 小注入条件下的体少数载流子寿命由 (8) 式计算。

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

式中：

τ_b ——体少数载流子寿命，单位为微秒 (μs)；

τ_F ——表观寿命，单位为微秒 (μs)；

R_{SF} ——表面复合率；标准样品的 R_{SF} 由表1给出，单位为微秒⁻¹ (μs^{-1})。

注：注意4.2.1中的复合及表3规定的可测最大体寿命。

9.2 对长度为 L，宽为 W，厚为 T 的长条形试样， R_{SF} 由 (9) 式求得：

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

9.3 对长度为 L，半径为 r 的圆柱样品， R_{SF} 由 (10) 式求得

$$R_{SF} = \pi^2 D [L^{-2} + (9/16r^2)] \dots\dots\dots (10)$$

式中：

D——少数载流子扩散系数，单位为平方厘米每秒 (cm^2/s)。

10 报告

试验报告应包括如下内容

- 试样编号；
- 试样尺寸；
- 试样导电类型和电阻率；
- 试样上测量点及其光照区域的长 (L_i)、宽 (W_i)；
- 光源种类；
- 直流电压降 V_{dc} ，电压幅度峰值或饱和值；
- 是否使用了幅度修正；
- 表观寿命 τ_F 测量值；
- 计算的体少数载流子寿命 τ_b 。
- 本标准编号；
- 测试人员和日期

11 精密度

本标准测量硅单晶体少数载流子寿命单个实验室测量精密度为 $\pm 10\%$ (R2S%)，测量锗单晶体少数载流子寿命单个实验室测量精密度为 $\pm 20\%$ (R2S%)。

12 方法二 高频光电导衰减法

12.1 方法原理及测试范围

本方法以直流光电导率减法原理为基础，用高频电场代替直流电场，以阻容耦合代替欧姆接触，以检测试样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，通过试样与取样器，在取样器两端产生高频电压。试样受光照时，产生附加光电导，流过试样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。

12.2 本标准适用于硅单晶锭、块的少数载流子寿命测量。

13 测量仪器

测量系统装置图见图3

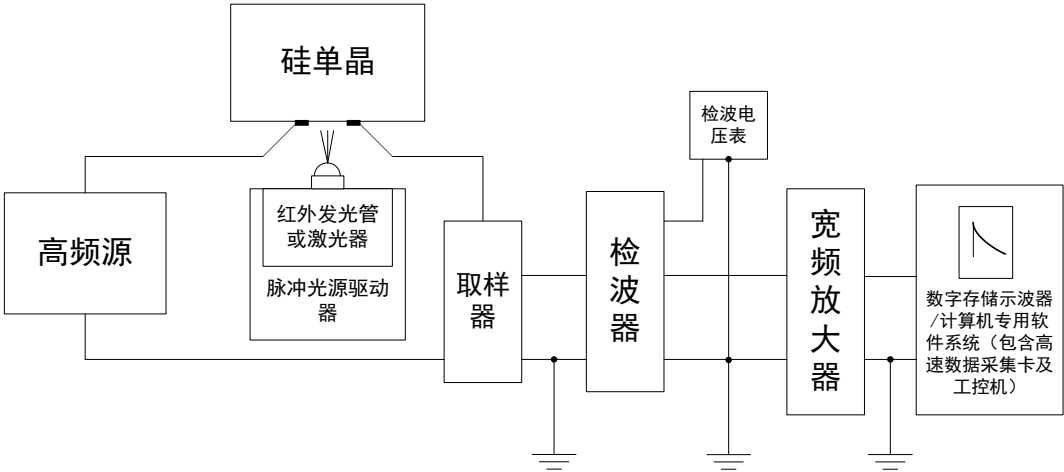


图3 高频光电导衰减法少数载流子寿命测量电路示意图

注：取样器为电流互感器（磁环取样器）

13.1 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。

13.2 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10Ω.cm的硅单晶片制成，厚度不小于1mm，表面抛光至镜面。使用波长为1.06 μm的红外发光二极管或激光器时，无需使用上述光学系统。

13.3 高频电源

频率30MHz，频率精度不低于10⁻⁴。

低输出阻抗，小于10 Ω；当负载小于100 Ω时，输出功率不低于1W。

13.4 检波器

保证信号不畸变，频率响应2Hz~2MHz。

13.5 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。

13.6 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DC、AC，当寿命值大于500 μ s时需用DC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 30MHz/S，输入范围 $\pm 5V$ ，精度 DC $\pm 1LSB$ ；计算机。

14 样品制备

14.1 试样形状：整根单晶棒，圆柱状或具有平面的单晶锭亦可。

14.2 试样处理：研磨或喷砂去除氧化层，表面清洁，不得有油污。

14.3 接触材料：样品与焊接有钨或钨钼合金的电极接触，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。

15 测量步骤

15.1 测量环境

15.1.1 温度 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ，相对湿度不大于65%。

15.1.2 测量房间应有电磁屏蔽，工作电源应有滤波装置。

15.2 测试条件

15.2.1 可以通过调节光源电压使光电导电压下降来保证小注入条件，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。

15.2.2 试样的光生伏特效应小于光电导信号的5%。

15.2.3 测量时，试样应避免环境光照的影响。

15.2.4 信噪比应小于10%，测量信号上下波动小于5%。

15.3 测量步骤

15.3.1 调节光强及示波器有关旋钮，在满足测量条件下，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 $y = y_0 e^{-x/L}$ 相重合，读出X轴上长度L所对应的时间值，即为表观寿命 τ_F （见图4）。

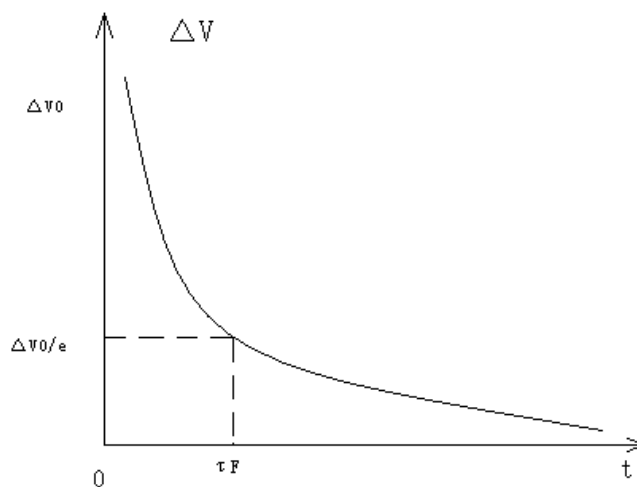


图4 $\Delta V - \tau_F$ 曲线

15.3.2 若光电导信号 ΔV 部分偏离指数曲线，则应作如下处理。

15.3.3 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量，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量（见图5）。

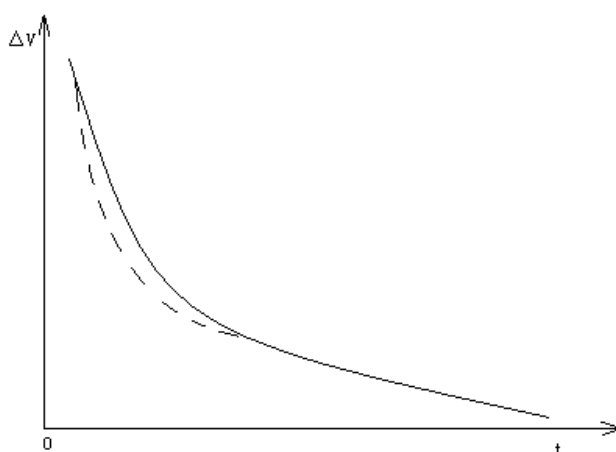


图5 表面复合

15.3.4 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量。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）。

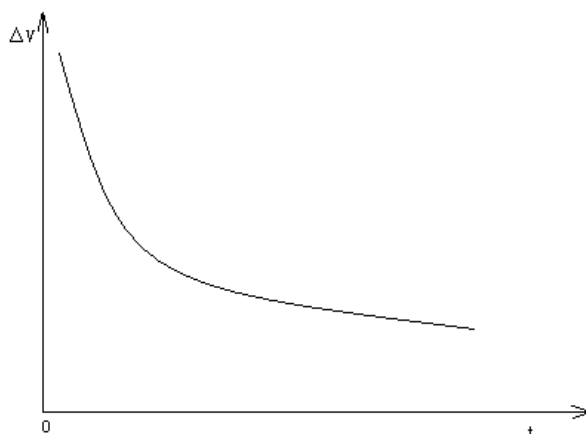


图6 陷阱效应

15.3.5 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量（见图7）。

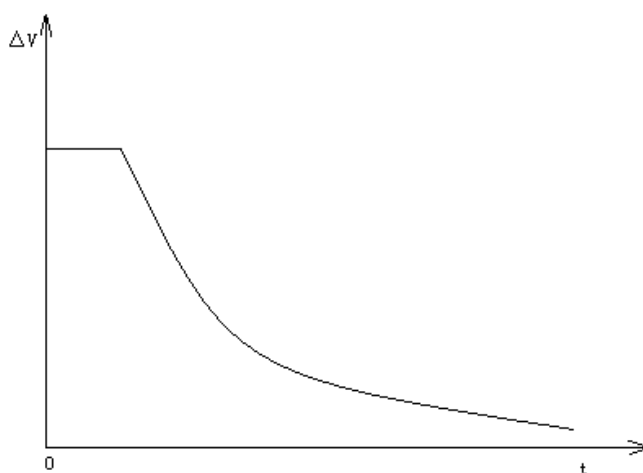
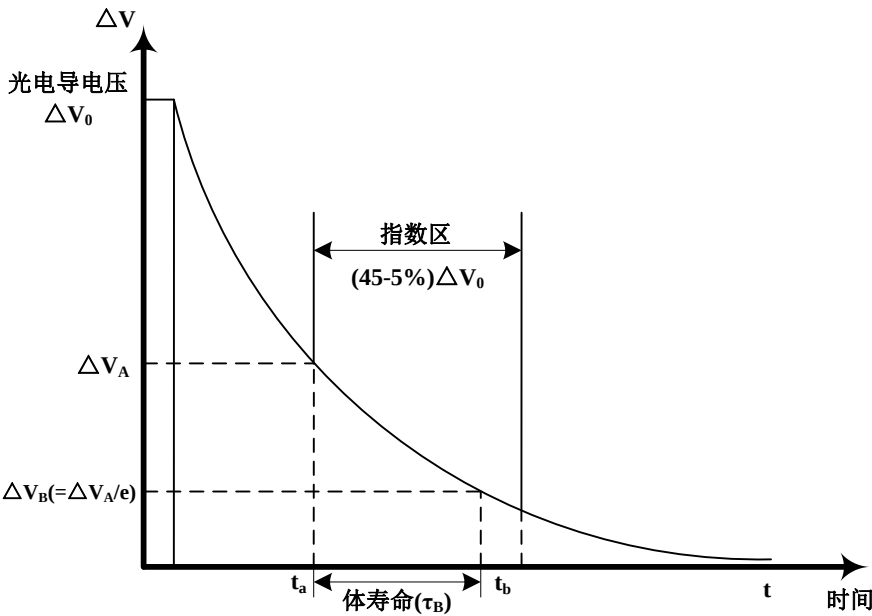


图7 信号限幅

15.4快速测量方法：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。



16 计算

16.1 注入水平的计算公式为：

$$\eta = \frac{\Delta V_0}{V_{dc}} = \frac{\Delta V}{A \times V_{dc}} \dots\dots\dots (11)$$

$$\Delta V_0 = \Delta V / A \dots\dots\dots (12)$$

式中：ΔV₀——样品上的光电导电压
ΔV——ΔV₀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量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量相同的单晶寿命时，会得到比较接近的寿命值。

16.2 计算体寿命时，考虑到表面复合作用，对表观寿命应作修正：

对长方形试样：1/τ_B=1/τ_F-π²D(1/L²+1/W²+1/T²) (13)

对圆柱形试样：1/τ_B=1/τ_F-π²D(1/L²+9/4φ²) (14)

式中：τ_B—体寿命，μs；
τ_F—表观寿命，μs；
D—少数载流子扩散系数，电子扩散系数D_n=36cm²/s，空穴扩散系数D_p=13cm²/s；
L、W、T、φ—分别为试样长、宽、厚、直径,cm.

16.2 试样的最小尺寸与可测量最高寿命值（理论值）见表6。表3供制作试样时参考，若直接测得的表观寿命大于表中值的一半时，则尺寸必须增大。

表6

长度 cm	截面积或直径	体寿命 μs	
		n 型	p 型
1.5	0.25×0.25 cm²	240	90
2.5	0.5×0.5 cm²	950	350
2.5	1.0×1.0 cm²	3600	1300

1.5	φ0.25 cm	2100	80
2.5	φ0.5 cm	860	310
2.5	φ1.0 cm	3300	1200

17 仪器的校准

17.1 使用标准样块校准仪器是最切实可行的方法；

17.2 在有校准样块的情况下可按以下程序调试寿命仪

17.2.1 使用 1.06 μm 红外发光二极管光源

光强指示调到 3-4V 测不同电阻率批次的产品时，可适当增减光源电压（光强指示），达到校对样块的寿命值即可进行测量。

17.2.2 使用 1.06 μm 脉冲激光器光源

光强指示调到 8V 只有在产品电阻率低于 2 欧姆厘米时再启用。激光器阈值电压 ≥ 5V 才发光。

17.2.3 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）。

18 报告

试验报告应包括以下内容：

- a) 试样编号；
- b) 试样尺寸；
- c) 试样导电类型和电阻率；
- d) 表观寿命 τ_F 测量值；
- 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。

18 精密度

本标准测量硅单晶体载流子寿命单个实验室测量精密度为 ±15%（R2S%），测量锗单晶体少数载流子寿命单个实验室测量精密度为 ±20%（R2S%）。

附录：注入水平探讨

注：此资料引用 SEMI MF1535 0707 相关资料，该资料由全球硅片委员会全体信函投票程序准许出版。

R1-1 载流子复合寿命常与少数载流子寿命相联系。如果寿命是在低注入水平时测定的，这时 η （过剩光生载流子浓度与平衡多数载流子浓度之比）远小于 1，同时其它某些条件也满足（见相关资料 2 和相关资料 3），则这种联系是正确的。当 $\eta \ll 1$ 时，低注入（小信号）载流子复合寿命值与 η 的数值无关。但在本方法中，要在低注入范围内进行测量，常常是不可能或不方便的。在这种情况下测得的复合寿命是注入水平的函数。

R1-2 半导体中载流子通过缺陷中心复合的基本模型由 Hall¹⁵ 及由 Shockley 和 Read¹⁶ 各自独立推出。此模型由 Blakemore¹⁷ 进行了详尽的讨论。在 Shockley-Read-Hall (S-R-H) 模型中，假定：（1）半导体的掺杂水平不太高，没有使半导体产生简并；（2）缺陷中心浓度与多数载流子浓度相比很小。

R1-3 读者应参阅 Blakemore 的文章以获得比本文更完全的论述，包括 S-R-H 载流子寿命表达式（公式 R1-1）的推导及费米能级对小信号复合寿命影响的讨论。此外，Blakemore 还讨论了当缺陷中心浓度与多数载流子浓度相比不很小¹⁸ 及存在载流子陷阱¹⁹ 的情况引起的复杂性。

R1-4 对于本方法要测量的样品，构成 S-R-H 模型基础的两个假定通常是合适的。在这两个假定下，过剩电子的浓度 (n_e) 与过剩空穴的浓度 (n_p) 相等，并且通过位于禁带中能级为 ε_T 的缺陷中心复合的电子寿命 (τ_n) 与空穴寿命 (τ_p) 相等。以 μs 为单位的载流子寿命 τ 可表示如下：

$$\tau = \tau_n = \tau_p = \frac{\tau_{n0}(p_0 + p_1 + n_e) + \tau_{p0}(n_0 + n_1 + n_e)}{(n_0 + p_0 + n_e)} \quad (R1-1)$$

其中：

- τ_{n0} = 空中心俘获电子的时间常数，以 μs 表示，
- τ_{p0} = 满中心俘获空穴的时间常数，以 μs 表示，
- n_0 = 非简并半导体中平衡电子浓度，以电子/ cm^3 表示，
- p_0 = 非简并半导体中平衡空穴浓度，以空穴/ cm^3 表示，
- n_1 = 当费米能级 $\varepsilon_F = \varepsilon_T$ 时非简并半导体中电子的浓度，以电子/ cm^3 表示，
- p_1 = 当费米能级 $\varepsilon_F = \varepsilon_T$ 时非简并半导体中空穴的浓度，以空穴/ cm^3 表示。

R1-5 在低注入范围内， n_e 可以忽略，公式 R1-1 简化为小信号复合寿命 τ_0 ：

$$\tau_0 = \tau_{n0} \frac{(p_0 + p_1)}{(p_0 + n_0)} + \tau_{p0} \frac{(n_0 + n_1)}{(n_0 + p_0)} \quad (R1-2)$$

另一方面，在高注入范围内， n_e 是主要项，复合寿命变成：

$$\tau_{\infty} = \tau_{n0} + \tau_{p0} \quad (R1-3)$$

中等注入时，复合寿命可由 τ_0 和 τ_{∞} 联合表示：

$$\tau = \frac{(n_0 + p_0) \tau_0 + n_e \tau_{\infty}}{n_0 + p_0 + n_e} = \frac{\tau_0 + \eta \tau_{\infty}}{1 + \eta} \quad (R1-4)$$

因此，当以 $\tau(1+\eta)$ 对 η 作图时，可得一直线。这条直线的零截距为 τ_0 ，其斜率为 τ_{∞} 。此函数的直线性可用以验证 S-R-H 模型的正确性以及检查试验样品中多种缺陷中心的存在。

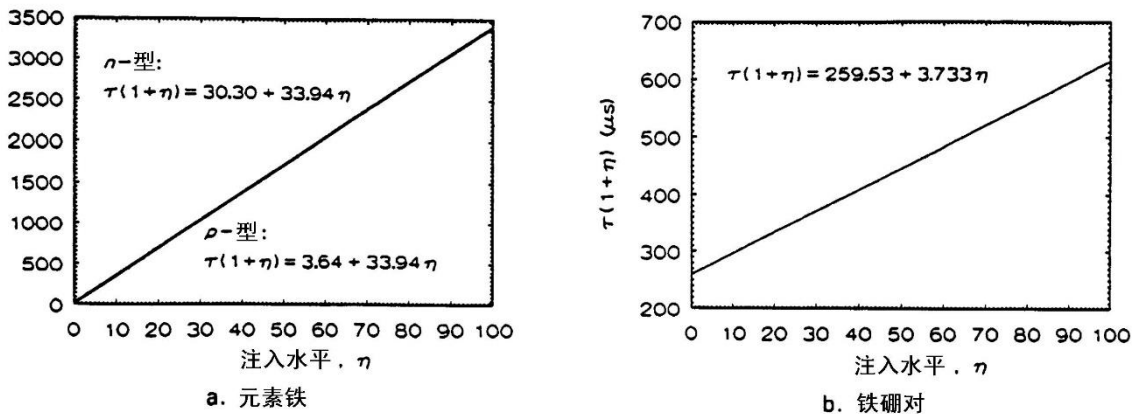


图 R1-1
从复合寿命与注入比的关系图中导出 τ_0 和 τ_∞

表 R1-1 用于计算复合寿命与注入比关系的参数

参数	元素铁 (Fe)	铁硼对 (Fe-B)
温度, K	300	300
硼浓度 (p_0), cm^{-3}	1×10^{15}	1×10^{15}
n_0 , cm^{-3}	1.16×10^5	1.16×10^5
铁浓度, 原子/ cm^3	5×10^{11}	5×10^{11}
缺陷能级, eV (价带之上)	0.400	0.100
τ_{n0} , μs	3.64	0.400
τ_{p0} , μs	30.3	3.33
n_i , cm^{-3}	1.96×10^7	179
p_i , cm^{-3}	5.91×10^{12}	6.48×10^{17}

R1-6 n 型和 p 型硅中通过元素铁缺陷中心以及 p 型硅中通过铁硼对的复合的线性情况见图 R1-1 所示。计算时所用的参数列于表 R1-1。在各种情况下都假定铁全部为缺陷态。注意，对于 p 型硅中的元素铁， $\tau_0 = \tau_{n0}$ ，对于铁硼对， $\tau_0 \gg \tau_{n0}$ ；对于 n 型硅中的元素铁， $\tau_0 = \tau_{p0}$ 。

R1-7 有文献³建议可用注入水平谱图来识别杂质能级。注入水平谱图取决于规定掺杂条件下 τ_0 和 τ_∞ 之间与作为杂质中心浓度的函数的关系。由于如下的事实，此方法对分析 p 型硅中的铁特别有用：（1）可以对样品进行处理以保证所有的铁基本上处于元素状态或结对状态²⁰，（2）对于这两种状态，其注入比关系显著不同（见图 R1-2）。

R1-8 应当指出，如果几种沾污以相近的浓度同时存在，则测出的 τ_0 与 τ_∞ 之比是各种不同沾污的结果数据的某种平均值，这是因为本方法不像深能级瞬态谱法或其它涉及空间电荷层中缺陷中心的充填和释过程的谱线技术那样针对特定杂质。

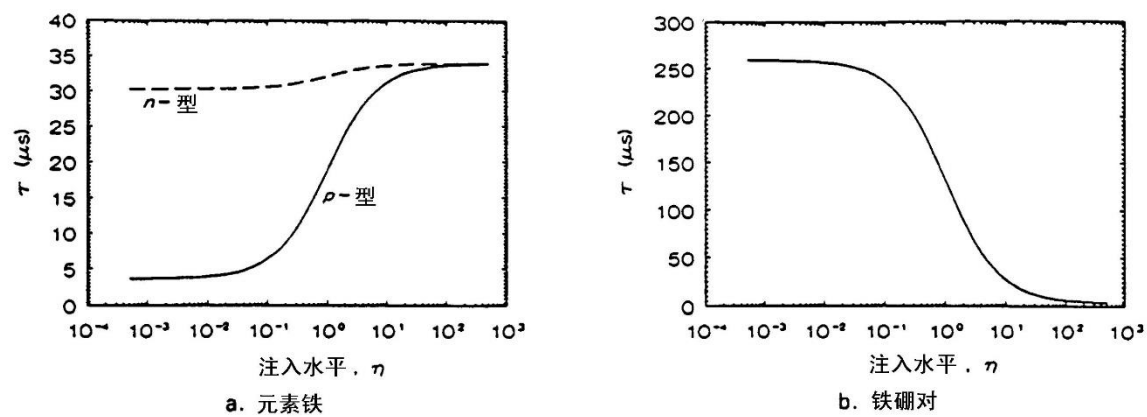


图 R1-2
复合寿命与注入比的函数关系