

Analisis Arus-Voltan bagi Pengubahsuaian Proses Fabrikasi Sel Suria Silikon Jenis-P ke atas Wafer Silikon Jenis-N (Current-Voltage Analysis for the Adaption of P-Type Silicon Solar Cell Fabrication Process onto N-Type Silicon Wafer)

SUHAILA SEPEAI*, WAN ZULHAFIZHAZUAN, CHEOW SIU LEONG, N.A. LUDIN, M.A. IBRAHIM,
K. SOPIAN & SALEEM H. ZAIDI

ABSTRAK

Sel suria adalah peranti semikonduktor yang menukar tenaga matahari kepada tenaga elektrik. Sel suria generasi pertama terdiri dari sel suria silikon (Si). Pada masa ini, hampir 90% daripada pasaran pengeluaran fotovolt (PV) adalah berdasarkan wafer Si. Ini disebabkan oleh kecekapan dan ketahanan yang tinggi serta jangka hayat yang lama iaitu selama 30 tahun. Proses pemfabrikasian piawai bagi sel suria Si dimulakan dengan proses pencucian dan penteksturan wafer Si, difusi Fosforus untuk pembentukan pemancar, pembentukan elektrod atas dan bawah melalui proses cetakan skrin dan proses pembakaran yang melengkapkan fabrikasi sel suria. Dalam industri, proses piawai ini dilakukan pada wafer Si jenis-p. Wafer jenis-n pula mempunyai potensi yang tinggi untuk menghasilkan sel suria Si yang berkecekapan tinggi. Namun, proses untuk menghasilkan sel suria silikon atas Si wafer jenis-n melalui proses yang lebih rumit dan lama seperti dua peringkat proses difusi menjadikan wafer jenis-p digunakan secara meluas kerana dapat merendahkan kos pemfabrikasian. Dalam penyelidikan ini, analisis bagi arus-voltan bagi sel suria Si jenis-n yang difabrikasi menggunakan adaptasi proses fabrikasi piawai bagi wafer Si jenis-p akan dibincangkan. Daripada kajian simulasi menggunakan perisian PC1D, didapati bahawa kecekapan bagi sel suria jenis-p dan jenis-n yang difabrikasi dengan kaedah yang sama adalah 19.63% dan 20.16%. Manakala keputusan eksperimen menunjukkan kecekapan sebanyak 9.44% dan 5.51% bagi sel suria jenis-p dan jenis-n.

Kata kunci: Jenis-n; jenis-p; PC1D; sel suria Si; wafer Si

ABSTRACT

Solar cell is a semiconductor device that converts solar energy into electricity. First generation solar cells consist of silicon (Si) solar cells. Currently, almost 90% of the photovoltaic (PV) production market is based on Si wafer. This is due to the high efficiency, high durability and a longer life span of 30 years. The standard fabrication process for Si solar cells is initiated by washing and texturing the Si wafer, phosphorus diffusion for the formation of transmitters, the formation of top and bottom electrodes through screen printing and combustion process that completed the fabrication of solar cells. In industry, this standard process is performed on p-type Si wafer. On the other hand, the n-type wafer has a higher potential to produce high-efficiency solar cells. However, the process for producing Si solar cells on n-type Si wafer through a complicated and longer process, such as two diffusion process stages that lead to p-type wafers more widely used as it has a lower fabricating cost. In this study, the current-voltages of n-type Si solar cells fabricated using the adaptation of the standard fabrication process of p-type wafer is analyzed and discussed. From the simulation study using PC1D software, it was found that the efficiency of the p-type and n-type solar cells that were fabricated using the same method were 19.63% and 20.16%. While the experimental results showed efficiency of 9.44% and 5.51% of the p-type and n-type solar cells.

Keywords: n-type; p-type; PC1D; solar cell Si; wafer Si

PENGENALAN

Wafer Si merupakan substrat yang digunakan secara meluas dalam bidang peranti mikroelektronik bagi memfabrikasi litar bersepadu. Dalam bidang fotovolt (PV), wafer Si digunakan sebagai asas dalam pemfabrikasian sel suria generasi pertama iaitu sel suria Si. Wafer Si akan didopkan dengan Boron daripada Kumpulan III bagi menghasilkan wafer Si jenis-p, dan didopkan dengan Fosforus daripada Kumpulan V bagi menghasilkan wafer jenis-n. Oleh itu,

wafer Si jenis-p mempunyai lebih lohong manakala wafer Si jenis-n mempunyai lebih elektron. Pembawa cas minoriti iaitu elektron dilaporkan mempunyai 3 kali ganda panjang difusi berbanding lohong pada jumlah pembawa cas majoriti yang sama (Cotter et al. 2006). Perubahan jenis wafer Si mempengaruhi prestasi sel suria kerana impak pada pecutan elektron, panjang difusi serta jangka hayat elektron dalam sel. Ini kerana simpang p-n penting dalam pembentukan medan elektrik akan mengarahkan perjalanan

elektron menuju elektrod berubah apabila jenis wafer Si yang digunakan bertukar. Ini kerana kedudukan simpang p-n akan berubah sama ada berada di atas atau di belakang sel suria (Untila & Zaks 2011).

Kajian pasaran menunjukkan bahawa Si wafer jenis-p mendominasi hampir 90% pasaran global sel suria dunia (Asim et al. 2012). Degradasi yang dialami oleh sel suria jenis-n terhadap radiasi tinggi menjadi faktor dominasi pasaran oleh sel suria jenis-p. Kajian menunjukkan pada radiasi tinggi, kadar degradasi pembawa cas minoriti dan kerosakan simpang lebih tinggi oleh sel suria jenis-n berbanding sel suria jenis-p (Alurralde et al. 2004). Walau bagaimanapun, dominasi oleh sel suria jenis-p dilihat bakal berakhir apabila laporan *International Technology Roadmap* menjangkakan anjakan keseluruhan penggunaan wafer Si jenis-p kepada jenis-n dalam aktiviti industri fabrikasi Si kristal sel suria berdasarkan peningkatan pegangan pasaran dunia (ITRPV 2017).

Dalam pembangunan sel suria berkecekapan tinggi, faktor penting seperti mobiliti elektron, kadar penggabungan semula elektron-lohong dan jangka hayat elektron dalam wafer Si, merupakan antara elemen yang perlu dipertingkatkan. Sifat mesra industri yang ditunjukkan wafer Si jenis-n seperti toleransi yang tinggi kepada kecacatan kristalografi, bendasing logam dan bahan kimia mendorong pengilang sel suria seperti Sanyo, Yingli dan SunPower memasarkan sel suria jenis-n (Cotter et al. 2006). Sel suria yang mencatat kecekapan tinggi seperti sel suria *Heterojunction Intrinsic Thin Layer (HIT)* dan sel suria *Interdigitated Backside Contact (IBC)* juga difabrikasi atas wafer Si jenis-n (Green et al. 2016). Kadar penggabungan semula elektron-lohong disebabkan pencemaran ketika fabrikasi dapat diminimalkan lantas mengurangkan penggabungan semula. Pengumpulan fotoarus yang optimum mampu meningkatkan ketumpatan arus litar pintas (J_{sc}) lantas meningkatkan kecekapan sel suria (Oktiawati et al. 2017).

Penggunaan Boron ke atas wafer Si jenis n melibatkan proses yang rumit serta kos yang tinggi berbanding penggunaan aloi Aluminium (Al). Ini kerana sel suria jenis-n melalui proses suhu tinggi sebanyak tiga kali iatu difusi Boron, difusi Fosforus dan penyepuhlindungan. Dua proses difusi untuk pembentukan lapisan pemancar dan permukaan medan bawah dilakukan secara berasingan dan menggunakan dua alat serta proses yang berbeza. Ini menyebabkan kosnya menjadi tinggi, akan tetapi sel suria yang terhasil memberikan nilai kecekapan yang lebih tinggi (Glunz et al. 2012). Kos bagi penghasilan sel suria Si jenis-n adalah lebih tinggi daripada jenis-p (Joris Libal 2015). Justeru, kajian terhadap adaptasi proses fabrikasi sel suria jenis-p ke atas wafer Si jenis-n dilihat mampu memberi impak terhadap kos pengeluaran sel suria kerana teknologi fabrikasi sel suria dengan aloi aluminium (Al) bersimpang bawah telah digunakan secara meluas dalam bidang industri PV. Oleh itu, sel suria jenis-p dengan struktur peranti npp+ dan sel suria jenis-n berstruktur n+np+ dikaji dalam kajian ini secara simulasi dan uji kaji. Analisis arus-voltan menjadi fokus analisis dalam kertas

penyelidikan ini bagi melihat hasil daripada adaptasi proses fabrikasi piawai sel suria jenis-p ke atas wafer Si jenis-n. Analisis ini juga akan melihat perbandingan dengan sel suria komersial jenis-p sebagai penanda aras.

METOD

Terdapat dua bahagian dalam kaedah penyelidikan ini iaitu kaedah simulasi menggunakan perisian PC1D dan proses fabrikasi sel suria jenis-p dan jenis-n.

SIMULASI

Parameter penting sel suria Si jenis-p dan jenis-n seperti kekonduksian pukal, medan permukaan hadapan dan pembawa minoriti jangka hayat disimulasi menggunakan perisian PC1D (Sepeai et al. 2013). Model sel suria jenis-p dan jenis-n berkeluasan 100 cm², berketebalan 200- μ m wafer Si, disimulasi dengan nilai tetap perintang sesiri dan kekonduksian pirau. Bahagian permukaan sel suria ditetapkan mempunyai nilai 10% kepantulan. Nilai 10% kepantulan adalah selari dengan keputusan kaedah penteksturan menggunakan KOH. Mengikut perkiraan PC1D, nilai kepantulan 10% terhasil apabila darjah kecuraman piramid adalah 54.3°. Dasar lekatan dan konduktor dalaman diselaraskan masing-masing pada nilai 0.0015 Ω and 0.3 S untuk sel suria jenis-p dan jenis-n. Konsentrasi pendopan bagi wafer Si jenis p dan n adalah 1.51E16/cm³. Konsentrasi pendopan pemancar bahagian permukaan hadapan sel suria jenis-p dan n adalah 1E17/cm³. Manakala, Konsentrasi pendopan medan belakang sel suria jenis-p dan n adalah 1E19/cm³ (Fonash 2010). Tempoh untuk kedua-dua jenis sel suria pembawa minoriti jangka hayat diselaraskan pada 1000 μ s. Halaju penggabungan semula bahagian permukaan hadapan diselaraskan pada 10 cm/s untuk kedua-dua jenis sel suria. Nilai parameter adalah sama bagi setiap lapisan untuk jenis-p dan jenis-n bagi melihat prestasi kedudukan simpang p-n yang berbeza kedudukan sama ada di atas atau di bawah bagi struktur peranti npp+ dan n+np+. Akhir sekali, model sel suria jenis-p dan n dicirikan di bawah pencahayaan 1 suria (AM 1.5G) (Fonash 2010).

FABRIKASI

Rajah 1 menunjukkan proses fabrikasi sel suria menggunakan wafer Si jenis-p dan jenis-n. Rajah 2(a) menunjukkan konfigurasi sel suria jenis-p komersial dengan lapisan anti pantulan (ARC) di atasnya. Manakala Rajah 2(b) dan 2(c) menunjukkan konfigurasi sel suria jenis-p dan jenis-n yang difabrikasi tanpa filem anti pantulan. Proses pembersihan ke atas wafer Si dilakukan untuk menyingkir kerosakan permukaan wafer Si melalui larutan 10% natrium hidroksida (NaOH). 600 g NaOH dilarutkan dalam 6000 mL air ternyahion dan dipanaskan sehingga 70°C. Kemudian, wafer tersebut direndam sepenuhnya selama 10 min dalam larutan tersebut. Proses ini akan menyingkirkan kerosakan permukaan serta menghapuskan pencemaran ketika proses penghirisan ingot. Seterusnya,

wafer Si dibilas menggunakan air ternyahion dan direndam dalam larutan cair asid hidroflorik (HF) dengan tujuan menghapuskan lapisan oksida semula jadi. Hasil daripada proses ini, permukaan wafer Si akan kelihatan berkilat dan keseluruhan permukaan adalah hidrofobik. Larutan alkali sangat berkesan untuk proses penteksturan ke atas hablur berorientasi <100> dalam pembentukan tekstur yang seragam dan berbentuk piramid. Larutan iso-propil alkohol (IPA): Kalium hidroksida (KOH): Air ternyahion (H_2O) disediakan berdasarkan nisbah isi padu 5:1:123 dan dipanaskan sehingga suhu $70^\circ C$. Seterusnya wafer direndam dalam larutan selama 30 min. Kemudian, wafer dibilas menggunakan air ternyahion dan direndam dalam larutan cair HF semula. Hasil daripada proses ini, wafer Si kelihatan kelabu serta berkilat. Permukaan wafer Si yang kasar meningkatkan cahaya terperangkap dan mengurangkan pantulan.

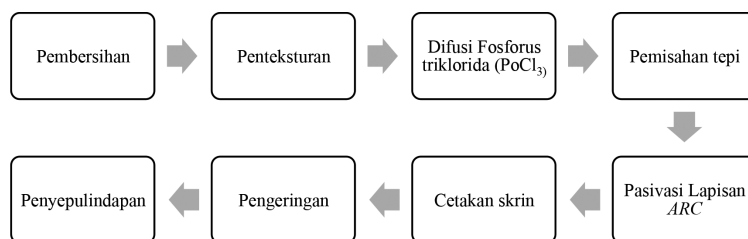
Simpang p-n pula dibentuk melalui proses difusi Fosforus Oksi-Triklorida ($POCl_3$) bagi sel suria jenis-p. Wap $POCl_3$ disalurkan ke relau kuarza bersuhu tinggi dan membentuk filem fosforus oksida dipermukaan wafer Si. Seterusnya, perekat logam dicetak pada skrin bahagian hadapan dan belakang wafer Si. Pada bahagian hadapan, perekat Ag dicetak pada skrin dan melalui proses pengeringan pada suhu $200^\circ C$ untuk tempoh 10 min. Diikuti oleh cetakan skrin perekat Al pada bahagian belakang dan juga melalui proses pengeringan pada suhu $200^\circ C$ untuk tempoh 10 min. Proses pengeringan membantu membuang lebihan pelarut organik daripada perekat dan menyediakan lekatan yang stabil antara perekat

dan permukaan wafer. Di samping itu, proses ini bertujuan membentuk rintangan lemah sentuhan ohmik antara filem logam dan wafer Si. Ketika proses ini dijalankan, wafer Si diletakkan di atas tali sawat penyampai lalu bergerak melalui enam zon suhu. Setiap zon dilengkapi lampu kuarza infra-merah untuk tujuan pemanasan. Akhirnya, sel suria yang telah siap melalui proses pencirian oleh sistem pengukuran lengkung arus-voltan berjenama Keithly 237. Nilai rintangan keping pula diukur menggunakan alat *4 point probe* jenama LUCAS LAB.

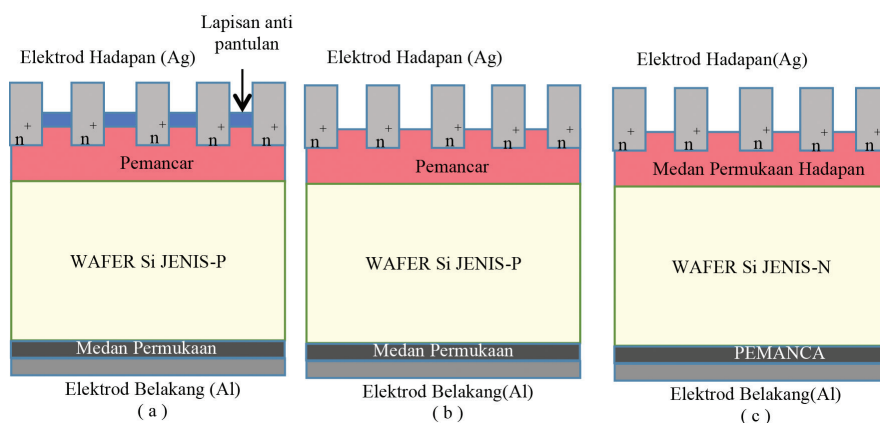
KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Rajah 3 menunjukkan lengkung arus-voltan bagi sel suria Si jenis-p dan jenis-n hasil daripada kaedah simulasi menggunakan perisian PC1D. Didapati sel suria jenis-p dan jenis-n menghasilkan kecekapan peranti sebanyak 19.63% dan 20.16%. Nilai faktor isian, voltan litar terbuka (V_{oc}) dan arus litar pintas (I_{sc}) bagi kedua-dua jenis sel suria ditunjukkan dalam Jadual 1.

Struktur peranti yang disetkan bagi sel suria jenis-p adalah npp+ manakala bagi sel suria jenis-n adalah n+np+. Ini adalah selari dengan kaedah yang digunakan dalam proses fabrikasi. Selepas proses difusi menggunakan fosforus triklorida itu dilakukan ke atas wafer jenis-n, simpang p-n tidak wujud di bahagian atas peranti sebaliknya simpang homo n-n+ yang akan terhasil seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2(b). Ini kerana proses difusi fosforus triklorida ke atas wafer jenis-n menghasilkan lapisan pemancar yang berkepekatan tinggi



RAJAH 1. Proses fabrikasi sel suria menggunakan wafer Si jenis-p dan jenis-n



RAJAH 2. Rajah skematik bagi (a) sel suria Si komersial; (b) sel suria Si jenis-p; dan (c) sel suria jenis-n

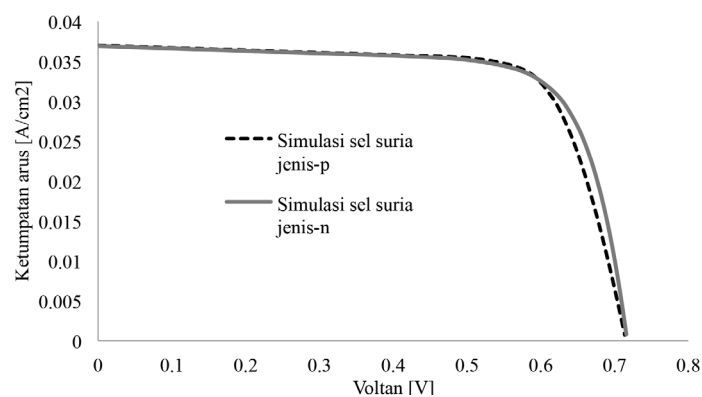
(n+). Lapisan ini juga dinamakan medan permukaan hadapan (*FSF*). Namun begitu, masih terdapat simpang p-n bagi sel suria yang menggunakan wafer Si daripada jenis-n di bahagian belakang sel iaitu hasil daripada lapisan medan permukaan belakang (*BSF*) atau lapisan p+. Lapisan *BSF* terhasil daripada kaedah percetakan tabir pes Al yang kemudiannya melalui proses pembakaran dan menghasilkan lapisan p+ atau *BSF*. Bagi sel suria jenis-p yang melalui proses fabrikasi piawai, simpang p-n berada di bahagian atas sel, manakala simpang homo p-p+ berada di bahagian belakang seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2(a).

Melalui nilai analisis prestasi dalam Jadual 1 tersebut adalah didapati tidak banyak perbezaan besar bagi fabrikasi sel suria ke atas wafer Si jenis-p atau jenis-n. Oleh sebab kaedah fabrikasi bagi wafer Si jenis-n adalah adaptasi daripada fabrikasi menggunakan wafer Si jenis-p, maka nilai parameter bagi kepekatan penderma (N_d), kepekatan penerima (N_a), ketebalan wafer dan nilai jangka hayat semuanya adalah sama. Kepekatan dopan bagi boron dalam wafer Si jenis-p adalah $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Manakala bagi wafer Si jenis-n, kepekatan dopan untuk fosforus adalah $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (Goetzberger 2003). Kepekatan lapisan pemancar menentukan nilai rintangan keping. Nilai yang baik bagi rintangan keping dalam menghasilkan sel suria sama ada daripada jenis-p atau jenis-n adalah dalam julat 40-50 ohm/sq (Markvart & Castañer 2005). Daripada keputusan ini, dapat dibuktikan bahawa wafer Si jenis-n dijangka mampu menghasilkan sel suria yang sama output menggunakan kaedah piawai industri bagi wafer jenis-p. Secara praktis di industri, sel suria dari wafer Si jenis-n akan menghasilkan sel suria yang berkecekapan tinggi jika menggunakan

proses fabrikasi yang lebih rumit dan kompleks seperti dua kali penyaduran lapisan pemancar menggunakan dua kaedah dan alat yang berbeza. Ini memakan masa yang panjang dan meningkatkan kos fabrikasi. Akan tetapi, hasil simulasi ini menjangkakan bahawa melalui proses ringkas seperti sel suria jenis-p, sel suria jenis-n ini masih mampu menghasilkan sel suria yang berkecekapan sama.

Rajah 4 menunjukkan lengkung arus-voltan bagi sel suria komersial daripada jenis-p sebagai penanda aras, yang dibandingkan dengan lengkung arus-voltan bagi sel suria Si jenis-p dan jenis-n hasil daripada kaedah fabrikasi. Didapati bahawa nilai kecekapan bagi sel suria komersial adalah 17.09%. Manakala sel suria jenis-p dan n menghasilkan kecekapan peranti sebanyak 9.44% dan 5.51%. Nilai FF, V_{oc} , I_{sc} dan bagi kedua-dua sel suria ditunjukkan dalam Jadual 2. Dapat diperhatikan bahawa nilai kecekapan peranti bagi sel suria jenis-p dan jenis-n adalah jauh berbeza daripada nilai jangkaan simulasi. Jika dilihat dalam hasil simulasi, kedua-dua jenis peranti memberi nilai kecekapan yang hampir sama dan berbeza sebanyak 1%. Namun, hasil yang diperoleh secara fabrikasi ini menunjukkan sebaliknya dan terdapat perbezaan sebanyak lebih kurang 4% bagi kecekapan sel suria jenis-p dan jenis-n.

Daripada Jadual 2, didapati nilai rintangan keping dan J_{sc} kelihatan jelas berbeza dan agak jauh daripada nilai piawai bagi sel suria yang baik. Nilai rintangan keping yang terhasil daripada pengukuran menggunakan 4 point probe bagi sel suria jenis-n adalah 12.51 ohm/sq berbanding 23.5 ohm/sq bagi jenis-p. Nilai rintangan keping bagi sel suria jenis-p adalah rendah daripada julat piawai bagi lapisan pemancar iaitu antara 40-50 ohm/sq (Markvart



RAJAH 3. Lengkung arus-voltan bagi sel suria Si jenis-p dan jenis-n hasil daripada kaedah simulasi menggunakan perisian PC1D

JADUAL 1. Prestasi sel suria jenis-p dan jenis-n melalui kaedah simulasi oleh perisian PC1D

Prestasi	Sel suria jenis-p	Sel suria jenis-n
I_{sc} (A)	3.699	3.629
V_{oc} (V)	0.7155	0.7152
Faktor isi	0.742	0.777
Kecekapan (%)	19.63%	20.16%

& Castañer 2005). Nilai rintangan keping yang rendah bagi sel suria jenis-n itu menunjukkan bahawa lapisan pemancar yang terhasil itu adalah terdop pekat. Apabila lapisan pemancar terdop pekat, maka terdapat terlalu banyak kelebihan elektron dalam lapisan itu menjadikan penggabungan semula lohong-elektron adalah tinggi. Penggabungan semula bagi lohong-elektron merendahkan kecekapan peranti sel suria. Ini kerana penggabungan elektron-lohong tidak menghasilkan elektrik sebaliknya menghasilkan haba atau fonon. Keputusan ini menunjukkan bahawa masa dan suhu semasa proses difusi fosforus triklorida perlu dikurangkan jika menggunakan wafer jenis-n bagi mengelakkan lapisan pemancar tersebut terdop pekat. Wafer Si jenis-n mempunyai degradasi pada suhu tinggi yang rendah berbanding wafer Si jenis-p. Maka, ini menunjukkan bahawa suhu fosforus difusi yang lebih rendah perlu dipraktikkan pada wafer Si jenis-n. Ini memberikan kesan yang positif kerana suhu rendah akan menyumbang kepada pengurangan kos fabrikasi.

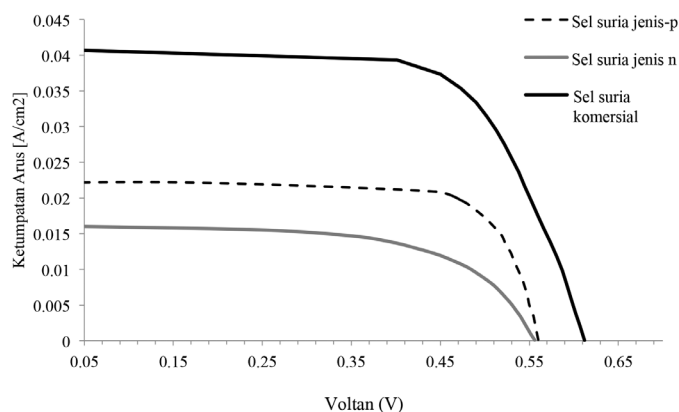
Nilai J_{sc} bagi sel suria jenis-n dan jenis-p adalah 17.0 dan 20.0 mA/cm². Secara teori, nilai J_{sc} yang maksimum bagi sel suria adalah 43.8 mA/cm² bagi menghasilkan sel suria Si yang berkecekapan tinggi. Bagi Si yang mempunyai jurang tenaga 1.12 eV, hanya panjang gelombang yang kurang daripada 1100 nm yang diserap. Sel suria Si yang komersial mempunyai nilai J_{sc} 42 mA/cm². Ini disebabkan penggunaan struktur pemerangkapan cahaya dan lapisan anti-pantulan (ARC) (Zhao et al. 1999) seperti dalam Rajah 2(a). Dapat dilihat juga daripada analisis arus-voltan pada

sel komersial yang diukur dalam uji kaji ini, nilai J_{sc} nya adalah 41 mA/cm². J_{sc} diberi sebagai;

$$J_{sc} = qG(L_n + L_p) \quad (1)$$

dengan G adalah kadar penghasilan cas yang bergantung kepada pencahayaan; manakala L_n dan L_p adalah jarak penyerapan bagi elektron dan lohong. Dalam persamaan ini juga, anggapan bahawa tiada penggabungan semula di permukaan sel suria telah dibuat. Ini membuktikan bahawa dalam kajian ini, penggabungan semula elektron-lohong adalah tinggi di lapisan pemancar bagi wafer Si jenis-n. Ini yang menyebabkan nilai kecekapan yang terhasil adalah rendah iaitu 5.51%.

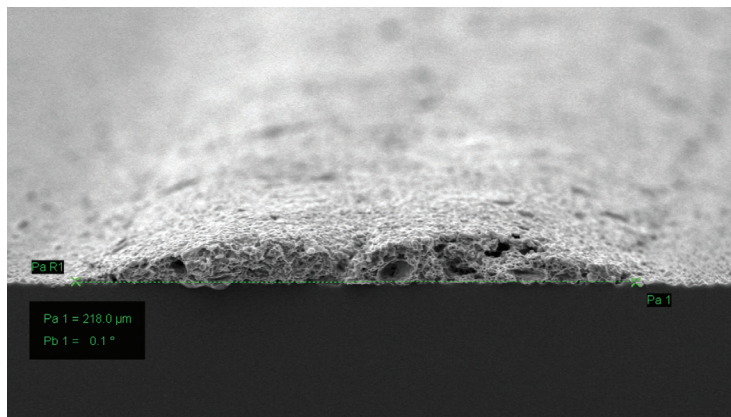
Faktor seterusnya yang menerangkan kerendahan nilai kecekapan adalah tiadanya lapisan anti-pantulan seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2(b) dan 2(c). Lapisan anti-pantulan (ARC) berkesan dalam meningkatkan pelanggaran cahaya melalui penindasan pantulan daripada permukaan sel suria (Abdullah et al. 2009). Dalam industri PV, silikon nitrida (SiN) yang memberikan warna biru kepada sel suria Si dimendapkan di atas lapisan pemancar menggunakan mesin pemendapan wap kimia secara pemerangkapan plasma (PECVD). Dalam kajian ini, lapisan SiN ini tidak dilakukan untuk meringkaskan lagi proses fabrikasi sel suria Si sekaligus merendahkan kos fabrikasi. Ini juga menjadi faktor penyumbang kerana terdapat peratusan kecil cahaya matahari atau foton yang terpantul semula ke luar daripada sel suria berikutan tiada lapisan SiN sebagai ARC.



RAJAH 4. Lengkung arus-voltan bagi sel suria Si jenis-p dan jenis-n hasil dari kaedah fabrikasi

JADUAL 2. Prestasi sel suria komersial (penanda aras), sel suria jenis-p dan jenis-n melalui kaedah fabrikasi

Prestasi	Sel suria jenis-p (Komersial)	Sel suria jenis-p (Fabrikasi)	Sel suria jenis-n (Fabrikasi)
V_{oc} (V)	0.612	0.56	0.560
J_{sc} (mA/cm ²)	41	20.0	17.0
Faktor Isian (FF)	0.671	0.7467	0.604
Kecekapan (%)	17.09	9.44	5.51



RAJAH 5. Rajah SEM bagi kelebaran cabang elektrod dengan magnifikasi 400× pada 15.0 kV

JADUAL 3. Data empirik dimensi lekatan hadapan

Sel suria	Lebar cabang elektrod	Lebar bas-bar utama	Luas kawasan elektrod	Peratus kehilangan
Komersial	125 μm	1650 μm	10.84cm ²	7.35%
Sel suria jenis-p dan jenis-n yang difabrikasi	218 μm	4100μm	20.29 cm ²	13.76%

Faktor seterusnya yang menerangkan kerendahan nilai J_{sc} antara sel suria komersial dan sel suria jenis-p dan jenis-n adalah kehilangan kawasan aktif permukaan hadapan sel suria. Rajah 5 menunjukkan rajah mikroskop elektron pengimbas (SEM) bagi kelebaran cabang elektrod dengan magnifikasi 400× pada 15.0 kV. Cabang elektrod Ag itu terhasil daripada proses cetakan tabir menggunakan topeng bagi grid sentuhan atas. Nilai kelebaran elektrod yang diperolehi adalah 218 μm. Jadual 3 pula menunjukkan dimensi lekatan atas dan peratus kehilangan arusfoto yang disebabkan oleh grid topeng bagi elektrod Ag sebagai sentuhan atas. Nilai peratus kehilangan dikira berdasarkan nisbah keluasan antara kawasan yang dicetak elektrod Ag dan wafer Si. Luas yang sama iatu 147.43 cm² bagi kesemua jenis sel suria. Jadual tersebut menunjukkan kehilangan yang dialami oleh sel suria jenis-p dan jenis-n adalah lebih tinggi berbanding sel suria komersial. Ini kerana penghasilan arusfoto tidak berlaku apabila cahaya diserap atau dipantulkan keluar oleh perekat Ag. Reka bentuk elektrod Ag yang sesuai mampu meminimakan kehilangan kawasan aktif (Leong 2013).

KESIMPULAN

Keputusan ini adalah sebagai penanda aras awal yang menunjukkan hasil adaptasi fabrikasi sel suria jenis-p ke atas wafer Si jenis-n. Nilai kecekapan yang diperolehi secara fabrikasi hasil adaptasi sepenuhnya bagi setiap lapisan filem nipis dalam sel suria tanpa ada perubahan adalah berbeza sebanyak ~4%. Ini berbeza dengan jangkaan simulasi yang menunjukkan bahawa ia mampu

memberikan nilai kecekapan yang sama bagi wafer Si yang berbeza. Ini menunjukkan masih banyak variasi eksperimen yang perlu dibuat lagi bagi mendapatkan nilai pemancar dan lapisan lain yang optimum bagi wafer Si jenis-n, dengan sekurang-kurangnya berjaya mendapat nilai kecekapan yang sama dengan jenis-p. Dapat disimpulkan bahawa, proses adaptasi ini adalah berjaya dan menjadi titik tolak utama terhadap penghasilan sel suria Si berkecekapan tinggi pada kos fabrikasi yang rendah menggunakan wafer Si jenis-n.

PENGHARGAAN

Penghargaan diberikan untuk geran penyelidikan ETP-2015-001 dan 03-01-02-SF1322.

RUJUKAN

- Abdullah, H., Saadah, N.H. & Ariyanto, N. 2009. Kesan pengedapan rendah ke atas bahan nanostruktur ZnO:AL sebagai lapisan anti-pantulan. *Sains Malaysiana* 38(5): 679-683.
- Alurralde, M., Tamasi, M.J.L., Bruno, C.J., Martínez Bogado, M.G., Plá, J., Fernández Vázquez, J., Duran, J., Schuff, J., Burlon, A.A., Stoliar, P. & Kreiner, A.J. 2004. Experimental and theoretical radiation damage studies on crystalline silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 82(4): 531-542.
- Asim, N., Sopian, K., Ahmadi, S., Saeedfar, K., Alghoul, M.A., Saadatian, O. & Zaidi, S.H. 2012. A review on the role of materials science in solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(8): 5834-5847.
- Cotter, J.E., Guo, J.H., Cousins, P.J., Abbott, M.D., Chen, F.W. & Fisher, K.C. 2006. P-type versus n-type silicon wafers:

- Prospects for high-efficiency commercial silicon solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices* 53(8): 1893-1901.
- Fonash, S. 2010. *Solar Cell Device Physics*. 2nd ed. New York: Elsevier Inc.
- Glunz, S.W., Preu, R. & Biro, D. 2012. *Crystalline Silicon Solar Cells. State-of-the-Art and Future Developments. Comprehensive Renewable Energy* (Vol. 1). New York: Elsevier Ltd.
- Goetzberger, A., Hebling, C. & Schock, H.W. 2003. Photovoltaic materials, history, status and outlook. *Materials Science and Engineering: R: Reports* 40(1): 1-46.
- Green, M.A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W. & Dunlop, E.D. 2016. Solar cells utilizing small molecular weight organic semiconductors. *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 48(24): 905-913.
- ITRPV. 2017. *International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV), 2016 Results. Itrpv* Eighth Edition. pp. 1-37.
- Joris Libal, D.R.K. 2015. N-type silicon solar cell technology: Ready for take off? http://www.pvtech.org/guest_blog/n_type_silicon_solar_cell_technology_ready_for_take_off. Diakses pada 18 Jun 2017.
- Leong, C.S. 2013. Evaluation of oxide passivated low reflection nano-structured solar cells. Tesis. Universiti Kebangsaan Malaysia (tidak diterbitkan).
- Markvart, T. & Castañer, L. 2005. *Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation*. Oxford: Elsevier Ltd.
- Oktiawati, U.Y., Mohamed, N.M. & Burhanudin Z.A. 2017. Applications of Taguchi method for optimization of dye solar cell design. *Sains Malaysiana* 46(3): 503-508.
- Sepeai, S., Zaidi, S.H., Desa, M.K.M., Sulaiman, M.Y., Ludin, N.A., Ibrahim, M.A. & Sopian, K. 2013. Design optimisation of bifacial solar cells by PC1D simulation. *Journal of Energy Technologies and Policy* 3(5): 1-11.
- Untila, G.G. & Zaks, M.B. 2011. Silicon-based photovoltaics: State of the art and main lines of development. *Thermal Engineering* 58(11): 932-947.
- Zhao, J., Wang, A., Campbell, P. & Green, M.A. 1999. A 19.8% efficient honeycomb multicrystalline silicon solar cell with improved light trapping. *IEEE Transaction on Electron Devices*. 46(10): 1978-1983.

Solar Energy Research Institute (SERI)
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 Bangi, Selangor Darul Ehsan
Malaysia

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

Diserahkan: 21 Jun 2017

Diterima: 30 Ogos 2017