

## Kesan Sistematik Modifikasi Dielektrik dengan Asid Fosfonik Alkil Ekalapisan terhadap Prestasi Transistor Filem Nipis Organik Saluran-N

(The Effect of Systematic Modification of Phosphonic Acid Alkyl Dielectric with monolayer on the Performance of Organic Thin Film Transistors-N Channel)

MOHD ZULHAKIMI ABDUL RAZAK, MOHD FARHANULHAKIM MOHD RAZIP WEE, MUHAMAD RAMDZAN BUYONG, SAWAL HAMID MD ALI, TEH CHIN HOONG, JUMADI ABDUL SUKOR & AHMAD GHADAFI ISMAIL\*

### ABSTRAK

*Kajian ini membincangkan tentang kesan panjang rantai karbon pada asid alkil fosfonik ekalapis pengumpulan sendiri terhadap prestasi transistor organik filem nipis saluran-n terbentuk berdasarkan  $N,N'$ -ditridekil-3,4,9,10-perilenadikarboximide (PTCDI- $C_{13}$ ). Prestasi transistor organik filem nipis tersebut meningkat dengan peningkatan panjang rantai ekalapis pengumpulan sendiri pada dielektrik  $SiO_2$ . Magnitud mobiliti setinggi  $0.3 \text{ cm}^2/Vs$  dan nisbah arus buka/tutup lebih tinggi daripada  $10^5$  telah dicapai. Transistor tersebut adalah calon terbaik untuk menyaingi transistor organik filem nipis pentacene saluran-p untuk menghasilkan litar semikonduktor logam pelengkap teroksida organik (O-CMOS). Prestasi peranti ini tidak bergantung terhadap panjang rantaian alkil apabila diuji di dalam udara ambien.*

*Kata kunci: Asid fosfonik; ekalapis pengumpulan sendiri; PTCDI; salur-n; transistor filem nipis organik*

### ABSTRACT

*The performance of  $N,N'$ -ditridecyl-3,4,9,10-perylenetetracarboxylic diimide (PTCDI- $C_{13}$ ) based n-channel organic thin film transistors with different carbon chain length of alkyl phosphonic acid self-assembled monolayers were investigated and presented in this paper. The study observed an improving trend in the performance of the organic thin film transistor with increasing self-assembled monolayer chain length on  $SiO_2$  dielectric. The results show mobility improvement reaching  $0.3 \text{ cm}^2/Vs$  and larger than  $10^5$  on/off current ratio. This study suggests these transistors should be a good match with p-channel pentacene organic thin film transistors for an organic complementary metal oxide semiconductor (O-CMOS) circuits. The device has no dependency with the alkyl chain length when tested in ambient air.*

*Keywords: N-channel; organic thin film transistor; phosphonic acid; PTCDI; self-assembled monolayer*

### PENGENALAN

Bahan semikonduktor organik (OSC) telah menunjukkan potensi untuk digunakan di dalam transistor filem nipis organik (OTFT), diod pemancar cahaya organik (OLED), dan sel solar organik. Banyak aplikasi yang menggunakan peranti berasaskan bahan OSC ini telah dihasilkan, contohnya termasuklah kertas elektronik, paparan boleh lentur, tag pengenalan berfrekuensi radio (RFID), kad pintar, dan penganalisis kimia. Kelebihan utama menggunakan OSC ini ialah kos pembuatan yang rendah, suhu pemrosesan yang rendah, dan keserasian terhadap substrat boleh lentur yang mendorong kepada peranti yang ringan dan lasak.

Kebanyakan OTFT adalah peranti saluran-p memandangkan kebiasaan ianya menunjukkan prestasi elektronik (mobiliti, nisbah arus buka/tutup, kecerunan *subambang*) yang lebih baik. Prestasi sebanding antara OTFT saluran-n dan saluran-p diperlukan untuk membentuk semikonduktor logam teroksida pelengkap organik (O-CMOS) yang boleh digunakan. Secara relatif, mobiliti,  $\mu$  peranti saluran-n yang rendah sebahagiannya adalah kerana keadaan perangkap elektron yang besar (yang telah menghadkan pengangkutan elektron) yang wujud

di bahagian pukal dan pada bahagian antara muka antara saluran organik yang aktif dan get dielektrik. Perangkap antara muka ini adalah berkemungkinan disebabkan oleh kewujudan kumpulan hidrosil pada  $SiO_2$  dan lain-lain permukaan (Chua et al. 2005). Lebih memburukkan keadaan, kebanyakan OTFT saluran-n bermobiliti tinggi adalah tidak stabil di dalam udara persekitaran kerana wujudnya keadaan perangkap yang boleh menjejaskan prestasi OTFT yang terhasil akibat tindak balas kimia antara OTFT dengan oksigen dan wap air (Weitz et al. 2008). Kebanyakan pengangkutan elektron di dalam saluran organik aktif adalah terhad kepada beberapa lapisan molekular ekalapisan pada antara muka organik/dielektrik (Bao 2007). Oleh kerana itu, ciri fizikal antara muka dielektrik mempunyai impak yang ketara terhadap pengangkutan cas dan prestasi kestabilan OTFT (Ismail & Hill 2011). Dalam rujukan ini juga didapati pemanasan substrat pada suhu sederhana ( $60$  to  $100^\circ C$ ) semasa pemendapan organik telah menghasilkan lapisan filem yang lebih tersusun dan mobiliti yang bertambah baik. Tambahan pula, ekalapisan pengumpulan sendiri (SAM) telah digunakan secara meluas sebagai penampan antara

muka organik dan dielektrik yang menghasilkan susunan molekular yang lebih baik dalam filem nipis. SAM yang terikat kepada dielektrik juga menggantikan kumpulan hidroksil yang menyebabkan ketumpatan perangkap elektron yang lebih rendah (Chua et al. 2005). SAM juga merendahkan kebocoran arus get di dalam OTFT (Halik et al. 2004), sama seperti peranan yang dimainkan oleh transistor kesan-medan semikonduktor logam teroksida (MOSFET) dalam menurunkan tahap kebocoran arus yang disebabkan oleh ketebalan oksida yang menipis (Maheran et al. 2014).

Untuk disepadukan dengan OTFT saluran-p (pentacene) yang terbaik, iaitu yang mempunyai mobiliti bermagnitud  $\sim 1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , satu peranti saluran-n dengan mobiliti elektron yang sebanding saluran-p adalah diperlukan untuk menghasilkan O-CMOS. Terbitan kepada Perylenetetra-karboksilik diimide (PTCDI) telah dikenal pasti sebagai calon yang sesuai untuk dijadikan OTFT saluran-n. Sebahagian daripada contoh-contoh terbitan ini ialah PTCDI-TFB (trifluorometilbenzil) dengan mobiliti,  $\mu = 0.041 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  (Hosoi et al. 2007), PTCDI- $\text{C}_{13}$  dengan nilai  $\mu = 0.7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  (Ismail 2018),  $\mu = 0.012 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  (Unni et al. 2005), dan  $\mu = 0.28$  kepada  $0.58 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  (Gundlach et al. 2005), PTCDI- $\text{C}_8$  dengan  $0.6 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  (Malenfant et al. 2002) dan  $\mu = 1.7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  (Chesterfield et al. 2004a). Chesterfield et al. (2004a) telah melaporkan kajian terhadap PTCDI dengan pelbagai panjang kumpulan dan  $\text{C}_8$  diapati sebagai yang terbaik, sepadan dengan laporan terdahulu (Malenfant et al. 2002).

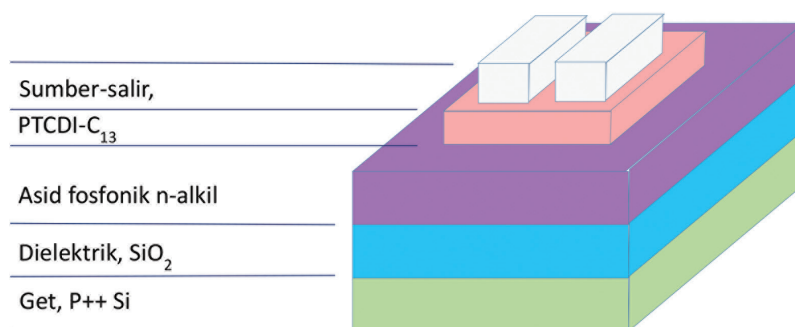
Kumpulan SAM seperti hexametil-disilazane (HMDS) (Hosoi et al. 2007), oktadecyl-trichlorosilane (OTS) (Gundlach et al. 2005; Hosoi et al. 2007), Organofosfonat (Acton et al. 2010; Liao et al. 2010) dan lapisan tipis poli( $\alpha$ -metilstirena) didapati dapat meningkatkan ciri-ciri elektronik OTFT berasaskan pentacene dan PTCDI (Chesterfield et al. 2004a).

Kesan panjang rantai asid fosfonik alkil berasaskan SAM terhadap transistor saluran-p berasaskan pentacene telah dinyatakan pada laporan terdahulu (Acton et al. 2010; Hill et al. 2009). Sungguhpun SAM berasaskan asid fosfonik telah digunakan pada OTFT saluran-n  $\text{F}_{16}\text{CuPc}$  (Klaauk et al. 2007), namun masih belum terdapat kajian yang sistematik tentang kesan kepelbagaian panjang rantai

dilakukan. Oleh itu, kajian lebih lanjut telah dijalankan dengan menggunakan SAM terhadap transistor saluran-n berasaskan PTCDI, untuk mengkaji tentang kesan panjang rantai alkil terhadap prestasi OTFT saluran-n. Di dalam uji kaji ini, PTCDI- $\text{C}_{13}$  telah digunakan sebagai saluran aktif. Kami juga mencadangkan alkil SAM yang optimum bagi membolehkan satu solusi yang praktikal dalam menghasilkan peranti pelengkap.

#### KAEDAH UJI KAJI

Dalam uji kaji ini, teknik penyejatan terma telah digunakan untuk penyediaan peranti. Substrat silikon dengan  $p^{++}$  yang terdop dengan tebal lapisan  $\text{SiO}_2$  100 nm sebagai dielektrik telah digunakan sebagai saluran get transistor, seperti dalam Rajah 1. Sebelum pemendapan PTCDI- $\text{C}_{13}$ , sumber aluminium dan sentuhan salir dilakukan, substrat tersebut telah dibersihkan terlebih dahulu dengan melakukan *sonication* selama 15 min di dalam metanol, ditiup kering dengan segera menggunakan udara yang dimampatkan dan diikuti dengan rawatan plasma oksigen di dalam plat selari pemunaran berion reaktif pada kuasa RF sebanyak 250 W, dengan tekanan sebanyak 200 mTorr, 20 sccm  $\text{O}_2$  selama 1 min. Selepas pemunaran, sebanyak empat substrat telah direndam dengan segera di dalam 0.5 mmol larutan asid fosfonik n-alkil (Strem Chemical) di dalam isopropanol untuk sekurang-kurangnya selama 24 jam. Rantaian alkil mempunyai gabungan atom karbon bernombor genap dengan julat daripada 6 kepada 18 (iaitu  $\text{C}_6$ ,  $\text{C}_{10}$ ,  $\text{C}_{14}$ ,  $\text{C}_{18}$ ). Selepas perendaman, substrat tersebut ditiup kering dengan menggunakan udara termampat, bersepuh lindap di bawah vakum kasar selama 10 min pada suhu 200 hingga 205°C, kemudian dibilas dengan menggunakan sebatian isopropanol sebelum ditiup kering sekali lagi. Sebagai tambahan kepada empat substrat tersebut terdapat dua substrat lagi digunakan sebagai kawalan penimbal. Substrat kawalan yang pertama (ditandakan sebagai 'Plasma  $\text{O}_2$ ') ialah substrat  $\text{SiO}_2$  yang menjalani pemendapan PTCDI- $\text{C}_{13}$  segera selepas rawatan plasma oksigen, dan substrat kawalan kedua (ditandakan sebagai 'isopropanol') yang menjalani prosedur yang sama seperti keempat-empat substrat terdahulu kecuali ianya telah direndam di dalam larutan isopropanol berbanding dengan substrat lain yang



RAJAH 1. Gambar rajah skema mewakili struktur transistor PTCDI- $\text{C}_{13}$

telah direndam di dalam larutan asid fosfonik n-alkil.

Tatasusunan sentuhan atas transistor difabrikasi dengan menggunakan nisbah lebar/panjang ( $W/L$ ) berubah daripada 1500  $\mu\text{m}/100 \mu\text{m}$  kepada 500  $\mu\text{m}/250 \mu\text{m}$ . PTCDI- $C_{13}$  (Sigma Aldrich) telah dimendapkan sebagaimana diterima melalui topeng stensil pada kadar 0.05 nm/s untuk 10 nm yang pertama dan 0.1 nm/s selanjutnya sehingga mencapai jumlah ketebalan pada anggaran 50 nm. Suhu substrat dikekalkan pada 90°C semasa proses pemendapan dengan jumlah tekanan tidak melebihi  $8.5 \times 10^{-6}$  Torr. Lanjutan daripada pemendapan PTCDI- $C_{13}$  dan penyejukan substrat pada suhu kurang daripada 40°C, vakum dinyahkan dan topeng stensil sumber-salir telah digunakan untuk menghasilkan sentuhan aluminium. Elektrod sumber-salir aluminium telah dihasilkan dengan kaedah mendapan pada kadar 0.1 nm/s sehingga mencapai jumlah ketebalan pada anggaran 56 nm. Substrat telah dikekalkan pada suhu bilik sepanjang proses pemendapan aluminium dan magnitud tekanan tidak pernah melebihi  $8.5 \times 10^{-6}$  Torr. Vakum sekali lagi dinyahkan dan mendedahkan transistor seketika kepada udara persekitaran sebelum ia disimpan di dalam kotak uji kaji bersarung tangan  $N_2$  untuk pengujian. Keputusan daripada pengujian di dalam kotak uji kaji  $N_2$ , kesemua peranti telah diuji di dalam udara persekitaran, satu pasangan pada sesuatu masa, dan memastikan peranti lain yang tidak diuji disimpan kemas di dalam kotak sarung untuk mengelakkan daripada terdedah kepada udara.

Dua unit pengukur sumber Keithly 236 telah digunakan untuk menilai ciri elektronik bagi peranti tersebut. Salah satu unit digunakan untuk mengawal voltan salir-sumber ( $V_{ds}$ ) dan mengukur arus salir ( $I_d$ ), manakala satu lagi unit digunakan untuk mengukur voltan get-sumber ( $V_{gs}$ ). Ciri-ciri ketepuan diukur dengan menetapkan  $V_{ds} = +50 \text{ V}$  dan mengubah nilai  $V_{gs}$  antara -5 V dan +50 V. Nilai voltan ambang ( $V_t$ ) dan mobiliti elektron ( $\mu$ ) telah diperolehi daripada persamaan tepuan transistor kesan medan (Razavi 2001),

$$I_d \approx \mu C_{ox} \frac{W}{L} (V_{gs} - V_t) V_{ds} \quad (1)$$

dengan  $C_{ox}$  adalah kapasitans dielektrik untuk setiap unit luas.

## KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

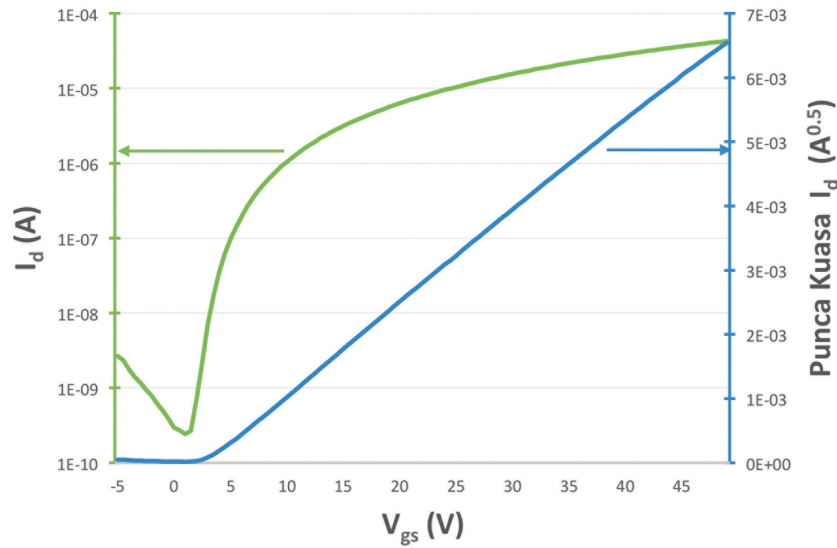
Pengukuran sudut sentuhan dilakukan pada tiga empat lokasi pada substrat pengujian untuk setiap rawatan SAM. Jadual 1 menunjukkan nilai purata untuk sudut sentuhan bagi setiap jenis sampel. Terdapat peningkatan sudut sentuhan dengan pertambahan panjang rantai dan ini menunjukkan sifat kehidrofobian semakin jelas dengan peningkatan panjang rantaian. Sudut sentuhan bermula pada 89.1° untuk panjang rantai  $C_6$  dan meningkat perlahan-lahan kepada 103.3° untuk panjang rantai  $C_{18}$ . Substrat yang terendam dengan isopropanol mempamerkan nilai sudut sentuhan yang lebih tinggi, iaitu pada nilai 73.2°, berbanding dengan sudut sentuhan yang sangat kecil oleh rawatan plasma  $O_2$ , dan ini menunjukkan wujudnya pencemaran pada permukaan substrat-substrat tersebut. Walau bagaimanapun, nilai ini masih rendah, di dalam sisihan sebanyak hampir 15.9°, berbanding dengan peranti yang dihasilkan berasaskan panjang rantaian SAM yang terpendek. Ini secara jelas menunjukkan pengaruh SAM terhadap peranti ini. Satu keluk pemindahan yang tipikal dilakarkan dalam Rajah 2, dengan kedua-dua lengkung logaritma dan lengkung punca kuasa arus saliran berlawanan dengan  $V_{gs}$  disertakan bersama. Data ini yang diperolehi daripada transistor SAM yang dihasilkan berasaskan asid fosfonik  $C_{10}$  dengan nisbah  $W/L = 1500 \mu\text{m}/250 \mu\text{m}$ . Untuk peranti tersebut, mobiliti, nisbah arus buka/tutup ( $I_{on}/I_{off}$ ) dan kecerunan *sub*-ambang ( $S$ ) masing-masing bernilai 0.22  $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ,  $1.5 \times 10^5$ , dan 1.04 V/dec.

Data mobiliti ditunjukkan dalam Rajah 3 untuk asid fosfonik n-alkil dan peranti kawalan. Titik-titik data mewakili nilai purata dan didapati satu kecenderungan dalam peningkatan mobiliti apabila nilai panjang rantai bertambah. Chesterfield et al. (2004a) telah melaporkan tentang kehidrofobian dielektrik tidak mempunyai sebarang pengaruh kepada mobiliti. Walau bagaimanapun, dalam uji kaji tersebut, mereka telah menggunakan nilai pemendapan yang sangat rendah. Nilai mendapan di dalam rujukan Chesterfield et al. (2004a) adalah sangat berbeza dengan kajian ini.

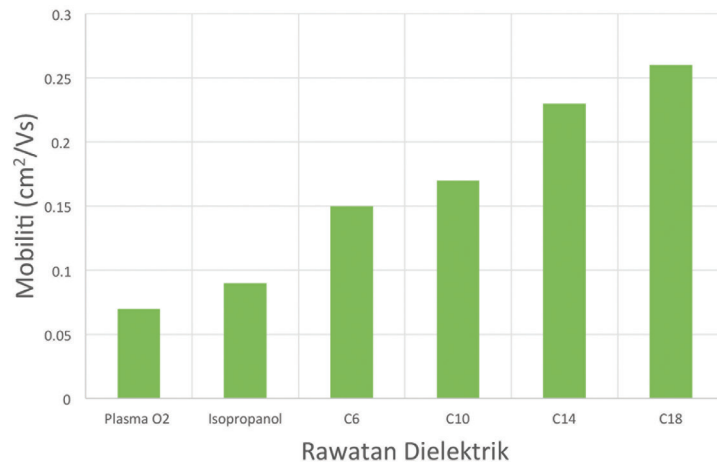
Peranti plasma  $O_2$ , yang tidak direndam dalam mana-mana larutan, mempunyai nilai mobiliti purata sebanyak 0.07  $\text{cm}^2/\text{Vs}$ . Sementara itu, peranti isopropanol telah

JADUAL 1. Ringkasan dapatan untuk peranti asid fosfonik n-alkil SAM dan peranti kawalan di dalam nitrogen (kotak bersarung tangan)

	Kawalan		Ekalapis Pengumpulan Kendiri (SAM)			
	$O_2$ plasma	IPA	$C_6$	$C_{10}$	$C_{14}$	$C_{18}$
Pengukuran sudut (deg) [ $^\circ$ ]	rendah	73.2	89.1	96.3	102.5	103.3
Mobiliti ( $\mu$ ) [ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ]	0.07	0.09	0.15	0.17	0.23	0.26
$I_{on}/I_{off}$	$10^4$	$10^4$	$10^5$	$10^5$	$10^5$	$10^5$
Kecerunan <i>sub</i> ambang ( $S$ ) [V/dec]	1.05	1.17	0.99	0.91	1	0.88
Voltan ambang ( $V_t$ ) [V]	8.7	1.7	7.4	2	1.4	11.7



RAJAH 2. Lengkok-lengkuk pemindahan untuk peranti menggunakan asid fosfonik C<sub>10</sub> dengan nisbah W/L = 1500 μm/250 μm dan V<sub>ds</sub> = +50 V



RAJAH 3. Mobiliti setiap panjang rantai asid fosfonik n-alkil berasaskan SAM dan peranti kawalan di dalam nitrogen (kotak bersarung tangan)

memberikan purata mobiliti yang sedikit tinggi, iaitu 0.09 cm<sup>2</sup>/Vs, dan ini telah menunjukkan kesan pengaruh lebih pencemaran permukaan terhadap substrat silikon selepas tiupan pengeringan dengan menggunakan udara termampat. Peningkatan mobiliti yang ketara dapat dilihat terhadap substrat yang dihasilkan melalui rawatan SAM berbanding rawatan plasma O<sub>2</sub> dan substrat isopropanol. Purata mobiliti untuk panjang rantai C<sub>6</sub> ialah 0.15 cm<sup>2</sup>/Vs dan purata mobiliti ini meningkat kepada 0.26 cm<sup>2</sup>/Vs untuk panjang rantai C<sub>18</sub>. Nilai mobiliti setinggi 0.3 cm<sup>2</sup>/Vs telah diperolehi daripada transistor berasaskan C<sub>18</sub>, dengan hasil yang lebih baik berbanding keputusan terdahulu (Maheran et al. 2014) dengan membandingkan peranti PTCDI-C<sub>13</sub> dengan struktur binaan yang sama. Ini menunjukkan bahawa SAM berasaskan C<sub>18</sub> adalah transistor PTCDI-C<sub>13</sub> yang memberikan keputusan yang terbaik dalam kajian ini.

Data berkenaan nisbah arus buka/tutup dipaparkan di dalam Jadual 1, kedua-dua peranti plasma O<sub>2</sub> dan isopropanol mempunyai I<sub>on</sub>/I<sub>off</sub> kurang dari 10<sup>5</sup>. Nilai I<sub>on</sub>/I<sub>off</sub> bagi peranti plasma O<sub>2</sub> berada pada bahagian atas dalam skala julat 10<sup>4</sup>, manakala peranti isopropanol mempunyai nilai I<sub>on</sub>/I<sub>off</sub> yang berada pada bahagian skala bawah dalam skala julat 10<sup>4</sup>. Kewujudan pencemaran daripada isopropanol didapati telah menyebabkan kemerosotan prestasi I<sub>on</sub>/I<sub>off</sub> peranti. Walau bagaimanapun, kesemua peranti yang disediakan melalui kaedah SAM telah memberikan bacaan I<sub>on</sub>/I<sub>off</sub> melebihi 10<sup>5</sup> yang dengan jelas menunjukkan impak yang dicetuskan oleh SAM terhadap transistor-PTCDI-C<sub>13</sub> tersebut. Jadual I juga menunjukkan data kecerunan subambang S transistor-transistor tersebut. Nilai purata bagi S untuk peranti plasma O<sub>2</sub> ialah 1 V/dec, manakala didapati nilai purata bagi S ialah 1.2 V/dec untuk peranti-isopropanol. Untuk peranti yang telah melalui



kaedah SAM, terdapat sedikit peningkatan pada nilai  $S$  dan ia didapati agak malar pada nilai sekitar 0.9 V/dec, dengan nilai paling rendah yang direkodkan adalah 0.7 V/dec. Oleh itu, peningkatan yang dicapai adalah sangat rendah, dan ia dianggap tidak bergantung kepada panjang rantaian alkil.

Jika diimbangi kembali, kesemua peranti tersebut telah terdedah kepada oksigen buat pertama kali antara proses pemendapan PTCDI dan aluminium, dan untuk kali kedua, semasa pemindahan peranti ke dalam kotak uji kaji bersarung tangan  $N_2$ , selepas proses fabrikasi. Pendedahan kepada oksigen ini telah mencetuskan keadaan wujudnya perangkap kompleks metastabil dan apabila bersama dengan pincangan get, ia telah meningkatkan lagi pembentukan perangkap metastabil (Chesterfield et al. 2004b). Sepanjang beberapa proses fabrikasi peranti tersebut, didapati wujudnya variasi pada  $V_f$ , tanpa mengambil kira samada substrat tersebut telah dirawat dengan menggunakan SAM, isopropanol atau plasma  $O_2$ , keadaan ini sekali lagi bersetuju dengan rujukan Chesterfield et al. (2004b) yang melakukan pemerhatian terhadap kebolehubahan (antara -5V dan +5V) daripada satu proses fabrikasi kepada proses fabrikasi yang lain. Oleh itu, ini dapat disimpulkan bahawa variasi yang berlaku kepada  $V_f$  adalah berhubung kait dengan pendedahan filem PTCDI kepada oksigen, semasa proses fabrikasi dan ketika proses pemindahan ke dalam kotak bersarung tangan, keadaan ini telah mengakibatkan keadaan kecacatan metastabil molekul pada filem tersebut (Chesterfield et al. 2004b). Sungguhpun begitu, faktor lain seperti variasi semasa proses fabrikasi boleh juga menyumbang kepada keadaan ini.

Jika dibandingkan nilai keputusan mobiliti dengan transistor berasaskan pentacene lain yang menggunakan kaedah SAM (Acton et al. 2010; Hill et al. 2009), transistor pentacene terdahulu mencatatkan nilai purata mobiliti antara julat ~0.2 ke 1.5  $cm^2/Vs$ , sementara dalam kajian kami, nilai purata mobiliti transistor PTCDI- $C_{13}$  adalah dalam lingkungan nilai 0.15 ke 0.26  $cm^2/Vs$ . Nisbah mobiliti lubang pentacene kepada mobiliti elektron PTCDI- $C_{13}$  didapati mempunyai aliran yang seiring dengan nisbah antara mobiliti elektron kepada lubang di dalam teknologi silikon kristal, dan ini memberi gambaran bahawa O-CMOS boleh difabrikasi dengan menggunakan transistor PTCDI- $C_{13}$  ini.

Adalah diketahui bahawa peranti jenis-n seperti PTCDI adalah sensitif kepada oksigen dan kelembapan yang menyebabkan keadaan sukar diramal, dan operasi peranti yang sukar difahami. Secara objektifnya, prestasi transistor yang baik apabila terdedah kepada udara adalah amat dikehendaki dan ini adalah untuk memadamkan transistor jenis-n dengan transistor pentacene jenis-p. Untuk mendapatkan pemahaman yang lebih mendalam berhubung dengan impak yang dimainkan oleh dielektrik berasaskan SAM terhadap ketabihan udara, peranti tersebut telah diuji dalam keadaan berudara untuk mengkaji tahap degradasi yang berlaku. Berbanding dengan keadaan ujian dalam nitrogen (Jadual 1), mobiliti telah berkurang antara 0.009 ke 0.05  $cm^2/Vs$  di dalam udara ambien, tanpa

pergantian yang jelas terhadap panjang rantaian alkil dapat diperhatikan.

## KESIMPULAN

Kajian ini dengan nyata telah menunjukkan bahawa asid fosfonik SAM telah mempertingkatkan prestasi mobiliti, kecerunan *subambang*, dan nisbah arus buka/tutup transistor berasaskan PTCDI. Dengan fungsi peningkatan panjang rantaian alkil, transistor SAM ini dengan jelas telah menunjukkan peningkatan terhadap prestasi mobiliti. Tambahan lagi, proses perawatan SAM telah menyebabkan peningkatan berterusan terhadap kecerunan *subambang* dan nisbah arus buka/tutup. Apabila diuji dalam udara persekitaran, prestasi peranti tersebut telah menunjukkan kemerosotan, seperti yang dijangka. Uji kaji ini telah menunjukkan bahawa peranti PTCDI- $C_{13}$  yang difabrikasikan menggunakan asid fosfonik n-alkil berasaskan SAM mempunyai prestasi yang menyamai dan bersesuaian untuk kegunaan aplikasi O-CMOS, dengan keputusan SAM yang terbaik ialah asid fosfinik  $C_{18}$ .

## PENGHARGAAN

Geran Penyelidikan Universiti Kebangsaan Malaysia GUP-2018-158 dan Kementerian Pendidikan Malaysia FRGS/1/2018/TK04/UKM/02/11 telah menyokong kajian ini.

## RUJUKAN

- Acton, O., Ting, G.G., Shamberger, P.J., Ohuchi, F.S., Ma, H. & Jen, A.K.Y. 2010. Dielectric surface-controlled low-voltage organic transistors via n-alkyl phosphonic acid self-assembled monolayers on high-k metal oxide. *Applied Materials & Interfaces* 2: 511-520.
- Bao, Z. 2007. Organic materials for thin film transistors. *Material Matters* 2.3, 4. <https://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/material-matters/organic-materials.html>.
- Chesterfield, R.J., McKeen, J.C., Newman, C.R., Frisbie, C.D., Ewbank, P.C., Mann, K.R. & Miller, L.L. 2004a. Variable temperature film and contact resistance measurements on operating n-channel organic thin film transistors. *Journal of Applied Physics* 95: 6396.
- Chesterfield, R.J., McKeen, J.C., Newman, C.R., Ewbank, P.C., da Silva Filho, D.A., Breda, J.L., Miller, L.L., Mann, K.R. & Frisbie, C.D. 2004b. Organic thin film transistors based on n-alkyl perylene diimide: Charge transport kinetics as a function of gate voltage and temperature. *Journal of Physical Chemistry* 108: 19281-19292.
- Chua, L.L., Zauhsell, J., Chang, J.F., Ou, E.C.W., Ho, P.K.H., Sirringhaus, H. & Friend, R.H. 2005. General observation of n-type field-effect behaviour in organic semiconductors. *Nature* 434: 194-199.
- Gundlach, D.J., Pernstich, K.P., Wilckens, G., Grüter, M., Haas, S. & Batlogg, B. 2005. High mobility n-channel organic thin film transistors and complementary inverters. *Journal of Applied Physics* 98: 064502.
- Halik, M., Klauk, H., Zschieschang, U., Schmid, G., Dehm, C., Schutz, M., Malsch, S., Effenberger, F., Brunnbauer, M. & Stellacci, F. 2004. Low-voltage organic transistors with an amorphous molecular gate dielectric. *Nature* 431: 963-166.

- Hill, I.G., Weinert, C.M., Kreplak, L. & van Zyl, B.P. 2009. Influence of self-assembled monolayer chain length on modified gate dielectric pentacene thin-film transistors. *Applied Physics A* 95(1): 81-87.
- Hosoi, Y., Tsunami, D., Ishii, H. & Furukawa, Y. 2007. Air-stable n-channel organic field-effect transistors based on N,N'-bis(4-trifluoromethylbenzyl) perylene-3,4,9,10-tetracarboxylic diimide. *Chemical Physics Letters* 436: 139-143.
- Ismail, A.G. & Hill, I.G. 2011. Stability of n-channel organic thin film transistors using oxide, SAM-modified oxide and polymeric gate dielectrics. *Organic Electronics* 12(6): 1033-1042.
- Ismail, A.G. 2018. Photolithographically patterned N-channel organic thin film transistors using sensitized polyvinyl alcohol. *Organic Electronics* 56: 111-115.
- Klauk, H., Zschieschang, U., Pfau, J. & Halik, M. 2007. Ultralow-power organic complementary circuits. *Nature* 445: 745-748.
- Lee, J.D., Park, B.G. & Jung, K.D. 2008. Reliability issues of bottom-contact pentacene thin-film transistors. *Sains Malaysiana* 37(3): 295-298.
- Liao, K.C., Ismail, A.G., Kreplak, L., Schwartz, J. & Hill, I.G. 2010. Designed organophosphate self-assembled monolayers enhance device performance of pentacene-based thin-film transistors. *Advanced Materials* 22: 3081-3085.
- Maheran, A.A.H., Menon, P.S. & Ahmad, I. 2014. Optimisation of process parameters for lower leakage current in 22 nm n-type MOSFET device using Taguchi method. *Jurnal Teknologi (Sciences and Engineering)* 68(4): 1-5.
- Malenfant, P.R.L., Dimitrakopoulos, C.D., Gelorme, J.D., Kosbar, L.L., Graham, T.O., Curioni, A. & Andreoni, W. 2002. N-type organic thin-film transistor with high field-effect mobility based on a N,N'-dialkyl-3,4,9,10-perylene tetracarboxylic diimide derivative. *Applied Physics Letters* 80: 2517.
- Mohamed, M.A., Zulkefli, F.D. & Majlis, B.Y. 2017. Pencirian transistor karbon tiub nano berding tunggal yang dihasilkan melalui kaedah pertumbuhan langsung. *Sains Malaysiana* 46(7): 1141-1145.
- Razavi, B. 2001. *Design of Analog CMOS Integrated Circuit*. New York: McGraw-Hill.
- Unni, K.N.N., Pandey, A.K. & Nunzi, J.M. 2005. N-channel organic field-effect transistors using N,N'-ditridecylperylene-3,4,9,10-tetracarboxylic diimide and a polymeric dielectric. *Chemical Physics Letters* 407: 95-99.
- Weitz, T., Amsharov, K., Zschieschang, U., Villas, E.B., Goswami, D.K., Burghard, M., Dosch, H., Jansen, M., Kern, K. & Klauk, H. 2008. Organic n-channel transistors based on core-cyanated perylene carboxylic diimide derivatives. *Journal of the American Chemical Society* 130: 4637-4645.
- Mohd Zuhakimi Abdul Razak, Mohd Farhanulhakim Mohd Razip Wee, Muhamad Ramdzan Buyong & Ahmad Ghadafi Ismail\*  
Institut Kejuruteraan Mikro dan Nanoelektronik  
Universiti Kebangsaan Malaysia  
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan  
Malaysia
- Sawal Hamid Md Ali  
Pusat Kejuruteraan Sistem Bersepadu dan Teknologi Termaju  
Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina  
Universiti Kebangsaan Malaysia  
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan  
Malaysia
- Teh Chin Hoong  
Pusat PERMATApintar Negara  
Universiti Kebangsaan Malaysia  
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan  
Malaysia
- Jumadi Abdul Sukor  
Fakulti Teknologi Kejuruteraan  
Universiti Tun Hussein Onn Malaysia  
84600 Panchor, Johor Darul Takzim  
Malaysia

\*Pengarang untuk surat-menyurat; email: ghad@ukm.edu.my

Diserahkan: 15 Januari 2019

Diterima: 28 Februari 2019