

Sains Malaysiana 48(6)(2019): 1267–1272
<http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2019-4806-14>

Kesan Penuaan Sesuhu terhadap Sifat Mikro Kekerasan Pempaterian Sn-Ag-Cu/CNT/Cu Menggunakan Pelekukan Nano (Effect of Isothermal Aging on Microhardness Properties of Sn-Ag-Cu/CNT/Cu using Nanoindentation)

NORLIZA ISMAIL, AZMAN JALAR*, MARIA ABU BAKAR, ROSLINA ISMAIL, NUR SHAFIQA SAFEEL, AHMAD GHADAFI ISMAIL & NAJIB SAEDI IBRAHIM

ABSTRAK

Kesan penuaan terma terhadap sifat kekerasan sambungan pateri Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) yang ditambah dengan partikel karbon tiub nano (CNT) telah dikaji. Sifat kekerasan yang menggambarkan kekuatan sambungan pateri ditentukan melalui pendekatan pelekukan nano. Bahan pateri SAC ditambah dengan 0.03% kandungan berat CNT untuk menghasilkan bahan pes pateri SAC-CNT. Pes pateri yang telah dicetak di atas papan litar bercetak (PCB) berkemasan kuprum (Cu) dikenakan paterian aliran semula pada suhu puncak 260°C untuk menghasilkan sambungan pateri SAC dan SAC-CNT. Sambungan pateri SAC dan SAC-CNT kemudiannya dikenakan penuaan terma melalui ujian penyimpanan suhu tinggi (HTS) selama 200, 400, 600, 800 dan 1000 j pada suhu tetap iaitu 150°C. Sampel sambungan pateri selepas paterian dan penuaan terma dianalisis melalui kaedah pelekukan nano untuk menentukan sifat kekerasannya. Untuk analisis mikrostruktur, sampel dipunar dan imej dicerap melalui mikroskop optik. Keputusan menunjukkan nilai kekerasan menurun dengan peningkatan masa penuaan bagi kedua-dua sambungan pateri yang dikaji. Walau bagaimanapun, sambungan pateri SAC-CNT mempunyai kekerasan yang lebih tinggi iaitu sebanyak 10-26% berbanding sambungan pateri SAC. Melalui ujian pelekukan nano, sifat mikro kekerasan bagi sambungan pateri akibat tindakan penuaan terma sesuhu yang bersifat setempat dapat ditentukan. Corak nilai mikro kekerasan yang diperoleh adalah selari dengan corak yang diperoleh menggunakan kaedah ujian kekerasan konvensional.

Kata kunci: Karbon nanotub; kekerasan; pateri Sn-Ag-Cu; pelekukan nano; penuaan terma

ABSTRACT

Effect of thermal aging towards hardness properties of Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) solder joint added with carbon nanotube (CNT) particles was investigated. Hardness properties indicate the strength of solder was determined by nanoindentation approach. SAC solder alloy was added with 0.03% weight percent of CNT to form SAC305-CNT solder paste. Printed solder paste on printed circuit board (PCB) with copper (Cu) surface finish underwent reflow soldering at peak temperature 260°C to form SAC305 and SAC305-CNT solder joint. Then, SAC305 and SAC305-CNT were exposed to thermal aging via high temperature storage test (HTS) at constant temperature 150°C for about 200, 400, 600, 800 and 1000 h. Solder joint samples after reflow and thermal aging were analysed using nanoindentation method to determine hardness properties. For microstructure analysis, samples were etched and images were captured via optical microscope. The results showed microhardness values decrease with increasing of aging time for both investigated solder joints. However, hardness values for SAC305-CNT solder joint was higher (~10-26%) compared to SAC305 solder joint without CNT. From nanoindentation test, localized microhardness properties of solder joint under isothermal aging have been attained. Trend of microhardness values obtained was parallel with the trend gained by using conventional hardness test.

Keywords: Carbon nanotube; hardness; nanoindentation; Sn-Ag-Cu; thermal aging

PENGENALAN

Di dalam pempakejan mikroelektronik, bahan pateri digunakan untuk menyambungkan komponen elektrik dan memastikan antara hubung elektrik serta keutuhan mekanik alat elektronik. Pembangunan teknologi pempakejan mikro elektronik menyebabkan komponen yang digunakan mengalami era pengecilan termasuklah bahan pateri (Tama et al. 2014). Oleh itu adalah penting untuk memahami kelakuan mekanik bahan pateri bagi memastikan keboleharapan alat elektronik. Pencirian bahan pateri di dalam skala kecil perlu untuk menentukan tahap keboleharapan pempakejan

mikro elektronik. Kajian terdahulu dan terkini banyak memfokuskan kepada sifat mekanik bahan pateri pukal (Karamouz et al. 2013; Sauli et al. 2014). Sifat mekanik yang dikaji adalah seperti kekuatan tegangan, kekuatan ricih, kekerasan dan rayapan. Teknik konvensional yang digunakan untuk mencirikan sifat mekanik tersebut adalah ujian tegangan, ujian mikro kekerasan Vickers dan ujian ricih (Izhan et al. 2017; Maria et al. 2016). Pengecilan alat elektronik menyebabkan kaedah yang dinyatakan ini tidak lagi sesuai untuk digunakan bagi mencirikan bahan pateri dan sambungan pateri pada skala kecil.

Teknik pelekukan nano telah meluas digunakan dalam mencirikan sifat mekanik pada struktur skala yang kecil tanpa merosakkan sampel. Kaedah ini juga dapat memberikan pengawalan terhadap beban, kedalaman dan posisi pengujian yang tepat. Berdasarkan lengkung beban melawan kedalaman, maklumat sifat mekanik serta canggaaan pada struktur skala kecil dapat diperoleh (Liu & Chen 2007). Gesheng et al. (2015) telah menggunakan kaedah pelekukan nano untuk mengkaji sifat mekanik sebatian antara logam pada antara muka sambungan pateri Sn-3.0Ag-0.5Cu/Cu. Daripada kajiannya, kekerasan, modulus elastik dan sifat rayapan sebatian antara logam Cu_3Sn dan Cu_6Sn_5 dapat ditentukan. Deng et al. (2004) mendapati sifat mekanik sebatian antara logam yang terbentuk pada sambungan pateri kaya Sn/Cu daripada pelekukan nano adalah selaras dengan nilai yang diperoleh daripada teknik konvensional.

Penambahan partikel penguat atau partikel fasa kedua bukan sahaja memberi kesan ke atas lapisan IMC dan mikrostruktur bahan pateri tetapi sekaligus memberi impak kepada sifat mekanik bahan pateri komposit (Che Ani et al. 2018). Sifat mekanik sangat penting dalam memastikan kekuatan dan keboleharapan sambungan bahan pateri. Kajian lepas melaporkan penambahan partikel nano seperti karbon tiub nano (CNT), seramik, logam dan IMC dapat meningkatkan kekuatan matriks bahan pateri. Pembaikan sifat mekanik yang terlibat adalah seperti kekerasan, kekuatan tegangan, kekuatan koyakan dan rayapan. Kajian mendapati, sifat mekanik bahan pateri yang ditambah CNT berbilang dinding (MWCNT) dan CNT berbilang tunggal (SWCNT) meningkatkan kekerasan mikro iaitu sebanyak 0.2% kekuatan alah dan kekuatan tegangan muktamad sambungan bahan pateri tetapi menurunkan sifat kemuluran bahan pateri komposit (Nai et al. 2008, 2006; Kumar et al. 2008). Kajian yang dilaporkan oleh Zhongbao et al. (2014) mendapati penambahan 0.05% kandungan berat CNT yang dilapisi nikel meningkatkan kekuatan tegangan muktamad bagi sambungan bahan pateri sehingga 15.95%.

Kekerasan merupakan salah satu sifat mekanik yang penting dalam menentukan kekuatan bahan selain daripada kekuatan tegangan, kekuatan ricih dan kekuatan koyakan. Kekerasan merupakan pengukuran rintangan bahan terhadap canggaaan plastik. Pengukuran nilai kekerasan biasanya dilakukan melalui beberapa kaedah iaitu ujian mikro kekerasan Vickers, mikro kekerasan Brinell dan pelekukan nano (Yahaya & Mohamad 2017). Ujian kekerasan adalah untuk mengukur kerintangan terhadap tusukan ke atas permukaan bahan oleh objek keras. Ujian mikro kekerasan Vickers dan Brinell merupakan kaedah yang sangat mudah dan murah serta sesuai digunakan untuk bahan pukal. Berbeza dengan ujian pelekukan nano yang memfokuskan keada pengujian berskala kecil iaitu di dalam skala berjarak nanometer (Askeland et al. 2011). Sejajar dengan era pengecilan alat elektronik dan pengecilan struktur sambungan, kajian terhadap sifat mekanik bahan pateri yang diperkuatkan dengan CNT pada skala kecil iaitu nanometer adalah sangat penting. Oleh

itu, di dalam kajian ini, sifat kekerasan sambungan pateri Sn-Ag-Cu dan Sn-Ag-Cu/CNT dianalisis menggunakan kaedah pendekatan pelekukan nano. Penuaan terma sesuhu dikenakan ke atas sambungan pateri bertujuan untuk melihat kelakuan sifat kekerasan terhadap kesan suhu dan masa yang panjang sesuai dengan penggunaan sambungan pateri di dalam pempakejan elektronik yang sebenar.

BAHAN DAN KAEDAH

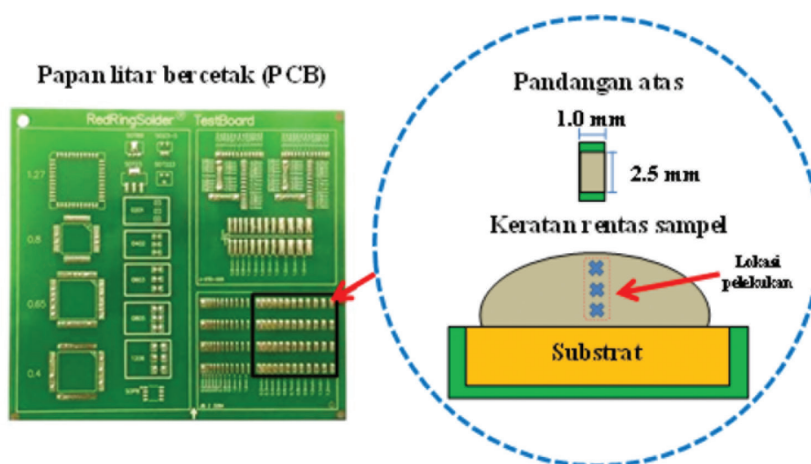
Dalam kajian ini, bahan pateri yang digunakan adalah di dalam bentuk pes. Serbuk pateri aloi Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) dicampurkan dengan 0.03% kandungan berat CNT dan fluks untuk menghasilkan pes pateri SAC305-CNT. Campuran serbuk pateri, CNT dan fluks diadun menggunakan kaedah percampuran mekanik selama 2 j di dalam kebuk bervakum untuk mendapatkan campuran yang homogen. Pes pateri yang terhasil dicetak ke atas papan litar bercetak (PCB) berkemasan kuprum (Cu) menggunakan kaedah percetakan stensil. Pes pateri yang telah dicetak dikenakan pematerian aliran semula pada suhu puncak 260°C untuk membentuk sambungan pateri SAC305-CNT. Sambungan pateri SAC305 juga dihasilkan sebagai sampel rujukan. Saiz sampel yang telah dipotong serta papan litar bercetak yang digunakan ditunjukkan di dalam Rajah 1. Kedua-dua jenis sampel iaitu sambungan pateri SAC dan SAC305-CNT didedahkan kepada penuaan terma melalui ujian penyimpanan suhu tinggi (HTS) pada suhu tetap iaitu 150°C selama 200, 400, 600, 800 dan 1000 jam. Sampel sambungan pateri selepas pematerian dan penuaan terma dicagak, dilelas dan digilap sebelum dianalisis menggunakan kaedah pelekukan nano bagi mendapatkan sifat kekerasan sambungan pateri. Bagi analisis mikrostruktur, sampel yang telah melalui proses cagakan, lelasan dan gilapan dipunar untuk menampakkan mikrostruktur matriks sambungan pateri. Imej mikrostruktur dicerap menggunakan mikroskop optik. Ujian pelekukan nano dijalankan menggunakan mesin pelekukan nano model Micro Materials Nanotest™. Ujian ini dilakukan menggunakan pelekuk intan jenis Berkovich. Beban maksimum yang dikenakan adalah sebanyak 10 mN dan kadar pembebanan adalah 0.5 setiap saat. Masa inapan pula adalah selama 30 s. Sebanyak tiga lekukan dikenakan ke atas sambungan pateri iaitu di bahagian pateri pukal seperti yang ditunjukkan di dalam Rajah 1. Sifat kekerasan ditentukan melalui data beban-kedalaman berdasarkan kaedah Oliver-Pharr. Kekerasan H , ditentukan sebagai:

$$H = \frac{P_{maks}}{A}$$

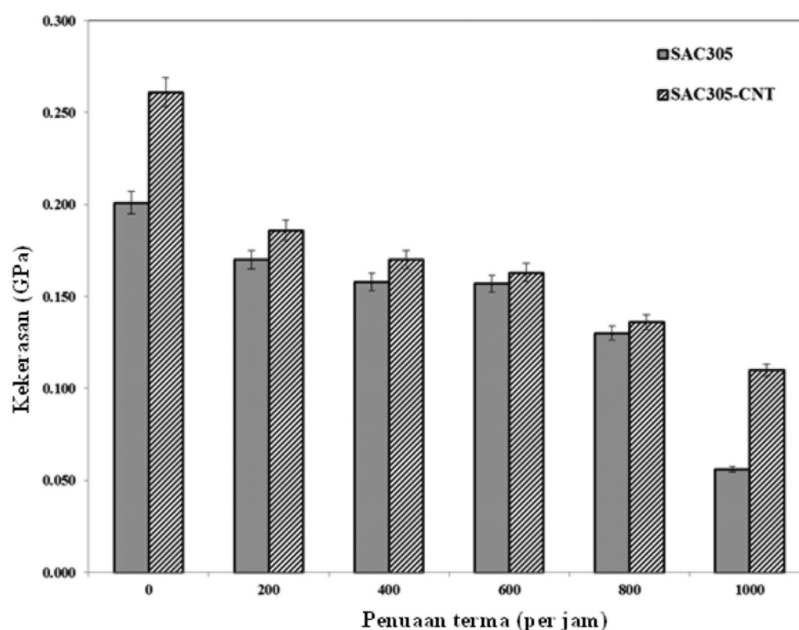
dengan P_{maks} ialah beban maksimum; dan A ialah kawasan sentuhan.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Rajah 2 menunjukkan nilai mikro kekerasan sambungan pateri SAC305 dan SAC305-CNT selepas pematerian dan



RAJAH 1. Saiz sampel yang digunakan untuk pengujian pelekukan nano dan lokasi pelekukan pada sampel



RAJAH 2. Nilai kekerasan sambungan pateri SAC305 dan SAC305-CNT selepas pematerian dan penuaan terma selama 200, 400, 600, 800 dan 1000 jam

selepas penuaan terma selama 200, 400, 600, 800 dan 1000 j. Nilai mikro kekerasan bagi sambungan pateri SAC305-CNT selepas pematerian dan penuaan terma sesuhu adalah lebih tinggi iaitu sebanyak ~10-26% berbanding sambungan pateri SAC305. Walau bagaimanapun, nilai mikro kekerasan bagi kedua-dua sambungan pateri didapati menurun dengan peningkatan masa penuaan. Daripada kajian ini, sifat mikro kekerasan yang didapati daripada ujian pelekukan nano adalah selaras daripada segi tingkah lakunya dengan ujian konvensional dengan struktur yang lebih besar. Jadual 1 menunjukkan nilai kekerasan yang diperolehi melalui ujian pelekukan nano di dalam kajian ini berbanding dengan ujian kekerasan konvensional oleh penyelidik terdahulu. Corak nilai mikro kekerasan yang diperolehi melalui kaedah pelekukan nano adalah selari

dengan kaedah konvensional. Oleh itu, pelekukan nano sesuai digunakan untuk menentukan sifat mikro kekerasan bagi sambungan pateri bagi komponen yang berstruktur kecil.

Selain itu, kaedah ini memberikan nilai mikro kekerasan yang bersifat setempat dan tertumpu pada kawasan yang dikenakan lekukan. Nilai mikro kekerasan yang diperolehi bagi ketiga-tiga lekukan yang dikenakan pada bahagian pukal sambungan pateri bagi setiap sampel menunjukkan perbezaan yang sangat kecil. Contohnya nilai mikro kekerasan bagi sambungan pateri SAC305 selepas pematerian bagi ketiga-tiga lekukan yang dikenakan pada lokasi yang berbeza adalah 0.217 GPa, 0.192 GPa dan 0.195 GPa. Oleh itu, keadaan ini menggambarkan bahawa rangkaian matriks sambungan pateri yang dikaji

JADUAL 1. Nilai mikro kekerasan sambungan pateri yang dikaji menggunakan ujian pelekukan nano dan ujian mikro kekerasan konvensional

Jenis sambungan pateri	Nilai mikro kekerasan (GPa)						Ujian mikro kekerasan	Sumber
Masa penuaan (setiap jam)	0	200	400	600	800	1000		
SAC305	0.201	0.170	0.158	0.157	0.130	0.056	Pelekukan nano	
SAC305-CNT	0.261	0.186	0.170	0.163	0.136	0.110		
Masa penuaan (setiap jam)	0	240	480	720	-	-		
SAC305	0.151	0.133	0.129	0.127	-	-	Vickers	Gain & Chan 2014
Masa penuaan (setiap jam)	0	169	324	484	-	-		
SAC305	0.128	0.124	0.121	0.116	-	-	Vickers	Chen at al. 2016
Masa penuaan (per jam)	0	480	960	1440	-	-		
SAC305	0.138	0.129	0.116	0.103			Vickers	Gain & Zhang 2017

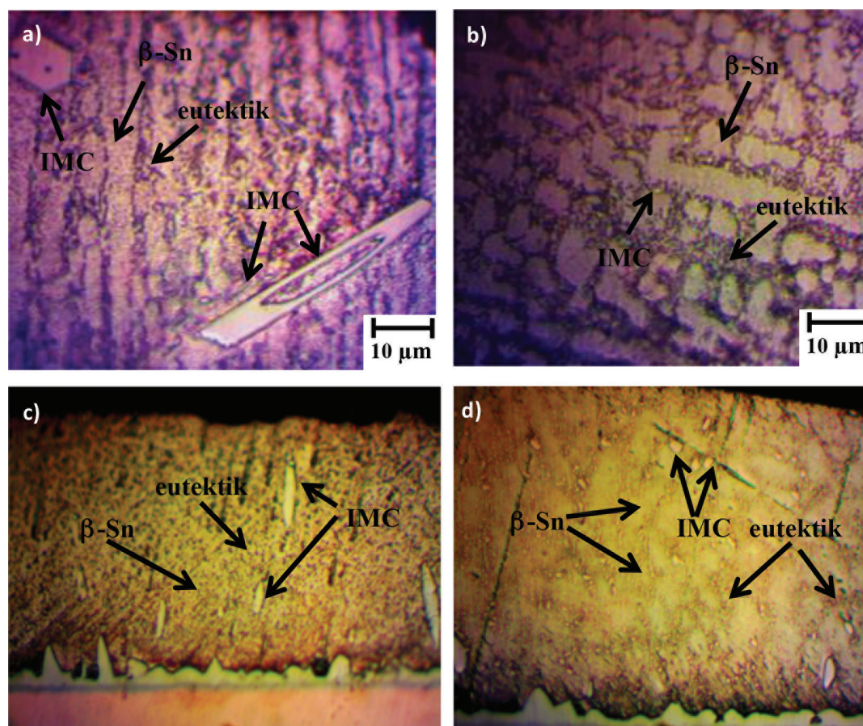
adalah bersifat homogen. Kajian lepas menunjukkan nilai kekerasan sambungan pateri untuk bahan yang sama tanpa CNT adalah sekitar $\sim 0.15-0.22$ GPa (Chellvarajoo et al. 2015; Liu & Chen 2007; Lotfian et al. 2013). Oleh itu keputusan yang diperoleh iaitu $0.195-0.217$ GPa adalah di dalam julat yang selaras dengan penyelidik lain.

Sifat kekerasan berkait rapat dengan mikrostruktur bahan. Oleh itu, mikrostruktur sambungan pateri SAC305 dan SAC305-CNT yang dikenakan penuaan terma ditunjukkan dalam Rajah 3. Daripada mikrostruktur ini, kelakuan sifat kekerasan akibat penuaan terma dapat dijelaskan. Daripada Rajah 3(a) dan 3(b), mikrostruktur sambungan pateri SAC305 dan SAC305-CNT menunjukkan fasa-fasa umum yang terbentuk seperti fasa *B-Sn*, fasa eutektik dan sebatian antara logam (IMC) Cu_6Sn_5 selepas pematerian (Pietrikova & Durisin 2010). Pendedahan sambungan pateri SAC305 terhadap suhu menggalakan aktiviti resapan unsur-unsur logam matriks bahan pateri (Ismail et al. 2018). Pendedahan yang berpanjangan menyebabkan berlakunya pengasaran fasa yang terlibat seperti yang berlaku pada mikrostruktur sambungan pateri SAC305 dan SAC305-CNT selepas penuaan terma (Rajah 3(c) dan 3(d)). Pertumbuhan butiran atau pengasaran fasa serta partikel IMC juga dikenali sebagai pematangan Ostwald (Fu et al. 2017; Saud et al. 2013). Berdasarkan Rajah 3(c) dan 3(d) secara kualitatif dapat dilihat, fasa eutektik yang biasanya mengandungi fasa Ag_3Sn dan Cu_6Sn_5 menjadi semakin tersebar dan jarak sesama sendiri semakin jauh setelah dikenakan penuaan terma. Keadaan ini disebabkan oleh berlakunya resapan atom akibat pengaruh suhu dan menjadikan partikel IMC menjadi semakin besar (Jalar et al. 2018). Fenomena pengasaran fasa *B-Sn* juga menyebabkan sifat kekerasan sambungan pateri menurun (Tan et al. 2017). Ini kerana fasa *B-Sn* merupakan kawasan yang kaya timah dan sifat timah adalah lembut (El-Bediwi et al. 2015).

Bagi sambungan pateri SAC305-CNT, kehadiran partikel CNT di dalam rangkaian matriks bahan pateri memperlahankan kesan pengasaran fasa di dalam rangkaian matriks. Ini kerana partikel CNT menghalang resapan berlaku. Secara tidak langsung kehadirannya merencatkan pertumbuhan fasa *B-Sn* serta fasa IMC yang terbentuk. Selain itu partikel CNT juga boleh bertindak sebagai penghalang berlakunya kehelan. Kajian oleh Zhu et al. (2018) mendapati partikel CNT terselit di antara sub-butiran atau fasa *B-Sn* dan secara tidak langsung membuktikan bahawa kehadiran CNT dapat merencatkan pertumbuhan dan pengasaran fasa-fasa yang terbentuk dalam matriks Sn-Ag-Cu. Pembentukan dan penyerakan fasa IMC di dalam matriks bahan pateri Sn-Ag-Cu bertindak sebagai pin dan menghalang pergerakan kehelan (Yusoff et al. 2019). Penyerakan fasa IMC di dalam rangkaian matriks SAC305-CNT bertindak sebagai penghalang kehelan. Apabila beban dikenakan terhadap matriks bahan pateri, taburan fasa IMC yang banyak menghalang kehelan berlaku. Berbeza dengan sambungan pateri SAC305 tanpa CNT yang membolehkan beban yang dikenakan masuk lebih mendalam melalui pergerakan kehelan pada sempadan butiran. Oleh itu nilai kekerasan yang diperoleh menjadi lebih rendah berbanding sambungan pateri SAC305-CNT (Yahaya et al. 2016).

KESIMPULAN

Sifat mikro kekerasan sambungan pateri SAC305 dan SAC305-CNT didapati menurun dengan peningkatan masa penuaan terma. Penurunan sifat mikro kekerasan ini adalah disebabkan oleh fenomena pengasaran mikrostruktur bahan pateri Sn-Ag-Cu akibat pendedahan terhadap suhu dan masa yang berpanjangan. Walau bagaimanapun, penambahan partikel CNT didapati dapat meningkatkan sifat mikro kekerasan sambungan pateri Sn-Ag-Cu



RAJAH 3. Mikrostruktur sambungan pateri selepas pematerian: (a) SAC305, (b) SAC305-CNT dan selepas penuaan terma selama 800 jam: (c) SAC305 dan (d) SAC305-CNT

iaitu sebanyak ~10-26% berbanding tanpa CNT. Melalui kaedah ujian pelekukan nano, sifat mikro kekerasan dapat ditentukan pada bahan sambungan pateri berstruktur kecil. Corak nilai mikro kekerasan yang diperoleh bagi sambungan pateri SAC305 dan SAC305-CNT akibat penuaan terma adalah selari dengan corak nilai mikro kekerasan yang diperoleh daripada ujian kekerasan konvensional yang dijalankan oleh penyelidik terdahulu. Oleh itu ujian pelekukan nano adalah praktikal untuk digunakan bagi sambungan pateri SAC305 dan SAC305-CNT walaupun ujian ini bersifat setempat.

PENGHARGAAN

Penulis merakamkan penghargaan atas sokongan kewangan daripada Kementerian Pendidikan Tinggi Malaysia melalui program Biasiswa 'My Brain 15', Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) di atas geran penyelidikan GUP-2018-079 dan RedRing Solder (M) Sdn. Bhd.

RUJUKAN

- Abdullah, I., Zulkifli, M.N., Jalar, A. & Ismail, R. 2017. Deformation behavior relationship between tensile and nanoindentation test of SAC305 lead-free solder wire. *Soldering & Surface Mount Technology* 30(3): 194-202.
- Askeland, D.R., Fulay, D.P. & Wright, W.J. 2011. *The Science and Engineering of Materials*. 6 ed. USA: Global Engineering.
- Bakar, M.A., Jalar, A., Daud, A.R., Ismail, R.C.L.N. & Ibrahim, N.S. 2016. Nanoindentation approach on investigating micromechanical properties of joining from green solder materials. *Sains Malaysiana* 45(8): 1275-1279.
- Che Ani, F., Jalar, A., Saad, A.A., Khor, C.Y., Abas, M.A., Bachok, Z. & Othman, N.K. 2018. Characterization of SAC-xNiO nano-reinforced lead-free solder joint in an ultra-fine package assembly. *Soldering & Surface Mount Technology* 31(2): 109-124.
- Chellvarajoo, S., Abdullah, M.Z. & Khor, C.Y. 2015. Effects of diamond nanoparticles reinforcement into lead-free Sn_{3.0}Ag_{0.5}Cu solder pastes on microstructure and mechanical properties after reflowing soldering process. *Materials & Design* 82: 206-215.
- Chen, G., Peng, H., Silberschmidt, V.V., Chan, Y.C., Liu, C. & Wu, F. 2016. Performance of Sn_{3.0}Ag_{0.5}Cu composite solder with TiC reinforcement: Physical properties, solderability and microstructural evolution under isothermal ageing. *Journal of Alloys and Compounds* 685: 680-689.
- Deng, X., Chawla, N., Chawla, K. & Koopman, M. 2004. Deformation behavior of (Cu, Ag)-Sn intermetallics by nanoindentation. *Acta Materialia* 52(14): 4291-4303.
- El-Bediwi, A.B., El-Shafei, A. & Kamal, M. 2015. Microstructure, physical and soldering properties of Tin-Zinc-Bismuth alloy. *Material Science an Indian Journal* 2(2): 29-35.
- Fu, N., Wu, J., Ahmed, S., Suhling, J.C. & Lall, P. 2017. Investigation of aging induced evolution of the microstructure of SAC305 lead free solder. *Proceedings of the ASME 2017 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems*. pp. 1-11.
- Gain, A.K. & Chan, Y.C. 2014. Growth mechanism of intermetallic compounds and damping properties of Sn-Ag-Cu-1wt% nano-ZrO₂ composite solders. *Microelectronics Reliability* 54: 945-955.
- Gain, A.K. & Zhang, L. 2017. Effect of isothermal aging on microstructure, electrical resistivity and damping properties

- of Sn-Ag-Cu solder. *J. Mater. Sci. Mater. Electron* 28(13): 9363-9370.
- Gesheng, X., Xuexia, Y., Guozheng, Y., Zhigang, L. & Xuefeng, S. 2015. Mechanical properties of intermetallic compounds at the Sn-3.0Ag-0.5Cu/Cu joint interface using nanoindentation. *Materials & Design* 88: 520-527.
- Ismail, N., Jalar, A., Ismail, R. & Bakar, A.B. 2018. Kesan penambahan CNT terhadap pertumbuhan lapisan IMC bahan pateri SAC/Cu akibat penuaan terma. *Sains Malaysiana* 47(7): 1585-1590.
- Jalar, A., Bakar, M.A., Ismail, R., Ibrahim, N.S. & Ambak, M.A. 2018. Effect of coloured pigment on intermetallic compound growth of Sn_{-3.0}Ag_{-0.5}Cu solder joint. *Sains Malaysiana* 47(5): 1005-1010.
- Karamouz, M., Azarbarmas, M., Emany, M. & Alipour, M. 2013. Microstructure, hardness and tensile properties of A380 aluminum alloy with and without Li additions. *Mater. Sci. Eng. A* 582: 409-414.
- Kumar, K.M., Kripesh, V. & Tay, A.O. 2008. Single-wall carbon nanotube (SWCNT) functionalized Sn-Ag-Cu lead-free composite solders. *Journal Alloys Compound* 450: 229-237.
- Liu, C.Z. & Chen, J. 2007. Nanoindentation of lead-free solders in microelectronic packaging. *Materials Science and Engineering A* 448: 340-344.
- Lotfian, S., Molina-Aldareguia, J.M., Yazzie, K.E., Llorca, J. & Chawla, N. 2013. Mechanical characterization of lead-free Sn-Ag-Cu solder joints by high-temperature nanoindentation. *Journal of Electronic Materials* 42(6): 1085-1091.
- Nai, S.M.L., Wei, J. & Gupta, M. 2008. Effect of carbon nanotubes on the shear strength and electrical resistivity of a lead-free solder. *J. Electron Mater.* 37: 515-522.
- Nai, S.M.L., Wei, J. & Gupta, M. 2006. Improving the performance of lead-free solder reinforced with multi-walled carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering: A* 423(1-2): 166-169.
- Pietrikova, A. & Durisin, J. 2010. Microstructure of solder joints and isothermal aging. *Acta Electrotechnica et Informatica* 10(3): 43-46.
- Saud, N. & Salleh, M.A.A.M. 2013. Low and high temperature isothermal aging effect on morphology and diffusion kinetics of intermetallic compound (IMC) for n-Cu-Si₃N₄ composite solder. *Key Engineering Materials* 594-595: 666-670.
- Sauli, Z., Retnasamy, V., Vairavan, R., Khalid, N. & Abdullah, N. 2014. Wire bond shear test simulation on flat surface bond pad. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 129: 328-333.
- Tan, A.T., Tan, A.W. & Yusof, F. 2017. Evolution of microstructure and mechanical properties of Cu/SAC305/Cu solder joints under the influence of low ultrasonic power. *Journal of Alloys and Compounds* 705: 188-197.
- Tama, F., Chan, Y.C. & Chan, D.K. 2014. Influence of cerium oxide (CeO₂) nanoparticles on the microstructure and hardness of tin-silver-copper (Sn-Ag-Cu) solders on silver (Ag) surface-finished copper (Cu) substrates. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron* 25: 5375-5387.
- Yahaya, M.Z. & Mohamad, A.A. 2017. Hardness testing of lead-free solders: A review. *Soldering & Surface Mount Technology* 29(4): 203-224.
- Yahaya, M.Z., Che, A.F., Samsudin, Z., Sahin, S., Abdullah, M.Z. & Mohamad, A.A. 2016. Hardness profiles of Sn_{-3.0}Ag_{-0.5}Cu-TiO₂ composite solder by nanoindentation. *Materials Science & Engineering A* 669: 178-186.
- Yusoff, W.Y.W., Ismail, N., Safee, N.S., Ismail, A., Jalar, A. & Bakar, M.A. 2019. Correlation of microstructural evolution and hardness properties of 99.0Sn-0.3Ag-0.7Cu (SAC0307) lead-free solder under blast wave condition. *Soldering & Surface Mount Technology* 31(2): 102-108.
- Zhongbao, Y., Wei, Z. & Ping, W. 2014. Effects of Ni-coated carbon nanotubes addition on the microstructure and mechanical properties of Sn-Ag-Cu solder alloys. *Materials Science and Engineering A* 590: 295-300.
- Zhu, Z., Chan, Y.C., Chen, Z., Gan, C.L. & Wu, F. 2018. Effect of the size of carbon nanotubes (CNTs) on the microstructure and mechanical strength of CNTs-doped composite Sn_{0.3}Ag_{0.7}Cu-CNTs solder. *Materials Science & Engineering A* 727: 160-169.

Norliza Ismail, Azman Jalar*, Maria Abu Bakar & Ahmad Ghadafi Ismail
 Institut Kejuruteraan Mikro & Nano Elektronik (IMEN)
 Universiti Kebangsaan Malaysia
 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan
 Malaysia

Roslina Ismail
 Division of Fine Arts
 Cultural Centre, University of Malaya
 50603, Kuala Lumpur, Wilayah Persekutuan
 Malaysia

Nur Shafiqah Safee
 Pusat Asasi Pertahanan
 Universiti Pertahanan Malaysia
 Kem Sungai Besi, 57000 Kuala Lumpur, Wilayah Persekutuan
 Malaysia

Najib Saedi Ibrahim
 RedRing Solder (M) Sdn. Bhd.
 Lot17486, Jalan Dua, Taman Selayang Baru
 68100 Batu Caves, Selangor Darul Ehsan
 Malaysia

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

Diserahkan: 2 Januari 2019

Diterima: 6 Mac 2019