

目 录

| | | |
|---|-----------|---|
| 1 | 前言 | 2 |
| 2 | 背景介绍 | 2 |
| 3 | 忆阻是如何被发现的 | 2 |
| 4 | 忆阻器的理论和性能 | 5 |
| 5 | 一个常见原型 | 5 |
| 6 | 忆阻器的未来 | 5 |

忆阻

彭峰 05121214

2015-5-10

§1 前言

先说说选题原因：还记得当年忆阻在实验室真正被实现时，我通过刊物了解到忆阻这一划时代的器件终于从理论转到实验阶段。还记得当时 HP 公司说希望在 2012 年实现成品进入市场。当时还很欣喜，说到时候就能用上这么高端的产品了，未想到现在还是处于实验室阶段，还在研究特性中。。

本次的选题实际上还是有极大的偏移的，忆阻作为第四种元件，虽然也可以当作电阻器使用，但也应该和电阻和电容处于同一层次才是。但是想想这样和大家的选题不同，加之之前有过一次邂逅，以前也有过了解，还是决定以“忆阻”为选题方向吧。

§2 背景介绍

1971 年华裔科学家蔡少棠提出忆阻的概念，在研究电荷、电流、电压和磁通量之间的关系时，外推了对称的非线性电阻（电压与电流），非线性电容器（电压与电荷），和非线性电感（磁通量与电流）之间的的概念，他推断在电阻、电容和电感器之外，应该还有一种组件，代表着电荷与磁通量之间的关系。由这张图可以很好地展现四种基本元件的关系。

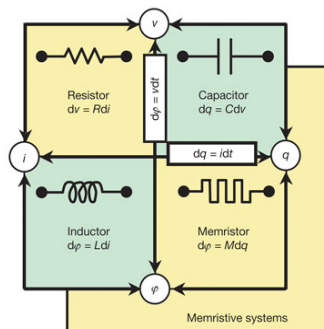


Figure 1: 四种基本元器件

在理论提出之前，蔡少棠发现在电流 (i)、电压 (v)，电荷 (q) 及磁通量 (ϕ_B) 4 种变量之间的 6 种关系有 5 种是已知的，从图(1)中我们可以看到，电阻是电压和电流之间的关系，电感是电流和磁通量之间的关系，电容是电压和电荷之间的关系，忆阻理论的提出很好的填补了四种基本物理量关系的空白。在理论提出的当时，还没有实际的器件，只是在数学模型上忆阻应该存在。

§3 忆阻是如何被发现的

这一理论可追溯到上世纪 90 年代末，当时惠普公司高级研究员 Stan Williams 建立了该公司的信息和量子系统实验室，以便开拓未来 20 年的计算技术。40 年来，工业界不断制造基于摩尔定律的更小、更便宜的晶体

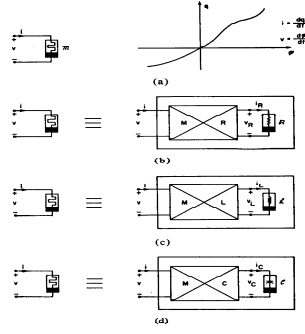


Figure 2: 忆阻推论

管。于是，Williams 研究团队开始研发越来越小的晶体管，这致使他们考虑当设备缩小到单个分子大小时会发生什么，以及单个原子运动将如何影响其性能。

在一次试验中，Stanley Williams 的团队发现，一块极薄的二氧化钛被夹在两个电极中间，这些二氧化钛又被分成两个部份，一半是正常的二氧化钛，另一半进行“掺杂”，使氧原子数减少。因此“掺杂”的那一半带正电，电流通过时电阻比较小，而且当电流从“掺杂”的一边通向正常的一边时，在电场的影响之下缺氧的“掺杂物”会逐渐往正常的一侧游移，使得以整块材料来言，“掺杂”的部份会占比较高的比重，整体的电阻也会降低。反之，当电流从正常的一侧流向“掺杂”的一侧时，电场会把缺氧的“掺杂物”从回推，电阻就会跟着增加。

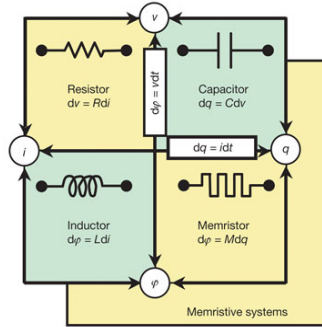


Figure 3: 氧原子流动示意图

，如图示。掺杂了氧空位的氧化钛层电阻较小，纵横门中掺杂层所占比例较大，纵横门处于导通状态；无掺杂氧空位的氧化钛层电阻较大，纵横门中无掺杂层所占比例较大，纵横门处于断路状态。纵横门的电阻可以简单的看做是掺杂部分电阻和无掺杂部分的电阻之和。令纵横门的总厚度为 D ，掺杂层的即时厚度为 $w(t)$ ，若纵横门全部为掺杂层，总电阻记为 R_{ON} ，那么掺杂层的即时电阻为 $R_{ON} \frac{w_t}{D}$ 。若纵横门全部为无掺杂层，总电阻记为 R_{OFF} ，无掺杂层的即时电阻为 $R_{OFF}(1 - \frac{w_t}{D})$ 。当忆阻器电极施加偏置电压 $v(t)$ ，忆阻器内部会导致离子迁移。设在理想欧姆接触及线性的电子迁移的情况下，离子迁移率为 μ_γ

$$v_t = (R_{ON} \frac{w_t}{D} + R_{OFF}(1 - \frac{w_t}{D}))i(t) \quad (1)$$

$$\frac{dw(t)}{dt} = \mu_\gamma \frac{R_{ON}}{D} q(t) \quad (2)$$

两式 (1)(2) 很好的满足了忆阻数学特性模型 (1)(2)

HP 的两个不同团队的研究成果：

我们结合实现的一个典型的忆阻做成的开关的图来看：

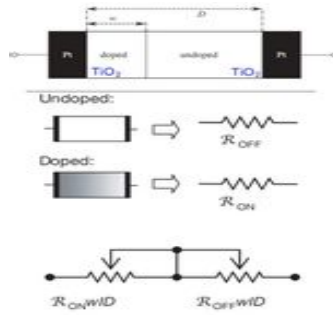


Figure 4: 等效器件

图中形成一个类似三明治的结构，最上方是纳米级的导线，中间部分是 TiO_2 层，内部包含游离的氧原子，下部是 TiO_3 层，内部原子结合较为稳定。最下方是又一根纳米数量级导线

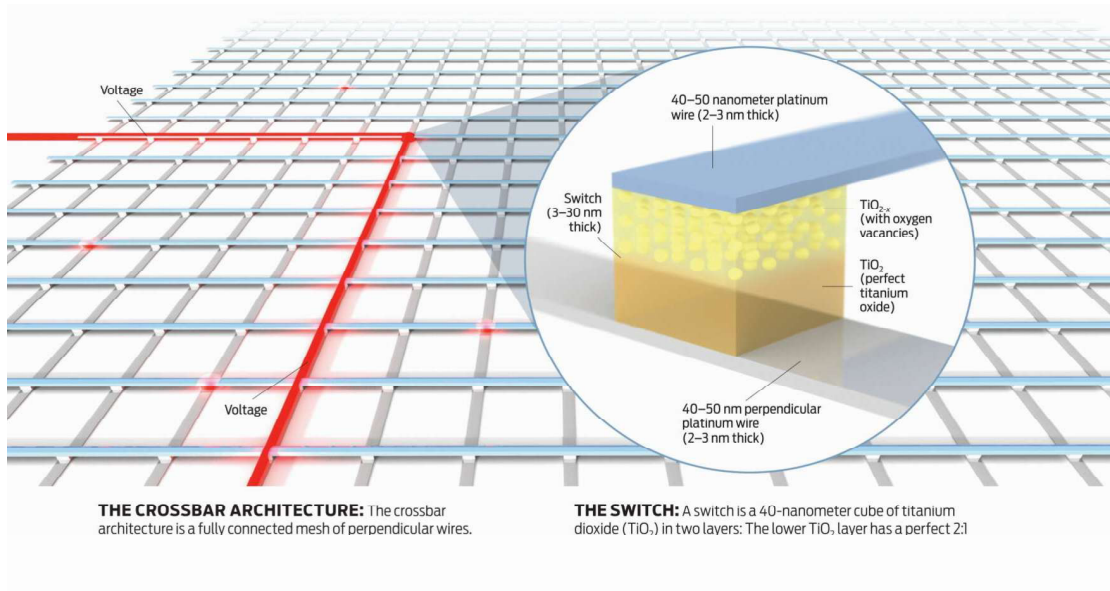


Figure 5: 忆阻门

§4 忆阻器的理论和性能

忆阻器的特性—忆阻值 M 满足式(3)的特性：

$$M = \frac{d\phi_B}{dq} \quad (3)$$

根据法拉第电磁感应定律及复合函数求导法则. 对其积分，有：

$$M(q(t)) = \frac{\int v(t)dt}{\int i(t)dt} \quad (4)$$

由式(4)可以看出，忆阻的值和电阻有着相同的量纲，但是其阻值取决于过去流过的电荷的总量，即忆阻有着记忆特性，且在断电状态下保持不变。这和电容器的电压比较类似。

我们用一个表格来看下忆阻器的行为：

| | | |
|----------------|---|---|
| | 电荷 (q) | 电流 (I) |
| 电压 (U) | 电容 (倒数) $\frac{1}{C} = \frac{dU}{dq} = \frac{d\Phi}{dq}$ | 电阻率 $R = \frac{dU}{dI} = \frac{d\Phi}{d\dot{q}}$ |
| 磁通量 (Φ) | 忆阻器 $M = \frac{d\Phi}{dq}$ | 电感 $L = \frac{d\Phi}{dI} = \frac{d\Phi}{d\dot{q}}$ |

§5 一个常见原型

这里介绍的是 HP 公司在当时忆阻器件发现之后提出的一种模型。

HP 关于忆阻器的发现在 2008 年时发表于「自然」期刊，2009 年证明了 Cross Latch 的系统很容易就能堆栈，形成立体的内存。这意味着可以每平方英寸能存储的容量极大，加之可以进行堆栈的 3D 构成，可以见到是存储的一种绝佳替代品。

2012 年，HRL 实验室（一个由通用汽车公司和波音公司共有的研究设施）宣布首次成功运行忆阻器阵列，即利用了用于电子设备生产的互补金属氧化物半导体（CMOS）制造工艺。

澳大利亚墨尔本皇家理工大学的科学家用非晶钙钛矿氧化物开发出一种纳米级超快忆阻器，采用了一种纳米级的薄膜材料来制造忆阻器，这种功能性氧化物比人类头发的直径薄 1 000 倍。这种材料在化学上具有“忆阻”效应，存储在其中的数据具有非易失性。

§6 忆阻器的未来

同时，如何建造忆阻器的理念也在持续演进。在 6 月中旬召开的惠普公司探索会议上，该公司首席技术官 Martin Fink 概述了一个简单的体系结构，他将其简单地称为“机器”。它包含一套记忆电路，并利用光导纤维而非铜线连接到高效专用处理器上。

该行业有若干目标处于变化中。忆阻器可以大大提高电子元件的能源效率，并能更好地处理数据洪流。对于这些设备的发展而言，一个必不可少的因素是，计算能力和储存密度指数式增长的延续，在过去 40 年里，这些产品的价格出现了暴跌。出于类似原因，IBM 刚刚宣布将投入 30 亿美元，用于研发实验性“后硅”结构和芯片，并预计在 10 年里能出现现存体系的根本性变化。

这些变化将带来计算机操作系统的极大变化，以适应不再区分动态存储器和长期存储的计算机硬件。Bresniker 认为这种改变是一个契机，以抛弃烦琐的操作系统代码——这些代码以前用来适应老式硬件的限制。

“我们开发出的这种忆阻器在电子？设备中具有广泛的应用价值，无论是能收缩到纳米 j 尺度的超快存储设备，还是基于计算机逻辑体系架 I 构的生物神经网络存储器。‘未来这种忆阻器将能够 j 替代目前所广泛使用的闪存、固态硬盘，让电子设备 j 更快、更轻、使用时间更长。虽然目前还有很多的研！究需要做，但已经能够肯定的是，新发现为寻找下一代内存设备，构建复杂的神经网络图形；