نحوه استناد به این مقاله: فرج الهی، جواد (۱۳۹۰). نانوسوئیچ الکترومکانیکی و کاربرد آن در حافظه های الکترونیک. تبدیل انرژی، ۲ (۱و۲)، ۳۹-۴۳

نانوسوئیچ الکترومکانیکی و کاربرد آن در حافظه های الکترونیک

جواد فرج اللهی [۱و*]

[۱]دانش آموخته، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: دی ۹۴، بازنگری: بهمن ماه ۹۴، پذیرش: فروردین ۹۴

چکیده

سوئیچ های نانوالکترومکانیک مشابه سوئیچ های نیمه هادی معمولی اند اما اصول عملکرد سوئیچ های نانوالکترومکانیک ونیمه هادی با هم متفاوت می باشد. با توجه به وضعیت بهینه ای که در فناوری سوئیچ های نانو الکترومکانیک وجود دارد می توان آنها را جایگزین فناوری نیمه هادی ها کرد. نکته قابل توجه در این فناوری این است که در ساختار سوئیچ های نانو الکترومکانیک نانولوله های کربنی نقش مهمی را ایفا می کنند چرا که دارای خواص فیزیکی استثنائی می باشند به گونه ای که عامل ایجاد پیشرفت های بسیاری در زمینه سیستم های نانو الکترومکانیکی نظیر ساخت انواع حافظه ، انواع حسگرها با حساسیت فوق العاده بالا و... شده است. در این مقاله کاربرد و فرآیند عملیاتی سوئیچ نانو الکترومکانیک و همچنین نحوه عملکرد برخی از انواع حافظه های ذخیره اطلاعات مبتنی بر نانولوله های کربنی به عنوان نمونه هایی از سیستم های نانو الکترومکانیکی توضیح داده شده است.

* **عهده‌دار مکاتبات:** j.farajollahi69@gmail.com

کلمات کلیدی: نانو سوئیچ الکترومکانیکی، نانولوله کربنی، نانو حافظه، نانو حسگر.

۱- مقدمه

سوئیچ های امروزی از نظر مقیاس به دو نوع میکرو الکترومکانیک[۱] و نانو الکترومکانیک[۲] تقسیم می شوند. سوئیچ های میکروالکترومکانیک که در ابعاد میکرومتری می باشند براساس تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی یا بالعکس عمل می کنند که می توان در بسیاری ازصنایع مانند سیستم های الکترونیکی، پزشکی، صنایع داروسازی هوشمند، خودروسازی و... از آنها استفاده کرد.اگر این نوع سوئیچ ها درابعاد کوچکتری ساخته شوند می توان شاهد کاهش مصرف مواد اولیه، افزایش سرعت عملکرد کلیدزنی و کاهش مصرف در انرژی و زمان باشیم که در راستای این اهداف، فناوری نانو در نظر دارد که با ساخت حافظه ها و ریزتراشه ها در مقیاس نانو بتواند تحولی در صنعت کامپیوترها، ماشین ها و الکترونیک ایجاد کند، این اهداف با ساخت نانوسوئیچ های الکترومکانیکی که اغلب آنها بر پایه نانولوله های کربنی می باشند محقق خواهدشد.[۱]

۲- نانو لوله کربنی

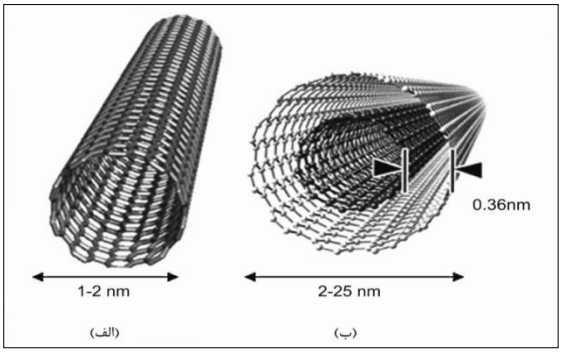
گرافن یکی از مهم ترین مواد کربنی مورد استفاده در فناوری نانو است. یک صفحه گرافن از کنارهم قرار گرفتن اتم های کربن شکل می گیرد بنابراین اگر صفحه گرافنی حول یک محور مرکزی لوله شود نانولوله کربنی[۳] ایجاد می شود که خود به دو دسته تقسیم می شوند:[۲]

۲-۱- نانولوله تک جداره: با پیچیده شدن یک صفحه گرافن حول یک محور مرکزی به وجود می آید و همان طور که در شکل(۱-الف) مشاهده می شود استوانه ای توخالی به قطر ۱تا ۲ نانومتر را شکل می دهد.

[1] Micro Electro Mechanical
[2] Nano Electro Mechanical
[3] Carbon nanotube

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.1.3.9]



شکل(۱): (الف) نانولوله کربنی تک جداره (ب) نانولوله کربنی چندجداره [۳].

۲-۲- نانولوله چندجداره: با پیچیده شدن چند صفحه گرافن حول یک محور مرکزی به وجود می آید و با توجه به شکل(۱-ب) معمولا حفره هایی به قطر۲ تا ۲۵ نانومتر که به صورت هم مرکز و با فاصله ۰,۳۶نانومتر از هم جدا شده اند، شکل می گیرد [۳].

نانولوله های کربنی خواص منحصر به فردی دارند از جمله این خواص،استحکام مکانیکی وهدایت الکتریکی عالی آنها می باشد.

۳- ساختمان نانو سوئیچ الکترومکانیک

موارد ذیل اجزای اصلی ساختمان یک نانوسوئیچ الکترو مکانیکی را تشکیل می دهند که در شکل(۲) نشان داده شده اند.

۱. **الکترود سورس**[۴]: الکترودی است که به ولتاژ منبع متصل میشود و با نماد S نمایش داده می شود.

۲. **الکترودگیت**[۵]: الکترودی است که با اتصال الکتریکی در آن می توان سوئیچ را تحریک نمود و با نماد G نمایش داده می شود.

۳. **الکترود درین**[۶]: الکترودی است که پس از تحریک سوئیچ موجب عبور جریان الکتریکی ازخود میشود و با نماد D نمایش داده می شود.

۴. **تیر یک سرگیردار:** یک پل ارتباطی است که از آن جهت انتقال جریان الکتریکی از الکترود سورس به درین استفاده می شود.

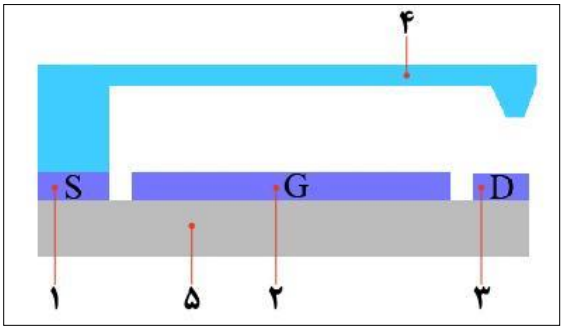
۵. **لایه عایق:** معمولا از مواد دی اکسید سیلیسیم استفاده می شود.

سه نیرویی که نقش اصلی را در عملکرد نانوسوئیچ الکترومکانیکی بر عهده دارند عبارتند از:

الف) **نیروی الکترواستاتیک**[۷]: با اعمال ولتاژ الکتریکی و ایجاد بارهای مخالف در دو صفحه،یک نیروی الکتریکی در بین آنها به وجود می آید که موجب جذب صفحات به یکدیگر می شود.

ب) **نیروی الاستیک**[۸]: یک نیروی ارتجاعی است مانند فنری که پس از کشیده شدن به حالت اولیه خود باز می گردد.

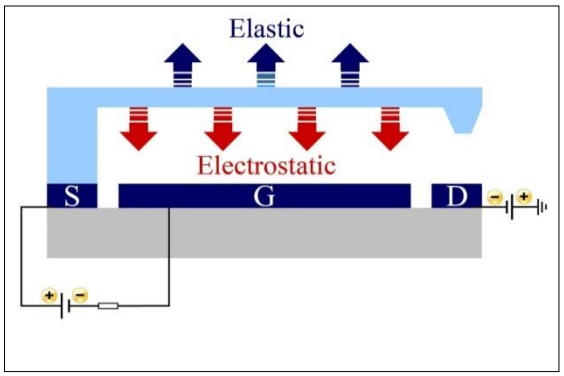
ج) **نیروی واندروالسی**[۹]: نیرویی که مولکولهای یک ماده را در حالت مایع یا جامد به یکدیگر ارتباط می دهد را نیروی بین مولکولی یا واندروالسی می گویند.



شکل(۲): ساختمان نانوسوئیچ الکترومکانیک [۴].

۴- عملکرد سوئیچ نانو الکترومکانیک

هنگامی که اختلاف پتانسیل بین الکترودهایG وS اعمال شود بارهای مخالف در تیر و الکترود G مطابق شکل(۳) باعث تشکیل نیروی الکترواستاتیک می شوند.



شکل(۳): حالت خاموش [۴].

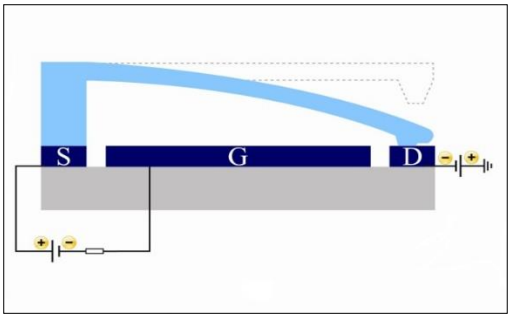
با افزایش ولتاژ الکتریکی، نیروی الکترواستاتیک بر نیروی الاستیک تیر غلبه می کند در نتیجه موجب خم شدن و اتصال انتهای تیر به الکترودD می شود که مطابق شکل(۴) سوئیچ در حالت روشن قرار گرفته و جریان الکتریکی از الکترودS به

[4] Source
[5] Gate
[6] Drain

[7] Electrostatic
[8] Elastic
[9] Van der Waals

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-25]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.1.3.9]

الکترودD انتقال می یابد. هنگامی که ولتاژ در الکترود G قطع شود نیروی الاستیک، تیر را به حالت اولیه باز می گرداند و با توجه به شکل(۳) سوئیچ درحالت خاموش قرار می گیرد [۵].



شکل(۴):حالت روشن [۴].

۵- کاربردهای سوئیچ نانو الکترومکانیک

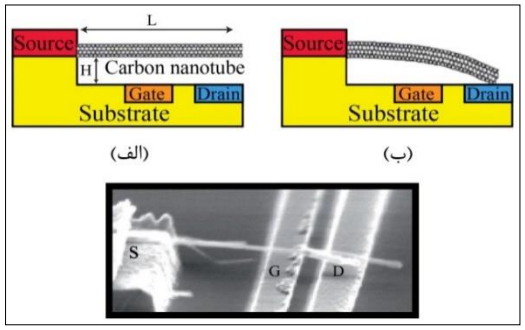
فناوری سوئیچ نانوالکترومکانیک هم اکنون سهم قابل توجهی را در اکثر صنایع مانند حافظه ها، نانوحسگرها[۶،۷]، بیوپزشکی، لرزه نگاری درصنایع نفت برای اکتشاف نفت وگاز[۸] و همچنین امروزه درمحدوده دماهای ۳۰۰ تا۵۰۰ درجه سانتی گراد در مواردی چون اکتشافات زمین گرمایی، حفاری چاه های عمیق، هوافضا و صنایع خودرو قابلیت کارکرد دارند [۹].

۶- حافظه ذخیره اطلاعات

هر وسیله ای که قادر به نگهداری و ذخیره سازی اطلاعات باشد حافظه نام دارد. شیوه عملکرد حافظه ها بر اساس حالت خاموش و روشن می باشد که در الکترونیک این حالت ها را با 0 و 1نشان می دهند. حافظه ها را می توان به دو نوع فرار و غیر فرار تقسیم نمود. حافظه ای که با قطع ولتاژ الکتریکی از 1 به 0 تغییر حالت دهد و موجب از دست رفتن اطلاعات شود را حافظه فرار و حافظه ای که با قطع ولتاژ در حالت 1 باقی بماند و موجب از دست رفتن اطلاعات نشود را حافظه غیر فرار می نامند که نوع پیکربندی حافظه ها تاثیر مستقیمی بر عملکرد آنها دارد. برای دستیابی به حافظه هایی در مقیاس نانو، می توان از نانو لوله های کربنی استفاده کرد که در این مطلب به چند نمونه از آنها اشاره می شود.

۶-۱- حافظه مبتنی بر نانو لوله های کربنی کانتیلوری[۱۰]

در این نوع حافظه می توان از نانولوله های کربنی یک یا چند جداره استفاده نمود که مطابق شکل(۵-الف) یک قسمت از نانولوله کربنی به الکترودS متصل شده است و انتهای دیگر آن به صورت معلق می باشد. هنگامی که اختلاف پتانسیل بین الکترودهای G وS اعمال شود بارهای الکتریکی در نانولوله کربنی و الکترود G بواسطه تشکیل نیروی الکترواستاتیک باعث خم شدن و اتصال انتهای نانولوله کربنی به الکترودD می شوند و مطابق شکل(۵-ب) حالت 1 ایجاد می شود.



شکل(۵):حافظه مبتنی بر نانولوله کانتیلوری[۵] (الف) حالت خاموش (0) (ب) حالت روشن (1) [۱۰].

هنگامی که ولتاژ الکتریکی در الکترود G قطع شود حافظه به صورت غیر فرار عمل میکند چون نیروی واندروالسی در محل اتصال بیش از نیروی الاستیک می باشد که می توان با اعمال اختلاف پتانسیل معکوس(ولتاژ خروجی)، نانولوله کربنی را به موقعیت اولیه برگشت داد و مطابق شکل(۵-الف) حالت 0 ایجاد شود [۱۰].

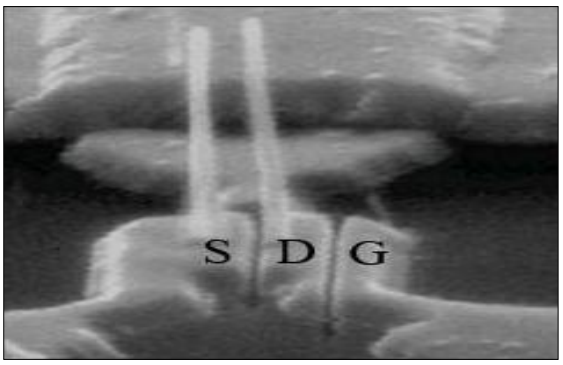
۶-۲- حافظه مبتنی بر نانو لوله های کربنی عمودی

در این نوع حافظه می توان از نانولوله های کربنی چند جداره که مطابق شکل(۶) به صورت عمودی بر روی الکترودهای S وD قرار می گیرند استفاده نمود. هنگامی که اختلاف پتانسیل بین الکترودها G وS اعمال شود بارهای الکتریکی درآنها سبب تشکیل نیروی دافعه الکترواستاتیکی می شوند و همانطور که در شکل(۷) مشاهده می شود نیروی دافعه الکترواستاتیکی، نانولوله کربنی الکترود D را به سمت نانولوله کربنی الکترود S حرکت می دهد و زمانی که با یکدیگر تماس الکتریکی پیدا کردند حالت 1 ایجاد می شود و جریان الکتریکی از میان دو الکترود عبور می کند. وقتی که ولتاژ در الکترود G قطع شود حافظه به صورت غیر فرار عمل می کند که این حالت در نانولوله های کربنی بلند ایجاد می شود چون نیروی واندروالسی در آنها بیشتر از نیروی الاستیک است و برای بازگشت به حالت 0 معمولا از نانولوله های کربنی کوتاه استفاده می شود. بنابراین حافظه بسته به طول نانو لوله های کربنی می تواند به صورت فرار یا غیر فرار عمل کند [۱۰].

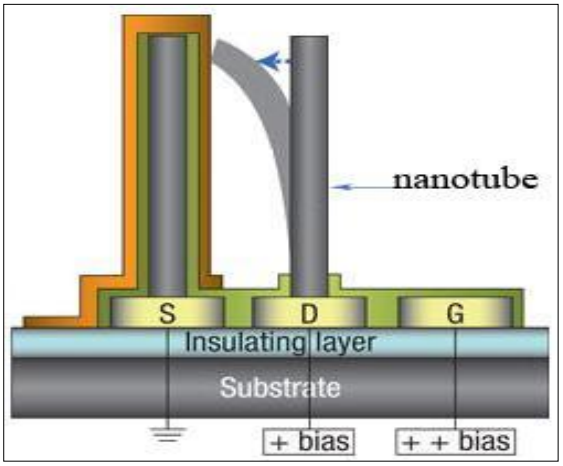
[۱۰] Cantilever

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.1.3.9]



شکل(۶):حافظه مبتنی بر نانولوله های کربنی عمودی [۱۰].



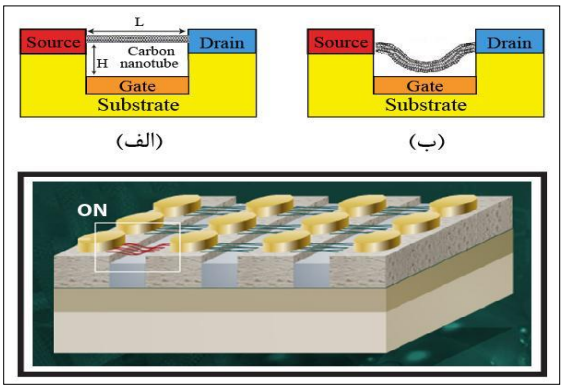
شکل(۷): (الف)حالت روشن(1) [۱۱].

۶-۳- حافظه NRAM

در این نوع حافظه می توان از نانولوله های کربنی تک جداره استفاده نمود. مطابق شکل(۸-الف)، نانولوله کربنی دو سرگیردار از یک سمت به الکترود S متصل شده است و از سمت دیگر به الکترود D قابل اتصال می باشد و الکترود G نیز در پائین نانو لوله کربنی قرار می گیرد. هنگامی که اختلاف پتانسیل بین الکترودهای G وS اعمال شود بارهای الکتریکی در نانولوله کربنی و الکترود G موجب ایجاد نیروی الکترواستاتیک می شوند که با افزایش این نیرو، نانولوله کربنی به سمت الکترود G خم می شود در نتیجه اتصال با الکترود D برقرار شده و مطابق شکل(۸-ب) حالت 1 ایجاد می شود. وقتی که ولتاژ الکتریکی در الکترود G قطع شود به دلیل وجود نیروی واندروالسی در محل اتصال، حافظه به صورت غیر فرار عمل می کند که با اعمال ولتاژ خروجی نانولوله کربنی به موقعیت اولیه بازمی گردد و مطابق شکل(۸-الف) حالت 0 ایجاد می شود [۱۰].

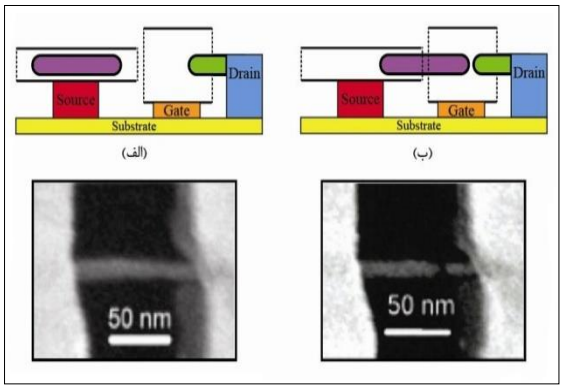
۶-۴- حافظه مبتنی بر نانو لوله کربنی تلسکوپی

این نوع حافظه مانند سایر حافظه ها به صورت سه ترمیناله می باشد. مطابق شکل(۹-الف) بر روی الکترودS یک نانولوله دوجداره سرباز قرار گرفته است ودارای یک هسته داخلی می باشد که می تواند به صورت رفت و برگشتی در درون نانو لوله دو جداره حرکت کند.



شکل(۸):**حافظه** NRAM (الف)حالت خاموش(0) (ب)حالت روشن(1) [۱۰].

در بالای الکترود G یک نانولوله کربنی تو خالی سرباز قرار دارد همچنین یک نانولوله کربنی تک جداره نیز به الکترود D متصل می باشد. هنگامی که ولتاژ ورودی اعمال می شود نیروی الکترواستاتیک باعث لغزش و خروج هسته داخلی از درون نانولوله کربنی دو جداره می شود و مطابق شکل(۹-ب) هسته داخلی با الکترودD تماس الکتریکی برقرار می کند و حالت 1 ایجاد می شود. وقتی که ولتاژ ورودی قطع شود امکان دارد به دلیل وجود نیروی واندروالسی بین هسته داخلی و الکترود D و همچنین وجود نیروی اصطکاک میان هسته داخلی و دیواره نانولوله کربنی، حافظه به صورت غیر فرار عمل کند که با اعمال ولتاژ خروجی حالت 0 در حافظه ایجاد می شود.



شکل(۹).حافظه مبتنی بر نانولوله تلسکوپی(الف)حالت خاموش (0) (ب)حالت روشن(1) [۱۰].

دراثر عکس والعمل نیروی واندروالسی میان دیواره های نانولوله کربنی دو جداره، یک نیروی ضعیفی ایجاد می شود که تمایل دارد هسته را به داخل فرو ببرد و مطابق شکل(۹-الف) تا موقعی که ولتاژی اعمال نشود حافظه می تواند به کمک این نیرو در حالت 0 باقی بماند [۱۰].

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.1.3.9]

۷- نتیجه گیری

۱: سوئیچ های نانو الکترومکانیک قابلیت جایگزینی با اکثرکلیدهای کنونی را دارند که بتوان در شرایط محیطی و کاربردهای مختلف از آنها استفاده کرد همچنین می‌توان از قابلیت باقی ماندن آنها در موقعیت روشن و خاموش هنگام قطع ولتاژ ورودی، در ابزار حافظه یا مهارکننده استفاده کرد.

۲: از بارزترین ویژگی نانولوله های کربنی می توان به افزایش نسبت سطح به حجم در ریز تراشه ها و حافظه ها اشاره نمود به عنوان مثال اگر در یک تراشه یک سانتی متر مربع از نوع نیمه هادی حدود یک صد میلیون کلید جای می گیرد در تراشه مبتنی بر نانولوله های کربنی حدودیک تریلیارد کلید در یک سانتی متر مربع جای می گیرد.

۳: مدل سازی هایی که براساس تحقیق و محاسبات ایجاد می شوند برخواص فیزیکی (مکانیکی، الکترواستاتیک، ترموالاستیک) و کاهش توان مصرفی سیستم های نانو الکترومکانیکی تاثیر بسزایی دارند به گونه ای که این طراحی ها موجب صرفه اقتصادی در تولید نیز می شوند.

مراجع

[1] W.W. Jang, J.O. Lee, J.B. Yoon, M.S. Kim, J.M. Lee, S.M. Kim, K.H. Cho, D.W. Kim, D. Park, W.S. Lee, Fabrication and characterization of a nanoelectro mechanical switch with 15-nm-thick suspension air gap, Applied Physics Letters, 92 (2008) 103110.

[2]http://edu.nano.ir/oldversion/index.php?actn=papers_view&id=224 ≥

[3]http://jnm.snmjournals.org/content/48/7/1039.full

[4]http://www.wesrch.com/wiki-889-operation-of-a-nem-nano-electrical mechanical-switch-transistor

[5]Y.L. Owen, D. H.D. Espinosa, Nanoelectro mechanical contact switches, Nature Nanotechnology, 7 (2012) 283-295 doi:10.1038/nnano.2012.40

[6]http://www.nano.ir/index.php?ctrl=paper&actn=paper_view&id=1329&lang=1 ≥ (1385/02/03)

[7]http://edu.nano.ir/oldversion/index.php?actn=papers_view&id=213

[8]http://www.nano.ir/index.php?ctrl=paper&actn=paper_view&id=1152&lang=1 ≥ (1384/05/08)

[9]T.H. Lee, S. Bhunia, M. Mehregany, Electromechanical computing at 500 °C with silicon carbide, Science, 329 (2010) 1316–1318.

[10]E. Bichoutskaia, A.M. Popov, Y.E. Lozovik, Nanotube-based data storage devices, Materials Today, 11(6) (2008) 38–43.

[11]http://www.nature.com/nnano/journal/v3/n1/fig_tab/nnano.2007.417_F1.html

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-06-25]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1390.2.1.3.9]