



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikai Technológia Tanszék

AZ ELEKTROKÉMIAI MIGRÁCIÓ MIKROELEKTRONIKAI ALKALMAZÁSOKBAN

PHD TÉZISFÜZET

Medgyes Bálint Károly

okl. villamosmérnök

Tanszékvezető és Témavezető:

Prof. Harsányi Gábor

egyetemi tanár

BUDAPEST
2014

A kutatás előzménye

A RoHS (Restriction of Hazardous Substances) Európai Uniósi direktíva [1] bevezetése nyomán szükségessé vált az ólommentes forrasztási technológiák széleskörű alkalmazása, melyek számos különböző anyagú kontaktus felületet, a hagyományos ólmos forrasztástól eltérő ötvözeteket, és hőkezelési eljárásokat alkalmaznak. Ebből eredően különböző megbízhatósági problémával találkozhatunk. Ilyen kurrens megbízhatósági problémának minősül az elektrokémiai migráció jelensége is. A továbbiakban az elektrokémia migrációra koncentrálok, mely jelenség veszélyes meghibásodásokhoz (rövidzár) vezethet. Tekintettel például egy járműelektronikai áramkörre, a fenti jelenségből eredő meghibásodások akár katasztrofális kimenetelűek is lehetnek.

Az elektrokémiai migráció klasszikus modelljét már az 1950-es években megalkották az ezüst migrációjával kapcsolatban, ami rendszeresen okozott meghibásodási problémákat az elektronikus alkatrészekben és áramkörökben. A modell szerint a jelenség az áramkör működése közben, nedvesség és elektromos feszültség együttes hatására lép fel, lényege fémionok keletkezése anódos oldódás révén, ezek vándorlása az elektrolitban, és az ezt követő dendrites kiválás a katódon. A dendritek átnövése rövidzárak kialakulásához és az áramkör meghibásodásához vezet. A jelenség elsősorban akkor veszélyes, amikor az élet- és vagyonbiztonsági kívánalmaknak megfelelő, nagy megbízhatóságúnak vélt rendszerekben idéz elő meghibásodást. További óriási probléma, hogy a meghibásodás hirtelen következik be, általában a környezeti feltételek megváltozása esetén (pl.: páratartalom növekedés, nedvesség, ill. szennyeződések bekerülése következtében), ezért annak valószínűségét előre megjósolni nehéz feladat. Hosszú ideig az ezüst egyedüli tulajdonságának tartották az elektrokémiai migrációs viselkedést, s ennek megfelelő magyarázatok születtek. A későbbi gyakorlati tapasztalatok bebizonyították, hogy egy általánosabb modellről, ill. jelenségköréről van szó, hiszen számos más fémkomponens is mutat zárlatokhoz vezető migrációt, mint például a réz, az ólom és az ón. Kiderült az is, hogy ionos szennyeződés jelenlétében ez a zárlatképződési mechanizmus jelentősen változhat. Ezen felül az újabb és újabb ólommentes elektronikai anyagrendszerek (pl.: védőfémmezések vagy forraszok) megjelenése folyamatosan igényelte/igényli a jelenségkör mélyebb vizsgálatát. Az áramkörök integráltságának fokozódása, kivezetéseinek sűrűsödése illetve az egyre kisebb méretű alkatrészek folyamatos megjelenése teszi különösen indokolttá az elektrokémiai migráció kutatását. Az utóbbi években született jó néhány, a területet érintő publikáció is a téma aktualitását támasztja alá [2-5].

A kutatási terület egyes megoldandó problémái

Jelenleg az elektrokémia migráció jelensége sok esetben nem teljesen tisztázott folyamatokat, reakciókat takar. A hiba jelenségét leírni kívánó különböző modellek és elméleti megfontolások nem adnak kielégítő választ a teljes folyamat megértéséhez különféle szituációkban. A megértést az is nehezíti, hogy más-más elektrokémia folyamat játszódhat le eltérő anyagrendszerekben, a környezeti szennyeződésektől függően eltérő elektrolit oldatokban, eltérő geometriákon. Mivel ez az elektrokémiai folyamat igen kis térfogatokban zajlik, valamint nem stacionárius és nem is homogén összetételű az elektrolit, ezért nem állnak rendelkezésünkre megfelelő leíró egyenletek, így a felállított modelleket is inkább a tapasztalati, kísérleti megfigyelésekre alapozzák [6].

A megfigyeléseket alapvetően kétféle környezetben végzik. A vizsgálatok egyik részét labor körülmények között, szobahőmérsékleten, míg a másik részét extrém klimatikus körülmények biztosításával hajtrák végre. Ez utóbbi vizsgálatokhoz ún. klímaállósági vizsgálatokra alkalmas klímakamrákat alkalmaznak, ahol pl. magas hő- és páratartalom mellett követik a teszt struktúrák valamilyen villamos paraméterének valós idejű vagy diszkrét mérésekkel megvalósított változását. Az eddigi megfigyelések elsősorban magára az elektrokémiai migrációs folyamatokra irányultak, és viszonylag kevés figyelmet fordítottak az elektrokémiai folyamatot indító előzményekre, pl. a páralecsapódásra. Ezek a klímavizsgálatok ugyan szimulálják magas páratartalmú környezet, de nem veszik figyelembe a páralecsapódási szakaszt. Ezért minimális információ található arról, hogy fizikailag hogyan zajlik a nedvesség lecsapódási folyamata, mielőtt megkezdődne maga az elektrokémiai migráció, vagyis a dendritképződési szakasz [7].

További nyitott kérdés még, hogy a kondenzáció folyamata, a kondenzációs idő (páralecsapódási szakasz) mennyire összemérhető az őt követő elektrokémiai migráció által előidézett zárlat képződési mechanizmus idejével (dendrit képződési szakasz), vagyis lehetséges, hogy a páralecsapódás bizonyos esetekben nem elhanyagolható tényező a meghibásodásig eltelt idő egészét tekintve. Amennyiben bizonyítható, hogy a kondenzációs idő nem elhanyagolható a teljes hibamechanizmusra nézve, akkor a meglévő gyorsítási modellek kiegészítése válik szükségessé.

A szobahőmérsékleten végzett vizsgálatokkal egyre elterjedtebben találkozhatunk manapság (pl.: vízcsepp teszt) [8]. A klimatikus vizsgálatokkal ellentétben itt az előzményekről (pl.: páralecsapódás) nem kapunk információt, viszont gyors, és mind

kvalitatív, mind kvantitatív eredményt nyerhetünk egy adott anyagrendszer elektrokémiai migrációs viselkedését tekintve.

Ezen felül a szakirodalomban számos tisztázatlan kérdés, valamint ellentmondásos állítás is található. Ilyen ellentmondásos leírást lehet találni a réz és az ólom migrációja kapcsán, amikor egy migrációs rangsort állítottak fel: $Ag > Pb > Cu > Sn$ (értsd: az ezüst hibásodik meg leghamarabb) [9]. Ez vizsgálódás tulajdonképpen a különböző forrasztható fémbevonatok anyagválasztásának könnyítését célozza, hiszen nem mindegy, hogy migrációs szempontból egyik másik fémezés mennyire lesz megbízható a működés során.

A tisztázatlan területeket tekintve az újonnan megjelenő ólommentes forraszok elektrokémia migrációs tulajdonságainak feltárását végeztem, ugyanis ismeretes, hogy például a hagyományos ólmos forraszokhoz képest igen eltérő megbízhatóságot mutatnak a hagyományosnak mondható ólommentes forraszok [10]. Tehát az ólmos és a legújabb ólommentes (mikro-ötözött) forraszok összehasonlítása még tisztázatlan terület a migrációs meghibásodások tekintetében.

Célkitűzések

Kutatómunkám egyik alapvető célja volt, hogy elősegítsem az elektrokémiai migráció által okozott meghibásodásokhoz vezető folyamatok jobb megértését. Az egyik tisztázatlan terület az volt, hogy az elektrokémiai migráció beindulását megelőző szakaszban milyen folyamatok mennek végbe és ezek a folyamatok milyen hatással vannak a teljes hibamechanizmusra. Esetemben a nedvesség kondenzációjának optikai és villamos paraméterrel követett vizsgálatát tűztem ki célul (FR-4 hordozó, ezüst védőfémezés példáján). Célul tűztem ki annak a megfigyelését is, hogy az adott struktúrán az összefüggő nedvességréteg vagy az első „vízhíd” kialakulásához szükséges kondenzációs idő és a migrációval (az első dendrit képződésétől a zárlatig) eltelt idő milyen arányban oszlik meg a meghibásodási idő egészét tekintve. A fentiek tisztázásához célul tűztem ki azt is, hogy kidolgozzak egy olyan mérési és megfigyelési módszert, ami valós időben és párhuzamosan szolgáltat mind optikai, mind villamos jel által hordozott információt.

A kutatómunka harmadik célkitűzése az volt, hogy a szakirodalomban található egyes tisztázatlan kérdésekre és hibás következtetésekre rávilágítsak, valamint kielégítő választ adjak ezen ellentmondásos vagy nem teljesen tisztázott kérdésekre. Ilyen ellentmondásos helyzetet lehet találni a réz és az ólom migrációja kapcsán, ahol egy migrációs rangsort állítottak fel [9]: $Ag > Pb > Cu > Sn$ (értsd: az ezüst a legkevésbé ellenálló migrációs szempontból). Ezt a sorrendet az un. oldhatósági szorzattal hozták összefüggésbe, konkrétan a különböző fémhidroxidok (pl.: $Sn(OH)_2$) oldhatósági szorzatát és a meghibásodásig eltelt idő között erős korrelációt mutattak ki. Mivel az ólom esetében nem tiszta fémet vizsgáltak, hanem forraszótvözetet, ezért felmerült a gyanú, hogy a felállított sorrend, nem biztos, hogy megállja helyét. Ezért ellenőrző vizsgálatok elvégzését tartottam indokoltnak, ami alapján kiderült, hogy a [9]-ben felállított sorrend módosulhat. Ezért a migrációs sorrend változás okainak tisztázást és a vonatkozó elektrokémiai reakciót meghatározását tűztem ki célul.

A tisztázatlan területeket tekintve az újonnan megjelenő ólommentes forraszok elektrokémia migrációs tulajdonságainak feltárását végeztem. Ugyanis ismeretes, hogy például a hagyományos ólmos forraszokhoz képest igen eltérő megbízhatóságot mutathatnak [10]. Ezért a kutatások utolsó csoportjában az ólmos és a legújabb ólommentes (mikro-ötözött) forraszok összehasonlítását tűztem ki célul az elektrokémiai migrációs meghibásodások tekintetében. Az összehasonlítás alapja a felületeken kialakult helyi aktív és passzív cellák feltérképezése volt, amely cellák kialakulása alapvetően az elektrokémiai korrózióknak volt tulajdonítható.

A kutatás módszerei

A kutatási módszereket érdemes kettéválasztani a környezeti behatások, paraméterek szerint. Az egyik csoportban szobahőmérsékleten, míg a másikban extrém klimatikus körülmények biztosításával (klímaállósági vizsgálatok) végzik a kutatásokat.

A klímaállósági vizsgálatok esetén a mintákat klímakamrában a szobahőmérsékletnél magasabb hőmérséklet és/vagy magas relatív páratartalom együttes igénybevételének vetik alá. Ez egy általánosan elterjedt eljárás az elektronikában olyan öregbítési folyamatok vizsgálatánál, melyeket a fenti tényezők együttesen vagy külön-külön befolyásolhatnak. Kvalitatív megfigyelésre azonban kevésbé alkalmas. Kvantitatív összehasonlítás úgy lehetséges, hogy a különböző mintákat azonos körülmények (relatív páratartalom, hőmérséklet, villamos terhelés) között tartva villamos paraméterek változását (például szigetelési ellenállás, vagy a szivárgási áram időfüggését) figyeljük. Saját kísérleteimben a páralecsapódás mechanizmusának vizsgálatát és a kondenzációs idők megfigyelését klímaállósági vizsgálatra alkalmas klímakamrában végeztem.

Az elektrokémiai migráció kutatásakor nem csak klímaállósági vizsgálatokat végeznek, hanem alkalmaznak szobahőmérsékleten művelhető vizsgálatokat is, mint pl. a vízcsepp tesztet. A vízcseppteszt lényege, hogy egy jól definiált (űrtartalom, koncentráció) folyadék (elektrolit) cseppet helyeznek a vizsgálandó vezetőrétegek közé és néhány volt feszültséget (DC) kapcsolunk a rendszerre. Közben vizuálisan figyelik a fémszálak (dendritek) kialakulását és annak sebességét, illetve például a szivárgási áram időfüggését. Ez tulajdonképpen egy durva beavatkozási módszer, viszont kvalitatív és kvantitatív megfigyelésre egyaránt alkalmazható. A módszer előnye, hogy könnyen és gyorsan megállapítható egy kérdéses anyag elektrokémiai migrációs hajlamossága, valamint lehetőséget nyújt, más anyagokkal való összehasonlításra. A réz és az ólomtartalmú anyagrendszerek valamint a különböző forrasz ötvözetek migrációs összehasonlításához elsősorban vízcsepp tesztet alkalmaztam.

A klímaállósági vizsgálatok és a szobahőmérsékleten végzett vízcsepp tesztek eredményeiként kapott mintaszerkezeteken különböző felületanalizáló és rétegszerkezet vizsgáló módszerek alkalmazása is szükséges a végbement változások értelmezése érdekében. A minták felületét elsősorban pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) vizsgáltam. Ebben az esetben a felület feltérképezése, annak domborzati megjelenítése a cél. A felületi részek anyagösszetétele illetve elemtérképe is meghatározható az Energy-Dispersive X-ray spectroscopy (EDS)

módszer segítségével. Az EDS tulajdonképpen egy ponton vagy akár meghatározott területen lévő anyag összetételének meghatározására alkalmas mérési módszer, ami akár tömeg- vagy atomarányt is ki tud mutatni. Alkalmaztam még az X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) módszert is, ahol a felületen kémiai megkötött kémiai elemek kötésiállapotai tanulmányozhatók. A felület és rétegvizsgáló módszerekkel figyeltem meg az egyes dendritek morfológiáját, anyagösszetételét, de a különböző forraszok felületét azok kötésiállapotait is.

Új tudományos eredmények

I. Tézis

Megalkottam egy olyan in-situ valós idejű monitorozó rendszert, amely optikai megfigyelés mellett villamos paraméterek változásának követésével információt szolgáltat klímaállósági vizsgálatok során az elektrokémiai migráció teljes folyamatáról. A módszer alkalmas nemcsak a dendritképződési folyamat, hanem az azt megelőző nedvesség kondenzáció megfigyelésére is, ezzel elősegítve a hiba kialakulásának jobb megértését. A módszer segítségével felállítottam a teljes folyamat egy empirikus modelljét:

- 1. Apró cseppek formálódnak a fémen (nukleáció), miközben a szigetelőn relatíve még apróbb cseppek feltételezhetők.**
- 2. Egyre nagyobb cseppek alakulnak és nedvesség szigetek formálódnak a fémen, a szigetelő rétegen nem feltételezhető a növekvő cseppek szigetekké való összenövése vagy folytonos nedvesség film kialakulása (nincs dendrit).**
- 3. A nedvesség először lokálisan „hidakat” képez a vezetópályák között és ekkor már megindul a dendritképződés, majd kialakul a folytonos nedvesség film a teljes szigetelőn, ami zárlathoz vezet.**

Diszkusszió: A mérőrendszer és a megfigyelések verifikálására egyrészt egy „*in-situ*” villamos paraméterváltozást mértem, illetve video felvételek rögzítésével kvalitatív információt szolgáltatam a víz lecsapódási folyamatáról, majd azt követően a dendritek kialakulásáról. Megfigyelhető volt, hogy a fém felületeken megindult az intenzív kondenzáció.

A megfigyelt „*vízhíd*” képződést, mint a dendritek kialakulásának közvetlen előzményét, eddig nem publikálták az elektrokémiai migrációs kutatások területén. Jelen eredményem ellentmond azon régebbi elméletnek, miszerint a szigetelő, mint egy szivacs, fokozatosan telítődik vízzel, majd csak aztán indul meg a migráció [11].

A tézisponthoz kapcsolódó publikációk: L1, R1

II. Tézis

Az I. tézisben ismertetett módszer segítségével kimutattam, hogy az elektrokémiai migrációt előidéző páralecsapódás során a kondenzációs idő (MTTC = Mean Time To Condensation) nem elhanyagolható a meghibásodásig eltelt idő (MTTF = Mean Time To Failure) egészét tekintve. Ezzel rámutattam arra, hogy a fémezés anyaga mellett a szigetelő is jelentősen befolyásolja a teljes meghibásodási folyamatot. Ebben pedig figyelembe kell venni a szigetelő nedvesítési és termikus tulajdonságait is. Ezért a klasszikus migrációs meghibásodásokra alkalmazott gyorsítási modellek kiegészítésre szorulnak a fenti feltételek figyelembevételével:

$$MTTF = MTTC + MTTD, \text{ ahol az } MTTD \text{ a dendrites zárlat kialakulásig eltelt idő.}$$

Diszkusszió: Az MTTC különbség elsősorban a hordozók *felületi érdességi és nedvesítési tulajdonságainak* jelentős eltéréseivel, valamint az eltérő ún. *termikus diffuzivitással*¹ magyarázható. A felületi érdességet egy felületi profil mérővel számszerűsítettem és azt találtam, hogy az FR4-es hordozó szignifikánsan érdesebb ($2.56 \pm 0.5 \mu\text{m}$), mint a PI ($1.69 \pm 0.3 \mu\text{m}$). Az érdességből adódó különbségek főleg a felület higroszkópos tulajdonságaira hatnak; az érdesebb felület nagyobb effektív felülettel, nagyobb felületi szabad energiával rendelkezik, ami a kondenzációnak jobban kedvez. A felületek nedvesítési tulajdonsága is hatással van a folytonos nedvesség film kialakulására: a jobban nedvesíthető felületen, gyorsabban alakul ki az összefüggő nedvesség film. Mivel a kondenzáció exoterm folyamat, ezért lényeges az ún. termikus diffuzivitás különbségét is figyelembe venni a hordozók között; a nagyobb termikus diffuzivitással rendelkező hordozó ($\alpha_{FR4} = 5.43e-7 \text{ m}^2/\text{s}$, $\alpha_{PI} = 3.16e-7 \text{ m}^2/\text{s}$), nagyobb hőmennyiséget képes elszállítani azonos térfogatú anyagoknál, ami növeli a kondenzáció intenzitását. Jelen eredmény választ ad pl. arra a korábbi ellentmondásos helyzetre is, hogy a polimer Ag vastagréteg poliészter-hordozó miért bizonyult megbízhatóbbnak, mint a NyHL-en kialakított Cu a THB tesztek során [12], holott az Ag MTTF-je kisebb (migrációra hajlamosabb), mint a Cu. Ennek oka nem feltétlenül a szerzők által leírt polimer kötőanyag esetleges gátló hatásának tudható be, hanem inkább a hordozókból adódó MTTC különbségnek.

A tézisponthoz kapcsolódó publikáció: L2, R4

¹A termikus diffuzivitás a következő összefüggésből számítható:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho * C_s}, \text{ ahol}$$

λ az anyag hővezetési együtthatója [W/m.K], ρ a sűrűség [kg/m³], C_s a fajlagos hőkapacitás és α termikus diffuzivitás [m²/s].

III. Tézis

Rámutattam, hogy az ólom és réz elektrokémiai migrációs „képességének” sorrendje nem egyértelmű: a korábban publikált, és a hidroxidok oldhatósági szorzatának tulajdonított $Ag>Pb>Cu>Sn$ sorrend bizonyos esetekben módosulhat: $Ag>Cu>Pb>Sn$. Ennek magyarázata az ólom esetén az eutektikum képződésnek, ill. az abból való kioldódás gátoltságának, a réz esetében pedig a felületi oxidációs állapot oldhatóságot befolyásoló szerepének tudható be.

Diszkusszió: Kísérleti eredményeimben a meghibásodásig eltelt átlagos idők a réz és a tűzi ón (tűzi ón (HASL): Sn63Pb37) esetében szignifikánsan eltértek az eredetileg felállított migrációs sorrendben foglalt helyüktől [9]. Az ólomtartalmú tűzi ón migrációs meghibásodásig eltelt átlagos ideje alapján felállított új sorrend a következőre módosult: $Ag>Cu>Pb(HASL)>Sn$. A változás okait mind az ólomtartalmú ötvözetek közötti különbségekben, mind a réz, pontosabban az anódról beoldódó réz ionok típusától (Cu^{1+} vagy Cu^{2+}) függően kellett keresni. Kísérletileg kimutattam, hogy a réz esetében a *felület oxidációjának* mértéke meghatározó: tiszta réz felületeken a feltételezett Cu^{2+} ionok helyett a Cu^{1+} migrációja dominál. Ez utóbbi eredmény az ipari alkalmazásokban megjelenő OSP (tiszta rézen lévő szerves bevonat) forraszható védőbevonat esetére jól alkalmazható.

A tézisponthoz kapcsolódó publikációk: L3, R2, R5

IV. Tézis

Kimutattam, hogy az alacsony ezüst tartalmú mikro-ötvözös ólommentes forraszkok (pl.: SAC0807) mikroelektronikai alkalmazása legalább akkora elektrokémiai migrációs meghibásodási kockázattal jár kloridionos szennyezéskor, mint a hagyományos Sn63Pb37 típusú, vagy a széles körben alkalmazott ólommentes SAC305-ös forraszcé. Rámutattam a meghibásodásig eltelt idő (MTTF) és a korrózióra jellemző oxidációs sebesség közötti kapcsolatra: az alapanyag nagyobb oxidációs sebessége (SAC0807: ~ 50 nm/h, SAC0307: ~ 20 nm/h) esetén kisebb migrációs MTTF (SAC0807: ~ 178 s, SAC0307: ~ 574 s) tapasztalható és fordítva.

Diszkusszió: Az elektrokémiai migrációs meghibásodás az elektrokémiai korrózió egyik típusa, amely a passzíváló oxidréteg képződése és az ionok anódról való beoldódása konkurens reakciók. Ha a passzíváló réteg stabil és növekedése megfelelően gyors, megakadályozza az anódos oldódást. Későbbi folyamatokban az anódon kialakult oxid (passzíváló) réteg részben, vagy egészben bomlásnak indulhat. Egy részről a passzíváló réteg lebomlásának sebessége, valamint ezen lebomlási sebesség térbeli homogenitása-inhomogenitása befolyásolja az egységnyi idő alatt oldatba kerülő fémionok számát. Az ón tartalmú forraszkok esetén az XPS eredmények alapján mért inhomogén oxidációs front (vertikális és horizontális) kialakulását minden valószínűség szerint az úgynevezett lyuk vagy pont korrózió (pitting corrosion) jelensége befolyásolta, hiszen egybefüggő oxid rétegben lyukszerű korróziós helyek alakultak ki. A lyuk korrózió általában a pozitív előfeszítésű anód felületén jön létre ott, ahol relatíve nagy a kloridion koncentráció. A lyuk korrózió által kialakított üregek mélységéből lehet következtetni a beoldódott fémionok mennyiségére: minél nagyobb az „üreg”, annál több fémion ment oldatba (*nagyobb oxidációs sebesség*) és vehetett részt később a migrációs folyamatokban. Vagyis a mélyebb lyukak, több fémion keletkezését feltételezik, ami által nagyobb valószínűséggel, gyorsabban alakulhatnak ki a migráció következtében a zárlatot okozó dendritek (*kisebb MTTF*).

A tézisponthoz kapcsolódó publikációk: L4, R3

Az eredmények hasznosulása

Az I. Tézis és a II. Tézis eredményei hozzájárulnak a mai napig tisztázatlan elektrokémiai migráció hibajelenség jobb megértéséhez, ezzel elősegítve azt, hogy még realiztikusabb modellt lehessen felállítani a jelenségről; például az ezüst és réz vezetőkre vonatkoztatva. Ez tulajdonképpen a még megbízhatóbb elektronikai huzalozások geometriai kialakítását is elősegítheti. A realiztikusabb modell nagyobb biztonsággal jósolja meg az ezüst és réz geometriák elektrokémiai migrációs ellenálló képességét. Továbbá az I. Tézis és a II. Tézis-ben ismertetett mérési módszer szabványosításának lehetősége is adott, hiszen jelenleg nincs olyan szabványosított mérési módszer, ami a kritikus RH-t figyelembe véve, a reggeli harmatképződést szimulálná.

A III. Tézis és a IV. Tézis az elektronikai ipar számára könnyíti meg a döntést; nagyobb megbízhatóságú anyagrendszerek kiválasztásának lehetősége elektrokémiai szempontból. Munkám hasznos információt szolgáltatott a suttgarti Bosch vállalatnak és a budapesti Continental Automotive Systems vállalatnak. Az ipari hasznosuláson túlmenően munkám hozzájárult a "Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" (TÁMOP-4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0002) és az „Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben" (TÁMOP-4.2.2.B-10/1--2010-0009) c. projektek megvalósításához, illetve a Campus Hungary Program (TÁMOP 4.2.4.B/1-11/1-2012-0001) szakmai célkitűzéseit is segítette.

Az eredményeknek köszönhetően a japán National Institute for Materials Science (NIMS) kutatóintézetben folytattam (7 hónapig) az elektrokémiai migráció kutatását, ahol transzmissziós elektronmikroszkópiával és elektrokémiai korróziós vizsgálatokkal foglalkoztam.

Publikációk listája

Tézispontokhoz kapcsolódó publikációk

Lektorált, idegen nyelvű, külföldön megjelent folyóiratcikkek

[L1] **B. Medgyes**, B. Illés, R. Berényi and G. Harsányi, "In situ optical inspection of electrochemical migration during THB tests", JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE-MATERIALS IN ELECTRONICS, Vol. 22, No. 6, pp. 694-700 (2011), IF: 1.070

[L2] **B. Medgyes**, B. Illés and G. Harsányi, "Effect of Water Condensation on Electrochemical migration during THB tests", JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE-MATERIALS IN ELECTRONICS, Vol. 24, No. 7, pp. 2315-2321 (2013), IF: 1.486*

[L3] **B. Medgyes**, B. Illés and G. Harsányi, "Electrochemical migration behaviour of Cu, Sn, Ag and Sn63/Pb37", JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE-MATERIALS IN ELECTRONICS, Vol. 23, No.2, pp. 551-556 (2012), IF: 1.486

Lektorált, idegen nyelvű, Magyarországon megjelent folyóiratcikk

[L4] **B. Medgyes**, B. Illés and G. Harsányi, "Electrochemical Migration Behaviour of Micro-alloyed Low Ag Content Solders in NaCl Solution", PERIODICA POLYTECHNICA-ELECTRICAL ENGINEERING, 57:(2) pp. 49-55 (2013)

Referált, idegen nyelvű, nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent cikkek

[R1] **B. Medgyes**, R. Berényi, L. Jakab and G. Hársanyi, "Real-time monitoring of electrochemical migration during environmental tests" Proc. of the 32nd IEEE International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Brno, Csehország, pp. 1-6 (2009)

[R2] **B. Medgyes** and B. Illés, "Contradictory Electrochemical Migration Behavior of Copper and Lead", Proc. of the 34th IEEE International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Tatranska Lomnica, Szlovákia, pp. 206-211 (2011)

[R3] **B. Medgyes**, D. Rigler, B. Illés, G. Harsányi and L. Gál, "Investigating of Electrochemical Migration on Low-Ag Lead-Free Solder Alloys" Proc. Of the 18th IEEE International Symposium for Design and Technology of Electronic Packaging (SIITME), Alba Iulia, Románia, pp. 147-150 (2012)

[R4] **B. Medgyes**, B. Illés and L. Gál, "Measurements of Water Contact Angle on FR4 and Polyimide Substrates relating Electrochemical Migration" Proc. of the 36th IEEE International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Alba Iulia, Románia, pp. 1-4 (2013)

[R5] **B. Medgyes**, B. Illés, D. Rigler, M. Ruzinkó and L. Gál, "Electrochemical Migration of Copper in Pure Water used in Printed Circuit Boards", Proc. Of the 19th IEEE International Symposium for Design and Technology of Electronic Packaging (SIITME), Galati, Románia, pp. 267-270 (2013)

Egyéb publikációk

Referált, idegen nyelvű, nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent cikk

[R6] **B. Medgyes** and B. Illés, "Investigating SIR of Cu, OSP, iSn and HASL Surface Finishes by THB Test", Proc. Of the 17th IEEE International Symposium for Design and Technology of Electronics Packages (SIITME), Timisoara, Románia, pp. 345-348 (2011)

[R7] **B. Medgyes** and G Ripka, "Qualifying Methods of Conformal Coatings used on Assembled Printed Wiring Boards", Proc. Of the 30th IEEE Int. Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Cluj-Napoca, Románia, pp. 429-433 (2007)

Idegen nyelvű, nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent előadás

[K1] **B. Medgyes**, "Qualifying Lead-Free Solder Joints on Printed Circuits Boards", International Symposium for Design and Technology of Electronic Packages (SIITME), Brasov, Románia, pp. 385-388 (2008)

[K2] **B. Medgyes**, "Life-time tests on printed circuit boards and qualifying lead-free solder joints", International microelectronics and packaging conference (IMAPS), Pułtusk, Lengyelország, pp. 282-287 (2008)

[K3] **B. Medgyes**, "Investigating Electrochemical Migration on Assembled Printed Circuit Boards coated by Conformal Coating", International Symposium for Design and Technology of Electronic Packages (SIITME), Baia Mare, Románia, pp. 32-35 (2007)

Nem lektorált, magyar nyelvű, Magyarországon megjelent folyóiratcikk

[M1] **B. Medgyes**, "Szerelt áramkörök alakkövető bevonása: Conformal Coating", ELEKTRONET, Vol. 1, No. 1, pp. 35-36. (2007)

Hivatkozott irodalom

- [1] Directive of the European Commission for the Reduction of Hazardous Substances, Directive 2000/0159 (COD) C5-487/2002, LEX 391, PE-CONS 3662/2/02 Rev 2, ENV581, CODEC 1273, 2003.
- [2] D. Q. Yu, W. Jillek, E. Schmitt, Electrochemical migration of lead free solder joints, *Journal of Materials Science - Materials in Electronics*. 17, 229-241 (2006)
- [3] J.Y Jung, S.B. Lee, H.Y. Lee, Electrochemical Migration Characteristics of Eutectic Sn-Pb Solder Alloy in NaCl and Na₂SO₄ Solutions, *Journal of Electronic Materials*. 38, 691-699 (2009)
- [4] B.I. Noh, J. W. Yoon, W.S. Hong, Evaluation of Electrochemical Migration on Flexible Printed Circuit Boards with Different Surface Finishes, *Journal of Electronic Materials*. 38, 902-907 (2009)
- [5] D. Minzari et al, Electrochemical migration of tin in electronics and microstructure of the dendrites, *Corrosion Science* 53, 1659–1669 (2011)
- [6] S. Yang et al, Initial Stage of Silver Electrochemical Migration Degradation, *Microelectronics Reliability* 46, 1915–1921 (2006)
- [7] Z. Sheng, M.H. Azarian, M. Pecht, Reliability of Printed Circuit Boards Processed Using No-Clean Flux Technology in Temperature Humidity Bias Conditions Device and Materials Reliability, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*. 8, 426-434 (2008)
- [8] S.B. Lee et al Effect of the Composition of Sn-Pb Alloys on the Microstructure of Filaments and the Electrochemical Migration Characteristics, *Metals and Materials International*, 17(4), 617-621 (2011)
- [9] G. Harsányi and G. Inzelt, Comparing Migratory Resistive Short Formation Abilities of Conductor Systems Applied in Advanced Interconnection Systems, *Microelectronics Reliability* 41, (2001)
- [10] D. Q.Yu, W. Jillek, E. Schmitt, Electrochemical migration of Sn-Pb and lead free solder alloys under distilled water, *Journal of Materials Science - Materials in Electronics*, 17, 219-227 (2006)
- [11] S. J. Krumbein, "Tutorial: Electrolytic Models for Metallic Electromigration Failure Mechanisms", *IEEE TRANSACTIONS ON RELIABILITY*, Vol. 44. No. 4, pp. 539-549 (1995)
- [12] P. Bojta, P. Németh and G. Harsányi, "Migration Reliability Comparison of Interconnection Substrates: Polymer Thick Films Seem Better than Regarded?", *Proc. of the 14th European Microelectronics and Packaging Conference (IMAPS)*, pp. 189-195 (2003)

Köszönetnyilvánítás

Prof. Harsányi Gábor témafelelősömnek a szakmai és anyagi támogatásért

Dr. habil. Jakab Lászlónak, az optikai területen tett tanácsaiért

Prof. Menyhárd Miklósnak és **Gurbán Sándornak**, az XPS mérésekben tett segítségükért

Dr. Illés Balázsnak, a publikációs iránymutatásért

Dr. Krammer Olivérnek, az építő szakmai kritikákért

Dr. Berényi Richárdnak, a mérőrendszer informatikai támogatásáért

Rigler Dánielnek, SEM-EDS vizsgálatokban végzett segítségért

Tanszék minden kollégájának, (kiemelten: **Dr. Illyefalvi-Vitéz Zsolt**, **Dr. Gordon Péter**, **Dr. Székely Iván**, **Dr. Sántha Hunor**, **Dr. Gál László**, **Géczy Attila**, **Hurtony Tamás**, **Dr. Bonyár Attila**).

Dr. Shinohara Tadashi Sensei-nek, japán mentoromnak, aki nyugalmat és magas színvonalú infrastruktúrát biztosított a kutatásaimhoz.

Prof. Lakatosné Varsányi Magdának és **Prof. Pécz Bélának**, akik lelkiismeretes bírálatukkal segítettek disszertációm véglegesítésében.

Végül, de nem utolsó sorban **Családomnak**, kiemelten **Feleségemnek**, akik fáradhatatlanul és minden lehetséges módon támogattak.