

## بررسی ساختار فیزیکی ممریستور و شبیه سازی آن

فرحناز ذاکریان<sup>۱</sup>، دکتر ستار میرزا کوچکی<sup>۲</sup>، افسانه شادآرام<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

[f.zakerian@srbiau.ac.ir](mailto:f.zakerian@srbiau.ac.ir)

<sup>۲</sup> تهران، دانشگاه علم و صنعت تهران، پژوهشکده الکترونیک

<sup>۳</sup> تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

### چکیده:

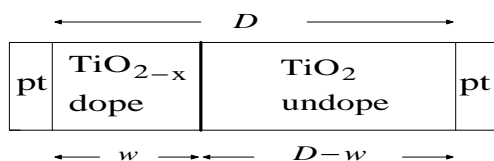
ممریستور، مقاومت حافظه‌داری است که رفتاری آنالوگی دارد یعنی مقاومت آن بین دو حالت با مقاومت حداقل و مقاومت حداکثر قابل برنامه ریزی می‌باشد و مقادیر تا اعمال ولتاژ برنامه ریزی بعدی حفظ و ذخیره می‌شوند؛ این عنصر به عنوان خاصیتی از ماده زمانی خود را نشان خواهد داد که از مواد و دستگاهی در ابعاد نانومتر استفاده شود. مداری که شامل ممریستور باشد، می‌تواند مزایایی چون کارایی بهتر، تعداد اجزای کمتر و در مقابل، سطح تراشه و میزان مصرف انرژی کمتر را هم زمان داشته باشد بنابراین در این مقاله با توجه به فواید ممریستور به بررسی جزئیات رفتار این عنصر با تغییر پارامترهای آن مانند فرکانس، ولتاژ ورودی، تغییرات مقاومت  $R_{ON}$ ،  $R_{OFF}$  با کمک مدلی که برای شبیه سازی طراحی شده است پرداخته می‌شود.

**کلمات کلیدی:** لایه نازک، ممریستور، ساختار فیزیکی، شبیه سازی مداری

### ۱. مقدمه:

این عنصر به عنوان خاصیتی از ماده زمانی خود را نشان خواهد داد که از مواد و دستگاهی در ابعاد نانومتر استفاده شود. هر چه پژوهشگران با دستگاه‌هایی در مقیاس کوچکتر کار کنند، بیشتر شاهد رفتارهای عجیب ناشی از اثر ممریستور در این دستگاه‌ها خواهند بود [۳]. ممریستور عنصری است که رفتاری آنالوگی دارد یعنی مقاومت آن بین دو حالت با مقاومت حداقل و مقاومت حداکثر قابل برنامه ریزی می‌باشد و مقادیر تا اعمال ولتاژ برنامه ریزی بعدی حفظ و ذخیره می‌شوند. مداری که شامل

چهارمین عنصر اصلی مدار (ممریستور) به صورت تئوری در سال ۱۹۷۱ مطرح شد [۱] ولی به صورت فیزیکی ساخته نشد تا اینکه در سال ۲۰۰۸، استنلی ویلیامز (S. Williams) و همکارانش در شرکت هولت پاکارد (HP) ممریستور را در مقیاس نانو ساختند [۳]، [۲] و به این ترتیب ممریستور به صورت کامل معرفی گردید.



شکل ۱: مدل فیزیکی ممریستور

مقاومت کلی عنصر، معادل مجموع دو مقاومت متغیر سری می‌باشد که هر دو وابسته به عرض  $w$  و مقدار  $R_{ON}, R_{OFF}$  می‌باشند:

$$M(x) = R_{ON}(x) + R_{OFF}(1-x) \quad (1)$$

$$x = \frac{w}{D}, \quad 0 \leq x \leq 1$$

$D$  طول کل و  $w$  طول متغیر قسمت ناخالص شده و

$x$  نسبت طول ناحیه‌ی ناخالص شده به کل طول ممریستور است.

$R_{ON}$ ، مقاومتی است که در آن کل ناحیه‌ی  $D$  ممریستور، آلایش شده باشد ( $w=D$ ) و  $R_{OFF}$ ، مقاومت ممریستور در حالتی است که کل ناحیه آلایش نشده باشد، یعنی تمام قطعه را خالص (ذاتی) فرض کنیم ( $w=0$ ).

با اعمال ولتاژ  $V(t)$  به ممریستور، مرزین دو ناحیه‌ی آلایش شده و نشده، جابجا شده و باعث تغییر اندازه مقاومت معادل آن می‌شود:

$$V(t) = (R_{ON}(x(t)) + R_{OFF}(1-x(t))) i(t) \quad (2)$$

$V(t)$  ولتاژ دو سر پایانه ممریستور،  $i(t)$  جریان عبوری از آن می‌باشد.

ممریستور باشد، می‌تواند مزایایی چون کارایی بهتر، تعداد اجزای کمتر و در مقابل، سطح تراشه و میزان مصرف انرژی کمتر را هم زمان داشته باشد [۲]، [۴].

با کمک این عنصر می‌توان کامپیوترهایی با مصرف کم، RAMهایی که با قطع برق اطلاعات در آن‌ها باقی بماند، حافظه‌هایی که ۱۰۰۰ بار سریعتر از دیسکهای مغناطیسی کنونی کار میکنند؛ را ساخت. از همه مهمتر استفاده آن در سیستم‌های پیشرفته‌ی هوش مصنوعی است [۵]، [۶].

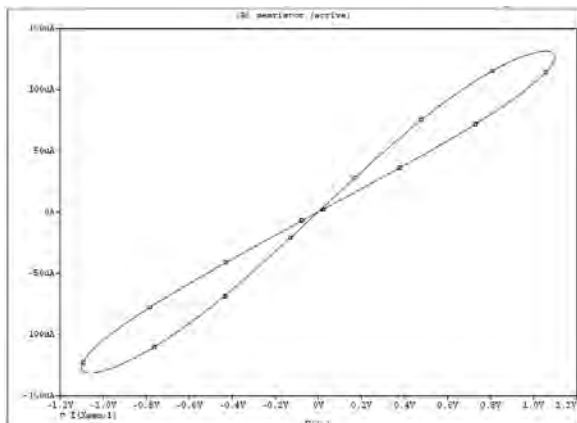
با توجه به ویژگی‌ها و کاربردهای ذکر شده ممریستور و برای آنکه بتوانیم بهره‌برداری مناسبی از این عنصر داشته باشیم لازم است ساختار فیزیکی و عملکرد آن در شرایط مختلف کاملاً بررسی و مشخصات آن استخراج شود.

در این مقاله ابتدا ساختار و روابط حاکم بر نمونه‌ی ساخته شده این عنصر مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس رفتار این قطعه در شرایط مختلف با کمک مدل که برای شبیه‌سازی طراحی شده است ارزیابی می‌شود.

## ۲. بخش تجربی:

### ۲-۱. ساختار فیزیکی ممریستور

ممریستور از یک فیلم لایه نازک اکسید تیتانیوم  $TiO_2$  دو لایه، با ضخامت  $D$  ساندویچ شده بین دو اتصال نانو سیم پلاتین تشکیل شده است. یک لایه با اکسیژن زیاد ناخالص شده و به نیمه‌هادی با مقاومت کم تبدیل شده است. ناحیه باقی مانده ناخالص نشده و مقاومت زیادی دارد (شکل ۱). [۲]



شکل ۲: منحنی مشخصه  $I-V$  ممریستور حالتی که مرز به دو لبه نمی رسد

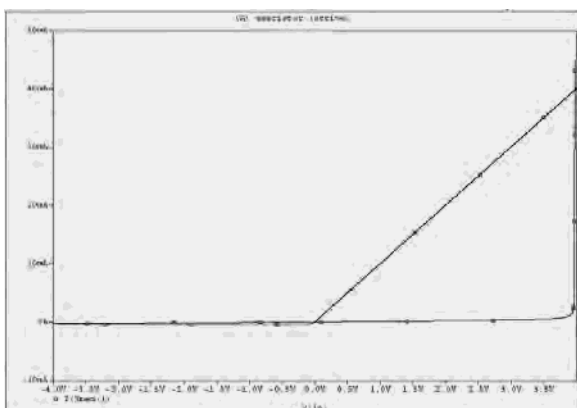
زمانیکه ولتاژ خارجی قطع گردد مرز در همان حالت فعلی خود باقی مانده و مقدار مقاومت ممریستور حفظ می شود که خود گویای حافظه ممریستور می باشد. [۲] [۳]

## ۲-۲. بررسی عملکرد ممریستور با تغییرات پارامترهای آن

در این بخش، با توجه به مدل نرم افزاری تهیه شده از عملکرد ساختار فیزیکی ممریستور به بررسی این

عنصر در شرایط مختلف و رابطه ی آن با تغییرات پارامترهایی مانند دامنه ولتاژ ، فرکانس و... پرداخته می شود.

## ۲-۲-۱- شبیه سازی ممریستور براساس تغییرات ولتاژ ورودی



شکل ۳: منحنی مشخصه  $I-V$  ممریستور زمانی که مرز به دو لبه میرسد

حرکت مرز در ممریستور بارزترین مشخصه ی رفتار ممریستور است که جابجایی آن با تغییرات دامنه ی ولتاژ اعمالی رابطه ی مستقیم دارد. تغییرات حرکت مرز را با اجرای مدل طراحی شده، در مقدار ولتاژهای مختلف بررسی کرده و با مقایسه آن ها می توان نتیجه گرفت که حرکت مرز با افزایش ولتاژ در حال نزدیک شدن به دو لبه ی صفر و یک می باشد (شکل ۲) تا اینکه در ولتاژهای بالا مرز به دو لبه رسیده و در این حالت می توان از آن به عنوان سوئیچ استفاده کرد. (شکل ۳)

## ۲-۲-۲- شبیه سازی ممریستور براساس تغییرات فرکانس ولتاژ ورودی

برای بررسی رابطه‌ی ممیستور و تغییرات فرکانس ولتاژ ورودی، فرکانس را از مقادیر ۱۰ هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز تغییر داده و ممیستور را با مدل مورد نظر شبیه‌سازی کرده وبا توجه به شواهد می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش فرکانس، اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان ممیستور کاهش می‌یابد و منحنی مشخصه  $i-v$  آن تبدیل به یک خط شده و حالت هیستریزس خود را از دست می‌دهد و رفتاری مانند یک مقاومت معمولی از خود نشان می‌دهد. (شکل ۴)

شکل ۴: نشان دهنده‌ی منحنی مشخصه‌ی ممیستور در مقدار ولتاژ

۱.۱ ولت و فرکانس: الف) ۱۰ هرتز ب) ۱۰۰ هرتز

ج) ۱ کیلو هرتز د) ۱۰ کیلوهرتز می‌باشد

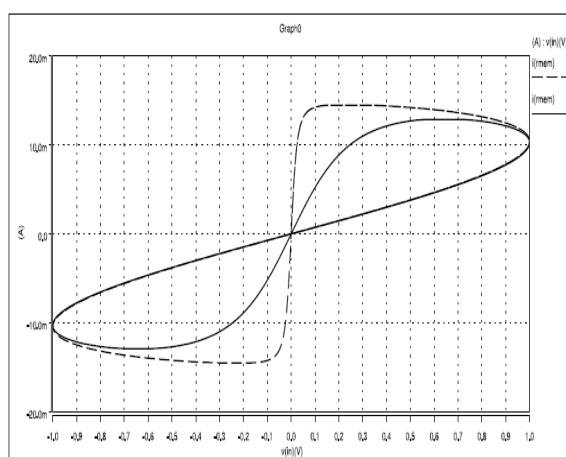
## ۲-۳- شبیه‌سازی ممیستور براساس تغییرات

### مقاومت $R_{ON}$

تغییر  $R_{ON}$ ، محدوده‌ی مقدار تغییرات مقاومت ممیستور را تغییر می‌دهد (معادله‌ی ۱).

مدل را با تغییر این مقاومت در مقادیر متفاوت شبیه سازی کرده و مشاهده شد که منحنی مشخصه  $i-v$  ممیستور در شیب قسمتی از منحنی، که نشان‌دهنده‌ی  $R_{OFF}$  می‌باشد، بر هم مماس بوده و منحنی

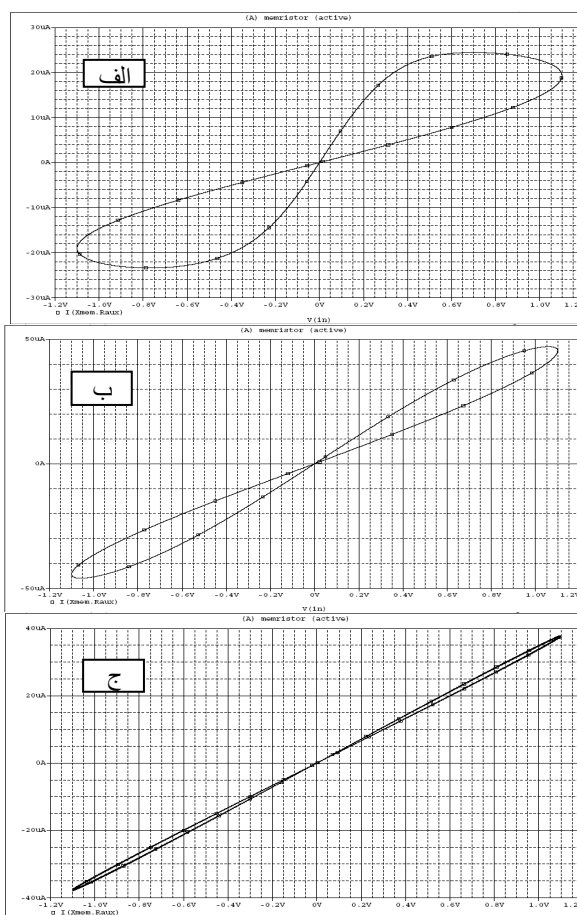
ها روی هم قرار گرفته‌اند اما در شیب  $R_{ON}$  با هم متفاوت می‌باشند. (شکل ۵)



شکل ۵: مقایسه‌ی منحنی مشخصه‌ی  $i-v$  ممیستور در مقاومت‌های

$R_{ON}=1.8\Omega$  (خط چین) و  $R_{ON}=18\Omega$  (خط توپر) با ولتاژ

اعمالی ۱ ولت و فرکانس ۱۰۰ هرتز و  $R_{OFF}=2.9K\Omega$



تغییرات فرکانس نیز عامل چشمگیری در خاصیت اصلی ممریستور یعنی حالت هیستریزیس آن دارد و همچنین تغییرات مقاومت  $R_{OFF}$  و  $R_{ON}$  نیز بر شیب منحنی  $i-v$  ممریستور تاثیر می‌گذارد که تمام این پارامترها و رابطه آن‌ها با رفتار ممریستور در این مقاله با مدل طراحی شده از ممریستور شبیه سازی و بررسی شد.

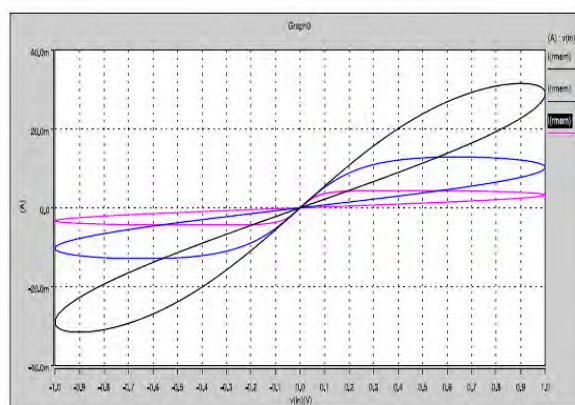
## ۲-۲-۴- شبیه سازی ممریستور براساس تغییرات

### مقاومت $R_{OFF}$

با توجه به آن که تاثیرات  $R_{OFF}$  طبق رابطه‌ی ۱ بر میزان جریان داخل ممریستور چشمگیر می باشد، بنابراین شبیه سازی را که با تغییرات  $R_{ON}$  انجام شد نیز با تغییر  $R_{OFF}$  بر روی مدل اجرا نموده و مشاهده شد که شیب منحنی مقاومت‌های  $R_{OFF}$  بر روی هم منطبق نمی‌باشد اما در شیب  $R_{ON}$  روی هم قرار گرفته‌اند. (شکل ۶)

## ۴. منابع:

1. L.O. Chua, "Memristor - the missing circuit element", IEEE Trans. Circuit Theory, 1971.
2. R.S.Williams, "How we found the missing memristor", IEEE Spectrum, 12/01/2008
3. D.B. Strukov, G.S. Snider, D.R. Stewart, and R.S. Williams, "The missing memristor found", Nature (London) 453, 2008
4. Julien Borghetti, Zhiyong Li, Joseph Straznick and R.S.Williams, "A hybrid nanomemristor/transistor logic circuit capable of self-programming" PNAS, vol. 106, no. 6, 1699-1703. February 10, 2009
5. J. Joshua Yang, Matthew D.Pickett, "Memristive switching mechanism for metal/oxide/metal nanodevices", Nature nanotechnology, vol3, July 2008
6. Bernabé Linares-Barranco, Teresa Serrano-Gotarredona, "Memristance can explain Spike-Time-Dependent-Plasticity in Neural Synapses", Nature Precedings, 2009.



شکل ۶: مقایسه‌ی منحنی‌های مشخصه‌ی  $i-v$  ممریستور با ولتاژ

اعمالی ۱ ولت، فرکانس ۱۰۰ هرتز و  $R_{ON}=18\Omega$

در مقاومت‌های  $R_{OFF}=290\Omega$  (خط سیاه)،  $R_{OFF}=2.9K\Omega$  (خط آبی)،  $R_{OFF}=29K\Omega$  (خط صورتی)

## ۳. بحث و نتیجه گیری:

با توجه به بررسی‌های انجام شده در مورد ویژگی‌های ممریستور می‌توان گفت که این عنصر در هر ولتاژی رفتار خاصی دارد و با توجه به نوع استفاده و میزان ولتاژ مدار باید نوع ممریستور را انتخاب کرده و طراحی نمود.

