

Igor Vehec

Katedra technológií v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach

Termomechanické namáhanie kontaktovaných spojov vplyvom cyklického prúdového zaťažovania

Abstrakt. Článok sa zaoberá simuláciou termomechanického namáhania kontaktovaných mikrodrôtov s priemerom 25 μm na štandardnom DPS substráte na báze FR4 vplyvom cyklického prúdového namáhania. Počas jednej periódy dochádza k ohrevu (vplyvom Joulového stratového tepla) a následne chladnutiu materiálu mikrodrôtička, čo vedie k jeho deformácii. Takáto cyklická deformácia iniciuje degradáciu spoja a v konečnom dôsledku vedie k jeho zlyhaniu a prerušeniu. Článok sa zameriava na degradáciu kontaktovaného spoja vo vrchole slučky.

Kľúčové slová: kontaktované spoje, mikrodrôty, simulácia, stratové teplo, mechanické namáhanie.

Abstract. The paper deals with simulation of thermo-mechanical stress in wire-bonded microwires with diameter of 25 μm on standard PCB substrate based on FR4. The microwires are stressed by cyclic current. The heating (due the Joule's heat loss) and cooling of microwire materials occurs during one period. This leads to cyclic deformation which initiate degradation of wirebond and consequently leads to failure of microwire. The contribution is focused on wirebonds degradation in the top of loop.

(Thermo-mechanical stress of wirebonds due to cyclic current stress)

Keywords: wire bonding, microwires, simulation, Joule heat loss, mechanical stress.

Úvod

Kontaktovanie pomocou drôtičkov z rôznych materiálov (na báze Cu, Al, Au alebo Ag) patrí stále medzi dominantné metódy prepájania čipov ako v silnoprádovej, tak aj v slaboprádovej elektronike. Pre výkonové aplikácie sa typicky používajú kontaktačné drôty s priemerom 100 až 500 μm , mikrodrôty s priemerom pod 100 μm sú typické pre kontaktovanie čipov v jemnej elektronike.

Počas doby života je kontaktovaný spoj vystavený ako vonkajšiemu prostrediu, tak aj namáhaniu iniciovanému činnosťou zariadenia. Typickým príkladom je vznik stratového tepla, ktoré urýchľuje vznik intermetalických zlúčenín na rozhraní materiálu mikrodrôtička a podložky. Pri dosiahnutí vyšších prúdových hustôt môže dochádzať k ďalším javom, akými je napr. elektromigrácia. Jedným z obmedzení s ktorým je potrebné pri prevádzkovaní počítať je maximálny prúd, pri ktorom dôjde k pretaveniu vodiča, ale aj v prípade ak sa nedosiahne tavný prúd, krátkodobé prúdové pulzy môžu spôsobovať množstvo problémov vedúcich k mechanickému namáhaniu spoja, vplyvom teplotnej rozťažnosti či už na rozhraní dvoch rôznych materiálov alebo samotného materiálov drôtička.

Tepelno-elektrické analýze mikrodrôtov bolo venovaných niekoľko štúdií. Veľká skupina článkov je zameraná hlavne na tavný prúd, a max. prúdy, pri ktorých dôjde k pretaveniu mikrodrôtov či už v plynnom prostredí, alebo v tuhom prostredí ako to je napr. v prípade zapuzdrených čipov. Analýza teplotných pomerov pre tenké mikrodrôty na báze platiny v plynnom a v kvapalnom prostredí bola realizovaná napr. pre platinový drôt s priemerom 25,4 μm v prostredí kvapalného dusíka [1], alebo novšie pre mikrodrôty na báze medi s priemerom od 39,9 μm v prostredí vody a vzduchu [2]. Tieto štúdie naznačujú, že v prípade tenkých vodičov umiestnených v plynnom prostredí je prenos tepla mierne odlišný ako v prípade vodičov s priemerom nad cca 100 μm . Zväčša ide o štúdie a fyzikálne modely, resp. FEM modely. Reálne meranie teploty kontaktačných drôtov (a teda aj validácia modelov) je z dôvodu ich malého priemeru často problematické, nakoľko rozlíšenie obrazových bodov IR CCD kamier je zvyčajne väčšie ako rozmery použitých mikrodrôtov. Alternatívnou metódou merania je meranie pomocou optického vláknového senzora využívajúceho FBG (Fiber Bragg Grating) odraz, ktorou bola meraná teplota

mikrodrôtov s priemerom od 100 μm pri rôznych zaťažovacích prúdoch [4].

Neposledným faktorom, ktorý vplyva na životnosť a spoľahlivosť kontaktovaných drôtov je únavová životnosť, ktorá môže nastať vplyvom periodického napájania pulzným prúdom, keď dochádza k mechanickému namáhaniu mikrodrôtu vplyvom teplotnej rozťažnosti materiálu počas ohrevu a chladnutia drôtu v priebehu jednej periódy [5] [6] [7]. V [3] je napr. realizovaná analýza zapuzdrených mikrodrôtov s priemerom 33 μm , ktoré boli napájané pulzným prúdom, no vo väčšine prípadov je tento jav sledovaný prevažne na kontaktovaných spojoch výkonových moduloch, nakoľko sa počas prevádzky uplatňuje výraznejšie, pričom samozrejme nie sú ovplyvnené len samotné kontaktačné spoje ale všetky komponenty výkonového modulu. Pre sledovanie a predikovanie životnosti modulov boli vyvinuté testovacie metódy akou je napr. APC (Active Power Cycling) pri ktorej je počas každého cyklu monitorovaná teplota a elektrické dáta [8].

Teoretický rozbor

Generovanie tepla vo vodiči vplyvom stratového Joulového tepla ($\sim I^2 R$) súvisí s elektrickým odporom vodiča, ktorý je závislý od teploty. Za predpokladu, že v rovnovážnom stave platí rovnosť medzi energiou generovanou prechodom prúdu ($Q_{in} = I^2 R$) a tepelnou energiou uloženou vo vodiči (Q_{stored}) a ktorá uniká z vodiča (Q_{out}) je možné vytvoriť zjednodušený model, ktorý vyjadruje teplotné pomery pre prípad vodiča pretekanom prúdom [9]:

$$(1) \quad Q_{in} = Q_{stored} + Q_{out}$$

$$(2) \quad I^2 \frac{l}{\sigma A} [1 + \alpha \Delta T] = \rho c_T A l \frac{dT}{dt} + \pi D l h_c \Delta T$$

kde I je elektrický prúd, ktorý prechádza vodičom, l je dĺžka vodiča, σ je jeho elektrická konduktivita pri referenčnej teplote, A je prierez vodiča, α je teplotný súčiniteľ odporu materiálu vodiča, ΔT je rozdiel teplôt, ρ je objemová hustota, c_T je tepelná kapacita vodiča, D je priemer vodiča a h_c koeficient prestupu tepla spôsobený konvekciou.

Presnejšie fyzikálne modely berú okrem teplotnej závislosti konduktivity do úvahy aj teplotné závislosti ďalších vlastností materiálu, napr. tepelná vodivosť materiálu je taktiež závislá od teploty. Obe tieto závislosti môžu

v konečnom dôsledku viesť k „samozosilneniu“ a zvýšeniu teploty pri zaťažovaní konštantným prúdom. Neposledným faktorom, ktorý vplyva na výsledné pomery je aj zmena dĺžky a priemeru mikrodrôtov vplyvom teplotnej rozťažnosti [3].

Treba poznamenať, že prirodzená konvekcia tepla z povrchu mikrodrôtov s priemerom pod 100 μm vykazuje v prostredí plynu niektoré odlišnosti od drôtov s väčšími rozmermi. Experimenty ukazujú, že koeficient prestupu tepla mikrodrôtov nachádzajúcich sa v prostredí vzduchu vo valcovej horizontálne umiestnenej nádobe sa so znižovaním priemeru vodiča zväčšuje, zatiaľ čo Nusseltovo číslo je nižšie oproti štandardným numerickým predpovediam, čo je spôsobené zmenšovaním hraničnej vrstvy pre prirodzenú konvekciu v okolí povrchu vodiča so znižujúcim sa priemerom vodiča. Pomer hrúbky hraničnej vrstvy k priemeru mikrodrôtu sa ale so znižovaním priemeru mikrodrôtu zvyšuje, čoho dôsledkom narastá podiel šírenia tepla vedením oproti konvekcií. Tepelné správanie sa mikrodrôtov v kvapalinách je do istej miery podobné ako v plynach, líši sa však pre tuhé prostredie, ako to je to napr. v prípadoch zapuzdrených čipov a mikrodrôtov [2] [10] [11].

Koeficient prestupu tepla je možné nepriamo určiť z Nusseltovho čísla (Nu), ktoré udáva pomer prenosu tepla spôsobeného konvekciou k prenosu tepla spôsobeného kondukciami. Vzťah medzi Nusseltovým číslom (Nu) a koeficientom prestupu tepla (h_c) spôsobeným konvekciou v prípade valcového povrchu je [12] [13]:

$$(3) \quad Nu = \frac{h_c D}{k}$$

kde D je priemer valca a k je tepelná vodivosť kvapaliny, resp. plynu (pre vzduch $24,35 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) v ktorom sa valec nachádza.

Pre určenie Nusseltovho čísla, v prípade mikrodrôtov s priemerom 30 až 120 μm umiestnených vo vzduchu za podmienok prirodzenej konvekcie je podľa [2] možné použiť približný vzťah:

$$(4) \quad Nu = 1,03(Gr \cdot Pr)^{0,035}$$

kde Gr je Grashofovo číslo a Pr je Prandtlovo číslo (pre plyny 0,7 až 1,0 a pre vzduch 0,71). Uvedený vzťah platí za predpokladu, že $0,0001 < Gr < 2,5$ [2], pričom Grashofovo číslo je možné určiť ako [5]:

$$(5) \quad Gr = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu^2}$$

kde g je gravitačné zrýchlenie ($g = 9,807 \text{ ms}^{-2}$), β je koeficient teplotnej rozťažnosti (pre ideálne plyny približne $1/T$, kde T je termodynamická teplota), ΔT je rozdiel teplôt, ν je kinematická viskozita (pre vzduch pri teplote 20°C je $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$) a L je charakteristická dĺžka.

Vplyvom stratového tepla (resp. tepla uloženého vo vodiči – Q_{stored}) a teplotnej rozťažnosti materiálu vodiča dochádza taktiež k zmene rozmerov vodiča a teda k jeho mechanickej deformácii. Pri riešení tohto problému je potrebné použiť termomechanickú analýzu, ktorá je založená na simultánnom riešení rovnic popisujúcich rozloženie mechanickej deformácie resp. mechanickeho napätia (6) a posunutia (7) v závislosti od rozloženia teploty [14]:

$$(6) \quad \nabla(k_S \nabla T) - \rho C \frac{dT}{dt} - (3\lambda + 2\mu)\epsilon_{ii} \alpha_T T_0 = -\dot{q}$$

$$(7) \quad \mu u_{i,kk} + (\lambda + \mu) u_{k,ki} - (3\lambda + 2\mu) \alpha_T \Delta T = 0$$

kde k_S je tepelná konduktivita materiálu, C je tepelná kapacita, \dot{q} je rýchlosť generovania tepla, ϵ je tenzor

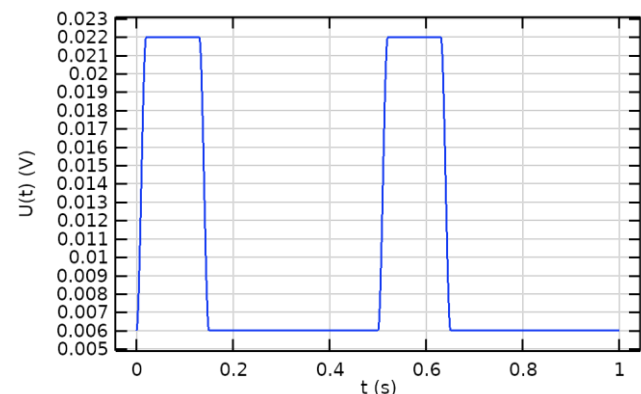
mechanickej deformácie, u je mechanicke posunutie a λ a μ sú Laméove koeficienty popisujúce elasticke vlastnosti izotropného pružného prostredia. V prípade cyklického namáhania je únavová životnosť materiálu zvyčajne definovaná pomocou mechanickeho napätia a počtu cyklov po zlyhanie [15].

Model

Vytvorený bol 2D model kontaktovaného drôtu na báze hliníka s priemerom 25 μm a dĺžkou cca 1,7 mm. Materiál substrátu je tvorený vodivými medenými kontaktovacími ploškami a izolačnou podložkou na báze FR4 (štandardný sklo-laminátový kompozit pre dosky plošných spojov), resp. na báze korundu – Al_2O_3 (štandardný materiál pre výkonové DBC – Direct Bonded Copper substráty). Model je vytvorený na základe reálnych vzoriek určených na analýzu vplyvu elektromigrácie na prechode medzi kontaktovaným drôtičkom na báze Al-1\%Si a medenou kontaktovanou ploškou. Izolačným substrátom tu bol FR4 [16].

Koeficient prestupu tepla pre kontaktovaný drôtičok bol zvolený na základe [2] a rovníc (3), (4) a (5). Ostatné plochy mali odhadnutý koeficient prestupu tepla pre prostredie s nenúteným prúdením $10 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Emisivity jednotlivých plôch boli 0,4 pre substrát, 0,07 pre drôtičok a 0,5 pre materiál medených plôšok. Teplota okolia bola 20°C .

Drôtičok je zaťažovaný periodickými pulzmi s periódou 500 ms, pričom maximálna hodnota vstupného napätia je na úrovni 22 mV po dobu 150 ms, zvyšný čas periódy je vstupné napätie na úrovni 6 mV. Uvedené úrovne napätia zodpovedajú pri danej konfigurácii 2D modelu prúdovým hustotám v mikrodrôtičiku na úrovni $1 \cdot 10^8 \text{ A.m}^{-2}$ v minime resp. $4 \cdot 10^8 \text{ A.m}^{-2}$ v maxime. Dĺžka prechodu vstupného napätia z minimálnej na maximálnu (resp. z max. na min.) úroveň je 20 ms (Obr. 1).



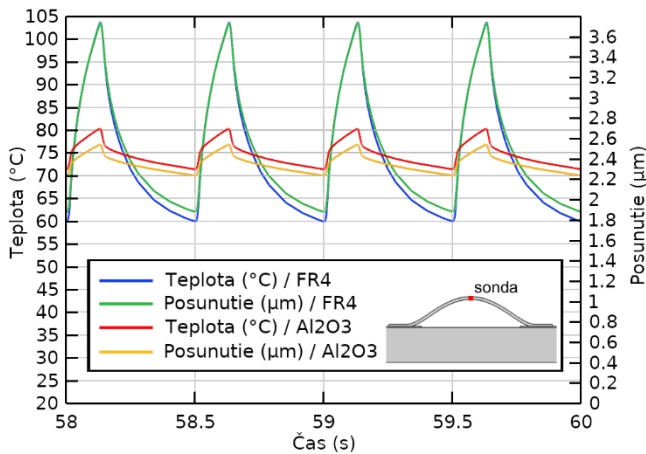
Obr. 1. Priebek vstupného napätia

Simulácia je založená na multifyzikálnej FEM analýze javov popisujúcich vznik stratového Joulového tepla, jeho následného šírenia a teplotnej rozťažnosti materiálov modelu. Minimálny element tetraedrickej siete konečných prvkov bol 0,12 μm .

Výsledky a diskusia

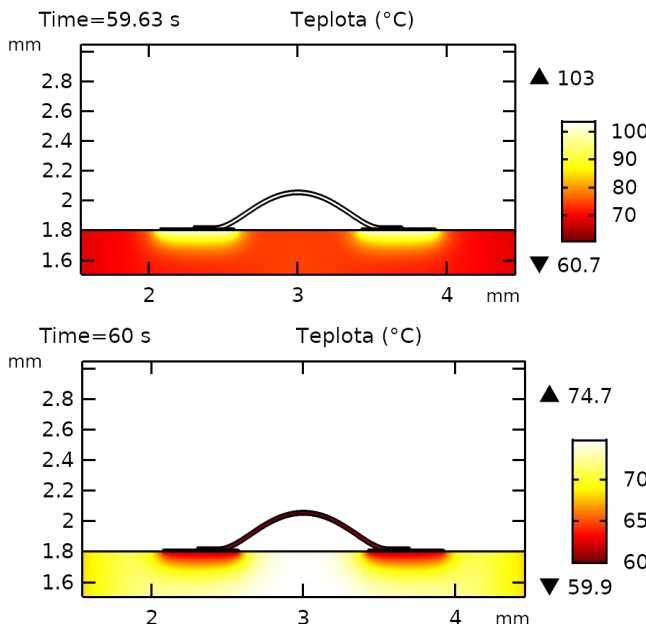
Na Obr.1 je vidieť priebek teploty a posunutia mikrodrôtičika vo vertikálnom smere v mieste vrcholu slučky kontaktovaného kontaktovaného drôtičika, ktoré zodpovedá miestu s maximálnou dosiahnutou teplotou počas celej jednej periódy. Dej je sledovaný až po ustálení maximálnych a minimálnych hodnôt teploty (resp. posunutia) na dvoch substrátoch – FR4 a korund (Al_2O_3). Ako je vidieť, teplota a aj posunutie je značne závislé od schopnosti materiálu izolačnej podložky odvádzať teplo. Zatiaľ čo posunutie vo vertikálnom smere je pre korundový substrát ($C = 900 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $k_S = 26,6 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$) len cca 0,3 μm

(rozdiel teplôt 9°C), pre substrát na báze FR4 ($C = 1369 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $k_s = 0,3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) to je už takmer 1,9 μm (rozdiel teplôt 46°C).

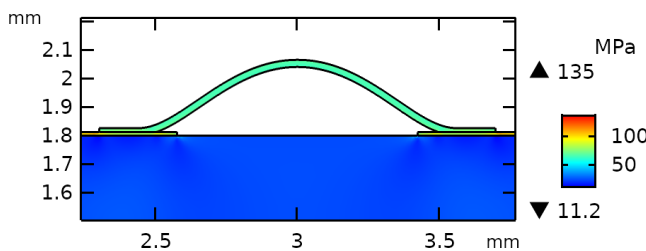


Obr.2. Teplota a posunutie mikrodrôtika vo vertikálnom smere v mieste vrcholu slučky kontaktovaného drôtika (sonda) pre substrát na báze FR4 a na báze korundovej keramiky

Rozloženie teploty v substráte a v mikrodrôtitku v čase keď teplota dosahuje maximálnu, resp. minimálnu hodnotu (Obr.3) ukazuje ako osciluje teplota v priebehu jednej periódy. Zatiaľ čo teplota substrátu je oproti mikrodrôtitku pomerne stabilná, mikrodrôtitok sa z dôvodu rýchleho odvodu tepla do prostredia na konci každej periódy vstupného signálu rýchlo ochladí a naopak z dôvodu veľkých prúdových hustôt rýchlo ohrieva (maximum nadobúda v čase, keď pulz vstupného signálu prechádza z maxima do minima).



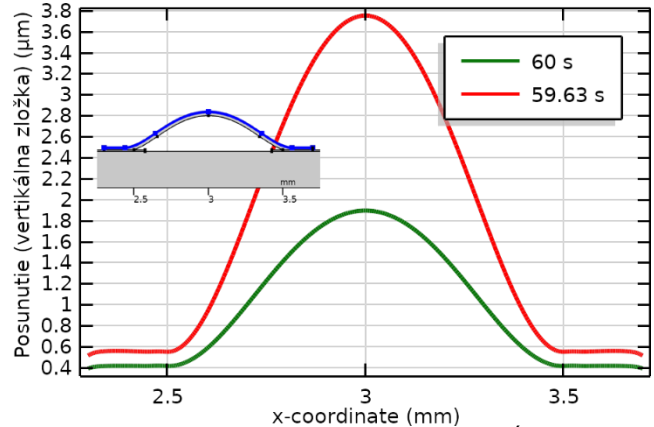
Obr.3. Rozloženie teploty v časoch keď teplota dosahuje maximálnu (hore) a minimálnu (dole) hodnotu v mieste sondy (substrát FR4)



Obr.4. Rozloženie von Misesovho napätia (substrát FR4)

Najväčšie mechanické napätie sa vyskytuje v medených ploškách a najmenšie v substráte (Obr.4), nakoľko sú ale medené plošky fixované k substrátu, najväčší pohyb vykonáva kontaktovaný drôtik. Vďaka teplotnej rozťažnosti materiálu drôtika ($\alpha_{T(Al)} = 2,31 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) dochádza teda práve pri ňom výraznejšie k jeho posúvaniu vo vertikálnom smere, ako je to zrejme aj zo závislosti na Obr.2.

Najväčšie posunutie mikrodrôtika sa vyskytuje vo vrchole jeho slučky, pričom pri maximálnej teplote dosahuje vertikálne posunutie od pôvodnej polohy takmer 3,8 μm . Na Obr.5 je možné vidieť vertikálnu zložku posunutia pozdĺž celej vrchnej strany mikrodrôtika vrátane častí, ktoré sú v kontakte s medenými ploškami. Uvedená grafická závislosť potvrdzuje, že k maximálnemu posunutiu dochádza práve vo vrchole slučky mikrodrôtika, ktorý sa počas jednej periódy cyklicky posúva nahor a nadol.



Obr.5. Vertikálna zložka posunutia mikrodrôtika pozdĺž jeho vrchnej časti (modrá krivka) v časoch keď teplota dosahuje maximálnu ($t = 59.63 \text{ s}$) a minimálnu ($t = 60 \text{ s}$) hodnotu (substrát FR4)

Ak uvažujeme materiál na báze Al, je potrebné predpokladať s časovo závislou plasticou deformáciou (tečenie), pri ktorej dochádza k akumulovaniu plastickej deformácie $\epsilon(t)$ za daný čas pri súčasnom pôsobení teploty T a mechanického napätia σ . Pri dosiahnutí vyššie uvedených maximálnych teplôt a rýchlostiach deformácie je možné predpokladať tečenie materiálu podmienené hlavne difúziou dislokácií materiálu drôtika [17] [18]. Tečenie materiálu môže spôsobiť oslabenie drôtika, čím dôjde zároveň lokálne k väčším prúdovým hustotám a v konečnom dôsledku k prerušeniu drôtika.

Na Obr.6 je vidieť prerušenie mikrodrôtika na báze Al-1%Si zliatiny s priemerom 25 μm a s dĺžkou približne 1,7 mm kontaktovaného na štandardný DPS substrát na báze FR4 s medenou fóliou. Podmienky cyklického napájania boli v experimente podobné ako vo vyššie uvedenej simulácii. Spoje boli extenzívne namáhané, pričom dochádzalo k ich prerušeniu prevažne vo vrchole slučky. Súbor rovnakých vzoriek namáhaných jednosmerným konštantným prúdom, ktorého veľkosť bola rovnaká ako RMS pulzného prúdu (a teda s predpokladom rovnakých Joulových strát) takejto degradácii nepodliehal [16].



Obr.6. Porucha kontaktovaného spoja (preušenie) vplyvom termomechanického namáhania iniciovaného cyklickým prúdovým zatažením [16]

Je možné predpokladať, že v prípade substrátu s väčšou tepelnou vodivosťou oproti FR4 ako je napr. korund (Obr.2) budú dôsledky vyššie uvedených javov menej výrazné.

Vyššie popísaná analýza je zameraná na možné príčiny prerušenia spoja v mieste vrcholu slučky kontaktovaného spoja. K poruchám spoja ale dochádza samozrejme aj v iných miestach spoja. Jedna z častých porúch s vysokou frekvenciou výskytu sa objavuje na rozhraní medzi drôtikom a kontaktovanou ploškou (Obr.4), resp. na mieste v ktorom drôtik prechádza do zvaru spoja s kontaktovanou ploškou, kde v dôsledku rôznych materiálov s rôznou teplotnou rozťažnosťou dochádza k namáhaniu na ich rozhraní.

Záver

Termomechanické namáhanie mikrodrôtov iniciované Joulovým stratovým teplom počas cyklického zaťažovania prúdovými pulzmi vedie k výraznejšiemu vzrastu porúch kontaktovaného spoja v porovnaní s ekvivalentným jednosmerným zaťažením. Značný vplyv na degradáciu a porušenie spoja má cyklická deformácia vplyvom teplotnej rozťažnosti materiálu. Je možné predpokladať, že táto degradácia je podporovaná zvýšenou teplotou pri ktorej dochádza k časovo závislej plastickej deformácii (tečeniu) materiálu drôtika na báze hliníka, následne k jeho oslabeniu a prerušeniu. Zo simulácii je možné predpokladať, že v prípade substrátu s väčšou tepelnou vodivosťou oproti FR4 ako je napr. korund budú dôsledky vyššie uvedených javov menej výrazné, nakoľko rozdiel maximálnej a minimálnej teploty (resp. posunutie mikrodrôtika) v priebehu jednej periódy je za rovnakých podmienok nižší.

Literatúra

- [1] P. J. Giarratano, "Transient boiling heat transfer from two different heat sources: Small diameter wire and thin film flat surface on a quartz substrate," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 27, no. 8, pp. 1311-1318, 1984.
DOI: 10.1016/0017-9310(84)90058-9
- [2] N. Guan, Z. Liu, Z. Chengwu and J. Guilin, "Natural convection heat transfer on surfaces of copper micro-wires," *Heat and Mass Transfer*, vol. 50, no. 2, pp. 275-284, 2014.
DOI: 10.1007/s00231-013-1240-x
- [3] C. C. Jung, C. Silber and J. Scheible, "Heat Generation in Bond Wires," *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, vol. 5, no. 10, pp. 1465 - 1476, 2015.
DOI: 10.1109/TCPMT.2015.2429743
- [4] P. Antunes, A. M. Rocha, H. Lima, H. Varum and P. S. André, "Thin bonding wires temperature measurement using optical fiber sensors," *Measurement*, vol. 44, no. 3, pp. 554-558, 2011.
DOI: 10.1016/j.measurement.2010.11.016
- [5] T. Dagdelen, E. Abdel-Rahman and M. Yavuz, "Reliability Criteria for Thick Bonding Wire," *Materials (Basel)*, vol. 11, no. 4, p. 11, 2018.
DOI: 10.3390/ma11040618
- [6] B. Czemy, M. Lederer, B. Nagl, A. Trnka, G. Khatibi and M. Thoben, "Thermo-mechanical analysis of bonding wires in IGBT modules under operating conditions," *Microelectronics Reliability*, vol. 52, no. 9-10, pp. 2353-2357, 2012.
DOI: 10.1016/j.microrel.2012.06.081
- [7] J. Bielen, J.-J. Gommans and F. Theunis, "Prediction of high cycle fatigue in aluminum bond wires: A physics of failure approach combining experiments and multi-physics simulations," in *EuroSime 2006 - 7th International Conference on Thermal, Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems*, Como, Italy, 2016.
DOI: 10.1109/ESIME.2006.1644022
- [8] C. Duran, M. Klinger, D. Coutellier and H. Naceur, "Power Cycling Reliability of Power Module: A Survey," *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 16, no. 1, pp. 80-97, 2016.
DOI: 10.1109/TDMR.2016.2516044
- [9] A. Mertol, "Estimation of aluminum and gold bond wire fusing current and fusing time," *IEEE Transactions on Components,*

Packaging, and Manufacturing Technology: Part B, vol. 18, no. 1, p. 1995, 210 - 214.

DOI: 10.1109/96.365510

- [10] E. Loh, "Heat Transfer of Fine-Wire Fuse," *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 264 - 267, 1984.
DOI: 10.1109/TCHMT.1984.1136364
- [11] D. Duque, T. Gotthans, R. Gillon and S. Schöps, "An Extended Analytic Model for the Heating of Bondwires," *arxiv.org*, p. 10, 2017. arXiv:1709.10069v1
- [12] F. Kreith, R. M. Manglik and M. S. Bohn, *Principles of Heat Transfer*, 7th ed., Cengage Learning, 2010, p. 696.
- [13] J. H. Lienhard V and J. H. Lienhard IV, *A Heat Transfer Textbook*, 4th, Ed., Cambridge: Phlogiston Press, 2017.
- [14] K. C. Nwanoro, H. Lu, C. Yin and C. Bailey, "Computer Simulation of the Reliability of Wire Bonds and Ribbon Bonds in Power Electronics Modules," in *23rd International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC)*, Amsterdam, Netherlands, 2017.
DOI: 10.1109/THERMINIC.2017.8233827
- [15] T.-Y. Hung, L.-L. Liao, C. C. Wang, W. H. Chi and K.-N. Chiang, "Life Prediction of High-Cycle Fatigue in Aluminum Bonding Wires Under Power Cycling Test," *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 14, no. 1, pp. 484 - 492, 2014.
DOI: 10.1109/TDMR.2013.2288703
- [16] I. Vehec, A. Pietriková and P. Čech, "Degradation of Al-1%Si wires bonded onto copper pads," *ElectroScope*, vol. 2017, no. 2, p. 5, 2017.
- [17] T. Matsunaga and E. Sato, "Creep Mechanism in Several Grades of Aluminum at Low Temperatures," *Materials Transactions*, vol. 54, no. 12, pp. 2202-2208, 2013.
- [18] R. Fernández, G. Bruno and G. González-Doncel, "Primary and secondary creep in aluminum alloys as a solid state," *Journal of Applied Physics*, vol. 120, no. 8, p. 9, 2016.
DOI: 10.1063/1.4961524

Podakovanie



Európska únia



Operačný program
VÝSKUM a VÝVOJ



Európska únia



Operačný program
VÝSKUM a VÝVOJ

Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku/ Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ. Tento článok bol vypracovaný v rámci projektu "Centrum excelentnosti integrovaného výskumu a využitia progresívnych materiálov a technológií v oblasti automobilovej elektroniky", ITMS 26220120055.

Tento príspevok vznikol vďaka podpore v rámci operačného programu Výskum a vývoj pre projekt: Univerzitný vedecký park TECHNICOM pre inovačné aplikácie s podporou znalostných technológií, kód ITMS: 26220220182, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku. Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov EÚ.

Autori: Igor Vehec, Katedra technológií v elektronike, Fakulta elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, E-mail: igor.vehec.2@tuke.sk