

VISOKOPOSPEŠENO TESTIRANJE ELEKTROMIGRACIJE V Al VODNIKI NA NIVOJU REZIN

Marijan Maček, Al V. Kordesch

Ključne besede: mikroelektronika, vezja integrirana, metalizacija, elektromigracija, prevodniki aluminijevi, testiranje visokopospešeno, BEM energija kovin, SWEAT testiranje, MTTF odpovedi, MEF energija odpovedi, TTF čas odpovedi

Povzetek: Podan je kratek teoretičen pregled dveh najpogosteje uporabljenih visokopospešenih testov elektromigracije na nivoju rezine. Prikazani eksperimentalni rezultati kažejo na dobro korelacijo med testoma BEM in SWEAT. Kljub visokemu faktorju pospešitve, s tipičnim časom testiranja od 10-100s, kažejo rezultati obeh testov na različnih testnih strukturah podoben trend napovedanega časa odpovedi pod normalnimi delovnimi pogoji ($2\text{MA}/\text{cm}^2$, 60°C) kot konvencionalni test EM na inkapsuliranih vezjih.

Highly Accelerated Electromigration Testing of Al Conductors on Wafer-level

Key words: microelectronics, integrated circuits, metallization, electromigration, aluminium conductors, highly accelerated testing, breakdown energy of metals, SWEAT patterns, mean time to failure, mean energy to fail, time to failure

Extended Abstract: Electromigration (EM) in Al conductors is one of the three most important factors affecting reliability of modern integrated circuits. To reduce the need for expensive and time consuming procedure on the packaged devices (up to 2×10^7 devicehours of testing) as much as it is possible, now highly accelerated EM tests have been developed. Two of them, Breakdown Energy of Metal (BEM) and Standard Wafer-level Electromigration Test (SWEAT) are discussed in the paper.

At the beginning a short introduction into the theory of the EM is made. After the introduction of the Shafft's equation for the thermal response of the straight conductor line under the stress current, the theory is extended to the special SWEAT structure. The Newton-Raphson algorithm gives the solution of the Black's transcendent equation at any time in the term of the current to keep the stress (target time to fail) constant. In the same way the measurements of the energy accumulated in conductor during the BEM test was introduced. Finally some measurements of the most important parameters for both tests are shown. Results show the constant stress SWEAT test is performed generally at lower temperature (approximately 350°C for the test time less than 100 s) than the BEM test (temperature where about 90% of the energy is accumulated is higher than 400°C for the same test time). This means the mechanism of the EM during the SWEAT test is closer to the pure grain boundary migration which prevails at lower temperatures than during the BEM test. Anyway the measured activation energy $E_a = 1.18 \text{ eV}$ is between the values reported for the bulk and grain boundary diffusion.

In the second part the results of both level tests are compared with each other as well with the conventional test performed at packaged level in the oven at 150°C under the moderate stress current of $4 \text{ MA}/\text{cm}^2$. Results show a good correlation between all three compared tests. But generally the expected median time to fail under the use condition calculated from the constant stress test performed on the SWEAT structures as well as on the straight metal lines is underestimated regarding the conventional procedure. On the other hand BEM test gives overestimated results.

From the results obtained in the industrial environment we can conclude SWEAT and BEM tests can be used as a fast, valuable tool to monitor the resistance of the Al conductors against the EM in the frame of the statistical process control.

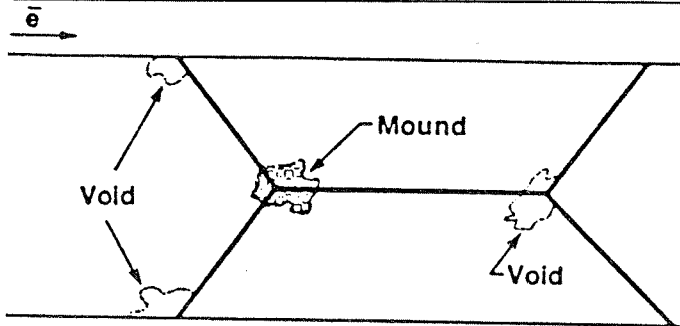
1.0 Uvod

Pred proizvajalci kompleksnih integriranih vezij (IV) so vedno hujše zahteve glede zanesljivosti delovanja vezij. V bližnji bodočnosti se bo zahtevala že tako visoka kvaliteta, da se resno postavlja vprašanje o smiselnosti do sedaj standardnih življenjskih testov. Že danes se zahteva testiranje 2×10^7 vezij x ur, da se zagotovi pogostost odpovedi pod 10 FIT^1 s 50% intervalom zaupa-

nja, v naslednjih letih pa se bo obseg testiranja povečal tudi prek 10^9 vezij x ur (1).

Navedeni obseg testiranja nujno pripelje do tega, da je potrebno število testiranj zmanjšati na minimalni obseg. Zato se v zadnjih letih razvijajo metode, ki zmanjšale potrebo po dragih življenjskih testih. Pojavljajo se novi matematični modeli (na primer *BERT*(1)), ki omogočajo napovedovanje kritičnih mest na vezjih glede zanesljivosti že med samim postopkom načrtovanja. Po drugi strani pa se v produkciji uveljavljajo metode, ki omogočajo sprotno zasledovanje kvalitete IV na nivoju rezine z visoko pospešenimi testi. Ker je tipičen čas testov 10-100s, se lahko izvajajo skupaj s parame-

¹ 1 FIT je 10^{-9} odpovedi na vezje v 1 uri.



Slika 1: Prikaz tvorbe praznin in kopičenja ionov v prevodni liniji iz čistega Al po enostavnem divergenčnem modelu.

omogočajo sprotno zasledovanje kvalitete IV na nivoju rezine z visoko pospešenimi testi. Ker je tipičen čas testov 10-100s, se lahko izvajajo skupaj s parametričnimi testi, kar omogoča zelo hitro povratno informacijo. Trije najpomembnejši mehanizmi odpovedi, ki vplivajo na zanesljivost delovanja IV so:

Elektromigracija (EM), ki je pomembna predvsem na povišanih temperaturah, saj znaša aktivacijska energija E_a od 0.54 eV za Al-1%Si do približno 0.7 eV za Al-1%Si-0.5%Cu.

Časovno odvisni preboj dielektričnih plasti (Time Dependent Dielectric Breakdown), ki je odgovoren za večino zgodnjih odpovedi, vendar izkazuje nekoliko manjšo temperaturno odvisnost ($E_a = 0.5$ eV).

Efekt vročih elektronov (Hot Electron Effect) postaja vse pomembnejši z zmanjševanjem dimenzij tranzistorjev. Obratno od prvih dveh mehanizmov ima negativno aktivacijsko energijo, kar pomeni, da na povišanih obratovalnih temperaturah postaja relativno manj pomemben od EM in TDDB.

2.0 Elektromigracija

V kovinskih povezavah sodobnih IV so po načrtovalskih pravilih dovoljene visoke gostote tokov, vse do 0.2 MA/cm². Gibanje elektronov ali takoimenovan "elektronski veter" povzroči transport ionov v nasprotni smeri električnega polja (sl. 1). Ionski tok je proporcionalen električnemu, pri čemer je difuzijska konstanta ionov odvisna tudi od snovnih parametrov, $j_{ion} \propto D_{ion}(T, \dots)$ je. Posledica masnega transporta je kopičenje ionov na področjih, kjer je transport otežen, ter tvorba praznin na področjih ugodnejših za ionski transport. Pogoj za pojav EM je od nič različna divergenca ionskega toka, $\nabla j_{ion} \neq 0$, kar je lahko poleg prikazane geometrije posledica gradientov temperature, mikrostrukture, nečistoč ali napetosti v plasteh. Najlaže prihaja do difuzije ionov vzdolž meja kristalnih zrn ($E_a = 0.554$ eV za Al-1%Si), medtem ko je pojav v notranjosti kristala opazen le pri višjih temperaturah ($E_a = 1.48$ eV) (2). Majhen dodatek bakra povzroči tvorbo precipitativ na meji, kar znatno upočasni difuzijo. Tipično izmerjene aktivacijske energije za Al-1%Si-0.5%Cu zlitino so okrog 0.75 eV.

V skladu z vakančnim modelom EM (3) zapišemo čas, v katerem odpove 50% testnih struktur (*Median Time to Fail, MTTF*) pod poljubno tokovno obremenitvijo z naslednjo enačbo:

$$MTTF = \frac{A_{DC}(T)}{|j|^{m-1} \bar{j}} \cdot \left(1 + \frac{A_{DC} (|j| - \bar{j})}{A_{AC} \bar{j}} \right)^{-1} \quad (1)$$

V primeru obremenitve s konstantnim enosmernim tokom preide gornji izraz v znano empirično Blackovo enačbo (2):

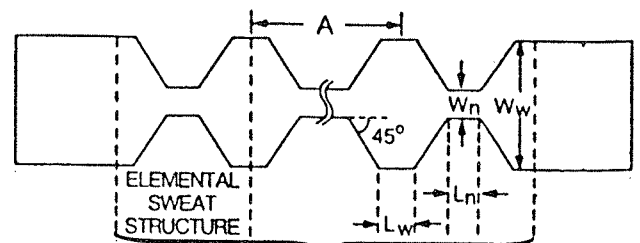
$$MTTF_{DC} = A_0 j^m \exp\left(\frac{E_a}{KT}\right) \quad (2)$$

v kateri pomeni m potenco tokovne odvisnosti, $m \approx -2$.

Elektromigracijo lahko torej pospešimo s povečevanjem toka in povišanjem temperature testa. V primeru testiranja inkapsuliranih vezij je zgornja meja temperature okrog 240°C, medtem ko so tokovi omejeni na 2-4 MA/cm², ko se segrejejo kovinske linije že prek 20°C nad temperaturo okolja. Dosegljiv faktor pospešitve je torej okrog 10⁴. Za tipično testiranje potrebujemo torej nekaj deset ur in več. V primeru testiranja na nivoju rezine lahko dosežemo mnogo višje temperature in tokove in posledično do tisočkrat višje faktorje pospešitve. Tipičen čas za visokopospešen test na nivoju rezine je potemtakem nekaj deset sekund.

V zadnjih nekaj letih je bilo razvitih več metod za testiranje EM na nivoju rezin. Najpomembnejši med njimi sta **metoda meritve prekinitvene energije kovinske linije** imenovana s kratico BEM (4) (Breakdown Energy of

$$W_n = 2.0 \mu m, W_w = 16.7 \mu m, L_n = 8 \mu m, \\ L_w = 8.3 \mu m, A = 23.6 \mu m, t_{m1} = 0.65 \mu m, \\ t_{m2} = 0.9 \mu m, t_1 = 1.2 \mu m, t_2 = 2.2 \mu m, \\ \beta = 3.8 \times 10^3 /K, \gamma_{R-T} = 1.08-1.21, N_{seg} = 21$$



Slika 2: Shematski prikaz testne strukture SWEAT z najpomembnejšimi parametri, kakor so bili uporabljeni pri naših testih na dveh različnih nivojih metalizacije. $t_{m1,2}$ je debelina prvega oziroma drugega nivoja metalizacije, $t_{1,2}$ pa pod njim ležečega dielektrika.

Metals) in **standardni pospešeni test EM na nivoju rezine**, poznan s kratico SWEAT (5) (Standard Wafer-level EM Accelerated Test). Pri obeh testih poteka segrevanje kovinske strukture s pomočjo sproščene Joulove toplote v kovini, dodatno zunanje segrevanje substrata pa ni potrebno. V primeru testa BEM je struktura kovinska linija enakomerne širine in dolžine več sto mikrometrov z različnimi topografijami, ki naj vsebujejo tudi najbolj neugodne primere stopnic. Za SWEAT test se uporabljajo posebej zato razvite strukture z izmenično si sledečimi širokimi in ozkimi segmenti, kakor je to prikazano na sliki 2. Tudi v tem primeru naj bodo ozke linije načrtane prek najneugodnejših topografij. Tako načrtana struktura je še dodatno občutljiva na pojav EM, saj ciklično spreminjanje preseka povzroči divergenco gostote toka, kar skupaj z različno sposobnostjo odvajanja toplote povzroči pojav termičnih gradientov. Bistvena razlika med obema testoma pa je v načinu izvajanja testa. Pri testu BEM stopničasto povečujemo tok, dokler se linija ne prekine podobno kot varovalka. Nasprotno pri testu SWEAT s primernim matematičnim algoritmom poskrbimo za čim konstantnejši faktor pospešitve. Seveda pa je možno test izvajati tudi pri konstantnem toku ali temperaturi, ter seveda tudi na preprosti enakomerno široki kovinski liniji.

2.1 Standardni pospešeni test elektromigracije na nivoju rezine (SWEAT)

Prvič sta test predstavila leta 1985 Root in Turner (5). Glavna odlika tega visokopospešenega testa EM je njegova visoka sposobnost absorpcije Joulove toplote in linearna odvisnost upornosti od sproščene moči. Tipično so dosegljive vsaj 2 krat večje gostote toka v ozkem segmentu kakor v enakomerno široki liniji. To omogoča, da je tipična temperatura med testom pod 350°C, kjer dominantni mehanizem migracije ni več difuzija v notranjosti kristalnih zrn.

Za pravilno interpretacijo rezultatov testa SWEAT je potrebno poznati temperaturo v ozkem segmentu širine W_n . Za izhodišče si vzamemo Schaffrov /6/ model za izračun temperature v zelo dolgi ($l \rightarrow \infty$) kovinski liniji skozi katero teče električni tok I .

$$T - T_s = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{1}{\left(K_i (1 + \alpha t_i / W) W^2 t_m / (\beta \rho_o t_i) \right)^2 - 1} = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{1}{(I_o / I)^2 - 1} \quad (3)$$

T_s = temperatura Si substrata

$t_{m,i}$ = debelina kovine in pod njo ležeče izolacijske plasti
 W = širina kovinske linije

K_i = toplotna prevodnost izolatorja

α = robni korekcijski faktor, $\alpha = 0.88$ za $l \rightarrow \infty$

ρ_o = specifična upornost kovine pri T_s (Ωcm)

β = koeficient temperaturne odvisnosti upornosti kovine

Za strukturo SWEAT z neenakomerno širino W določimo povprečen dvig temperature $\langle T - T_s \rangle$ iz naslednje enačbe:

$$\langle T - T_s \rangle = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{1}{(I_o / I)^2 - 1} = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{R - R(T_s)}{R(T_s)} \quad (4)$$

V tem primeru je kritični tok I_o definiran na nekoliko bolj kompliciran način prek "povprečne" širine W . Vsekakor pa velja še naprej zveza med močjo P in spremembo upornosti $\Delta R = R - R(T_s)$

$$I_o^2 = \frac{P}{\Delta R} = \frac{K_i t_m \langle W^2 \rangle}{\rho_o \beta t_i} \quad (5)$$

Poleg povprečnega dviga temperature, nas zanima tudi maksimalna temperatura T_n^{Max} , ki je povezana s povprečnim dvigom z naslednjo zvezo:

$$T_n^{\text{Max}} - T_s = \gamma \langle T - T_s \rangle \quad (6)$$

Parameter γ je komplicirana funkcija geometrije strukture in tokovne obremenitve. V nekoliko modificiranem Root-Turnerjevem modelu (7) izračunamo γ iz geometrijskih podatkov:

$$\gamma = \frac{(n_n + \lambda n_t) \cdot (n_n + n_w + n_t)}{(n_n + \lambda n_t)^2 + (n_w + (1 - \lambda) n_t)^2} \quad (7)$$

$n_{n,w,t}$ = število kvadratov ozkega, prehodnega in širokega območja strukture

λ = parameter; $\lambda = 0$, če prehodno območje obravnavamo kot široko, oziroma $\lambda = 1$, če ga obravnavamo kot ozko območje.

Za strukturo prikazano na sliki 2 ima γ vrednosti 1.21 ($\lambda = 0$), oziroma 1.08 ($\lambda = 1$). Korektnije rezultate za faktor γ , oziroma porazdelitev temperature po liniji dobimo z rešitvijo naslednje normalizirane diferencialne enačbe, ki opisuje razmere v eni dimenziji:

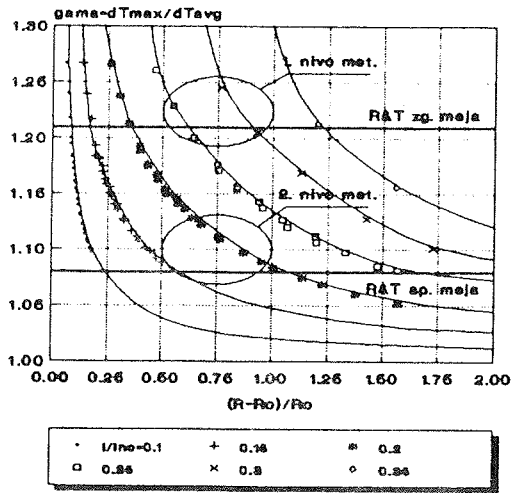
$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial u^2} = -A(1 + \Theta) + B \left\{ \frac{W(u)}{W_n} (W(u) + \alpha t_i) \right\} \Theta$$

$$\Theta = \beta (T - T_s), A = (I/I_n)^2, B = \frac{K_i W_n^2}{K_m t_i t_m}, I_n^2 = \frac{K_m t_m^2}{\beta \rho_o} \quad (8)$$

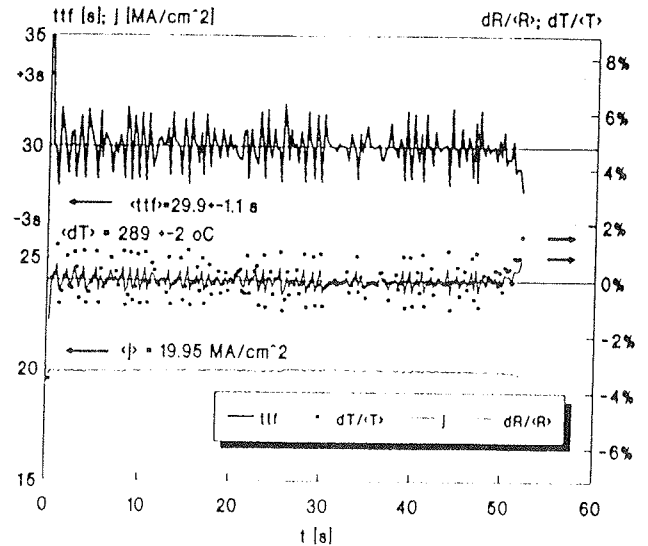
u = brezdimenzijska mera števila kvadratov vzdolž strukture

K_m = toplotna prevodnost kovine.

Odvisnost koeficienta γ od spremembe upornosti $\Delta R/R(T_s)$ izračunana na osnovi 1-D modela (8) in z upoštevanjem temperaturno odvisnih koeficientov toplotne prevodnosti kovine in izolatorja za strukturo s



Slika 3: Odvisnost parametra $\gamma = (T_n^{Max} - T_s) / \langle T - T_s \rangle$ od spremembe upornosti $\Delta R/R(T_s)$ preračunano po 1-D modelu za različne tokovne obremenitve.



Slika 4: Izmerjeni parametri pomembni za izvedbo testa SWEAT s konstantnim faktorjem pospešitve oziroma konstantnim ciljnim časom odpovedi TTF.

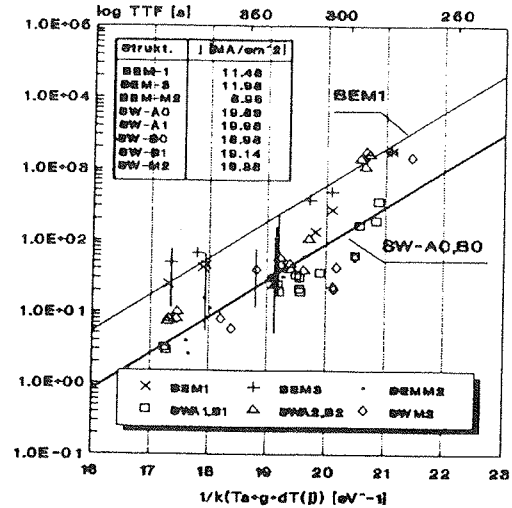
slike 2 je prikazana na sliki 3. Vrednosti $\gamma = 1.21$ in $\gamma = 1.08$ sta dobri oceni za prvi oziroma drugi nivo metalizacije.

Test SWEAT se kot je že bilo omenjeno izvaja tako, da je faktor pospešitve konstanten, kar lahko izrazimo z ciljnim časom odpovedi TTF. Razvit je bil matematičen algoritem, ki omogoča vsak trenutek izračun potrebnega toka na osnovi meritve upornosti strukture. S kombinacijo enačb (2) in (3), ter upoštevanjem enačb (4) in (6) dobimo transcendenten izraz za tok I, ki ga rešimo z **Newton-Raphsonovo** metodo:

$$F(I) = (TTF) I^{(1/m)} \exp\left(\frac{E_a}{km \left\{ T_s + (\gamma/\beta) \left((I_0/I)^2 - 1 \right) \right\}}\right) - I = 0 \quad (9)$$

Rezultat meritve parametrov med izvajanjem obremenitve na eni od testnih struktur je prikazan na sliki 4. Vidimo, da sorazmerno majhna nihanja v temperaturi in upornosti prispevajo k znatni (3%) nenatančnosti parametra TTF, kar pa je razumljivo če upoštevamo eksponentno odvisnost v (2).

Parameter A_0 in aktivacijska energija, potrebna za izračun TTF iz enačbe (2) sta bila določena iz odvisnosti MTTF od $1/kT$ prikazane na sliki 5. Izmerjena aktivacijska energija določena za temperature od 250-400°C znaša 1.18 ± 0.10 eV. To je znatno nad literaturno vrednostjo 0.7-0.8 eV za zlitino Al-1%Si-0.5%Cu določeno s konvencionalnimi testi na temperaturi pod 240°C in blizu vrednosti 1eV poročani v (9) za podobne pogoje obremenjevanja². Konstanta A_0 zavzema za

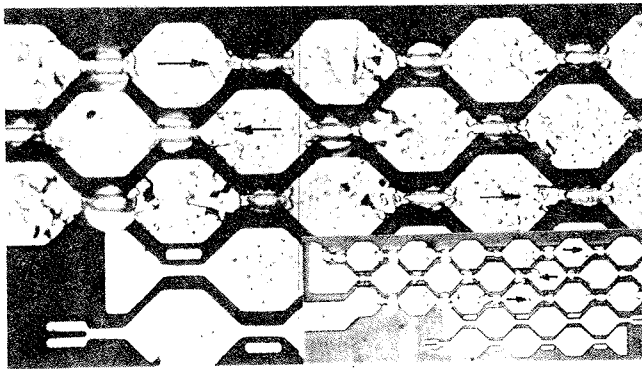


Slika 5: Odvisnost MTTF merjeno na različnih testnih strukturah, ter z različnimi temperaturami substrata v odvisnosti od $1/kT$. Za primerjavo so dodane tudi vrednosti MTTF merjene na kovinskih linijah za test BEM.

različne strukture vrednosti od 6×10^3 do $3 \times 10^4 \text{ A}^{1.7} \text{ cm}^{-3.4} \text{ s}$ ($E_a = 1.18 \text{ eV}$, $m = -1.7$).

Na sliki 6 je prikazan mikroskopski posnetek strukture SWEAT, ki pokaže kopičenje kovine v ozkem segmentu in tvorbo praznin v prehodnem in širokem segmentu po dolgotrajnem ($> 10^4 \text{ s}$) obremenjevanju s tokom $j = 18.5 \text{ MA/cm}^2$, kar je povzročilo povprečen največji dvig temperature $\Delta T_{max} = 324^\circ C$.

² Določeno za temperaturni interval od 210-310°C in tok 16 MA/cm².



Slika 6: Mikroskopski posnetek povsem pasivirane strukture SWEAT po netipično dolgotrajni ($> 10^4$ s) obremenitvi. ($\bar{j} = 18.5 \text{ MA/cm}^2$, $\Delta T_{\text{max}} = 324^\circ \text{C}$). Puščica kaže smer elektronskega toka.

2.2. Metoda meritve prekinitvene energije (BEM)

Istočasno kot test SWEAT se je pojavil tudi drugi močno razširjeni visokopospešeni test EM. Vpeljala sta ga C.C. Hong in D.L. Crook (4). Pri tem testu se primerja akumulirana energija pri kateri odpove polovica struktur (Median Energy to Fail, MEF) z MTTF. Konstanta A_0 v enačbi (2) je proporcionalna specifični upornosti ρ , povprečni prosti poti l , hitrosti v in ionskemu sipalnemu preseku σ , $A_0 = K'(l\sigma/v)$. Ob predpostavki, da je $m=-2$, in upošteva $j=l/(Wt_m)$ preuredimo Blackovo enačbo (2) tako, da jo zapišemo v obliki proporcionalni akumulirani energiji na enoto dolžine linije L z upornostjo R ;

$$\text{Konst} = \text{MEF} = \frac{(Wt_m)^2}{K' (l\sigma/v)} = I^2 \left(\frac{R}{L} \right) \exp \left(\frac{-E_a}{kT} \right) \text{MTTF}. \quad (10)$$

Iz gornje enačbe sledi naslednji izraz, ki povezuje srednjo energijo in čas odpovedi:

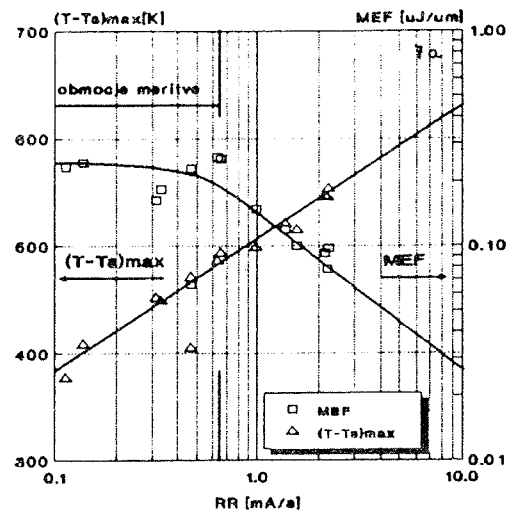
$$\text{MTTF} = \frac{\text{MEF}}{(RL)} I^{-2} \exp \left(\frac{E_a}{kT} \right). \quad (11)$$

Test BEM se izvaja tako, da se enakomerno (stopničasto ali zvezno) povečuje tok skozi testno strukturo, vse dokler se le-ta ne prekine. Energijo odpovedi EF na enoto dolžine dobimo z integriranjem moči v intervalu od $t=0$ do trenutka odpovedi $t=t_{\text{odpoved}}$:

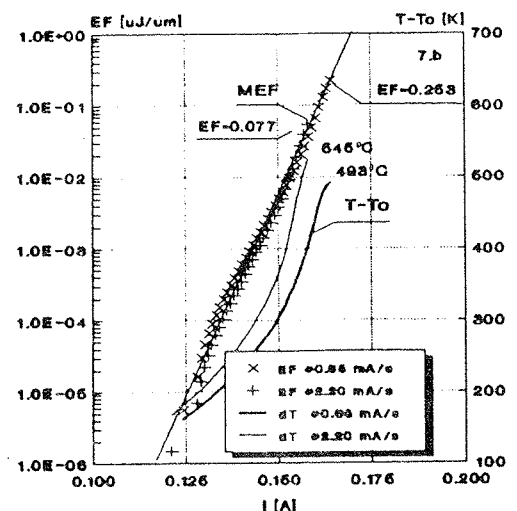
$$\text{EF} = \int_{t=0}^{t_{\text{odpoved}}} I(t)^2 \left(\frac{R(t)}{L} \right) \exp \left(\frac{-E_a}{kT(t)} \right) dt. \quad (12)$$

Vendar hitrost spreminjanja toka (RR) ne sme biti prevelika, ker postane meritev odvisna od RR. Za testne linije, kakršne smo uporabili pri naših meritvah³ se izkaže, da mora biti RR manjši od 0.05 MA/cm^2 , kar je lepo vidno iz slike 7a. Iz slike vidimo tudi, da je zadnja izmerjena temperatura pred prekinitvijo linije skoraj linearna funkcija RR. Slika 7b nam pokaže, kako se spreminja temperatura med povečevanjem toka skozi linijo. Vidimo tudi, da je prirastek EF pomemben le pri

³ $L = 480 \mu\text{m}$, $W = 2 \mu\text{m}$, $t_{m1,(2)} = 0.65, (0.9) \mu\text{m}$, $t_{1,(2)} = 1.2, (2.2) \mu\text{m}$



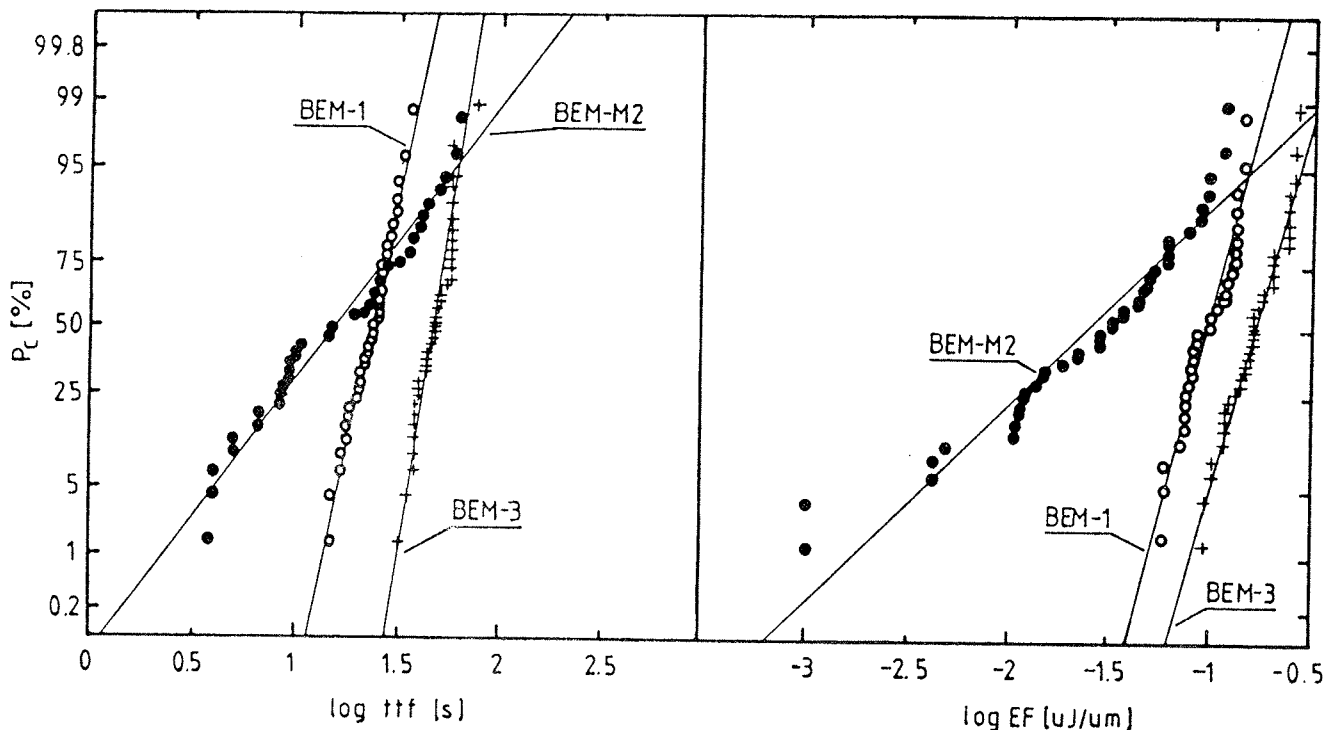
Slika 7: a) Odvisnost MEF in ΔT_{max} od logaritma hitrosti (log-RR) spreminjanja toka skozi strukturo. Za prikazano strukturo je kritična hitrost okrog 0.05 MA/cm^2 . V tem primeru bodo maksimalne temperature pod 500°C . b) Prirastek temperature in energije med poviševanjem toka skozi strukturo z dvema različnima hitrostima RR.



povišanih temperaturah. Večina energije je akumulirana pri temperaturah nad 400°C , kar pomeni, da je prevladujoči mehanizem EM difuzija v kristalnem zrnu in ne na njegovih mejah. Le z zelo počasnimi spremembami toka, kar pomeni nepraktično dolgimi časi testiranja se da znižati maksimalne temperature odpovedi.

3.0 Primerjava rezultatov pospešenih testov EM

Zanimivo je primerjati rezultate obeh visokopospešenih testov EM na nivoju rezine med seboj in z rezultati dobljenimi na rezinah iz iste šarže po običajnem testiranju na inkapsuliranih vezjih. Testi so bili narejeni na različnih testnih strukturah prvega in drugega nivoja metalizacije. Zaradi primerjave obeh testnih metod je bil izveden test SWEAT (s konstantnim ciljnim TTF) tudi na



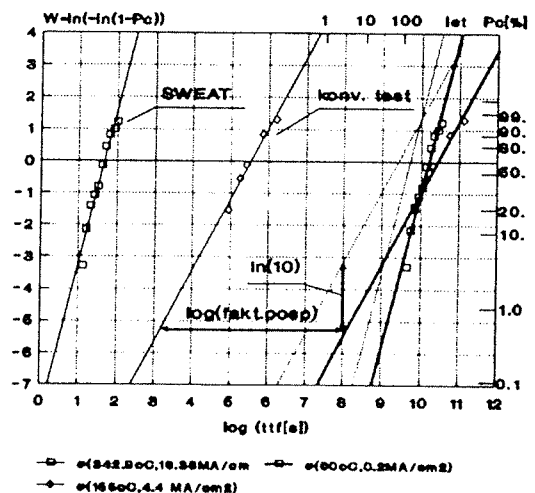
Slika 8: Log-normalni porazdelitvi časa odpovedi t_{ff} pod testom konstantne obremenitve (a), ter energije odpovedi E merjene s testom BEM (b). Rezultatih z obeh slik so dobljeni na kovinskih linijah z nominalnimi podatki $L=480 \mu m$, $W=2 \mu m$, $t_{m1} = 0.65 \mu m$, $t_{m2} = 0.9 \mu m$, $\rho=3.25 \mu\Omega cm$. (BEM-1 je linija s stopnicami, BEM-3 brez stopnic, BEM-M2 linija s stopnicami na drugem nivoju metalizacije).

metalnih linijah namenjenih drugače za test BEM. Na sliki 8 sta primerjani porazdelitvi $\log-t_{ff}$ za test s konstantnim ciljnimi TTF in $\log-E$ za test BEM. Oboje je bilo merjeno na istih rezinah in testnih strukturah namenjenih za test BEM (v naprej oznaka BEM/SW, oziroma BEM/BE). Očividno sta obe porazdelitvi dokaj podobni. Izstopa dejstvo, da ima porazdelitev obeh merjenih količin za drugi nivo metalizacije (BEM-M2/SW, BE) večjo standardno deviacijo, kot porazdelitev za topografsko ustrezno linijo na prvem nivoju metalizacije (BEM-1/SW, BE), ter da ima manjšo srednjo vrednost. Prav tako opazimo, da je 50 percentilna vrednost obeh merjenih količin na liniji brez stopnic (BEM-3) večja, kot na liniji s stopnicami BEM-1 na istem nivoju. V insertu obeh slik opazimo tudi zapisane pomebnejše parametre meritev.

V tabeli 1 so prikazani rezultati meritev prikazanih na sliki 8, kakor tudi rezultati dobljeni na strukturi namenjeni testu SWEAT. Za primerjavo so dodani še rezultati klasičnega testa na inkapsuliranih vezjih iz istih rezin. Na osnovi rezultatov so narejene tudi napovedi za čas odpovedi posameznih struktur pod različnimi pogoji. Napovedani rezultati se ujemajo znotraj velikostnega razreda, pri čemer so napovedi narejene na osnovi rezultatov meritve energije precenjene nasproti napovedim na osnovi konvencionalnega testa in podcenjene pri testu s konstantnim faktorjem pospešitve.

Poglejmo si še grafični prikaz porazdelitve odpovedi pod normalnimi delovnimi pogoji dobljene iz pospešenega

testa SWEAT in konvencionalnega testa za strukturo SWEAT-M2 (sl. 9). S preprostim premikom porazdelitvene krivulje za logaritem faktor pospešitve vidimo, da se obe krivulji premakneta daleč onstran ciljnih 10 let. Ker rezultati dobljeni s konvencionalnim testom kažejo nekoliko večje sipanje, pa bi naj po tej napovedi odpovedalo približno 1% struktur. Tipčna IV imajo večjo dolžino metalizacije. Ob upoštevanju 10 kratnega faktorja ska-



Slika 9: Porazdelitev časov odpovedi izmerjenih na strukturi SWEAT-M2 s konvencionalnim testom in s pospešenim testom na nivoju rezine. Iz njiu napovedana srednja časa odpovedi pod normalnimi delovnimi pogoji sta skorajda enaka (510, oziroma 620 let). S črtkano črto je prikazana napoved za gručo 10 struktur z $L_{Al} = 1.7 mm$, kar je ekvivalentno IV.

Struktura/test	Pospešeni test			Konvencionalni test			MTTF napovedan iz:		
	j (MA / cm ²)	ΔT (°C)	tff(s)/MEF (μJ/μm)	j	T≡ 150 + ΔT (°C)	tff (h)	Posp. t. Konv. t. (h)	Konv. t. Norm. Delovne. pogoje (let)	Posp. test na (let)
BEM-1/SW	11.48	397.6	24.5	4.25	170	85	45.9	> 1.1x10 ³	6.2x10 ²
BEM-3/SW	11.98	391.7	49.0	4.26	170	85	88.4	1.2x10 ³	1.2x10 ³
BEM-M2/SW	8.96	374.2	15.5	4.42	175	58	11.1	1.0x10 ³	2.0x10 ²
SW-A0/SW	19.89	333.8	25.7	3.86	155	630	81.3	3.6x10 ³	4.7x10 ²
SW-A1/SW	19.98	333.5	67.6	4.22	155	700	184.1	4.8x10 ³	1.2x10 ³
SW-B0/SW	18.98	335.8	33.9	4.24	155	550	88.2	3.8x10 ³	6.0x10 ²
SW-B1/SW	19.14	335.4	58.9	4.20	155	600	156.6	4.0x10 ³	1.0x10 ³
SW-M2/SW	16.38	342.9	38.9	4.44	160	55	67.1	5.1x10 ³	6.2x10 ²
BEM-1/BEM	12.42 ^{max}	446.1 ^{max}	0.099	4.25	170	85	222.3	1.1x10 ³	9.2x10 ³
BEM-3/BEM	12.43 ^{max}	488.1 ^{max}	0.172	4.26	170	85	383.6	1.2x10 ³	1.6x10 ⁴
BEM-M2/BEM	9.15 ^{max}	390.5 ^{max}	0.040	4.42	175	58	94.5	1.0x10 ³	3.7x10 ³

Normalni delovni pogoji: T = 60°C, j = 0.2 MA/cm²

Tabela 1: Primerjava parametrov različnih testov EM in napovedani MTTF za različne vhodne parametre. Računano z E_a = 0.75 eV

liranja postanejo zadeve nekoliko bolj kritične, saj bi naj odpovedalo že skoraj 20% vezij. Vendar je potrebno upoštevati tudi to, da je ΔT v tabeli 1 podcenjen, ker je odvajanje toplote v inkapsuliranem vezju slabše kot na rezini. Prav tako IV ne obratuje pod DC obremenitvijo, kar pomeni, da je napovedani MTTF podcenjen.

4.0 Zaključek

Iz tega kratkega prikaza visokopospešenih testov EM na nivoju rezine in rezultatov iz industrijskega okolja je razvidno, da rezultati dokaj dobro korelirajo z rezultati konvencionalnega testa na inkapsuliranih vezjih. To velja predvsem za test SWEAT in nekoliko manj za test BEM. Iz rezultatov meritev lahko sklepamo, da se prvi bolj približuje pogojem, pod kakršnimi prihaja do pojava EM med normalnim obratovanjem IV (elektromigracija na mejah zrn na srednjih in nizkih temperaturah). Drugi test pa je predvsem primeren za hitro spremljanje lastnosti volumna materiala saj se pomembne spremembe v materialu zgodijo na visokih temperaturah. Oba testa pa omogočata hitro zasledovanje kvalitete metalizacije v proizvodnem okolju, saj je tipičen čas testiranja pod 100s. Posebej pomembno je ponovno poudariti, da osnovni namen obeh testov ni napoved življenske dobe metalizacije pod normalnimi delovnimi pogoji. Njun namen je zasledovati kvaliteto metalizacije v proizvodnem okolju iz šarže do šarže z minimalnim časovnim zamikom. Merjena parametra MEF in MTTF morata biti znotraj določenega območja, za katerega vemo iz konvencionalnih testov, da zagotavlja zadovoljivo kvaliteto. Vsako odstopanje navzdol pa pomeni takojšnje ukrepanje v svrhu izboljšanja kvalitete metalizacije.

5.0 LITERATURA

- 1/ Chenming Hu, "IC Reliability Simulation", IEEE Journal of Solid-State Circuits, VOL. 27, pp.241-246 (1992)
- 2/ J.R.Black, "Physics of Electromigration", Proceedings of the International Reliability Physics Symposium (IRPS), 1974, pp.142-147
- 3/ B.K. Liew, P. Fang, N.W. Cheung, C. Hu, "Reliability simulator for interconnect and intermetallic contact electromigration", IRPS, 1990, pp.111-118
- 4/ C.C. Hong, D.L. Crook, IRPS, 1985, pp.108-114
- 5/ B.J. Root, T. Turner, Wafer Level Electromigration Tests for production Monitoring, IRPS, 1985, pp.100-106
- 6/ H.A. Schafft, Thermal Analysis of Electromigration Structures, IEEE Trans. ED-34, pp.664-672(1987)
- 7/ C.R. Crowell, C.C. Shin, V. Tyree, Simulation and Testing of Temperature Distribution and Resistance versus Power for SWEAT and related Joule-heated Metal-on-insulator Structures, IRPS, 1990, pp.37-43
- 8/ M. Maček, Al V. Kordesch, bo objavljeno
- 9/ H. Katto, M. Harada, Y. Higuchi, Wafer Level J-ramp & J-constant Electromigration Testing of Conventional & SWEAT Patterns assisted by Thermal & Electrical Simulator, IRPS, 1991, pp. 298-305

Marijan Maček
Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo
61000 Ljubljana, Tržaška 25

Al V. Kordesch IMP 2830 N First Street
San Jose, CA 95134

Prispelo: 19.10.92

Sprejeto: 10.11.92