

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

T/

团体标准

T/XXX XXXX—XXXX

# 新型非易失性存储器基本性能测试方法

Basic performance testing methods for emerging non-volatile memory

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

发布

## 目 次

|                        |    |
|------------------------|----|
| 前言.....                | II |
| 1 范围.....              | 1  |
| 2 规范性引用文件.....         | 1  |
| 3 术语和定义.....           | 1  |
| 4 磁存储器测试.....          | 4  |
| 4.1 抗磁性测试.....         | 4  |
| 4.2 读干扰率/写错误率测试.....   | 6  |
| 4.3 数据保持时间测试.....      | 7  |
| 5 相变存储器测试.....         | 10 |
| 5.1 测试条件.....          | 10 |
| 5.2 测试原理.....          | 11 |
| 5.3 存储窗口测试.....        | 11 |
| 5.4 置位测试.....          | 12 |
| 5.5 复位测试.....          | 13 |
| 5.6 耐久测试.....          | 14 |
| 5.7 数据保持时间测试.....      | 15 |
| 6 阻变存储器测试.....         | 15 |
| 6.1 测试条件.....          | 15 |
| 6.2 测试原理.....          | 16 |
| 6.3 Forming 成功率测试..... | 16 |
| 6.4 置位/复位测试.....       | 17 |
| 6.5 耐久测试.....          | 17 |
| 6.6 数据保持时间测试.....      | 18 |

## 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。

本文件由浙江省半导体行业协会提出并归口。  
本文件起草单位：浙江大学微纳电子学院。  
本文件主要起草人：程志渊、黄平洋、刘晨曦、杨吉龙。

# 新型非易失性存储器基本性能测试方法

## 1 范围

本标准给出了磁随机存储器(Magnetic Random-Access Memory; MRAM)芯片、相变存储器(Phase Change Memory; PCM)芯片、阻变存储器(Resistive Random-Access memory; RRAM)芯片相关的测试方法的术语、测试原理、测试环境、测试设备、测试程序等。

本标准适用于磁随机存储器芯片、相变存储器芯片、阻变存储器芯片的测试,适用于实现磁随机存储芯片、相变存储器芯片、阻变存储器芯片关键性能(可靠性和电学参数等)验证。

## 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 6648——1986 半导体集成电路静态读/写存储器空白详细规范(可供认证用)
- GB/T 35003——2018 非易失性存储器耐久和数据保持试验方法
- GB/T 17574——1998 半导体器件 集成电路 第2部分:数字集成电路 3
- GB/T 17574 半导体器件 集成电路 第2部分:数字集成电路
- GB/T 33657 纳米技术 晶圆级纳米尺度相变存储单元电学操作参数测试规范

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1到3.17适用于磁存储器,3.18到3.27适用于相变存储器和阻变存储器。

### 3.1

**磁随机存储器 magnetic random-access memory; MRAM**

利用磁性层的磁矩作为信息存储的载体,利用隧穿磁阻效应作为信息读取方法,具有非易失性、近乎无限次擦写和快速写入等优点的随机存储器。

### 3.2

**磁隧道结 magnetic tunnel junction; MTJ**

磁隧道结为磁随机存储器的基本存储单元。它的核心部分是由两个铁磁金属层夹着一个隧穿势垒层形成的三明治结构。

### 3.3

### 参考层（固定层） **reference layer (pinned layer)**

磁隧道结中的一个铁磁层，它的磁化方向沿着易磁化轴方向保持不变。

#### 3.4

### 自由层 **free layer**

磁隧道结中的另一个铁磁层，其磁化有两个稳定的取向，分别与参考层的磁化方向平行或反平行。

#### 3.5

### 隧穿势垒层 **tunnel barrier**

磁隧道结中两层铁磁层中间的由金属氧化物等绝缘体材料形成的薄膜层。

#### 3.6

### 隧穿磁电阻率 **tunnel magnetoresistance ratio; TMR**

磁隧道结处于反平行状态和平行状态时的电阻差值与平行状态时的阻值的比值。隧穿磁电阻率决定磁随机存储芯片的数据读取裕度。因此隧穿磁电阻率是决定磁随机存储芯片性能的关键参数。

#### 3.7

### 磁各向异性场 **magnetic anisotropy field; H<sub>k</sub>**

当磁矩方向偏离易磁化轴方向时受到的可使磁矩恢复到易磁化轴方向的等效磁场。

#### 3.8

### 数据错误率 **failure rate; F**

不进行任何操作，经过一段时间后，磁随机存储芯片发生翻转的比特数与总比特数的比值。

#### 3.9

### 写周期 **write cycle time**

获取写使能命令的高电平写状态起始时间和低电平写状态结束时间之间的时间间隔。

#### 3.10

### 读周期 **read cycle time**

获取读使能命令的高电平为读状态的起始时间和读状态结束后低电平之间的时间间隔。

#### 3.11

### 抗磁干扰能力 **the ability of magnetic immunity**

MTJ 中自由层抵抗外部磁场干扰，防止磁矩翻转的能力。

#### 3.12

### 读干扰率 **read disturbance rate; RDR**

存储设备在进行数据读取时受到外界环境干扰，记录下当前受干扰的存储单元数量与原写入存储单元数量的比值即是读干扰率。

#### 3.13

### 写错误率 **write error rate; WER**

存储设备在进行数据写入时受到外界环境干扰,记录下当前受干扰的存储单元数量与写入存储单元数量的比值即是写错误率。

### 3.14

#### **非易失性 non-volatile**

在规定环境条件下,器件存储单元在非偏置状态下保持数据而不丢失。

### 3.15

#### **数据保持时间 data retention time**

磁随机存储芯片、相变存储器、阻变存储器芯片不进行读写的情况下,在允许错误范围内能够保持数据稳定存储的最长时间。

注:数据保持时间决定了芯片的可靠性。数据保持的定义见 GB/T35003—2018 中 3.2 的相关规定。

### 3.16

#### **热稳定性 thermal stability**

存储芯片的耐热性,存储芯片在温度影响下的稳定性,该概念主要应用在磁存储器芯片中。

### 3.17

#### **热稳定因子 thermal stability factor**

表示热波动下自由层磁化方向随机发生翻转的倾向。用能量势垒  $E$ ,操作温度  $T$  与玻尔兹曼常数  $k$  的乘积的比值来计算。热稳定因子越大,相同操作温度下存储中数据储存时间越长。该概念主要应用在磁存储器芯片中。

### 3.18

#### **置位 set**

通常施加一个宽度较宽且幅度适中的电脉冲,实现相变存储单元中的相变材料由非晶态向多晶态的转化,进而实现相变存储单元阻值降低,即置 1 操作;或使阻变存储单元中阻变材料中导电细丝形成,进而实现阻变存储单元阻值降低,即置 1 操作。使存储器件置入不表示零的规定状态的置位 (SET) 操作。

### 3.19

#### **复位 reset**

通常施加一个宽度较窄而幅度较高的电脉冲,实现相变存储单元中的相变材料由多晶态向非晶态的转化,进而实现相变存储单元阻值升高,即置 0 操作;或使阻变存储单元中阻变材料中导电细丝出现断裂,进而实现阻变存储单元阻值升高,即置 0 操作。使存储器件恢复到规定的未必一定表示零的初始状态的复位 (RESET) 操作。

### 3.20

#### **读操作 read**

指施加一个宽度适当而幅度较小的电脉冲,通过测量存储器单元的电阻值是高或低来判断其存储的数据,由于读取时不能改变存储器单元的状态,因此施加一个幅值较小的电脉冲,使其产生的热量不使

相变材料的温度上升到结晶温度以上；或使其产生的热量不使阻变材料的导电细丝状态发生变化，读取存储单元存储状态的操作。

### 3.21

#### **存储窗口 memory window**

存储器的高低阻态的阻值之比。

### 3.22

#### **置位时间 set-time**

使存储器件发生 SET 操作的最小脉冲宽度。

### 3.23

#### **置位电压 set-voltage**

使存储器件发生 SET 操作的最小脉冲幅值。

### 3.24

#### **复位时间 reset-time**

使存储器件发生 RESET 操作的最小脉冲宽度。

### 3.25

#### **复位电压 reset-voltage**

使存储器件发生 RESET 操作的最小脉冲幅值。

### 3.26

#### **耐久性 endurance**

对存储器进行反复复位置位，直到高低阻态之间的动态范围不能满足正确的数据读取所经过的复位置位循环数量。

### 3.27

#### **失效时间 failure time**

存储器单元从正常相态转换到信息失效或者丢失所经历的时间。

## 4 磁存储器测试

### 4.1 抗磁性测试

#### 4.1.1 测试原理

磁隧道结可以根据其磁各向异性的不同进行分类。磁各向异性指物质的磁性随方向变化的现象，称为易磁化轴。面内磁隧道结的易磁化轴与薄膜平面对齐，而垂直磁隧道结易磁化轴与薄膜平面垂直，一般来讲，垂直磁隧道结因其更好的可伸缩性而成为市场上的首选。然而，无论是面内磁隧道结还是垂直磁隧道结，都容易受到磁场影响而产生翻转或损害。磁场能够改变自由层的极化方向，导致存储单元

的数据错误，甚至会对器件造成物理损伤。因此，在设计磁随机存储芯片时需要考虑磁场的影响，以保证存储器的可靠性和稳定性。

#### 4.1.2 测试条件

除另有规定外，每种测试的电源电压或电流应在规定值 $\pm 1\%$ 以内。

除另有规定外，被测器件的环境温度应在规定值 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内。应规定电压测试的参考点。

除另有规定外，器件应在“推荐工作条件”范围内的一组条件下工作。

磁场发生器磁场强度偏差低于 $\pm 5\%$ 的均匀区域的间距大于等于 40mm。

使用能够产生检测指令的芯片控制设备。

为了保证测试数据准确性和验证有效性，磁随机存储芯片需与驱动设备保持连接。

在抗磁性测试验证前，主控芯片在非磁场干扰环境下对磁存储设备必须进行全字节数据写入，然后放置在磁干扰环境中进行外磁场干扰。

其中非干扰磁场环境之外的磁场大小不能大于 1 OE。

#### 4.1.3 测试方法

第一步：针对磁随机存储芯片选择高可靠性的主控设备进行驱动。该驱动装置可以是 FPGA 或 MCU 主控驱动，此主控驱动应放置在不干扰磁场环境下完成对磁随机存储芯片的读写操作。这样可以保证主控设备的稳定性，同时避免主控驱动本身特性对测试结果带来干扰。

第二步：针对磁随机存储芯片的不同存储接口进行信号调试，保证根据磁随机存储芯片的时钟频率准确完成数据的读写功能。磁随机存储芯片具有不同的封装接口（SOP、DFN 或 BGA 等），根据不同种类的封装接口选择合适的烧录器。该方式可以减少对磁随机存储芯片的非必要破坏，保证芯片完整性。

第三步：主控驱动设备通过存储接口的读/写指令驱动磁随机存储芯片来操作读/写工作。控制写操作：信号有效时，主控设备向磁随机存储芯片写入“0”/“1”；控制读操作：信号有效时，磁随机存储芯片向主控设备输出“0”/“1”。主控驱动需要对比写入数据和读出数据，确保数据全部写入及验证磁随机存储芯片基本性能。

第四步：将磁随机存储芯片放置在外磁干扰设备中。磁控设备调节外磁场强度及当前磁场方向（X、Y 和 Z 三个外磁场方向）。主控驱动设备对磁随机存储芯片进行数据确认，查看是否有被破坏的数据并记录，测试步骤如图 1 所示：



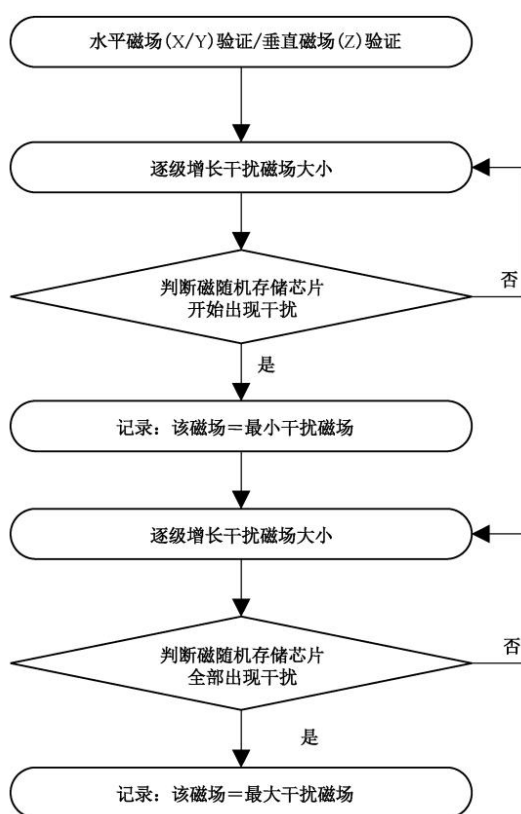


图1 磁随机存储芯片抗磁性测试方法

## 4.2 读干扰率/写错误率测试

### 4.2.1 测试原理

施加外磁场对磁随机存储芯片进行干扰并完成读写测试。磁随机存储芯片的数据写入方式有两种：磁场写入模式与全电流写入模式。前者主要通过字线与位线在磁随机存储芯片记录单元上所产生的磁场，使磁随机存储芯片的自由层在磁场的作用下实现与参考层平行与反平行方向的翻转，来完成“0”/“1”数据的写入。后者利用自旋转移矩（spin-transfer torque; STT）或自旋轨道矩（spin orbit torque; SOT）效应，通过自旋转移矩或自旋轨道矩电流使自由层磁化方向发生翻转。磁随机存储芯片在读取数据时，需要保证内部的自由层没有受到外部磁场的影响或损坏，因此外磁场对于磁随机存储芯片读干扰和写错误测试是重要测试。该测试数据对磁随机存储芯片的应用场景及系统设计具有指导作用。

### 4.2.2 测试条件

同上一项“抗磁性测试”

### 4.2.3 测试方法

首先确认磁随机存储芯片是否导通，在确认磁存储芯片导通时再进行读干扰和写错误验证。读/写测试主要分成三类，如图2所示：

第一类，在外磁场干扰的情况下，对磁存储芯片全部字节写“0”。磁随机存储芯片继续放置磁干扰

装置设备中进行外磁干扰。对磁随机存储芯片进行数据读取验证当前字节是不是全部为“0”，若存在不为“0”的情况，记录下写错误率。间隔一定时间后对磁存储芯片进行读取判断是否有不为“0”的情况，若存在不为“0”的存储单元，记录下读干扰率。

第二类，在外磁场干扰的情况下，对磁存储芯片全部字节写“1”。磁随机存储芯片继续放置磁干扰装置设备中进行外磁干扰。对磁随机存储芯片进行数据读取验证当前字节是不是全部为“1”，若存在不为“1”的情况，记录下写错误率。间隔一定时间后对磁存储芯片进行读取判断是否有不为“1”的情况，若存在不为“1”的存储单元，记录下读干扰率。

第三类，在外磁场干扰的情况下，对磁存储芯片的指定地址写入随机数值。磁随机存储芯片继续放置磁干扰装置设备中进行外磁干扰。对磁随机存储芯片进行数据读取，验证当前字节是不是为写入的随机数值，若写入数据和读取数据不一致时，记录下写错误率。间隔一定时间后对磁存储芯片进行读取判断写入数据和读取数据是否不一致，若存在存储单元数据偏差的情况，记录下读干扰率。测试步骤如下：

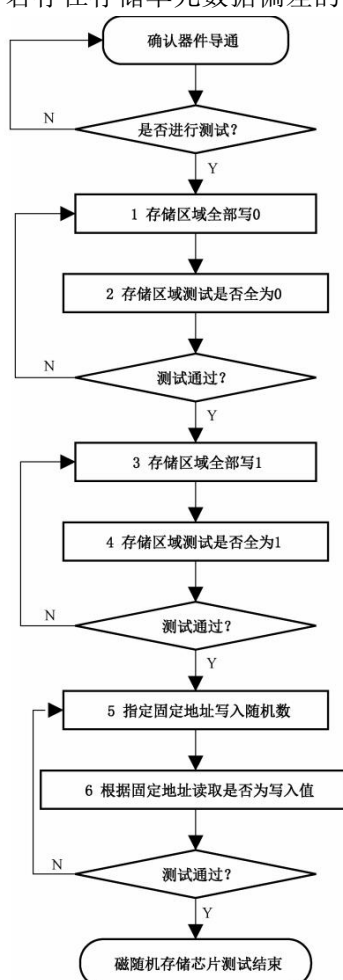


图2 磁随机存储芯片读干扰率和写错误率测试方法

### 4.3 数据保持时间测试

#### 4.3.1 测试原理

磁随机存储芯片的阻态变化与热稳定性因子 $\Delta$ 相关。不进行任何操作的情况下，经过一段时间后，

磁随机存储芯片发生翻转的比特数与总比特数的比值被称为数据错误率。在 N 比特的磁随机存储芯片中，数据错误率 F 与热稳定因子 Δ 的关系见公式 (1)：

$$F = 1 - \exp[-Nt \exp(-\Delta)/\tau_0] \dots \dots \dots (1)$$

式中：t 为所测芯片的数据保持时间； $t_0$  为固有尝试时间，一般为 1ns。

已有研究表明，热稳定性因子 Δ 与温度之间的关系是线性关系，满足  $\Delta_T = -kT + \Delta_0$ 。其中  $\Delta_T$  为温度 T 时的热稳定因子， $\Delta_0$  为 0 K 时的热稳定因子。因此本测试方法通过线性加速模型获得热稳定性因子，随后根据公式 (1) 计算得到规定数据错误率 F 下的数据保持时间。具体原理为在较高的不同温度下，经过不同时间，测试磁随机存储芯片的翻转概率，即数据错误率 F，通过公式 (1) 计算得到不同温度下的热稳定因子。对得到的热稳定因子进行线性拟合，得到较低温度下的热稳定因子，如图 3 所示，通过公式 (1) 即可计算得到规定温度和规定数据错误率下的数据保持时间。测试原理框图如图 4 所示：

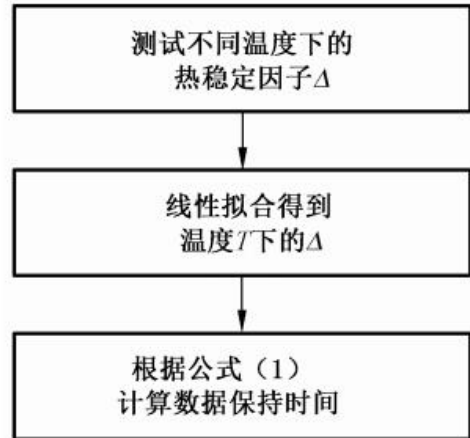
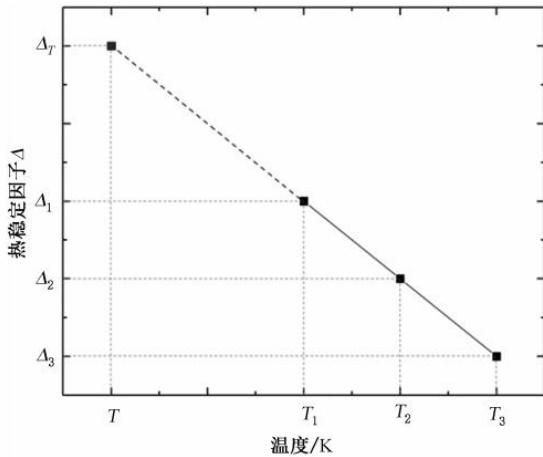


图 3 热稳定因子随温度 T 的变化示例      图 4 磁随机存储芯片的数据保持时间测试原理框架图

#### 4.3.2 测试条件

测试设备：磁随机存储芯片数据保持时间测试需要主控驱动、磁随机存储芯片和温度控制箱等设备。磁随机存储芯片放置于温度控制箱中，可以进行不同温度下的测试。主控驱动根据磁随机存储芯片的不同接口对其进行读/写驱动，通过串口等接口与 PC 端通信，最终在 PC 端显示磁随机存储芯片写入和读取的数据。如图 5 所示：

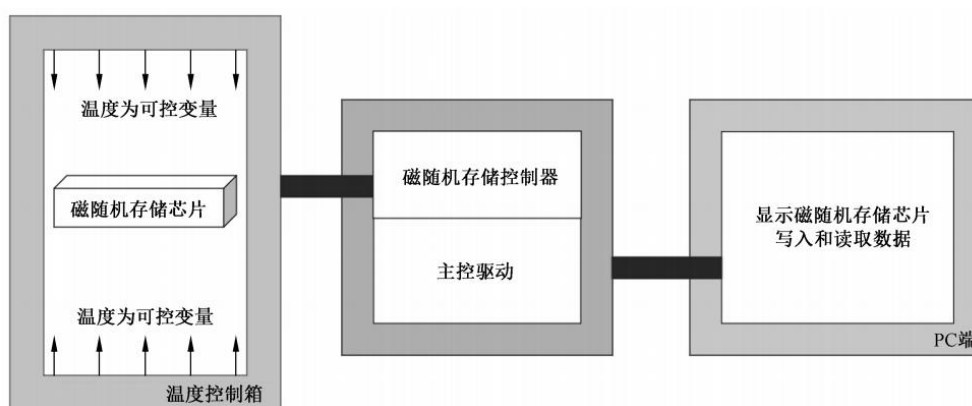


图5 磁随机存储芯片数据保持时间测试设备示意图

环境温度：除另有规定外，环境温度应在 20℃~28℃之间。

环境磁场：除另有规定外，环境磁场应小于 0.1 mT。

测试设备的准确度：除另有规定外，电源电压和偏压准确度应保持在规定值的±1%之内；输入调整电压准确度应保持在规定值的±1%或±1mV之内，取其大者；输入脉冲特性、重复率、频率等准确度应保持在±10%之内。

#### 4.3.3 测试方法

在磁随机存储芯片的数据保持时间测试时，需要测试  $m$  个芯片 ( $m$  的取值范围为  $10^0 \sim 10^5$ )，根据实际情况及要求选择测试芯片的一个阵列或者全部阵列，测试方法流程图如图 6 所示，具体测试步骤如下。

(1) 将磁随机存储芯片置于温度为  $T_1$  的高温环境中。

(2) 对磁随机存储芯片进行初始化。采用芯片额定工作电压进行数据写入，将磁随机存储芯片的全部比特写为“0”。

(3) 经过时长  $\tau_1$  后，采用芯片额定工作电压读取磁随机存储芯片的状态，统计错误比特数，错误比特数与总比特数的比值即为此温度下的数据错误率  $F_1$ ，将  $\tau_1$  和  $F_1$  分别代入公式 (1) 中的  $t$  和  $F$ ，计算得到  $\Delta_1$ 。

(4) 重复 (1) ~ (3)，用逐渐递增的温度  $T_2 \sim T_n$  代替 (1) 中的温度  $T_1$ ，用时长  $\tau_2 \sim \tau_n$  代替 (3) 中的测试得到数据错误率  $F_2 \sim F_n$ ，计算得到  $\Delta_2 \sim \Delta_n$ 。

(5) 采用加速模型对  $\Delta_1 \sim \Delta_n$  进行线性拟合，得到磁随机存储芯片在某个较低温度  $T$  下的热稳定因子  $\Delta_T^{“0”}$ 。

(6) 重复 (1) ~ (5)，初始化时采用芯片额定工作电压将磁随机存储芯片的全部比特写为“1”，得到磁随机存储芯片在某个较低温度  $T$  下的热稳定因子  $\Delta_T^{“1”}$ 。

(7) 取  $\Delta_T^{“0”}$  和  $\Delta_T^{“1”}$  中的较小值，作为温度为  $T$  时的热稳定性因子  $\Delta_T$ 。

(8) 根据公式 (1)，计算规定数据错误率 (例如  $10^{-9} \sim 10^{-3}$ )、温度为  $T$  时的数据保持时间，即待测芯片的数据保持时间。

(9) 重复测试  $m$  个芯片，取  $m$  个芯片的数据保持时间平均值，即为所测芯片的数据保持时间。

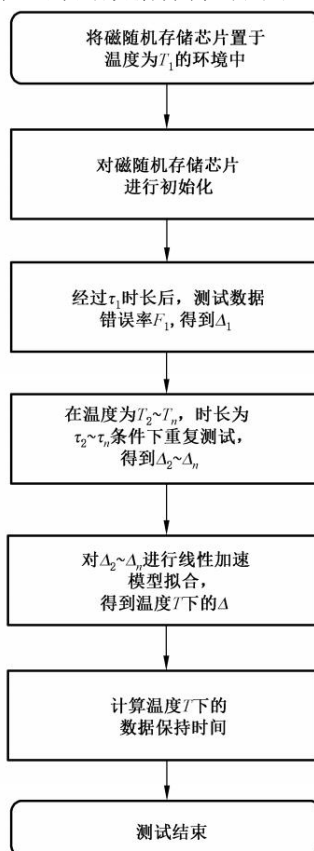


图6 磁随机存储芯片数据保持时间测试方法

## 5 相变存储器测试

### 5.1 测试条件

**源测量单元：**这是本测试系统的核心部分，其主要用途是对存储单元进行直流扫描、电阻读出及其他操作。它能够为相变存储单元提供 I-V 及脉冲相关的电特性测试。用户可通过操作界面对测试项目进行较为全面的控制和参数设定。其电压源输出范围应不小于  $\pm 10$  V，电压测量分辨率  $0.5 \mu\text{V}$ ；电流源输出范围不小于  $\pm 100$  mA，电流测量分辨率  $1$  nA，具备客制化编程功能。

**信号发生器：**须具备脉冲信号输出能力，其主要用途是对相变存储单元施加读、写、擦操作脉冲。输出电压范围在开路负载时不小于  $\pm 10$  V，输出脉冲最小宽度  $10$  ns，上升/下降沿不大于  $10$  ns，支持自定义波形输出功能。也可通过综合性的半导体特性测试仪等设备提供上述信号发生器与源测量单元的测试功能。

**探针台：**主要由样品台，探针，光学显微镜，真空泵等部分组成，主要功能是提供放置测试用样品（相变存储器单元）的平台并引入操作脉冲信号和测量信号施加到测试样品上。探针台需具备以下特点：（1）具备气垫防震系统，以降低外界因素对测量干扰，提高测试结果的准确性和可信度；（2）具备加热功能，满足变温测试需求。

示波器：数字示波器及探头技术参数需符合测试平台的要求，对相变存储器单元的动态过程进行监测。整套测试环境搭建如图 7 所示：

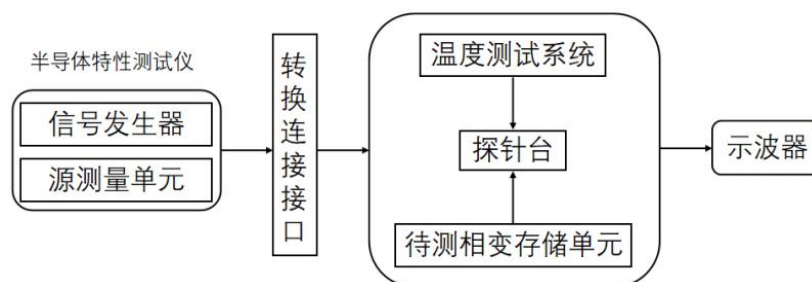


图7 相变存储单元测试系统

样品：具有两个外接引出端子的相变存储单元器件。

测试的环境温度： $25 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 。

湿度： $< 65\% \text{RH}$ 。

## 5.2 测试原理

利用源测量单元发出设定好的信号，利用探针台将信号传递给待测单元，同时采用示波器显示待测单元的输出信号，从而实现对存储单元的性能测试。

## 5.3 存储窗口测试

(1) 对选择的器件单元进行直流电流扫描，扫描范围需大于其阈值电流，使样品处于较低的阻值状态；

(2) 设置信号发生器输出连续的方波脉冲，脉冲的电压幅值从 0 V 开始以 0.2 V 步进逐渐增加，将脉冲作用于器件单元。测试记录每次施加脉冲后器件电阻的变化。对于纳米尺度相变存储器单元，建议所施加的脉冲电压幅值不超过 10 V；

(3) 根据测试数据画出电压-电阻曲线，如图 8 所示。其中，当阻值变化到较高阻值区间且不再明显变化时，视为到达高阻态区域；

(4) 对图 8 中的曲线进行分段线性拟合，选取其中低阻向高阻跳变后连续 5 个点平均值作为存储器的高阻值  $R_H$ ；类似地，在低阻态区域选取连续 5 个点平均值作为低阻值  $R_L$ ，按照以下公式 (2) 计算得到存储窗口  $W$ 。

$$W = R_H/R_L \quad (2)$$

记录如图 8 所示的测试曲线及根据公式 (2) 计算得到的相变存储器存储窗口  $W$ 。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/606200135145011003>