



# 基于统计数据的 RRAM 器件特性参数分析

柯庆, 代月花\*

安徽大学集成电路学院, 合肥 230601

\* 通信作者. E-mail: daiyuehua2013@163.com

收稿日期: 2024-03-13; 修回日期: 2024-04-30; 接受日期: 2024-06-05; 网络出版日期: 2024-08-06

国家自然科学基金 (批准号: 62274002, 61874001) 资助项目

**摘要** 本文统计了 58 款不同结构和不同材料的 RRAM 器件结构和电学特性参数, 根据参数之间的联系建立了器件特性参数的计算模型, 用统计学的百分位法计算了器件数据的差异性, 获得了 RRAM 器件参数的定量指标. 根据计算结果, 我们发现 RRAM 器件的写时间、擦时间、写能量和数据维持时间均未达到预期指标, ECM 器件低阻态时有量子力学效应, 而 VCM 器件则没有量子力学效应. RRAM 器件还需要进一步发展才能取代 Flash 技术. 就发展趋势而言, ECM 和 VCM 器件与 NOR flash 的差距最小, 最可能取代 NOR flash.

**关键词** 阻变存储器件, 参数计算模型, 百分位方法, 统计指标

## 1 引言

随着存储器技术快速发展, 传统缓存 SRAM (static random access memories) 和主存 DRAM (dynamic random access memories), 因为是电荷存储器件正在逐渐被非易失 (non-volatile) 闪存替代. 闪存有两种: 随机访问的 NOR Flash 和串行访问的 NAND Flash. 但是 Flash 技术的器件仍然是 MOS 晶体管, 只不过电荷存储在 MOS 管的浮栅上, 因此 Flash 器件仍然与 SRAM 和 DRAM 一样, 都是电荷存储器件, 电荷存储器件的某些缺点依旧存在. 例如 Flash 器件易丢失电荷, 可擦写次数有限, 写速度慢, 只能达到毫秒级别.

为了克服电荷存储器件的缺陷, 大量非电荷存储技术陆续被开发成各种新型存储器. 其中基于导电细丝机制的阻变随机存取存储器 (resistive random access memories, RRAM) 除了充当存储器件以外, 还可以应用于神经网络计算和新型逻辑电路中, 以其优秀的特性和广阔的应用前景, 成为 Flash 最有力的竞争者. 但是 RRAM 器件本身也面临着严重的挑战, 就其研究工作来说, 还存在数据维持时间不稳定、高阻态电阻不稳定、耐久性等问题. 虽然也有大量的文献报道了器件研究的进展, 但是这些文

**引用格式:** 柯庆, 代月花. 基于统计数据的 RRAM 器件特性参数分析. 中国科学: 信息科学, 2024, 54: 2021–2034, doi: 10.1360/SSI-2024-0078

Ke Q, Dai Y H. Analysis of RRAM device characteristic parameters based on statistical data (in Chinese). Sci Sin Inform, 2024, 54: 2021–2034, doi: 10.1360/SSI-2024-0078

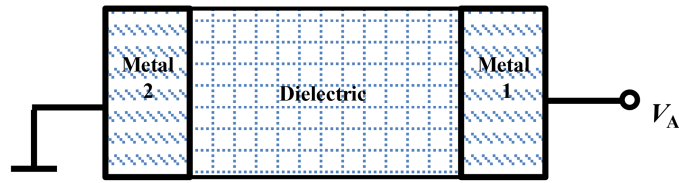


图 1 (网络版彩图) RRAM 器件示意图. 金属 1 与金属 2 是同一种金属或者不同金属

**Figure 1** (Color online) Schematic diagram of RRAM devices. Metal 1 and metal 2 are the same metals or different metals

章报道集中在某一类材料, 或者某一类结构制作的 RRAM 器件的进展, 最为重要的是这些研究进展报道来自于作者主观意识的评价, 缺乏对于数据客观评估后得到的定量指标<sup>[1,2]</sup>.

针对上述缺点, 本文收集了 2008~2022 年各种文献公开发表的 58 款各种材料和结构器件的资料, 开发了部分参数计算模型, 用统计学的方法计算了器件特性参数的特性, 得到了基于导电细丝 RRAM 器件各项特性的定量指标, 为我们客观和公正地评价 RRAM 器件的潜力与发展水平提供了帮助. 本文后继章节如下: 第 2 节介绍了收集的器件参数和来源以及参数的意义; 第 3 节讨论了参数的计算模型, 和数据处理过程, 推导了相关的计算公式, 并用统计学的百分位方法计算了这些参数的指标, 定量评价了基于导电细丝 RRAM 器件的研究进展; 第 4 节总结了本文工作.

## 2 统计数据集及说明

RRAM 器件是两块金属作为电极, 硫族化合物或者氧化物作为电极之间介质层所制作的二端器件, 如图 1 所示, 这里用金属 1/介质层/金属 2 表示其结构. RRAM 器件有两大类, 分别是基于导电细丝器件和非细丝器件, 其中非细丝器件性能低于基于导电细丝器件, 并与 CMOS 器件工艺不兼容, 还在实验室中继续完善. 基于导电细丝器件分别是化合价变价 (valence change mechanism, VCM)、热化学 (thermochemical mechanism, TCM) 和电化学金属化 (electrochemical metallization, ECM) 三类器件. 在基于细丝器件中, 外加电压或者电流时, 两个电极之间的介质层因阳极金属离子, 或者阴离子迁移, 部分区域变成低电阻区域, 器件由高阻态 (high resistance state, HRS) 转变为低阻态 (low resistance state, LRS). 低电阻率区域称之为导电细丝. 这类器件工作稳定、电学特性良好, 受到了研究者和业界的关注, 是 RRAM 器件的研究重点.

RRAM 器件有两类开关特性: 一类器件的高阻态与低阻态转换需要改变器件两端外加电压的极性, 称为双极性器件; 另一类器件的高低阻态变化无需改变外加电压极性, 称为单极性器件. ECM 与 VCM 器件是双极性器件, TCM 器件是单极性器件. TCM 器件的高、低阻态转变中无需改变外加电源极性, 一个 TCM 器件与一个二极管就可以组成一个存储单元, 很容易制成高密度集成电路, TCM 器件一度被认为是最有前途的 RRAM 器件. 但是进一步研究发现, TCM 器件在 Reset 过程中的溶解焦耳热量过大, 导致器件耐久性仅数百个循环, 器件的可靠性较差, 限制了器件的应用范围. 现在 TCM 器件在存储器领域应用的文献已经很少了<sup>[2]</sup>, 考虑到这一原因, 本文重点研究 ECM 和 VCM 器件的特性.

为了对于近年来出现的 RRAM 器件作统计分析, 本文收录了文献 [3~53] 提供的 2008~2022 年国内外公开报道的 58 款不同材料和不同结构基于细丝 RRAM 器件的特性, 数据汇集在表 1. 表 1 每一横行的数据来源于一篇参考文献的一种器件, 竖栏列出了该器件的参数值. 这些参数值是总结了一篇文献里给出的这种器件的参数值、实验列表和图像中的数据后得到的结果, 然后按照参数性质归类分

列在表 1 的 8 个竖栏中.

表 1 中各栏标题意义和内容介绍如下:

Type and filament: 器件的结构和导电细丝长度. 器件结构用电极材料 1/介质层/.../电极材料 2 表示, 例如 Ta/TaO<sub>x</sub>/TiO<sub>2</sub>/Ti, 电极材料是 Ta 和 Ti, 介质层分别是 TaO<sub>x</sub> 和 TiO<sub>2</sub>.

虽然大部分文献中列出了器件的横向截面尺寸, 但是考虑到已发表的文献主要是研究器件的物理和电学特性, 对应器件截面尺寸都较大, 与实用器件截面尺寸相差较大, 所以没有列出器件的 cell 面积的参数, 只列出了器件的纵向结构和导电细丝长度. ECM 器件的导电细丝长度是两个电极之间介质层的长度. VCM 和 TCM 器件电极之间介质层由交换层 (Scavenging layer) 和功能层组成, 交换层作为氧离子或者其他阴离子的仓库, 负责存储与释放阴离子, 功能层生长导电细丝, 所以导电细丝是 VCM 和 TCM 器件的功能介质层长度. 表中用 Vo 表示氧空位导电细丝, 金属的名称如 Cu, Ag 表示金属导电细丝的名称. 例如  $L_{\text{ZnO}}(\text{Vo}) = 20 \text{ nm}$  表示 ZnO 介质层中形成了氧空位导电细丝, 长度是 20 nm.

MW/ $R_{\text{LRS}}$ : 包含 MW 和  $R_{\text{LRS}}$  两项内容. MW 是高阻态电阻  $R_{\text{HRS}}$  与低阻态电阻  $R_{\text{LRS}}$  的比值, 称为存储器窗口 (memory window);  $R_{\text{LRS}}$  是低阻态电阻.

Retention: 器件的数据维持时间, 单位是秒 (s). 所列出的时间是文献中给出的器件试验时间. 如果是室温或者没有说明实验温度, 不标注温度, 否则用括号标注实验温度.

Endurance: 器件的耐久性测试次数, 单位是脉冲循环的次数 (cycle).

$V_{\text{F}}/V_{\text{read}}$ : 包含  $V_{\text{F}}$  和  $V_{\text{read}}$  两项内容.  $V_{\text{F}}$  是指是否需要 Forming, Yes 是需要, NO 是不需要, NS 是文献未报道;  $V_{\text{read}}$  是器件的读电压.

$V_{\text{Set}}(\text{V})/\text{Time}$ : 包含  $V_{\text{Set}}$  和 Time 两项内容. Set 过程外加锯齿波扫描电压,  $V_{\text{Set}}$  是高阻态到低阻态的最终电压幅度. 外加方波脉冲时,  $V_{\text{Set}}$  是 Set 过程的方波电压幅度. 两者单位都是伏 (V). 如果同时有矩形脉冲和扫描电压,  $V_{\text{Set}}$  是脉冲电压幅度, Time 是矩形波电压幅度和对应的高阻态到低阻态的响应时间.

$V_{\text{Reset}}(\text{V})/\text{Time}$ : 包含  $V_{\text{Reset}}$  和 Time 两项内容. Reset 过程外加锯齿波扫描电压,  $V_{\text{Reset}}$  是低阻态到高阻态的最终电压幅度. 外加矩形脉冲时,  $V_{\text{Reset}}$  是 Reset 过程的矩形波电压幅度, 单位是伏 (V). 如果同时有矩形脉冲波和扫描电压,  $V_{\text{Reset}}$  是脉冲电压幅度, Time 是矩形波电压幅度和对应的低阻态到高阻态的响应时间.

Mode/ $I_{\text{Max}}$ : 包含 Mode 和  $I_{\text{Max}}$  两项内容. Mode 表示器件是双极性还是单极性. 如果是矩形脉冲,  $I_{\text{Max}}$  是 Set 过程结束时的最大电流幅度, 或者是限流电流的幅度. 如果是锯齿波扫描电压,  $I_{\text{Max}}$  是扫描结束时的电流或者限流电流幅度.

Year/Ref.: 包含 Year 和 Ref. 两项内容, 分别指文献发表的年份和参考文献的编号.

注意表中 NS 是指文献中未提到该项内容.

### 3 数据处理模型和器件研究进展分析

#### 3.1 参数计算模型

通常文献里没有写和擦除的能量和功耗, 可用相关参数计算这两个参数的值. Set 和 Reset 分别是导电细丝生长和溶解过程, 因此这两个过程是器件写和擦除信息的过程, Set 电压和 Reset 电压分别是器件的写和擦除电压. 通常有两种测量器件 Set 与 Reset 电压方法.

表 1 2008 年以来部分文献中的 RRAM 器件特性  
Table 1 Characteristics of RRAM devices in some studies since 2008

Type and filament	MW/ $R_{LRS}$	Retention (s)	Endurance (cycle)	$V_F/V_{read}$	$V_{Set}$ (V) /Time	$V_{Reset}$ (V) /Time	Mode/ $I_{Max}$	Year/Ref.
Pt/ZnO/Pt $L_{ZnO}$ (Vo):100 nm	$10^4/16 \Omega$	NS	$>10^2$	Yes/0.1 V	-2/NS	-1/NS	Unipolar/ NS	2008/[3]
Al/ $Al_xO_y$ /Al $L_{Al_xO_y}$ (Vo):10 nm	$>10^4/33 \Omega$	$10^4$ (358 K)	$10^4$	Yes/0.1 V	2.0/NS	0.4/NS	Unipolar/ 1 mA	2008/[4]
Tin/ZnO/Pt $L_{ZnO}$ (Vo):30 nm	25/0.2 K	NS	NS	NO/0.5 V	4/10 ns	-4/>40 ns	Bipolar/ 6 mA	2008/[5]
Ti/MnO <sub>2</sub> /Pt $L_{MnO_2}$ (Vo):80 nm	50/20 $\Omega$	$>10^4$ (358 K)	$>10^5$	NS/0.2 V	1.5/10 ms	-1.5/10 ms	Bipolar/ 5 mA	2009/[6]
Au/ZrO <sub>2</sub> /Ag $L_{ZrO_2}$ (Vo):40 nm	$10^4/0.3$ K	$10^4$	$>500$	NO/0.1 V	0.5/50 ns	-0.6/50 ns	Bipolar/ 1 mA	2009/[7]
Ag/Ag-Ge-Se/Pt $L_{AgGeSe}$ (Ag):55 nm	$10^4/20$ K	NS	$10^4$	Yes/NS	0.08/40 s	-0.1/NS	Bipolar/ 55 nA	2009/[8]
Cu/SiO <sub>2</sub> /Pt $L_{SiO_2}$ (Cu):12 nm	$10^3/20$ K	$10^5$	NS	Yes/0.05 V	3/1 $\mu$ s	NS/NS	Bipolar/ NS	2009/[8]
Cu/SiO <sub>2</sub> /Pt $L_{SiO_2}$ (Cu):10 nm	NS/200 K	NS	$10^4$	Yes/0.05 V	0.2/NS	-0.1/NS	Bipolar/ 1 nA	2009/[8]
Ta/TaO <sub>x</sub> /Pt $L_{TaO_x}$ (Vo) $\sim$ 12 nm	$\sim 10/0.12$ K	$\sim 10^7$	$10^9$	Yes/NS	1.9/1 $\mu$ s	-2.2/NS	Bipolar/ 0.1 mA	2010/[9]
Au/ZnO/ITO $L_{ZnO}$ (Vo):20 nm	330/60 $\Omega$	$10^4$	120	NS/0.55 V	-2/NS	1.5/NS	Bipolar/ 35 mA	2011/[10]
Pt/ZnO/Pt $L_{ZnO}$ (Vo):25 nm	$10^3/0.2$ K	$10^6$	$10^6$	Yes/0.1 V	1/10 ms	-0.5/NS	Bipolar/ 3 mA	2012/[11]
Ta/TaO <sub>x</sub> /TiO <sub>2</sub> /Ti $L_{TaO_x}$ (Vo):20 nm	20/100 K	$>10^4$	$>10^{12}$	NO/2 V	6/50 ns	-5.5/50 ns	Bipolar/ 10 nA	2013/[12]
TiN/HfO <sub>2</sub> /Pt $L_{HfO_2}$ (Vo):24.7 nm	$10^6/1$ K	$10^4$ (398 K)	NS	NO/0.5 V	6/NS	-1.5 $\sim$ -4.3/NS	Bipolar/ 0.5 $\mu$ A	2014/[13]
Pt/AlO <sub><math>\delta</math></sub> /Ta <sub>2</sub> O <sub>5-x</sub> /TaO <sub>y</sub> /Pt $L_{AlO_\delta}$ /Ta <sub>2</sub> O <sub>5-x</sub> /TaO <sub>y</sub> (Vo):56 nm	$10^3/1$ K	$10^4$ (398 K)	$10^{10}$	Yes/0.1 V	-1.9/100 ns	2.3/100 ns	Bipolar/ 1 mA	2014/[14]
W/Ta/TaO <sub>x</sub> /Pt $L_{TaO_x}$ (Vo):7 nm	$\sim 10^2/2.5$ K	$>10^4$ (358 K)	$>10^8$	Yes/0.2 V	1/NS	-0.75/NS	Bipolar/ 200 $\mu$ A	2015/[15]
Ti/HfO <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> -HfO <sub>2</sub> /TiN $L_{HfO_2}$ (Vo):10 nm	$10^3/1.5$ K	$10^4$ (398 K)	$10^{10}$	NS/0.3 V	3.5/30 ns	-3/30 ns	Bipolar/ 0.2 mA	2015/[16]
Cu/HfO <sub>2</sub> /Pt $L_{HfO_2}$ (Cu):4 nm	5/1 K	$10^5$ (Low resistance)	$10^9$	Yes/0.1 V	3/50 ns	-2.4/50 ns	Bipolar/ 1 $\mu$ A	2015/[17]
Ti/TiO <sub>2</sub> Np/Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /Au $L_{TiO_2Np}$ /Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (Vo):30 nm	36/17 $\Omega$	NS	40	NO/0.5 V	0.7/NS	-0.7/NS	Bipolar/ 30 mA	2015/[18]
ITO/aTiO <sub>x</sub> /Ag NPs/ TiO <sub>x</sub> /aAlTiO <sub>x</sub> /FTO $L_{TiO_x}$ (Vo):20 nm	300/16 K	$10^4$	$>100$	NO/0.1 V	-0.36 $\pm$ 0.11/NS	0.14 $\pm$ 0.07/NS	Bipolar/ 20 $\mu$ A	2016/[19]
W/Ti/TiO <sub>x</sub> /MgO/Ru TiO <sub>x</sub> :3 nm $L_{MgO}$ (Vo):20 nm	21/2 K	$3.5 \times 10^3$	$10^9$	NO/0.3 V	1.4/1 $\mu$ s	-1.8/1 $\mu$ s	Bipolar/ 1 mA	2016/[20]
TiN/Ti/TiO <sub>2-x</sub> /Pt NCs/TiO <sub>2-x</sub> /Au, $L_{TiO_{2-x}}$ (Vo):45 nm	$\sim 10^5/10$ K	$10^5$	$10^5$	NO/1 V	1/NS	-1/NS	Bipolar/ 0.2 mA	2016/[21]
Ag/a-ZnO/Pt $L_{a-ZnO}$ (Ag):100 nm	$10^7/1$ K	$10^7$	100	NO/0.1 V	3/20 ns	-3/300 ns	Bipolar/ 1 mA	2016/[22]
W/WO <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / TiW/Cu, $L_{WO_3/Al_2O_3}$ (Cu): 11.9 nm	$10^4/1$ M	NS	$10^3$	Yes/0.1 V	3.5/100 ns	-2.5/100 ns	Bipolar/ 10 $\mu$ A	2016/[23]
Pt/TaO <sub>x</sub> /Ta $L_{TaO_x}$ (Vo): $\sim$ 35 nm	20/2 K	$\sim 10^6$ (423 K)	$10^8$	NO/NS	1.3/200 ns	-1.6/500 ns	Bipolar/ 1 mA	2016/[24]
Cu/HfO <sub>2</sub> /TiN/Ru $L_{HfO_2}$ /TiN(Cu):8 nm	30/ $\sim$ 1 K	$10^6$ (393 K)	$10^8$	Yes/0.2 V	2/<20 ns	-2.5/<100 ns	Bipolar/ 1.5 mA	2017/[25]
W/Cu/Ti/HfO <sub>2</sub> /Pt $L_{Ti/HfO_2}$ (Cu):7 nm	7/1.843 K	$4 \times 10^4$	NS	NO/0.1 V	0.75/NS	-0.5/NS	Bipolar/ 1 mA	2017/[26]
Ag/NiO/Pt $L_{NiO}$ (Vo):50 nm	$10^2/0.3$ K	$10^5$	100	Yes/0.1 V	0.5/NS	-0.5/NS	Bipolar/ 1 mA	2018/[27]
Ti/HfO <sub>2</sub> /TiN $L_{HfO_2}$ (Vo):10 nm	10/NS	$10^4$ (380 K)	$10^7$	Yes/0.1 V	$\sim$ 0.5/NS	$\sim$ -0.5/NS	Bipolar/ NS	2018/[28]
ITO/a-TiO <sub>2</sub> /Pt $L_{a-TiO_2}$ (Vo):7.5 nm	$10^2/7$ $\Omega$	$10^4$	100	Yes/0.1 V	0.6/NS	-0.5/NS	Bipolar/ 10 mA	2018/[29]
ITO/Zn <sub>2</sub> TiO <sub>4</sub> /Pt $L_{Zn_2TiO_4}$ (Vo): 67.69 nm	$\sim 10^2/0.4$ K	$10^4$	$>500$	Yes/0.1 V	0.6/NS	-0.6/NS	Bipolar/ 1 mA	2018/[30]
Ag/MnO/Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /Pt $L_{MnO}$ /Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (Vo): 60 nm	$10^6/3$ K	$10^4$	100	NO/0.2 V	0.8/NS	-1.1/NS	Bipolar/ 0.2 mA	2018/[31]
Pd/HfO <sub>x</sub> /Au or Cu NCs/HfO <sub>x</sub> /TiN $L_{HfO_x}$ (Vo):16 nm	$\sim 10^3/2$ K	$>10^4$ (358 K)	$10^8$	Yes/0.2 V	2.2/100 ns	-2.2/150 ns	Bipolar/ 4 mA	2018/[32]

表 1 续

Type and filament	MW/ $R_{LRS}$	Retention (s)	Endurance (cycle)	$V_F/V_{read}$	$V_{Set}$ (V) /Time	$V_{Reset}$ (V) /Time	Mode/ $I_{Max}$	Year/Ref.
TiN/Cu <sub>2</sub> Ge <sub>50</sub> Te <sub>50</sub> /Ta/GeTe/TiN, $L_{GeTe}$ (Te):40 nm	>10 <sup>2</sup> /100 K	NS	10 <sup>4</sup>	Yes/0.1 V	4/500 ns	-1.5/NS	Bipolar/ 10 $\mu$ A	2019/ [33]
Zr <sub>x</sub> Te <sub>1-x</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> / Pt, $L_{Al_2O_3}$ (Te):2 nm	~8.69/5 K	2 $\times$ 10 <sup>4</sup> (423 K)	10 <sup>5</sup>	Yes/0.1 V	0.75/NS	-1.5/NS	Bipolar/ 100 $\mu$ A	2019/ [34]
Cu/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Pt $L_{Al_2O_3}$ (Cu):2 nm	NS/6.1 K	<10 <sup>3</sup> (423 K)	10 <sup>5</sup>	Yes/0.1 V	0.75/NS	-1.5/NS	Bipolar/ 100 $\mu$ A	2019/ [34]
Ni/MgO/Ni $L_{MgO}$ (Ni):10 nm	>100/50 $\Omega$	10 <sup>4</sup>	10 <sup>2</sup>	NO/0.1 V	1.0/NS	-0.6/NS	Bipolar/ 12 mA	2019/ [35]
Au/hexagonal born nitride(h-BN)/ Au, $L_{h-BN}$ (Au):0.33 nm	10 <sup>7</sup> /0.6K	10 <sup>6</sup>	50	NO/0.1 V	5/15 ns	-5/50 ns	Bipolar/ 10 mA	2019/ [36]
Au/hexagonal born nitride(h-BN)/ Au, $L_{h-BN}$ (Au):0.33 nm	10 <sup>7</sup> /0.6 K	10 <sup>6</sup>	50	NO/0.1 V	2/NS	-1/NS	Unipolar/ 1 mA	2019/ [36]
Pt/HfO <sub>x</sub> /Cu/Pt $L_{HfO_x}$ (Cu):10 nm	10 <sup>4</sup> /47 K	NS	10 <sup>4</sup>	Yes/0.4 V	0.4/200 $\mu$ s	-0.2/200 $\mu$ s	Bipolar/ 20 $\mu$ A	2019/ [37]
Cu <sub>2</sub> GeTe <sub>3</sub> /Ta /GdAlO/TiN $L_{Ta/GdAlO}$ (Cu+Vo):8 nm	10/25 K	3.6 $\times$ 10 <sup>6</sup> (358 K)	10 <sup>7</sup>	Yes/NS	3.5/1 $\mu$ s	-1.5/1 $\mu$ s	Bipolar/ 65 $\mu$ A	2019/ [38]
Ta/GdAlO/TiN /TiN $L_{GdAlO}$ (Cu):5 nm	10/25 K	3.6 $\times$ 10 <sup>6</sup> (358 K)	10 <sup>7</sup>	Yes/NS	3.5/1 $\mu$ s	-1.5/1 $\mu$ s	Bipolar/ 65 $\mu$ A	2019/ [38]
Cu/ZnO/NiO/ITO $L_{ZnO/NiO}$ (Cu): 400 nm	10 <sup>3</sup> /4 K	10 <sup>4</sup>	160	NO/0.4 V	1.72/NS	-1.0/NS	Bipolar/ 3 mA	2020/ [39]
Al/CuO/ITO $L_{CuO}$ (Cu):72 nm	10 <sup>5</sup> /4 K	10 <sup>4</sup>	250	NS/-0.5 V	-4/30 ns	5/60ns	Bipolar/ 0.11 mA	2020/ [40]
Pt/Ta/TaO <sub>x</sub> /Pt $L_{TaO_x}$ (Vo):10 nm	20/2 K	10 <sup>5</sup> (358 K)	4.5 $\times$ 10 <sup>8</sup>	Yes/0.1 V	0.7/NS	-2/NS	Bipolar/ 0.1 mA	2021/ [41]
Pt/Ta/TaO <sub>x</sub> :Zr/Pt $L_{TaO_x}$ (Vo):10 nm	20/2K	10 <sup>7</sup> (358 K)	2.9 $\times$ 10 <sup>8</sup>	Yes/0.1 V	0.7/NS	-2/NS	Bipolar/ 0.1 mA	2021/ [41]
Pt/Ta/ZrO <sub>2</sub> /Pt $L_{ZrO_2}$ (Vo):5 nm	~10 <sup>2</sup> /0.2 K	NS	2 $\times$ 10 <sup>7</sup>	Yes/0.2 V	0.9/NS	-1.5/NS	Bipolar/ 0.1 mA	2021/ [42]
Pt/HfO <sub>x</sub> / Polydopamine/AgNPs /Ti, $L_{HfO_2}$ (Vo or weak metal):5 nm	100/0.2 K	10 <sup>4</sup> (358 K)	10 <sup>3</sup>	NS/0.1 V	0.5 $\pm$ 0.1 /NS	-0.7 $\pm$ 0.1 /NS	Bipolar/ 1 mA	2021/ [43]
Ti/HfO <sub>x</sub> /Cu/HfO <sub>x</sub> /Pt $L_{HfO_x}$ /Cu/HfO <sub>x</sub> (Vo+Cu):20 nm	~ 33/50 $\Omega$	10 <sup>4</sup>	200	Yes/0.05 V	0.17 $\pm$ 0.06/82 ns	-0.14 $\pm$ 0.02/NS	Bipolar/ 10 mA	2021/ [44]
W/TiO <sub>2</sub> /HfO <sub>2</sub> /TaN $L_{TiO_2}$ /HfO <sub>2</sub> (Vo): 10 nm	20/3.3 K	10 <sup>4</sup> (398 K)	10 <sup>7</sup>	Yes/0.2 V	1/6 $\mu$ s	-1/14 $\mu$ s	Bipolar/ 80 $\mu$ A	2022/ [45]
Au/HfO <sub>2</sub> /Al-ZnO/HfO <sub>2</sub> /ITO, $L_{HfO_2}$ (Vo):100 nm	10 <sup>4</sup> /0.3 K	10 <sup>4</sup> (353 K)	10 <sup>2</sup>	Yes/0.45 V	0.65/NS	-1.34/NS	Bipolar/ 1 mA	2022/ [46]
Ag/SiO <sub>2</sub> :Ag/TiO <sub>2</sub> /p <sup>++</sup> Si $L_{SiO_2}$ :Ag/TiO <sub>2</sub> (Ag): 105.8 nm	60/167 $\Omega$	10 <sup>5</sup>	10 <sup>3</sup>	NS/0.5 V	1.8/NS	-3/NS	Bipolar/ 5 mA	2020/ [47]
Au/ZnO <sub>x</sub> S <sub>1-x</sub> /Al $L_{ZnO_xS_{1-x}}$ (Al):40 nm	10 <sup>6</sup> /~30 $\Omega$	10 <sup>4</sup>	100	Yes/0.2 V	2.5/NS	0.5/NS	Unipolar/ 1 mA	2014/ [48]
Al/WO <sub>3</sub> /Pt $L_{WO_3}$ (Al):170 nm	30/50 $\Omega$	3 $\times$ 10 <sup>4</sup>	200	Yes/0.1 V	1.0/100 ns	-1.2/140 ns	Bipolar/ 6 mA	2016/ [49]
Cu/WO <sub>3</sub> /Pt $L_{WO_3}$ (Cu):170 nm	10/0.5 K	3 $\times$ 10 <sup>4</sup>	150	Yes/0.1 V	1.0/150 ns	-1.2/400 ns	Bipolar/ 0.32 mA	2016/ [49]
Ag/NiO <sub>x</sub> /TiO <sub>2</sub> /FTO, $L_{NiO_x}$ /TiO <sub>2</sub> (Ag+Ni): 100 nm	10 <sup>3</sup> /0.8 K	10 <sup>4</sup>	100	NS/0.2 V	2/NS	-2/NS	Bipolar/ 10 mA	2017/ [50]
Ag/DMcT-cc /TiO <sub>2</sub> NP/FTO, $L_{DMcT-cc}$ /TiO <sub>2</sub> NP(Ag):322 nm	10 <sup>4</sup> /0.25 K	2 $\times$ 10 <sup>4</sup>	NS	NS/0.1 V	-1/NS	1/NS	Bipolar/ 0.7 mA	2020/ [51]
Ag/NiO/ITO/PET $L_{NiO}$ (Ag):30 nm	100/0.5 K	10 <sup>5</sup>	100	NO/0.1 V	0.75/NS	-1.23/NS	Bipolar/ 1 mA	2021/ [52]
Ag/Cu <sub>x</sub> O/SiO <sub>x</sub> /n-Si $L_{Cu_xO/SiO_x}$ (Ag):18 nm	10 <sup>7</sup> /1.67 K	2 $\times$ 10 <sup>4</sup>	1.2 $\times$ 10 <sup>4</sup>	NS/1 V	2.0/NS	-3.0/NS	Bipolar/ 10 mA	2022/ [53]

第 1 种方法, 加矩形脉冲电压在器件两端, 测试电流跃起或者下降的时间. 电流跃起时间和下降的时间分别是写时间或者擦除时间, 脉冲电压的幅度  $V_{Set}$  和  $V_{Reset}$  分别是写和擦除电压.

第 2 种方法, 加三角波或者阶梯电压在器件两端, 电流跃起时的电压是 Set 电压, 电流下降时的电压则是 Reset 电压, 这两个电压也分别是最大写电压和最大擦除电压, 这种方法不能直接给出写或者擦除时间.

第 1 种方法可以计算写能量和最小擦除能量, 第 2 种方法可计算最大写功耗, 计算公式推导如下.

设外加矩形脉冲电压后, 电流跃起时间是  $t_S$ , 电流是  $i(t)$ , 器件的写能量是  $E_W$ , 则有

$$E_W = \int_0^{t_S} V(t)i(t)dt. \quad (1)$$

因为是矩形波电压,  $V(t) = V_{\text{Set}}$  为一常数. 于是上式可写成

$$E_W = \int_0^{t_S} V(t)i(t)dt = V_{\text{Set}}t_S \frac{1}{t_S} \int_0^{t_S} i(t)dt = V_{\text{Set}}t_S I_{\text{ave}}, \quad (2)$$

其中  $I_{\text{ave}} = \int_0^{t_S} i(t)dt/t_S$  为 Set 过程的平均电流. 平均电流  $I_{\text{ave}} \approx [0 + I_{\text{Max}}]/2$ , 代入上式得到

$$E_W = \frac{1}{2}V_{\text{Set}}I_{\text{Max}}t_S. \quad (3)$$

根据能量守恒定理, 擦除能量应当大于等于写过程消耗的能量, 写能量也是最小擦除能量.

写状态的最大电压和最大电流分别是  $V_{\text{Set}}$  和  $I_{\text{Max}}$ , 器件的最大瞬时写功耗是

$$P_M = V_{\text{Set}}I_{\text{Max}}. \quad (4)$$

器件读脉冲电压通常是一个非常小的矩形脉冲. 设读电压脉冲幅度是  $V_{\text{read}}$ , LRS 电阻是  $R_{\text{LRS}}$ , LRS 的读功耗是

$$P_{\text{read}} = \frac{V_{\text{read}}^2}{R_{\text{LRS}}}. \quad (5)$$

$R_{\text{HRS}}$  比  $R_{\text{LRS}}$  大得多, 但是 HRS 的读电压与 LRS 读电压相同, 因此 HRS 的读功耗远小于 LRS 读功耗, 式 (4) 计算的读功耗是每个器件的最大读功耗.

### 3.2 统计计算模型

统计学中称数据集中数据的最大值与最小值之差是极差, 根据极差的大小有两种方法计算统计数集中数据的差异性. 如果数据集中数据的极差较小, 通常采用均值描述数据的中心度量, 然后用均差和均方差描述数据对于中心度量的差异性. 如果极差很大, 均值将趋向于最大值一端, 数据集的特性受到最大值干扰, 与离群的端点值 (最大值) 靠近, 不能描写数据集的真实性. 这种情况下宜用百分位数度量数据集的特性, 数据集的中心位置是中位数, 用百分位数对应的数据差表示对应数据之间的覆盖范围.

本文收集的数据集如表 1 所示. 表 1 中的数据维持时间、耐久性、存储窗口、低阻态电阻、数据写和擦时间的极差都很大. 例如 ECM 器件耐久性的最小值是 50, 而最大值是  $1.6 \times 10^9$ , 所以本文采用百分位数方法计算数据集的性质. 常用百分位数 25%, 50%, 75% 表达数据集中数据的意义<sup>[54]</sup>, 称之为四分位数方法. 百分位数  $x\%$  是指按大小排列数据中至多  $x\%$  数据比它小,  $(100 - x)\%$  的数据比它大. 算法如下:

(1) 对数据集中数据从小到大按升序排序, 得到升序集合  $\{y(n)\}$ .  $y(n)$  对应的百分位数是  $100(n - 0.5)/n_{\text{max}}$ .

(2) 四分位数 25%, 50%, 75% 对应的数据位置若是奇数位置, 直接取该数据作为四分位数的值; 如果是偶数位置, 取其与相邻位置数据的平均值作为四分位数的值.

(3) 四分位数间距  $\text{IQR} = 75\%$  的分位数 - 25% 的分位数.  $\text{IQR}$  度量了覆盖中间 50% 的数据的距离, 是四分位数的最重要度量参数之一.

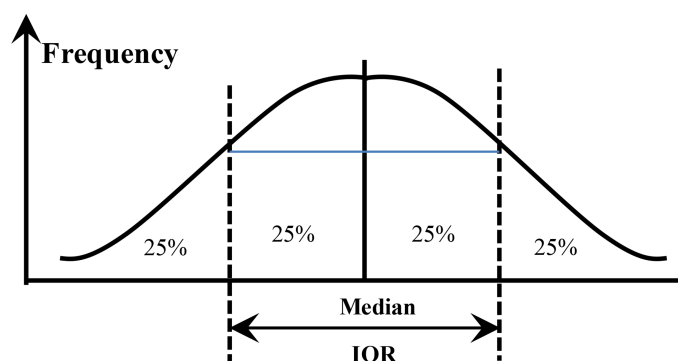


图 2 (网络版彩图) 四分位数表示的统计数据集

Figure 2 (Color online) Statistical data set represented by the quartile

(4) 多组数据混合时, 新的中位数不能通过每组中位数直接相加得到, 而要重新计算混合后数据的中位数.

四分位数方法的意义如图 2 所示, 其中中位数是出现频率最高的数据, 中位数是数据集的趋势. 从统计学的观点来看, 25%~75% 的数据是研究工作的中心, 其中 50% 分位数 (中位数) 代表了当前的主流工作; 0~25% 和 75%~100% 的数据分别是优秀的工作和其他工作.

### 3.3 统计计算结果

用百分位数处理了表 1 的数据. 图 3 是器件的导电细丝长度随着年份变化的散点图和百分位数取值, 导电细丝类型和长度是表 1 中 Type and filament 一栏所给出的导电细丝长度. 图上标出了 3 个百分位数的位置. 图中可以看到 25% 器件的研究工作进入细丝长度 10 nm 以下的器件, 10 nm 以下细丝长度是研究工作前沿, 最小细丝长度已达到 0.33 nm<sup>[36]</sup>; 50%(25% - 75%) 的器件细丝长度在 10~55 nm 之间, 20 nm 长度的细丝研究工作是代表性工作. 这些数据说明 RRAM 器件工艺和研究工作进展很快.

表 2 中列出了写电压、擦电压、读电压、写时间、擦时间、写能量、写最大功率、MW (存储窗口)、LRS 电阻、读功率、Endurance 和 Retention 百分位数计算情况以及免除 Forming 研究进展, 表中 RRAM devices 一栏是所有器件的参数统计数据混合后的计算结果. 50% 对应的数据与其他两个百分位数的对应值反映了参数的变化趋势. 百分位表示法与均值表示法对于误差与偏差的控制是不同的. 均值不是数据集中的真实数据, 其值表达的中心数据变化趋势是用均值与均方差来衡量的. 而在百分位数表示法中, 中位数是真实数据, 覆盖区间是 IQR. 下偏差  $\Delta D = \text{中位数} - 25\% \text{分位数}$ , 上偏差  $\Delta U = 75\% \text{分位数} - \text{中位数}$ . 数据集的有效数据是  $[\text{中位数} - \Delta D, \text{中位数} + \Delta U]$ ,  $\text{IQR} = \Delta U + \Delta D$  是中心数据的偏差范围. 表 2 数据的偏差可根据 IQR 来判断, 表 3 给出了表 2 各栏数据的 IQR, 同时也给出了对应数据集中的最大值和最小值以供参考.

目前大部分文献引用的 RRAM 器件能达到的技术指标来源于文献 [55] 提供的数据, 例如文献 [56] 引用了这些技术指标. 这些指标来自于文献 [55] 的作者在 2012 年对于几种金属氧化物介质材料的单极与双极性 RRAM 器件性能总结后得到的数据<sup>[57]</sup>, 作者在文献中没有给出得到数据的方法. 文献 [55] 也给出了理想存储器件指标, 但是作者也没有给出数据的来源. 这两项指标可能是作者根据当时计算机性能和 RRAM 器件研发进展主观估计的结果. 表 4 中列出了文献 [55] 给出的理想存储器件指标和文献 [55, 56] 列出的 RRAM 器件 cell 指标的数据.

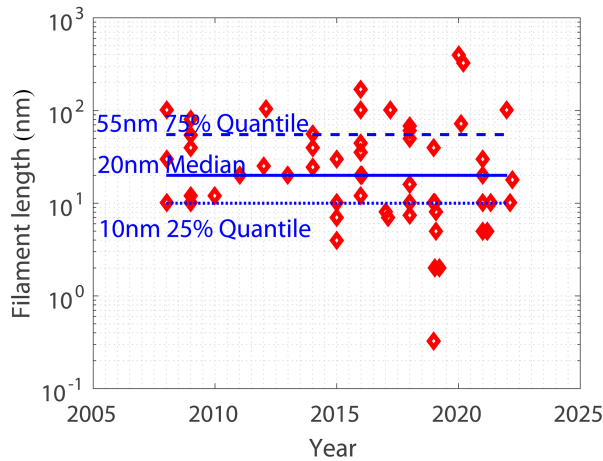


图 3 (网络版彩图) 2008~2022 年之间导电细丝长度的研究进展. 数据来源于文献 [3~53], 具体数据值见表 1 中 Type and filament 一栏导电细丝长度的数据

Figure 3 (Color online) Research advances on the length of conductive filaments from 2008 to 2022. The data is from [3~53], which can be found in the column of Type and filament of Table 1

表 2 ECM 和 VCM 器件的统计计算结果

Table 2 Statistical calculation results of ECM and VCM devices

Parameter	EDM devices			VCM devices			RRAM devices		
	25%	50%	75%	25%	50%	75%	25%	50%	75%
Write voltage (V)	0.75	1.54	3.00	0.70	1.00	2.00	0.70	1.15	2.00
Erase voltage (V)	0.77	1.23	2.48	0.60	1.42	2.00	0.70	1.29	2.00
Read voltage (V)	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.41	0.1	0.1	0.3
Write time (ns)	27.5	100	625	74	200	2250	45	100	1000
Erase time (ns)	52.5	100	375	50	425	1000	50	140	1000
Write energy (pJ/bit)	9.15	30	319	55	114	355	11	95	300
Maximum write power ( $\mu$ W/bit)	75	700	4620	125	550	1950	82.5	600	3000
MW	20	103	104	20	100	103	20	100	104
$R_{LRS}$ (k $\Omega$ )	0.35	1.00	16.52	0.11	1.00	2.13	0.2	1.00	4
Read power ( $\mu$ W/bit)	2	20.0	50	16	50	625	10	40	200
Endurance (cycle)	100	500	$1.05 \times 10^4$	110	$5.5 \times 10^6$	$2.75 \times 10^8$	100	$10^4$	$1.25 \times 10^7$
Retention (s)	$10^4$	$2.5 \times 10^4$	$10^5$	$10^4$	$10^4$	$10^5$	$10^4$	$10^4$	$10^5$
Forming	Seven devices are free			Eight devices are free			Fifteen devices are free		

Flash 器件是三端器件, 在写、擦和读的过程中每一个 cell 要加栅电压和漏源电压. 写电压、擦电压和读电压通常是指漏源电压, 栅电压随着漏源电压变化. 典型的情况是读电压 1 V, 栅电压 5 V; 写电压 5~7 V, 栅电压 12 V; 擦电压 12 V, 栅电压 0 V [57, 58]. NOR 是随机存储, NAND 是页操作, 两种器件 cell 外加电压的情况还有所不同, 综合文献 [55~59] 的结果, 表 4 给出了 Flash 器件参数的参考值.

表 4 中同时列出了用四分位数计算的指标数据以供对比. 其中百分位数对应的数据, 列出了中位数 (50%) 和好指标两栏. 好指标是 3 个百分位数指标的中上等数据, 是 25% 或者 75% 的数据.



表3 表2中ECM和VCM器件数据的最大值、最小值和IQR

Table 3 Maximum, minimum and IQR of the data in the ECM and VCM devices of Table 2<sup>a)</sup>

Parameter	EDM devices			VCM devices			RRAM devices		
	Min.	Max.	IQR	Min.	Max.	IQR	Min.	Max.	IQR
Write voltage (V)	0.08	5	2.25	0.17	6	1.3	0.08	6	1.3
Erase voltage (V)	0.10	5	1.70	0.14	5.5	1.4	0.10	6	1.3
Read voltage (V)	0.05	1	0.1	0.05	2	0.31	0.05	2	0.2
Write time (ns)	15	$2 \times 10^5$	597.5	10	$10^7$	2176	10	$10^7$	955
Erase Time (ns)	50	$2 \times 10^5$	322.5	30	$10^7$	950	30	$10^7$	950
Write energy (pJ/bit)	0.075	$3.2 \times 10^8$	309.6	$1.5 \times 10^{-3}$	$3.5 \times 10^7$	355	$1.5 \times 10^{-3}$	$3.2 \times 10^8$	289
Maximum write power ( $\mu$ W/bit)	$2 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^4$	4545	$6 \times 10^{-2}$	$7 \times 10^4$	1825	$2 \times 10^{-4}$	$7 \times 10^4$	2918
MW	5	$10^7$	9970	10	$10^6$	980	5	$6 \times 10^7$	9980
$R_{LRS}$ (k $\Omega$ )	0.03	1000	16.17	0.01	100	2.02	0.2	1.00	4
Read power ( $\mu$ W/bit)	0.01	1497	48	0.5	$1.5 \times 10^4$	609	0.01	$1.5 \times 10^4$	190
Endurance (cycle)	50	$1.6 \times 10^9$	$1.04 \times 10^4$	40	$10^{12}$	$2.75 \times 10^8$	40	$10^{12}$	$1.25 \times 10^7$
Retention (s)	$10^3$	$10^7$	$9 \times 10^4$	3500	$10^7$	$9 \times 10^4$	$10^3$	$10^7$	$9 \times 10^4$

a) Min. and Max. mean minimum and maximum, respectively.

表4 RRAM器件的理想参数、估算的参数与已实现参数对比

Table 4 Comparison of ideal parameters, estimated parameters and realized parameters for RRAM devices

Parameter	Idea data	Flash <sup>[55~59]</sup>		RRAM data in [55, 56]	This work	
		NOR	NAND		Median	Good index
Write voltage (V)	<1	5	10	<3	1.15	0.7
Erase voltage (V)	<1	10	10~20	<3	1.29	0.7
Read voltage (V)	-	1.5	6	-	0.1	0.1
Write time (ns)	<1	$10^4 \sim 10^6$	$10^5 \sim 10^6$	<10	100	45
Erase time (ns)	<1	-	-	<10	140	50
Write energy (pJ/bit)	$10^{-3}$	100	0.01	0.1	95	11
Read energy (pJ/bit)	$10^{-3}$	-	-	-	-	-
Read power ( $\mu$ W/bit)	-	-	-	-	40	10
Maximum write power ( $\mu$ W/bit)	-	-	-	-	600	82.5
Endurance (cycle)	$>10^{17}$	$10^5$	$10^4$	$10^6 \sim 10^{12}$	$10^4$	$1.25 \times 10^7$
Retention (s)	$3.15 \times 10^8$	$3.15 \times 10^8$	$3.15 \times 10^8$	$3.15 \times 10^8$	$10^4$	$10^5$
$R_{LRS}$ (k $\Omega$ )	-	-	-	-	1	0.2
MW	-	-	-	-	100	$10^4$

### 3.4 ECM和VCM器件研究进展分析

表2和4清楚地显示出RRAM器件的研究进展,分析如下:

(1) 除了器件的写电压、擦电压和单元尺寸外,现有器件的性能均不能达到文献[55]估计的进展目标.随着器件尺寸的缩小,MOS器件需要的外加电压越来越小,这3项指标与MOS器件电压进展同步,说明RRAM器件的工艺进展与集成电路工艺进展同步,表明了RRAM器件工艺进展迅速和工

艺的成功.

(2) 器件的写时间、擦时间、写能量和数据维持时间均未达到文献 [55] 作者预计的指标. 写时间和擦时间与预计指标相差较小, 而写能量和数据维持时间与预计的指标相差较多, 甚至不能与 NAND flash 相比拟.

导电细丝是介质层中的局域化结构, 导电细丝的体积, 特别是截面的尺寸不随 RRAM 器件尺寸变化, 截面尺寸仅与写电流大小有关, 决定了器件的耐久性和数据维持时间 [2]. 而足够大的写电流才能稳定细丝的截面, 保证细丝的鲁棒性. 这就要求器件的写电流必须大于某个定值, 导电细丝才能稳定和可靠地工作. 从式 (2) 和 (3) 可知, 写能量和写功率与电流成正比, 写电流越大, 写能量和写功率越大, 导电细丝的鲁棒性越好, 数据维持时间和耐久性指标也更好. 这说明减小写能量和写功率, 就必须减小电流, 这导致细丝的截面减小, 器件的耐久性和数据维持时间指标就差; 增加耐久性和数据维持时间, 必须增大细丝截面, 就要增加写能量和写功率, 增加写电流. 器件的写能量和写功率与可靠性 (耐久性与数据维持时间) 是矛盾的, 矛盾的中心是写电流的数值. 为了达到要求的指标, 就要求写能量和写功率与可靠性参数之间要有一定的妥协, 即写电流不是任意的. 解决这个矛盾的途径是采用优化的方法, 设计器件的最大工作电流  $I_{Max}$ , 可以通过选择恰当的限流电流决定最大工作电流.

(3) 首次给出了具有普遍意义的 RRAM 器件存储窗口和低阻态电阻数值. 从表 2 中看到 ECM 与 VCM 器件的存储窗口大约都是几百  $\Omega$  量级, ECM 器件的存储窗口大于 VCM 器件的存储窗口.

ECM 器件低阻态电阻是 0.35~16.52 k $\Omega$ , VCM 低阻态电阻是 0.11~2.13 k $\Omega$ , 两者的低阻态电阻相差较大. 其原因解释如下. ECM 器件的介质层是绝缘体, 其电阻非常大, 基本上可以忽略. 导电细丝的电阻就是器件低阻态的电阻. 导电细丝是一个局域的低电阻区域, 如图 4 所示. 如果 ECM 器件导电细丝两端的某个截面  $A_{small}$  非常小, 可达原子半径量级, 则该截面  $A_{small}$  与电极连接后会产生“量子点”效应, 该效应作用下的导电细丝电阻  $R_{filament}$  是 [1,60]

$$R_{filament} = R_{body} + R_{landauer}, \quad (6)$$

$$R_{landauer} = \begin{cases} 0, & A_{small} \text{ is relatively large,} \\ \frac{h}{e^2}, & A_{small} \text{ is very small,} \end{cases} \quad (7)$$

其中  $h$  和  $e$  分别是普朗克常数和电子电荷.  $R_{body}$  是导电细丝的体电阻.  $R_{landauer}$  是量子点效应电阻, 即接触面过小的量子力学效应电阻为 12.9 k $\Omega$ , 导电细丝将因 Landauer 电阻变得很大, 因而低阻态有较大的电阻. 计算表明 ECM 低阻态电阻 74.05% 分位的值是 12.9 k $\Omega$ , ECM 器件中有 25.6% 器件的低阻态电阻大于 12.9 k $\Omega$ . 这个比例说明 ECM 器件的量子点电阻不可以忽略, 与之鲜明对比的是 VCM 器件的低阻态电阻基本上在 2 k $\Omega$  以下, VCM 器件中没有量子点效应.

表 2 和 4 给出的器件指标是多个器件综合以后的指标, 就特定的某一种材料和一种结构的器件而言, 其性能指标一定低于表 4 给出的指标. 进一步对比表 4 中 RRAM 器件与 Flash 器件性能可知, RRAM 器件的写、擦和读电压以及写时间都很小, 比 Flash 器件要小一个数量级至 2~3 个数量级; 写能量与 NOR Flash 持平, 但是比 NAND Flash 大得多; 耐久性略低于 NOR Flash, 与 NAND Flash 持平; 数据维持时间则远低于两种 Flash 器件. 对比这些结果可知, ECM 和 VCM 器件与 NOR Flash 的差距最小, 最可能取代的器件是 NOR Flash. 就发展水平而言, RRAM 器件目前还需要进一步发展才能取代 Flash 技术.

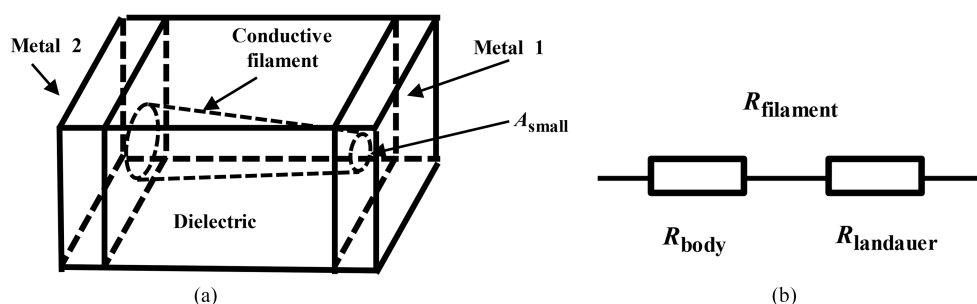


图4 ECM器件的导电细丝示意图与等效电路。(a) 导电细丝示意图; (b) 导电细丝的等效电路

**Figure 4** Schematic diagram and equivalent circuit of the conductive filament for ECM devices. (a) Schematic diagram of the conductive filament; (b) equivalent circuit of the conductive filament

#### 4 结束语

本文用统计的方法计算了58款各种不同材料和结构的基于细丝的RRAM器件的特性参数的信息,定量评估了基于导电细丝的RRAM器件的研究进展,发现器件的写时间、擦时间、写能量和数据维持时间均未达到预计的目标,器件的写能量和写功率与器件的可靠性(数据维持时间和耐久性)之间的矛盾并没有完全解决,ECM器件中广泛存在量子点效应.这些评价的结果说明RRAM器件目前还不能取代Flash器件,将来发展中最有可能取代的是NOR flash.

#### 参考文献

- 1 Jameson J R, Blanchard P, Dinh J, et al. (Invited) conductive bridging RAM (CBRAM): then, now, and tomorrow. *ECS Trans*, 2016, 75: 41–54
- 2 Slesazek S, Mikolajick T. Advances in resistive switching based memory devices. *Nanotechnology*, 2019, 30: 30352003
- 3 Chang W Y, Lai Y C, Wu T B, et al. Unipolar resistive switching characteristics of ZnO thin films for nonvolatile memory applications. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 022110
- 4 Kim S, Choi Y K. Resistive switching of aluminum oxide for flexible memory. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 223508
- 5 Xu N, Liu L, Sun X, et al. Characteristics and mechanism of conduction/set process in TiN/ZnO/Pt resistance switching random-access memories. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 232112
- 6 Yang M K, Park J W, Ko T K, et al. Bipolar resistive switching behavior in Ti/MnO<sub>2</sub>/Pt structure for nonvolatile memory devices. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 5655
- 7 Li Y T, Long S B, Zhang M H, et al. Resistive switching properties of Au/ZrO<sub>2</sub>/Ag structure for low-voltage nonvolatile memory applications. *IEEE Electron Device Lett*, 2010, 31: 117–119
- 8 Schindler C. Resistive switching in electrochemical metallization memory cells. Dissertation for Ph.D. Degree. Phoenix: Arizona State University, 2009. 92–94
- 9 Yang J J, Zhang M X, Strachan J P, et al. High switching endurance in TaO<sub>x</sub> memristive devices. *Appl Phys Lett*, 2010, 97: 232102
- 10 Han Y, Cho K, Kim S. Characteristics of multilevel bipolar resistive switching in Au/ZnO/ITO devices on glass. *Microelectron Eng*, 2011, 88: 2608–2610
- 11 Chiu F C, Li P W, Chang W Y. Reliability characteristics and conduction mechanisms in resistive switching memory devices using ZnO thin films. *Nanoscale Res Lett*, 2012, 7: 178
- 12 Hsu C W, Wang I T, Lo C L, et al. Self-rectifying bipolar TaO<sub>x</sub>/TiO<sub>2</sub> RRAM with superior endurance over 10<sup>12</sup> cycles for 3D high-density storage-class memory. In: *Proceedings of Symposium on VLSI Technology*. New York: IEEE, 2013. T166–T167
- 13 Zhao L, Chen H Y, Wu S C, et al. Multi-level control of conductive nano-filament evolution in HfO<sub>2</sub> ReRAM by pulse-train operations. *Nanoscale*, 2014, 6: 5698–5702

- 14 Bai Y, Wu H, Wu R, et al. Study of multi-level characteristics for 3D vertical resistive switching memory. *Sci Rep*, 2014, 4: 5780
- 15 Prakash A, Park J, Song J, et al. Demonstration of low power 3-bit multilevel cell characteristics in a TaO<sub>x</sub>-based RRAM by stack engineering. *IEEE Electron Device Lett*, 2014, 36: 32–34
- 16 Chand U, Huang C Y, Jieng J H, et al. Suppression of endurance degradation by utilizing oxygen plasma treatment in HfO<sub>2</sub> resistive switching memory. *Appl Phys Lett*, 2015, 106: 133441
- 17 Lv H, Xu X, Liu H, et al. Evolution of conductive filament and its impact on reliability issues in oxide-electrolyte based resistive random access memory. *Sci Rep*, 2015, 5: 7764
- 18 Park M R, Abbas Y, Hu Q, et al. Resistive switching characteristics of tantalum oxide thin film and titanium oxide nanoparticles hybrid structure. *J Nanosci Nanotechnol*, 2015, 15: 8613–8616
- 19 Huang Y J, Shen T H, Lee L H, et al. Low-power resistive random access memory by confining the formation of conducting filaments. *AIP Adv*, 2016, 6: 809
- 20 Lu W, Chen W, Li Y, et al. Self current limiting MgO ReRAM devices for low-power non-volatile memory applications. *IEEE J Emerg Sel Top Circuits Syst*, 2016, 6: 163–170
- 21 Bousoulas P, Stathopoulos S, Tsialoukis D, et al. Low-power and highly uniform 3-b multilevel switching in forming free TiO<sub>2-x</sub>-based RRAM with embedded Pt nanocrystals. *IEEE Electron Device Lett*, 2016, 37: 874–877
- 22 Huang Y, Shen Z, Wu Y, et al. Amorphous ZnO based resistive random access memory. *RSC Adv*, 2016, 6: 17867–17872
- 23 Woo J, Belmonte A, Redolfi A, et al. Introduction of WO<sub>3</sub> layer in a Cu-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> conductive bridge RAM system for robust cycling and large memory window. *IEEE J Electron Devices Soc*, 2016, 4: 163–166
- 24 Yu M, Cai Y, Wang Z, et al. Novel vertical 3D structure of TaO<sub>x</sub>-based RRAM with self-localized switching region by sidewall electrode oxidation. *Sci Rep*, 2016, 6: 21020
- 25 Cao R, Liu S, Liu Q, et al. Improvement of device reliability by introducing a BEOL-compatible TiN barrier layer in CBRAM. *IEEE Electron Device Lett*, 2017, 38: 1371–1374
- 26 Aga F G, Woo J, Song J, et al. Controllable quantized conductance for multilevel data storage applications using conductive bridge random access memory. *Nanotechnology*, 2017, 28: 115707
- 27 Li Y, Chu J, Duan W, et al. Analog and digital bipolar resistive switching in solution-combustion-processed NiO memristor. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2018, 10: 24598–24606
- 28 Su Y T, Wang M C, Zhang S, et al. A method to reduce forming voltage without degrading device performance in hafnium oxide-based 1T1R resistive random access memory. *IEEE J Electron Devices Soc*, 2018, 6: 341–345
- 29 Chen S X, Chang S P, Chang S J, et al. Highly stable ultrathin TiO<sub>2</sub> based resistive random access memory with low operation voltage. *ECS J Solid State Sci Technol*, 2018, 7: Q3183–Q3188
- 30 Chen S X, Chang S P, Hsieh W K, et al. Highly stable ITO/Zn<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>/Pt resistive random access memory and its application in two-bit-per-cell. *RSC Adv*, 2018, 8: 17622–17628
- 31 Hu Q, Park M R, Abbas H, et al. Forming-free resistive switching characteristics in tantalum oxide and manganese oxide based crossbar array structure. *Microelectron Eng*, 2018, 190: 7–10
- 32 Wu Q, Banerjee W, Cao J, et al. Improvement of durability and switching speed by incorporating nanocrystals in the HfOx based resistive random access memory devices. *Appl Phys Lett*, 2018, 113: 023105
- 33 Goux L, Radhakrishnan J, Belmonte A, et al. Key material parameters driving CBRAM device performances. *Faraday Discuss*, 2019, 213: 67–85
- 34 Lee S, Song J, Lim S, et al. Excellent data retention characteristic of Te-based conductive-bridge RAM using semiconducting Te filament for storage class memory. *Solid-State Electron*, 2019, 153: 8–11
- 35 Liu D, Yin Y, Cheng H. Physically transient memristor based on the permeation of water at the interface of electrode and substrate. *J Alloys Compd*, 2019, 810: 151957
- 36 Wu X, Ge R, Chen P A, et al. Thinnest nonvolatile memory based on monolayer h-BN. *Adv Mater*, 2019, 31: 1806790
- 37 Dananjaya P A, Loy D J J, Chow S C W, et al. Unidirectional threshold switching induced by Cu migration with high selectivity and ultralow OFF current under gradual electroforming treatment. *ACS Appl Electron Mater*, 2019, 1: 2076–2085
- 38 Radhakrishnan J, Belmonte A, Clima S, et al. Improving post-cycling low resistance state retention in resistive RAM with combined oxygen vacancy and copper filament. *IEEE Electron Device Lett*, 2019, 40: 1072–1075

- 39 Siddik A, Haldar P K, Garu P, et al. Enhancement of data storage capability in a bilayer oxide-based memristor for wearable electronic applications. *J Phys D-Appl Phys*, 2020, 53: 295103
- 40 Hsu C C, Lin Y S, Cheng C W, et al. Annealing effect on the performance of copper oxide resistive memory devices. *IEEE Trans Electron Devices*, 2020, 67: 976–983
- 41 Kempen T, Waser R, Rana V. 50X endurance improvement in TaO<sub>x</sub> RRAM by extrinsic doping. In: *Proceedings of IEEE International Memory Workshop (IMW)*, New York, 2021. 1–4
- 42 Wiefels S, von Witzleben M, Huttemann M, et al. Impact of the ohmic electrode on the endurance of oxide-based resistive switching memory. *IEEE Trans Electron Devices*, 2021, 68: 1024–1030
- 43 Song Y, Wang X, Wu Q, et al. High switching uniformity in HfO<sub>x</sub>-based memristors by adding polydopamine-derived Ag nanoparticles on the electrode. *Appl Phys Lett*, 2021, 118: 223501
- 44 Guo T, Wang Y, Duan L, et al. Uniform switching behavior of HfO<sub>x</sub>-based memory with gradual-grown filaments by interface modulation. *Vacuum*, 2021, 189: 110224
- 45 Ismail M, Chand U, Mahata C, et al. Demonstration of synaptic and resistive switching characteristics in W/TiO<sub>2</sub>/HfO<sub>2</sub>/TaN memristor crossbar array for bioinspired neuromorphic computing. *J Mater Sci Tech*, 2022, 96: 94–102
- 46 Xu Y D, Jiang Y P, Tang X G, et al. Enhancement of resistive switching performance in hafnium oxide (HfO<sub>2</sub>) devices via sol-gel method stacking tri-layer HfO<sub>2</sub>/Al-ZnO/HfO<sub>2</sub> Structures. *Nanomaterials*, 2022, 13: 39–45
- 47 Wang Z Q, Xu H Y, Li X H, et al. Synaptic learning and memory functions achieved using oxygen ion migration/diffusion in an amorphous InGaZnO memristor. *Adv Funct Mater*, 2012, 22: 2759–2765
- 48 Cho K, Park S, Chung I, et al. Effect of oxidizable electrode material on resistive switching characteristics of ZnO<sub>x</sub>S<sub>1-x</sub> films. *J Nanosci Nanotechnol*, 2014, 14: 8187–8190
- 49 Kim J, Inamdar A I, Jo Y, et al. Effect of electronegativity on bipolar resistive switching in a WO<sub>3</sub>-based asymmetric capacitor structure. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, 8: 9499–9505
- 50 Zhou G, Xiao L, Zhang S, et al. Mechanism for an enhanced resistive switching effect of bilayer NiO/TiO<sub>2</sub> for resistive random access memory. *J Alloys Compd*, 2017, 722: 753–759
- 51 Kumari A, Shanbogh S M, Udachyan I, et al. Interface-driven multifunctionality in two-dimensional TiO<sub>2</sub> nanosheet/poly(dimercaptothiadiazole-triazine) hybrid resistive random access memory device. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12: 56568–56578
- 52 Wang T Y, Meng J L, Li Q X, et al. Forming-free flexible memristor with multilevel storage for neuromorphic computing by full PVD technique. *J Mater Sci Tech*, 2021, 60: 21–26
- 53 Hsu C C, Hua S Y, Zhang X Z, et al. Effects of interfacial oxide layer formed by annealing process on WORM characteristics of Ag/Cu<sub>x</sub>O/SiO<sub>x</sub>/n<sup>+</sup>-Si devices. *J Alloys Compd*, 2022, 898: 162918
- 54 Ott R L, Longnecker M. *An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis*. 5th ed. Beijing: Science Press, 2003. 90 [Ott R L, Longnecker M, 著. 张忠占, 王建稳, 王强, 等译. *统计学方法与数据分析引论*. 北京: 科学出版社, 2003. 90]
- 55 Yu S, Chen P Y. Emerging memory technologies: recent trends and prospects. *IEEE Solid-State Circuits Mag*, 2016, 8: 43–56
- 56 Zahoor F, Zulkifli A T Z, Khanday F A. Resistive random access memory (RRAM): an overview of materials, switching mechanism, performance, multilevel cell (MLC) storage, modeling, and applications. *Nanoscale Res Lett*, 2020, 15: 1–26
- 57 Wong H S P, Lee H Y, Yu S, et al. Metal-oxide RRAM. *Proc IEEE*, 2012, 100: 1951–1970
- 58 Pavan P, Bez R, Olivo P, et al. Flash memory cells—an overview. *Proc IEEE*, 1997, 85: 1248–1271
- 59 Kim S S, Yong S K, Kim W, et al. Review of semiconductor flash memory devices for material and process issues. *Adv Mater*, 2023, 35: 2200659
- 60 Yan S S, Gan Z Z. *Mesoscopic Physics*. Beijing: Peking University Press, 1997. 30–31 [阎守胜, 甘子钊. *介观物理*. 北京, 北京大学出版社, 1997. 30–31]

## Analysis of RRAM device characteristic parameters based on statistical data

Qing KE & Yuehua DAI\*

*School of Integrated Circuits, Anhui University, Hefei 230601, China*

\* Corresponding author. E-mail: daiyuehua2013@163.com

**Abstract** This article provides statistics on the process and electrical parameters for 58 RRAM devices with different structures and materials. The calculation model of the device characteristics was built by these parameters, while the differences in device data were calculated by using statistical percentile method, and as a result, quantitative indicators of RRAM device parameters were obtained. Based on the calculation results, we found that the write time, erase time, write energy, and data retention time of RRAM devices did not reach the expected indicators. ECM devices exhibit the quantum mechanical effects in the low resistance state, while there is no quantum mechanical effect for VCM devices in the low resistance. RRAM devices still need further development to replace Flash technology. In terms of the RRAM device's development trend, ECM and VCM devices have the smallest gap with NOR flash and are most likely to replace NOR flash.

**Keywords** resistive memory devices, parameter calculation model, percentile method, statistical indicators