

Visokopospešeno testiranje elektromigracije

Highly Accelerated Electromigration Test

Maček M.¹, Laboratorij za mikroelektroniko, Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo, Ljubljana
A. V. Kordesch, IMP San Jose, California USA

Opisana je tehnika visokopospešenega testiranja EM na nivoju Si rezine z uporabo metode SWEAT. Dosegljivi testni časi so tipično od 10 - 100 s, kar je približno 10^7 krat hitreje od standardnih testov. Za metalizacijo Al-1%Si-0.5%Cu je bila na območju od 240-400°C izmerjena aktivacijska energija $E_a = 1.18$ eV, kar je znatno več od literaturnih podatkov, ki se nanašajo na temperature pod 200°C, kjer pri pojavu elektromigracije prevladuje difuzija po mejah kristalnih zrn. Kljub velikemu faktorju pospešitve kaže novi test visoko občutljivost na majhne procesne spremembe, kot je na primer sprememba temperature depozicije, in se uporablja za kontrolo metalizacije pri proizvodnji submikrometerskih integriranih vezij v firmi International Micro Products Inc., ZDA.

Ključne besede: struktura SWEAT, elektromigracija, visokopospešeno testiranje, Al-Si-Cu tanka plast

A new highly accelerated SWEAT wafer level electromigration test is presented. Typical test times of the new methods are 10-100 s, which is approximately 10^7 times faster than standard test. For the Al-1%Si-0.5%Cu metalization film is activation energy, $E_a =$ equals 1.18 eV, measured in the temperature range from 240-400°C. This is considerably higher than reported values, obtained for temperatures below 200°C, where the grain-boundary diffusion of the electromigration process prevails. Due to high sensitivity of the new test to small variations of deposition parameters, and fast turn-a-round time, the test had been accepted for monitoring the quality of the metalization films in fabrication of submicrometer integrated circuits at International Micro Product Inc., USA.

Key words: SWEAT structure, electromigration, highly accelerated test, Al-Si-Cu thin film

1. Uvod

Pred proizvajalci kompleksnih integriranih vezij (IV) so vedno višje zahteve glede znesljivosti delovanja vezij. V bodočnosti bo zahtevana že tako visoka kvaliteta, da bo vprašanje o smiselnosti do sedaj standardnih življenskih testov. Za zagotavljanje pogostosti odpovedi pod 10 FIT¹ s 50% intervalom zaupanja se že zahtevajo testiranja do 2×10^7 vezij • ur, v naslednjih letih pa se bo obseg testiranja povečal krepko preko 10^9 vezij • ur¹².

Navedeni obseg testiranja vodi do zmanjšanja števila testiranja na minimalni obseg. Zato se v proizvodnji IV vedno bolj uveljavljajo pospešeni testi na nivoju rezine, katerih tipični testni čas

je od 10 - 100 s in se izvajajo istočasno kot parametrični testi. Na ta način se omogoči hitro povratno informacijo, njihova glavna prednost pred klasičnimi testi inkapsuliranih vezij.

Opisali bomo manj znan visokopospešeni test elektromigracije (EM), kakor je bil izveden v firmi IMP.

2. Elektromigracija

V modernih IV se po kovinskih povezavah s tipičnim presekom $1 \mu\text{m}^2$ pretakajo majhni tokovi do nekaj sto μA . Vendar je gostota toka zelo visoka, po načrtovalskih pravilih pa ne sme preseči 0.2 MA/cm^2 . Pri tako visokem pretoku elektronov postane izmenjava gibalne količine med elektroni in kovinskimi ioni pomemben faktor, poznan pod imenom sila elektronskega vetra. Kot rezultat se pojavi masni transport ionov v smeri električnega toka, ki mu nasprotuje električni drift aktiviranih ionov. Za

¹ FIT je 10^{-6} odpovedi na vezje v 1 uri.

² dr. Marijan MAČEK
Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo
Tržaška c. 25, 61000 Ljubljana

nastanek elektromigracije je potrebna od nič različna divergenca gostote masnega toka ionov, $j \neq 0$. Posledica EM je tvorba mikropraznin, ki povzročijo prekinitev prevodnih linij, in mikroizrastlin, ki povzročijo stike med različnimi prevodnimi plastmi.

Čas, v katerem zaradi EM odpove 50% kovinskih testnih struktur (Median Time to Failure, MTF), obremenjenih z enosmernim tokom gostote j na temperaturi T izračunamo iz empirične Blackove enačbe¹²⁾:

$$MTF_{DC} = A_0 j^{-m} \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (1)$$

v kateri pomeni m potenco tokovne odvisnosti, $m \approx 1.5-2$, faktor A_0 , pa je odvisen od geometrije in mikrostrukture prevodne linije ter tudi notranjih napetosti. Aktivacijska energija E_a za temperaturo pod 1/2 tališčne temperature, kjer prevladuje difuzija ionov na kristalnih mejah, znaša za zlitino Al-1%Si okrog 0.55 eV. Pri višjih temperaturah prevladuje elektromigracija v kristalnih zrnih, kar se odraža v mnogo višji aktivacijski energiji, $E_a = 1.48$ eV.

Iz enačbe (1) sledi, da lahko EM pospešimo s povečevanjem toka in povišanjem testne temperature. 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 preko 20°C nad temperaturo okolja. Dosegljiv faktor pospešitve je potemtakem okrog 10⁴, kar pomeni, da potrebujemo za tipično testiranje nekaj deset ur in več, neupoštevaje pripravo inkapsuliranih vzorcev.

V primeru testiranja na nivoju rezine lahko dosežemo mnogo višje temperature in električne tokove. V skladu z (1) so dosegljivi do tisočkrat višji faktorji pospešitve. Tipičen čas za visokopospešen test na nivoju rezine se tako zniža na 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 BEM¹³⁾ (Breakdown Energy of Metals) in standardni pospešeni test EM na nivoju rezine, poznan s kratico SWEAT¹⁵⁾ (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, tudi najbolj neugodnimi topografijami. Za test SWEAT se uporabljajo posebej zato razvite strukture, pri katerih si izmenično sledijo široki in ozki segmenti, kakor je to prikazano na sliki 1. Tudi v tem primeru naj bodo ozke linije načrtane preko 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 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. Test je možno izvajati tudi pri konstantnem toku ali temperaturi, in tudi na preprosti enakomerno široki kovinski liniji.

3. Standardni pospešeni test elektromigracije na nivoju rezine (SWEAT)

Prvič sta test predstavila leta 1985 Root in Turner¹⁵⁾. Glavna odlika tega visokopospešenega testa EM je njegova visoka sposobnost absorpcije Joulove toplote in linearna odvisnost upornosti od sproščene moči. Tipično so dosegljive vsaj dvakrat 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 zm.

Za pravilno interpretacijo rezultatov testa SWEAT moramo poznati temperaturo v ozkem segmentu širine W_o . Za izhodišče si vzamemo Schafftov¹⁶⁾ model za izračun temperature v zelo dolgi ($l \rightarrow \infty$) kovinski liniji skozi katero teče električni tok I .

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

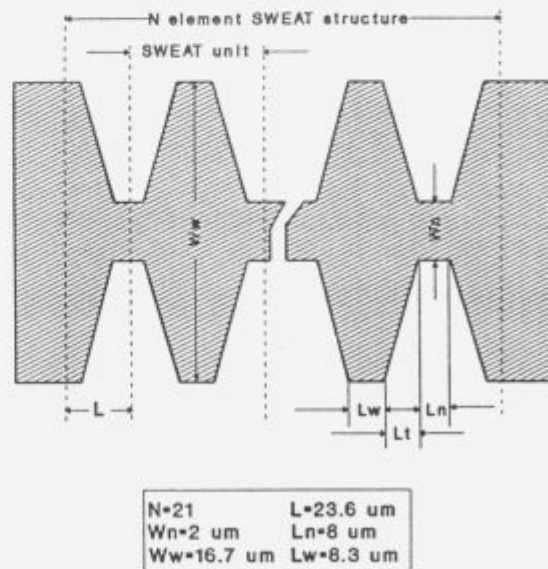
kjer pomeni T_s temperaturo substrata in temperaturni koeficient upornosti.

Povprečen dvig temperature za strukturo SWEAT z neenakomerno širino W določimo na podoben način. Povezan je z močjo P in spremembo upornosti $\Delta R = R - R(T_s)$ z enačbo

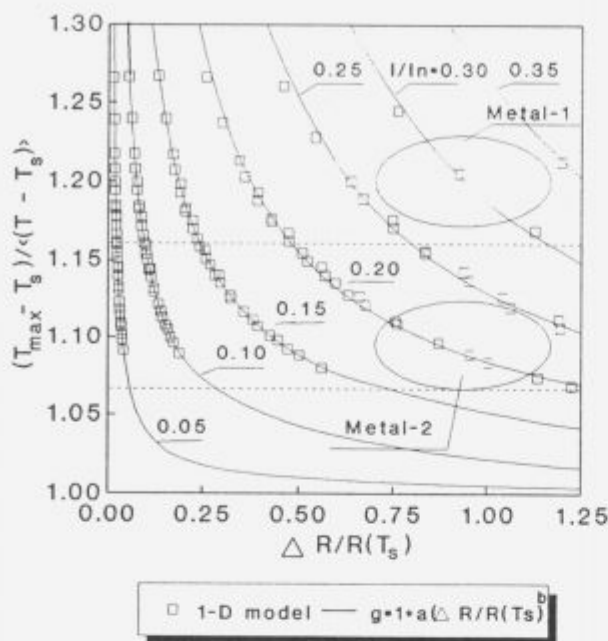
$$(3) I_o^2 = \frac{P}{\Delta R}$$

Poleg povprečnega dviga temperature, je pomembna tudi maksimalna temperatura v sredini ozkega segmenta, T_s^{Max} , ki je povezana s povprečnim dvigom z naslednjo zvezo:

$$T_s^{Max} - T_s = \gamma < T - T_s > \quad (4)$$



Slika 1: Shematski prikaz testne strukture SWEAT z najpomembnejšimi parametri, kakor so bili uporabljeni pri naših testih
Figure 1: Schematic representation of the SWEAT test structure and parameters relevant for our studies



Slika 2: Odvisnost parametra $\gamma = (T_{max} - T_s) / \langle T - T_s \rangle$ od spremembe upornosti $\Delta R/R(T_s)$ preračunano po 1-D modelu za različne tokovne obremenitve I/I_n .

Figure 2: Dependence of the parameter $\gamma = (T_{max} - T_s) / \langle T - T_s \rangle$ on the relative resistance change $\Delta R/R(T_s)$ at different normalized currents $A_n^{(2)} = (I/I_n)$. Dashed lines are limits calculated from the R&T model

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

$$\gamma = \frac{(n_n + \lambda n_t) \cdot (n_n + n_w + n_t)}{(n_n + \lambda n_t)^2 + \{n_w + (1 - \lambda)n_t\}^2} \quad (5)$$

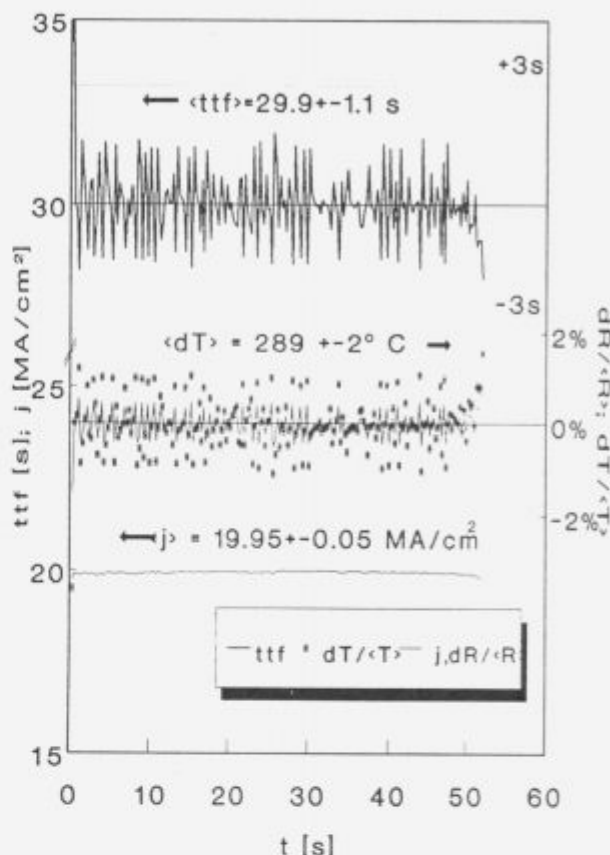
kjer pomeni $n_{n,w,t}$ število kvadratov ozkega, prehodnega in širokega območja strukture prikazane na sliki 1. Parameter $\lambda = 0$, če prehodno območje obravnavamo kot široko, oziroma $\lambda = 1$, če ga obravnavamo kot ozko območje.

Odvisnost koeficienta γ od spremembe upornosti $\Delta R/R(T_s)$ izračunana na osnovi 1-D modela prevajanja toplote⁽⁸⁾ in z upoštevanjem temperaturno odvisnih koeficientov toplotne prevodnosti kovine in izolatorja za strukturo s slike 1 je prikazana na sliki 2. Vrednosti $\gamma = 1.16$ in $\gamma = 1.08$ iz enačbe (5) sta dobri spodnji oceni za prvi oziroma drugi nivo metalizacije.

Test SWEAT se izvaja tako, da je faktor pospešitve konstanten, kar lahko izrazimo z ciljnim časom odpovedi TTF. Iz upornosti $R(t, I)$ izmerjene v času $t = t_1$, iz enačbe (4) izračunanega kritičnega toka $I_c = I_c(t_1)$ in na sliki 2 prikazane odvisnosti parametra $\gamma = \gamma(t)$ lahko vedno izračunamo tok I s katerim bomo obremenili testno strukturo v času t_2 , tako, da bomo dosegli željen faktor pospešitve. S kombinacijo enačb (1-4) dobimo transcendenten izraz za tok I , ki ga rešimo z Newton-Raphsonovo metodo iteracije:

$$F(I) = (TTF)I^{-(1/m)} \exp \left(\frac{E_a}{km \left\{ T_s + (\gamma/\beta) \left[(I_c/I)^2 - 1 \right] \right\}} \right) - I = 0 \quad (6)$$

Rezultat meritve parametrov med izvajanjem obremenitve na eni od testnih struktur je prikazan na sliki 3. Vidimo, da



Slika 3: Izmerjeni parametri pomembni za izvedbo testa SWEAT s konstantnim faktorjem pospešitve oziroma konstantnim ciljnim časom odpovedi TTF

Figure 3: Parameters measured during the SWEAT test with the constant acceleration factor. Target time to fail TTF for this test was 30 s

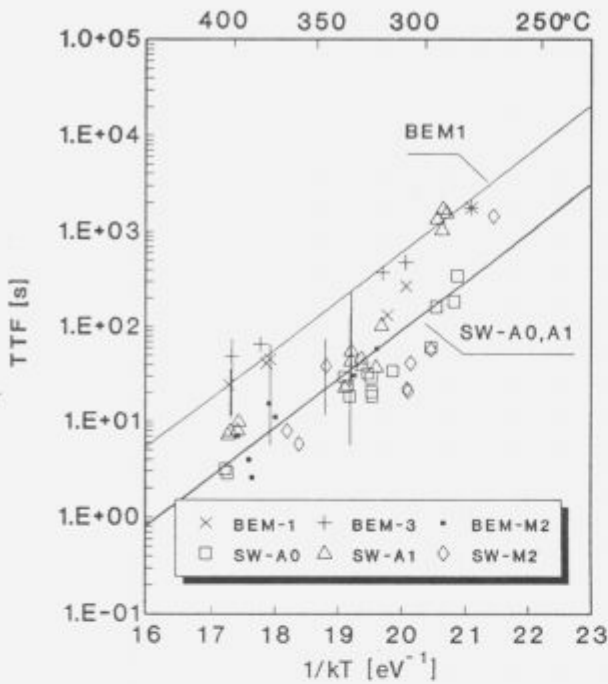
sorazmerno majhna nihanja v temperaturi in upornosti prispevajo k znatni (3%) nenatančnosti parametra TTF, kar je razumljivo če upoštevamo eksponentno odvisnost v enačbi (1).

Parameter A_0 in aktivacijska energija, potrebna za izračun TTF iz enačbe (1) sta bila določena iz odvisnosti MTTF od $1/kT$ prikazane na sliki 4. 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 obremenjevanja. Konstanta A_0 zavzema za različne strukture vrednosti od 6×10^5 do $3 \times 10^4 \text{ A}^{-1.7} \text{ cm}^{-3.5} \text{ s}$ ($E_a = 1.18$ eV, $m = 1.7$).

Na sliki 5 je prikazan mikroskopski posnetek strukture SWEAT, ki pokaže kopičenje kovine v ozkem segmentu in tvorbo praznin v prehodnem in širokem segmentu po dolgotrajnem ($>10^4$ s) obremenjevanju s tokom $j = 18.5 \text{ MA/cm}^2$, kar je povzročilo povprečen največji dvig temperature $\Delta T_{max} = 324^\circ \text{C}$.

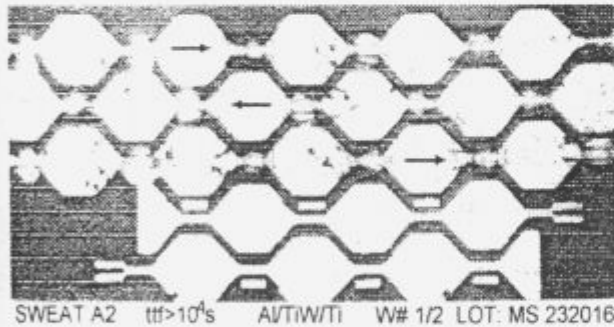
Kljub visoki pospešenosti testa ($T = 325 \pm 2^\circ \text{C}$, $j = 20.42 \pm 0.5 \text{ MA/cm}^2$) je test dokaj občutljiv na spremembe parametrov nanašanja aluminija. Na sliki 6 sta prikazani kumulativni log-normalni porazdelitvi odpovedi za Al, nanešen na dveh različnih temperaturah, 150 in 300°C. Opazna je znatna razlika v kvaliteti plasti v dobro Al nanešenemu na višji temperaturi, ki se odlikuje po večjih kristalnih zrnih. Dominanten mehanizem EM na srednjih temperaturah je difuzija kovinskih ionov po kristalnih mejah.

⁽⁷⁾ Določeno za temperaturni interval od 210-310°C in tok 16MA/cm².



Slika 4: Odvisnost MTTF merjeno na različnih testnih strukturah, ter različnimi temperaturami substrata v odvisnosti od $1/kT$. Za primerjavo so dodane tudi vrednosti MTTF merjene na kovinskih linijah za test BEM

Figure 4: Dependence of the MTTF for different SWEAT test structures versus temperature $1/kT$. For comparison values of MTTF measured on the straight metal lines for the BEM test are included

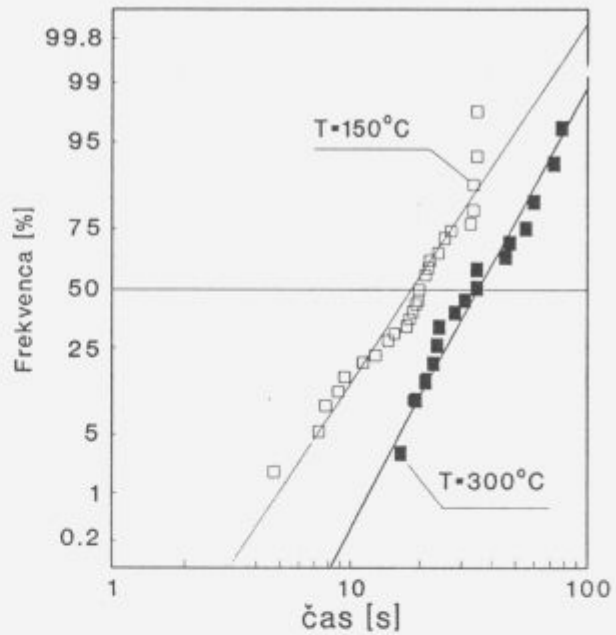


Slika 5: Mikroskopski posnetek povsem pasivirane strukture SWEAT po netipično dolgotrajni ($>10^4$ s) obremenitvi. ($j = 18.5 \text{ MA/cm}^2$, $\Delta T_{\text{max}} = 324^\circ\text{C}$). Puščica kaže smer elektronskega toka

Figure 5: Micrograph of the passivated SWEAT structure A2 after unusually long ($>10^4$ s) stress. ($j = 18.5 \text{ MA/cm}^2$, $\Delta T_{\text{max}} = 324^\circ\text{C}$). The arrow indicates the direction of the electron flow

4. Zaključek

Visokopospešeni test SWEAT omogoča zasledovanje kvalitete metalizacije v proizvodnji IV na nivoju rezine. Tipični testni čas je pod 100 s, kar pomeni, da lahko test izvajamo istočasno z ostalimi parametričnimi testi. Izmerjena aktivacijska energija



Slika 6: Vpliv temperature nanašanja Al na kumulativno log-normalno porazdelitev odpovedi merjeno s testom SWEAT. ($T = 325 \pm 2^\circ\text{C}$, $j = 20.42 \text{ MA/cm}^2$, ciljni čas odpovedi TTF = 30 s)

Figure 6: Dependence of the log-normal distributed cumulative failure rate measured by the SWEAT test. ($\Delta T_{\text{max}} = 325 \pm 2^\circ\text{C}$, $j = 20.42 \text{ MA/cm}^2$)

$E_a = 1.18 \text{ eV}$ je dokaj višja od aktivacijske energije za standardne teste pri temperaturah pod 240°C , vendar nas v primeru visokopospešenih testov ne zanima dolgoročna napoved zanesljivosti. Z visokopospešenimi testi ugotavljamo predvsem odstopanja značilnega parametra (v primeru testa SWEAT srednji čas odpovedi) od za določen kvalificiran proces značilne vrednosti.

5. Literatura

- Chenming Hu, IC Reliability Simulation, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 27, 1992, 241-246
- J. R. Black, Physics of Electromigration, Proceedings of the International Reliability Physics Symposium (IRPS), 1974, 142-147
- B. K. Liew, P. Fang, N. W. Cheung, C. Hu, Reliability Simulator for Interconnect and Intermetallic Contact Electromigration, IRPS, 1990, 111-118
- C. C. Hong, D. L. Crook, Breakdown Energy of Metal (BEM) - a New Technique for Monitoring Metallization Reliability at Wafer Level, IRPS, 1985, 108-114
- B. J. Root, T. Turner, Wafer Level Electromigration Tests for production Monitoring, IRPS, 1985, 100-106
- H. A. Schafft, Thermal Analysis of Electromigration Structures, *IEEE Trans. ED-34*, 1987, 664-672
- 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, 37-43
- M. Maček, A.V. Kordesch, Numerical Analysis of SWEAT Structure with an Improved 1-D Nonlinear Model, *Microelectron. Reliab.*, 34, 1994, 689-702
- 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, 298-305