

Kesan Penambahan Tiubnano Karbon terhadap Pertumbuhan Lapisan Sebatian antara Logam Sistem Pateri Sn-Ag-Cu/Cu akibat Penuaan Termal (Effect of Carbon Nanotube Addition on the Growth of Intermetallic Layer of Sn-Ag-Cu Solder System under Thermal Aging)

NORLIZA ISMAIL, AZMAN JALAR*, MARIA ABU BAKAR & ROSLINA ISMAIL

ABSTRAK

Kesan tiubnano karbon (CNT) terhadap pertumbuhan lapisan sebatian antara logam (IMC) bagi sistem pateri bebas plumbum 96.5Sn-3.0Ag-0.5Cu/substrat Cu telah dikaji. Serbuk aloi Sn-Ag-Cu (SAC305) dicampurkan dengan 0.02 peratus berat CNT untuk menghasilkan pes pateri SAC305-CNT. Kedua-dua pes pateri SAC305 dan SAC305-CNT dicetak secara manual di atas permukaan papan litar bercetak (PCB) dengan kemasan kuprum (Cu) menggunakan kaedah percetakan stensil. Sampel yang telah dicetak dikenakan proses pematieran aliran semula pada suhu 260°C. Sampel yang sudah terpateri dikenakan ujian penuaan termal selama 200, 400, 600, 800 dan 1000 jam menggunakan ketuhar penyimpanan suhu tinggi (HTS) pada suhu malar iaitu 150°C. Ketebalan lapisan sebatian antara logam (IMC) diukur menggunakan alat Pengukuran Fokus Tak Terhingga (IFM®). Keputusan kajian mendapati kadar pertumbuhan lapisan IMC bagi sistem SAC305/Cu-CNT adalah 25% lebih rendah berbanding dengan sistem SAC/Cu. Maka, dicadangkan bahawa penambahan CNT boleh merencatkan pertumbuhan lapisan IMC sebanyak 25% akibat penuaan termal.

Kata kunci: Jerapan tiubnano karbon; pateri Sn-Ag-Cu; pertumbuhan lapisan antara logam; resapan; tiubnano karbon

ABSTRACT

Effect of carbon nanotube (CNT) on the growth of intermetallic compound (IMC) layer of 96.5Sn-3.0Ag-0.5Cu/Cu substrate lead free solder system has been investigated. Sn-Ag-Cu alloy powder (SAC305) was mixed with 0.02 weight percent of CNT to produce SAC-CNT solder paste. Both SAC305 and SAC305-CNT solder paste has been manually printed on the printed circuit board (PCB) with the copper (Cu) surface finish by using stencil printing method. Printed samples were reflowed at temperature 260°C. Soldered samples underwent thermal aging test for the period of 200, 400, 600, 800 and 1000 h using high temperature storage (HTS) oven at a constant temperature 150°C. The thickness of IMC layer was measured by Infinite Focus Measurement (IFM®) equipment. The results found that growth rates of IMC layer for SAC305/Cu-CNT system is 25% lower than SAC/Cu system. Therefore, addition of CNT proposed can retard about 25% of IMC layer growth under thermal aging.

Keywords: Carbon nanotube; carbon nanotube adsorption; diffusion; intermetallic layer growth; Sn-Ag-Cu solder

PENGENALAN

Semasa proses pematieran, tindak balas metalurgi yang berlaku antara bahan pateri dan substrat logam membentuk lapisan sebatian antara logam (IMC) pada antara muka bahan pateri/substrat. Lapisan IMC yang terbentuk ini merupakan faktor utama yang mengawal kebolehharian sambungan pateri untuk jangka masa panjang. Disebabkan sifat semula jadinya yang rapuh dan keras, pertumbuhan lapisan IMC yang berlebihan boleh melemahkan sifat mekanik antara muka sambungan pateri dan substrat serta memberi kesan terhadap kebolehharapannya (Han et al. 2009; Nor et al. 2014; Roshanghias et al. 2013;).

Terdapat banyak faktor yang mempengaruhi pertumbuhan lapisan IMC yang terbentuk semasa proses pematieran seperti jenis substrat dan kemasan permukaan yang digunakan, suhu dan masa, isi padu bahan pateri, kekasaran permukaan substrat dan komposisi bahan pateri (Harris & Chaggar 1998). Terdapat beberapa laporan yang

membincangkan peranan komposisi terhadap pembentukan dan pertumbuhan lapisan IMC (Kang et al. 2002; Yang et al. 2016). Penggunaan dan penambahan partikel zarah telah dikaji dalam mengehadkan dan merencatkan pertumbuhan lapisan antara logam (Liang & Tu 2014; Li et al. 2014; Tan et al. 2015). Tan et al. (2015) melaporkan penambahan partikel zarah seperti kobalt (Co), molibdenum (Mo), titanium oksida (TiO₂), aluminium oksida (Al₂O₃) dan zirkonium dioksida (ZrO₂) didapati dapat mengehadkan dan merencatkan pertumbuhan lapisan antara logam.

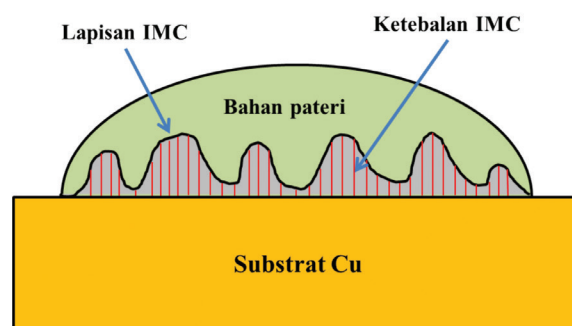
Penambahan partikel zarah ke dalam bahan pateri yang menghasilkan bahan pateri komposit zarah adalah bertujuan untuk mengawal pertumbuhan lapisan IMC sekaligus meningkatkan prestasi sifat mekanik bahan pateri seperti kekerasan, kekuatan ricih dan kekuatan tegangan telah menarik minat sebilangan penyelidik (Eid et al. 2016; Han et al. 2009; Mehrabi et al. 2016; Ren et al. 2017). Tsao (2011) telah berjaya mencampurkan partikel zarah TiO₂ ke

dalam bahan pateri bebas plumbum Sn-Ag-Cu. Keputusan kajiannya mendapati partikel zarah TiO_2 sebanyak 0.5% dapat merencatkan pertumbuhan lapisan IMC akibat tindakan haba. Kajian yang dibuat oleh Young et al. (2010) juga mendapati penambahan zink (Zn) ke dalam bahan pateri bebas plumbum merencatkan pertumbuhan lapisan IMC selepas pematerian aliran semula dan ketika ujian penuaan. Han et al. (2012) melaporkan bahan pateri Sn-Ag-Cu yang diperkuatkan dengan CNT yang dilapisi nikel (Ni) telah memperlambatkan pertumbuhan lapisan IMC pada sambungan bahan selepas pematerian dan dalam keadaan kitaran terma. Penemuan yang sama juga diperolehi oleh Nai et al. (2008) dengan kehadiran CNT berkesan dalam merencatkan pertumbuhan lapisan IMC bagi bahan pateri Sn-Ag-Cu. Menurut Krystyna et al. (2013) pula, penambahan CNT memberi kesan yang positif terhadap ketebalan IMC dengan menghalang pertumbuhannya yang berlebihan. Dele-Afolabi et al. (2015) pula mendapati penambahan 0.05% CNT ke dalam bahan pateri bebas plumbum Sn-5Sb telah merencatkan pertumbuhan lapisan IMC dan merendahkan pekali resapan berbanding bahan pateri Sn-5Sb tanpa CNT. Menurut Nai et al. (2009), kehadiran CNT yang bertaburan secara rawak samada di dalam keadaan tunggal atau berkelompok di dalam rangkaian matriks pateri SAC-CNT telah memperlambatkan resapan unsur Sn dan Cu di dalam sistem pateri. Oleh itu, dalam kajian ini, penambahan 0.02% CNT ke atas bahan pateri Sn-Ag-Cu di dalam bentuk pes pateri telah dihasilkan. Adakah penambahan CNT dapat merencatkan pertumbuhan lapisan IMC? Kesan penambahan CNT terhadap pertumbuhan lapisan IMC selepas pematerian aliran semula dan pada keadaan penuaan terma dikaji dan dilaporkan.

BAHAN DAN KAEDAH

Dalam kajian ini, serbuk pateri 96.5Sn-3.0Ag-0.5 Cu (SAC305) dengan saiz partikel antara julat 20-38 μm dicampurkan dengan 0.02% berat nanotub karbon berbilang dinding (MWCNT) untuk menghasilkan pes pateri SAC305-CNT. Campuran pes pateri ini diadun secara mekanikal dalam keadaan bervakum selama 2 jam. Pes pateri SAC305 dan SAC305-CNT dicetak secara manual ke atas papan litar bercetak berkemasan Cu menggunakan kaedah percetakan stensil. Permukaan papan litar bercetak dibersihkan terlebih dahulu untuk memastikan permukaan substrat Cu di atas permukaan papan litar bercetak bersih daripada bendasing dan kotoran. Pes pateri perlu ditekan dan ditarik secara sekata sehingga meliputi seluruh permukaan substrat supaya pes pateri memenuhi ruang. Tarikan dibuat dalam keadaan penekan bersudut 45° darjah. Pes pateri yang dicetak kemudiannya dikenakan pematerian aliran semula pada suhu 260°C . Sampel yang telah dipateri dipotong kepada bahagian yang kecil dengan ukuran 2 cm \times 1 cm. Kemudian sampel dimasukkan ke dalam relau penyimpanan suhu tinggi pada suhu 150°C untuk ujian penuaan terma selama 200, 400, 600, 800 dan 1000 jam. Sampel kemudiannya dicagak, dilelas dan digilap (Bakar

et al. 2016) sebelum dicerap menggunakan alat pengukuran fokus tidak terhingga (IFM) bagi pengukuran ketebalan lapisan sebatian antara logam (IMC). Rajah 1 menunjukkan skematik pengukuran ketebalan lapisan IMC. Pengukuran titik ketebalan lapisan IMC dilakukan dengan membuat garisan menegak yang diambil daripada sempadan garisan atas lapisan IMC hingga ke sempadan garisan bawah lapisan IMC. Hanya bentuk lapisan IMC yang jelas dipilih dalam pengukuran ini. Sebanyak 100 titik garisan menegak diukur pada bahagian lapisan IMC yang berbeza. Purata ketebalan lapisan IMC diperolehi dengan membahagikan jumlah ukuran ketebalan lapisan IMC dengan 100. Nilai purata ketebalan ini dianalisis berdasarkan suhu ujian penyimpanan suhu tinggi untuk melihat kadar pertumbuhan lapisan IMC dan kesan penambahan 0.02% CNT terhadap tingkah laku pertumbuhan lapisan IMC.



RAJAH 1. Skematik cara pengukuran lapisan IMC menggunakan alat pengukuran fokus tidak terhingga (IFM)

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Jadual 1 menunjukkan nilai ketebalan lapisan sebatian antara logam (IMC) bagi bahan pateri SAC305 dan SAC305-CNT selepas pematerian aliran semula dan selepas dikenakan ujian penuaan terma selama 200, 400, 600, 800 dan 1000 jam. Perbandingan ketebalan lapisan IMC bagi kedua-dua bahan pateri yang dikaji ditunjukkan pada graf dalam Rajah 2. Keputusan kajian menunjukkan penambahan 0.02% CNT telah mengurangkan sebanyak lebih kurang 25% ketebalan lapisan IMC bagi sistem pateri Sn-Ag-Cu/Cu selepas pematerian aliran semula.

JADUAL 1. Nilai ketebalan lapisan IMC bagi bahan pateri yang dikaji

Tempoh masa penuaan (per jam)	Ketebalan lapisan IMC (μm)	
	SAC305	SAC305-CNT
0	5.34	3.89
200	6.90	5.40
400	7.46	5.91
600	7.40	6.20
800	7.90	6.82
1000	8.75	7.52

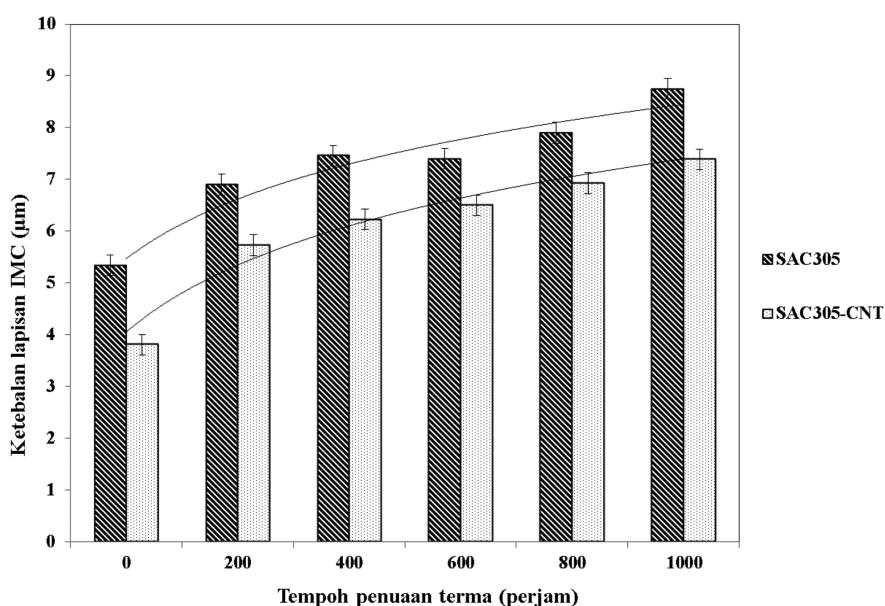
Penambahan CNT juga mengurangkan ketebalan lapisan IMC yang dikenakan ujian penuaan terma. Pengurangan ketebalan lapisan IMC bagi tempoh masa penuaan selama 200, 400, 600, 800 dan 1000 jam adalah sebanyak 21.74%, 20.78%, 16.22%, 13.67% dan 14.06%. Ketebalan lapisan IMC bagi kedua-dua bahan pateri diperhatikan meningkat dengan peningkatan masa penuaan terma.

Daripada graf yang ditunjukkan dalam Rajah 2, pertumbuhan lapisan IMC bagi bahan pateri SAC305 dan SAC305-CNT dilihat mengikut corak pertumbuhan kinetik parabolik selaras dengan kajian yang dilaporkan oleh Mayappan et al. (2014). Pertumbuhan lapisan IMC mengikut corak parabolik menunjukkan proses resapan memainkan peranan penting dalam mekanisme pertumbuhan (Kim & Jung 2005). Resapan unsur Sn daripada bahan pateri dan juga Cu daripada substrat terlibat dalam mengawal pertumbuhan lapisan IMC mengikut pertumbuhan kinetik parabolik (Ramani et al. 2014). Pada peringkat awal pematerian, lapisan IMC yang awal terbentuk sejeurus selepas sahaja pematerian adalah Cu_6Sn_5 berbentuk 'scallop' seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3(a) dan 3(b). Lapisan Cu_3Sn yang berwarna agak gelap juga kelihatan selepas pematerian, walau bagaimanapun, ia sangat nipis seperti yang dilaporkan oleh Tan et al. (2015). Oleh kerana CNT yang hadir dalam bahan pateri tidak melarut dan bersifat lengai, ia tidak bertindak balas dengan unsur bahan pateri untuk membentuk lapisan IMC. Walau bagaimanapun, kehadiran CNT dalam bahan pateri Sn-Ag-Cu mengubah kelakuan resapan atom Sn dan Cu dalam sistem sambungan bahan pateri.

Semasa bahan pateri Sn-Ag-Cu mencapai suhu peleburan, ia berada dalam keadaan cecair dan partikel CNT dipercayai bertaburan secara rawak dalam leburan bahan pateri ini. Apabila bahan pateri mula mengalami

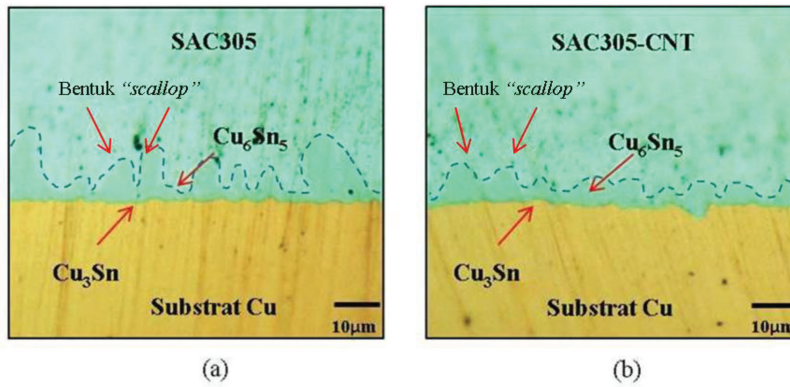
proses pemejalan yang disertai oleh proses penyejukan maka berlakulah penukleusan heterogen membentuk nukleus IMC dan nukleus ini membesar membentuk lapisan IMC melalui tindak balas resapan unsur Sn dan Cu (Liu & Ahmad 2013; Tan et al. 2015). Kehadiran partikel CNT dalam cairan bahan pateri bertindak sebagai penghalang kepada aktiviti resapan unsur Sn dan juga Cu yang terdapat dalam sistem sambungan bahan pateri. Tindak balas resapan bagi unsur Sn dan Cu adalah samada melalui laluan 1, 2 bagi Sn dan 3, 4 bagi Cu seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 4(a) dan 4(b). Apabila hadirnya partikel CNT dalam bahan pateri ia sekaligus bertindak sebagai penghalang dan mengganggu proses resapan yang berlaku untuk membentuk lapisan IMC (Rajah 4(b)). Oleh itu kadar resapan menjadi perlahan berbanding bahan pateri Sn-Ag-Cu tanpa kehadiran partikel CNT. Han et al. (2012) juga mendapati penambahan partikel CNT yang dilapisi nikel (Ni) dalam bahan pateri Sn-Ag-Cu menghalang laluan resapan unsur-unsur Sn dan Cu yang terlibat dalam pembentukan lapisan IMC.

Selain itu, aktiviti jerapan bahan aktif permukaan dicadangkan terlibat dalam mekanisme perencatan pertumbuhan lapisan IMC. Mekanisme perencatan lapisan IMC oleh aktiviti jerapan telah dicadangkan oleh beberapa penyelidik sebelum ini (Li et al. 2014; Ren et al. 2017). Tiubnano karbon mempunyai tenaga permukaan yang tinggi disebabkan saiznya yang sangat kecil. Oleh itu, ia cenderung untuk menjerap permukaan lapisan IMC yang telah terbentuk bagi merendahkan tenaga permukaannya. Berdasarkan teori jerapan, apabila partikel CNT menjerap ke atas permukaan lapisan IMC ia akan merendahkan tenaga permukaan dan seterusnya mengurangkan kelajuan pertumbuhan butiran IMC, sesuai dengan persamaan berikut (Li et al. 2014; Tama et al. 2014):

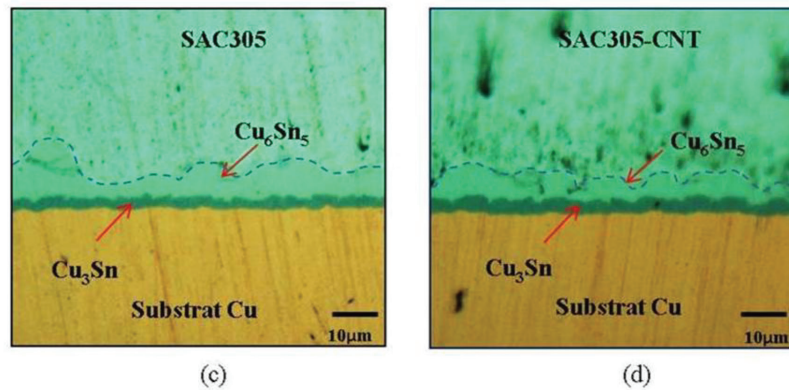


RAJAH 2. Graf ketebalan lapisan IMC bagi setiap bahan pateri yang dikaji selepas pematerian aliran semula dan pada ujian penuaan terma

Selepas pematerian



Selepas penuaan terma



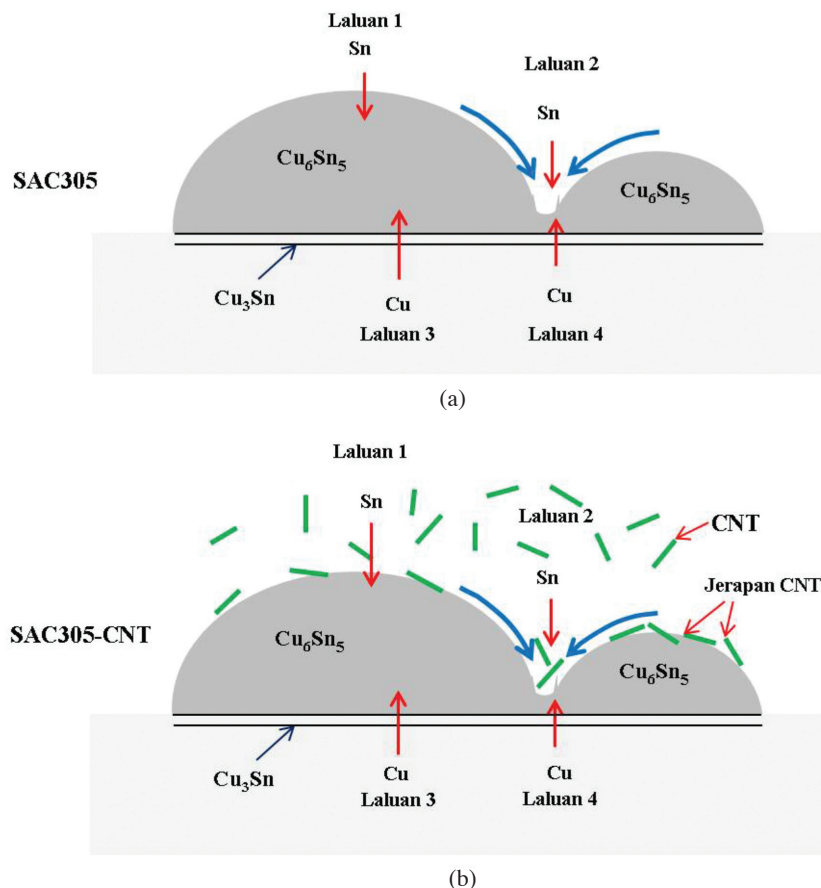
RAJAH 3. Lapisan IMC Cu_6Sn_5 yang terbentuk pada antara muka bahan pateri Sn-Ag-Cu dan substrat Cu selepas proses pematerian aliran semula (a) bahan pateri SAC305 (b) bahan pateri SAC305-CNT dan selepas penuaan terma selama 400 jam (c) bahan pateri SAC305 (d) SAC305-CNT

$$\begin{aligned} \sum_k \gamma_{(c)}^k A_k &= \sum_k (\gamma_{(0)}^k - RT \int_0^c \frac{\Gamma^k}{c} dc) A_k \\ &= \sum_k \gamma_{(0)}^k A_k - RT \sum_k A_k \int_0^c \frac{\Gamma^k}{c} dc \end{aligned}$$

dengan Γ^k adalah jerapan bahan aktif permukaan pada satah k ; c adalah kepekatan bahan aktif permukaan; R ialah pemalar ideal gas; T adalah suhu mutlak; $\gamma_{(c)}^k$ ialah tegangan permukaan bagi satah k dengan jerapan bahan aktif; $\gamma_{(0)}^k$ adalah tegangan permukaan permulaan satah hablur k tanpa jerapan; dan A_k adalah kawasan/bahagian satah hablur k . Apabila keadaan ini berlaku, secara tidak langsung jerapan CNT di atas permukaan butiran IMC akan merencatkan pertumbuhannya. Kadar pertumbuhan lebih kecil dan lapisan yang tumbuh menjadi nipis. Ilustrasi mekanisme jerapan yang merencatkan pertumbuhan lapisan IMC oleh CNT ditunjukkan pada Rajah 4(b). Kajian yang dijalankan oleh Chang et al. (2011) terhadap sambungan bahan pateri SAC-TiO₂ mendapati pertumbuhan lapisan IMC Cu_6Sn_5 dilaporkan terencat disebabkan oleh kesan jerapan partikel zarah TiO₂. Menurut Chang et al. (2011), partikel partikel zarah TiO₂ menjerap sebatian antara logam Ag₃Sn dan merencatkan pertumbuhannya. Keadaan yang sama berlaku terhadap sebatian antara logam Cu_6Sn_5

dengan jerapan partikel Ag₃Sn ke atas butiran Cu_6Sn_5 pada permukaan sambungan merencat dan mengecilkan saiz butirannya. Kajian lanjutan yang dijalankan oleh Tsao (2011) terhadap pertumbuhan bahan pateri SAC-TiO₂ pula mendapati partikel nano Ag₃Sn berada di atas butiran sebatian antara logam Cu_6Sn_5 dan tenaga pengaktifan sebatian antara logam tersebut adalah lebih tinggi daripada yang terdapat dalam sambungan SAC/Cu. Oleh itu, beliau mencadangkan penjerapan partikel nano Ag₃Sn ke atas butiran sebatian antara logam Cu_6Sn_5 bukan sahaja mengurangkan tenaga permukaan tetapi juga bertindak sebagai penghalang resapan dengan mengurangkan kadar resapan atom Sn ke permukaan bahan pateri / Cu_6Sn_5 .

Selepas proses pematerian aliran semula, bahan pateri berada dalam keadaan pepejal. Dalam keadaan pepejal, pertumbuhan lapisan IMC tidak berhenti di situ sahaja malah terus berlaku dengan kadar yang perlahan berbanding di dalam keadaan cecair. Apabila didedahkan kepada haba ketika ujian penuaan terma, lapisan IMC Cu_6Sn_5 dan Cu_3Sn semakin menebal seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3(c) dan 3(d). Dalam keadaan ini resapan atom Cu daripada substrat logam dan juga atom Sn daripada bahan pateri berlaku dengan kadar perlahan. Pada ketika ini, aktiviti resapan giat berlaku di kawasan laluan 2 dan 4 dengan pembentukan IMC di kawasan ini mengubah bentuk



RAJAH 4. Ilustrasi mekanisme pencetakan lapisan IMC bagi bahan pateri Sn-Ag-Cu semasa proses pematerian

lapisan IMC Cu_6Sn_5 daripada 'scallop' kepada bentuk 'planar' seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3(c) dan 3(d). Lapisan IMC akan semakin menebal akibat daripada kesan haba dan masa penuaan. Walau bagaimanapun, bagi SAC305-CNT, lapisan IMC yang tumbuh adalah lebih nipis berbanding lapisan IMC SAC305.

KESIMPULAN

Penambahan tiubnano karbon terhadap sistem pateri SAC/Cu didapati telah merendahkan kadar pertumbuhan sehingga 25% berbanding sistem SAC/Cu tanpa penambahan tiubnano karbon. Kadar pertumbuhan lapisan IMC juga berkurangan terhadap peningkatan masa penuaan sekitar 17- 24%. Aktiviti jerapan tiubnano karbon serta resapan unsur-unsur pateri dan substrat didapati menyumbang kepada mekanisme pengurangan kadar pertumbuhan lapisan IMC akibat proses penuaan.

PENGHARGAAN

Penulis merakamkan penghargaan atas bantuan kewangan daripada Kementerian Pendidikan Tinggi, Malaysia melalui program Biasiswa 'My Brain 15' dan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) atas geran penyelidikan GGPM-2017-048.

RUJUKAN

- Bakar, M.A., Jalar, A., Daud, A.R., Ismail, R., Lah, N.A.C. & Ibrahim, N.S. 2016. Nanoindentation approach on investigating micromechanical properties of joining from green solder materials. *Sains Malaysiana* 45(8): 1275-1279.
- Chang, S.Y., Jain, C.C., Chuang, T.H., Feng, L.P. & Tsao, L.C. 2011. Effect of addition of TiO_2 nanoparticles on the microstructure, microhardness and interfacial reactions of Sn3.5AgXCu solder. *Materials and Design* 32: 4720-4727.
- Dele-Afolabi, T.T., Hanim, M.A., Norkhairunnisa, M., Yusoff, H.M. & Suraya, M.T. 2015. Growth kinetics of intermetallic layer in lead-free Sn-5Sb solder reinforced with multi-walled carbon nanotubes. *Journal Mater Sci: Mater Electron*. 26: 8249-8259.
- Eid, E.A., Fouda, A.N. & Duraia, E.S.M. 2016. Effect of adding 0.5 wt% ZnO nanoparticles, temperature and strain rate on tensile properties of Sn-5.0 wt% Sb-0.5 wt% Cu (SSC505) lead free solder alloy. *Materials Science and Engineering: A* 657: 104-114.
- Han, Y.D., Jing, H.Y., Nai, S.M.L., Xu, L.Y., Tan, C.M. & Wei, J. 2012. Interfacial reaction and shear strength of Ni-coated carbon nanotubes reinforced Sn-Ag-Cu solder joints during thermal cycling. *Intermetallics* 31: 72-78.
- Han, Y.D., Jing, H.Y., Nai, S.M.L., Xu, L.Y., Tan, C.M. & Wei, J. 2009. Effect of Ni-coated carbon nanotubes on interfacial intermetallic layer growth. *Electronics Packaging Technology Conference*. pp. 292-295.

- Harris, P.G. & Chaggar, K.S. 1998. The role of intermetallic compound in lead-free soldering. *Soldering & Surface Mount Technology* 10(3): 38-52.
- Kang, S.K., Choi, W.K., Yim, M.J. & Shih, D.Y. 2002. Studies of the mechanical and electrical properties of lead-free solder joints. *Journal of Electronic Materials* 31(11): 1292-1303.
- Kim, D. & Jung, S. 2005. Interfacial reactions and growth kinetics for intermetallic compound layer between In-48Sn solder and bare Cu substrate. *Journal of Alloys and Compounds* 386: 151-156.
- Krystyna, B., Janusz, S., Marek, K., Wojciech, N., Anna, M. & Malgorzata, J. 2013. SAC solder with carbon nanotubes. Part II: carbon nanotubes effect on solder joints mechanical properties and microstructure. *Soldering & Surface Mount Technology* 25(4): 195-208.
- Li, Y., Zhao, X., Liu, Y., Wang, Y. & Wang, Y. 2014. Effect of TiO₂ addition concentration on the wettability and intermetallic compounds growth of Sn_{3.0}Ag_{0.5}Cu-xTiO₂ nano-composite solders. *J. Mater. Sci: Mater. Electron.* 25(9): 3816-3827.
- Liang, Z. & Tu, K.N. 2014. Structure and properties of lead-free solders bearing micro and nano particles. *Materials Science and Engineering R* 82: 1-32.
- Liu, M.L. & Ahmad, A.M. 2013. Interfacial reaction of Sn-Ag-Cu lead-free solder alloy on Cu: A review. *Advances in Materials Science and Engineering* 2013: Article ID 123697.
- Mayappan, R., Yahya, I., Ab Ghani, N.A. & Hamid, H.A. 2014. The effect of adding Zn into the Sn-Ag-Cu solder on the intermetallic growth rate. *J. Mater Sci: Mater. Electron.* 25(7): 2913-2922.
- Mehrabi, K., Khodabakhshi, F., Zareh, E., Shahbazkhan, A. & Simchi, A. 2016. Effect of alumina nanoparticles on the microstructure and mechanical durability of meltspun lead-free solders based on tin alloys. *Journal of Alloys and Compounds* 688: 143-155.
- Nai, S.M.L., Gupta, M. & Wei, J. 2008. Suppressing intermetallic compound growth in SnAgCu solder joints with addition of carbon nanotubes. *2nd IEEE International*. pp. 15-19.
- Nai, S.M.L., Wei, J. & Gupta, M. 2009. Interfacial intermetallic growth and shear strength of lead-free composite solder joints. *Journal of Alloys and Compounds* 473: 100-106.
- Nor, A.M., Badariah, B. & Ibrahim, A. 2014. Reflow soldering process for Sn_{3.5}Ag solder on ENIG using rapid thermal processing system. *Sains Malaysiana* 43(1): 117-122.
- Roshanghias, A., Kokabi, A.H., Miyashita, Y., Mutoh, Y. & Madaah, H.H.R. 2013. Formation of intermetallic reaction layer and joining strength in nano-composite solder joint. *J. Mater. Sci: Mater. Electron.* 24: 839-847.
- Ren, S., Yanwei, S., Jiqui, Q., Fuxiang, W., Yezeng, H., Xiao, C., Qingkun, M. & Zhi, S. 2017. Influence of SnO₂ nanoparticles addition on microstructure, thermal analysis and interfacial IMC growth of Sn_{1.0}Ag_{0.7}Cu solder. *Journal of Electronic Materials* 46(7): 4197-4205.
- 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.
- Tan, A.T., Tan, A.W. & Farazila, Y. 2015. Influence of nanoparticle addition on the formation and growth of intermetallic compounds (IMCs) in Cu/Sn-Ag-Cu/Cu solder joint during different thermal conditions. *Sci. Technol. Adv. Mater.* 16(3): 033505.
- Tsao, L.C. 2011. Suppressing effect of 0.5 wt.% nano-TiO₂ addition into Sn-3.5Ag-0.5Cu solder alloy on the intermetallic growth with Cu substrate during isothermal aging. *Journal of Alloys and Compounds* 509: 8441-8448.
- Yang, M., Ji, H.J., Wang, S., Ko, Y.H., Lee, C.W., Wu, J.X. & Li, M.Y. 2016. Effects of Ag content on the interfacial reactions between liquid Sn-Ag-Cu solders and Cu substrates during soldering. *Journal of Alloys and Compounds* 679: 18-25.
- Young, M.K., Kyoung, M.H. & Young, H.K. 2010. Mechanism of the delayed growth of intermetallic compound at the interface between Sn-4.0Ag-0.5Cu and Cu-Zn substrate. *Electronic Materials Letters* 6(4): 151-154.
- Norliza Ismail, Azman Jalar*, Maria Abu Bakar & Roslina Ismail
Institute of Microengineering and Nanoelectronic (IMEN)
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan
Malaysia
- Roslina Ismail
Division of Fine Arts, Cultural Centre
University of Malaya (UM)
50603 Kuala Lumpur, Wilayah Persekutuan
Malaysia

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

Diserahkan: 15 September 2017

Diterima: 8 Mac 2018