

2 ممریستور مقاومتی (غیر هادی)

قبل از ظهور ممریستور مقاومتی (غیر هادی)، مواد مقاومتی (غیر هادی) به طور گسترده در حافظه‌های با دسترسی تصادفی مقاومتی (غیر هادی) (ReRAM) استفاده شده بودند [25-27]. عملکرد ذخیره سازی (حافظه ای) ReRAM با یک رفتار فیزیکی ذاتی مشاهده شده در ReRAM یعنی سوئیچینگ مقاومتی (غیر هادی) محقق می شود. به دلیل سوئیچینگ مقاومتی (غیر هادی)، مواد مقاومتی (غیر هادی) می توانند بین یک حالت مقاومت بالا (HRS) و یک حالت مقاومت پائین (LRS) تحت یک یک محرک الکتریکی خارجی سوئیچ شوند. فرآیند سوئیچینگ از HRS به LRS و ولتاژ سوئیچینگ متناظر معمولاً فرایند SET و Vset نامیده می شود، در حالی که فرآیند گذار از حالت LRS به HRS و ولتاژ سوئیچینگ مورد نیاز فرآیند به ترتیب با RESET و Vreset نشان داده می شوند. ذکر این نکته نیز مفید است که در بیشتر موارد، در طی فرآیند SET جریان ناشی از محرک خارجی به یک ناحیه محلی با رسانایی بالا محدود می شود، در حالی که در طی فرآیند RESET این جریان به طور یکنواخت از ReRAM عبور می کند [28]. این نکته هم باید گفته شود که در مواد مقاومتی (غیر هادی) برق فشار قوی، مانند برخی اکسیدهای فلزات واسطه، معمولاً دو مود سوئیچینگ وجود دارد؛ یعنی سوئیچینگ تک قطبی و سوئیچینگ دو قطبی، همان طور که در شکل 3 نشان داده شده است.

سوئیچینگ تک قطبی امکان یک فرایند سوئیچینگ را می دهد که مستقل از مستقل از پلاریته ولتاژ/جریان است بنابراین، فرآیند SET و RESET با پلاریته سیگنال مشابه حاصل می شود. با این وجود، مود سوئیچینگ دو قطبی منجر به پلاریته سیگنال مخالف بین فرآیند SET و RESET می شود. مقایسه بین شکل 2 و 3، به طور واضح نشان می دهد که مواد مقاومتی (غیر هادی) زمانی که در مود دو قطبی عمل می کنند یک منحنی I-V مشابه با منحنی ممریستور تئوری فراهم می کنند. به همین دلیل، تلاش های تحقیقاتی قابل توجهی اخیراً به توسعه ممریستورها مبتنی بر مواد مقاومتی (غیر هادی) مانند TiO_2 [9 و 11 و 29]، ZnO و TaO_x [31 و 32]، اختصاص یافته اند که منجر به پیدایش برخی از نمونه های ممریستور اولیه مبتنی بر مواد مقاومتی (غیر هادی) شده است.

ساختار ممریستور مبتنی بر مواد مقاومتی (غیر هادی) معمولاً شامل یک عایق محصور شده با دوفلزا است، که موسوم به MIM نیز می باشد، و در شکل 4 نشان داده شده است.

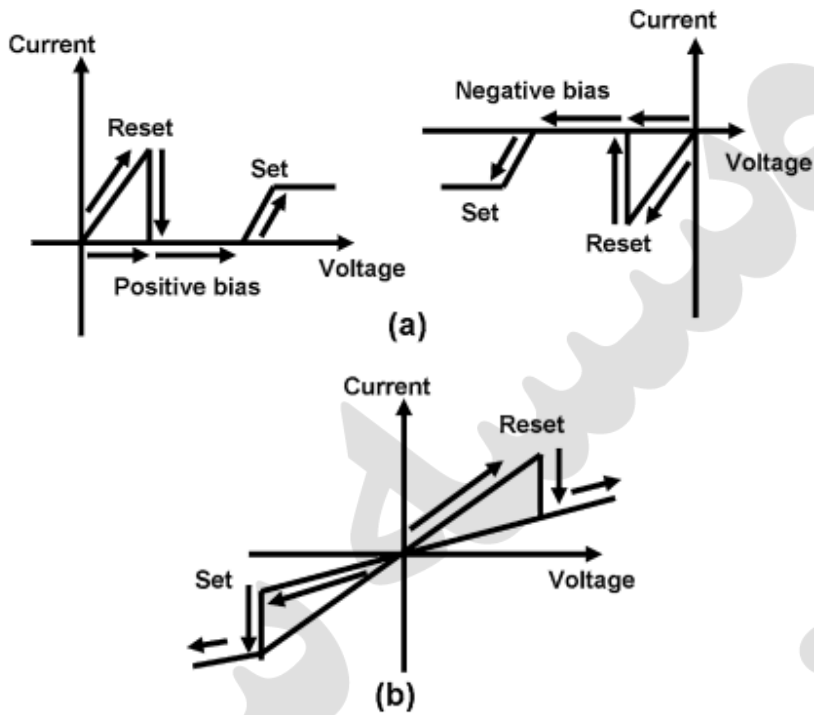
با تغییر دامنه و پلاریته سیگنال اعمال شده به فلزات (در اینجا یعنی الکترودها)، عایق محصور شده می تواند بین حالت ON و OFF جابجا شود به نحوی که عملکرد ممریستوری را محقق نماید. اگرچه چنین پدیده گذار مقاومتی (غیر هادی) به مدت چندین سال است که کشف شده است، مکانیزم فیزیکی مرتبط با آن هنوز به طور مناسبی درک نشده است. امروزه، اثر سوئیچینگ مقاومتی (غیر هادی) القاشده پالس الکتریکی (EPRI) عمومی ترین مکانیزم پذیرفته شده است. جذاب ترین ویژگی EPRI مربوط به وابستگی قوی آن به جهت میدان می باشد، که نشان دهنده این است که مقاومت سیستم می تواند با پالس ولتاژ یا جریان به کار رفته برای تولید پسماند V-اجابجا شود که عملکرد حافظه مقاومتی را تغذیه می نماید.

جدول 1 مقایسه ممریستورهای مختلف

ممریستور	نسبت خاموش/روشن	زمان دسترسی (ns)	نگهداری	تحمیل	مراجع
مقاومتی	2000	~ 10	خیلی زیاد	10^9	[9-11, 28-43]
یلیمری	100	~ 25	نسبتاً زیاد	10^8	[12-14, 44-46]
فروالکتریکی	300	~ 10	نسبتاً زیاد	10^{14}	[15-17, 62]
مغناطیسی	100	~ 100	زیاد	10^3	[18-20]
RTD	-	-	-	-	[21, 22, 54, 55]
اسپینترونیک	5	~ 10	خیلی زیاد	10^{16}	[23, 24, 56-61, 62]

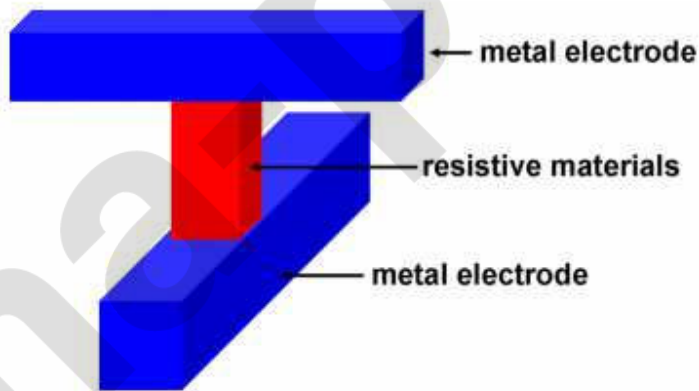
البته ویژگی های مشخص ممریستورهای ار تی دی به ندرت گزارش شده اند، اعداد مراجع برای سهولت و راحتی خوانندگان فراهم می شود.

اگرچه تا آن جا که ما اطلاع داریم ویژگی های خاص ممریستورهای ار تی دی به ندرت گزارش شده اند، اعداد مراجع برای سهولت و راحتی خوانندگان فراهم می شود



شکل ۳ سوئیچینگ مواد مقاومتی در یک مود تک قطبی، و در مود دو قطبی. مسیر سوئیچینگ در ری رم قطبی به پلاریته محرک خارجی وابسته نیست در حالی که مسیر سوئیچینگ در ری رم دو قطبی شدیداً به پلاریته محرک خارجی وابسته است

شکل 3 سوئیچینگ مواد مقاومتی در یک مود تک قطبی و در مود دو قطبی. مسیر سوئیچینگ در ری رم تک قطبی به پلاریته محرک خارجی وابسته نیست در حالی که مسیر سوئیچینگ در ری رم دو قطبی شدیداً به پلاریته محرک خارجی وابسته است



شکل ۴ ممریستور مقاومتی مبتنی بر ساختمان میم

شکل 4 ممریستور مقاومتی مبتنی بر ساختمان MIM

اگرچه راز پنهان در EPRI همچنان کشف نشده است، اتفاق نظر در این رابطه وجود دارد که اثر EPRI موجب تشکیل و پارگی یک رشته سانا (CF) داخل ماده مقاومتی (غیر هادی) خواهد شد [33]. اثر ترموشیمیایی به عنوان یکی از موجه ترین دلایل برای فرضیه CF تلقی شده است [34-36]. مکانیزم ترموشیمیایی فرض می کند که تعداد زیادی از یون های O^{2-} اطراف الکتروود جمع می شود، بنابراین منجر به شکل گیری حفره های اکسیژن می شود. با اعمال یک بایاس منفی به الکتروود بالایی، یون های O^{2-} از الکتروود بالایی رانده می شوند در حالی که حفره های اکسیژنی به سمت آن جذب می شوند. در این حالت، ناخالصی های حفره ای می توانند در میدان الکتریکی از مطلوب ترین مسیرهای نفوذ مانند مرزدانه ها رانده شوند تا یک مسیر رشته ای-مانند با رسانایی الکتریکی بالا را شکل دهند [37]. یکبار که CF ها شکل گرفتند، جریان شریان جریانی که می توانست بر روی رشته های منتجه متمرکز شود می تواند به واسطه حرارت محلی ناشی از جریان شریان یافته متمرکز، موجب یک رشد سریع این رشته ها شود که متناظر با فرآیند SET است. فرآیند RESET فرض می شود که با پارگی حرارتی رشته ها براساس حرارت تولید شده در حضور یک جریان عبوری بزرگ محقق می شود.

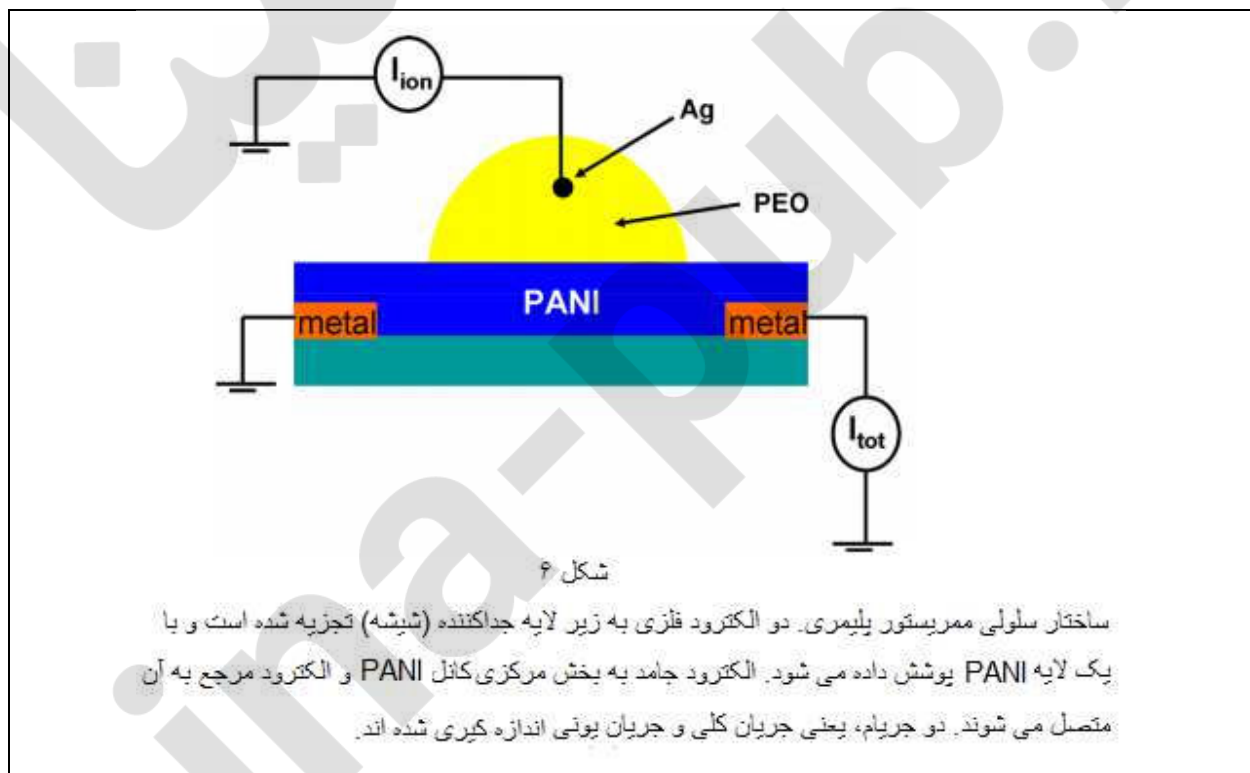
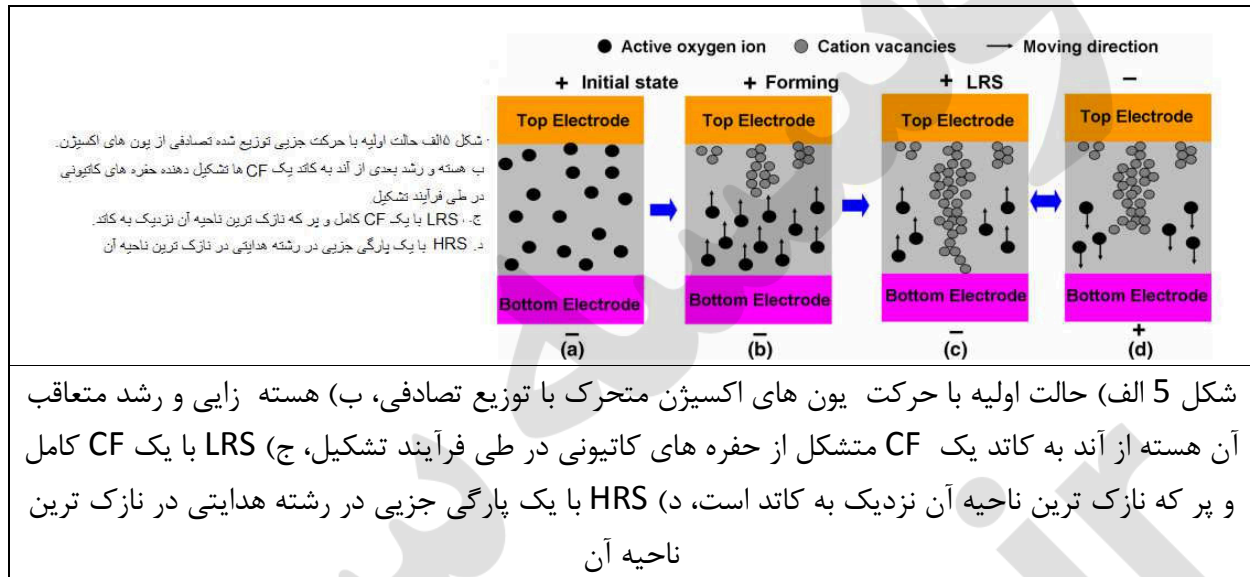
بر عکس اثر ترموشیمیایی، تعبیر دیگر مربوط به رویداد CF به حرکت یون های اکسیژن می باشد که معمولاً نزدیک عیوب (نواقص) شبکه های کریستالی مثل حفره های اکسیژنی و مرز دانه ها ظاهر می شود [28 و 38 و 39]. همان طور که در شکل 5 الف نشان داده شده است، اعمال یک بایاس مثبت به الکتروود بالایی می تواند موجب رانده شدن یون های اکسیژنی به سمت الکتروود بالایی شود که در نتیجه یون های اکسیژنی در آنجا تجمع خواهند داشت. این حرکت یونی می تواند موجب ایجاد حفره های کاتیونی فراوانی شود، همان طور که در شکل 5 ب نشان داده شده است. از آنجا که حفره های کاتیونی که می توانند یک سطح پذیرش نزدیک باند ظرفیت ایجاد کنند، منبع حامل های حفره ای در نیمه هادی ها هستند، ممکن خواهد بود تا این حفره های کاتیونی به تازگی ایجاد شده به هسته نیمه هادی CF ها منتقل شود. در نتیجه این هسته ها با کمک میدان الکتریکی رشد خواهند داشت تا یک CF توسعه دهنده کل ضخامت متوسط ذخیره سازی را تشکیل دهند (شکل 5 ج)، و در نهایت سلول حافظه می تواند به LRS برسد. به دلیل این حقیقت که CF واقعا از یک آند به کاتد رشد پیدا می کند، نازک ترین ناحیه CF انتظار می رود که

نزدیکی کاتد جای داشته باشد [28]. به عنوان یک نتیجه، حرارت ژولی بیشتری در بخش نازک تر CF جمع خواهد شد زمانی که الکتروود بالایی به صورت منفی بایاس شود. تحت این شرایط، یون های اکسیژن در نازک ترین بخش CF به طور شدید به سمت الکتروود پائینی شتاب می گیرد و سپس در واسط الکتروودی ذخیره سازی میانی/زیرین یا در مرزدانه الکتروود زیرین به دام می افتد. این حرکت می تواند تمرکز حفره های کاتیونی در نازک ترین بخش CF را تخریب نماید و بنابراین منجر به پارگی CF گردد، همان طور که در شکل 5 نشان داده شده است. سلول حافظه متعاقبا به حالت HRS سوئیچ خواهد شد.

علاوه بر اثر ترموشیمیایی و اثر یونی، مکانیزم های ممکن دیگری که دربرگیرنده گذار فلز-نیمه هادی [29و40]، گذر فاز TiO_2 آمورف TiO_2 با رسانش گرمایی و ناحیه شکست [29و41]، افزایش و کاهش یافتن نواحی سد شاتکی با انتقال اکسیژن حجیم یا واسط [29و42]، و حرارت هدایتی ایجادکننده حمل جانبی رشته های هدایتی [29و43]، پیشنهاد شده اند تا برای سوئیچینگ مقاومتی (غیر هادی) ممریستور مقاومتی (غیر هادی) به حساب آیند. این مکانیزم های سوئیچینگ مختلف احتمالا به دلیل این حقیقت است که مواد مقاومتی (غیر هادی) به طور متفاوت در بین پژوهش های ذکر شده ساخته و اندازه گیری شده اند. بنابراین، این بسیار محتمل خواهد بود تا نتیجه بگیریم که رفتار سوئیچینگ ممریستور مقاومتی (غیر هادی) با یک اثر مشخص القا نمی شود، بلکه یک نتیجه از یک ترکیب همه مکانیزم های سوئیچینگ ممکن معرفی شده فوق خواهد بود.

از آنجا که مواد مقاومتی (غیر هادی) به دلیل کاربرد های بالقوه خود برای ReRAM به مدت چندین دهه ارزیابی شده اند، اطلاعات و دانش عظیمی در خصوص اثرات الکتریکی، حرارتی و مکانیکی اولیه آن ها تا کنون جمع آوری شده اند. با کمک این گنجینه دانشی، دستگاه های ممریستور مقاومتی (غیر هادی) توجه بیشتری را به نسبت سایر ممریستورها در چشم انداز طراحی آزمایشگاهی و آنالیز تئوری به خود جلب کرده اند. با این وجود، در ترم های معنی اولیه "ممریستور"، یک دستگاه شبه غیرخطی است. با این وجود، این در مقابل مشخصه ReRAM است که منحنی I-V آن معمولا شامل یک بخش هدایتی اهمی است. بنابراین، ReRAM نمی تواند به شدت به عنوان یک

ممریستور شناسایی شود. علی رغم چنین تفاوتی، دانشمندان همچنان معتقدند که حداقل همگرایی بین آنها و برخی محققانی که حتی این دو ترم را به جای یکدیگر استفاده می کنند، وجود دارد [29].



شکل 6 ساختار سلولی ممریستور پلیمری. دو الکترود فلزی به زیر لایه جداکننده (شیشه) تجزیه شده است و با یک لایه PANI پوشش داده می شود. الکترود جامد به بخش مرکزی کانال PANI و الکترود مرجع به آن متصل

می شود. دو جریان یعنی جریان کلی و جریان یونی اندازه گیری شده اند.

3 ممریستور پلیمری

عملکرد ممریستوری دستگاه پلیمری با سوئیچینگ رسانایی الکتریکی لایه پلیمر بین یک حالت شدیداً مقاومتی (غیر هادی) (که حالت کاهش یافته هم نامیده می شود) و یک حالت شدیداً رسانا به واسطه واکنش شناخته شده اکسایشی کاهش یافته حاصل می شود. ساختار ممریستور پلیمری به طور شماتیک وار در شکل 6 نشان داده شده است.

یک لایه پلیمر هادی نازک (پلی آنیلین، PANI) به یک زیرلایه جامد جداکننده با دو الکتروود فلزی از قبل شکل گرفته تجزیه می شود. یک لایه اضافی اکسید پلی اتیلن آلائیده شده پرکلرات لیتیومی روی ناحیه مرکزی لایه PANI شکل داده می شود چنان که شار یونیک را در (و خارج از) لایه PANI در وسط فراهم می کند. چنین واسطه PANI-PEO ناحیه اصلی است که واکنش اکسید کاهش یافته در آن روی می دهد و بنابراین ناحیه فعال نامیده می شود. به علاوه، از آنجا که واکنش اکسید کاهش یافته به پتانسیل مرجع نیاز دارد، یک الکتروود سوم یعنی سیم نقره ای نیاز است تا در لایه PEO ضمیمه شود تا به عنوان یک الکتروود مرجع رفتار نماید.

اصول عملکرد ممریستور پلیمری در شکل 7 نشان داده شده است.

همان طور که از شکل الف 7 می توان دید، در حالتی که یک تحریک مثبت به دستگاه عایق اولیه اعمال شود (ناحیه آبی) برخی نواحی داخل ناحیه فعال پتانسیل بیشتری از پتانسیل اکسیداسیون نشان می دهند. در این حالت، لایه PANI می تواند از حالت مقاومتی (غیر هادی) به حالت هادی تنها در این ناحیه محدود شده جابجا گردد. این نکته باید تاکید شود که پروفایل پتانسیل منتهی در ناحیه فعال می تواند با فرآیند انتقال تغییر داده شود [12]. به عنوان یک نتیجه، پتانسیل داخل برخی نواحی جداکننده قبلی ممکن است به پتانسیل اکسیداسیون برسند، و بنابراین برای این مناطق رسانایی را فراهم نمایند. به علت دلیل فوق، یک حرکت تدریجی مرز ناحیه هدایتی می تواند مشاهده شود، که موجب افزایش تغییرات نسبتاً آرام رسانایی می شود. در حالتی که یک تحریک منفی به دستگاه هادی اولیه (ناحیه سبز) اعمال شود، کل ناحیه اکتیو می تواند در معرض کاهش پتانسیل قرار گیرد، همان طور که در شکل 7 ب

نشان داده شده است. این می تواند امکان کاهش و انتقال PANI به حالت جداکنندگی را فراهم نماید تا به طور همزمان در کل ناحیه فعال صورت گیرد [12]، در نتیجه یک نرخ سوئیچینگ سریع را القا می نماید. بنابراین به وسیله تنظیم پتانسیل واقعی ناحیه فعال نسبت به پتانسیل مرجع، یون Li^+ می تواند یا به لایه PANI تزریق شود و یا از آن برداشته شود، و در نتیجه دستگاه پلیمری با عملکرد ممریستوری فراهم نماید [12 و 44 و 46].

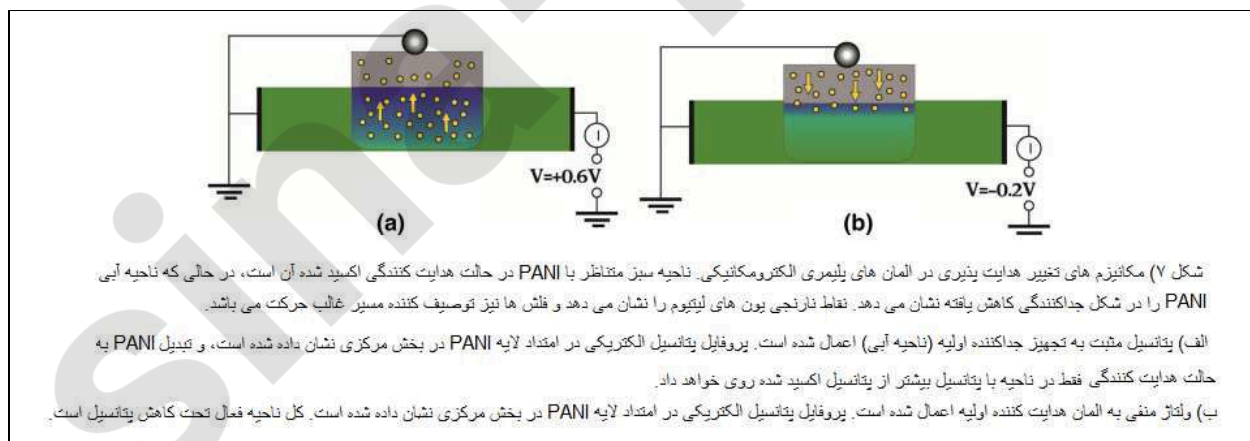
در مقایسه با ممریستور مقاومتی (غیر هادی)، ممریستور پلیمری در یک روش که بیشتر شبیه به ممریستور تئوری است عمل می کند، چراکه مقاومت آن واقعا با انتقال شارژ اداره می شود. به علاوه، این پدیده که رسانایی PANI در حالتی که در معرض تحریک سیگنال مثبت است به تدریج افزایش می یابد، بسیار شبیه به عملکرد سنپتکی (آموزش) در سیستم های بیوزیستی واقعی است، که در Hebbian توصیف شده است [14]. کاهش رسانایی PANI برای مقدار بایاس منفی مشخص نیز یک نقش اساسی در کاربرد شبکه ایفا می نماید. با در نظر گرفتن یک شبکه پیچیده که شامل ممریستورهای پلیمری طراحی شده است، مسیرهای سیگنالی فراوانی بین ترمینال ورودی و خروجی وجود خواهد داشت. در این حالت، استفاده مکرر از این شبکه برای مدت زمان طولانی می تواند موجب ایجاد رسانایی کامل در ممریستورها شود، و بنابراین عملکرد مقاومتی (غیر هادی) دستگاه را مختل می نماید. تحت چنین شرایطی، کاربرد متناوب کوتاه مدت بایاس منفی می تواند به طور موثری از اشباع سیستم ممانعت نماید [12 و 14]. به علاوه، این حقیقت که کاربرد نسبتا طولانی بایاس منفی بین ترمینال ورودی و خروجی می تواند مسیر سیگنالی ترجیحی را مختل نماید، می تواند برای تقلید از رفتار که "یادگیری نظارت" نامیده می شود، استفاده گردد [12].

اگرچه یک مدار نسبتا ساده مبتنی بر ممریستور پلیمری طراحی شده بود تا هم یادگیری نظارتی و هم یادگیری غیرنظارتی شبکه ها را محقق نماید، این نکته باید اعلام شود که شبکه پیچیده واقعی ابداع شده برای اتخاذ تصمیم ممکن است شامل یک تعداد بزرگ المان هایی که به مدت زیادی در حال کار هستند باشد (یعنی فراتر از هزار سیکل یادگیری)، چنان که رفتار یادگیری را فراهم نماید. به عنوان یک نتیجه، برخی الزامات سختگیرانه به خواص فیزیکی ممریستور پلیمری تحمیل شده است. نخست، نسبت رسانایی در هدایت کنندگی اکسیدشده و حالات

جداکنندگی کاهش یافته باید تا حد ممکن بالا باشد. ثانیاً، مقدار مطلق رسانایی ممریستور در حالت اکسیدشده باید نسبتاً بالا باشد. مهمتر از اینها، ممریستور باید پایداری بالایی داشته باشد. متأسفانه، عملکرد تکنولوژی های ممریستوری پلیمری فعلی، براساس دانش مولفین، پائین تر از این الزامات است و به موجب آن تلاش برای فناوریهای نوآورانه تر نیاز است تا به طور وسیع تر عملکرد ممریستور پلیمری بهبود داده شود.

4 ممریستور فروالکتريک

این به خوبی مشخص شده است که پلاریزاسیون مواد فروالکتريک زمانی که در معرض یک میدان الکتريکی خارجی هستند می تواند بین دو حالت مجزا جابجا شود. بنابراین، این دو وضعیت پلاریزاسیون مخالف می تواند برای نشان دادن بیت های باینری 0 و 1 مود استفاده قرار گیرد، و در نتیجه منتج به اختراع حافظه با دسترسی تصادفی فروالکتريک گردید (FeRAM). به دلیل عملکرد ذخیره سازی غیر فرار آن، مواد فروالکتريکی به طور گسترده در شناسایی فرکانس رادیویی (RFID)، کارت های هوشمند، کارت شناسایی ID، و سایر کاربردهای مرتبط با حافظه ها مانند مسیر راه آهن، دستگاه های خودرویی، و کاربردهای الکترونیک داخلی استفاده شده است [47و48]. علاوه بر FeRAM، کشف این موضوع که پدیده فروالکتريکی می تواند در یک لایه نازک تا مقیاس نانومتر حفظ شود، مواد فروالکتريکی را برای کاربرد پیوند تونل الکتريکی (FTJ) جذاب نموده است که معمولاً شامل یک لایه فروالکتريک نازک نانومتر محصور شده با دو الکتروود فلزی است. این حقیقت که جریان تونلی از FTJ با یک میدان الکتريکی خارجی می تواند بین دو حالت غیر فرار از طریق جهتگیری قطبش در ناحیه سد فروالکتريک جابجا شود، مقاومت FTJ را قادر می سازد تا به طور پیوسته تنظیم شود.



شکل 7. مکانیزم های تغییر رسانایی در المان های پلیمری الکترومکانیکی. ناحیه سبز متناظر با PANI در حالت رسانش اکسید شده آن است، در حالی که ناحیه آبی PANI را در شکل جداکنندگی کاهش یافته نشان می دهد. نقاط نارنجی یون های لیتیوم را نشان می دهد و فلش ها نیز توصیف کننده مسیر غالب حرکت می باشند.

الف) پتانسیل مثبت به دستگاه عایق اولیه (ناحیه آبی) اعمال شده است. پروفایل پتانسیل الکتریکی در امتداد لایه PANI در بخش مرکزی نشان داده شده است و تبدیل PANI به حالت هدایت کنندگی فقط در ناحیه با پتانسیل بیشتر از پتانسیل اکسید شده روی خواهد داد.

ب) ولتاژ منفی به المان رسانا اولیه اعمال شده است. پروفایل پتانسیل الکتریکی در امتداد لایه PANI در بخش مرکزی نشان داده شده است. کل ناحیه فعال تحت کاهش پتانسیل است.

در نتیجه، دستگاه FTJ رفتار سوئیچینگ مقاومتی (غیر هادی) غیر فرار و قابل تنظیم و هیسترویک را نشان داده است که مشخصه ممریستیو بودن ممریستور تئوریک را مشابهت می بخشد [15]. تحت چنین شرایطی، مفهوم FTJ مبتنی بر ممریستور اخیرا پیشنهاد به شدت بحث شده است. تا به امروز، ساختمان ممریستور فروالکتریک گزارش شده معمولا از لایه $BaTiO_3$ تجزیه شده به لایه $LaxSryMnO_3$ تشکیل شده است که با دو الکتروود محصور شده است [15 و 16]. شکل 8 چنین شماتیکی را نشان می دهد.

رفتار سوئیچینگ مقاومتی (غیر هادی) ممریستور فروالکتریک طبیعتا به عنوان نتیجه ای از وارونگی پلاریزاسیون دی الکتریک در فروالکتریک لحاظ می شود. این باید گفته شود که برای یک لایه فروالکتریک نازک که با وجود قابلیت حفظ فروالکتریکی، شارژ سطحی در فروالکتریک به طور کامل در فلزات مجاور نمایش نمی شود، بنابراین امکان میدان الکتریکی بی قطبی شده غیر صفر در لایه فروالکتریک را فراهم می نماید. پتانسیل الکترواستاتیکی منتهجه در کنار این میدان قویا به مسیر پلاریزاسیون دی الکتریک بستگی دارد. در این حالت، از آنجا که FTJ معمولا از الکتروودهای فلزی با طول غربالگری مختلف ایجاد شده است، یک پروفایل پتانسیل نامتقارن برای مسیر پلاریزاسیون مخالف تشکیل می شود [49]. این می تواند پتانسیل دیده شده توسط الکترون های انتقالی را تغییر دهد و در نتیجه منجر به تغییر مقاومت شود. با این وجود، یک فرضیه که اخیرا پیشنهاد شده است نسبت سوئیچینگ مقاومتی (غیر هادی) FTJ را به بازتوزیع شدن شارژ میدان-القایی در سطح فروالکتریک-الکتروود نسبت می دهند [16]. این تفسیر

فرض می کند که حرکت و تجمع شارژ در واسط فروالکتریک/فلز تسهیل یافته توسط ساختار ناقص آن نقش بسیار مهمی در تاثیر سوئیچینگ مقاومتی (غیر هادی) بازی می نماید [9 و 50]. اکسید شدن الکتروود فلز می تواند موجب افزایش تشکیل لایه دی الکتریکی پسو با مقدار چگالی حفره اکسیژنی افزایش یافته در بالای واسط فروالکتریک در ساختار هیسترویک FTJ پردازش شده فشار پایه کم گردد. ارتفاع ناحیه سد وابسته به این لایه بزرگتر است از ناحیه سد لایه فروالکتریک و به طور چشمگیری در رفتار مقاومتی (غیر هادی) مشارکت دارد. در این حالت، یک تحریک مثبت به کار رفته در الکتروود بالایی می تواند موجب تجمع جفره های اکسیژنی در واسط فلزی اکسید/فروالکتریک شود که به موجب آن ارتفاع ناحیه سد می تواند به طور موثری کاهش یابد و مقاومت حالت ON نیز می تواند کاهش داده شود. یک بایاس منفی موجب القا اتلاف شارژ تجمع شده در این المان واسط و/یا کاهش اکسید فلزی در المان واسط، سوئیچینگ ساختار هیسترویک به حالت مقاومت بالا می گردد. چنین مکانیزمی در شکل 9 نشان داده شده است.

5 ممریستور مغناطیسی

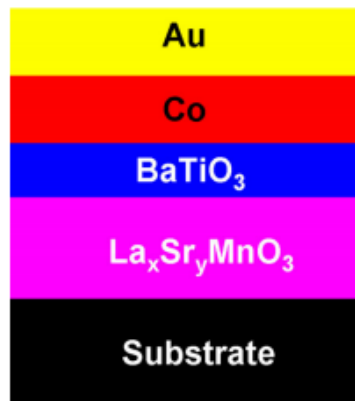
مواد مغناطیسی پروسکایت اخیرا توجه زیادی را جلب نموده اند که عمدتا به دلیل ویژگی های خارق العاده شامل اثر مقاومت مغناطیسی بزرگ، مرتبه شارژ اسپین-مدار زیاد، پلاریزاسیون اسپینی 100 درصدی و جداسازی فاز الکترونیکی ذاتی است [51 و 52]. با این وجود، ظرفیت فراهم کردن خاصیت ممریستوری آن به طور کارکردی تا اخیرا مرموز باقی ماند زمانی که یک ممریستور مبتنی بر $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ بی شکل (آمورف) به طور موفقیت آمیز ساخته شد. همان طور که در شکل 10 نشان داده شده است، ساختار لایه ای این ممریستور مغناطیسی شامل یک لایه نازک a-LSMO محصور شده با دو الکتروود است. الکتروود بالایی از جنس نقره و الکتروود پائینی از جنس پلاتین است که هر کدام به زیر لایه $Ti/SiO_2/Si$ کندوپاش مگنترون فرکانسی رادیویی تجزیه می شود. به طور مشابه با سایر ممریستورها، اثر سوئیچینگ EPRI می تواند در دستگاه های ساخته شده مشاهده شود، و منحنی $I-V$ اندازه گیری شده آزمایشگاهی به طور واضح یک حلقه پسماند باریکش را نشان داده است که در نتیجه نشان دهنده مشخصه ممریستیوی آن است.

مکانیزم سوئیچینگ مقاومتی (غیر هادی) ممریستور مغناطیسی عمدتاً به شکل گیری پل نانویی نقره ای نسبت داده می شود [18]. زمانی که الکتروند نقره ای بالا به طور مثبت بایاس شود، به لطف اختلاف پتانسیل الکترومکانیکی، آند شروع به حل شدن می کند که در نتیجه منجر به تولید یون های کاتیون Ag^+ می شود. با رانده شدن توسط میدان الکتریکی قوی، کاتیون های Ag^+ سرتاسر لایه LSMO حرکت می کند و به الکتروند پلاتینی پائین می رسد که فرآیند خنثی سازی از کاتیون Ag^+ به اتم Ag به دلیل واکنش تجزیه کاتودیک روی می دهد. به عنوان نتیجه، اتم های بیشتری از Ag نزدیک به الکتروند پلاتینی پائینی مشارکت خواهند داشت و در نهایت یک رشته نانویی از الکتروند نقره ای بالا به الکتروند پلاتینی پائینی شکل خواهد گرفت که متناظر با LRS است. در ارتباط با نائل شدن به HRS، الکتروند بالایی به طور منفی بایاس می شود که منجر به حل شدن رشته نانویی نقره ای می شود. توانایی به منظور نمایش حلقه پسماند باریکش تحت فرکانس تحریک بالا با استفاده از ممریستور مغناطیسی نشان داده است [19]. به علاوه، ممریستور مغناطیسی به طور پیوسته مقاومت سیناپس مانند قابل تنظیم و تحمل پایدار (تا 1000 سیکل پالس ست و ریست) و نیز نسبت مقاومت ON/OFF تا 100 را نشان می دهد [20]. این خواص جذاب می تواند به ممریستور مغناطیسی پتانسیل تقلید کردن از سیناپس بیوزیستی را اعطا کند که به عنوان مولفه کلیدی کامپیوتر مغزمانند تلقی می شود.

6 ممریستور دیودی تونل زنی - رزونانس

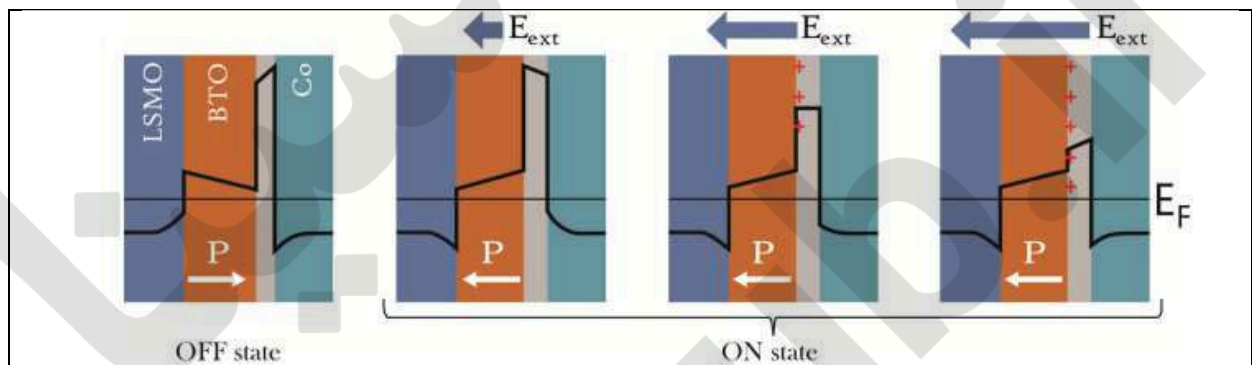
یک RTD یک دیود با ساختار تونل زنی-رزونانسی است که الکترون ها می توانند از برخی حالت های رزونانسی در سطوح انرژی مشخصی تونل شوند. RTD می تواند از مواد نیمه هادی مختلفی مانند ناحیه سد دوگانه، ناحیه سد سه گانه، سیم کوانتومی، و نقاط کوانتومی ایجاد شود [53]. پیکربندی دستگاه RTD با ساختار لایه ای دوبل به طور شماتیک وار در شکل 11 نشان داده شده است.

همان طور که می تواند از شکل 11 دیده شود، دو میله تماسی که به طور سنگین آلائیده شده اند، مواد انرژی-گپ باریک محاط کننده ناحیه امیتر، یک دیوار کوانتومی بین دو ناحیه سد، و یک ناحیه کلکتور وجود دارند. نکته این که



شکل ۸ نمایش سطح مقطع از FTJ استفاده شده برای ممریستور فروالکترونیک

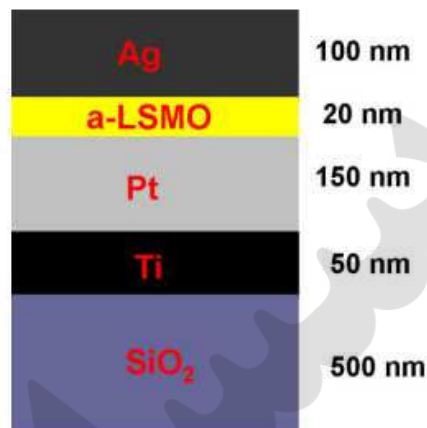
شکل 8 نمایش سطح مقطع از FTJ استفاده شده برای ممریستور فروالکترونیک



شکل ۹. تشریح شماتیک دیگرام ناحیه سد انرژی برای حالت های ON و OFF به عنوان تابعی از میدان الکتریکی خارجی E_{ext} . لایه خاکستری بین لایه های Co و BTO لایه دی الکتریک پسیو CoOx است. تحت یک بایاس مثبت اعمال شده به الکتروود بالایی، حفره های اکسیژنی در واسط CoOx/BTO جمع می شوند، به طور موثری ارتفاع ناحیه سد را کاهش داده و مقاومت حالت ON را کاهش می دهند.

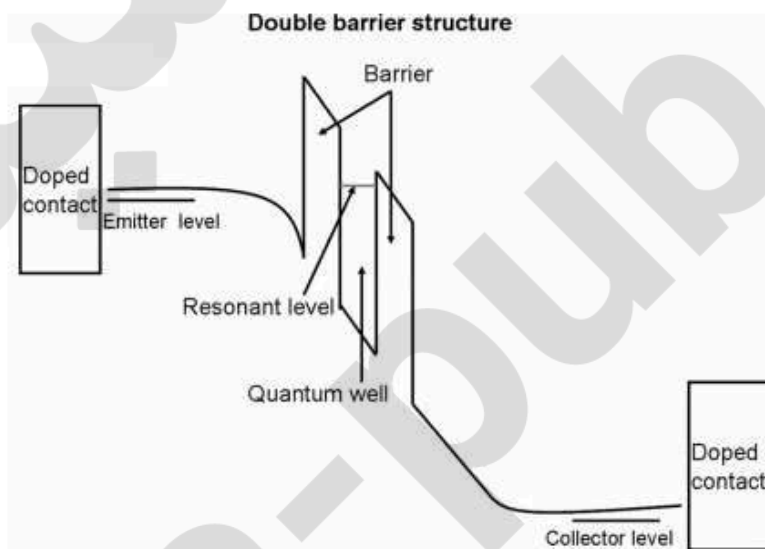
شکل 9. نمایی شماتیک دیگرام ناحیه سد انرژی برای حالت های ON و OFF به عنوان تابعی از میدان الکتریکی خارجی.

لایه خاکستری بین لایه های Co و BTO لایه دی الکتریک پسیو CoOx است. تحت یک بایاس مثبت اعمال شده به الکتروود بالایی، حفره های اکسیژنی در واسط CoOx/BTO جمع می شوند، به طور موثر ارتفاع ناحیه سد را کاهش داده و مقاومت حالت ON را کاهش می دهند.



شکل ۱۰ شماتیک سطح مقطع ممریستور مغناطیسی مبتنی بر a-LSMO

شکل 10 شماتیک سطح مقطع ممریستور مغناطیسی مبتنی بر a-LSMO

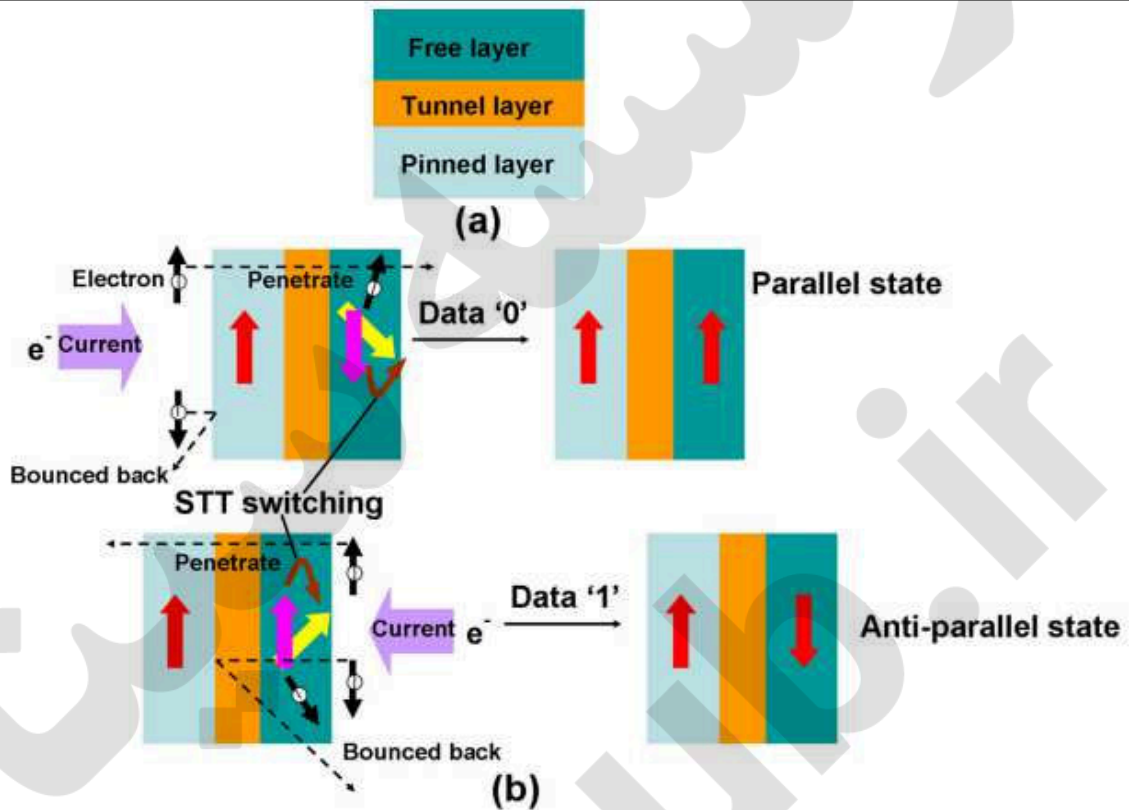


شکل ۱۱

دیاگرام باند انرژی یک RTD تحت ساختار ناحیه سد دویل. در امتداد افزایش ولتاژ بایاس، سطح امیتر می تواند تا سطح رزونانس افزایش یابد، و جریان ماکزیمم در لحظه تطابق سطح امیتر با سطح رزونانس روی می دهد. بعد از آن، افزایش بیشتر ولتاژ می تواند سطح رزونانس را کاهش دهد و جریان کاهش می یابد که منجر به اثر مقاومت تفاضلی منفی NDR می شود.

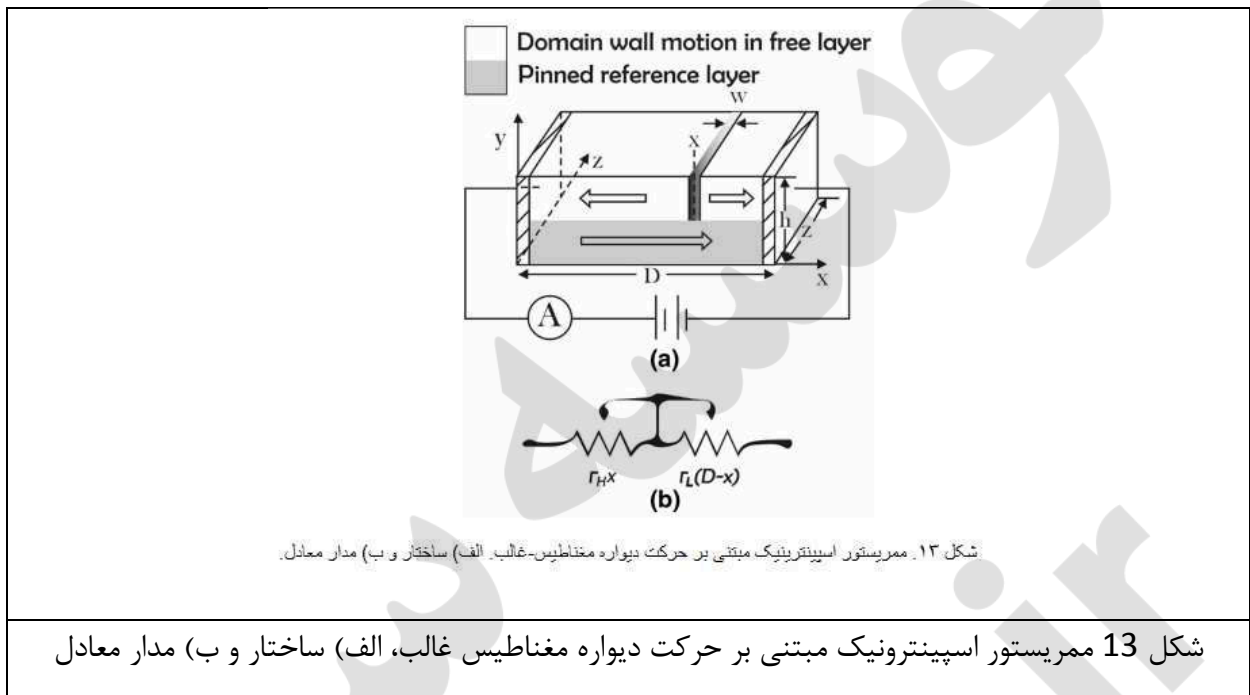
شکل 11 دیاگرام باند انرژی یک RTD تحت ساختار ناحیه سد دویل. در امتداد افزایش ولتاژ بایاس، سطح امیتر

می تواند تا سطح رزونانس افزایش یابد، و جریان ماکزیمم در لحظه تطابق سطح امیتر با سطح رزونانس روی می دهد. بعد از آن، افزایش بیشتر ولتاژ می تواند سطح رزونانس را کاهش دهد و جریان کاهش می یابد که منجر به اثر مقاومت تفاضلی منفی (NDR) می شود



شکل ۱۲. الف) ساختار MJT و ب) گشتاور انتقالی اسپینی سوئیچینگ مغناطیس زایی از ضد-موازی به موازی (بالا) و از موازی به ضد-موازی (پائین). نکته این که برای هر دو نمونه، الکترون ها با پلاریزاسیون مشابه به عنوان لایه ضمیمه شده از طریق MJT نفوذ خواهند کرد، در حالی که الکترون ها با پلاریزاسیون مخالف به لایه ضمیمه شده می توانند به بیرون پس زده شود یا در واسط لایه ضمیمه شده یا واسط لایه جداکننده.

شکل 12 الف) ساختار MTJ، ب) گشتاور انتقالی اسپینی سوئیچینگ مغناطیس زایی از حالت ضد-موازی به موازی (بالا) و از حالت موازی به ضد-موازی (پائین). نکته اینکه برای هر دو نمونه، الکترون ها با پلاریزاسیون مشابه به عنوان لایه ضمیمه شده از طریق MJT نفوذ خواهند کرد، در حالی که الکترون ها با پلاریزاسیون مخالف به لایه فیکس شده می توانند به بیرون پس زده شوند یا در واسط لایه فیکس شده یا واسط لایه جداکننده



دیوار کوانتومی با استفاده از نیمه هادی باندگپ کوچک ساخته شده است، در حالی که ناحیه سد از مواد باندگپ بزرگ ساخته شده است. زمانی که RTD بایاس می شود، الکترون هایی که قبلا در انرژی گین امیتر ناشی از میدان الکتریکی به دام افتاده اند، بنابراین می توانند از طریق دیواره کوانتومی به سمت کلکتور تونل ایجاد کنند که منجر به افزایش جریان می شود. براساس مکانیزم بحث شده فوق، یک RTD ساختار لایه ای دوبل AIAS/GaAS/AIAS شامل طرح ویژه آلاینده شده لایه های فضا ساز در منبع و ناحیه درین، مستعد نمایش یک منحنی $I-V$ پاپیونی می شوند [21و22]. با این وجود، دستاوردهای بیشتر در این زمینه تا سال 2012 حاصل نشده بودند تا زمانی که یک ممریستور کوانتومی-نقطه ای قابل برنامه ریزی مبتنی بر یک ساختار شبکه عصبی سلولی برای کاربردهای پردازش تصویر مانند تشخیص خط و لبه توسعه داده شد [54و55].

7 ممریستور اسپینترونیکی

ممریستور اسپینترونیکی که متفاوت از ممریستورهای فوق الذکر است، مقاومت خود را با تغییر مسیر اسپینی الکترون ها تغییر می دهد [56]. علایق تحقیقاتی در زمینه ممریستور اسپینترونیکی ناشی از پیشرفت های اخیر در توسعه گشتاور انتقال-اسپین تکنولوژی های حافظه با دسترس تصادفی بود [57و58]. اصول فیزیکی مربوط به STT این

است که زمانی که یک جریان به لایه مغناطیسی اعمال می شود، اسپین های الکترون هایی که جریان را می سازند در مسیر مغناطیس زایی هم تراز می شوند که به عنوان پدیده پلاریزاسیون اسپینی شناخته شده است و اگر چنین جریان اسپینی-پلاریزه ای در جهت دیگری مغناطیسی شود، این اسپین ها می توانند دوباره پلاریزه شوند. در طول فرآیند بازپلاریزاسیون، لایه مغناطیسی در معرض یک گشتاور است که می تواند تحریک اسپین-موج ها را فعال سازد یا مسیر مغناطیس زایی لایه مغناطیسی را در چگالی جریان به حد کافی بالا برگرداند [59]. براساس این مکانیزم، STT مبتنی بر پیوند تونلی مغناطیسی (MTJ) می تواند بین حالت LRS و HRS با استفاده از جریان اسپینی-پلاریزاسیون القا شده بین دو لایه فروالکتریک سوئیچ شود. ساختار سلولی نشان داده شده در شکل 12 الف سوئیچینگ STT-MTJ را از حالت جهت ضد-موازی به حالت موازی نشان می دهد [60]. به منظور القا چنین حالت سوئیچینگ، الکترون ها باید از لایه فیکس شده با مغناطیس زایی ثابت به لایه آزاد که مغناطیس زایی آن می تواند به راحتی چرخانده شود شریان یابند. الکترون هایی که دارای جهت اسپینی مشابه با جهت مغناطیس زایی در لایه فیکس شده هستند می توانند باقی بمانند تا جریان پلاریزه شده اسپینی را بعد از اینکه آنها از لایه فیکس شده عبور کردند، شکل دهند. در نتیجه این جریان پلاریزه شده اسپینی از لایه آزاد شریان می یابد که در معرض گشتاور ناشی از حرکت زاویه ای اسپینی جریان پلاریزه شده است. این حالت مغناطیسی، اگر گشتاور به اندازه کافی قوی تر از مقدار آستانه باشد، لایه آزاد را قادر می سازد تا تغییر نماید. به منظور نائل آمدن به سوئیچینگ از جهت موازی به جهت ضد-موازی نشان داده شده در شکل 12 ب، الکترون ها باید از لایه آزاد به لایه فیکس شده شریان یابند. یکبار که الکترون ها به لایه فیکس شده برسند، الکترون ها با جهت اسپینی مشابه با لایه فیکس شده می توانند از لایه فیکس شده عبور نمایند، در حالی که سایر آنها به مرز بین جداکننده و لایه فیکس شده منعکس شده و به لایه آزاد جهت داده می شوند. این حرکت انعکاسی می تواند گشتاور انتقالی اسپینی روی لایه آزاد تولید نماید و مغناطیس زایی را از لایه آزاد سوئیچ نماید زمانی که مقدار آن فراتر از مقدار آستانه رود.

مکانیزم فیزیکی توضیح داده شده فوق می تواند به طور مستقیم برای ساختن ممریستور اسپینترونیکی استفاده گردد. همان طور که در شکل 13 نشان داده شده است، ممریستور اسپینترونیکی نیز از لایه مرجع و لایه آزاد ساخته می

شود. مغناطیسی کردن لایه مرجع با اتصال آن به یک لایه مغناطیس زایی فیکس شده، تثبیت می شود در حالی که یک دیواره غالب مستقر شده است تا لایه آزاد را به دو بخش با مغناطیس زایی مخالف نسبت به هم تقسیم نماید. مشابه با STT-MTJ، زمانی که مغناطیس زایی لایه آزاد در یک بخش در جهت موازی/ضد-موازی نسبت به لایه مرجع است، مقاومت بر واحد طول بخش کم/زیاد است. به عنوان نتیجه، اعمال کردن جریان پلاریزه شده با جهت مشابه با مغناطیس زایی لایه مرجع می تواند جهت مغناطیس زایی بین لایه مرجع و لایه آزاد را موازی نماید که در نتیجه منجر به یک مقاومت سیستمی کم می شود. از طرف دیگر، اعمال کردن جریان پلاریزه شده با جهت مخالف مغناطیس زایی لایه مرجع می تواند جهت مغناطیس زایی بین هر دو لایه را ضدموازی نماید که در نتیجه منجر به مقاومت زیاد می شود. براساس این توضیح، ممریستیوی ممریستور اسپینترونیک که به موقعیت دیواره غالب وابسته است می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$M(x) = r_H \cdot x + r_L \cdot (D - x) \quad (5)$$

که در آن r_H و r_L به ترتیب مقاومت بر واحد طول است زمانی که مغناطیس زایی لایه های آزاد و مرجع ضدموازی و موازی هستند، x موقعیت دیواره غالب و D طول لایه آزاد است. v سرعت دیواره غالب در این حالت متناسب با چگالی جریان J است که به صورت زیر داده می شود:

$$v = \frac{dx}{dt} = \Gamma \cdot J = \frac{\Gamma}{h \cdot z} \cdot \frac{dq}{dt} \quad (6)$$

که در آن T ضریب سرعت دیواره غالب است که به ساختار دستگاه و خواص مواد بستگی دارد؛ h و z بیانگر ضخامت و پهنای دستگاه هستند. بنابراین ممریستیوی یک ممریستور اسپینترونیک می تواند به صورت زیر بیان گردد:

$$M(q) = r_L \cdot D + (r_H - r_L) \frac{\Gamma}{h \cdot z} q(t) \quad (7)$$

براین اساس، با حرکت موقعیت دیواره غالب در لایه آزاد، امکان تغییر پیوسته ممریستیوی دستگاه تغییر وجود خواهد داشت. همان طور که عملیات نوشتن در ممریستور اسپینترونیک با اعمال کردن یک جریان از خود آهنربا حاصل می شود به جای آنکه یک میدان وارونه بسیار قوی تولید شود، این برای یک ممریستور اسپینترونیک مفید

خواهد بود تا مصرف توان کمتر از دستگاهات ممریستوری متداول داشته باشد. علاوه بر این، ممریستور اسپینترونیك الزام استفاده از يك خط فلزی دیگر به عنوان مسیر جریان را خواهد داشت، که بنابراین منجر به مقیاس پذیری بهتر می شود. با این وجود، نسبت مقاومت ON/OFF کوچک يك نگرانی بزرگ برای ممریستور اسپینترونیك باقی خواهد ماند [40].