

Pencirian Transistor Karbon Tiub Nano Berdinding Tunggal yang Dihasilkan melalui Kaedah Pertumbuhan Langsung

(Characterization of Single-Walled Carbon Nanotube Transistors by Direct Growth Method)

MOHD AMBRI MOHAMED*, FARAH DZILHANI ZULKEFLI & BURHANUDDIN YEOP MAJLIS

ABSTRAK

Transistor berasaskan karbon tiub nano (CNTFET) telah dihasilkan melalui kaedah pertumbuhan langsung menggunakan alkohol pemangkin pemendapan wap kimia. Sifat struktur dan ciri elektrik peranti telah dikaji. FET ini menunjukkan operasi ambipolar dan ia selaras dengan jenis-Schottky FET. Ia telah didapati bahawa ketinggian halangan Schottky yang wujud antara sentuhan elektrod dan CNT, boleh termodulat oleh aplikasi berkesan daripada voltan pincang (V_{DS}) dan voltan get (V_{GS}). Aplikasi voltan pincang sahaja tidak mudah untuk merendahkan ketinggian halangan Schottky dan ketebalan halangan Schottky, tetapi ia berkait rapat dengan aplikasi voltan get. Bagi konfigurasi peranti dalam kajian ini, keberkesanan medan boleh dikaitkan dengan $V_{GS}:V_{DS} = 10:-1$. Peningkatan arus didapati disebabkan oleh pengurangan tenaga pengaktifan. Kaitan yang jelas antara kesan voltan pincang, voltan get dan tenaga pengaktifan telah diperhati dalam kajian ini.

Kata kunci: Alkohol pemangkin pemendapan wap kimia (ACCVD); kaedah pertumbuhan langsung; karbon tiub nano berdinding tunggal; keberkesanan-medan voltan pincang dan get; tenaga pengaktifan

ABSTRACT

Carbon nanotube field-effect transistor (CNTFET) was fabricated by means of direct growth method using alcohol catalytic chemical vapor deposition. The structural properties and characteristics of devices have been investigated. The FET shows ambipolar operation which is consistent with Schottky-type FET. It was found that carrier injection barrier heights that exist at the contacts of metal and CNT, can be modulated by application of effective bias and gate voltages. The application of bias voltage does not simply reduce the carrier injection barrier, but is correlated with the application of gate voltage. For the device configuration in this study, the field-effectiveness can be related as $V_{GS}:V_{DS} = 10:-1$. The enhancement of current can be attributed to the reduction of activation energy. The clear correlation between the effects of bias voltage, gate voltage and activation energy has been observed in this study.

Keywords: Activation energy; alcohol catalytic chemical vapor deposition (ACCVD); direct growth; effectiveness of bias and gate voltages; single-walled carbon nanotubes

PENGENALAN

Karbon tiub nano (CNT) adalah satu daripada alotrop unsur karbon yang sering diberi tumpuan sebagai bahan generasi akan datang kerana ciri-ciri elektronik, mekanik dan sifat kimianya yang sangat baik (Karamde et al. 2010; Rahmani et al. 2014). Daripada sudut pandangan sifat elektronik, mereka boleh bersifat logam atau semikonduksi bergantung kepada kekiralan dan diameter CNT tersebut. Dalam proses fabrikasi FET, kaedah untuk disposisi CNT dalam saluran FET adalah salah satu isu yang paling penting yang perlu diberi perhatian.

Terdapat dua kaedah utama dalam fabrikasi CNTFET iaitu penyerakan selepas (Shiraishi et al. 2004) dan penyerakan sebelum (Ohno et al. 2003). Dalam kaedah penyerakan selepas, CNT diserakkan di antara elektrod sumber dan salir yang terlebih dahulu dipaten. Walaupun kaedah ini adalah yang paling popular dan paling mudah, sentuhan elektrik antara CNT dan elektrod adalah lemah, serta pencemaran medium CNT oleh sisa kimia tidak dapat

dielakkan. Kaedah lain adalah serakan sebelum, dengan CNT diserakkan pada substrat terlebih dahulu, kemudian diikuti dengan pempatenan elektrod di atas CNT dengan kaedah litografi. Dalam kaedah ini, sentuhan elektrik antara CNT dan elektrod dapat dipertingkatkan. Walau bagaimanapun, masalah pencemaran masih boleh berlaku dengan sebahagian sisa kimia yang digunakan dalam proses litografi boleh menyerap pada CNT seterusnya merendahkan prestasi peranti.

Kaedah pertumbuhan langsung, dengan CNT tumbuh secara langsung dari elektrod dan meniti antara dua elektrod sumber dan salir, adalah kaedah yang paling ideal. Ini kerana ia menyelesaikan masalah sentuhan elektrod yang lemah dan pencemaran sisa kimia kepada CNT dapat dielakkan (Franklin et al. 2002). Di sebalik kelebihan kaedah ini, pengoptimuman proses fabrikasi dan sifat FET masih kurang diterokai. Dengan mengoptimumkan proses fabrikasi, sentuhan antara elektrod dan CNT boleh diperbaiki, seterusnya prestasi peranti boleh

dipertingkatkan. Di dalam laporan ini, fabrikasi dan pencirian CNTFET melalui kaedah pertumbuhan terus karbon tiub nano di antara elektrod FET dibincangkan. Karbon tiub nano yang tertumbuh melalui kaedah ini adalah daripada jenis berdinging tunggal (SWNT) untuk mendapatkan peranti berprestasi tinggi.

KAEDAH

Di dalam proses pertumbuhan langsung, karbon tiub nano berdinging tunggal (SWNT), dwi-lapisan Mo/Co telah digunakan masing-masing sebagai elektrod dan pemangkin kepada pertumbuhan SWNT (Mohamed & Azam et al. 2010). FET yang difabrikasi dalam kajian ini adalah daripada konfigurasi jenis get belakang. Wafer silikon jenis-n yang terdop tinggi, dengan ketebalan 400 nm haba teroksida SiO₂ digunakan sebagai substrat. Lapisan SiO₂ dan lapisan silikon yang terdop daripada wafer itu telah digunakan masing-masing sebagai get penebat dan get elektrod. Elektrod sumber dan elektrod salir telah dipatenkan di atas lapisan penebat SiO₂, menggunakan kaedah fotolithografi. Saluran bagi panjang, L dan lebar, W , telah direka masing-masing berukuran 5 dan 250 μm . Teknik endapan sudut telah diperkenalkan untuk meningkatkan pertumbuhan SWNT daripada elektrod sumber kepada elektrod salir yang bertentangan (Mohamed & Inami et al. 2008). Pada mulanya, Mo diendapkan terlebih dahulu secara sudut di atas substrat oleh sistem endapan wap alur elektron (EBPVD) kepada ketebalan 100 nm, diikuti oleh endapan normal lapisan Co kepada ketebalan nominal 1 nm. Teknik endapan sudut telah digunakan untuk pengendapan Co pada bahagian sisi Mo bagi menggalakkan pertumbuhan SWNT sepanjang saluran.

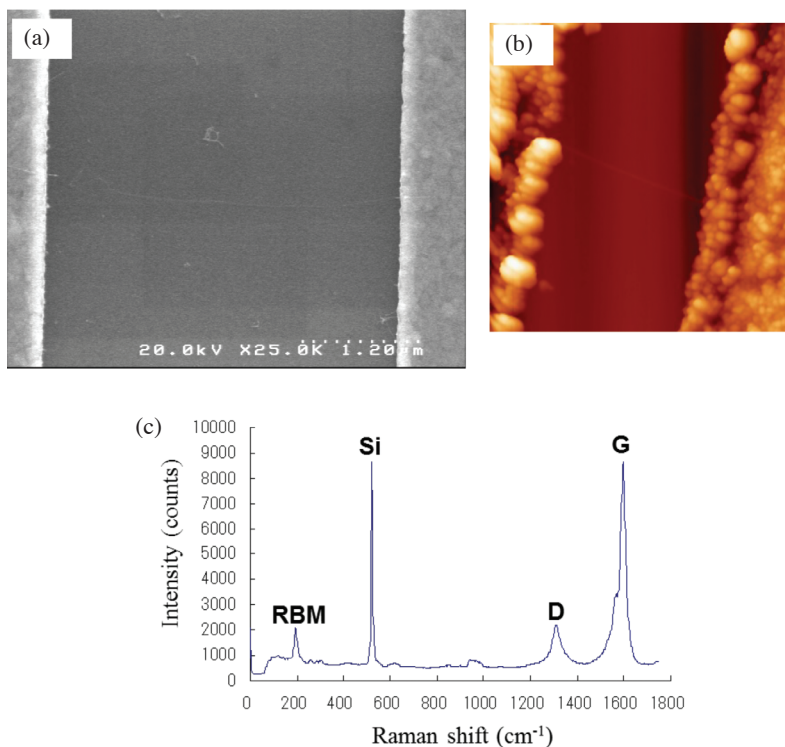
Sejumlah 12 peranti telah berhasil menggunakan substrat tunggal pada setiap wafer. SWNT tumbuh secara langsung daripada elektrod FET dengan menggunakan teknik alkohol pemangkin pemendapan wap kimia (ACVD) dengan menggunakan etanol sebagai sumber gas hidrokarbon. Etanol dipilih sebagai sumber hidrokarbon kerana murah, mudah didapati dan mesra alam. Selepas menyediakan elektrod dan pemangkin, substrat kemudiannya dipindahkan ke dalam reaktor CVD. Relau CVD yang digunakan dalam kajian ini adalah relau mudah alih untuk membolehkan pemanasan/penyejukan pesat. Reaktor CVD telah divakumkan oleh pam tatal sehingga bawah paras 0.4 Pa. Sementara itu, relau CVD telah dipanaskan sehingga suhu 900°, 30 cm jauh dari kedudukan substrat. Campuran aliran gas Ar/H₂ (3% H₂) telah digunakan untuk membersihkan reaktor CVD pada tekanan dalaman sebanyak 400 Pa. Apabila suhu reaktor telah menjangkau suhu sintesis, relau dipindahkan serta-merta kepada kedudukan substrat bagi pemanasan secara pesat. Aliran gas Ar/H₂ ditamatkan dan dengan serta-merta gas etanol dilepaskan ke dalam reaktor bagi memulakan penguraian hidrokarbon kepada CNT. Tindak balas sintesis berterusan selama 30 min dan kemudiannya relau telah dipindahkan kepada kedudukan asal sebelum substrat itu ditinggalkan untuk sejuk secara semula jadi.

Struktur pertumbuhan CNT ke atas substrat telah dicirikan dengan menggunakan mikroskop imbasan elektron pancaran medan (FESEM), mikroskop daya atom (AFM) dan Raman spektroskopi dengan tenaga pengujaan laser iaitu sebanyak 1.96 eV ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$). Ciri elektrik bagi CNTFET telah diukur di bawah persekitaran vakum di bawah tekanan 10⁻⁵ Torr menggunakan sistem penganalisis semikonduktor kriogenik selepas penyepuhlindapan pada suhu 120° selama 24 jam bagi membolehkan pelepasan molekul O₂ and H₂O yang terserap di dalam CNT ketika proses penghasilan CNTFET. Kedua-dua voltan pincang (V_{DS}) dan voltan get (V_{GS}) telah diimbis dari -10 V kepada +10 V. Plot perubahan arus terhadap perubahan voltan pincang dan voltan get telah diukur pada suhu 300, 320, 340, 360, 380 dan 393 K untuk mendapatkan lengkung pindah dan lengkung *output*. Melalui kecerunan plot tenaga pengaktifan, anggaran ketinggian/ketebalan halangan Schottky yang wujud di antara elektrod dan CNT dapat diekstrak.

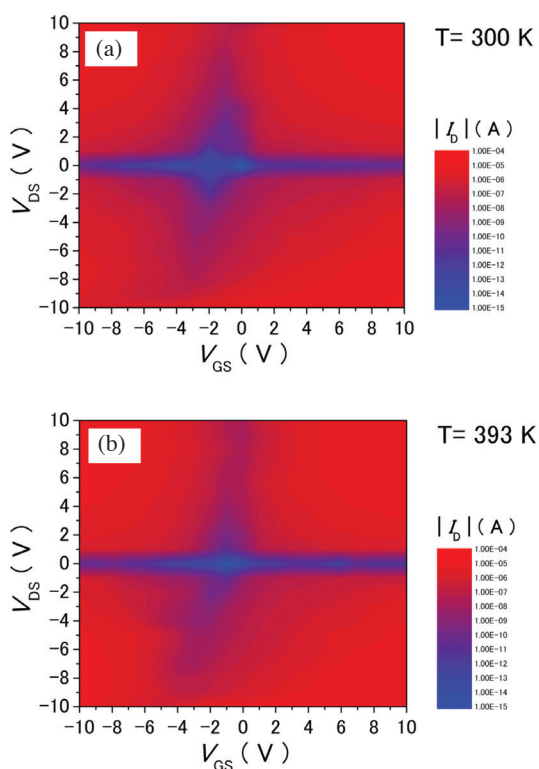
KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Rajah 1 menunjukkan imej FESEM di antara sepasang elektrod Mo/Co selepas prosedur ACCVD. Sisi kiri dan kanan berpadanan dengan Mo/Co elektrod yang bertindak sebagai elektrod sumber dan salir. Struktur halus yang merintang kedua-dua elektrod telah dapat diperhatikan melalui pencirian FESEM dan AFM seperti dalam Rajah 1(a) dan 1(b). Raman spektroskopi telah diambil pada bahagian struktur halus yang merintang kedua-dua elektrod. Melalui cerapan ini, terdapat signal mod radius pernafasan (RBM) pada frekuensi 200 cm⁻¹ dan jalur G pada frekuensi sekitar 1600 cm⁻¹ yang merupakan pencirian unik kepada karbon tiub nano berdinging tunggal (SWNT). Melalui cerapan AFM (Rajah 1(c)), diameter SWNT didapati dalam julat 1-3 nm.

Daripada pencirian peranti yang difabrikasi di atas wafer Si, didapati bahawa lebih daripada separuh peranti menunjukkan tindak balas FET. Nisbah buka tutup berubah-ubah dari 10³-10⁶ pada suhu bilik bergantung kepada peranti. Punca perubahan boleh dikaitkan dengan populasi berbeza sifat logam dan semikonduktor SWNT tersebut. Nilai ini adalah setanding dengan nilai transistor konvensional (Inami & Mohamed et al. 2008). Rajah 2(a) dan 2(b) menunjukkan perubahan arus, I_D untuk pelbagai V_{DS} dan V_{GS} pada suhu 300 dan 393 K. Kawasan arus terbuka dan arus tertutup diwakili masing-masing oleh kontur berwarna biru dan merah. Kontur warna berubah-ubah mengikut populasi arus bagi kepelbagaian V_{DS} dan V_{GS} . Dalam Rajah 2(a), kawasan arus tertutup untuk imbasan V_{GS} menunjukkan V_{DS} adalah bersandaran antara satu sama lain. Kawasan arus tertutup tidak berada pada $V_{GS} = 0 \text{ V}$. Ini boleh dilihat daripada kecondongan positif arus tertutup seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2(a). Nilai V_{GS} ialah nilai I_D minimum diperhatikan, V_{GS}^{min} , berubah-ubah daripada -3 V pada $V_{DS} = -10 \text{ V}$ hingga -1 V pada $V_{DS} = 10 \text{ V}$. V_{GS}^{min} menunjukkan peningkatan linear dengan peningkatan V_{DS} . Melalui rajah ini juga didapati



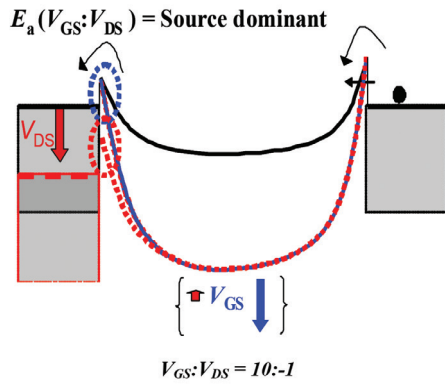
RAJAH 1. (a) Imej FESEM, (b) AFM menunjukkan SWNT tumbuh secara langsung daripada elektrod sumber ke elektrod salir yang terhasil melalui kaedah pertumbuhan langsung ACCVD dan (c) Raman spektrum diambil di kawasan SWNT menunjukkan signal RBM yang terhasil daripada denyutan karbon tiub nano berdinggal tunggal (SWNT)



RAJAH 2. Perubahan arus, I_D bagi kepelbagaian fungsi V_{DS} dan V_{GS} pada suhu (a) 300 K dan (b) 393 K. Kontur biru (*off-region*) menunjukkan arus rendah ataupun tiada arus. Kontur merah (*on-region*) menunjukkan arus tinggi

penggunaan V_{DS} tidak hanya mengurangkan ketinggian halangan Schottky, tetapi V_{DS} berkorelasi dengan V_{GS} untuk mengurangkan halangan Schottky. Mekanisma ini dapat digambarkan melalui lenturan jalur tenaga seperti dalam ilustrasi Rajah 3. Apabila V_{GS} dikenakan kepada peranti, jalur tenaga mengalami lenturan seterusnya halangan Schottky dikurangkan secara signifikan. Berikutnya apabila V_{DS} dikenakan kepada terminal sumber, keupayaan jatuh, akan tetapi, terdapat sedikit peningkatan kepada halangan Schottky. Kolerasi ini menunjukkan voltan get lebih dominan berbanding voltan pincang dalam pengurangan halangan Schottky.

Bagi konfigurasi peranti di dalam kajian ini, dominasi kesan medan boleh dikaitkan sebagai $V_{GS} : V_{DS} = 10 : -1$, yang dapat dikira daripada Rajah 2(a) menerusi condongan arus tertutup. Pemerhatian pada suhu tinggi 393 K adalah juga bersifat sama daripada segi kualitatif seperti pada suhu 300 K. Apabila suhu meningkat, kawasan kontur berwarna biru berkurangan dan kawasan kontur berwarna merah meningkat sekaligus menunjukkan arus meningkat bersama suhu. Tingkah laku ini juga boleh dijelaskan daripada segi suntikan pembawa modulasi halangan Schottky yang dikenali juga sebagai operasi jenis Schottky-FET (Martel et al. 2001). Dominasi kesan medan elektrik V_{DS} dan V_{GS} menunjukkan peranan voltan pincang dan voltan get serta kesan kuantitatif yang optimum dalam pengurangan halangan Schottky yang terbentuk di antara elektrod logam dan CNT. Di dalam konfigurasi peranti ini, dominasi kesan medan elektrik $V_{GS} : V_{DS} = 10 : -1$ membawa

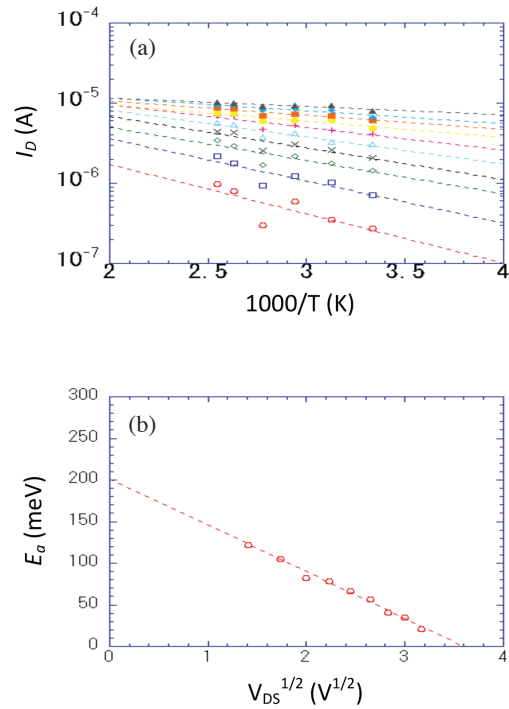


RAJAH 3. Mekanisme perubahan lenturan jalur tenaga melalui aplikasi berkesan V_{DS} dan V_{GS} yang menyebabkan perubahan ketinggian/ketebalan halangan Schottky

maksud perubahan lenturan jalur tenaga didominasi oleh aplikasi V_{GS} sebanyak 10 kali ganda berbanding V_{DS} . Oleh itu, untuk pengurangan halangan Schottky yang optimum, medan elektrik yang dibekalkan kepada voltan get perlulah 10 kali lebih tinggi berbanding voltan pincang.

Ketinggian halangan Schottky di antara sentuhan elektrod dan CNT boleh dianggarkan daripada kebergantungan arus, I_D kepada suhu. Rajah 4(a) menunjukkan suhu kebergantungan I_D pada $V_{GS} = -10$ V (operasi jenis- p). Plot Arrhenius telah digunakan untuk menganggarkan nilai pengaktifan tenaga berdasarkan persamaan $I_D = Ae^{E_a/kT}$ dengan I_D, A, E_a, k, T adalah masing-masing mewakili arus, pemalar, tenaga pengaktifan, pemalar Boltzman ($k_B = 8.6171 \times 10^{-5}$ eV/K) dan suhu. Tenaga pengaktifan mewakili tenaga minimum yang diperlukan untuk melepasi halangan Schottky pada voltan pincang. Berdasarkan persamaan ini, nilai pengaktifan tenaga dapat dikira melalui kecerunan plot log natural arus $-1/T$, seperti ditunjukkan dalam Rajah 4(b). Nilai E_a telah diekstrapolasi kepada $V_{DS}^{1/2} = 0$ untuk mendapatkan nilai intrinsik potensi ketinggian halangan Schottky. Nilai ini adalah bersamaan dengan ketinggian halangan keupayaan yang terbentuk pada sentuhan antara elektrod dan CNT. Daripada plot ini, ketinggian halangan intrinsik pada $V_{GS} = -10$ V telah dikira dan dipastikan pada nilai 200 meV. Nilai ini didapati lebih rendah daripada nilai ketinggian halangan intrinsik peranti yang dihasilkan melalui kaedah konvensional iaitu penyerakan selepas yang memberi nilai tenaga pengaktifan sebanyak 270 meV (Fukao et al. 2006). Pengurangan tenaga pengaktifan sebanyak 70 meV boleh dikatakan berpunca daripada sentuhan fizikal yang baik antara CNT dan elektrod melalui kaedah pertumbuhan langsung CNT daripada elektrod. Kaedah penyerakan sebelum menunjukkan pengurangan tenaga pengaktifan yang lebih signifikan iaitu sebanyak 70 meV setelah proses penyepuhlandapan di atas suhu 700°C seperti dilaporkan (Nakamura et al. 2006). Kaedah pengedapan kimia juga melaporkan pengurangan tenaga pengaktifan pada julat yang lebih rendah iaitu 13 -15 meV (Martel & Derycke et al. 2001). Namun begitu, semua contoh

kaedah konvensional yang dinyatakan di atas melibatkan proses yang sangat rumit seperti keperluan untuk nano-identifikasi, penyepuhlandapan pada suhu tinggi dan pengedapan kimia. Kaedah kami iaitu pertumbuhan langsung CNT daripada elektrod adalah lebih mudah dan langsung, membolehkan CNTFET dihasilkan dalam skala yang besar tanpa perlu melalui proses nano-identifikasi, penyepuhlandapan dan pengedapan untuk mengurangkan tenaga pengaktifan. Prestasi transistor juga adalah setara atau lebih baik daripada kaedah konvensional.



RAJAH 4. (a) Plot Arrhenius I_D pada $V_{GS} = -10$ V bagi kepelbagaian V_{DS} untuk setiap peningkatan 1 V sehingga 10 V dan (b) Plot tenaga pengaktifan, $E_a - V_{DS}^{1/2}$ bagi ketinggian halangan Schottky pada sentuhan elektrod-SWNT. Garisan bertitik adalah ekstrapolasi kecerunan garis sesuai (fitting) didapati daripada ekstrak plot eksperimen

KESIMPULAN

Kesimpulannya, CNTFET telah dihasilkan dengan menggunakan kaedah pertumbuhan langsung ACCVD. Ciri struktur dan elektrik telah dikaji. Khususnya, SWNT telah berjaya meniti elektrod FET. Untuk konfigurasi peranti di dalam kajian ini, keberkesanan kesan medan boleh dikaitkan sebagai $V_{GS} : V_{DS} = 10 : -1$. Peningkatan arus boleh dikaitkan secara langsung dengan pengurangan tenaga pengaktifan dan pengurangan halangan Schottky. Ketinggian dan ketebalan halangan Schottky yang wujud di antara sentuhan elektrod dan CNT, boleh termodulat oleh aplikasi berkesan daripada gabungan voltan pincang (V_{DS}) dan voltan get (V_{GS}). Dalam kajian ini, hubungan yang jelas antara kesan voltan pincang, voltan get dan tenaga pengaktifan telah diperhatikan. Operasi peranti

adalah konsisten dengan operasi jenis Schottky FET dengan nilai E_a yang kecil iaitu 200 meV, lebih baik berbanding dengan peranti CNTFET yang difabrikasi melalui kaedah konvensional. Kajian ini menyumbang kepada fabrikasi mudah FET yang berprestasi tinggi.

PENGHARGAAN

Hasil kerja ini telah disokong sebahagiannya oleh Kementerian Pengajian Tinggi Malaysia melalui geran LRGS/2015/UKM-UKM/NANOMITE/04/01 dan HiCOE-AKU95.

RUJUKAN

- Franklin, N.R., Wang, Q., Tomblor, T.W., Javey, A., Shim, M. & Dai, H. 2002. Integration of suspended carbon nanotube arrays into electronic devices and electromechanical systems. *Appl. Phys. Lett.* 81(5): 913-915.
- Fukao, T., Nakamura, S., Kataura, H. & Shiraishi, M. 2006. Solution-processed single-walled carbon nanotube transistors with high mobility and large on/off ratio. *Jpn. J. Appl. Phys.* 45(1): 6524.
- Inami, N., Mohamed, M.A., Shikoh, E. & Fujiwara, A. 2008. Device characteristics of carbon nanotube transistor fabricated by direct growth method. *Appl. Phys. Lett.* 92: 243115.
- Karamdel, J., Damghanian, M., Razaghian, F., Dee, C.F. & Majlis, B.Y. 2010. Dependence of band structure and carrier concentration of metallic (13,13) and semiconducting (13,0) single wall carbon nanotube on temperature. *Sains Malaysiana* 39(4): 615-620.
- Martel, R., Derycke, V., Lavoie, C., Appenzeller, J., Chan, K.K., Tersoff, J., Avouris, P. 2001. Ambipolar electrical transport in semiconducting single-wall carbon nanotubes. *Phys. Rev. Lett.* 87: 256805.
- Mohamed, M.A., Azam, M.A., Shikoh, E. & Fujiwara, A. 2010. Fabrication and characterization of carbon nanotube field-effect transistors using ferromagnetic electrodes with different coercivities. *Jpn. J. Appl. Phys.* 49(2 Part 2): 02BD08.
- Mohamed, M.A., Inami, N., Shikoh, E., Yamamoto, Y., Hori, H. & Fujiwara, A. 2008. Fabrication of spintronics device by direct synthesis of single-walled carbon nanotubes from ferromagnetic electrodes. *Sci. Technol. Adv. Mater.* 9: 02519.
- Nakamura, S., Ohishi, M., Shiraishi, M., Takenobu, T., Iwasa, Y. & Kataura, H. 2006. Logic circuits using solution-processed single-walled carbon nanotube transistors. *Appl. Phys. Lett.* 89: 013112.
- Ohno, Y., Iwatsuki, S., Hiraoka, T., Okazaki, T., Kishimoto, S., Maezawa, K., Shinohara, H. & Mizutani, T. 2003. Position-controlled carbon nanotube field-effect transistors fabricated by chemical vapor deposition using patterned metal catalyst. *Jpn. J. Appl. Phys.* 42(1): 6B.
- Rahman, S.F.A., Mahmood, M.R. & Hashim, A.M. 2014. Growth of graphene on nickel using a natural carbon source by thermal chemical vapor deposition. *Sains Malaysiana* 43(8): 1205-1211.
- Shiraishi, M., Takenobu, T., Iwai, T., Iwasa, Y., Kataura, H. & Ata, M. 2004. Single-walled carbon nanotube aggregators for solution-processed field-effect transistors. *Chem. Phys. Lett.* 394: 110-113.

Institute of Microengineering and Nanoelectronics (IMEN)
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan
Malaysia

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

Diserahkan: 1 Januari 2017

Diterima: 6 Februari 2017