

Kesan Kemasan Permukaan Berbeza terhadap Sifat Mikromekanik Sambungan Pateri Sac 0307 Menggunakan Pendekatan Pelekukan Nano

(Effect of Different Surface Finishes on Micromechanical Properties of Sac 0307 Solder Joint using Nanoindentation Approach)

MARIA ABU BAKAR, AZMAN JALAR* & ROSLINA ISMAIL

ABSTRAK

Sifat fizik dan mekanik sambungan pateri pada papan litar bercetak (PCB) sangat bergantung kepada bahan pateri dan permukaan penglogaman PCB. Kemajuan penyelidikan dan pembangunan bahan pateri bebas plumbum membuka peluang untuk menghasilkan sambungan pateri yang mempunyai kebolehtahanan yang tinggi. PCB/Cu merupakan PCB tanpa kemasan digunakan sebagai sampel kawalan manakala dua PCB yang lain iaitu PCB/ImSn (immersion tin) dan PCB/ENiG (electroless nickel immersion gold) dipilih untuk mengkaji kestabilan sambungan pateri. Sambungan pateri pada kemasan permukaan yang berbeza didedahkan kepada penyimpanan suhu tinggi (HTS) pada suhu 175°C selama 1000 jam untuk mengkaji perubahan sifat mikromekanik. Ujian pelekukan nano memberikan sifat mikromekanik yang bersifat setempat. Perubahan kekerasan antarasambungan SAC 0307 selepas HTS ialah 66 MPa bagi PCB/Cu, 107 MPa bagi PCB/ImSn dan 45 MPa bagi PCB/ENiG. Analisis terhadap sifat mikromekanik mendapati bahawa PCB/ENiG menunjukkan perubahan nilai yang minimum berbanding dengan PCB/Cu dan PCB/ImSn. Ini menunjukkan PCB/ENiG memberikan kestabilan sifat mikromekanik yang tinggi selepas didedahkan pada HTS pada suhu 175°C selama 1000 jam.

Kata kunci: Bahan pateri Sn-Ag-Cu; kemasan permukaan; pelekukan nano; sambungan pateri; sifat mikromekanik

ABSTRACT

Physical and mechanical properties of solder joints on printed circuit boards (PCB) depend on the solder materials and PCB surface metallization. Advances in research and development of lead-free solder materials provide an opportunity to produce solder joint with high reliability. PCB/Cu is a PCB without surface finish used as control sample while the other two, PCB/ImSn (immersion tin) and PCB/ENiG (electroless nickel immersion gold) have been chosen in order to study the solder joint stability. Solder joints on different surface finishes are exposed to high temperature storage (HTS) at 175°C for 1000 h in order to investigate the micromechanical properties changes. Nanoindentation test provides localized micromechanical properties. The hardness changes of SAC 0307 solder joint after HTS is 66 MPa for PCB/Cu, 107 MPa for PCB/ImSn and 45 MPa for PCB/ENiG. PCB/ENiG has shown the minimum changes of micromechanical properties compared to PCB/Cu and PCB/ImSn. The show that PCB/ENiG provides the high stability of micromechanical properties after subjected to HTS at 175°C for 1000 h.

Keywords: Material Sn-Ag-Cu; micromechanical properties; nanoindentation; solder; solder joint surface finishes

PENGENALAN

Papan litar bercetak (PCB) dengan kemasan permukaan yang berbeza telah digunakan dalam industri elektronik dan pematerian merupakan salah satu teknologi sambungan yang diguna pakai. Adalah diketahui bahawa dalam soal pematerian, interaksi pateri-substrat adalah bergantung kepada komposisi pateri dan jenis substrat logam. Cu digunakan dengan meluas sebagai pad logam yang menghubungkan komponen elektronik pada papan litar bercetak (PCB) dan juga dalam alat-alat semikonduktor yang lain (Zhang et al. 2012). Walaupun sambungan pateri pada PCB bergantung kepada logam Cu sebagai logam penglogaman PCB, namun secara praktis dalam industri, PCB dikenakan rawatan permukaan yang dikenali sebagai kemasan permukaan. Ini adalah kerana

kemasan permukaan mempunyai hubung kait dengan pematerian dan penting dalam meningkatkan sifat tindak balas serta kebolehbasahan antara pateri-substrat. Seiring dengan penggunaan bahan bebas Pb, maka bahan untuk kemasan permukaan juga seharusnya bebas Pb agar dapat menghasilkan sambungan pateri yang baik dengan bahan pateri bebas Pb. Antara kemasan permukaan yang biasa digunakan pada bahan penglogaman Cu ialah ImSn, ENiG, NiAu, OSP, ENEPIG dan ImAg (Ding et al. 2015; Kotadia et al. 2014; Liu et al. 2016; Myung et al. 2016). Kebanyakan kemasan permukaan berfungsi untuk mengelakkan resapan Cu ke dalam pateri bagi mengurangkan pertumbuhan sebatian antara logam (IMC) berlebihan yang boleh menyebabkan kerapuhan antarsambungan pateri. Kajian lepas melaporkan kemasan permukaan NiAu telah

membentuk IMC (Ni, Cu)₃Sn₄ seterusnya mengubah kelakuan mekanik sambungan pateri. Kemasan Au dan OSP pula digunakan untuk melindungi permukaan pad daripada teroksida dan meningkatkan kebolehbasahan (Goncalves et al. 2015). Maka kemasan permukaan didapati memainkan peranan yang penting dalam tindak balas antaramuka sambungan dan mempengaruhi mikrostruktur berhampiran pateri-substrat (Chavali et al. 2013).

Kelakuan mekanik sambungan pateri merupakan perkara yang penting dalam isu keboleharapan sesuatu pakej atau produk elektronik. Sambungan pateri terdiri daripada aloi pateri, substrat dan IMC. Lapisan antara aloi pateri-substrat dan dua antaramuka iaitu antaramuka pateri-IMC dan IMC-substrat. Kelakuan mekanik sambungan pateri adalah berkait rapat dengan kelakuan mekanik unsur tersebut. Apabila sambungan pateri didedahkan pada uji kaji seperti penuaan, mikrostruktur aloi pateri berubah dan menyebabkan perubahan dalam sifat mekanik sambungan pateri (An & Qin 2014).

Maka adalah perlu untuk menilai kualiti sambungan pateri penglogaman Cu dengan kemasan permukaan yang berbeza. Dalam kajian ini, PCB/Cu merupakan PCB tanpa kemasan permukaan yang digunakan sebagai kawalan manakala dua jenis PCB yang lain iaitu PCB dengan kemasan permukaan ImSn (*immersion tin*), PCB/ImSn dan kemasan permukaan ENiG (*electroless nickel immersion gold*), PCB/ENiG digunakan untuk melihat kestabilan sambungan pateri SAC 0307. Kaedah pelekukan nano pula dipilih disebabkan oleh kemampuan peralatan dan kaedah yang boleh memberikan sifat mikromekanik dan bersifat setempat (Pharr 2015) berbanding kaedah konvensional seperti mikrokekerasan (Vickers) (Santos et al. 2015). Giuranno et al. (2016) telah mengkaji sifat mekanik aloi pateri SAC menggunakan kaedah Vickers dengan membuat pelekukan pada kawasan pateri dan kawasan substrat. Walau bagaimanapun, kaedah konvensional ini hanya dapat memberikan sifat mekanik secara pukal. Sifat mikromekanik yang dikaji melalui kaedah pelekukan nano ialah kekerasan, modulus terkurang, kerja plastik dan kerja elastik. Objektif kajian ini adalah untuk mengkaji kesan kemasan permukaan yang berbeza (PCB/Cu, PCB/ImSn, PCB/ENiG) ke atas sifat mikromekanik sambungan aloi pateri SAC 0307 selepas didedahkan pada penyimpanan suhu tinggi (HTS) pada suhu 175°C selama 1000 jam menggunakan pendekatan pelekukan nano.

BAHAN DAN KAEDAH

Pes aloi pateri SAC 0307 dengan komposisi 99% Sn, 0.3% Ag dan 0.7% Cu. PCB/Cu merupakan PCB tanpa kemasan yang digunakan sebagai sampel kawalan. Dua jenis kemasan permukaan dikaji iaitu PCB/ImSn (*immersion tin*) dan PCB/ENiG (*electroless nickel immersion gold*). Pes pateri didepositkan pada PCB melalui proses percetakan *stencil* dan dipaterikan secara aliran semula (*reflow soldering*). Bahan pes pateri SAC 0307 yang digunakan asalnya merupakan aloi Sn-0.3Ag-0.7Cu yang berbentuk

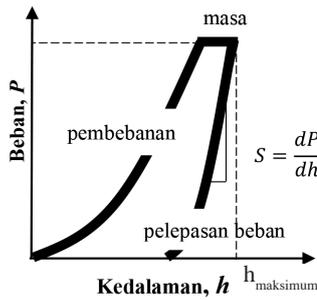
partikel bersaiz 20-38 µm, dicampurkan dengan bahan fluks membentuk pes. Kemudian pes ini mengalami proses percetakan *stencil* dan kemudian dialirkan semula (225°C selama 10 min) menghasilkan sambungan pateri dalam bentuk pepejal yang homogen secara setempat. Setelah dipateri, sampel didedahkan kepada penyimpanan suhu tinggi (HTS) pada suhu 175°C selama 1000 jam mengikut piawai JEDEC (JESD22-A103C). Selesai HTS, keratan rentas sampel dihasilkan melalui teknik metalografi bagi pencirian mikromekanik. Sampel selepas HTS dipotong dan dicagak menggunakan serbuk resin pengeras (*VersoCit-2 Powder*, Struers) dan cecair resin epoksi (*VersoCit-2 liquid*, Struers) dengan nisbah berat 3:2. Kedua jenis bahan ini digaul perlahan-lahan selama 30 s untuk percampuran yang homogen, dituang ke dalam bekas acuan dan dibiarkan mengeras pada suhu bilik selama empat jam. Seterusnya, proses lelasan dijalankan menggunakan kertas las SiC (Buehler) dari gred kasar kepada gred halus (400, 600, 800, 1200, 2000 grit) (Yahaya et al. 2016). Proses penggilapan pula menggunakan semburan berlian bersaiz 1 µm bagi mendapatkan permukaan sampel yang bebas daripada kesan calar.

Alat pelekukan nano (Micro Materials, NanoTest™) digunakan untuk mendapatkan sifat mikromekanik (kekerasan, modulus terkurang, kerja plastik dan kerja elastik) sambungan pateri pada kemasan permukaan berbeza. Jenis eksperimen pelekukan nano ialah histeresis beban melawan kedalaman. Beban maksimum yang dikenakan ke atas sampel ialah sebanyak 10 mN (Bakar et al. 2016; Yusoff et al. 2014; Zulkifli et al. 2013). Beban awal yang dikenakan ialah 0.001 mN yang bersesuaian untuk bahan aloi pateri yang bersifat lembut. Kadar pembebanan dan pelepasan beban yang sama digunakan iaitu 0.5 mN/s. Masa inap yang dikenakan ialah selama 30 s. Ujian pelekukan nano merekodkan lengkung pembebanan dan pelepasan beban semasa ujian dijalankan dengan beban pelekukan, P diplotkan melawan kedalaman pelekukan, h . Skematik lengkung beban-kedalaman ditunjukkan seperti dalam Rajah 1. Analisis mikromekanik selepas ujian pelekukan nano melibatkan kekerasan dan modulus terkurang diperoleh daripada data beban dan kedalaman berdasarkan kaedah Oliver dan Pharr.

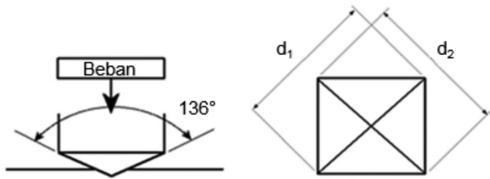
KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Untuk mendapatkan sifat kekerasan permukaan menggunakan ujian pelekukan (Vickers), pengiraan saiz atau dimensi merupakan faktor penting melibatkan luas sentuhan selepas pelekukan dengan beban tertentu (Rajah 2). Berdasarkan persamaan ini, ujian Vickers mengambil kira bentuk lekuk piramid berlian (panjang pepenjuru) yang diperoleh bagi pengiraan nilai kekerasan. HV ialah kekerasan Vickers; F ialah beban ujikaji (kgf); S ialah luas permukaan lekukan (mm²); d ialah purata jarak pepenjuru (mm); dan θ ialah sudut pepenjuru pelekuk Vickers (136°).

$$HV = \frac{F}{S} \quad (1)$$



RAJAH 1. Skematik lengkung beban, P melawan kedalaman, h semasa ujian pelekukan nano



RAJAH 2. Illustrasi ujian Vickers

$$HV = \frac{2F \sin \frac{\theta}{2}}{d^2} \quad (2)$$

$$HV = \frac{2F \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \quad (3)$$

$$HV = 1.8544 \frac{F}{d^2} \quad (4)$$

Walau bagaimanapun, pendekatan pelekukan nano, pengiraan kekerasan tidak berdasarkan bentuk lekukan (Rajah 3). Pada beban maksimum $h = h_{maksimum}$, ke dalam antara pelekuk dan sampel adalah seperti berikut:

$$h_c = h_{maksimum} - h_s \quad (5)$$

yang mana ialah kedalaman sentuhan dan h_s ialah anjakan daripada permukaan asal kepada perimenter sentuhan. Kedalaman sentuhan, h_c dapat ditentukan melalui persamaan berikut:

$$h_c = h_{maksimum} - \epsilon \frac{P_{maksimum}}{S} \quad (6)$$

dengan $P_{maksimum}$ ialah beban maksimum yang dikenakan ke atas sampel manakala ϵ pula ialah pemalar yang bergantung pada geometri pelekuk. Bagi pelekuk Berkovich, nilai ϵ ialah 0.75. Maka luas sentuhan, A_c pada beban maksimum ditentukan menggunakan geometri pelekuk, F dan kedalaman sentuhan, h_c seperti berikut (Useinov et al. 2015):

$$A_c = F(h_c) \quad (7)$$

Dengan itu, kekerasan, H dikira sebagai:

$$H = \frac{P_{maksimum}}{A} \quad (8)$$

Modulus terkurang, E_r ditentukan seperti berikut:

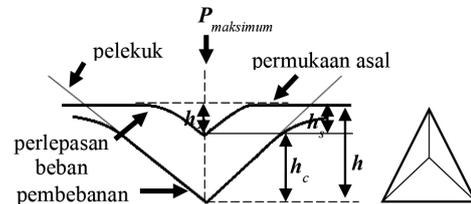
$$E_r = \frac{S\sqrt{\pi}}{\sqrt{A_c}} \quad (9)$$

dengan S ialah kekakuan sentuhan yang sepadan dengan lengkung pelepasan beban (Rajah 3). E_r juga bersamaan dengan:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{(1-\nu_s^2)}{E_s} + \frac{(1-\nu_i^2)}{E_i} \quad (10)$$

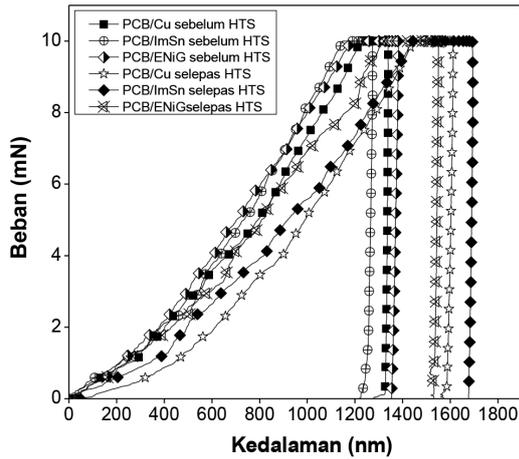
dengan E_s dan ν_s adalah modulus Young dan Nisbah Poisson bagi sampel dan E_i dan ν_i adalah modulus Young dan Nisbah Poisson bagi pelekuk. Untuk pelekuk Berkovich yang diguna pakai dalam kajian ini, nilai E_i ialah 0.07 dan ν_i ialah 1141 GPa (Ju et al. 2007).

Rajah 4 menunjukkan profil melawan kedalaman bagi sambungan pateri SAC 0307 pada PCB dengan kemas permukaan berbeza sebelum dan selepas HTS selama 1000 jam. Plot ini menunjukkan profil

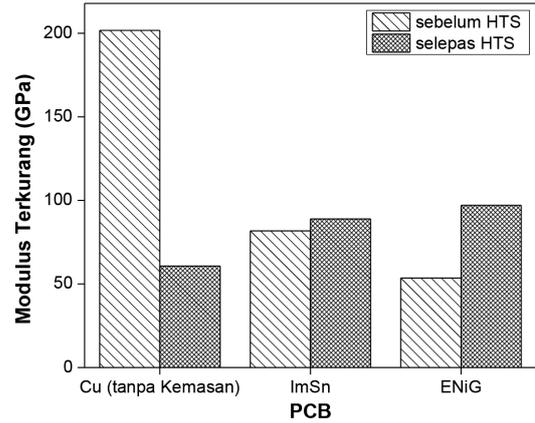


RAJAH 3. Illustrasi skematik proses pembebanan dan pelepasan beban semasa ujian pelekukan nano

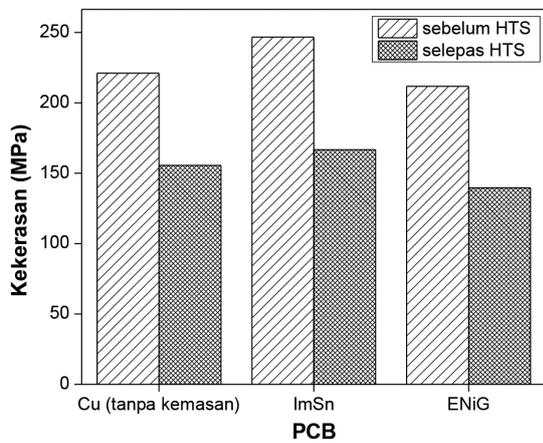
tipikal bagi sampel yang homogen secara setempat. Ini ditunjukkan oleh profil (pembebanan) berbentuk tanpa gangguan. Bentuk profil ini juga menunjukkan kerja plastik dan elastik yang tipikal. Nilai kekerasan bagi sampel yang sama telah menurun dengan HTS iaitu dari 221 MPa kepada 156 MPa bagi PCB/Cu, 247 MPa kepada 167 MPa bagi PCB/ImSn dan 212 MPa kepada 137 MPa bagi PCB/ENiG (Rajah 5). Ini selaras dengan teori kekerasan bahan logam menurun akibat rawatan haba yang sering dirujuk sebagai pelembutan. Pang dan Xiong (2005) juga telah melaporkan kekuatan mekanik 95.5Sn-3.8Ag-0.7Cu telah menurun dengan peningkatan suhu. Walau bagaimanapun, PCB kemas permukaan ENiG (PCB/ENiG) menunjukkan nilai kekerasan paling rendah berbanding PCB/ImSn dan PCB/Cu tanpa kemas permukaan. Pemilihan kemas permukaan adalah sangat mempengaruhi aplikasi pakej elektronik. Nilai kekerasan sahaja tidak mencukupi untuk dipertimbangkan



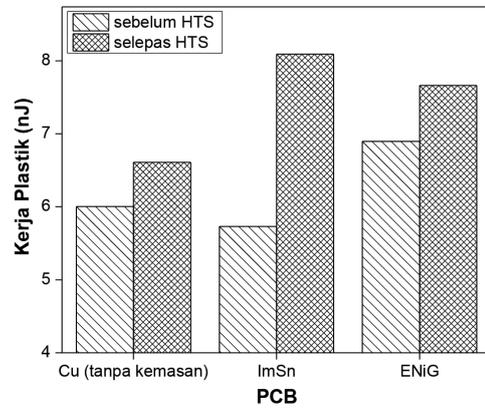
RAJAH 4. Plot beban melawan kedalaman bagi sambungan pateri SAC 0307 sebelum dan selepas HTS



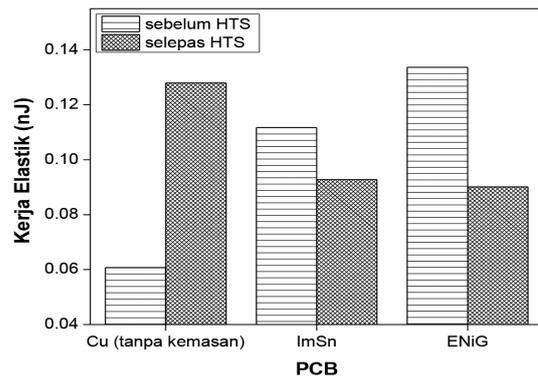
RAJAH 6. Modulus terkurang bagi sambungan pateri SAC 0307 sebelum dan selepas HTS



RAJAH 5. Kekerasan bagi sambungan pateri SAC 0307 sebelum dan selepas HTS



RAJAH 7. Kerja plastik bagi sambungan pateri SAC 0307 sebelum dan selepas HTS

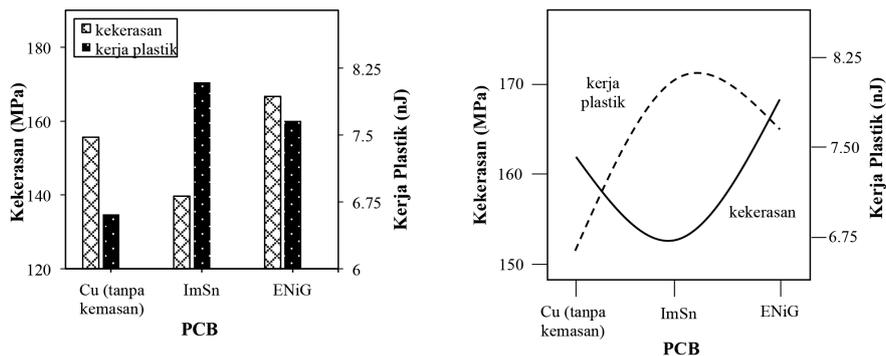


RAJAH 8. Kerja elastik bagi sambungan pateri SAC 0307 sebelum dan selepas HTS

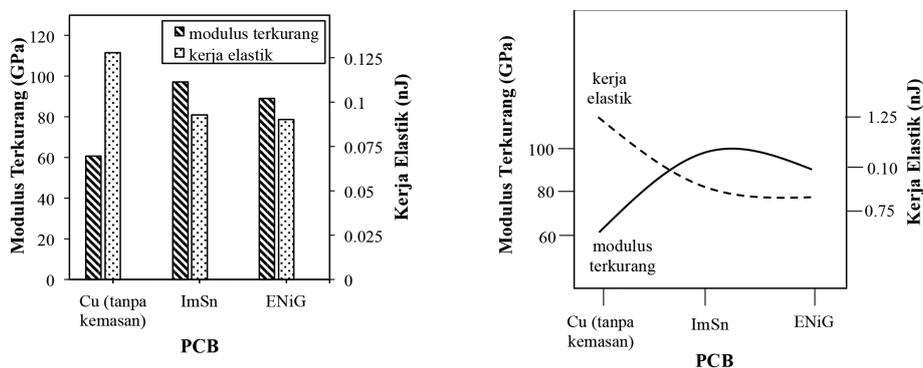
bagi menggambarkan sifat mekanik sambungan pateri. Modulus terkurang (Rajah 6) bagi PCB/ENiG adalah lebih tinggi berbanding dengan PCB/ImSn setelah dikenakan HTS selama 1000 jam. Keputusan ini membolehkan maklumat terperinci berkaitan dengan kerja plastik dan kerja elastik yang dialami oleh sampel seperti dalam Rajah 7-10 diperoleh.

Keboleharapan sesuatu sambungan ditunjukkan dengan kestabilan mikrostruktur dan sifat mekanik sebelum kegagalan. Keboleharapan dalam pakej elektronik (sambungan/antarasambungan/substrat) biasanya dirujuk berdasarkan piawaian JEDEC (JESD22-A103C). Kestabilan sifat mikromekanik antarasambungan bahan pateri/substrat (dalam kajian ini ialah substrat Cu) dengan kemasan permukaan berbeza ditunjukkan dalam Rajah 9 dan 10. Perbandingan nilai kerja plastik dan kekerasan bagi PCB/ImSn adalah lebih besar berbanding dengan PCB/ENiG. Ini memberi kefahaman bahawa PCB/ENiG memberi kestabilan yang lebih tinggi akibat tindakan terma (175°C) dan masa (1000 jam). Sifat mikromekanik bagi sambungan pateri PCB/ImSn

berbanding PCB/Cu (tanpa kemasan) adalah tidak stabil dengan jurang nilai kekerasan dan kerja plastik yang besar. Penemuan ini adalah selari dengan keputusan kajian, yang menunjukkan pertumbuhan sebatian antara logam (IMC) dengan penggunaan kemasan permukaan ENiG (PCB/ENiG) (Rajah 11) telah menghasilkan



RAJAH 9. (a) Nilai kekerasan dan kerja plastik bagi sambungan pateri SAC 0307 pada kemasan berbeza selepas HTS dan (b) skematik perkadaran kekerasan dengan kerja plastik akibat faktor kemasan permukaan

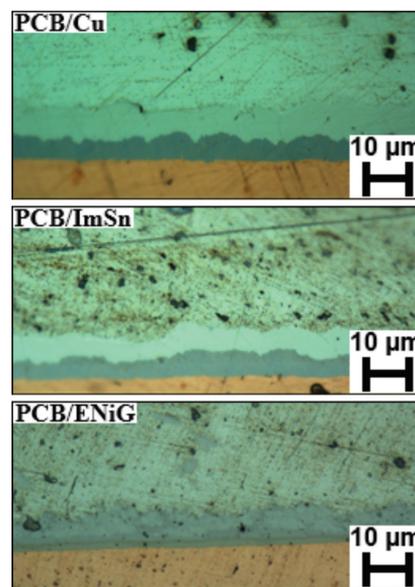


RAJAH 10. (a) Nilai modulus terkurang dan kerja elastik bagi sambungan pateri SAC 0307 pada kemasan berbeza selepas HTS dan (b) skematik perkadaran modulus terkurang dengan kerja elastik akibat faktor kemasan permukaan

pertumbuhan IMC yang paling nipis iaitu sebanyak 11 μm berbanding 14 μm pada PCB/ImSn dan 19 μm pada PCB/Cu (tanpa kemasan). Ini juga adalah selaras dengan kajian Choubey et al. (2008) yang menunjukkan ketebalan IMC selepas HTS bagi kemasan permukaan ENiG adalah lebih nipis berbanding dengan kemasan permukaan ImSn, ImAg dan OSP. Ini juga bererti kurang berlaku pertumbuhan IMC pada kemasan ENiG, menyebabkan mikrostruktur matriks bahan pateri kurang mengalami perubahan mikrostruktur atau atom-atom Sn dan Cu dalam bahan pateri kurang meresap untuk bertindak balas dengan substrat Cu untuk pertumbuhan IMC. Hal ini adalah selaras dengan modulus terkurang dan kerja elastik seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 10. Kemasan ENiG (PCB/ENiG) adalah lebih stabil selepas HTS dengan jurang perbezaan kerja elastik dan modulus terkurang yang paling kecil berbanding kemasan yang lain.

KESIMPULAN

Pendekatan kaedah pelekukan nano dapat memberikan sifat mikromekanik yang komprehensif seperti mikrokekerasan, modulus terkurang, kerja plastik dan kerja elastik yang sangat penting sebagai pencirian terutamanya dalam menilai keboleharapan sesuatu sambungan pateri pakej elektronik. Kestabilan sifat mikromekanik ditunjukkan oleh hubungan kekerasan dan kerja plastik serta modulus



RAJAH 11. Mikrostruktur sebatian antara logam (IMC) pada PCB/Cu, PCB/ImSn dan PCB/ENiG

terkurang dengan kerja elastik. Kemasan permukaan ENiG (PCB/ENiG) menunjukkan kestabilan sifat mikromekanik selepas ujikaji HTS yang lebih tinggi berbanding dengan PCB/ImSn dan PCB/Cu.

PENGHARGAAN

Penulis merakamkan penghargaan kepada pihak RedRing Solder (M) Sdn. Bhd. atas kolaborasi projek ini serta sumbangan bahan penyelidikan dan Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) di atas geran penyelidikan DIP-2014-012.

RUJUKAN

- An, T. & Qin, F. 2014. Effects of the intermetallic compound microstructure on the tensile behavior of Sn_{3.0}Ag_{0.5}Cu/Cu solder joint under various strain rates. *Microelectronics Reliability* 54: 932-938.
- Bakar, M.A., Jalar, A., Daud, A.R., Ismail, R., Lah, N.C.A. & Ibrahim, N.S. 2016. Nanoindentation approach on investigating micromechanical properties of joining from green solder materials. *Sains Malaysiana* 45(8): 1275-1279.
- Chavali, S., Singh, Y., Subbarayan, G., Bansal, A. & Ahmad, M. 2013. Effect of pad surface finish and reflow cooling rate on the microstructure and the mechanical behavior of SnAgCu solder alloys. *Microelectronics Reliability* 53: 892-898.
- Choubey, A., Yu, H., Osterman, M., Pecht, M., Yun, F., Hong, L.Y. & Ming, X. 2008. Intermetallics characterization of lead-free solder joints under isothermal aging. *Journal of Electronic Materials* 37(8): 1130-1138.
- Ding, K.K., Li, X.G., Xiao, K., Dong, C.F., Zhang, K. & Zhao, R.T. 2015. Electrochemical migration behavior and mechanism of PCB-ImAg and PCB-HASL under adsorbed thin liquid films. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 25: 2446-2457.
- Giuranno, D., Delsante, S., Borzone, G. & Novakovic, R. 2016. Effects of Sb addition on the properties of Sn-Ag-Cu/(Cu, Ni) solder systems. *Journal of Alloys and Compounds* 689: 913-930.
- Goncalves, C., Leitao, H., Lau, C.S., Teixeira, J.C., Ribas, L., Teixeira, S., Cerqueira, M.F., Macedo, F. & Soares, D. 2015. Wetting behaviour of SAC305 solder on different substrates in high vacuum and inert atmosphere. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 26(7): 5106-5112.
- JEDEC Standard JESD22-A103C. 2009. *High Temperature Storage Life*. USA: JEDEC Solid State Technology Association.
- Ju, S.P., Wang, C.T., Chien, C.H., Huang, J.C. & Jian, S.R. 2007. The nanoindentation responses of nickel surfaces with different crystal orientations. *Molecular Simulation* 33(11): 905-917.
- Kotadia, H.R., Howes, P.D. & Mannan, S.H. 2014. A review: On the development of low melting temperature Pb-free solders. *Microelectronics Reliability* 54(6-7): 1253-1273.
- Liu, B., Tian, Y., Liu, W., Wu, W.W. & Wang, C. 2016. TEM observation of interfacial compounds of SnAgCu/ENIG solder bump after laser soldering and subsequent hot air reflows. *Materials Letters* 163: 254-257.
- Myung, W.R., Kim, Y., Kim, K.Y. & Jung, S.B. 2016. Drop reliability of epoxy-contained Sn-58 wt.% Bi solder joint with ENIG and ENEPIG surface finish under temperature and humidity test. *Journal of Electronic Materials* 45(7): 3651-3658.
- Pang, J.H.L. & Xiong, B.S. 2005. Mechanical properties for 95.5Sn-3.8Ag-0.7Cu lead-free solder alloy. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* 28(4): 830-840.
- Pharr, G.M. 2015. Recent advances in small-scale mechanical property measurement by nanoindentation. *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 19: 315-316.
- Santos, W.L.R., Brito, C., Bertelli, F., Spimelli, J.E. & Garcia, A. 2015. Microstructural development of hypoeutectic Zn-(10-40) wt% Sn solder alloys and impacts of interphase spacing and macrosegregation pattern on hardness. *Journal of Alloys and Compounds* 647: 989-996.
- Useinov, A.S., Kravchuk, K.S., Rusakov, A.A., Krasnogorov, I.V., Kuznetsov, A.P. & Kazieva, T.V. 2015. Indenter shape characterization for the nanoindentation measurement of nanostructured and other types of materials. *Physics Procedia* 72: 194-198.
- Yahaya, M.Z., Ani, F.C., Samsudin, Z., Sahin, S., Abdullah, M.Z. & Mohamad, A.A. 2016. Hardness profiles of Sn-3.0Ag-0.5Cu-TiO₂ composite solder by nanoindentation. *Materials Science & Engineering A* 669: 178-186.
- Yusoff, W.Y.W., Ismail, R., Jalar, A., Othman, N.K. & Rahman, I.A. 2014. Microstructural evolution and micromechanical properties of gamma-irradiated Au ball bonds. *Materials Characterization* 93: 129-135.
- Zhang, L., Xuea, S.B., Zeng, G., Gao, L.L. & Ye, H. 2012. Interface reaction between SnAgCu/SnAgCuCe solders and Cu substrate subjected to thermal cycling and isothermal aging. *Journal of Alloys and Compounds* 510: 38-45.
- Zulkifli, M.N., Jalar, A., Abdullah, S., Rahman, I.A. & Hamid, M.A.A. 2013. Strength distribution of Au ball bond using nanoindentation approach. *Materials Science and Engineering A* 577: 189-196.

Maria Abu Bakar, Azman Jalar* & Roslina Ismail
Institute of Microengineering and Nanoelectronics
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan
Malaysia

Azman Jalar*
School of Applied Physics
Faculty of Science and Technology
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan
Malaysia

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

Diserahkan: 15 Ogos 2017
Diterima: 30 Disember 2017