

基于忆耦器实现神经突触可塑性和神经网络模拟

尚大山[†] 孙阳^{††}

(中国科学院物理研究所 北京凝聚态物理国家研究中心 北京 100190)

2018-03-25收到

[†] email: shangdashan@iphy.ac.cn

^{††} email: youngsun@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20180604

现代计算机自问世以来一直采用冯·诺依曼结构,即运算器与存储器分离,这种结构使得运算器与存储器之间的数据传输成为影响系统性能的瓶颈(称为冯·诺依曼瓶颈^[1]),大大限制了计算机性能的提高;同时,由于现代计算机中的运算器和主存储器都是易失性器件,不仅在断电后信息立即消失,而且具有较高的能耗。作为对比,人类的大脑是一个高效的信息存储与计算系统,而且具有非常低的功耗(约20W)。主要原因在于人脑对信息独特的处理方式。人脑是一个由约 10^{11} 神经元和 10^{15} 突触构成的高度互连、大规模并行、结构可变的复杂网络。在神经网络中,神经元被认为是大脑的计算引擎,它并行地接受来自

与树突相连的数以千计的突触的输入信号。突触可塑性即是通过特定模式的突触活动产生突触权重变化的生物过程,这个过程被认为是大脑学习和记忆的源头^[2]。可以看出,人脑是一种典型的非冯·诺依曼构架,即存储与计算于一体的并行信息处理模式,并且还具有自适应学习能力、高的容错能力和抗干扰能力。随着计算数据复杂度的提高,神经网络型信息处理模式的效率将会明显优于传统计算机^[3]。为了实现这种神经形态信息存储与计算特性,人们已经尝试采用传统硅基器件和电路来模拟神经形态存储与计算功能^[4]。由于模拟单个神经元功能所需要的器件多、电路复杂,在大规模集成方面仍然面临着高密度和低能耗的挑战。

忆阻器(Memristor)是一类两端无源电子器件,具有简单的电极/介电层/电极三明治结构,其电阻值与流过器件的电荷量相关^[5]。在外电场作用下,忆阻器可以在两个或多个电阻态之间发生转变,并且这种转变是非易失性的。忆阻器的这些特性,在模拟人类大脑神经突触的功能方面展现了巨大潜力^[6]。在忆阻器发现的启发下,忆容器(Memcapacitor)和忆感器(Meminductor)也随即被提出并得到证实^[7]。随着这些新型电子器件的出现,利用单一电子器件实现神经突触可塑性和计算功能的模拟引起人们的极大兴趣,形成了一个前沿研究方向——突触电子学(Synaptic Electronics)^[8]。

我们研究组于2015年在国际上首先提出了一种基于磁电耦合效应的基本电路元件——电耦器(transtor)及其相应的非线性记忆元件——忆耦器(memtranstor)^[9]。这些器件分别由电荷和磁通的线

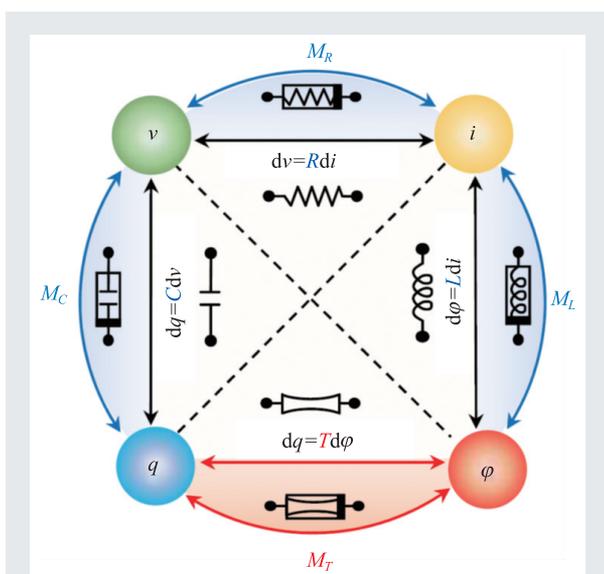


图1 基本电路元件关系图。每一个元件由电压(v)、电流(i)、电荷(q)和磁通(φ)4个基本电路变量中的两两之间的关系来定义。其中包括4个线性元件:电阻器(R)、电容器(C)、电感器(L)和电耦器(T);以及4个非线性记忆元件:忆阻器(M_R)、忆容器(M_C)、忆感器(M_L)和忆耦器(M_T)

性和非线性关系来定义,其状态值用电耦(transmittance, $T=dq/d\phi$)来表示,可以通过测量器件的磁电耦合电压值来给出。结合已知的电阻器、电容器和电感器等基本线性电路元件以及忆阻器、忆容器和忆感器等非线性记忆元件,我们建立了一张完整的基本电路元件关系图(见图1)。近年来,我们基于忆耦器分别成功演示了室温下的两态存储、多态存储和布尔逻辑运算功能^[10-13]。相比于电阻器件,忆耦器由于高度绝缘,因而具有更低的功耗。

在本工作中,我们进一步演示了忆耦器作为人工突触电子器件的潜力。该忆耦器由PMN-PT铁电单晶与两层磁性Ni薄膜组成的三明治结构而构成(图2(a)),其磁电耦合效应通过铁磁层和铁电层界面的应力而实现。图2(b)显示了Ni/PMN-PT/Ni忆耦器在不同极化状态下其磁电耦合电压(V_{ME})随直流偏置磁场大小的变化。可以看出,在零偏置磁场条件下,Ni/PMN-PT/Ni忆耦器的 V_{ME} 极性取决于PMN-PT铁电单晶的极化方向。因此,通过调节PMN-PT的极化方向,可以获得不同的磁电耦合电压 V_{ME} 值。

图3(b)显示了在电压脉冲作用下,Ni/PMN-PT/Ni磁电耦合电压的变化。可见,随着脉冲电压的升高, V_{ME} 从负值($-5\mu\text{V}$)逐渐增加至正值($13\mu\text{V}$)。在反向电压脉冲的作用下, V_{ME} 逐渐降低回 $-5\mu\text{V}$ 。所得到的每一个 V_{ME} 值都具有很好的稳定性和保持性(图3(b)内插图)。这种 V_{ME} 的连续可逆变化与生物学中突触的信息传递行为非常相似。在生物学中,突触是连接前神经元和后神经元的部位(见图3(a))。在外界刺激下,前神经元产生动作电位并经过突触传递至后神经元,并产生兴奋性后神经元电位(EPSP)或抑制性后神经元电位(IPSP),同时突触的权重(即连接强度)发生变化。信息的记忆和学习就是突触权重变化的结果。我们可以把忆耦器

作为一个人工突触器件,其中电耦值相当于突触权重,所产生的 V_{ME} 相当于EPSP或IPSP。外加电压脉冲起到了动作电位的作用。因此, V_{ME} 的增加和减小分别相当于突触权重的增强和抑制,即突

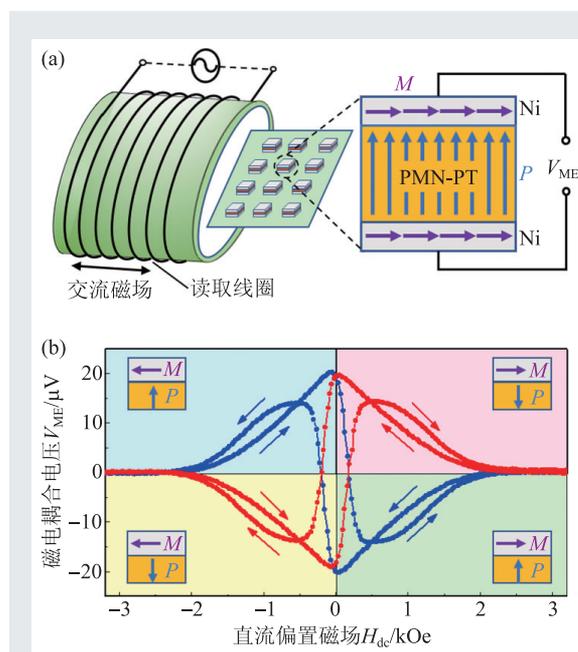


图2 (a)忆耦器的结构及工作原理图;(b)磁电耦合电压(V_{ME})在不同磁化和电极化状态下随直流偏置磁场的变化

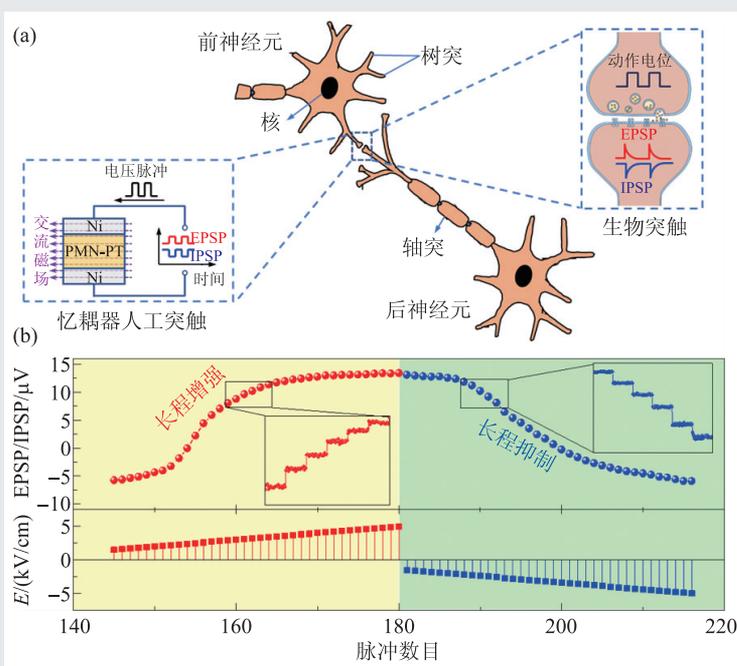


图3 (a)生物学上的神经元和突触以及忆耦器人工突触示意图;(b)兴奋性后神经元电位(EPSP)或抑制性后神经元电位(IPSP)(即磁电耦合电压)随外加电压脉冲序列的变化



ILOPE - 2018 北京光电周
 中国国际激光、光电子及光电显示产品展览会
 China International Lasers, Optoelectronics and Photonics Exhibition

2018.10.10-12
 北京·中国国际展览中心(静安庄馆)



中展集团北京华港展览有限公司
 Tel: +86-10-84600314, 84600384
 Email: ilope-expo@ciec.com.cn



中国光学光电子行业协会
 Tel: +86-10-84321499
 Email: coema@coema.org.cn



触的可塑性。基于这种人工突触的可塑性，并通过设计脉冲电压触发波形，我们实现了脉冲时序依赖可塑性(STDP)这种典型的突触可塑性学习行为。

为了验证忆耦器的学习功能，我们构建了一个简单的 4×4 神经网络，通过采用了随机噪声学习方法，模拟了图片静态和动态学习功能。由于忆耦器所采用的材料都为良好的绝缘体材料，信息的写入和读取过程中的漏电流几乎可以忽略。因此，有望大大降低神经网络的能耗。

这项研究结果最近在 *Advanced Materials* 上发表^[14]。我们的工作在国际上首次利用忆耦器模拟了神经突触可塑性和学习功能，证明了基于忆耦器构建高效神经网络的可行性，为突触电子学和类脑计算技术的开发提供了一种全新的途径。

参考文献

- [1] Backus J. *Comm. ACM*, 1978, 21: 613
- [2] Bi G Q, Poo M M. *J. Neurosci.*, 1998, 18: 10464
- [3] Mead C. *Proc. IEEE*, 1990, 78: 1629
- [4] Indiveri G, Chicca E, Douglas R A. *IEEE Trans. Neural Netw.*, 2006, 17: 211
- [5] Strukov D B, Snider G, Stewart D R *et al.* *Nature*, 2008, 453: 80
- [6] Yang J J, Strukov D B, Stewart D. *Nat. Nanotechnol.*, 2013, 8: 13
- [7] Ventra M D, Pershin Y V, Chua L O. *Proc. IEEE*, 2009, 97, 1717
- [8] Kuzum D, Yu S, Wong H S P. *Nanotechnology*, 2013, 24: 382001
- [9] Shang D S, Chai T S, Cao Z X *et al.* *Chin. Phys. B*, 2015, 24: 068402
- [10] Shen J X, Cong J Z, Chai Y S *et al.* *Phys. Rev. Applied*, 2016, 6: 021001
- [11] Shen J X, Shang D S, Chai Y S *et al.* *Phys. Rev. Applied*, 2016, 6: 064028
- [12] Shen J X, Cong J Z, Shang D S *et al.* *Sci. Rep.*, 2016, 6: 34473
- [13] Lu P P, Shang D S, Shen J X *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 109: 252902
- [14] Shen J X, Shang D S, Chai Y S *et al.* *Adv. Mater.* 2018, 30: 1706717