

FIABILITATEA ÎNCAPSULĂRILOR MICROELECTRONICE

Titu-Marius I. BĂJENESCU, prof.

Elveția

1. INTRODUCERE

Capsula joacă un rol esențial în funcționarea componentelor electronice, îndeplinind trei funcții principale: (i) Interfațarea cipului cu circuitul extern; (ii) Evacuarea căldurii generate de funcționarea dispozitivului; (iii) Protejarea cipului de mediul extern (integritate mecanică, protejarea împotriva temperaturii ridicate, radiațiilor, umidității, ionilor etc., izolarea chimică de un mediu ostil).

Capsula trebuie să realizeze cel mai bun compromis între performanțele electrice, termice și mecanice, dimensiunile fizice cerute de aplicație, fiabilitate și cost. Distingem două mari categorii de capsule: capsule mono-cip (*single chip package* – SCP), respectiv capsule multi-cip (*multichip package* - MCP). Așa cum o sugerează și numele, în SCP se încapsulează doar un singur cip [2].

Încapsularea electronică este un subiect multidisciplinar care cuprinde ingineria mecanică, electrică, chimică, fizică și industrială, ba chiar și marketingul. Ea adăpostește și interconexiunile circuitelor integrate ale sistemelor electronice. Încapsularea electronică trebuie să permită distribuirea semnalelor electrice, manufacturabilitatea, să permită distribuirea puterii și serviciile periodice.

De ce trebuie să încapsulăm componentele electronice? (a) Pentru a le proteja împotriva șocurilor, vibrațiilor, contaminărilor, a manipulărilor, a pătrunderii luminii sau a diferitelor emisiuni nedorite. (b) Pentru a permite sistemului electronic să realizeze conexiuni între elementele unei plăci echipate. (c) Pentru a împiedeca părțile conductive ale elementelor să vină în contact neintenționat cu alte elemente conductive ale suprafețelor sistemului.

Provocările permanente ale încapsulării electronice sunt: (i) Numărul în permanentă creștere de intrări și ieșiri ale sistemelor încapsulate, concomitent cu scăderea distanței dintre piciorușe. (ii) Disiparea căldurii, mai cu seamă pentru aplicațiile spațiale (iii) Manufacturabilitatea. (iv) Sfidările materialelor utilizate. (v) Sfidările mecanice. (vi) Instalarea. (vii) Testarea. (viii) Impecabilitatea asamblării. (ix) *Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment*

(RoHS) - interzicerea folosirii plumbului la efectuarea lipiturilor.

Primele circuite integrate din decada 1950 au fost montate în capsule plate ceramice (*ceramic flat packs*), care continuă să fie folosite de mulți ani în aplicații militare și/sau spațiale, pentru fiabilitatea lor ridicată și dimensiunile lor mici. Când se pun multe cipuri legate între ele într-o singură capsulă, avem de a face cu o capsulă ce conține un sistem (*system in package* - SiP). Când mai multe cipuri sunt combinate pe un singur substrat mic, adesea ceramic, această capsulă se numește modul multichip (*multichip module* - MCM).

În ultimii ani, o nouă categorie de tehnologii de încapsulare a început să fie folosită, și anume încapsularea la nivel de plachetă (*wafer-level package* - WLP). Un exemplu îl reprezintă încapsularea la nivel de cip (*chip-scale package* – CSP), termen intrat în lexiconul industrial în 1994 [3] și definit ca o capsulă cu un perimetru care este mai mare de cel mult 1,2 ori față de perimetrul cipului pe care îl conține. Aceste capsule combină cele mai bune caracteristici ale asamblării cipului gol cu încapsularea tradițională, reducând dimensiunile totale ale sistemului, în spiritul produselor electronice portabile. WLP este utilizată la încapsularea CI la nivel de plachetă, în locul tradiționalului proces de încapsulare a fiecărei unități individuale de pe plachetă.

Funcționarea multor tipuri de dispozitive nano-, micro-, optoelectronice, medicale, etc. depinde de protecția pe care o oferă încapsularea lor ermetică. Anumite capsule pot crea însă un minimediu înconjurător extrem de aspru pentru dispozitivele pe care le adăpostesc; medii ambiante aspre externe, termice, mecanice sau chimice pot induce sau înrăutăți o mulțime de defectări ale dispozitivelor interne, după efectuarea testului de etanșeitate al capsulei sau, ulterior, în exploatarea curentă. În funcție de tipul dispozitivului adăpostit, vaporii, condensatul de umiditate, hidrogenul, oxigenul, hidrocarburile, amoniacul și alte gaze volatile pot deteriora sau distruge funcția dispozitivului [4]. Dispozitivele pot fi susceptibile la mecanisme de defectare cum ar fi coroziunea, scurgerile electrice sau instabilitatea, creșterea dendritelor, ceața, sticțiunea, etc.

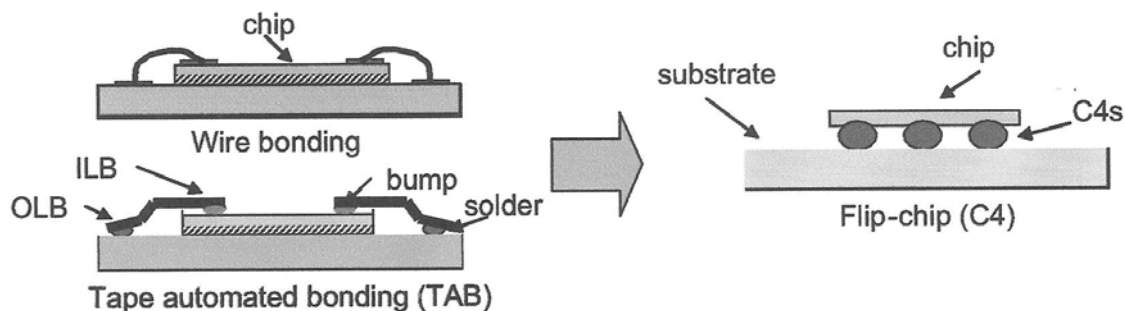


Figura 1. Evoluția tehnologiei de interconectare chip/capsulă. Industria părăsește treptat lipirea firelor (wire bonding) și tehnologia tape automated bonding (TAB), trecând la flip chip (sau cip răsturnat) C4 (controlled collapse chip connection) - v. Tabela 1. ILB= inner lead bonding; OLB =outer lead bonding [5].

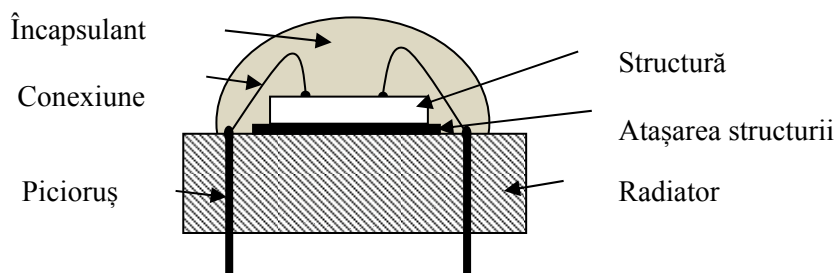


Figura 2. Încapsularea în material plastic a componentelor active [1].

Tabela 1. Posibilitățile de interconectare ale diferitelor tehnologii [6].

Tehnologie	Descriere	Conexiuni/cip
Lipirea firelor	Pas de asamblare, periferie	1.000
Lipire cu bandă automată (TAB)	Pas de asamblare, periferie	1.200
Cip răsturnat C4	Procesare plachetă, area array	16.000

Toate tehnologiile de asamblare (montaj) menționate cuprind cam aceleași procese:

- **Separarea:** Placheta este tăiată în blocuri dreptunghiulare, numite cipuri (*dies, chips*), fiecare conținând un dispozitiv.

- **Atașarea cipului:** Cipul (numit și *structură* în terminologia fabricanților români de dispozitive cu semiconductoare) este ferm atașat de substrat sau de o grilă (*lead frame*). Atașarea cipului trebuie să îndeplinească o serie de funcții critice: (i) Un bun drum termic între cip și baza capsulei, care este de obicei atașată la o aripioară de răcire (*heat sink*), utilizată pentru îndepărtarea căldurii generate în cip în timpul funcționării dispozitivului; (ii) Un bun contact electric între spatele cipului și capsulă; (iii) Aceste două roluri critice trebuie să fie jucate pe întreaga durată de viață a dispozitivului și în condițiile de mediu cerute de aplicație.

- **Atașarea firelor:** Există trei variante posibile (Figura 1): (i) Lipirea firelor (*wire bonding*), în care interconexiunile se fac cu fire metalice, de la traseele (*pads*) care se află de obicei la marginea cipului și până la conexiunile capsulei; (ii) Lipirea cu bandă automată (*tape automated bonding* –

TAB); și (iii) *Flip chip* (sau cip răsturnat) – vezi Tabela 1.

- **Încapsularea:** Întregul ansamblu este închis ermetic (în capsulă metalică sau ceramică) sau ne-ermetic, în material plastic (Figura 2). Validarea unei tehnologii de încapsulare se bazează pe încercări de fiabilitate (1000 ore la 85°C și 85% umiditate relativă). Încercările¹ se aplică pentru orice profil al misiunii, pentru toate încapsulările, indiferent de tehnologia componentelor utilizate.

2. MICROCIRCUITE ÎNCAPSULATE ÎN MATERIAL PLASTIC

Experiența ultimelor decenii a demonstrat, prin testări și calificări, că fiabilitatea și calitatea PEMs

¹ Condițiile de realizare ale acestor încercări nu sunt clar definite; de exemplu, aplicarea sau nu a unui puternic câmp electric la nivelul componentei. Or, acest singur parametru devine preponderent când sunt reunite condițiile pentru a permite fenomenele de coroziune.

(*plastic encapsulated microcircuits*) sunt excelente - pentru toate aplicațiile comerciale și industriale - și sensibil echivalente (ba chiar, în anumite cazuri) superioare capsulelor ermetice.

PEMs au o acceptanță mereu în creștere - față de tradiționalele capsule ceramice - în telecomunicații, aeronautică, automobile, până și în aplicații militare și spațiale, datorită avantajelor lor privind dimensiunile, greutatea, costul, disponibilitatea, performanțele și calitatea de a fi permanent "la zi" cu progresele de concepție și tehnologice.

Materialul plastic cel mai utilizat este epoxi, cu numeroase formule chimice ale fabricanților, bazat pe proprietățile sale optime și pe rezultatele obținute la testările și calificările de fiabilitate. O importantă proprietate este puritatea sa ionică, esențială pentru performanțele fiabiliste. Getteri aditivi sunt folosiți pentru a elimina ionii mobili, pentru a mări rezistența mecanică de tracțiune și pentru a elimina *popcorning*. Există numeroase proprietăți în funcție de care materialele plastice sunt recomandate și folosite *epoxy molding compound* (EMC) într-o selecție aspră de către fabricanți. Deși, în mod normal, obiectivele fabricanților sunt aceleași (încapsularea a cât mai multor componente, fiabilitate foarte bună și performanțe ridicate ale dispozitivului), EMC folosite sunt, totuși, diferite (datorită concepțiilor diferite de proiectare ale cipului, diferitelor procese ale semiconductoarelor, diferitelor echipamente de asamblare, diferitelor metode și rezultate ale testelor de fiabilitate și ale calificărilor, etc.).

3. DEGAZAREA

Din punct de vedere istoric, testarea degazării (*outgassing*) a fost pusă la punct pentru calificarea oricărui material plastic și/sau organic care - în vidul spațiului cosmic - ar putea transforma în gaze materiale volatile care s-ar putea condensa pe suprafețe optice sensibile. Cunoscând proprietățile de degazare ale PEMs - datorită diferitelor părți constitutive ale EMC utilizate de diferiți fabricanți de PEMs - nu se recomandă folosirea PEMs în industria spațială. *Plastic molding compound* PMC are o formulă complexă tipică, specifică unei anumite rășini, cu anumite adaosuri, care asigură proprietățile dorite ale respectivului dispozitiv și caracterizează fiecare fabricant de încapsulări electronice, în parte. De aceea nu se recomandă utilizarea acestor dispozitive în industria spațială. Formula respectivă include rășina epoxi, substanțele de întărire, amestecurile specifice compușilor folosiți, substanțele de umplere, acceleratoarele,

substanțele care întârzie apariția flacării, substanțele de cuplare, aditivele care reliefează stresul, coloranții, getterii ionici, etc. [7]. Dacă unul dintre aceste ma și/sau căldurii, el poate teriale produce gaze atunci când este expus în vid și/sau căldurii, el poate compromite buna funcționare și fiabilitatea fie a senzorilor, fie a opticii. Testul de degazare este folosit pentru identificarea și cuantificarea parametrilor măsurați pentru standardul respectiv [pierderile totale de masă (*total mass loss* TML), materialele volatile condensabile colectate (*collected volatile condensable materials* CVCM) și vaporii de apă recăștigați (*water vapour regained* (WVR)]. Cum formulele compușilor folosiți se schimbă în permanență, testul de degazare trebuie permanent utilizat pentru monitorizarea și/sau calificarea încapsulărilor respective, pentru a ști dacă pot fi folosite în aplicațiile critice din industria spațială.

4. ABSORBȚIA UMIDITĂȚII

Umiditatea poate provoca defectarea unei componente neîncapsulate ermetic. Capsulele în material plastic absorb umiditatea destul de repede. Majoritatea încapsulanților plastici sunt saturați (în echilibru cu atmosfera înconjurătoare timp de cca 24 ore). Dacă o capsulă în material plastic absoarbe suficientă umiditate, înainte de a fi fixat capsula pe suprafața unui circuit imprimat, căldura produsă în timpul operației de refuziune poate vaporiza această umiditate. Într-adevăr, în timpul încercărilor de fiabilitate, componenta încapsulată este supusă la temperaturi cuprinse între 210°C și 260°C timp de 30 secunde până la 5 minute. Aceste temperaturi ridicate, dar mai cu seamă viteza rapidă de încălzire, împiedică evacuarea umidității absorbite. Cum apa își mărește volumul de cca 1,7 ori trecând din starea lichidă în stare de vaporii, presiunea generată de acești vaporii provoacă un zgomot audibil "popcorn" (Figura 3) care caracterizează ruptura capsulei. Există și cazuri în care *popcorn* nu este audibil; acestea conduc la delaminări, găuri sau fisuri mai puțin importante, și constituie tot atâtea defectări latente care limitează fiabilitatea sistemului pe termen lung. Într-adevăr, întrucât materialul de încapsulare nu mai aderă la componenta pe care trebuie s-o protejeze, umiditatea se fixează la suprafața circuitului și face să crească astfel foarte mult susceptibilitatea la coroziune [8].

Umiditatea și contaminanții au tendința să se acumuleze la nivelul interfețelor diferitelor elemente ale unei capsule din material plastic. În particular, interfețele care au suferit delaminări între rășina de încapsulare și pasivare sunt locuri privilegiate de

adsorpție și, ulterior, de condensare localizată. La acest nivel, pot avea loc mecanisme de degradare prin coroziune. Degradările interfețelor care conduc la delaminări pot fi provocate de prezența contaminanților ionici, de zonele de concentrare a constrângerilor (zonele periferice ale pistelor metalizate și/sau ale componentelor, reliefuri relativ pronunțate, trepte și coturi) și prin expunerea prelungită la condiții severe de temperatură, umiditate și polarizare. Prezența apei și a unui câmp electric sunt suficiente pentru a iniția mecanisme de coroziune electrochimică.

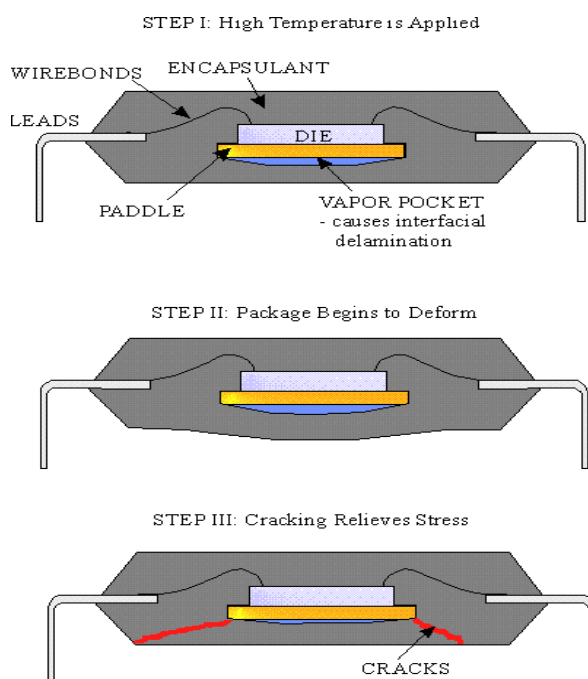


Figura 3. Exemple de evenimente popcorning. Prima fază: Aplicarea temperaturii ridicate. A doua fază: Capsula începe să se deformeze. Faza a treia: Crăparea, fisurile ușurează stresul [7].

Parametrii-cheie care stau la baza eficacității protecției unei componente electronice cu ajutorul unei mase plastice sunt: (i) Calitatea pe termen lung a adeziunii între rășina de încapsulare și suprafața componentei, în general pasivată cu un strat de material anorganic de nitru de siliciu sau material organic (benzociclobuten BCB). (ii) Gradul de contaminare ionică (halogenuri) – care trebuie să fie, de la început, cât mai slab cu putință – ținând seama de natura autocatalitică a reacțiilor de coroziune în prezența halogenurilor [9].

Unul din aspectele critice ale fiabilității PEMs este natura inherent higroscopică și absorbantă a materialelor epoxi folosite pentru încapsularea microcircuitelor. Numeroase studii au scos în evidență defectările pe care le provoacă coroziunea datorită contaminanților ionici și pătrunderii

umidității. PEMs sunt așadar susceptibile la problemele de intermitență introduse termic, când dispozitivele au de suferit din cauza circuitelor deschise, la temperaturi ridicate. În ultimii ani, datorită îmbunătățirii tehnicilor, a metodelor și formulelor de realizare a compuşilor, a tehnologiei de pasivare și a dispunerii circuitelor (*layout*), fiabilitatea părților realizate cu materiale plastice a crescut, astfel încât acestea au adesea performanțe la fel de ridicate ca și încapsulările ceramice, testate în condiții identice. Totuși, cum *surface-mount technology* (SMT) este folosită din ce în ce mai des pentru capsulele de mari dimensiuni, defectările capsulelor provocate de umiditatea indusă (cum ar fi delaminarea interfacială și *cracking*-ul din timpul retopirii de lipire (*solder reflow*) pot provoca probleme de fiabilitate. Delaminarea indusă de umiditate și *cracking*-ul (denumit și *popcorning*) reprezintă adevărate probleme. În această privință, *surface mount devices* (SMD) sunt mai susceptibile decât găurile (la *printed circuit board* PCB), întrucât ele sunt expuse unor temperaturi mai mari în timpul retopirii de lipire. Aceasta deoarece lipirea trebuie să aibă loc pe aceeași parte a plăcii ca și dispozitivul SMD. Pentru găuri, operația de lipire are loc sub placa care protejează dispozitivele contra sudurii fierbinți.

5. PROBLEME DE FIABILITATE

Adeziunea compusului care permite turnarea în tipar (*moulding compound*) are influență asupra fiabilității diferitelor elemente din interiorul dispozitivului, mai cu seamă asupra suprafeței cipului. Acest tip de probleme a fost corelat cu circuitele electrice intermitent deschise datorită temperaturii ridicate și coroziunii. Delaminarea lipirii firelor poate să degradeze interfața atașării lipiturilor datorită forțelor mecanice ce se exercită asupra lipirii cu bilă (*ball bond*) la ciclarea termică. Aceasta poate provoca cracarea siliconului aflat sub lipitura cu bilă.

Altă problemă de fiabilitate este crăparea cipului, ca urmare a manipulării mecanice incorecte în timpul procesului de încapsulare. Acest tip de probleme poate să nu apară la testarea electrică, dar el va provoca o defectare permanentă la ciclarea termică repetată, din timpul utilizării.

Încapsulările în material plastic pot fi subiectul și altor probleme potențiale de fiabilitate; pentru detectarea lor se folosește o tehnică nedestructivă denumită imagine micro-acustică (*acoustic micro imaging*).

Stresul temperatură și polarizare negativă (*negative bias temperature* - NBT) este altă cauză

importantă a generării de stări de interfață. Degradarea tranzistorului în acest mod se numește instabilitate de polarizare negativă și temperatură (*negative bias temperature instability* - NBTI) și se produce atunci când un *p*MOSFET are poarta conectată la o tensiune mare. Aceasta este una din problemele cele mai serioase privind fiabilitatea [10].

6. ATAȘAREA CIPULUI [2]

Atașarea cipului se poate face cu epoxi, eutectic sau sticlă. Metoda de atașare cu epoxi lipește cipul de grilă prin folosirea unui epoxi. Atașarea cu eutectic utilizează o peliculă subțire de aur pe spatele plachetei, apoi aurul este aliat cu suprafața metalizată a grilei. Sticla folosește de fapt un amestec de argint și sticlă într-un mediu organic, fiind utilizată la atașarea cipurilor la capsulele ceramice [11].

Un mecanism important de defectare indus la atașarea cipului este **liftarea cipului** (*die lifting*), care înseamnă detașarea cipului de traseu sau cavitare. Sunt două cauze posibile ale liftării cipului [12]:

- O fractură în materialul de atașare (defectare de coeziune);
- Delaminarea între spatele cipului și materialul de atașare, sau între materialul de atașare și traseul cipului (defectare de adeziune); În acest caz, primul pas în analiza defectărilor este identificarea tipului de liftare a cipului responsabil pentru defectare.

Defectările de coeziune pot fi produse de nepotriviri de material, goliri excesive de material, grosimi neadecvate de trasee etc. Forța de fracturare a materialului de atașare a cipului este micșorată, ceea ce poate duce la defectare atunci când sunt aplicate stresuri termo-mecanice (ciclare termică, stocare la temperatură ridicată, teste de accelerație constantă). Când se întâmplă așa ceva, mai întâi apar crăpături, apoi materialul de atașare a cipului se fracturează în mijloc, ducând la desprinderea cipului, cu material de atașare încă rămas atât pe spatele cipului, cât și pe traseele cipului. Golirile de material pot duce la degradare prin supraîncălzire.

Degradarea forței mecanice a materialului de atașare a cipului poate fi provocată și de degradarea chimică în timp sau produsă de forțe externe, cum ar fi umiditatea, temperatura etc. Cauzele de mai sus sunt responsabile și pentru defectările de adeziune, dar există și o cauză specifică a acestui mecanism de defectare, și anume prezența contaminanților pe spatele cipului, care poate duce la delaminarea materialului de atașare a cipului de cipul însuși, în

timp ce contaminanții de pe traseul cipului pot duce la delaminarea între materialul de atașare a cipului și traseul cipului. Oricum, rezultatul este desprinderea cipului. Acest proces poate fi accelerat prin testul de rezistență la încălzirea la sudură (*solder heat resistance test* - SHRT), ciclare termică și șoc termic, și identificat prin inspecție vizuală.

7. CONCLUZII

Miniaturizarea echipamentelor electronice și asigurarea unei fiabilități ridicate, pentru costuri competitive, sunt – de totdeauna – cerințele majore în mai toate domeniile industriale: produse pentru publicul larg (telefonie mobilă portabilă, computere pentru uz personal, aparate foto, etc.), sisteme informatice, telecomunicații, medicină, automobile, aeronautică, sisteme militare și spațiale.

Începând cu decada 1980, încapsulările în materiale plastice, mai ieftine și mai puțin voluminoase decât capsulele ceramice sau metalice, individuale sau multiple, au început să se generalizeze în mai toate domeniile. Aceasta a coincis cu sosirea pe piață a materialelor organice ale căror caracteristici de degazare și de impuritate ionică erau suficiente pentru asigurarea fiabilității componentelor. Doar sistemele spațiale și, parțial, cele militare au rezistat la această uniformizare.

Bibliografie

1. **Bâzu M., Băjenescu T.-M.** *Reliability Issues of Epoxy Materials Used in Microtechnologies. Actes du troisième colloque francophone Pluridisciplinaire sur les Matériaux, l'Environnement et l'Electronique (PLUMEE), Bacău, 22-25 mai 2013.*
2. **Băjenescu T.-M., Bâzu M.** *Mecanisme de defectare ale componentelor electronice, Editura Matrix Rom, București, 2012.*
3. **Thomson P.** *Chip-Scale Packaging. IEEE Spectrum, August 1997, pp. 36-43.*
4. **Robert K. Lowry, Richard C. Kullberg, Daniel J. Rossiter.** *Harsh Environments and Volatiles in Sealed Enclosures. Proceedings, Surface Mount Technology Association, International Technical Conference, October 24-28, 2010, Orlando, FL, pp. 380-386.*
5. **Datta M., Osaka T., Schultze J. W. (eds.),** *Microelectronic Packaging, CRC Press, 2005.*
6. **Rymaszewski E. J., Tummala R. R., Watari T.** *In Microelectronic Packaging Handbook, Part I, 2nd edition, R. R. Tummala, E. J. Rymaszewski, and A. G. Klopfenstein (eds.), Chapman and Hall, NY, 1997.*
7. **Mike Sandor.** *Plastic Encapsulated Microcircuits (PEMs) Reliability / Usage Guidelines for Space*

Applications". Jet Propulsion Lab., California Institute of Technology, Pasadena, CA, Oct. 9, 2000.

8. Gallo A. A., Munamarty R. Popcorning: A Failure Mechanism in Plastic-Encapsulated Microcircuits," *IEEE Transactions on Reliability*. 1995, Vol. 44, 3, pp. 362-367.

9. Bennaceur Walim. Evaluation des solutions d'encapsulation quasi-hermétique pour les composants actifs hyperfréquences. Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 13.06.2013.

10. Hongxia L., Yue H., Zhu J. A Study of Hot-Carrier-Induced Breakdown in Partially Depleted SIMOX MOSFETs. *Journal of Electronics*, Vol. 19, No. 1, 2002, pp. 50-56.

11. Czernohorsky J., et al. Evaluation of the Impact of Solder Die Attach Versus Epoxy Die Attach in a State of the Art Power Package. *Proceedings of 13th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems Thermic*, 2007, Budapest, Hungary.

12. * * *, "Die Lifting," *Siliconfareast.com*, <http://www.siliconfareast.com/die-lifting.htm>.