

Resistive Memory-Based Analog Synapses

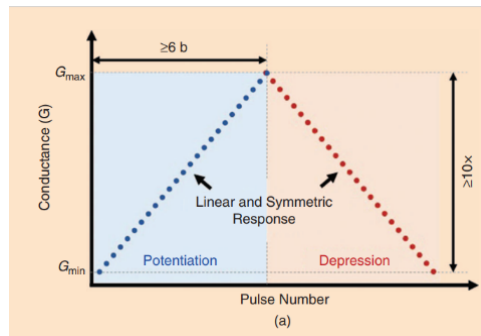
Woo J, Yu S. Resistive memory-based analog synapse: The pursuit for linear and symmetric weight update[J]. IEEE Nanotechnology magazine, 2018, 12(3): 36-44.

- **写作目的:**

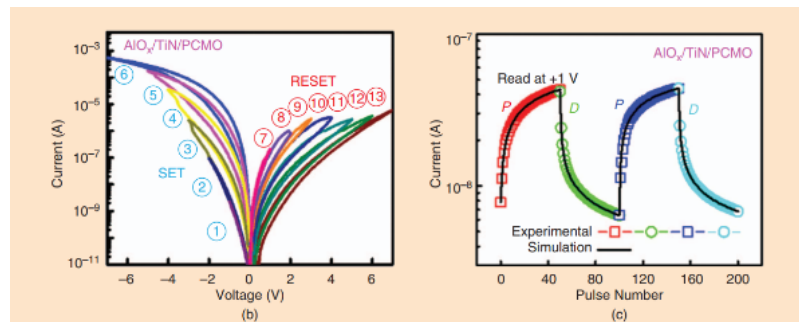
本文简介RRAM在模拟突触，实现神经形态运算方面的应用。重点讨论如何优化RRAM在模拟突触时的对称性与线性。

- **内容记录:**

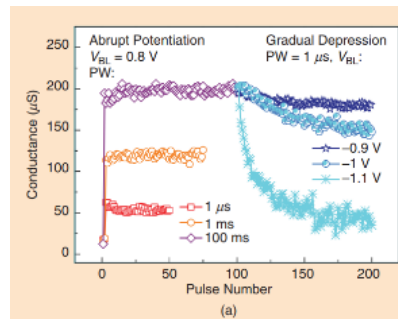
- RRAM实现模拟突触的理想特性：**线性与对称性**:



- **Interface-RRAM**实现模拟突触的特性（不具有良好的对称性与线性）:

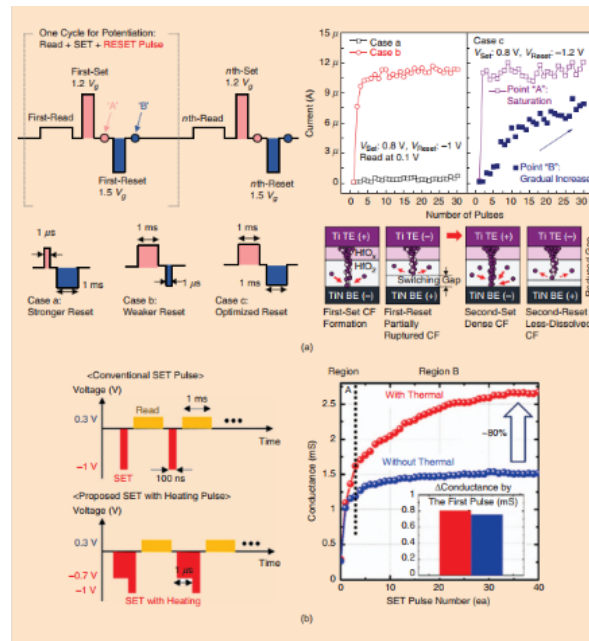


- CF-RRAM对连续脉冲的响应（仅响应第一个Set脉冲，持续响应Reset脉冲）:

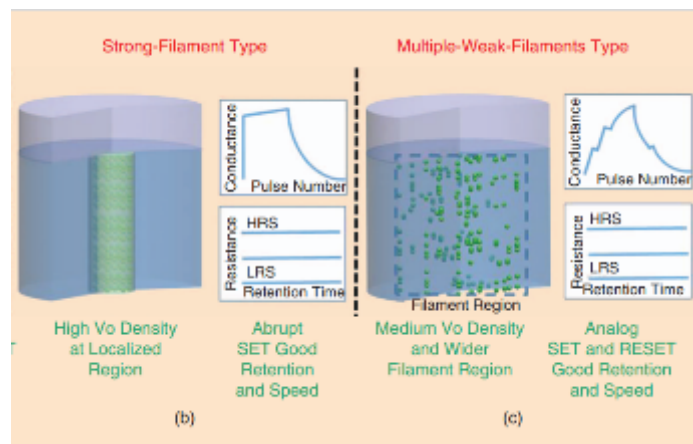


- 通过调制脉冲改变CF-RRAM对连续Set脉冲的响应:

1. 使用Set+Reset脉冲实现电导的线性变化。
2. 在Set过程中附加heating pulse增大电导变化范围。



- 2类CF实现的模拟突触特性（多条弱导电纤维更优）：



批注：

- 模拟突触（Analog Synapses）本质上利用的是RRAM的MLC（但也不完全相同）。
- 线性与对称性的本质含义是希望在Set与Reset过程中，每一脉冲引起的电导变化是相同的。
- CF-RRAM对连续脉冲的响应表明可以直接通过连续的Reset脉冲实现RRAM在Reset过程中的线性。

Analog-Type Resistive Switching Devices for Neuromorphic Computing

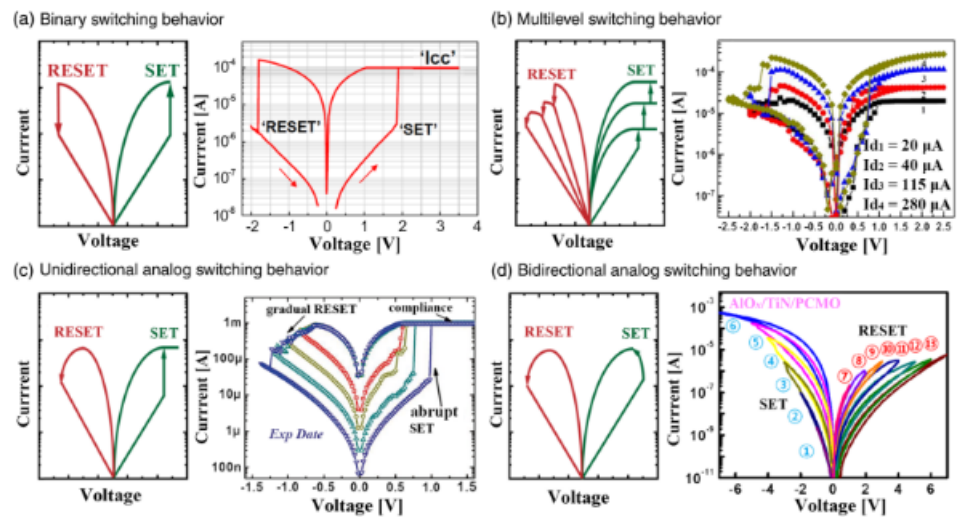
Zhang W, Gao B, Tang J, et al. Analog-type resistive switching devices for neuromorphic computing[J]. physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters, 2019, 13(10): 1900204.

写作目的：

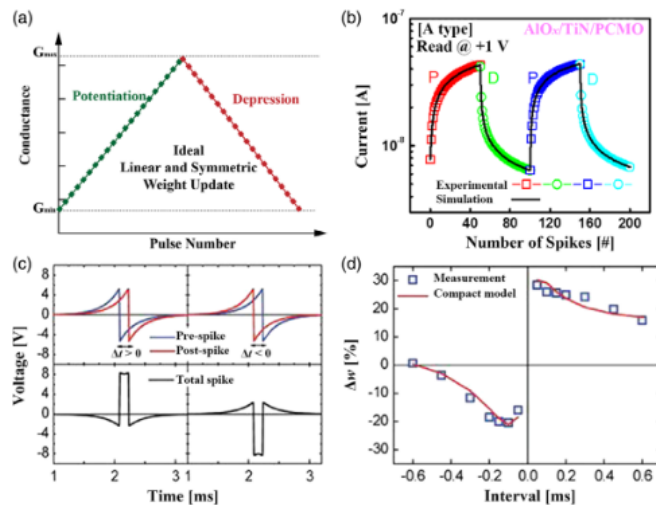
本文主要介绍模拟型RRAM的若干种模拟开关机制，并针对模拟型RRAM在神经形态计算方面的应用提出优化建议。

内容记录：

- 4种类型的RRAM（按SR特性分类）：二进制开关RRAM（用于数据存储）、多位开关RRAM（用于数据存储）、单向模拟开关RRAM、双向模拟开关RRAM：



- 2类用于实现神经形态计算的神经网络：DNN、SNN：

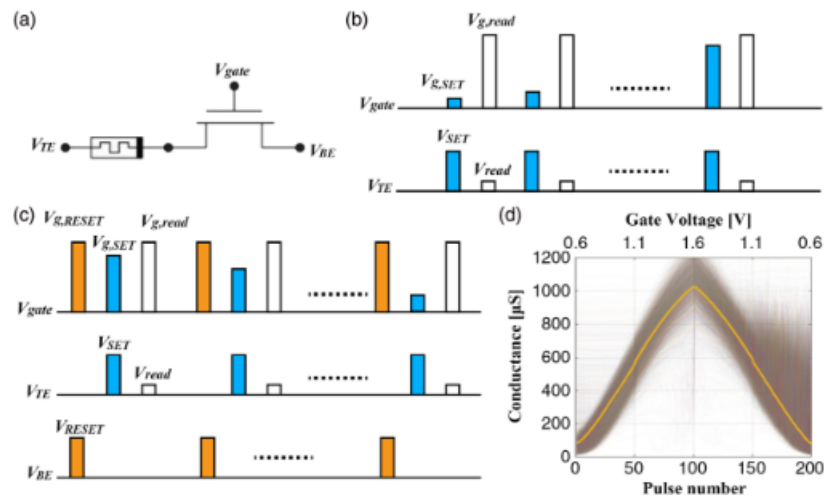


- 改进模拟型RRAM开关特性的4种方法（改进其对称性与线性）：

1. 多条弱导电纤维 (HfO_x)
2. 调制导电纤维的横向延伸 (HfO_2)
3. 双原子通道 (TaO_x)
4. Interface-RRAM ($\text{Al}/\text{PCMO}+\text{N-rich TiN}$)

Methods	Formation/rupture of multiple weak CFs	CF size modulation	Channel composition modulation	Interface switching
Schematic				
Advantages	High speed Low current	Good reliability	High endurance High speed	Most gradual switching
Disadvantages	Noise Relaxation	Low on/off ratio High current	High current	Intrinsic trade-off among the switching voltage, speed, and retention
System-level demonstration	Perceptron for face classification on a 1k array ^[5] Generative adversarial network demonstration on a 1k array ^[105]	Gray scale image recognition on a 24 × 24 RRAM array ^[71]	Multiple-layer network for handwritten digital recognition on an 8k array ^[3] Fully memristive SNN for letters recognition on an 8 × 8 array ^[4]	SNN for handwritten digital recognition on a 1k array ^[66] Neuromorphic speech systems on a 1k array ^[62]

- 使用电流脉冲及可变的栅极电压实现DNN中对应突触权重的线性与对称性：



• 批注:

- **突触可塑性** (synaptic plasticity)：指神经细胞间的连接，即突触，其连接强度可调节的特性，可用模拟型RRAM电导可调节的特性进行模拟。
- CF-RRAM的Set是一个正反馈过程，CF的形成使温度与局部电场增加，进而促进氧空位的增加与CF的形成，这也是导致CF-RRAM模拟开关特性具有非线性的一個主要原因。
- 有关电流脉冲：电流脉冲的大小由外加的MOSFET调制，以Set过程为例，由于 $P = I^2/G$ ，Set过程中电导 G 逐渐变大，因此需要调制使 I 也逐渐变大，以使 P 实现线性变化。因此需要在MOSFET栅极施加逐渐变大的栅极电压。

Synaptic electronics: materials, devices and applications

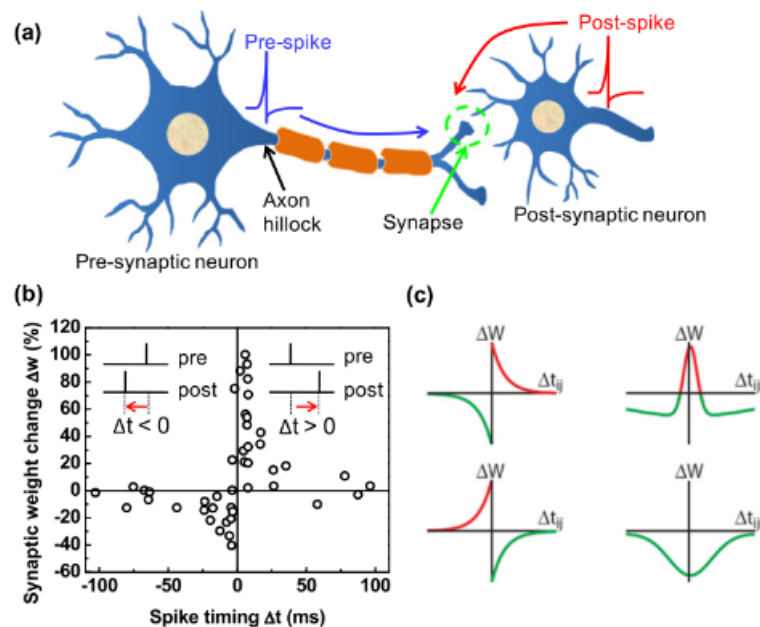
Kuzum D, Yu S, Wong H S P. Synaptic electronics: materials, devices and applications[J]. Nanotechnology, 2013, 24(38): 382001.

• 写作目的:

介绍**突触电子学** (Synaptic electronics) 的相关内容，主要包括：可用于模拟突触的相关器件、突触器件的性能指标、包含突触器件的相关计算应用。

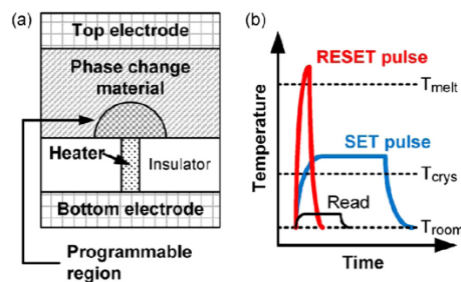
• 内容记录:

- **STDP** (spike-timing-dependent plasticity)：突触权重受前后神经元尖峰脉冲的时间差的调制：

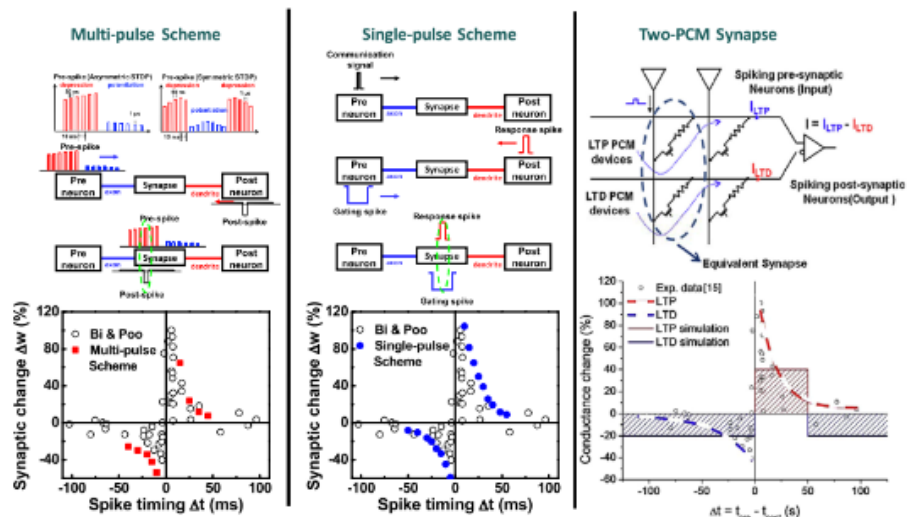


○ 几种用于模拟STDP的器件：PCM、RRAM、CBRAM、FeRAM、FET。

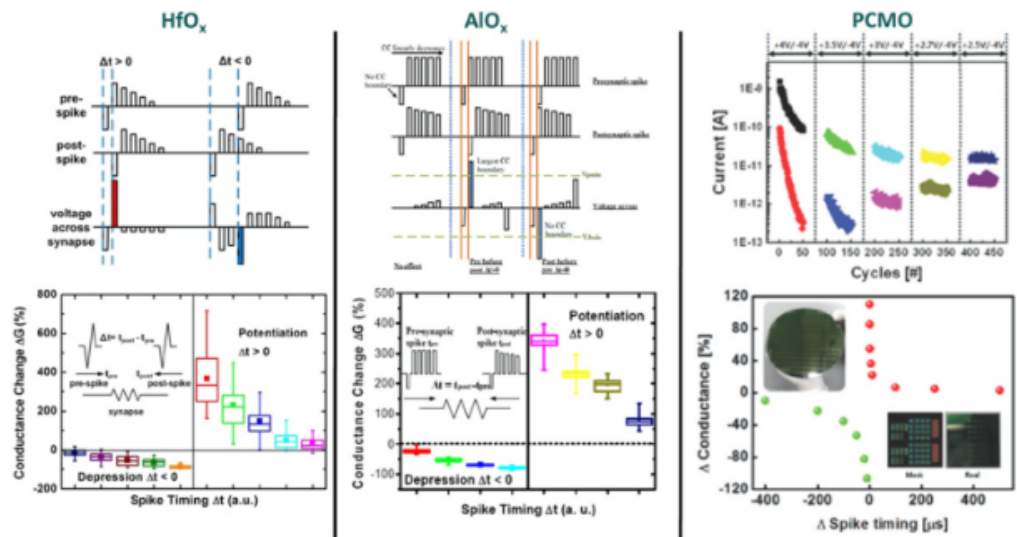
1. **PCM**：温度调制，具有较高的可扩展性、可靠性、耐久性、良好的MLC性能及器件间的均匀性：



PCM实现STDP的几种途径：多脉冲、单脉冲（通过前置的通信信号）、双PCM：



2. **RRAM**：电压/电流调制，具有出色的可扩展性、较高的开关速度、良好的耐久性与**较低**的能耗。下图是几种不同氧化层材料的RRAM实现STDP的方案：



3. **CBRAM**: 电压调制，相当于阳离子驱动的RRAM。

4. **FET**:

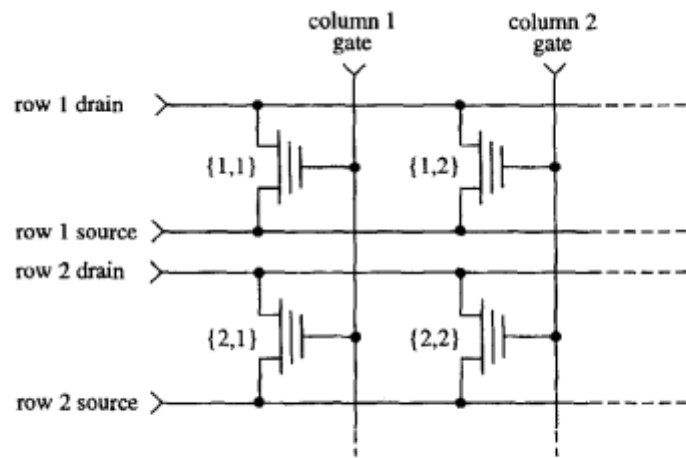


Fig. 11. A 2×2 synaptic array. The row synapses share a common drain wire, so tunneling at one synapse can cause undesired tunneling and injection at other row synapses.

- 用于实现STDP的器件的性能指标: (1)**尺寸**(2)**能耗** (最具挑战性，一般通过最小化编程时间来降低) (3)**运行速度/编程时间** (与能耗权衡) (4)**多级状态** (至少100级) (5)**动态范围** (HRS/LRS) (6)**耐久性**(7)**均匀性**。
- 用于实现STDP的器件的理想性能指标:

Table 2. Desirable performance metrics for synaptic devices.

Performance metrics	Targets
Device dimensions	$< 20 \text{ nm} \times 20 \text{ nm}$
Energy consumption	$< 10 \text{ fJ}$
Operating speed/programming time	$\sim 10 \text{ Hz} / < 1 \text{ ms}$
Multi-level states	20–100
Dynamic range	> 4
Retention/endurance (for LTP and LTD)	$\sim 10 \text{ years} / 3 \times 10^9 \text{ synaptic activity}$

• **批注:**

- 突触通过调整其连接强度来调制其在计算中的权重（突触可塑性）。
- STDP因其简单性、生物学合理性以及良好的运算性能受到广泛的关注。
- 需要注意的一点：用于模拟突触的器件单元通常为**二端器件**（记二端为A,B端）则在A端施加正/负脉冲与在B端施加负/正脉冲是等效的（当然，这基于器件的对称性）。

- PCM实现STDP的单脉冲方案：本质上将STDP中的时间差转化为了脉冲幅度差，给出一系列幅度的连续脉冲（包含Set与Reset），使前后脉冲在不同时间差下对应叠加的脉冲幅度不同。缺点是会有很多额外的无效脉冲，会增加能耗与干扰：

