

TTL sorozatú SSI digitális integrált áramkörök 100 millió eszközórás megbízhatósági vizsgálatainak újabb eredményei

II. rész. Vizsgálati eredmények és azok hibafizikai interpretációja

ETO: 920.199:621.3.019.3.621.3.049.771.14:681.325

A vizsgálati módszerek és azok várható hatásának ismertetése után a világviszonylatban is jelentős volumenű vizsgálati eredmény áttekintését és hibafizikai szempontból való kiértékelését végezzük el, korszerű pásztázó elektronmikrográfiai módszereket is alkalmazva.

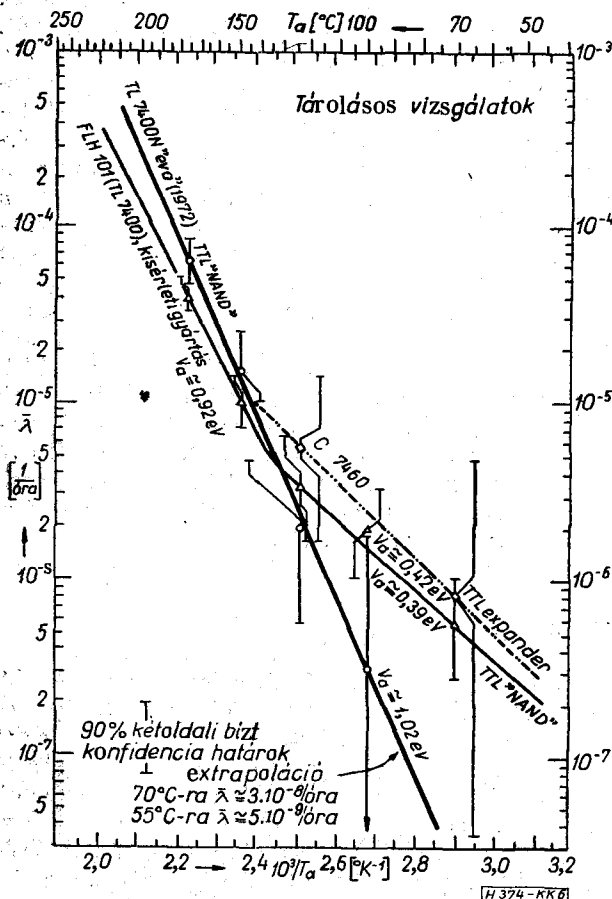
5. A tárolásos vizsgálatok eredményei [1, 13, 18]

A 4. táblázatban és a 6. ábrán szemléletesen összefoglaljuk az eddig összesen 45,6 millió eszköz-órás terjedelmet kitevő tárolásos vizsgálatok hibastatistikáját. A külföldi ellenőrző minta (C 7460) eredményei nem vethetők össze minden további nélkül a bonyolultabb hazai NAND-kapu két (korai kísérleti, és reguláris gyártásból származó) tételével, már csak az előbbi lazább előírásai miatt sem, nem is beszélve arról, hogy az itt vizsgált C 7460 expander meglepően nagy 0-órás selejtje miatt meglehetősen szerencsétlen, a valódi minőséget nem reprezentáló mintához jutottunk (a fenti, szocialista eredetű SSI sorozat kitűnő minősége az erős gyorsítású statikus módszerrel vizsgált NAND-kapu és J-K flip-flop típusoknál mutatkozik meg, 1. később). A hazai négyszeres NAND-kapu két csoportja között a folyó gyártás minőségi javulása a kísérleti gyártáshoz képest kézenfekvő. Így a folyó, „eva” jelölésű gyártás 70 °C-os mintájánál 15 000 óra alatt egyáltalán nem lépett fel hibásodás (70 °C különben az adatlapon megengedett maximális működési hőmérséklet), emiatt számszerűen csak az $\bar{\lambda}$ faktor 60%-os felső konfidenciahatára adható ott meg. Nem lévén egyéb viszonyítási alap, a $\bar{\lambda}(T_2)/\bar{\lambda}(70\text{ °C})$ gyorsítási tényező rubrikájában a magasabb hőmérsékletű vizsgálatok eredményeinek 60%-os felső konfidenciahatárát vettük figyelembe (zárójelben), de a V_a aktiválási energia számításánál, a 70 és 100 °C közötti vizsgálatpár 0,63 eV-os értékétől eltekintve (amely a 60%-os felső határok alapján van számítva), a többi vizsgálatpárnál a $\bar{\lambda}$ tényleges kísérleti eredményeit vettük a (12) egyenlet szerint tekintetbe.

Alacsony hőmérsékletű vizsgálati lépcsőknél (70... 125 °C) a hibásodások elszórtan léptek fel, mert még nem — vagy csak alig — érték el a vizsgált tételek a kontaktuspestises elhasználódás fázisába, ahogy ezt a 7. és 8. ábrák $\bar{\lambda}(t)$ függvényei is bizonyítják.

Ezzel szemben a két legmagasabb hőmérsékletű lépcsőben — 150 és 175 °C-on — megfigyelhető egyrészt a $V_{out(0)}$ degradáció, másrészt a szakadáshibák tömeges fellépése. Ez a kétfajta hiba egyértelműen azonos okra vezethető vissza: a bondolt termokomp-

Beérkezett: 1975. IV. 11.



6. ábra. A tárolásos vizsgálatok eredményei a $\log \bar{\lambda}(1/T_a)$ gyorsítási egyenesek formájában

TTL IC-k tárolásos vizsgálatának eredményei

Funkció Típus/eredet Texas ekvivalens	négyeseres, 2-bemenetű „NAND” kapu										kettős expander		Funkció Típus/eredet Texas ekvival.
	FLH 101 (= TL 7400 N), korai kísérlet SN 7400 N					TL 7400 N, „eva” folyó gyártás (1972) SN 7400 N					C 7460 ~SN 7460 N		
N_0 , induló dbszám	1000	400	250	250	200	500	200	200	200	100	250	130	N_0 [db]
t_{tot} , vizsg. idő [óra]	15 000	15 000	10 000	10 000	6000	15 000	15 000	15 000	5000	5000	15 000	5000	t_{tot} [óra]
$N_0 \cdot t_{tot}$ [10^6 óra]	15,0	6,0	2,5	2,5	1,2	7,5	3,0	3,0	1,0	0,5	3,75	0,65	$N_0 \cdot t_{tot}$ [10^6 óra]
T_a [°C]	70	100	125	150	175	70	100	125	150	175	70	25	T_a [°C]
$V_{out(o)} > 0,4$ V	—	2	—	9	25	—	—	3	7	9	—	—	$V_{on} > 0,4$ V
$V_{out(i)} < 2,4$ V	—	—	—	1	1	—	—	—	—	1	—	—	$I_{off} > 270 \mu A$
hibásodások [db]	$-I_{in(o)} > 1,6$ mA	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	$-I_{in(o)} > 1,6$ mA
	$I_{in(o)} > 40 \mu A$	2	5	7	4	3	—	—	3	1	1	—	$I_{in(i)} > 90 \mu A$
	$I_{os} \leq \frac{10}{33}$ mA	2	—	—	1	—	—	—	—	—	—	1	$I_{on} < -0,43$ mA]
	$I_{CC(o)} > 22$ mA	1	—	1	—	2	—	—	—	—	—	1	$I_{CC(off)} \geq 4$ mA
	$I_{CC(i)} > 8$ mA	2	—	1	1	—	—	—	—	—	—	1	$I_{CC(on)} > 2,5$ mA
szakadás*** zárlat	— 1	5 —	— —	10 1	22 —	— —	— 1§	— —	10 —	22 —	1 —	2 —	szakadás zárlat
ΣR összhiba [db]	9	12	9	27	53	—	1	6	18	33	3	4	ΣR [db]
$10^5 \bar{\lambda}$ [1/óra]	0,060	0,202	0,36	1,08	4,40	—	0,033	0,200	1,80	6,60	0,083	0,58	$10^5 \bar{\lambda}$ [1/óra]
$10^5 \lambda_{max}$ 60% C. L. [1/óra]	0,070	0,230	0,42	1,16	~4,40	0,0125*	0,069	0,246	1,89	7,06	0,117	0,76	** [1/óra]
$\bar{\lambda}(T_a)/\bar{\lambda}(70^\circ C)$	1	3,37	6,0	18,0	73,2	?(1)	?(5,22)	?(21,2)	?(151)	?(565)	1	6,88	$\bar{\lambda}(T_a)/\bar{\lambda}(70^\circ C)$
V_a , aktív energia [eV]	0,45	0,30	0,64	0,92	(0,63)	0,92	1,28	0,85			0,42		V_a [eV]
0-óránál hibás [db]	3	5	—	2	—	—	—	—	—	1	9	1	0-óránál hibás hibaok
Hibaok	$I_{CC(i)}$	—		$I_{CC(i)}$						$I_{CC(i)}$		$I_{CC(on)}$	

* Nem lévén hibásodás, szabály szerint 0,95 „fiktív” hibát vettünk tekintetbe.

** Felső határ 60% konfidenciaszintnél.

*** Túlnyomórészt az Au-Al bondolások szakadása.

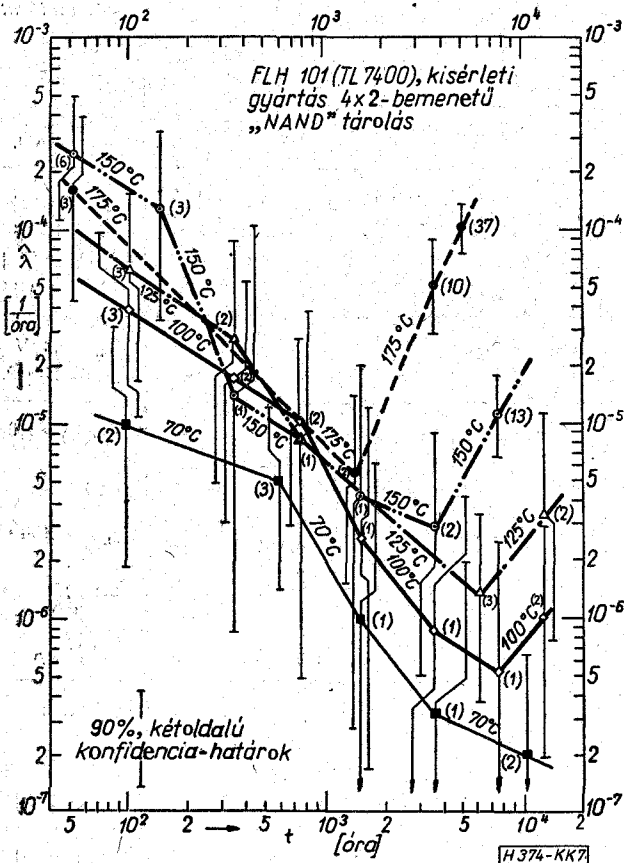
ressziós Au-Al kötések pestisére. A $V_{out(o)}$ megemelkedése a 0,4 V-os adatlap határon túl ennek a hibának a szakadás előtti, de már előrehaladott fázisát mutatja, mivel a $V_{out(o)}$ mérésénél a kimenetbe befolyó, viszonylag nagyon nagy $I_{slnk} = -16$ mA előírt worst-case áram a pestis miatt nagy átmeneti ellenállású Au-Al kötésnél nagy feszültségesést okoz. A $V_{out(o)}$ így a kontaktusromlásra jól rámutató előrejelző index. Tárolásos vizsgálatnál, ahol a magas hőmérséklet egyaránt hat az összes termokomprimált kötésre, a pestises romlás szempontjából nincs kiüntetett kontaktus, és így, ha a $V_{out(i)}$ -nél jelentős

hibásodás lép fel, ez nem azt jelenti, hogy a többi kontaktus nem romlott le hasonlóan, mint a $V_{out(o)}$ -val kapcsolatos kimeneti (X) kontaktus, mindössze a többi paraméter nem mutatja ki olyan érzékenyen a pestises romlást, mint a $V_{out(o)}$ a kimeneti kontaktusét. Ezt alátámasztja az is, hogy a fellépő összes szakadások közül milyen azok megoszlása az egyes elektródákra értve, amelyek a TL 7400 N „eva” tétel 10+22=32 szakadáshibás példányánál (lásd 4. táblázat) fellépő összesen 38 szakadt termokompressziós kötésre nézve az 5. táblázatban található. A 38 szakadt kötés a 32 szakadáshibás példányánál azt

5. táblázat

Szakadáshibák megoszlása az egyes bondolások közt a TL 7400 N „eva” minta tárolásos (150 és 175 °C) vizsgálatnál

A_1	B_1	A_2	B_2	A_3	B_3	A_4	B_4	X_1	X_2	X_3	X_4	V_{CO}	GND	Össz.
6	3	1	3	2	1	1	2	4	2	2	3	5	3	38



← 7. ábra. A hibásodási ráta időfüggése az FLH 101 kísérleti gyártású NAND kapunégyes tárolásos vizsgálatainál. 125 °C felett jól látható az erősen emelkedő elhasználódási szakasz, melyet kontaktuspestis okoz

jelenti, hogy egyes daraboknál nemcsak egy, de 2–3 szakadás is fellépett.

A hibásodások fizikai okait tekintve, a 6. táblázatban tüntettük fel százalékos megoszlásuk szerint azokat mind a két vizsgált hazai mintánál.

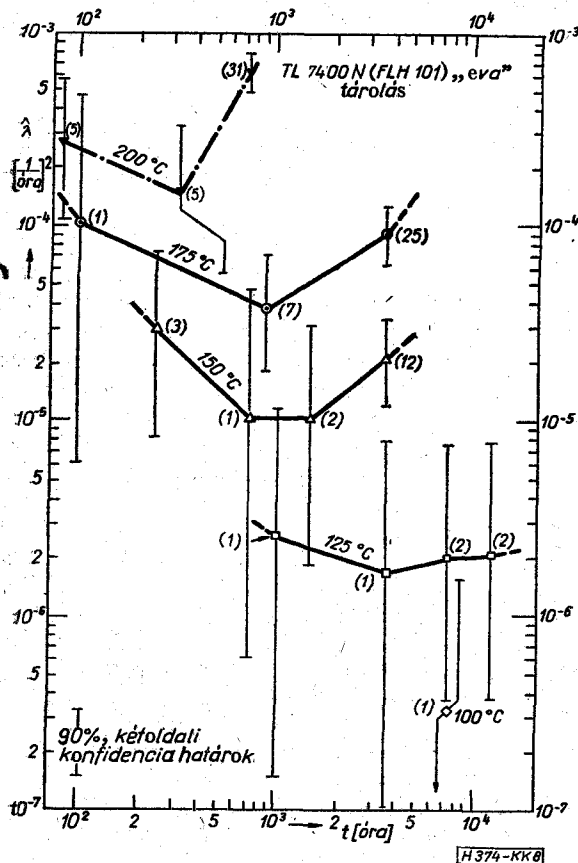
6. táblázat

A hibásodások okainak megoszlása a hazai TTL „NAND” kapuk vizsgálati mintáinál, 70...175 °C tárolás során

Vizsgált minta	FLN 101 kísérl. gyártás		TL 7400 N „eva”	
Au-Al bondolások pestise és fémezéshibák				
[szakadások és $V_{out(0)}$ degradáció]	73	66,36%	50	89,29%
[ebből $V_{out(0)} > 0,4$ V degradáció]	(36)	(32,73%)	(18)	(32,14%)
Nagyszintű áramparaméter-határok túllépése*				
[$I_{in(0)}$, I_{os} , $I_{CC(0)}$ és $I_{CC(1)}$ degradáció]	12	10,92%	—	—
Nagy szivárgási áram (felületi állapotok) [$I_{in(1)} > 40 \mu A$]*	21	19,09%	4	7,13%
Tranzisztorelemek zárata (pl. „pinhole” stb.)	2	1,82%	1	1,79%
Egyéb [$V_{out(1)} < 2,4$ V degradáció]	2	1,82%	1	1,79%
Összhiba a vizsgálat tartama alatt	110	100,00%	56	100,00%
Katasztrofális/összhiba arány	39/110	35,5%	33/56	59,0%
$N_{0t_{0t}}$ összesített eszköz-óra szorzat	27,2 millió		14 millió	

* Nem funkcionális hiba; a határt enyhén túllépő példány működőképes marad.

A 6. táblázatból világosan kitűnik a reguláris gyártású („eva”) tétel jobb minősége két szempontból is. Először is nem lépett fel egyáltalán olyan degradációs hiba, amely a diffundált ellenállások eleve nagyobb 0-órás értékszórásával, ill. a határhoz közel eső mediánjával kapcsolatos, és a 4. ábra helyettesítő képei értelmében az $I_{in(0)}$, $I_{CC(0)}$ és $I_{CC(1)}$ áramparaméterek határon túli növekedésében, ill. az I_{os} alsó vagy felső határainak túllépésében mutatkozik meg. Ezt

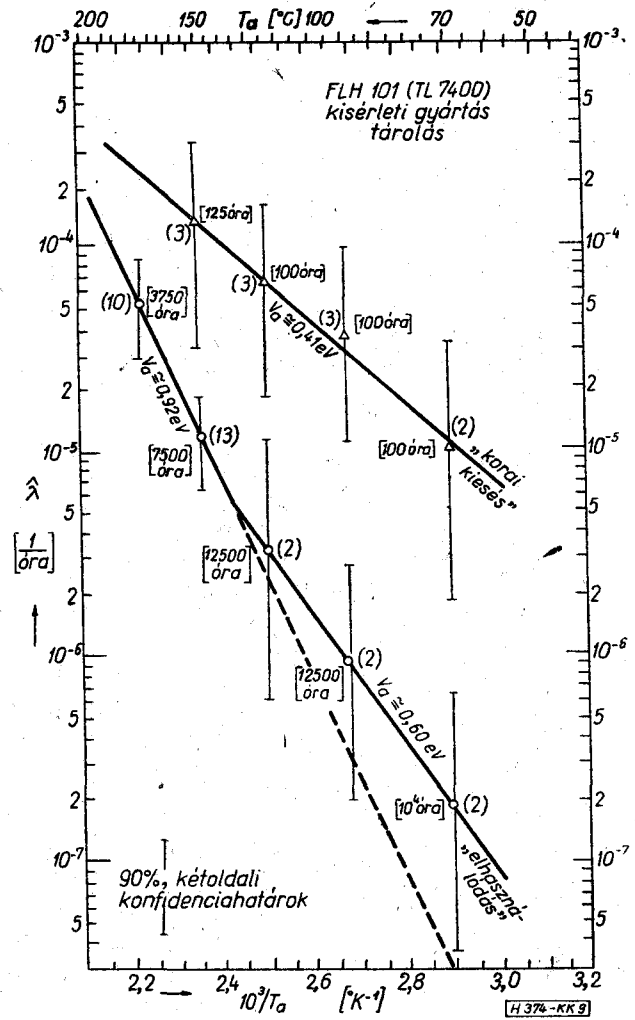


← 8. ábra. A TL 7400 N „eva” NAND kapunégyes $\lambda(t)$ függvényei (1972. gyártás). Az elhasználódás 150 °C felett tendenciózusan megjelenik

igazolják egyrészt az előbbi áramparaméterek elosztásfüggvényeinek sokkal kisebb szórásai is (lásd Függelék) a sorozatgyártású „eva” változatnál. Másrészt lényegesen lecsökkent a folyó „eva” gyártásnál az $I_{in(1)} > 40 \mu A$ degradáció részaránya: 19,1%-ról 7,1%-ra (közel a harmadára), ami sokkal kisebb felületi állapotsűrűsége és konzisztensebb (szűkebb szórású) és kisebb szivárgási áramra mutat. Valóban ezt tapasztalhatjuk az $I_{in(1)}$ elosztásfüggvényeinél (vizsgálat előtti és utáni állapotokat összehasonlítva), bár az „eva” minőség $I_{in(1)}$ átlaga eredetileg valamivel magasabb, de értéke a tárolás folyamán gyakorlatilag nem változik, és szórása sokkal kisebb a kísérleti gyártású tétel szórásánál (lásd Függelék). Utóbbi hatás egyértelműen a foszforüveges morzsavédelem alkalmazásával magyarázható az „eva” minőségénél, amely magába getterezi a SiO_2 -ben levő és különben a SiO_2 alatti Si felületén erős inverziót okozó alkálifém (pl. Na) ionokat és egyéb szennyezéseket. Mindazonáltal mindkét vizsgálati mintában a termokomprimált kötések pestises romlása, ill. szakadása játssza a főszerepet a hibásodásban (90, ill. 67%). Ezzel igazoltuk a bevezetés a) tézisében említettet.

A (11) Arrhenius-összefüggésre vonatkozó $\log \lambda(i/T_a)$ gyorsítási függvényeket az összes itteni vizsgálati tételekre a 6. ábrán mutatjuk be, amely a 4. táblázatban közölt eredményekre épül. A folyó gyártás (TL 7400 N „eva”) eredménye 100 és 175 °C közt meglehetősen egybehangzóan 1 eV aktiválási energiát ad. Az egyes eredmények pontjainak enyhe szórása az 1 eV aktiválási energiát képviselő gyorsítási egyenestől nem számottevő (vastag folytonos vonal). Ez az elkerülhetetlen statisztikai ingadozás okozza különben a 4. táblázat V_a értékeiben mutatkozó szórás (0,92—1,28—0,85 eV) is. Az FLH 101 kísérleti gyártású tételnél a helyzet már nem ilyen egyértelmű, bár a megbízhatóság számszerű értékében nincs lényeges eltérés a két gyártás közt: 130 °C közelében a két függvény átmetszi egymást. A vékony folytonos vonallal jelzett kísérleti gyártású tételnél magas hőmérsékleten 0,92 eV aktiválási energia adódik, amely nem tér el lényegesen az „eva” minta 1,0 eV-os értékétől, de alacsony hőmérsékletnél V_a 0,39 eV-ra esik le virtuálisan, amelynek okairól a bevezetés e) pontjában már említést tettünk [1, 18]. Ezt a tényt tehát vizsgálati hibának tekinthetjük. Mindenesetre a V_a hőmérsékleti aktiválási energia jellemző értéke — legalábbis 100 és 200 °C közt — 1 eV-ra tehető, amely a diszkrét szilícium tranzistorokéval egyezik meg [7, 8, 9, 10].

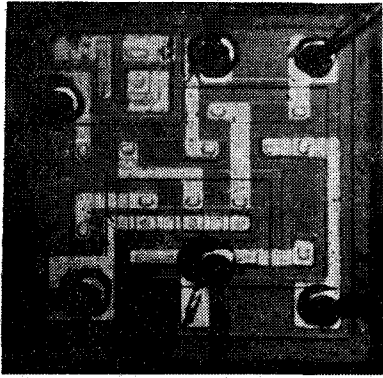
Érdemben a legtöbbet a $\lambda(t)$ függvények lefutásáról kell mondanunk. Az FLH 101 kísérleti gyártású tételre vonatkozó ilyen függvények a 7. ábrán láthatók, bár ez a minta nem jellemző a sokkal konzisztensebb folyó gyártásra. A bevezetés c) pontjában foglaltaknak megfelelően a korai kiesés szakaszában a 100...175 °C-os görbék egy keskeny mezőben, összefonódva futnak, mintha a hibásodás jóformán független lenne a hőmérséklettől. Pusztán véletlenül ilyen nagy vizsgált mintáknál nem lehet szó, hisz hasonlóak a tapasztalatok az RTL NOR kaputípuson végzett közel 20 millió eszköz-órás vizsgálatainknál is [1, 18]. Megkockáztathatjuk tehát azt a kijelentést, hogy az aktiválási energia a korai kiesés szakaszában — leg-



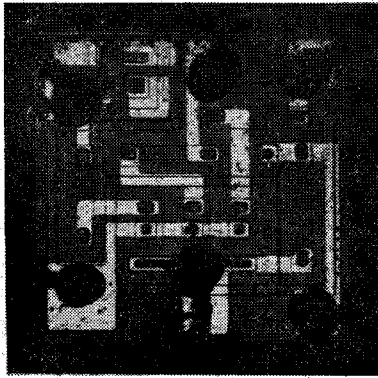
9. ábra. Gyorsítási egyenesek és aktiválási energiák az FLH 101 kísérleti gyártású tétel tárolásos vizsgálatánál a korai kiesés szakaszában, ahol igen kis aktiválási energia adódik (0,41 eV; fent) és a teljes eddigi vizsgálati időkre vetítve (lent)

alábbis ahol ez viszonylag erőteljesen jelentkezik, tehát még nem kiforrott technológiáknál — kicsi, pontosabban biztosan és lényegesen kisebb, mint a kontaktuspestis felléptére jellemző elhasználódási szakaszban. Beszédesen bizonyítja ezt a 9. ábra erre a vizsgálati tételre vonatkozó $\log \lambda(1/T_a)$ gyorsítási diagramja, ahol a halmozott λ helyett egyrészt a 100 óránál adódó, a korai kiesésre jellemző λ , ill. az eddig végzett utolsó vizsgálati időpontokban az elhasználódási szakaszban adódó λ pillanatnyi hibásodási rátákat vettük figyelembe. A korai kiesés szakaszában átlagosan a nagyon kicsi 0,41 eV aktiválási energia adódott, míg magas hőmérsékleteken, jól benne járva az elhasználódási szakaszban, 0,92 eV és alacsonyabb hőmérsékleteken, ahol az elhasználódás (kontaktuspestis) még nem eléggé kifejezett, az átmeneti 0,6 eV átlagos értéket kaptuk. Ez is megerősíti azt a tézisünket, hogy a kontaktuspestises degradáció aktiválási energiája 1,0 eV körüli vagy ennél kevéssel nagyobb.

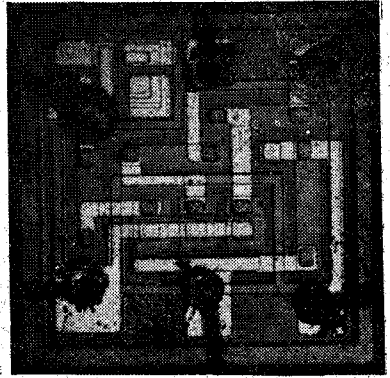
Problémamentesebbek a TL 7400 N „eva” folyó gyártás $\lambda(t)$ függvényei (8. ábra). A 150 és 175 °C-os terhelésű lépcsők a teknőgörbére emlékeztetnek, míg



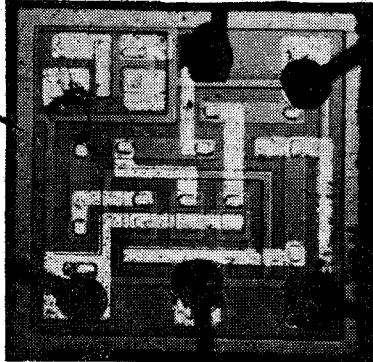
a)



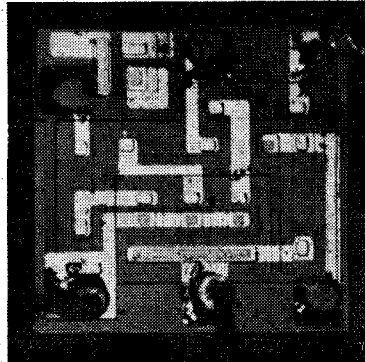
b)



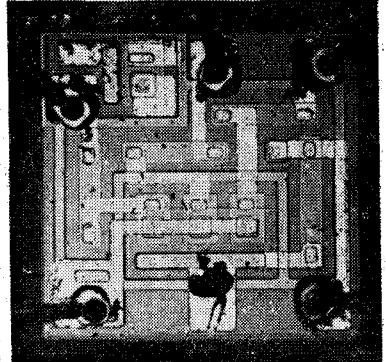
c)



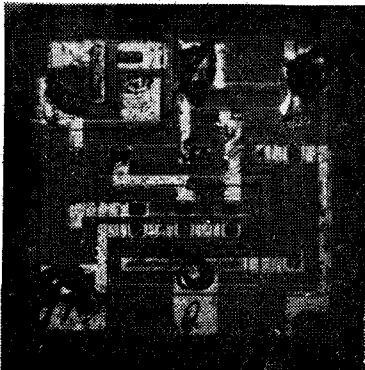
d)



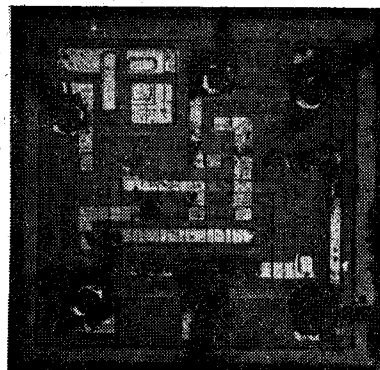
e)



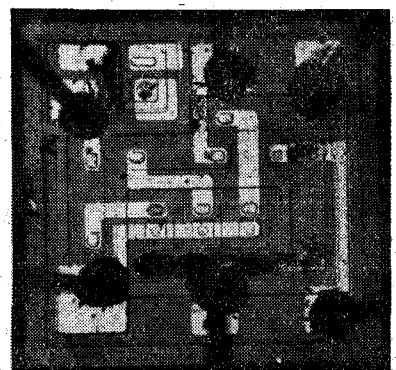
f)



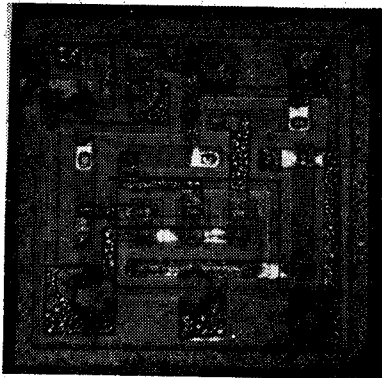
g)



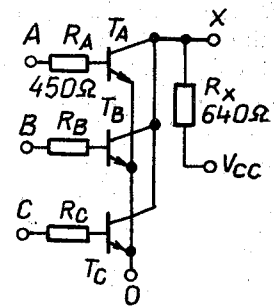
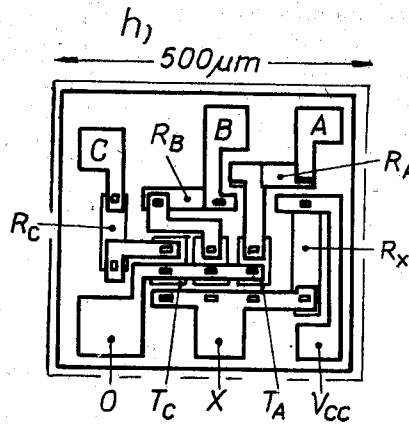
h)



i)



j)



k)

H 374-KK 10

a 125 °C-os görbénél már túl kevés hibásodás lépett fel ahhoz, hogy a tényleges függvény lefutásáról kellő adatokat nyerhettünk volna (az csak jóval nagyobb terjedelmű minta vizsgálatával válna lehetségessé), nem is beszélve a 100 °C-os eredményről, ahol 15 000 óra alatt egyetlen hibásodás történt csak. Két tény mindenesetre világos: a négy lépcső minimumhelyei közt átlagosan 1 eV körüli aktiválási energiának megfelelő távolságok vannak, másodsorban a három legmagasabb hőmérsékleti lépcsőnél (150, 175 és 200 °C) egyértelműen fellép a kontaktuspestis okozta elhasználódási szakasz, mintegy 400... 3000 óra után. A korai kiesés szakaszában a magas hőmérsékletű vizsgálati lépcsőknél gyanítható, hogy az egyes görbék itt is nagyon közel kerülnek egymáshoz, tehát az aktiválási energia erősen lecsökken, akár a 7. ábrán látható FLH 101 kísérleti gyártású tételnél. Itt ez a jelenség csak azért nem olyan szembezőkő, mert — különösen az alacsony hőmérsékletű lépcsőknél — egyrészt túl kicsiny volt a minták terjedelme és így a hibásodások száma, másrészt nagy terjedelmű mintáknál is sűrűbb időközökben kellene a vizsgálatok kezdetén az ellenőrző paraméter-méréseket elvégezni. Az egyértelmű választ tehát hasonló, de nagy terjedelmű minták ismételt vizsgálata fogja megadni.

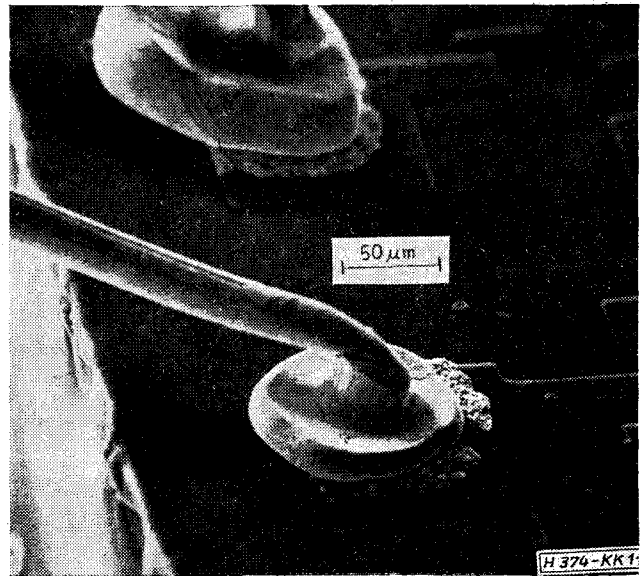
A termokompressziós kontaktusok pestises szakadásának és az alumínizált összeköttetések egyes jellegzetes hibáinak mikrofotográfiáit a 10. ábra mutatja az [1, 18] közleményeinkben szereplő fém tokozású RTL NOR kapuknál, 1680 órás, 150 °C-os tárolás után. Egy szakadás előtt álló, erős fekete pestist mutató termokompressziós kontaktus erős nagyítású mikrofotóját a 11. ábrán láthatjuk, ahol az Au_5Al_2 intermetallikus fázis laza, szivacsos szerkezete jól megfigyelhető. — A pestises hibák szerepére az F.2. Függelékben még visszatérünk. —

A 12. ábrán a TL 7400 N morzsa felülnézeti mikrofotográfiája látható.

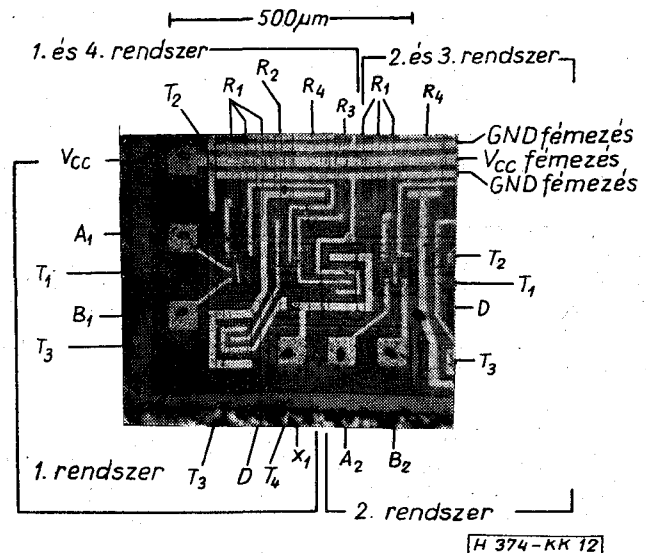
6. A statikus elektromos terheléses vizsgálatok eredményei

A műanyag tokozású TTL IC-k három jellegzetes típusán végzett, eddig összesen kb. 21 millió eszköz-óra terjedelmű statikus elektromos vizsgálatok eredményeit a 7. táblázat foglalja össze, ezenkívül újabb 10,4 millió eszköz-órás legújabb vizsgálatról (1973. gyártású hazai TTL kapuk) is beszámolunk.

Két jellegzetes vizsgálómódszerrel dolgoztunk, és pedig a 2. ábra szerinti „logikai 1 és 0” és a 3. ábra



11. ábra. Erős fekete pestis SEM (pásztázó elektronmikroszkópos) felvétele két túllapított, repedt termokompressziós gömbkötés körül. Az $Au_5Al_2 + Au_3Al$ intermetallikus fázisok habosan laza szerkezete az élvilágítású felvételen jól megfigyelhető (Stefániay Vilmos felvétele)



12. ábra. A TL 7400 N, 2-bemenetű TTL NAND kapunégyes morzsa egy kapujának mikrofotográfiája és topográfiája. Az U-alakú kollektor- és emitterkontaktusú két nagy tranzistorstruktúra a kimeneti totemoszlopok tranzisztorai. A meander (S) alakú ellenállás, mely a középső vízszintes V_{CC} fémzett csíkhöz csatlakozik, az R_1 . Mellette a négyzetes R_4 látható, közben a keskeny, egyenes R_2 diffundált ellenállással. R_3 ugyanolyan, mint R_2 , de rövidebb és R_4 mellett foglal helyet

10. ábra. Kontaktuspestis és alumínizálási hibák mikrofotográfiái (3-bemenetű NOR kapu; 1680 órás, 150 °C-os tárolás után): a) jó termokompressziós kötések, b) ugyanott kezdődő $AuAl_2$ fázisú bíborpestis, a kötések még kifogástalanok, c) az Au_5Al_2 fekete pestises intermetallikus fázis első jelei a kötések körül, az IC még működőképes, d) pestis és Kirkendall-üregképződés miatt a „C” bemenet termokompressziós kötése levált, az összes többi kötésnél erős fekete pestis, e) mint előbb, de a 0 (föld) és X (kimenet) kötések váltak le, f) a kimeneti kötés levált, az eredeti aranygömb alatti fekete folt az alumínizált kötési felületen arany szegregációra utal, a 0 kivételével az összes kötés erősen pestises, g) a jó termokompressziós kötések és jól szinterelt alumínizált csíkok olyan erősek, hogy a kötések aranygömbjeinek önkényes letépése a szilícium alaplamezből utóbbinak mély kagylós töréseivel járt együtt (kivéve a V_{CC} és C bemenet kontaktusokat), h) különösen erős fekete pestisképződés és szilícium migráció, melyek a kimeneti kollektor fémzett csíkra is kiterjedtek (utóbbi épp a teljes szakadás előtt), az oxid Newton-gyűrűs elszíneződéseit a SiO_2 réteg alatti szennyeződés okozza, i) az alumínizált kimeneti összekötő csík teljes korróziója és szakadása fekete pestis és szilícium migráció következtében, j) a fémzett kontaktuscsíkok hólyagosan felváltak az oxidról a magas hőmérséklet, a rossz eredeti szinterelés és így gyenge tapadás következtében, f) Az IC topográfiája és kapcsolása

Statikus elektromos terheléses vizsgálatok eredményei. $V_{CC} = 5,25 \text{ V}$

Funkció	Négyszeres, 2 bemenetű NAND-kapu								2x4 bemenetű NAND-kapu	J-K master-slave flip-flop		
Típus (ekvivalens)	TL 7400 N „eva” (=SN 7400 N); 1972						O 7400 (≈ SN 7400 N)	C 7420 (≈ SN 7420 N)	TL 7472 N / C 7472 (≈ SN 7472 N)			
Stresszmódszer	Logikai 1 és 0 (2. ábra)		erős gyorsítást, aktív tartományú (3. ábra)								„erős gyorsítást” (56 ábra)	
$P_{d\text{ tot}}$, össz-disszipáció	66 ± 4,5 mW		336 ± 24 mW				420 ± 30 mW	210 ± 15 mW	~200 mW	~260 mW		
N_0 , kezdeti darabszám	500	200	800	250	250	480	100	60	200	180	400	100
t_{tot} , vizsg. összeitő [óra]	5000	5000	5000	15 000	6000	2000	15 000	10 000	10 000	6000	5000	5000
Millió eszköz-óra	2,5	1,0	4,0	3,75	1,5	0,96	1,5	0,6	2,0	1,08	2,0	0,5
T_a , körny. hőmérs. [°C]	70	100	70	70	100	125	70	100	70	100	70	70
T_S , chip hőmérsékl. [°C]	76,6 ± 1,5	106,6 ± 1,5	104 ± 7	104 ± 7	134 ± 7	160 ± 7	110 ± 8	140 ± 8	90 ± 4	120 ± 4	~90 ± 5	~96 ± 6
$V_{\text{out}(0)} > 0,4 \text{ V}$	—	—	2	1	20	58	—	—	—	—	—	—
$V_{\text{out}(1)} < 2,4 \text{ V}$	—	—	—	1	—	2	—	—	—	—	—	—
hibásodások [db]												
$-I_{\text{in}(0)} > 1,6 \text{ mA}$	1	—	—	1	—	—	—	1	—	—	—	1
$I_{\text{in}(1)} > 40 \mu\text{A}$	—	—	1	—	2	—	—	1	—	—	—	—
$I_{\text{os}} < 18 \text{ mA}$	—	—	—	1	1	—	—	—	—	—	—	—
$I_{\text{CC}(0)}, I_{\text{CC}}$	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—
$F_{\text{CC}(1)}$	—	1	—	—	1	1	—	—	—	—	—	—
szakadt zárlatos	—	—	3	2	19	71	3	3	—	1	4	—
	—	—	2	5	1	9	—	—	1	1	1	—
Σ halmozott hiba [db]	1	1	8	11	44	141	3	6	1	2	5	1
$10^5 \bar{\lambda}$ [1/óra]	0,0400	0,100	0,200	0,294	2,94	14,7	0,200	1,00	0,0500	0,185	0,300	0,204
$10^5 \bar{\lambda}_{\text{max}}$ 60% C.L. [1/óra]	0,0830	0,207	0,296	0,338	3,06	~15,0	0,282	1,23	0,1035	0,293	0,384	0,423
V_a , aktív-energia [eV]	~0,355?		—	1,05	1,10	0,655	0,540	—	—	—	—	—
0-óránál hibás [db]	—	—	1	1	—	—	—	—	—	—	—	2

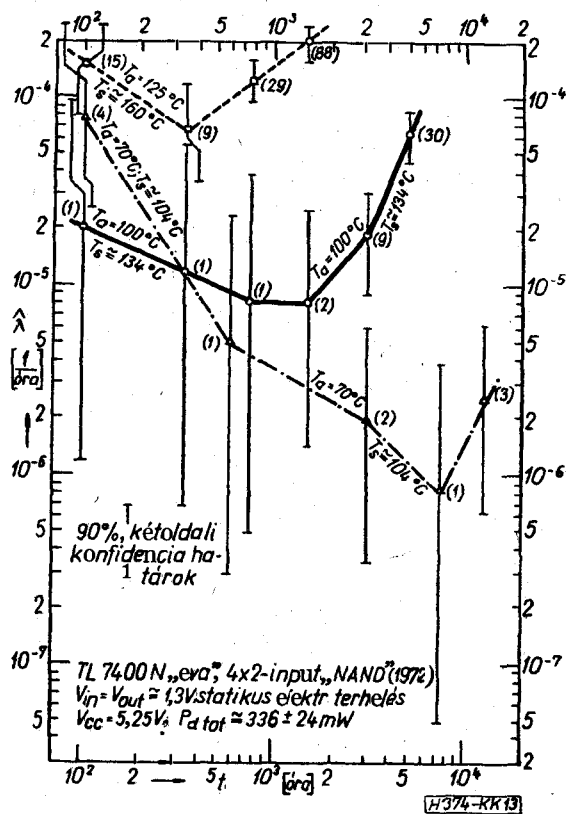
Végpont-kritérium TL 7400 N-nél 8 mA-t; a C 7400-nál 12 mA-t; a C 7420-nál 6 mA-t meghaladó $I_{\text{CC}(1)}$. Végpont-kritérium TL 7400-nál $I_{\text{CC}(0)} > 22 \text{ mA}$; a C 7400-nál $> 30 \text{ mA}$; a C 7420-nál $> 15 \text{ mA}$; TL 7472 N-nél $I_{\text{CC}} > 11 \text{ mA}$ és a C 7472-nél $I_{\text{CC}} > 16 \text{ mA}$. $-I_{\text{in}(0)} > 1,6 \text{ mA}$ az összes NAND-kapunál és a J-K flip-flop összes J és K bemeneteinél, míg a J-K flip-flop Preset (P), Clear (C) és óra (T) bemeneteinél $-I_{\text{in}(0)} P, C, T > 3,2 \text{ mA}$ a végpont-kritérium. A TL 7400 N-nél és a TL 7472 N J és K kapubemeneteinél $I_{\text{in}(1)}$, ill. $J_{\text{in}(1)} J, K > 40 \mu\text{A}$, míg utóbbi P, C és T bemeneteinél $I_{\text{in}(1)} P, C, T > 80 \mu\text{A}$. A C 7400, C 7420 és C 7472 típusoknál $I_{\text{in}(1)}$, ill. $I_{\text{in}(1)} J, K > 90 \mu\text{A}$ és $I_{\text{in}(1)} P, C, T > 160 \mu\text{A}$ a végpont.

elektromos viszonyai szerinti „erős gyorsítást, aktív tartományú” módszerrel a NAND-kapuknál. Természetesen csak a logikai 1 és 0 vizsgálat fedi a valóságos működési viszonyokat és ad autentikus megbízhatósági mutatót, abból is csak a 70 °C-os vizsgálat, amely még belül van az adatlapi maximumértéken.

A logikai 1 és 0 módszer 6,6 °C átlagos morzsahőmérséklet-emelkedést okozó nagyon kis disszipációjával csak szórványos degradációs hibásodást okozott (3,5 millió eszköz-órás, jelentős terjedelmű vizsgálatnál mindössze kettőt), így az eredmények szignifikanciája igen alacsony, és mint a 14. ábra összehasonlító $\log \lambda(1/T_s)$ gyorsítási függvényei is mutatják, a hibásodási ráta csak lényegtelenül nagyobb, mint a tárolásos vizsgálatnál fellépő érték (100 °C-on kb. kétszeres csak) és így, a várakozásnak megfelelően, a logikai 1 és 0 módszer a romlási folyamatok gyors „előhívása” szempontjából alig hatásosabb, mint a sokkal olcsóbb tárolásos vizsgálat. A vizsgálatok nagyon kis statisztikai biztosítottsága

miatt a kiadódó igen kis 0,36 eV aktiválási energia nem jellemző az ilyen vizsgálatra; a végleges eredményeket ismételt, nagyobb terjedelmű minták 15...25 ezer órás terhelése szolgáltathatja csak.

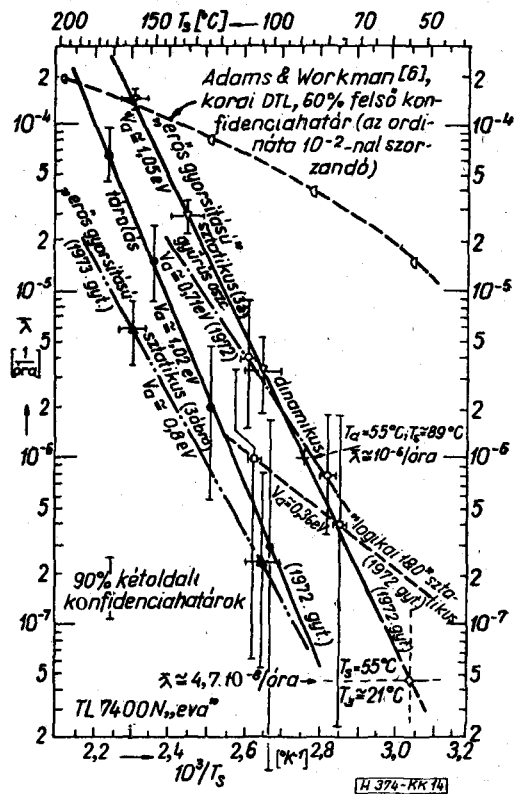
Annál többet mond a hazai TL 7400 „eva” NAND-kapu három hőmérsékleti lépcsőben (104, 134 és 160 °C átlagos morzsahőmérsékleteken) végzett, 10 millió eszköz-órát meghaladó vizsgálata a szigorú erős gyorsítást módszerrel, amely átlagosan 34 °C, már tekintélyes morzsahőmérséklet-emelkedéssel és így jelentős hőmérsékleti gradienssel jár, amely a felületi és a kontaktus-degradációs folyamatokat a leghatásosabb módon gyorsítja. A legfeltűnőbb jelenség a hőmérséklet emelésével rohamosan növekvő $V_{\text{out}(0)}$ és a szakadáshibák száma, amelynek közös és egyértelmű oka itt is (ahogy ezt a hibás példányok boncolása és mikroszkópos ellenőrzése is megerősíti) a termokompressziós kontaktusok intermetálikus fázisokba menő „fekete pestises” romlása. A magasabb hőmérsékletű lépcsőknél néhány ezer óra után fellépő



13. ábra. A TL 7400 N „eva” minta 3. ábra szerinti erős gyorsítási terhelése során nyert $\lambda(t)$ függvények 70, 100 és 125 °C környezeti hőmérsékletű lépcsőkben. A 100/134 °C-os lépcsőnél világosan felismerhető a jellegzetes teknőgörbe. A kontaktuspestis okozta elhasználódás jelei világosan mutatkoznak a két magasabb hőmérsékletű lépcső függvénymeneteiben. Zárójelben a hibásodott példányok száma

kontaktuspestist a 13. ábra $\log \lambda(t)$ függvényeinek hirtelenül emelkedő elhasználódási szakasza beszédesen mutatja: $T_s = 135$ °C-on ez 2000 óra, míg $T_s = 160$ °C-on már 500 óra után következik be, és $T_s = 105$ °C-nál 15 000 óra elteltével sem jelenik meg határozottan. A korai kiesések szakaszában viszont (100 óra körül) ugyanazt tapasztaljuk, mint a tárolásos vizsgálatoknál: a függvénymenetek nagyon közel kerülnek egymáshoz, és így az aktiválási energia ebben a szakaszban jelentősen kisebb, ahogy azt a bevezetés c) pontjában is mondtuk; sőt, a hibák véletlen csomósodása miatt a 70/104 °C-os vizsgálat az első 300 órában sokkal magasabb kiesést (λ -faktort) mutatott, mint a 30 °C-kal magasabb hőmérsékletű, 100/134 °C-os vizsgálati lépcső. Ez vezetett az [1] közleményünkben érthetetlen jelenségként említett ellentmondásra: a látszólag zérus aktiválási energiára. A vizsgálat folytatása során az ellentmondás feloldódott, és a 14. ábrán is láthatóan az elhasználódás, ill. a minimális lambda szakaszára (a kontaktuspestisre és a felületi folyamatokra) jellemző 1,05 eV aktiválási energia adódott: ugyanazt tehát, mint a tárolásos vizsgálatnál. Ez pedig megerősíti az ilyen degradációs folyamatok egységességéről vallott nézetünket, függetlenül a működési, ill. vizsgálati módtól. Így végeredményben megerősítést nyertek a bevezetés a), b), c) és g) pontjában elmondott tézisek. A másik szembeeső eredmény a zárlathibák vi-

szonylag erőteljes megjelenése: a 10 millió eszköz-órás kísérletnél összevontan 17 ilyen hiba túlnyomó része: 11 db a T_2 meghajtó tranzisztor C—B vagy C—E zárlata, mely a típus ilyen potenciális rejtett hibájára utal. (A többi 6 hibából 4 a sokemitteres T_1 tranzisztor bemeneti E—B diódájának zárlata és 2 a kimeneti T_4 totem-oszlop zárlata.) Ez azt mutatja, hogy ez a módszer a rejtett térfogati hibák gyors előhívására is alkalmas, amelyek esetleg csak sok tízezer óra után okoznának működésképtelenséget normál üzemi körülmények között. Ilyen hibák jellegzetesen lépnek fel a maszkoló SiO_2 réteg diszkontinuitásainál, pl. túlyukak (pinhole), oxid-karcok (csipesz) és oxid alámarás helyeinél, amelyek mentén hamis diffúzió vagy a fémzés behatolása az alsóbb rétegekbe a használati idő folyamán zárlatot okozhat akkor is, ha 0-óránál a zárlat még nem alakult ki, hisz a magas hőmérséklet és nagy hőmérsékleti gradiens elősegíti a fém- vagy dópoló atomok diffúzióját és migrációját ezen hibahelyek mentén [2, 4, 14]. Az egyéb felületi hatásból származó — pl. $I_{in(i)}$ — és diffundált ellenállás-változás hibák viszont csak elszórtan léptek fel. A hibásodások okainak eloszlását a 7. táblázat szerinti 250–250 db-os, 70, ill. 100 °C környezeti hőmérsékleten végzett TL 7400 N „eva” vizsgálatpár összesen 55 hibás példánynál a 8. táblázat mutatja.



14. ábra. A TL 7400 N „eva” minta $\log \lambda(1/T_s)$ gyorsítási egyenesei a tárolásos, a logikai 1 és 0, valamint a 3. ábra szerinti erős gyorsítási statikus és a gyűrűs oszcillátoros dinamikus terhelések eredményeiként. Az erős gyorsítási statikus mód-szerrel a tárolással megegyezően kb. 1 eV aktiválási energia lép fel. A vízszintes hibahatárok a morzshőmérséklet standard szórásának felelnek meg. Az 1973. gyártású tétel (bal szélen) több, mint 1 nagyságrendnyi javulást és kisebb (0,8 eV) aktiválási energiát mutat a hasonlóan erős gyorsítási statikus módszerrel vizsgált 1972. évi tételhez képest

8. táblázat

A hibásodás okainak megoszlása a TL 7400 N „eva” minta 70 és 100 °C környezeti hőmérsékletű, 250–250 db-os tételénél

Bondolások pestise, fémezés ($V_{out(0)}$ és szakadáshibák) (Ebből $V_{out(0)} > 0,4$ V degradáció)	42 (21)	76,38% (38,18%)
Nagyszintű áramparaméter-határok túllépése ($I_{in(0)}$, I_{OS} , $I_{CC(0)}$, $I_{CC(1)}$ degradáció)	4	7,27%
Nagy szivárgási áram, felületi állapotok ($I_{in(1)}$ hibák)	2	3,63%
Tranzisztor zárlat (pl. pinhole a SiO_2 rétegben)	6	10,92%
Egyéb ($V_{out(1)} < 2,4$ V)	1	1,82%
Összesen; 5,25 millió eszköz-óra alatt hibás	55	100,00%

Ugyanezen tétel 125/160 °C-os vizsgálati lépcsőjénél a 141 hiba 91,5%-a származik az Au-Al termokompressziós kötések pestiséből (ebből 50,4% a szakadás) és csak 6,4% a tranzisztor zárlat aránya. A tárolásos vizsgálatok hasonló jellegű 6. táblázatának eredményeivel való összevetésben egyetlen lényeges különbség tűnik csak fel: a zárlathibák viszonylagos megemelkedése az erős gyorsítású statikus módszerrel. A magas hőmérsékletű vizsgálati lépcsők szakadáshibáinak az egyes kontaktusok szerinti megoszlását tekintve úgy tűnik, mintha a nagy áramot hordozó V_{CC} és GND bevezetések nagyobb szakadási tendenciát mutatnának. A TL 7400 N „eva” minta 100/134 és 125/160 °C-os lépcsőit tekintve, a szakadáshibák megoszlása a 9. táblázatban található.

A nagy tápáramot (itt 336 mW/5,25 V = 64 mA) szállító V_{CC} és GND kontaktusok (lásd 3. ábra) erősebb szakadási hajlama nyilván nem véletlen. Egyrészt gyanítható, hogy a termokompressziós kontaktusok pestisképződésében (ill. a Kirkendall-üregek képződésében az aranygömb alatt) az átfolyó áramnak gyorsító szerepe van [7, 8, 9], pl. helyi áramkoncentráció okozta forró pontok fellépte miatt. Másrészt az onnan elvezető fémezés korróziója, migrációja és így szakadása szintén összefügg az átfolyó árammal [4, 14, 15, 16, 17, 22, 23, 24, 25, 26, 27], különösen geometriai hibahelyeken (oxid-lépcsők, maszkolási hiba pl. porszem takarása, alámarás vagy

karcolás mentén), ahol a fémezés elvékonyodik és az áramsűrűség megnő, amely az alumínium aktivált ionjai és az elektronok közötti ütközéses momentumcsere következtében az alumínium ionok migrációját okozza a pozitív elektróda irányában. Éppen az utóbbi elektromigrációs hatás miatt keletkezik több szakadás a GND és V_{CC} bevezető elektródák körül, mint azt a 9. táblázatban is láthatjuk, a többi kisebb áramú elektróda szakadásaival összevetve (47:43 arányban). Mivel a V_{CC} elektródán befolyó és a GND elektródán kifolyó tápáramok gyakorlatilag azonosak (lásd 3. ábra), nem csodálkozhatunk azon, hogy az elektromigráció által legalábbis elősegített nagyobb szakadási arány a két nagyáramú elektródánál közel azonos (bár a hiba fő oka nyilván a pestisesedés). Összevetve a 9. táblázat nagy disszipációjú statikus elektromos terhelésű vizsgálatának eredményeit az azonos típusú tárolásos vizsgálatának 5. táblázat szerinti eredményeivel, úgy a nagy tápáramot hordozó V_{CC} és GND elektródák szakadásának aránya az összes szakadásban $47/90 = 52,4\%$ a statikus vizsgálatnál, míg az elektromos terhelés nélküli tárolásos vizsgálatoknál ugyanez csak $8/38 = 21\%$.

A nagy áramsűrűség másodlagos hatása mind az Au-Al termokompressziós kontaktusok, mind az elvezető fémezett csíkok szakadásában a pestises kontaktus, ill. az elvékonyodott fémezés mentén a nagy áramsűrűség miatt, ill. a nagy átmeneti ellenállás következtében fellépő magasabb helyi hőmérséklet, amely mindkét folyamat előrehaladását erősen gyorsítja [4, 14, 15, 16, 17, 22, 23, 24, 25, 26, 27], és a folyamat, kumulatívva válva, végül is szakadáshoz vezet. Ebben jelentős szerepe lehet a szilícium szilárd oldhatóságának az alumíniumban a kontaktusablakokban, hisz ez az oldhatóság erősen nő a hőmérséklettel (250°-on kb. 0,01 súlysúlyszázalék, míg 550 °C-on már 1,3 súlysúlyszázalék).* A fémezésbe diffundált Si egyrészt gödröt hagy maga után a Si kontaktusablakban, másrészt a tiszta Al elvezetés felé diffundál és a beoldódás, most már lecsökkent keresztmetszetben és így a fellépő magasabb hőmérséklet miatt egyre gyorsulónan alymintatódik. Másrészt a be diffundáló Si atomok az alumínium csíkban a szemcsehatárok mentén dúsulnak fel, csökkentve ott a kohéziós erőket, így a fémezés hólyagosodását, majd szakadását elősegítve (lásd 10j ábra).

* Valójában a Si nagy mennyiségben a gyártási műveletet a (fémezés utáni kontaktus beszinterelés, ill. beötvözés) alatt kerül a kontaktusablak menti alumíniumba, a Si kontaktusban „gödröket” hagyva (24, 25) (I. F. 2. Függelék). Ez a folyamat helyi forrópontok (pl. elektromigráció miatti) képződése után a működés alatt folytatódhat.

9. táblázat

Szakadáshibák megoszlása a TL 7400 N „eva” tétel „erős gyorsítású” statikus elektromos vizsgálatánál

T_a/T_s (°C)	A_1	B_1	A_2	B_2	A_3	B_3	A_4	B_4	X_1	X_2	X_3	X_4	V_{CC}	GND	Össz.
100/134	2	1	—	1	—	—	—	1	—	—	—	—	8	6	19
125/160	4	2	1	3	4	1	3	2	6	3	4	5	18	15	71
Összesen:	6	3	1	4	4	1	3	3	6	3	4	5	26	21	90

Mindezen kontaktus- és fémezési hibafolyamatok csak magas hőmérsékleten és viszonylag hosszú idő elteltével mutatkoznak erőteljesen, tehát az elhasználódás szakaszában. E szempontból vegyük elemzés alá a 13. ábrán jól elkülönülő korai kiesés és konstans lambda, ill. az elhasználódás szakaszokat a TL 7400 N „eva” tétel 100/134 °C-os vizsgálati lépcsőjénél a 10. táblázat szerint. Az „elhasználódás” kezdetét 2000 óra után értelmezzük.

10. táblázat

Hibásodási okok megoszlása a TL 7400 N „eva” tétel $T_a = 100$ °C, $T_S = 134$ °C statikus elektromos vizsgálatának korai kiesés, ill. elhasználódás szakaszában

Vizsgált időszak Hibatípus	100, 200 és 1000 óránál		2000...6000 óra között	
Bondolt kontaktusok pestise; fémezési hibák $V_{out(0)} > 0,4$ V és szakadások ebből $V_{out(0)} > 0,4$ V degradáció	2	40%	37 (20)	94,88% (51,28%)
Nagyszintű áramparam. határok túllépése ($I_{in(0)}$, I_{os} , $I_{CC(0)}$, $I_{CC(1)}$) degradáció)	1	20%	1	2,56%
Nagy szivárgási áram ($I_{in(1)} > 40$ μ A degr.)	1	20%	1	2,56%
Tranzisztorzárlat (pl. pinhole)	1	20%	—	—
Összesen:	5	100%	39	100,00%
Katasztrófális/össz. hibaarány	3/5	60%	17/39	43,60%

Látható, hogy a szakadáshibák rohamos fellépte csak az elhasználódási szakaszban következik be. Vessük össze ezután a fenti eredményeket az ekvivalens külföldi C 7400 típus eredményeivel (7. táblázat). A $T_a = 70$ °C-os legalacsonyabb hőmérsékleti lépcsőnél nincs lényeges különbség a λ faktorok értékében, de a C 7400 típus $T_a = 100$ °C-os vizsgálati lépcsőjénél kb. egyharmadnyi hibásodási ráta adódott a hazai típussal való összevetéskor. Mindazonáltal a kis darabszámok miatt a szocialista eredetű típus eredményeit óvatosan kell értékelnünk. Hasonló a helyzet a C 7420 típus eredményeinél, ahol a nagyobb darabszám ellenére 3 millió eszköz-óránál csak 3 hiba adódott, de itt ne feledkezzünk meg arról, hogy az átlagos morzsahőmérséklet-emelkedés mindössze 20 °C, tehát a fele a C 7400-nál levőnek, tekintettel arra, hogy egyetlen DIL műanyag házban itt 4 helyett csak 2 NAND-kapu van, tehát fél disszipáció lép fel. A 30°-os környezeti hőmérséklet-emelkedés meglehetősen alacsony, kb. 0,55 eV-os aktiválási energiát eredményezett mindkét típusnál, de ez — már csak a szocialista eredetű típusok vizsgálatának kis statisztikai biztosítottságú eredményei miatt is — kevésbé meggyőző, mint a hazai típus ilyen eredményei. Mindkét külföldi típusnál a nagyobb disszipáció

(NAND-kapunként 105 mW átlagérték, szemben a hazai típusok 84 mW átlagértékével) a kisebb átlagértékű diffundált ellenállások következménye különben, ami az $I_{CC(0)}$ és $I_{CC(1)}$ tápáramok másfélszeres adatlapi határaiban is megmutatkozik. Meglepő különben a $V_{out(0)}$ degradációs hibák hiánya a szocialista eredetű típusoknál, ami azt sugalmazza, hogy a szakadások felléptében nem annyira a termokompressziós kontaktusok pestise, hanem a fémezés-szakadás viszi a főszerepet. Tény az, hogy a külföldi típusoknál kissé eltérő az Au-Al termokompressziós technológia: golyós kötés (ball-bonding) helyett inverz szemölcsökötést és kétszeres vastagságú (50 μ m) aranyhuzalt használnak (és az eredmények szerint sikeresen: a bondolás pestisére utaló közvetlen jelek nem találhatók).

Az előzőekhez szorosan kapcsolódva be kell számolnunk a TL 7400 N típus 1973-as, tovább javított technológiájú mintájának a 3. ábra szerinti erős gyorsítású statikus vizsgálata során nyert rendkívül kedvező eredményeiről. Újabb 800 db-ot vizsgáltunk 70 °C-os, míg 480 db-ot 125 °C-os környezetben (tehát 104, ill. 160 °C medián morzsahőmérsékleten). A vizsgálatok szerint 70/104 °C-on összesen 2 db $V_{out(0)}$ hiba lépett fel 10000 óra alatt, ami $2,5 \cdot 10^{-7}$ /óra — rendkívül kicsiny — lambda faktort adott, míg 125/160 °C-on 5000 óra alatt mindössze 14 hiba lépett fel (4 db $V_{out(0)}$, 2 db $I_{in(0)}$); 4–4 db szakadt, ill. zárlatos), mely $5,83 \cdot 10^{-6}$ /óra hibásodási rátát jelent. A 14. ábrán jól láthatóan ez több, mint 1 nagyságrendnyi javulást jelent a szintén igen jó 1972-es eredményhez képest. A $V_{out(0)}$ és szakadás hibák viszonylagos visszahúzódása a termokompressziós technika ugrásszerű javulására utal. Eszerint a hazai TTL SSI sorozat megbízhatósága nemcsak vetekszik a szocialista eredetű típusokkal, de — legalábbis a rendelkezésünkre álló utóbbi mintákhoz képest — azokat számottevően felül is múlja. Ezt mutatja az aktiválási energia csökkenése 1 eV-ról 0,8 eV-ra, tehát közelebb a fémezési hibák jellemző értékéhez, amellyel — óvatos becsléssel — a 45...55 °C környezetben előírásosan (számítógép-üzem) működő hazai IC-k a néhányszor 10^{-9} /óra rendkívül kicsiny hibásodási rátát érik el.

Végül a TL 7472 N, J–K master-slave flip-flop két tételének eredményeiről kell szólnunk. Megbízhatóság szempontjából a hazai NAND-kapu és J–K flip-flop közt nincs számottevő különbség, az utóbbi nagyobb bonyolultsága ellenére. Hasonló eredményű a külföldi és hazai minták összevetése is, bár az előző típusnál (C 7472) a vizsgált darabszám, és így az eszközóra terjedelem is kicsiny.

7. A kapcsolóüzemű elektromos vizsgálatok eredményei

Az eddig 10,5 millió eszköz-órás, viszonylag szerény terjedelmű ilyen vizsgálatok eredményeit a 11. táblázatban foglaltuk össze. A 75...110 °C közötti morzsahőmérsékletek mellett csak szórványos hibák léptek fel, tendenciózus kontaktus-pestises elhasználódásra utaló jelek, pl. tömeges $V_{out(0)}$ degradáció, nem mutatkoznak az eddigi 5...10 ezer óra alatt.

Dinamikus (kapesolóüzemű) elektromos terheléses vizsgálatok eredményei. $V_{CC} = 5,25$ V

Sztresszmódszer		Gyűrűs oszcillátor, $n = 3$ kapu		Parallel-vezérelt, igazság-táblás bemenetű 1. [1,18] irod.			
Kapcsolási frekvencia		~25 MHz		2 MHz óra; 0,5 MHz ismétlődés		100 kHz óra; 25 kHz ismétlődés	
$P_{d,tot}$ össz-disszipációs teljesítmény		105±7 mW		72±5 mW		68±4,5 mW	
Típus, ekvivalencia		TL 7400 N „eva” (= SN 7400 N)		FLH 101 kísérl. gy. (= SN 7400 N)		C 7400 (≈SN 7400 N)	
						C 7460 (≈SN 7460 N)	
N_0 , kezdeti mintaterjedelem	[db]	500	200	360	240	50	20
t_{tot} , vizsgálati összhidő	[óra]	10 000	5000	10 000	5000	10 000	10 000
$N_{0,tot}$, millió eszköz-óra		5,0	1,0	3,6	1,2	0,5	0,2
T_a , környezeti hőmérséklet	[°C]	70	100	70	100	70	70
T_s , chip-hőmérséklet	[°C]	80±2	110±2	77±1,5	107±1,5	76±1,5	~72
hibásodások [db]	$V_{out(o)} > 0,4$ V < V_{on}^{***}	—	—	2	—	—	—
	$V_{out(i)} < 2,4$ V	—	—	—	—	—	—
	$-I_{in(o)} > 1,6$ mA	1	—	—	—	—	—
	$I_{in(i)} > 40$ μA (90 μA*)	1	—	—	—	—	—
	$I_{CC(o)}$ * ($I_{CC(off)} > 4$ mA****)	—	—	1	7	1	—
	$I_{CC(i)}$ ** ($I_{CC(on)} > 2,5$ mA****)	—	—	1	4	—	—
szakadás		—	1	3	1	—	—
zárlat		2	3	2	—	—	—
E_r halmozott összhiba	[db]	4	4	9	12	1	—
$10^5 \bar{\lambda}$, halm. hibásodási ráta	[1/óra]	0,0800	0,400	0,250	1,02	0,200	—
$10^6 \bar{\lambda}_{max}$, 60% C.L.	[1/óra]	0,105	0,528	0,292	1,16	0,415	0,475
V_a , aktiválási energia	[eV]	0,707		0,540?		—	—
0-óránál hibás	[db]	3	—	—	5	—	—

* $I_{CC(o)} > 22$ mA a TL 7400 N és FLH 101 típusoknál és $I_{CC(o)} > 30$ mA a C 7400-nál.

** $I_{CC(i)} > 8$ mA a TL 7400 N és FLH 101 típusoknál, míg $I_{CC(i)} > 12$ mA a C 7400-nál.

*** C 7460 kettős, 4-bemenetű expandernél.

A TL 7400 N „eva” tételt két hőmérsékleti lépcsőben gyűrűs oszcillátor üzemmódban vizsgáltuk, a párhuzamos bemeneteket az-előző kapu kimenetével összekövetve $n=3$ NAND-kapunál, míg a negyedik kapu bemenetei az egyik kimenetre kapcsolódnak, kimenete pedig lebeg. Az ilyen üzemmódnál [1, 18] közel tiszta szinuszos, kb. 25 MHz frekvenciájú oszcilláció lép fel, amely a négyszeres NAND-kapü morzsahőmérsékletét kb. 10 °C-kal, tehát nem nagyon jelentősen emeli. Mint a táblázatból látható, ennél a módszernél is jelentős részarányú tranzisztor-zárlat lépett fel, ugyanazért, mint az erős gyorsítású statikus elektromos vizsgálatnál, és az aktiválási energia is megközelíti az ott nyert értéket: itt 0,707 eV. A vizsgálat folytatása az azzal járó nagyobb kieséssel közelebb hoz majd a pontosabb értékhez. A 100/110 °C-os lépcsőnél csak katasztrofális hibásodás adódott (3 zárlat, 1 szakadás). Az azonos típusú kísérleti gyártású FLH 101 tételt szintén 70 és 100 °C környezetben, 2 lépcsőben vizsgáltuk az [1, 18] közleményben ismerttetett igazságtáblás parallel vezérlésű módszerrel, 10-szeres worst-case fanout-nak megfelelő kimeneti terhelésnél, logikai 0 kimeneti állapotban $I_{sink} = 16$ mA és logikai 1 kimenetnél $I_{load} = 400$ μA maximális ohmos terheléssel, amelyen kívül még kb. 270 pF kapacitás is terheli a ki-

menetet. Ilyen állapotban az átlagos morzsahőmérséklet-emelkedés mindössze kb. 7 °C, ami degradáció szempontjából nem túl jelentős, alig kétszeres $\bar{\lambda}$ -faktor emelkedés várható az azonos környezeti hőmérsékletű tárolás eredményéhez képest. Összehasonlítva ennek a mintának azonos T_a -n végzett tárolási eredményeivel, az itteni dinamikus vizsgálat 4...5-szörös emelkedést mutat a $\bar{\lambda}$ faktorban, amely több-letemelkedés a potenciál-grádiens sztrezz-hatásában keresendő. A $\bar{\lambda}(t)$ függvények szignifikanciája a túl kevés kiesés miatt amúgy sem nagy, így azokat meg sem adjuk, elég annyit elmondani, hogy a $T_a = 70$ °C lépcsőben a függvény 10 ezer óráig monoton csökken, míg $T_a = 100$ °C-nál 2000 óra után olyan enyhe az emelkedés, hogy azt tendenciózus elhasználódásnak nem tekinthetjük még. Az aktiválási energia is azért adódott 0,54 eV igen kis értéknek, mert a korai kiesés szakaszának az eddigi vizsgálatban még döntő szerepe van.

A két külföldi eredetű minta oly kis darabszámú, hogy 10 000 óra alatt csak az egyik tételnél volt egyetlen kiesés, és így az eredmény szignifikanciája nagyon kicsi.

Érdekesebb az FLH 101 kísérleti gyártású tételnél az a megállapítás, hogy a degradációs hibák, 2 $V_{out(o)}$ hibát kivéve, csak a tápáramfelvétel határainak túl-

lépésében (13 db) nyilvánultak meg, aminek okát a 3. fejezetben tárgyaltuk, az R_1 és R_2 diffundált ellenállások átlagértéke lényegesen a névleges érték alatt van. A végleges gyártás (TL 7400 N „eva”) ezt az elcsúszást már kiküszöbölte.

8. A különböző stresszmódszerek összehasonlítása
Extrapoláció üzemi viszonyokra

Az egyes vizsgálati módszereket a rejtett, potenciális hibák napvilágra hozása, tehát a gyorsítás mértéke szerint vetjük itt össze elsősorban. Erre egyrészt a hazai négyszeres NAND-kapu kísérleti gyártású FLH 101 tétele, másrészt ugyanennek reguális gyártású TL 7400 N „eva” tétele alkalmas mind a nagy darabszám, mind a sokfajta végzett vizsgálat miatt, de legfőképpen azért, mert a két minta biztosan egy-egy gyártási tételből származik és nem keverék-minőség.

A TL 7400 N „eva” mintát — az igazságtáblás parallel vezérelt dinamikus módszeren — kívül mind-egyik ismertett stresszmódszerrel vizsgáltuk, így a 14. ábra gyorsítási diagramja jó alapnak ígérkezik az összehasonlításra. Mivel a viszonylag kis eszköz-óra számú logikai 1 és 0 statikus és gyűrűs oszcillátoros dinamikus módszerekkel kisebb aktiválási energiát kaptunk, mint a tárolásos és a 3. ábra szerinti erős gyorsítású statikus módszereknél egységesen adódó $V_a = 1$ eV, ezért az összehasonlítást nem elég egyetlen, közepmagas morzsahőmérsékleten elvégezni. Az összevetést 100, 112,5 és 125 °C-on a 12. táblázat mutatja. A kísérleti gyártású FLH 101 tétel tárolásos és igazságtáblás, parallel-vezérelt kapcsolóüzemű vizsgálatainak összevetését is ott tüntetjük fel.

A 12. táblázat eredményeit óvatosan interpretálva (pl. a $T_S = 112,5$ °C-os összevetés közepes értékeit, ill. arányait tekintve) úgy tűnik, hogy az egyes elektromos terhelési módszerek viszonylagos hatásossága a rejtett hibásodási mechanizmusok előhívásában, a tárolásos vizsgálat eredményét egységnek

véve, a hatásosság növekvő sorrendjében a következő: logikai 1 és 0 statikus ÷ 1,5...2,5; parallel vezérelt igazságtáblás dinamikus (2 MHz óra) ÷ 4...5,5; gyűrűs oszcillátoros dinamikus ($n=3, f=25$ MHz) ÷ 5...7 és végül a 3. ábra szerinti erős gyorsítású statikus ÷ 8...10.

A 12. táblázat a TL 7400 N „eva” tétel vizsgálati eredményeinek extrapolációját is tartalmazza, $V_a = 1$ eV-os aktiválási energiát figyelembe véve az átlagos üzemi körülményeknek megfelelő $T_a = 55$ °C környezeti hőmérsékletre; tárolásnál a 6. ábra, míg a 3. ábra szerinti erős gyorsítású statikus terhelésnél a 14. ábra alapján. Ugyanakkor az azonos $T_S = 55$ °C morzsahőmérsékletet tekintve is szerepel az extrapolált érték. Az utóbbi szerint $T_S = 55$ °C-on a hazai TTL SSI áramkörök hibásodási rátája az igénybevételi módtól függően $5 \cdot 10^{-9}$ és $5 \cdot 10^{-8}$ /óra értékek közt mozog. Az átlagos kapcsolóüzemű igénybevételnek (pl. számítógép), a $T_a \approx 45...55$ °C-on megfelelő hibásodási ráta tehát a két érték középértéként $2 \cdot 10^{-8}$ /óra körüli becslést ad, amely ipari alkalmazásban rangos, jó megbízhatóságnak tekinthető. Az 1973. évi gyártás ehhez képest további, legalább 1 nagyságrendnyi javulást hozott.

A 12. táblázat extrapolációjánál, valamint az egyes stresszmódszerek viszonylagos hatásosságának összevetésénél csak a TL 7400 N „eva” tétel tárolásos és a 3. ábra szerinti erős gyorsítású statikus vizsgálatainak eredményei tekinthetők véglegesnek és egyértelműen megalapozottnak, hisz csak ezeknél kaptunk konzisztensen 1 eV aktiválási energiát, és ezek statisztikai biztosítottsága is kielégítő.

Végül vizsgáljuk meg azt, hogy a különböző stresszmódszerek különböző hőmérsékleteken hogyan befolyásolják a létrejövő hibásodások fajtáit, ill. azok okait. Ezt áttekinthető formában a 13. táblázatban találhatjuk meg a TL 7400 N „eva” tételre vonatkozóan.

Három lényeges következtetést vonhatunk le:

- (i) a növekvő mértékű gyorsítás, tehát a növekvő hőmérséklet, a hibák okainak megoszlását

12. táblázat

Különböző vizsgálati módszerek relatív hatásossága a 4×2 bemenetű hazai NAND-kapu vizsgálatánál, a tárolás eredményeihez viszonyítva. $\bar{\lambda}^*$ = az adott elektromos terhelés eredménye

Vizsg. minta	Terhelési mód	TL 7400 N „eva”				FLH 101 kísérleti gyártás	
		Tárolás	Logikai 1 és 0 statikus	Gyűrűs oszc. dinamikus	3. ábra szerint statikus	Tárolás	Parallel vez. igazságtáblás din.
100 °C	(1/óra) $\bar{\lambda}^*/\bar{\lambda}$ (tárolás)	$3 \cdot 10^{-7}$ 1	$8,5 \cdot 10^{-7}$ ~ 2,8	$2,5 \cdot 10^{-6}$ ~ 8,3	$2,8 \cdot 10^{-6}$ 9,3	$2 \cdot 10^{-6}$ 1	$7,3 \cdot 10^{-6}$ 3,7
112,5 °C	(1/óra) $\bar{\lambda}^*/\bar{\lambda}$ (tárolás)	$8,5 \cdot 10^{-7}$ 1	$1,3 \cdot 10^{-6}$ ~ 1,5	$5 \cdot 10^{-6}$ ~ 5,9	$7,2 \cdot 10^{-6}$ 8,5	$2,5 \cdot 10^{-6}$ 1	$1,5 \cdot 10^{-5}$ 5,6
125 °C	(1/óra) $\bar{\lambda}^*/\bar{\lambda}$ (tárolás)	$\sim 2 \cdot 10^{-6}$ 1	— —	$9 \cdot 10^{-6}$ ~ 4,5	$1,6 \cdot 10^{-6}$ 8,0	$3,6 \cdot 10^{-6}$ 1	— —
Extrapolált $\bar{\lambda}$ [1/óra]	$T_S = 55$ °C $T_a = 55$ °C	$\sim 5 \cdot 10^{-9}$?	?	$4,7 \cdot 10^{-8}$ ** $1 \cdot 10^{-6}$ ***	?	?

* A $T_S = 55$ °C-hoz tartozó környezeti hőmérséklet $T_a = 21$ °C.

** A $T_a = 55$ °C-hoz tartozó morzsahőmérséklet $T_S = 89 \pm 7$ °C.

A hibásodások okainak megoszlása a különböző vizsgálómódszerek szerint és a hőmérséklet függvényében

T_s ehip-hőmérséklet-tartomány		70...80 °C		
Terhelési mód	Hibatípus	Log. 1 és 0 statikus	Gyűrűs oszcillátor dinamikus	
		db	db	%
Au-Al bondolások pestise; fémzésmigráció és szakadás [$V_{out(0)}$ és szakadáshibák] [Ebből $V_{out(0)} > 0,4$ V degradáció]		—	—	—
		—	—	—
Nagyszintű áramparaméter-határok túllépése [$I_{in(0)}$, I_{os} , $I_{CC(0)}$, $I_{CC(1)}$ hibák]		1	1	25
Nagy szivárgási áram, nagy felületi állapotfűréség [$I_{in(1)}$ hibák]		—	1	25
Tranzisztorzárlat (pl. pinhole miatt)		—	2	50
Egyéb [pl. $V_{out(1)} \leq 2,4$ V]		—	—	—
Összhiba [db]/%		1	4	100
Katasztróf./összhiba arány [%]		0	50	
Millió eszköz-óra		2,5	5,0	

* Nem független hiba, ugyanazon a példányon lépett fel, melynél az $I_{in(0)}$ degradáció.
** „Erős gyorsítású” módszer.

gyökeresen megváltoztatja, éspedig a kontaktuspestis és fémzési szakadáshibák dominanciája felé. 100 °C-on az ilyen hibák részaránya 0...40%, míg 150 és 175 °C között 92...95%;

- (ii) tranzisztorzárlat csak elektromos igénybevétel esetén lép fel (egyetlen esettől eltekintve), és különösen a legnagyobb disszipációt jelentő gyűrűs oszcillátoros dinamikus és a 3. ábra szerinti erős gyorsítású statikus szteszeknél. Részaránya csak viszonylag alacsony hőmérsékleten (110 °C alatt) jelentős, mert magas hőmérsékleten a kontaktus- és fémzési hibák elnyomják;
- (iii) a többi hibatípus, akárcsak a karasztrófális hibák aránya az összhibásodáshoz, sem a hőmérséklettel, sem a stresszmódszerrel nem mutat észrevehető összefüggést.

Függelék

F.1. Paraméter eloszlásfüggvények

Az IC hibás voltának megítélése a degradációs hiba vagy funkcionális működésképtelenség első megjelenésére alapozódik, hacsak a degradációs hibánál a határadat túllépése ismét el nem tűnik (visszajavul). Ha egy adott mérési időpontban egyszerre több paraméter szerint vált hibássá az adott áramkör, úgy a hiba okát egyetlen paraméterre értve minősítjük a következő fontossági sorrendben: funkcionális hibák (zárlat vagy szakadás), $V_{out(0)}$ és $V_{out(1)}$ logikai szintek, $I_{in(0)}$ és $I_{in(1)}$ bemenő áramok, I_{os} rövidzárási áram és végül az $I_{CC(0)}$, $I_{CC(1)}$ tápáramfelvétel.

A hibás IC-t mindazonáltal nem rekesztjük ki a további vizsgálatból (hacsak mérhetetlenné nem vált), és paramétereit tovább is mérjük, hogy az azokból nyert eloszlásfüggvények torzítatlanok maradjanak.

A paraméter-eloszlásfüggvényeket a vizsgálat előtti 0-órás és vizsgálat végi állapotban szerkesztjük meg, esetenként 1–2 közöttes időpontban is, hisz így tanulmányozható egy adott módszerű és szintű vizsgálati sztesz hatása a paraméterek stabilitására, mediánjuk és standard szórásuk változására, ill. az eloszlásfüggvények jellegzetes torzulására, különösen az eloszlásfüggvények extremitásainál (széleinél), ahogy ezt a 15. ábra mutatja.

Általánosságban elmondható, hogy a 0-órás eloszlás homogén minőség esetén normális eloszlás, az $I_{in(i)}$ bemenő áramét kivéve, amely log-normál eloszlású (lásd a 15. és 16. ábrákat). Az eloszlások mediánja és standard szórása még igen erős és huzamos sztesz esetén sem változik észrevehetően, ahogy ezt a TL 7400 „eva” minta $T_s = 134 \pm 7$ °C-os, 6000 órás erős gyorsítású (l. 3. ábra) statikus elektromos terhelésének a 15. ábrán bemutatott eloszlásain is megfigyelhetjük.

A 15...17. ábrák eloszlásfüggvényeinek a halmozott százalékarány 16 és 84%-os értékeinek metszéspontjait is feltüntettük; normális eloszlás esetén ugyanis az ezen százaléktértekekhez tartozó abszcisszák képviselik a standard szórás határait, közöttük terül el a teljes népesség 68%-a, míg a medián egybeesik az algebrai átlaggal.

Az egyes eloszlásfüggvények csak akkor torzulnak jelentősen, ha az IC-k huzamos, extrém igénybevétel szenvednek el, mint ahogy ez pl. 6000 óra után a 15. ábrán látható. Jó példa erre a 16. ábra,

a TL 7400 N „eva” NAND kaputípusnál (1972. gyártás)

100...110 °C					125...135 °C					150...160 °C					175 °C		
Tárolás		3. ábra szer.** statikus elektromos			Gyűrűs oszillátor dinamikus		Tárolás		3. ábra szer.** statikus elektromos			Tárolás		3. ábra szer.** statikus elektr.		Tárolás	
db	db	%	db	%	db	%	db	%	db	%	db	%	db	%	db	%	
—	8	42,10	1	25	2	50	39	88,64	17	94,44	129	91,49	31	93,94			
—	(3)	(15,79)	—	—	(2)	(30)	(20)	(45,45)	(7)	(38,89)	(58)	(41,13)	(9)	(27,27)			
—	2	10,53	—	—	—	—	2	4,55	1	5,56	—	—	1	3,03			
—	1	5,26	—	—	2	50	2	4,55	[1]*	[5,56]*	—	—	1	3,03			
1	7	36,85	3	75	—	—	1	2,26	—	—	9	6,38	—	—			
—	1	5,26	—	—	—	—	—	—	—	—	2	1,42	1	3,03			
1	19	100,00	4	100	4	100	44	100,00	18	100,00	141	100,00	33	100,00			
100	63,16		100		0		45,45		55,56		57,45		63,64				
3,0	7,75		1,0		2,0		1,5		1,0		0,96		0,5				

ahol a TL 7400 N „eva” tétel 70 és 175 °C közötti tárolásos vizsgálatának egyes hőmérsékleti lépcsőinél a vizsgálat végi, ill. ahhoz közeli $V_{out(0)}$ és $I_{in(0)}$ eloszlásfüggvényeket mutatjuk be. Bár a medián csak jelentéktelenül csúszott el, mindkét függvény jellegzetes torzulása figyelhető meg 125 °C tárolási hőmérséklet felett: a vízszintes felé törve szétterülnek a nagy $V_{out(0)}$, ill. a zérus $I_{in(0)}$ irányába. A torzulások oka, ill. a mögöttük rejlő fizikai hiba más és más a két függvénynél. A $V_{out(0)}$ eloszlásánál a degradálódott hányad a népesség 5%-a 125 °C-on és kb. 10%-a 150 °C-on, míg az 50%-ot éri el 175 °C-on a vizsgálat 10 000, ill. 5000 óras fázisában. Az erősen megnövekedő $V_{out(0)}$ részint a pestises, nagy átmeneti ellenállású termokompressziós bondolás, részint annak teljes szakadásának következménye. Szakadásnál $V_{out(0)}$ az $I_{sink} = -16$ mA áramgenerátor 7 V körüli kapcsolófeszültségére ugrik fel. Az $I_{in(0)}$ eloszlások vízszintes felé való törése, amely 125 °C-on a népesség 2,5%-ára, 150 °C-on már 6%-ára, míg 175 °C-on kb. 25%-ára terjed ki, a bemeneti termokompressziós kontaktusok szakadására utal. Szakadásnál ugyanis $I_{in(0)} = 0$ és $I_{in(1)} = 0$.

Az I_{os} eloszlásának hasonló viselkedése V_{CC} szakadással kapcsolatos, vö. az 1. táblázattal. A $V_{out(0)}$, $I_{in(0)}$ és I_{os} eloszlásfüggvények menetében hasonló torzulások mutatkoznak a 134 °C átlagos morzsa-hőmérsékletű erős gyorsítású (3. ábra) statikus vizsgálat 6000 órája után is, miként a 15. ábrán látható, egybehangzóan a 13. ábra $\lambda(t)$ függvényeivel. A degradálódott hányad a töréspontokon túl fekszik, tehát kb. 15%-a $V_{out(0)}$ -nál, 4% az I_{os} -nél (V_{CC} szakadás), míg az $I_{in(0)}$ eloszlásban a népesség kb. 3,7%-ánál $I_{in(0)} = 0$ bemenet szakadásra utal. Hasonló, bár

enyhébb torzulások léptek fel az FLH 101 kísérleti gyártás 150 °C-os tárolásának 17. ábra szerinti $V_{out(0)}$ és $I_{in(0)}$ eloszlásainál. Mindazonáltal ezek a torzulások az átlagot (mediánt) és a standard szórást még alig vagy egyáltalán nem befolyásolják.

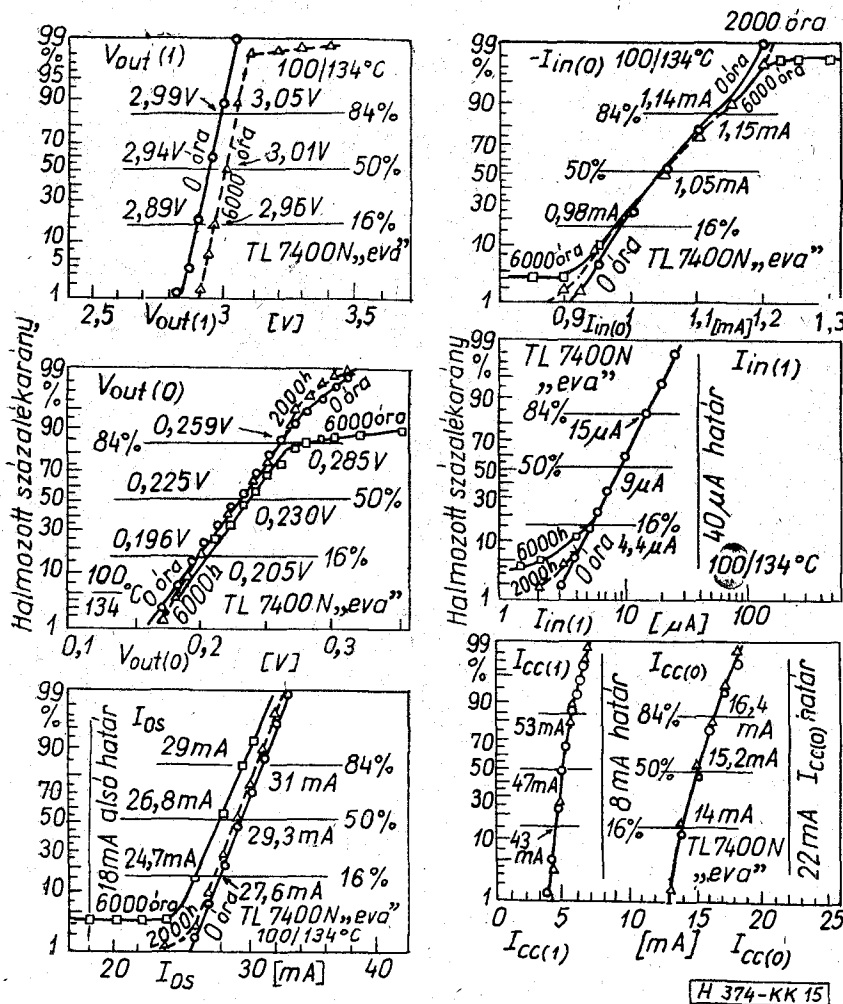
Összefoglalásképpen megállapíthatjuk, hogy a TTL műanyag tokozású IC-k paraméterstabilitása 150 °C hőmérséklet alatt kitűnő: jelentős változás még huzamos, sok ezer órás igénybevétel alatt sem lép fel sem a medián, sem a standard szórás értékében.

F.2. Néhány jellegzetes IC hibamechanizmus

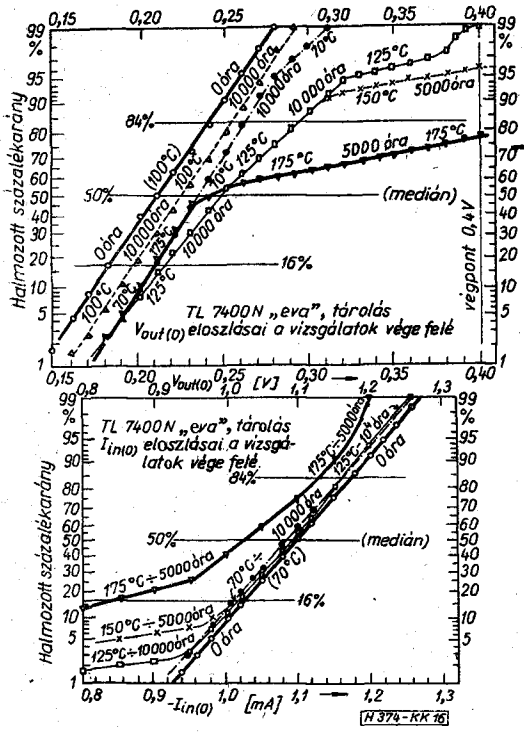
A tönkrement eszközök hibaanalízise során néhány jellegzetes hibamechanizmussal találkoztunk. Az analízishez felhasználtuk a nagy felbontó képességű röntgensugaras átvilágítást, a pásztázó elektronmikroszkópot (SEM) és az optikai mikroszkópot is. A röntgenátvilágításos és SEM felvételeket Stefániai Vilmos készítette a TUNGSRAM Kutatóban, ill. a Fémipari Kutató Intézetben.

F.2.1. Az Au-Al kötés pestisesedése, üregek képződése a kötés alatt

Al filmre Au szállal készített termokompressziós gömbkötéses kontaktálást alkalmazunk a hazai integrált áramköröknél. A két fém (Au-Al) tulajdonsága, hogy hő hatására óhatatlanul intermetallikus fázisokat hoz létre. Az öt intermetallikus fázist Hansen 1958-ban azonosította már, azóta a félvezető eszközöknél ez a kérdés csak részben módosult. Philofsky [22] azonosított egy Al-Si-Au fázist is. A vizsgálatok bebizonyították, hogy a Si jelenléte



15. ábra. A TL 7400 N „eva” minta 3. ábra szerinti erős gyorsítású $T_a = 100^\circ\text{C}$, $T_S = 134 \pm 7^\circ\text{C}$ hőmérsékletű statikus terhelése során alakuló paraméter-eloszlásfüggvények 0, 2000 és 6000 óránál. A medián és a szórás az extrém igénybevétel ellenére nem vagy csak jelentéktelenül változik 6000 óra után; számottevő torzulások csak az eloszlásfüggvények extrémitásainál lépnek fel, különösen $V_{out}(0)$ -nál a kimeneti kontaktus pestise és szakadások, $I_{in}(0)$ és $I_{in}(1)$ -nél bemenet- és V_{CC} -szakadások, végül I_{os} -nél egyéb szakadások miatt



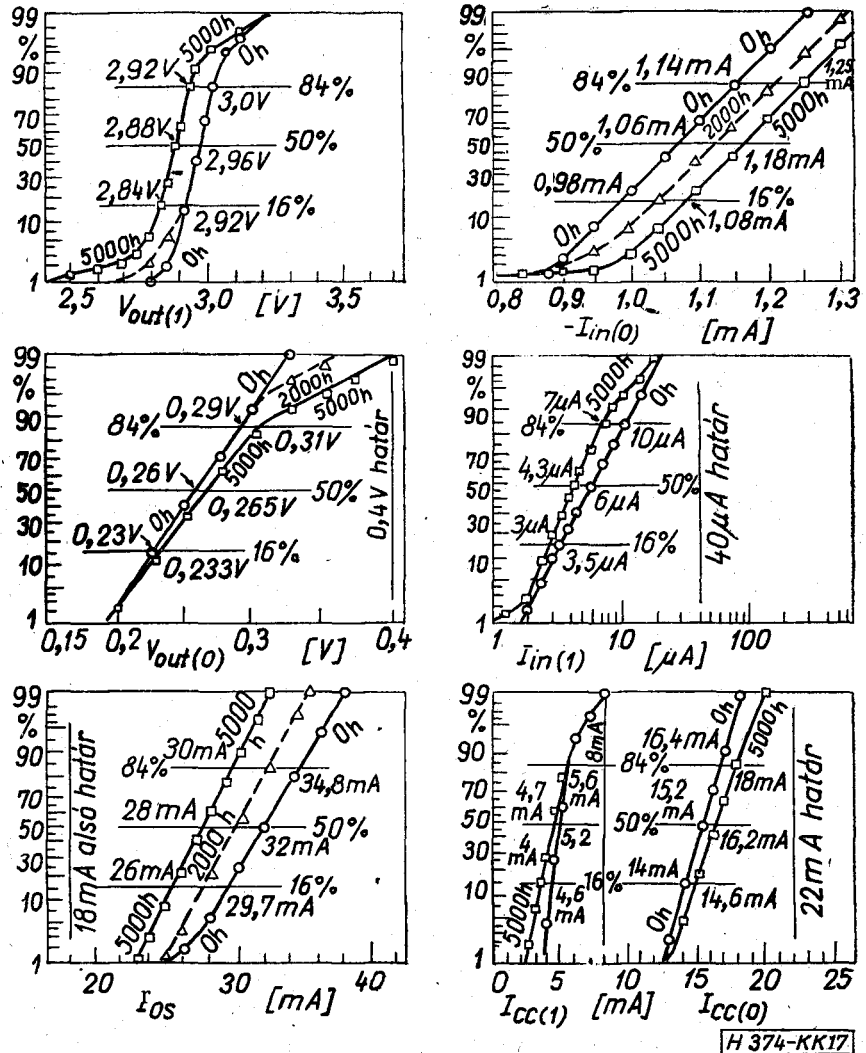
katalizáló hatást gyakorol egyes pestises fázisokra, bár azok Si nélkül is — függetlenül a technológiától — létrejönnek.

A jó kötés jellemzője, hogy a termokompressziós kötés környékén (az Al-on) egy sűrűbb, finomabb szemcseszerkezetű pestises állomány alakul ki, de a kötésterület alá nem hatol be ez a folyamat (11. és 18. ábrák).

A rossz — technológiailag nem megfelelő — kötés pestisesedése a kötésterület (az Au gömb) alatt indul meg, és üregesedést okozva [23] felváláshoz vezet, bár a környező Al még nem alakult át pestises állománnyá. Az ilyen struktúra durva szemcséjű (19. ábra).

16. ábra. $V_{out}(0)$ és $I_{in}(0)$ eloszlásfüggvényei a vizsgálat végén vagy közel ahhoz, a TL 7400 N „eva” minta 70, 100, 125, 150 és 175 °C-os tárolása után. Referencia a 100 °C-os $V_{out}(0)$, ill. a 70 °C-os $I_{in}(0)$, 0-órás eloszlás. 125 °C felett az eloszlások számottevő torzulást szenvednek az extrémításoknál. $V_{out}(0)$ eloszlásának szétterülése a nagyobb értékek felé a kimeneti bondolás pestises eredetű átmeneti ellenállás-növekedése, ill. szakadáshibák miatt jön létre és 175 °C-on 5000 óra után a népesség 21%-ánál okoz $V_{out}(0) > 0,4\text{V}$ hibát. Az $I_{in}(0)$ eloszlások szétterülése a zérus érték felé részint a szakadt bemenetek következménye, mely a 175 °C-os lépcső 100 példányánál, 800 bemenetre vetítve, 14 db-ot (1,75%-ot) tesz ki. Az utóbbi hatás a 125 és 150 °C-os lépcsőknél is fellép, ha kisebb mértékben is

17. ábra. A kísérleti gyártású FLH 101 tétel 150 °C-os vizsgálatának paraméter-eloszlásfüggvényei 0, 2000 és 5000 óránál. A 15. és 16. ábra eloszlásaival összevetve már 0 óránál is jól megfigyelhető egyrészt az $I_{in(1)}$ szivárgási áram, másrészt a nagyszintű áramparaméterek eleve nagyobb szórása és az $I_{CC(1)}$ határközeli mediánja, mely utóbbiak a diffundált ellenállások, ill. a bázisdiffúzió nagyobb technológiai szórásával magyarázhatók, míg a szivárgási áram nagyobb szórása és változása erősebb felületi állapotúság eredménye



Az analíziseredmények és a tapasztalatok is azt igazolják, hogy Au-Al rendszerben kellő hőmérsékleten és kellő idő alatt mindig keletkezik intermetallikus fázis, de ez nem minden esetben okoz kötésdegradációt, jó technológiával a kötés alatti pestisesedést, ill. üregesedést el lehet kerülni.

F.2.2. Túlszinterelés, kontaktusablak-gödrösödés. Al-Si reakciók, termomigráció

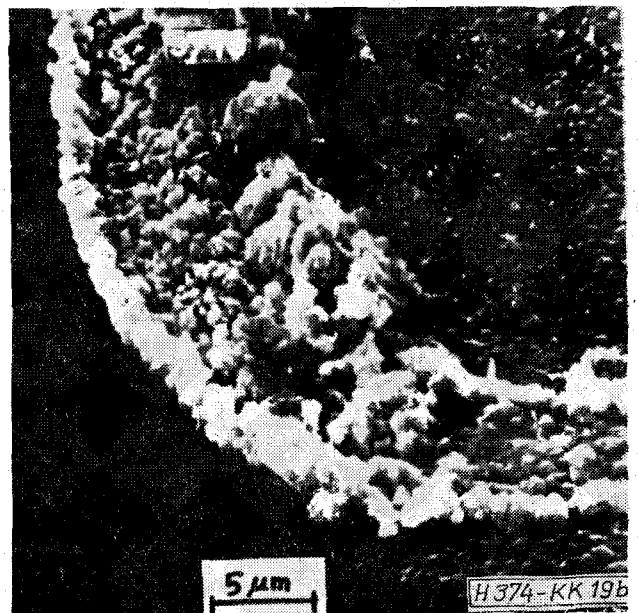
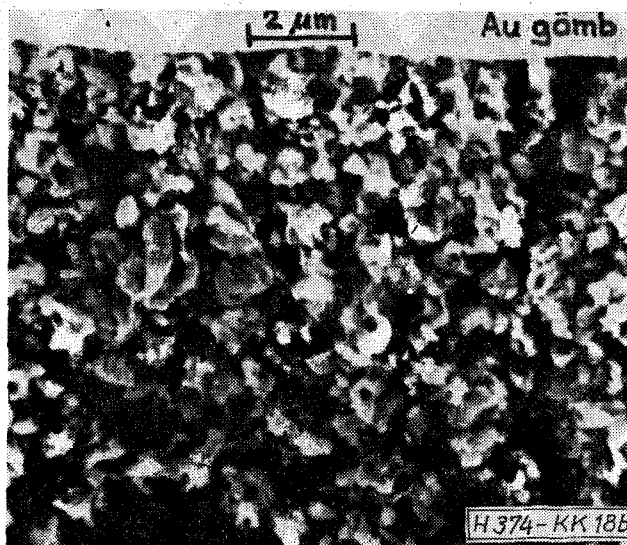
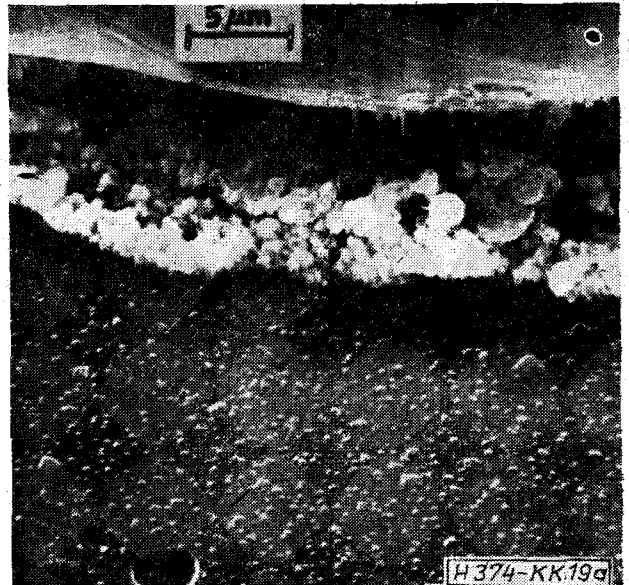
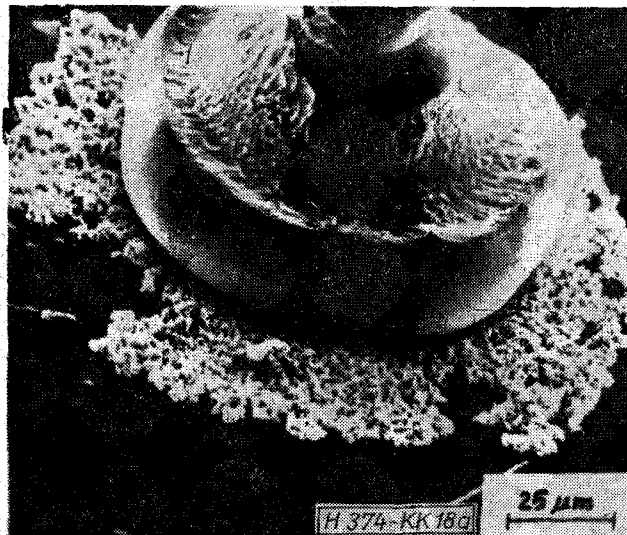
Az integrált áramköri fémezések jellegzetes technológiai eredetű hibafajtája a kontaktusablak alján levő szilícium beoldódása az elvezető Al-csikba. Az Al film fémezésbe a párologtatást követő szinterelő hőkezelés (ötvözés) hatására Si oldódik be, amely 500...570 °C közt már igen jelentős. A Si-nak Al-ban való szilárd oldási telítettsége az általánosan alkalmazott szinterelési hőfokon és időtartam esetén (450...550 °C, 5...30 perc) nem következik be. A kész eszköz működése során a Si beoldódása tovább folytatódik relatíve alacsony (kb. 250 °C) hőmérsékleten is. A beoldott Si a kontaktusablak aljáról a tiszta Al vezetõn keresztül elvándorol és távolabb, a lehülés után, ill. a hidegebb helyeken a szemcsehatárokon kiválik. Ez a folyamat tehát nem áll meg, hanem folytatódik addig, amíg az oxidlépcsőnél —

ahol nagy a hőmérsékleti grádiens — a szemcsehatárokon kiváló Si hatására szakadás lép fel, vagy amíg a kontaktusablak aljából kioldott Si helyébe nyomuló Al az átmenetet a gödrökben rövidre nem zárja. A folyamattal R. J. Anstead és S. R. Floyd [24], valamint J. McCarty [25] is foglalkozott. Bizonyították, hogy jóval a Si-Al eutektikus hőmérséklet alatt (577 °C) is folytatódik a Si-nak az Al-ba való beoldódása. Ezt részben az Al és a SiO₂ közötti exotherm reakció is igazolja, mely mély gödröket markol ki a (111) szilíciumból (20. ábra). A Si-Al eutektikus hőmérséklet, 577 °C feletti túlszinterelésnél az Al a Si-SiO₂ határfelületen, az oxid alatt penetrálva ötvözési háromszögesedéssel zárlatot okozhat szomszédos kontaktusok, ill. vezetők közt, és a fémsík felülete összeugrik, ráncosodik (21. ábra).

A Si szilárd oldódása az Al-ba termomigráció következménye, ahol ezen diffúziós folyamat hajtóereje a termikus grádiens, és iránya a migráló anyag negatív koncentrációs grádiense.

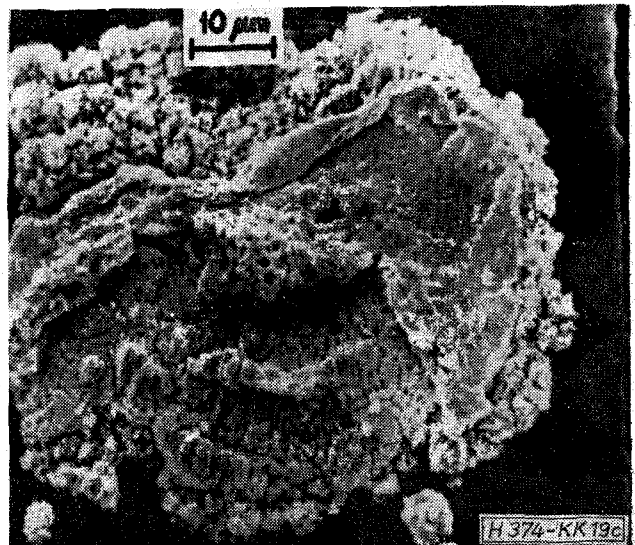
F.2.3. Elektromigráció

A metallizációs meghibásodások másik nagy csoportja a nagy áramsűrűség (és hő) hatására fellépő anyagvándorlásos szakadás. A jelenséget többen ta-



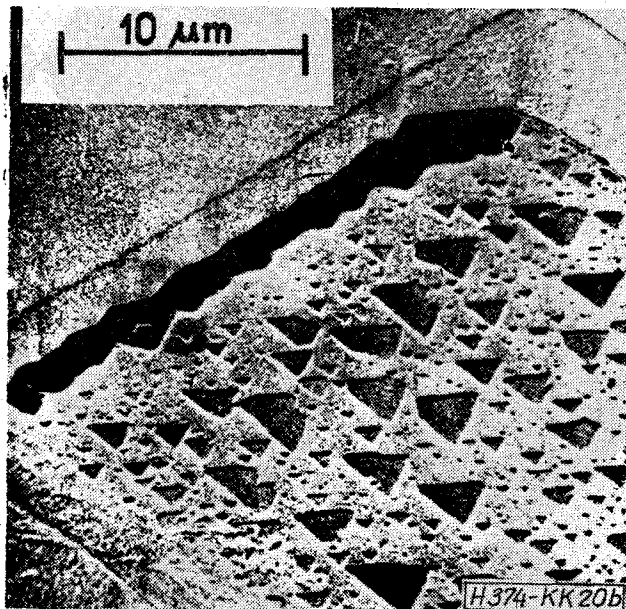
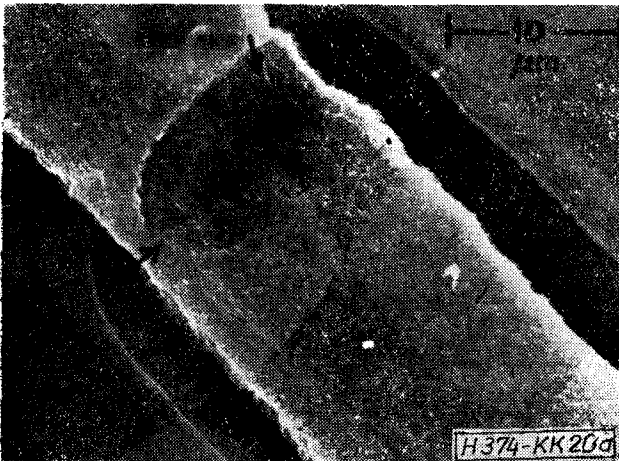
18. ábra. Az Au-Al bondolás környezetében a fémezés sűrű, finomszemcsés intermetallikus fázisokkal van borítva, de a kötés alatt nincs üregképződés: ártalmatlan pestis esete (a). A TL 7400 N fém-üveg tokban, 175 °C-on, 4000 óra után még hibátlan. Erős nagyításnál jól látható a tömött, finomszemcsés struktúra (b) (SEM)

nulmányozták, így J. R. Black [26] is, aki kísérletei alapján számszerű eredményeket is közölt. Vékonyréteg vezetőknél $5 \cdot 10^4$ A/cm² áramsűrűség és 150 °C felett domináns meghibásodási okká válik az áramsűrűség hatására fellépő anyagvándorlás. A vékony keresztmetszetű vezetőben a nagy áramsűrűség hatására fellépő Joule-hő a folyamatot gyorsítja, és a hibamechanizmus kumulatívva válva vezet a fémezés szakadásához (22. ábra). Az elektromigráció

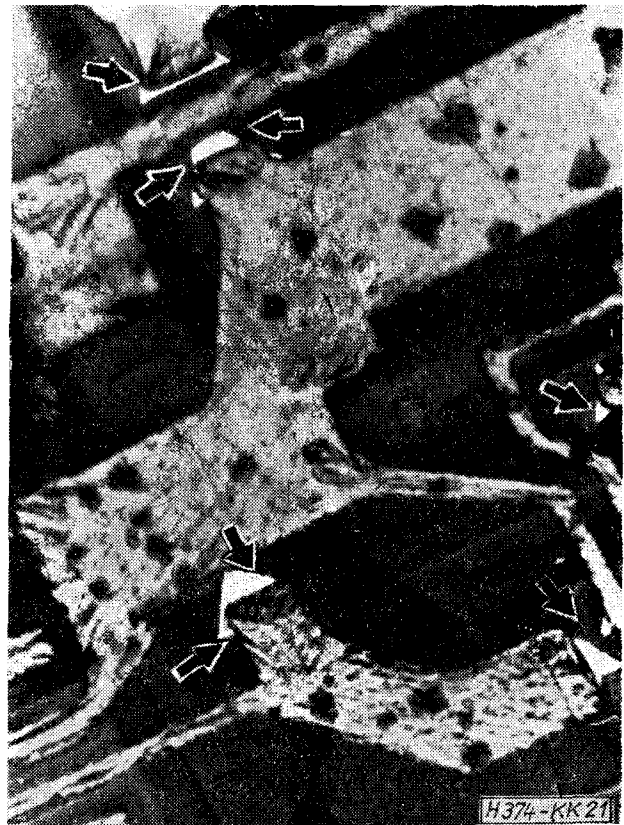


19. ábra. Végzetes kontaktuspestis és Kirkendall-üregképződés, mely az Au-Al bondolás kötésterülete alá terjed és amelyet a kötésterület pereme élesen határol. Az a) felvételen a durva, változatos formájú (globulák, hegyláncok, cseppkövek) pestis-struktúra és a hatalmas, összefüggő üreg jól látható. A b) kép az Au golyó érintésre való leválása után a kötésterületet mutatja: kontaktus csak a peremen volt. A kötés alatti terület összefüggő, vastag, üreges és laza fázisképződést mutat a c) ábrán (TL 7400, fém-üveg tok, 150 °C, 500 óra, SEM)

voltaképpen oka az elektronok ütközéses momentumcseréje a termikusan ionizált fématomokkal, amelyeket az elektronszél a pozitív elektróda felé hajt, üregeket hagyva a negatívabb oldalon, amelyek összenöve végül is szakadáshoz vezetnek. Tömör vezetőkben az elektromigráció tömbdiffúziós jelenség [26, 27], amely csak 500...800 °C felett észrevehető, olyan áramsűrűségeknel, amelyek a gyakorlatban huzalokban nem lépnek fel. A viszonylag sokkal jobban hűtött vékonyréteg fémfilmeknél mint az IC-k-nél, az áramsűrűség szokásos értéke 2–3 nagyságrenddel nagyobb, és az elektromigráció 100...250 °C-on is jelentőssé válik, mivel az öndiffúzió nem a térfogatban, hanem a szemcsehatárok mentén zajlik le [15, 19, 26, 27]. Ennélfogva az átlagos szemcseméret nagyon fontos az elektromigrációs hajlam szempontjából. Kis hőmérsékleten ($\cong 200$ °C) párologtatott



20. ábra. Szinterelési (beoldódási) gödör látható egy TA 72 702 analóg áramkör kontaktusablakának vezető élénél: a Si a továbbvezető Al csíkba oldódva a beszívódott fémezésen át is jól látható gödröt hagyott. Az alumínium kioldása után a csúspasz (111) szilícium sok sekély, jellegzetesen háromszöges szinterelési (ötvözési) gödröt mutat, amely a vezető él mentén (fent) összefüggő, 0,5 μm mély üreggé nőtt össze (b) (SEM felvételek)



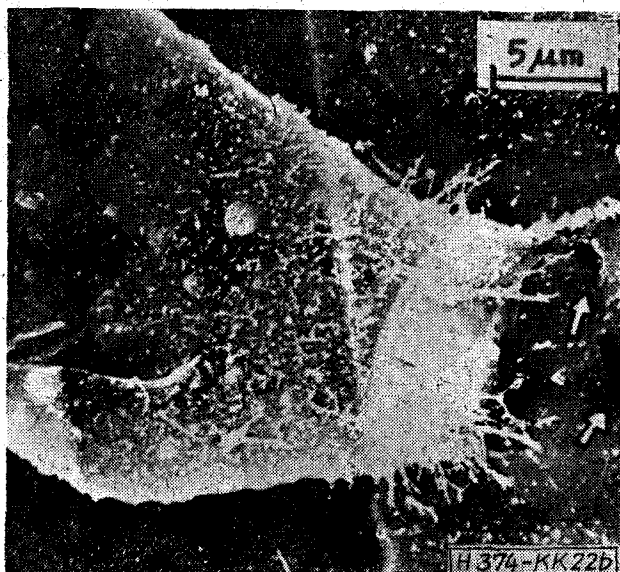
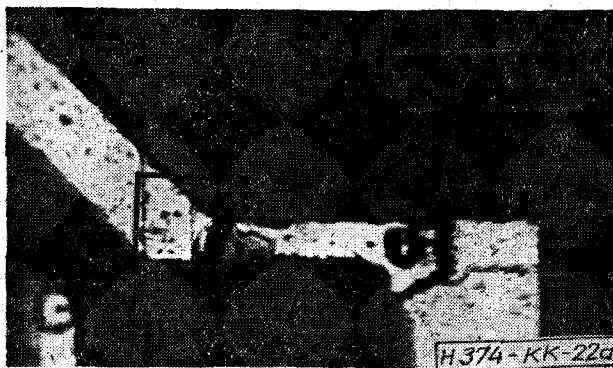
21. ábra. Túlszintereit DTL NAND-kapú fénmikroszkópos képe, ráncosan összetegrott Al fémezéssel, amely jellegzetes négyzetes Al_2O_3 zárványokat mutat a kialakult exotherm Al-SiO₂ reakció miatt, és a kontaktusablakoknál a Si-SiO₂ határfelületen laterálisan penetráló Al háromszögekkel (nyílak), amelyek közül a bal felső zárlatot okozott

Al film, 1...2 μm átlagos szemcsézettséggel 0,5 eV körüli aktiválási energiát és viszonylag erős hajlamot mutat elektromigrációra, míg 400...500 °C-os, 5...8 μm-es szemcseméretű Al filmek, 0,7...0,85 eV-tal, sokkal kisebbet [15, 26, 27]. Az elektromigráció támadási helye a nagy termikus gradiensek helyein kívül főleg a fémion-mozgékonyosság erős divergenciahelyeinél van, pl. a nagy és kis szemcsézetség határvonalánál, Al-Si és Al-Au kontaktusoknál (Si-ban az öndiffúzió igen kicsiny) és áramkoncentrációs helyeken (oxidlépcsők, alámart vagy rossz fotolitográfia miatt elvékonyodott fémfilmek).

Az elektromigráció megakadályozása céljából az áramsűrűséget minél inkább csökkentve, megfelelően széles és lehetőleg rövid fémezett összeköttetéseket, nagy felületű Al-Si kontaktusablakokat, lankás oxidlépcsőket és nagy szelcséjű, jól orientált filmszerkezetet kell kialakítani. Adalékfémek (Cu, Ni, Mg, Cr) néhány %-ban az Al-hoz adva erősen csökkentik a migrációs hajlamot [27].

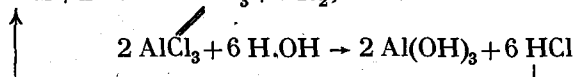
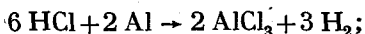
F.2.4. Korrózió

Bár az Al filmet a 20...100 Å vastag természetes oxid jól védi korrózió ellen, ezt a gátat savak vagy lúgok nyomai is leépíthetik nedvesség (pl. tokszivágás) jelenlétében, pl. a NaCl formájában mindenütt jelenlévő klór önfenntartó zárt ciklust ered-



22. ábra. Elektromigrációs szakadás közel egy oxidlépcsőhöz, amelyet a túl vékony, alámart fémsík melegezése okozott (TA 72 702, kísérlet). A fénymikroszkóp (a) furesa árnyékot, árkot mutat a szakadás helyén harántirányban, mely az erős SEM nagyítás alatt (b) a SiO₂ felületén levő néhány 100 Å mély laterális olvadékaróknak bizonyult. Az ehhez szükséges kb. 3500 °C helyi hőmérsékletet valószínűleg az Al-SiO₂ exotherm reakció szolgáltatta, amelyet a szakadás előtti 690 °C-nál (Al olvadáspont) magasabb hőmérséklet indított be. A fémzés szétfröccsenése a szakadáshelyen jól látható. Az (a) ábrán bekeretezett rész felel meg a (b) ábrának

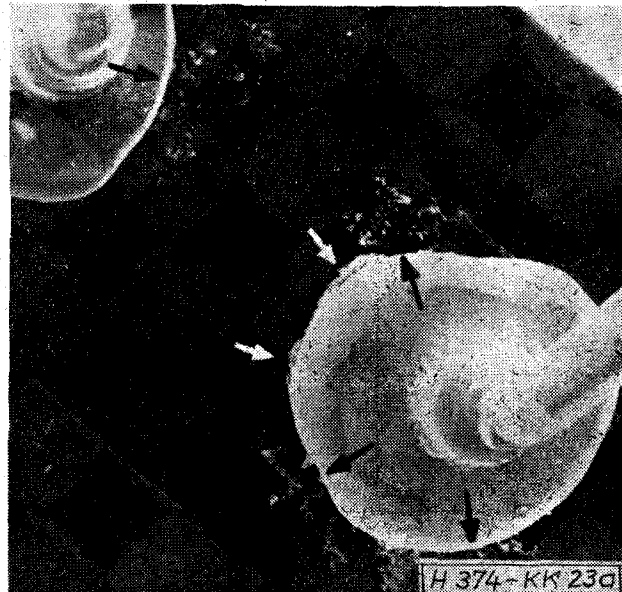
ményezhet mindaddig, míg a nedvesség el nem fogy, ill. az Al film el nem szakad:



amelynek eredménye a kristályvízben dús (átvezető), de önmagában szigetelő kocsonyás alumínium-hidroxid.

Bár a kémiai korróziót jó tokzársi technikával és kellő tisztasággal el lehet kerülni, az Au-Al termokompressziós kötésnél a fém pár közt fellépő kb. 3 V-os elektrokémiai potenciál nedvesség jelenlétében galvanikus korróziót okozhat, melynek folyamán ugyancsak a kocsonyás Al(OH)₃ + n.H₂O alakul ki (23. ábra). Ezt a nagy áramsűrűség, ill. külső pozitív feszültség (működés) erősen fokozhatja, és az alumí-

nium film elszakadhat. A nedvesség kizárásán kívül ezt a hajlamot a morzsa külvilágtól való mechanikus elválasztásával, elsősorban pirolitikusan, gőzfázisból növesztett üvegbevonattal, továbbá szilikonlakkbevonattal lehet megakadályozni. Mindkét technikát együttesen alkalmazzuk a hazai IC-knél, az üvegbevonatnál természetesen ablakokat nyitva az Au-Al bondolások helyén [28].



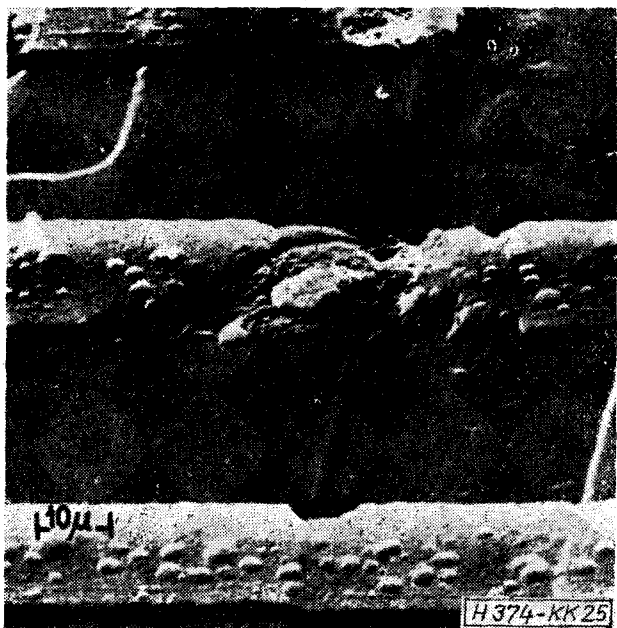
23. ábra. Korrózió egy Au-Al bondolás körül (a). A fekete nyilak mutatják a SiO₂-re leelőgő kocsonyás Al(OH)₃ korróziós produktumot, amely sötétebb színével és féregszerű, dűrvább szemcseszerkezetével (b) erősen elüt a szintén jelenlevő pestistől (fehér nyilak) (TL 7472 N, fém-üvegház, 21 nap, 40 °C nedves-meleg klíma után a tok átérésztett, SEM felvételek)

F.2.5. Reziszt-, túlyuk- és zárlathibák

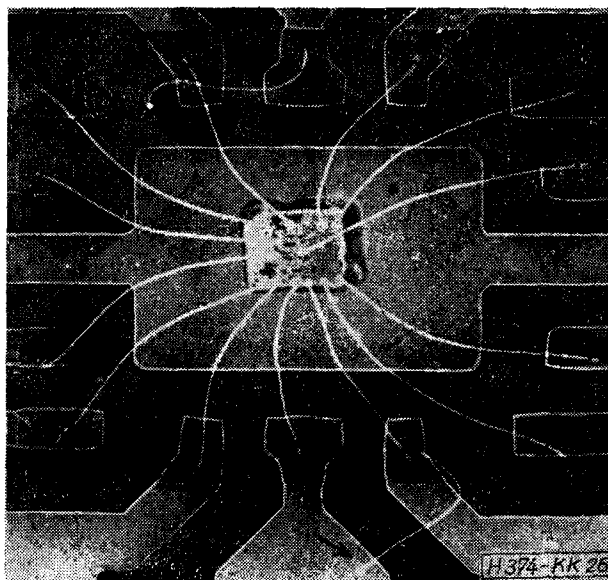
Porszem okozta takarás a fotolitográfiás művelet alatt végzetes és alattomos hibákra vezethet, a működés folyamán, mivel 0-órás mérésekkel nem mindig mutatható ki, mint pl. a 24. ábra esete, ahol a bizonytalan körvonalú, jellegzetes és hatalmas túlyuk ($\sim 20 \mu\text{m}$ Ø) elvékonyította a fémezést, és így az erősebb helyi melegedés miatt az Al a mély túlyukon át a SiO_2 alatt levő kollektordiffúzióba penetrált néhány 1000 óra után, ott zárlatot okozva. Túlyukak menti hamis B vagy P diffúzió is hasonló eredménnyel járhat. A fémezés rezisztthibák miatti helyi alamarása az elektromigrációs szakadások kiindulása lehet, l. a 25. ábrát.



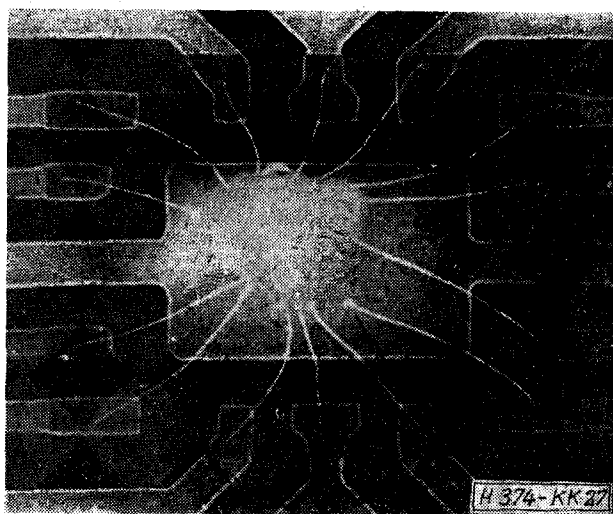
24. ábra. Nagyméretű porszem okozta óriási túlyuk mentén a fémezés elvékonyodott és 3300 óra, 125°C üzem után zárlatot okozott a túlyuk mentén bediffundáló Al, a helyi erős melegedés miatt (SEM)



25. ábra. Reziszt-hiba (buborék) egyenetlen, elvékonyodott, hólyagos fémezésre vezetett (SEM)



26. ábra. Röntgenátvilágításos felvétel finomfókuszú csővel felderítette a szakadás (fent) és zárlat (lent, nyíl) okát: a jobb oldalról nagy nyomással betóduló műanyag a fröccsöntéskor a gyenge felső bondolást lesodorta, és úgy ágyazta be, hogy az zárlatot m-m okoz, de a lefűzés után otffejtett aranyozás (nyíl) a bal szomszéd kivezetővel zárlatot okozott



27. ábra. A jobb felől betóduló műanyag elsodorta a hibásan forrasztott morzsát a kovar állványról, és leszakította a jobb oldali bondolásokat (röntgenátvilágítás)

F.2.6. Felforrasztási és tokozási hibák

A röntgensugaras átvilágítás lehetővé tette a kész, műanyag tokozott eszközök hibaanalízisét is. Az egyetlen szerelés miatt kis termogömbbel készült bekötő huzalt a fröccsajtoláskor a prészerszám üregébe beáramló műanyag letolja az elemről, ami Au huzalvégzárlatot is okozhat (26. ábra). A 400°C körüli eutektikus forrasztással (Si-Au) az aranyozott kovar alaplemeze erősített morzsa hibás, csak kis felületen kötő ráforrasztás esetén egyrészt a nagy hőellenállás miatt erős morzsa hőmérséklet-emelkedést és ezen át idő előtti tönkremenetelt okozhat.

másrészt a nagy nyomással betóduló műanyag elsodorhatja a morzsát, és az összes Au-Al bondolás elszakadhat (27. ábra).

Köszönetnyilvánítás

Ezúton mondunk köszönetet Stefániay Vilmosnak (FKI) a SEM mikrofotografiák és röntgenátvilágítá-

sos felvételek mintaszerű elkészítéséért, továbbá Csornai Lászlónak, Nagy Lászlónak (EIVRT Félvezető MEO), Zanaty Tibornak, Kászonyi Lászlónak, Huszka Zoltánnak és Komlóssy Évának (EIVRT Félvezető Fejlesztés) értékes támogatásukért és észrevételeikért, végül mind az EIVRT, mind a HIKI vezetőségének e munka támogatásáért és a munka megjelentetésének engedélyezéséért.