

## Penggabungan $Ti_3C_2T_x$ dalam Matriks Poli (Metil Metakrilat) untuk Aplikasi Memori Tidak Meruap

(Incorporation of  $Ti_3C_2T_x$  in Poly(Methyl Methacrylate) Matrices for Non-Volatile Memory Application)

Rahmat Zaki Auliya, Mohsen Ahmadipour, Chang Fu Dee, Poh Choon Ooi\*

*Institute of Microengineering and Nanoelectronics (IMEN), Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia*

\*Corresponding author: [pcooi@ukm.edu.my](mailto:pcooi@ukm.edu.my)

Received 17 May 2023, Received in revised form 18 August 2023

Accepted 29 September 2023, Available online 30 March 2024

### ABSTRACT

*MXenes, with their unique surface properties and 2D structure, have demonstrated promising potential in electronic devices, particularly in memory storage. This study explored the potential of 2D  $Ti_3C_2T_x$  for the non-volatile memory (NVM) application. The simple solution process routes were used to fabricate the two-terminal bistable switching devices. The silver nanowires/nanocomposite/ITO structure was deposited on a glass substrate using spin coating and spray coating techniques. The  $Ti_3C_2T_x$  MXene flakes were incorporated into a poly(methyl methacrylate) (PMMA) polymer host to form the nanocomposite and act as a charge-trapping layer. Meanwhile, PMMA acts as a dielectric layer. The measured current-voltage (*I-V*) data showed a bistable current behavior with the presence of a memory window. The fabricated NVM memory devices were reprogrammable when the endurance test was performed and stable up to  $1 \times 10^4$  s cycles with a distinct ON/OFF ratio of  $10^3$ . The conduction mechanisms were identified using the curve-fitting method with double log plots of current-voltage (*I-V*) data. Based on the obtained *I-V* characteristics, various conduction mechanisms, especially Schottky and Poole-Frenkel emission, trapped charge limiting current, and space charge limited current, were proposed to be responsible for the bistable switching behavior. Thus, the results of this study provide an experimental basis for using MXene in non-volatile memory applications.*

*Keywords:  $Ti_3C_2T_x$ ; non-volatile memory, bistable, nanocomposite, conduction mechanisms*

### ABSTRAK

*MXenes telah menunjukkan aplikasi yang berpotensi besar dalam peranti elektronik baharu kerana sifat permukaan yang unik dan struktur 2D, terutamanya dalam storan memori yang popular. Dalam kajian ini, keupayaan 2D  $Ti_3C_2T_x$  diterokai untuk aplikasi memori tidak meruap (NVM). Kaedah pemrosesan larutan yang mudah telah digunakan untuk memfabrikasi peranti pensuisan dwistabil dua terminal. Struktur wayar nano perak/komposit nano/indium-tin-oksida telah dimendapan pada substrat poli etilena tereftalat dengan menggunakan kaedah-kaedah salutan spin dan salutan semburan. Serpihan  $Ti_3C_2T_x$  MXene telah dicampurkan dengan polimer poli (metil-metakrilat) (PMMA) untuk membentuk komposit nano dan bertindak sebagai lapisan perangkap cas. Sementara itu, PMMA bertindak sebagai lapisan penebat. Data voltan dan arus yang diukur menunjukkan ciri-ciri arus dwistabil dengan kehadiran tetingkap memori. Peranti NVM yang difabrikasi boleh diprogram semula ketika ujian ketahanan dilakukan dan mampu mencapai kestabilan sehingga  $1 \times 10^4$  s kitaran dengan nisbah 'Buka/Tutup' setinggi  $10^3$ . Kaedah penyesuaian lengkung menggunakan plot log berganda data arus voltan (*I-V*) telah digunakan untuk mengenalpasti mekanisme-mekanisme konduksi. Berdasarkan ciri-ciri *I-V* yang diperolehi, pelbagai mekanisme konduksi, seperti mekanisme pancaran Schottky dan Poole-Frenkel, arus terhad cas terperangkap dan arus terhad cas ruang yang menyebabkan sifat-sifat pensuisan dwistabil telah dicadangkan. Dengan itu, keputusan kajian ini menyediakan asas eksperimen untuk MXene dalam aplikasi memori tidak meruap.*

*Kata Kunci: 2D  $Ti_3C_2T_x$ ; memori tidak meruap; dwistabil; komposi nano; mekanisme konduksi*

## PENGENALAN

Memori tidak meruap (NVM) muncul sebagai kunci untuk membolehkan teknologi berkuasa rendah yang dijangka merebak ke pasaran untuk aplikasi memori terbenam hingga ke Internet Pelbagai Benda (Internet of Things (IoT)) (Feng et al. 2023; Yang et al. 2022). Memori ialah salah satu unsur penting bagi peranti-peranti elektronik moden terutamanya telefon bimbit, komputer peribadi, dan paparan lentur yang bertujuan untuk menyimpan data (Bertolazzi et al. 2019; Duangthong et al. 2019). Oleh kerana jumlah data yang semakin meningkat untuk disimpan dalam peranti elektronik pintar, memori yang bersaiz skala kecil dan operasi berkelajuan tinggi sememangnya dikehendaki (Khot et al. 2023; Lee 2011). Pengecilan saiz peranti-peranti elektronik sentiasa membawa kepada isu kebocoran cas yang tidak diinginkan apabila menggunakan teknologi berasaskan Si. Walau bagaimanapun, memristor berasaskan polimer boleh mengurangkan masalah kebocoran cas yang dihadapi oleh teknologi Si. Memristor boleh dianggap sebagai calon utama untuk aplikasi penyimpanan maklumat pada masa hadapan kerana ia dapat memenuhi fabrikasi peranti luas kawasan yang kecil dan sifat tidak meruap yang serasi dengan memori berasaskan Si.

Unsur memori boleh dibentuk dengan memasukkan bahan perangkap cas ke dalam bahan polimer. Berbanding dengan silikon dioksida dan bahan bukan organik yang lain, bahan-bahan polimer mendedahkan ciri-ciri menarik seperti bahan kos rendah, kemampuan pemprosesan larutan dan kelenturan mekanikal. Polimer boleh bertindak sebagai penebat yang menghalang pergerakan cas daripada perantaraan perangkap cas. Poli (metil-metakrilat) (PMMA) mempunyai jurang tenaga yang tinggi. Maka, ia sesuai untuk digunakan sebagai lapisan pensuisan rintangan (Chen et al. 2014; Son et al. 2010). Oleh itu, polimer PMMA dipilih dalam kajian ini disebabkan oleh sifat-sifat kimia, fizikal, biologi, mekanikal, optik dan habanya yang sangat baik. Di samping itu, PMMA mempunyai k-rendah telah dilapor dapat meningkatkan kelajuan sambungan dalam peranti transistor (Shamiryani et al. 2004; Song et al. 2016).

Bahan dua dimensi (2D) dalam ketebalan skala atom mempunyai sifat-sifat kimia dan fizikal yang unik menunjukkan keupayaan untuk meningkatkan prestasi elektrik dan fizikal peranti NVM. Bahan 2D baharu MXene  $Ti_3C_2T_x$  ( $T_x$  adalah penamatan permukaan yang terdiri daripada =O, -OH, and -F) yang ditemui pada tahun 2011 telah digunakan sebagai perantaraan perangkap cas dalam NVM. Ia menunjukkan sifat pensuisan dwikutub dan ciri pengekal yang lama (Ding et al. 2019; Naguib et al. 2011). Keupayaan memerangkap cas oleh  $Ti_3C_2$  boleh

dikaitkan dengan fungsi kerjanya yang tinggi iaitu  $\sim 4.9$  eV, penamatan permukaan dan kekosongan logam dalam helai nano  $Ti_3C_2T_x$ .  $Ti_3C_2T_x$  berdimensi rendah mampu memerangkap cas secara mendalam disebabkan oleh kesan kurungan kuantum dan dihalang oleh penebat lapisan PMMA (Mao et al. 2020).  $Ti_3C_2T_x$  akan diadun dengan PMMA untuk membentuk lapisan komposit nano. Zarah-zarah nano yang dicampur dengan penebat akan menunjukkan peningkatan sifat yang ketara, walaupun pada kandungan zarah-zarah nano yang rendah (Zheng, Zhou, and Gangopadhyay 2015).

Walaupun beberapa kajian tentang  $Ti_3C_2T_x$ -berasaskan NVM telah dilaporkan, akan tetapi, pencapaian nisbah 'Buka/Tutup', dan kestabilan masih rendah. Ini mungkin disebabkan struktur peranti dilaporkan tanpa menggunakan penebat polimer (Feng et al. 2023; Khot et al. 2021). Maka, kajian ini menerokai struktur peranti yang bertambah baik, iaitu penggabungan  $Ti_3C_2T_x$  dalam matriks PMMA untuk mencapai kestabilan dan kitaran nisbah yang lebih tinggi. Di samping itu, kajian ini juga mencadangkan mekanisme konduksi yang masih boleh dipertikaikan. Dalam penggajian ini, kaedah fabrikasi semua pemprosesan larutan akan digunakan untuk membentuk struktur berbilang lapisan dalam peranti. Ini kerana teknik tersebut tidak memerlukan peralatan-peralatan yang mahal, proses yang rumit, suhu tinggi dan persekitaran vakum. Idium-timah-oksida (ITO) akan digunakan sebagai elektrod bawah dalam struktur logam-penebat-logam (MIM), manakala dawai nano perak (AgNW) akan disembur untuk membentuk elektrod atas. Campuran  $Ti_3C_2T_x$  dan PMMA akan membentuk satu lapisan komposit nano untuk meminimumkan pencemaran pemendapan dan haba teraruh. Reka bentuk NVM terdiri daripada struktur Ag-NW/komposit nano/ITO di atas substrat polietilena tereftalat (PET) yang lentur dan lutsinar.

## METODOLOGI

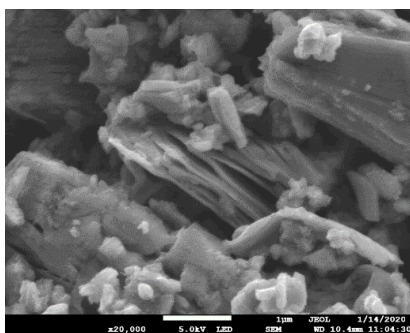
Langkah-langkah butiran sintesis bahan MXene telah dihuraikan dalam rujukan (Auliya et al. 2021). Rajah 1 menunjukkan imej mikroskop elektron pengimbas pelepasan medan (FESEM) MXene yang disintesis adalah berbilang lapisan dengan saiz zarah berjulat sekitar 1–10  $\mu\text{m}$ . Sifat semula jadi MXene yang berlapis dapat diperhatikan dan ia menunjukkan ketebalan lapisan struktur yang sangat nipis. Struktur mikro berbilang lapisan adalah disejajarkan dengan baik, dan morfologi khusus adalah seperti akordion. Keratan rentas daripada gelinciran ricih dan struktur berbilang lapisan bagi bahan nano MXene yang disintesis menunjukkan pengelupasan yang sangat baik dari bahan fasa MAX induk.

Serbuk  $Ti_3C_2T_x$  ditaburkan dalam etanol dengan kepekatan 1 % isipadu dan kemudian disonikasi selama 1

jam untuk memastikan taburan seragam  $Ti_3C_2T_x$ . Ampaian MXene ini kemudiannya diadun dengan larutan polimer polimetil metakrilat (PMMA) untuk membentuk komposit nano. Larutan PMMA disediakan dengan melarutkan 100 mg serbuk PMMA yang dibeli daripada Sigma Aldrich ke dalam 5 mL toluena. Larutan komposit nano telah disediakan dengan mencampur ampaian MXene dan larutan PMMA mengikut nisbah 1:1 untuk menyediakan lapisan perangkap cas. Untuk fabrikasi memristor, indium-timah-oksida (ITO) / polietilena tereftalat (PET) dengan keluasan 1.5 cm x 1.5 cm digunakan sebagai substrat. Sebelum pemendapan berbilang lapisan di atas substrat, permukaan ITO/PET dirawat dengan plasma oksigen pada 50 W selama 5 minit untuk menghasilkan permukaan hidrofilik.

Dua peranti NVM dengan struktur MIM yang terdiri daripada AgNWs/PMMA/ ITO/PET dan AgNWs/ Komposit nano /ITO/PET masing-masing dilambangkan sebagai peranti-peranti Ref dan NVM-PT. Rajah 2(a) dan (b) menggambarkan struktur kedua-dua peranti tersebut. Ag digunakan sebagai elektrod logam atas dalam kajian ini kerana ia adalah logam kos rendah dan lebih terkenal daripada kategori logam mulia yang sama seperti Au. Rajah 2(c) menunjukkan keratan rentas imej FESEM dalam peranti NVM-PT dengan ketebalan komposit nano 230 nm. Rajah 2(d) ialah gambar hasil fabrikasi peranti NVM yang lentur dan lutsinar.

Semua ukuran data elektrik diukur oleh sistem pencirian semikonduktor (Keithley 4200-SCS). Voltan pincang dikenakan di atas elektrod atas AgNW dan elektrod bawah ITO telah dibumikan.

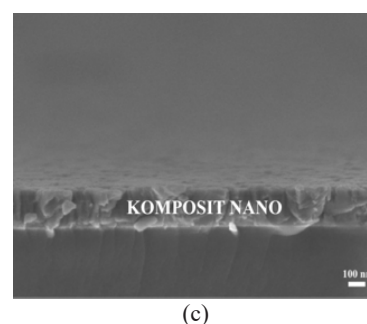
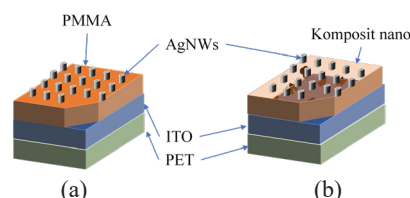


RAJAH 1. Imej FESEM  $Ti_3C_2T_x$  berbilang lapisan

## HASIL DAN PERBINCANGAN

Rajah 3 menunjukkan pencirian arus-voltan (I-V) dalam skala semi log untuk peranti Ref dan NVM-PT. Rajah 3(a) menunjukkan bahawa tettingkap histerisis daripada pencirian I-V peranti Ref yang boleh diabaikan. Manakala Rajah 3(b) menunjukkan kehadiran tettingkap histerisis I-V

yang ketara untuk peranti NVM-PT. Tettingkap histerisis ini menunjukkan kemampuan penyimpanan cas dengan kehadiran  $Ti_3C_2T_x$  dalam peranti. Voltan yang diimbaskan pada kedua-dua peranti adalah diimbaskan dari -2.0 ke +2.0 V dan sebaliknya. Apabila voltan untuk peranti NVM-PT diimbaskan dari 0 hingga +2.0 V, peningkatan mendadak dalam arus berlaku pada +1.5 V ( $V_{Buka}$ ).



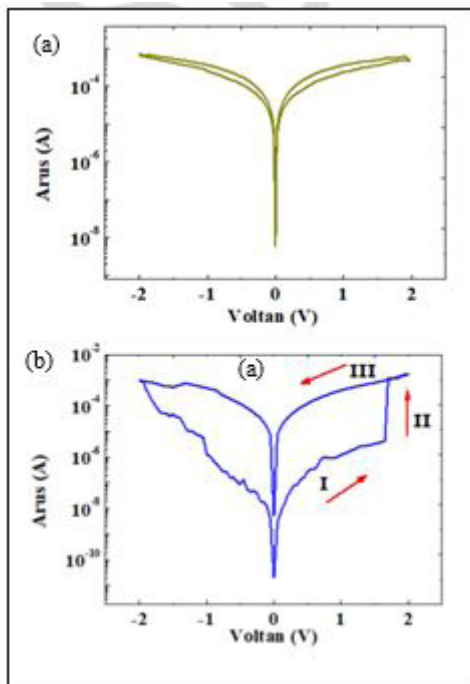
(d)

RAJAH 2. Gambaran struktur peranti-peranti (a) Ref, dan (b) peranti NVM-PT. (c) Imej struktur keratan FESEM, dan (d) gambar peranti NVM-PT

Perubahan mendadak ini menukar peranti daripada keadaan arus rendah kepada keadaan arus tinggi. Peranti adalah kekal dalam keadaan arus tinggi apabila voltan diimbaskan daripada +2.0 kepada 0 V. Apabila kekutuban pincang diubah kepada 0 hingga -2.0 V, peranti beralih daripada keadaan arus tinggi kepada keadaan arus rendah pada -2.0 V. Peranti adalah kekal dalam keadaan arus rendah apabila voltan diimbaskan dari -2.0 ke 0 V.

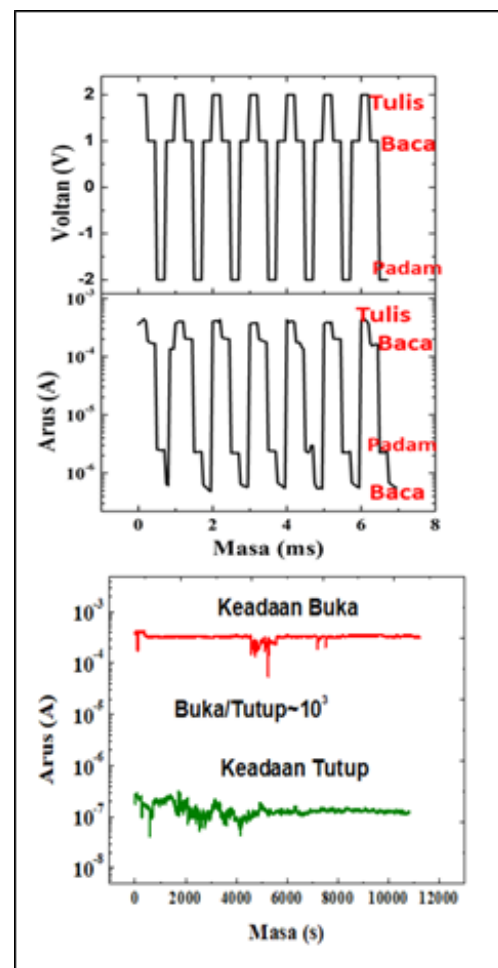
Tiga bahagian yang berbeza telah ditandakan dalam lengkung I-V seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3(b). Ini bertujuan untuk memahami mekanisme konduksi dominan yang mungkin berlaku dalam peranti memori NVM. Kaedah penyesuaian lengkung (curve fitting) menggunakan plot log berganda data I-V untuk mengenalpasti mekanisme-mekanisme konduksi. Pada

bahagian I, elektron mungkin diangkut melalui antara muka penebat-logam melalui pancaran Schottky dan Poole-Frenkel (PF) kerana mekanisme konduksi ini berkemungkinan berlaku pada 230 nm ketebalan komposit nano (Liu et al. 2002; Suñé et al. 2011). Data eksperimen yang diperoleh pada bahagian keadaan ‘tutup’ dapat disesuaikan dengan baik menggunakan persamaan-persamaan  $\ln(1/T^2) \propto V^{0.5}$  dan  $\ln(1/V) \propto V^{0.5}$ , di mana T adalah suhu, masing-masing menunjukkan kehadiran mekanisme pancaran Schottky dan PF. Ketika voltan pincang ditingkatkan kepada  $V_{buka}$  pada bahagian II, cerun penyesuaian lengkung adalah lebih kurang 36.7 seperti ditunjukkan dalam Rajah 3(b). Pada ketika ini, mekanisme pengangkutan bertukar mengikuti model arus terhad cas ruang dengan perangkap, atau lebih dikenali sebagai arus terhad cas terperangkap (TCLC) kerana cerun yang jauh lebih besar daripada 2 (Yamamoto et al. 2005; Chin et al. 2011). Dalam bahagian ini, tapak perangkap dengan kehadiran  $Ti_3C_2T_x$  mula diisi dengan elektron-elektron sebagai hasil peningkatan arus mendadak. Setelah tapak perangkap diisi dengan elektron, mekanisme pengangkutan bertukar kepada arus terhad cas ruang (SCLC) dengan cerun lengkung  $\sim 1.5$  ditunjukkan dalam bahagian III. Peranti berada dalam rejim balistik seperti yang diterangkan oleh hukum Child Langmuir (Tan et al. 2003; Some et al. 1998). Peranti kekal dalam keadaan buka walaupun voltan yang diimbaskan berkurangan hingga ke 0 V.



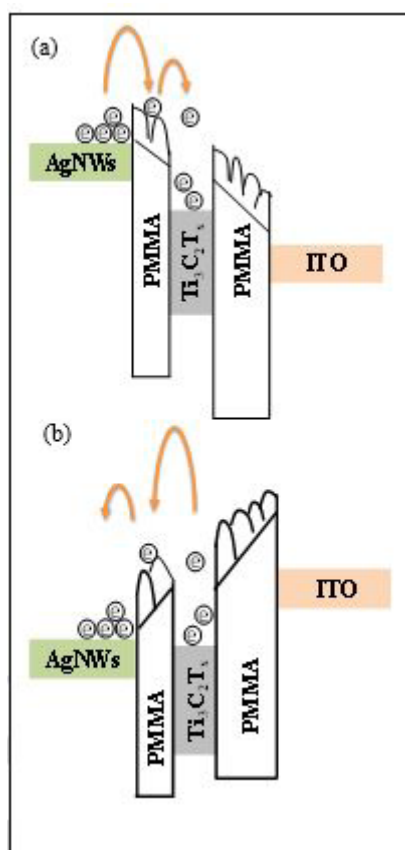
RAJAH 3. Graf-graf semi log pencirian I-V untuk peranti-peranti (a) Ref, dan (b) NVM-PT

Seterusnya, ciri ketahanan dan pengekalan dilakukan untuk menguji prestasi dan kestabilan peranti memori. Kitaran ketahanan pada Rajah 4(a) telah diuji dalam urutan Tulis (2 V) - Baca (1 V) - Padam (-2 V) - Baca (1 V) dengan Tulis dan Padam ialah voltan pincang untuk menukar peranti memori masing-masing kepada keadaan ‘Buka’ dan ‘Tutup’. Dua keadaan rintangan dibaca pada 1 V untuk beberapa kitaran yang kekal stabil dengan nilai yang boleh dibezakan bagi kedua-dua keadaan rintangan, seperti yang boleh dilihat daripada Rajah 3(a). Keadaan rintangan yang stabil adalah syarat penting untuk mengelakkan salah pembacaan dua nilai sistem logik dengan keadaan ‘Buka’ dan ‘Tutup’ untuk aplikasi sebenar. Ujian pengekalan telah dilakukan dan hasilnya ditunjukkan dalam Rajah 4(b). Voltan Tulis dan Padam yang berlawanan pengutuban telah dikenakan pada peranti. Kemudiannya, kestabilan dua keadaan rintangan bagi peranti telah dibaca pada 1 V selama  $1 \times 10^4$  s dalam keadaan sekitar. Keputusan pengekalan yang diperolehi menunjukkan keadaan rintangan ‘Buka’ dan ‘Tutup’ tanpa sebarang kemerosotan yang ketara selama masa tersebut dengan nisbah arus ‘Buka/Tutup’ ialah  $10^3$ .



RAJAH 4. Data pengujian (a) ketahanan, dan (b) kestabilan pengekalan bagi peranti NVM-PT





RAJAH 5. Gambar skematik jalur tenaga untuk mencadangkan mekanisme konduksi yang berkemungkinan dominan semasa proses (a) pemrograman, dan (b) pepadaman

Rajah 5(a) and (b) mengilustrasikan gambar jalur tenaga peranti NVM-PT ketika proses program dan padam. Dalam Rajah 5(a), ketika peranti diprogramkan dengan voltan 2 V, elektron beralih daripada elektrod AgNWs menuju ke  $Ti_3C_2T_x$  dan terperangkap di dalam tapak perangkap  $Ti_3C_2T_x$ . Manakala dalam Rajah 5(b), ketika peranti dipadamkan dengan voltan -2 V, elektron dilepaskan daripada  $Ti_3C_2T_x$  dan kembali ke elektrod AgNWs. Kitaran proses ini adalah boleh berulang dan cas-cas yang disimpan tidak meruap. Pensuisan ‘Buka’ dan ‘Tutup’ untuk beberapa kali kitaran dapat dilakukan dengan voltan yang sesuai ketika pincangan depan dan sonsang.

## KESIMPULAN

Pensuisan dwistabil peranti NVM dengan struktur MIM menggunakan komposit nano PMMA- $Ti_3C_2T_x$  telah difabrikasi dengan kaedah pemrosesan larutan. Lengkung I-V peranti AgNWs/PMMA- $Ti_3C_2T_x$ /ITO/PET menunjukkan pensuisan dengan tettingkap histerisis yang ketara. Kitaran ketahanan peranti untuk kedua-dua keadaan

rintangan adalah stabil dan hasil uji pengekal menunjukkan keadaan rintangan yang stabil tanpa sebarang kemerosotan selama  $10^4$  s dengan nisbah arus ‘Buka/Tutup’ sebesar  $10^3$ . Pancaran Schottky, PF, TCLC, dan SCLC dicadangkan sebagai mekanisme konduksi yang dominan untuk peranti NVM berasaskan ciri I-V yang diperoleh. Hasil kerja ini menunjukkan kemampuan  $Ti_3C_2T_x$  memerangkap cas dan penggabungannya dengan lapisan PMMA untuk aplikasi peranti memori dengan ketumpatan penyimpanan yang tinggi, lutsinar dan pakai buang.

## PENGHARGAAN

Penyelidikan ini disokong oleh FRGS/1/2022/TK08/UKM/02/13 Skim Geran Penyelidikan Fundamental (FRGS).

## PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada

## RUJUKAN

- Auliya, R. Z., Poh, C. O., Rad, S., Noor, A. T., Zhi, Y. Y., Muhammad, A. S. M. H., Boon, T. G., Chang, F. D., Navid, A., & Sameer, Al-Bati. 2021. Exploration of 2D  $Ti_3C_2$  MXene for all solution processed piezoelectric nanogenerator applications. *Scientific reports* 11 (1): 1–13.
- Bertolazzi, S., Paolo, B., Stephan, R., Tamer, S., Sung-Yool, C., Luigi, C., Francesco, B., & Paolo, S. 2019. Nonvolatile memories based on graphene and related 2D materials. *Advanced materials* 31 (10) 1806663.
- Chen, Y., Gang, L., Cheng, W., Wenbin, Z., Run-Wei, L., & Luxing, W. 2014. Polymer memristor for information storage and neuromorphic applications. *Materials Horizons* 1 (5): 489–506.
- Chin, A., Tsai, C. Y., & Wang, H. 2011. High performance charge-trapping flash memory with highly-scaled trapping layer. *11th Annual Non-Volatile Memory Technology Symposium Proceeding, Shanghai, China* 1–4.
- Ding, G., Kelin, Z., Kui, Z., Zongxiao, L., Ye, Z., Yongbiao, Z., Li, Z., Xiaoli, C., & Su-Ting, H. 2019. Configurable multi-state non-volatile memory behaviors in  $Ti_3C_2$  nanosheets. *Nanoscale* 11 (15): 7102–7110.
- Duangthong, C., Phakphisut, W., & Supnithi, P. 2019. Capacity Enhancement of Asymmetric Multi-Level Cell (MLC) NAND Flash Memory using Write

- Voltage Optimization. *34th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC), JeJu, Korea (South)* 1–4.
- Feng, X., Huang, J., Ning, J., Wang, D., Zhang, J., & Hao, Y. 2023. A novel nonvolatile memory device based on oxidized  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene for neurocomputing application. *Carbon*, 205, 365–372.
- Khot, A. C., Dongale, T. D., Park, J. H., Kesavan, A. V., & Kim, T. G. 2021.  $\text{Ti}_3\text{C}_2$ -based MXene oxide nanosheets for resistive memory and synaptic learning applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(4), 5216–5227.
- Khot, A. C., Dongale, T. D., Nirmal, K. A., Deepthi, J. K., Sutar, S. S., & Kim, T. G. 2023. 2D  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene-derived self-assembled 3D  $\text{TiO}_2$  nanoflowers for nonvolatile memory and synaptic learning applications. *Journal of Materials Science & Technology*, 150, 1–10.
- Lee, J. 2011. Progress in non-volatile memory devices based on nanostructured materials and nanofabrication. *Journal of materials chemistry* 21 (37): 14097–14112.
- Liu, P., Chang T.C., Hsu, K.C., Tseng, T., Chen L.M., Wang, C.J., & Sze, S.M. 2002. Characterization of porous silicate for ultra-low k dielectric application. *Thin solid films* 414 (1): 1–6.
- Mao, H., Gu, C., Yan, S., Xin Q., Cheng S., Tan P., Wang, X., Xiu, F., Liu, X., & Liu, J. 2020. MXene quantum dot/polymer hybrid structures with tunable electrical conductance and resistive switching for nonvolatile memory devices. *Advanced Electronic Materials* 6 (1): 1900493.
- Naguib, M., Kurtoglu, M., Presser, V., Lu, J., Niu, J., Heon, M., Hultman, L., Gogotsi, Y., & Barsoum, M. W. 2011. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$ . *Advanced materials* 23 (37): 4248–4253.
- Shamiryan, D., Abell, T., Iacopi, F., & Maex, K. 2004. Low-k dielectric materials. *Materials today* 7 (1): 34–39.
- Some, R., & Minning, C. P. 1998. Overview of non-volatile memory packaging needs and approaches for space based systems. *Seventh Biennial IEEE International Nonvolatile Memory Technology Conference. Proceedings (Cat. No.98EX141), Albuquerque, NM, USA* 14–.
- Son, D. I., Kim, T. W., Shim, J. H., Jung, J. H., Lee, D. U., Lee, J. M., Park, W. I., & Choi, W. K. 2010. Flexible organic bistable devices based on graphene embedded in an insulating poly (methyl methacrylate) polymer layer. *Nano letters* 10 (7): 2441–2447.
- Song, H., Zhang, C., Zhang, S., & You, X. Polar code-based error correction code scheme for NAND flash memory applications. 2016. *2016 8th International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), Yangzhou, China* 1–5.
- Suñé, J., Miranda, E., Jiménez, D., Long, S., & Liu, M. 2011. From dielectric failure to memory function: Learning from oxide breakdown for improved understanding of resistive switching memories. *2011 11th Annual Non-Volatile Memory Technology Symposium Proceeding, Shanghai, China* 1–6.
- Tan, J., & Anderson, W.A. 2003. Current transport in copper indium gallium diselenide solar cells comparing mesa diodes to the full cell. *Solar energy materials and solar cells* 77 (3): 283–292.
- Yamamoto, H., Kasajima H., Yokoyama W., Sasabe H., & Adachi, C. 2005. Extremely-high-density carrier injection and transport over  $12\,000\text{ A/cm}^2$  into organic thin films. *Applied Physics Letters* 86 (8): 083502.
- Yang, H., Valenzuela, S. O., Chshiev, M., Couet, S., Dieny, B., Dlubak, B., Fert, A., Garello, K., Jamet, M., & Jeong, D. 2022. Two-dimensional materials prospects for non-volatile spintronic memories. *Nature* 606 (7915): 663–673.
- Zheng, H., Zhou, Y., & Gangopadhyay, S. 2015. Size-dependent work function and single electron memory behavior of pentacene non-volatile memory with embedded sub-nanometer platinum nanoparticles. *Journal of Applied Physics* 117 (2): 024504.