

Elektromigrácia a spoľahlivosť integrovaných obvodov

ŠTEFAN LUBY

Electromigration and reliability of integrated circuits

Abstract

Electromigration is the process of atomic transport in the metallization of electronic components or integrated circuits (IC), caused by the drift of the material of thin film, e.g. aluminum conductors by a flux of electrons (electron wind) at a high dc current density of about 10^5 A/cm² or more. As a result, voids are formed in the conducting paths and the drifting material is collected in hillocks or whiskers. This leads to interrupted interconnections, broken passivation layers and other defects. Research on electromigration, its suppression and increasing the lifetime of electronic components and circuits took place at the Institute of Electrical Engineering of SAS in cooperation with TESLA Piešťany and TESLA Rožnov in the years 1972-1990. After summarizing the basic physics of electromigration, the paper presents the results of the lifetime of aluminum-based metallization, which was successfully improved by: a) increasing the average grain size of polycrystalline Al layers and reducing their dispersion; b) by alloying aluminum conductors with copper and c) by covering them with various passivation layers. Original results were obtained in case of loading of the conductors by the superposition of direct and alternating current. Measurements were made on experimental chips from oxidized silicon, on which conducting stripes of various dimensions and thickness were photolithographically patterned both on the planar surface and across steps in the underlying oxide. The achieved reliability of metallization was comparable to that from abroad, and the research resulted in the creation of a scientific school. At the end, electromigration research and the development of metallization of components and ICs after 1990 until today are briefly summarized.

1. Začiatok výskumu elektromigrácie v Slovenskej akadémii vied

Pred rokom 1990 sme v Československu mali elektrotechnický priemysel reprezentovaný podnikmi a závodmi TESLA, METRA a i. Vysoké školy i výskumné ústavy s nimi aktívne spolupracovali. Elektrotechnický ústav SAV si vzhľadom na svoje tradície vo výskume polovodičov hľadal pozíciu v spolupráci s TESLOU Rožnov pod Radhoštěm a TESLOU Piešťany.

TESLA Rožnov p. R. sa udomácnila v technológii bipolárnych súčiastok a integrovaných obvodov (IO), ktoré boli vtedy hlavným ťahúňom polovodičového priemyslu. Ale TESLA Výskumný ústav pro sdělovací techniku A. S. Popova v Prahe sa zaoberal unipolárnymi technológiami typu MOS (kov – oxid – polovodič) a tlačil na TESLU Rožnov, aby ich výsledky preberala. Vyriešilo sa to tak, že unipolárne súčiastky a obvody sa delimitovali roku 1972 do

TESLY Piešťany. V Piešťanoch v tom videli šancu, ale mali aj obavy z prevzatia technológie, ktorá vyžadovala ešte značné zdokonalenie [1].

Presun MOS programu na Slovensko bol výzvou pre slovenskú výskumnú komunitu, aby sa v ňom angažovala. V EÚ SAV sme začali s výskumom MOS štruktúr so žiaruvzdornou molybdénovou vrstvou ako samozákrytovým hradlom. Tvorilo zároveň difúznú masku, čo umožnilo dosiahnuť presný súkryt hradla s emitorm a kolektorom, t.j. zmenšenie parazitných kapacít (R MOS – refractory MOS) [2]. Predbehol nás však rýchly posun polovodičového priemyslu k použitiu samozákrytového hradla z polykryštalického kremíka.

Pri hľadaní novej témy sme narazili na elektromigráciu (EM) ako proces degradácie metalizácie IO, ktorý bolo treba skúmať a potlačiť. Tento problém dovtedy výskumníkom na Slovensku unikal a stal sa našim poľom neoraným. Spočiatku sa zdal príťažlivý tým, že pri testovaní až do zničenia vzorky je výsledok vždy zaručený, je to iba otázka záťaže a času. Vo výskume polovodičových a tenkovrstvových štruktúr v 60. a 70. rokoch 20. stor. pri našom vtedajšom vybavení nebolo totiž jednoduché dopracovať sa k relevantnému výsledku, o čom ironicky hovorila poučka „*ak sa ti experiment podarí, nikdy ho neopakuj*“. Neskôr sme pochopili, že v elektromigrácii to nie je inak, že je to dokonca ešte zložitejšie, lebo pri skúmaní akejkoľvek spoľahlivosti sú presvedčivé iba výsledky podložené väčšími štatistickými súbormi údajov. Prvé overovacie merania sme urobili s pracovníkmi TESLY Piešťany [3] a dohodli sme sa na širšom výskume, do ktorého sme neskôr získali aj TESLU Rožnov. Spolu sme zhotovili vyše 800 testovacích čipov a vyhodnotili takmer 9 000 experimentálnych spojov. Keby sme však chceli dôsledne preskúmať všetky kombinácie geometrických rozmerov spojov, metód ich depozície, pasivácie, tepelného spracovania, dotovania prímiesami, puzdrenia a i. tak by tých možností bolo okolo 1,5 milióna. A to by sa nebolo dalo zvládnuť ani s pomocou okruhu priateľov a spolupracovníkov, ktorých sme v TESLE Piešťany a TESLE Rožnov získali a ku ktorým patrili v Piešťanoch riaditeľ Peter Pfliegel, jeho námestník Alojz Slovák, Vladimír Áč, Milan Mancel, Jozef Palaj, Milan Dubnička a i. a v Rožnove Emil Belluš, vedúci vývoja polovodičových súčiastok, Ivan Záruba, Vladimír Strakoš, Jaromír Valíček, Radek Lenhard a ďalší.

2. Základy fyziky elektromigrácie [4, A]

Pohyb vlastných atómov i atómov prímiesí v tuhej látke ovplyvňujú rozličné hnacie sily. V metalizácii polovodičových súčiastok zaťažených prúdom sú významné najmä sily elektrického pôvodu, spôsobujúce elektromigráciu. Je to prenos častíc atomárnej povahy (atómov, iónov) spôsobený jednosmerným elektrickým prúdom alebo elektrickým poľom.

Všeobecný výraz pre transport častíc je

$$\mathbf{J} = -D \nabla N + \mathbf{F} (D/kT)N, \quad (1)$$

kde \mathbf{J} je tok častíc, D – difúzny koeficient, N – koncentrácia častíc v látke, \mathbf{F} – hnacia sila, k – Boltzmanova konštanta a T – absolútna teplota. Prvý člen na pravej strane rovnice (1) vyjadruje vplyv izotermálnej difúzie v gradiente koncentrácie a druhý člen vplyv hnacej sily. Ak sa jedná o silu elektrického, teplotného alebo mechanického pôvodu, hovoríme o elektromigrácii,

termomigrácii alebo baromigrácii. Tu sa budeme zaoberať elektromigráciou, navyše len jej zložkou spôsobenou tokom prúdu. V tom prípade vyjadríme hnaciu silu ako

$$F_w = Z^*_w |e| E, \quad (2)$$

kde $Z^*_w < 0$ je efektívne nábojové číslo odpovedajúce sile tzv. elektrónového vetra (wind), ktorá vyjadruje unášanie atomárnych častíc elektrónmi zrážkovým mechanizmom a e je náboj elektrónu. Efekt sa prejaví pri hustotách prúdu väčších ako 10^5 A/cm^2 . (Za týchto podmienok možno spravidla vplyv izotermálnej difúzie zanedbať.) Hodnota Z^*_w pre meď je -20 pri $175 \text{ }^\circ\text{C}$ a pre hliník -10 pri $225 \text{ }^\circ\text{C}$.

Na základe uvedených vzťahov a testovania elektromigračnej životnosti spojov publikoval Black [5] pre stredný čas zlyhania spojov (MTF – mean time to failure) výraz

$$\text{MTF} = A(j - j_c)^{-n} \exp(Q/kT) \quad (3)$$

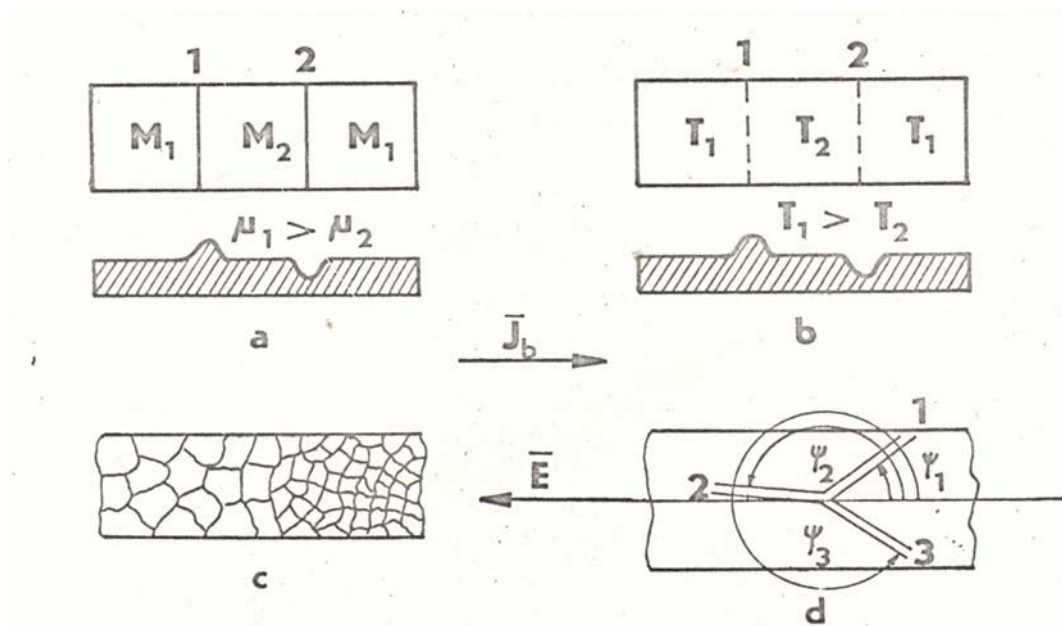
kde A je konštanta ktorá zohľadňuje prierez spoja, j – hustota prúdu, j_c – kritická alebo prahová hustota prúdu, škálovací faktor n má hodnotu okolo 2 a Q je aktivačná energia difúzie, ktorá sa udáva okolo 1 eV a viac pre objemovú difúziu, $0,5 - 0,7 \text{ eV}$ pre difúziu pozdĺž hraníc zŕn polykryštalického spoja a menej ako $0,5 \text{ eV}$ pre povrchovú difúziu. V praxi je pre MTF rozhodujúca difúzia pozdĺž hraníc zŕn (boundaries, symbol b), preto v relevantných prípadoch uvažujeme miesto toku J tok J_b . Po povrchu, ktorý je spravidla pasivovaný, transport neprebíha a cez objem vzhľadom na vysokú hodnotu aktivačnej energie tiež nie.

Základné typy elektromigračných porúch v metalizácii elektronických súčiastok a obvodov sú trhliny a výstupky (obr. 1 a,b) a whiskery. (obr. 1 c). Materiál z trhlín sa ukladá vo výstupkoch a whiskery sa tvoria vystreknutím a stuhnutím taveniny.



Obr. 1. Elektromigračné poruchy v napařovaných hliníkových spojoch šírky $10 \text{ } \mu\text{m}$ a hrúbky $0,9 \text{ } \mu\text{m}$ na oxidovanej Si podložke. Na obr. vľavo a v strede vidieť trhliny a výstupky, do ktorých sa materiál z trhlín uložil. Na obr. v strede bol process zlyhania urýchlený v miestach, kde spoj prechádza cez dva $0,5 \text{ } \mu\text{m}$ vysoké šikmé stupne v podklade, na ktorých sa spoj pri napaření stenčil. Na obr. vpravo vidieť whisker vytvorený vytreknutím a stuhnutím taveniny z vnútra spoja, o čom svedčia fazety na jeho povrchu (foto EÚ SAV).

Mechanizmus tvorby a zárodočné miesta porúch dokumentuje obr. 2. Zo vzťahu (1) je zrejmé, že poruchy sa tvoria v dôsledku gradientov a lokálnych zmien veličín D a T a ďalej môžu vznikáť aj v dôsledku zmien merného odporu spoja, lokálnych zmien veľkosti zŕn polykryštalického spoja (jeden z najčastejších prípadov), v trojných bodoch polykryštalickej štruktúry a i.



Obr. 2. Hlavné faktory vzniku a lokalizácie EM porúch pri zvolených smeroch \mathbf{J}_b a \mathbf{E} : a) styk dvoch kovov s rozličnými pohyblivosťami (difúznymi koeficientami) migrujúcich častíc; b) teplotný gradient vo vzorke, napr. pri rozličnom odvode tepla podložkou; c) rozhranie rozličných veľkostí kryštalických zŕn spoja, v ktorom sa vytvorí trhlina; d) trhlina vznikne aj v trojnom bode – mieste styku troch zŕn vrstvy, pokiaľ je splnená nerovnosť $D_1 \cos \psi_1 + D_2 \cos \psi_2 + D_3 \cos \psi_3 > 0$.

Prehľadové práce o elektromigrácii z obdobia nášho výskumu sú [4, 6, 7, 8].

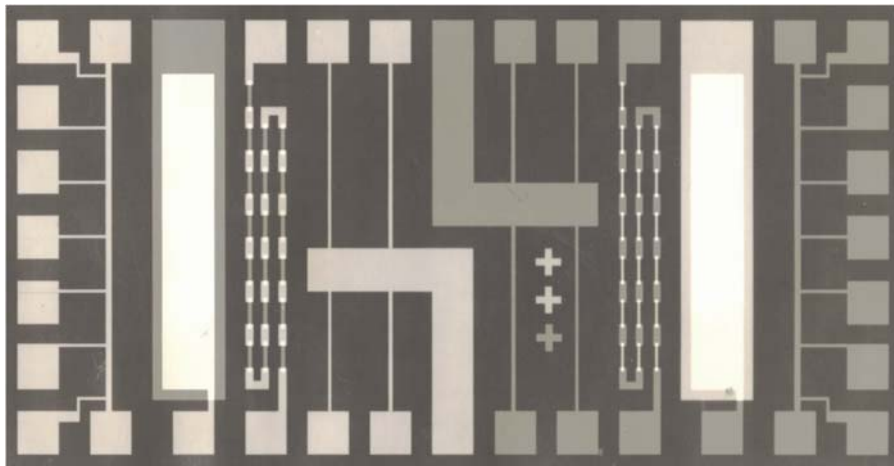
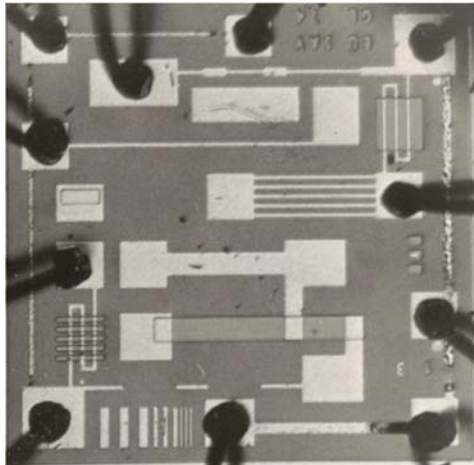
3. Meranie a vyhodnocovanie elektromigračných efektov v metalizácii

Na meranie životnosti spojov sme zostavili poloautomatizované pracovisko [9]. Vzorky boli umiestnené v meracích piekch vyhrievaných horúcim vzduchom, pričom ich teplota bola stabilizovaná s presnosťou $\pm 0,7$ °C a volila sa do 200 °C. To umožňuje pri aktivačnej energii difúzie 0,5 eV process voči izbovej teplote urýchliť až 1400 násobne. Väčšie urýchlenie sme nepoužívali, lebo to nie je vždy fyzikálne opodstatnené.

Zariadenie umožnilo naraz testovať do 15 vzoriek. Napájali sa stabilizovanými zdrojmi jednosmerného prúdu do 1 A. Merací systém obsahoval posuvný register, dierovač, kódér čísla spoja, elektronické stopky, riadenie tlače a i. Detaily sú v [9]. Stredná životnosť spojov t_{50} sa stanovila ako medián súboru. Výhodou bolo, že nebolo treba merať až do prerušenia všetkých spojov. Hodnotu t_{50} sme v praxi stotožňovali s MTF vo vzťahu (3).

Používali sme dve testovacie štruktúry – čipy TS I a TS II realizované v spolupráci s TESLOU Piešťany a TESLOU Rožnov o ploche 1×1 mm² resp. $1,2 \times 2,3$ mm² (obr. 3), zhotovené na oxidovano kremíku s hrúbkou oxidu do 1,5 μm. Používali sa tri masky – na vyleptanie stupňov v podložnom oxide, na tvarovanie spojov a na otvorenie kontaktovacích okien, pokiaľ bol čip pasivovaný. Testovacie čipy sa puzdrili do kovových alebo keramických puzdier. Obsahovali líniové vodiče, sériovo a paralelne zapojené vodiče, meandre, stupne v podložnom oxide, prvky na meranie merného odporu a i.

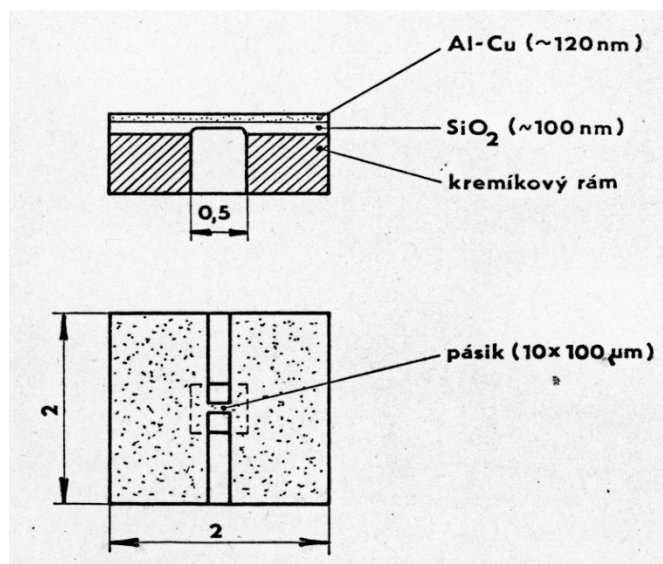
Rozmery spojov boli: šírka 4 až 26 μm , dĺžka 120 až 900 μm a hrúbka do 1,8 μm . Zaťažovali sa spravidla prúdom hustoty $3 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$. Za uvedených podmienok čas do zlyhania spoja bol 20 až 60 h. Metalizácia sa deponovala naparováním z volfrámových roštov, pomocou elektrónového kanóna alebo magnetronovým naprašovaním. Kvôli porovnaniu rozličných meraní sme si definovali štandardné podmienky 150°C a $3 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$, na ktoré sme výsledky prepočítavali. Príslušnú životnosť označujeme (t_{50}).



Obr. 3 Testovacie štruktúry TS I – nakontaktovaný čip (hore) a TS II (dole).

Zhotovená metalizácia sa hodnotila pomocou transmisného a rastrovacieho elektrónového mikroskopu, rtg a elektrónovou difrakciou a kompozícia sa určila pomocou elektrónového mikroanalyzátora. Využívali sme zariadenia SAV, SVŠT a ČVUT Praha.

Treba ešte spomenúť priekopnícku metódu sledovania tvorby EM defektov v spojoch *in situ* v elektrónovom mikroskope v reálnom čase, ktorú v EÚ SAV etablovali I. Vávra, P. Lobotka a F. Zachar [10]. Sledovaný spoj bol deponovaný na oxidovej membráne a ich úhrnná hrúbka 220 nm bola pre elektróny transparentná (obr. 4).



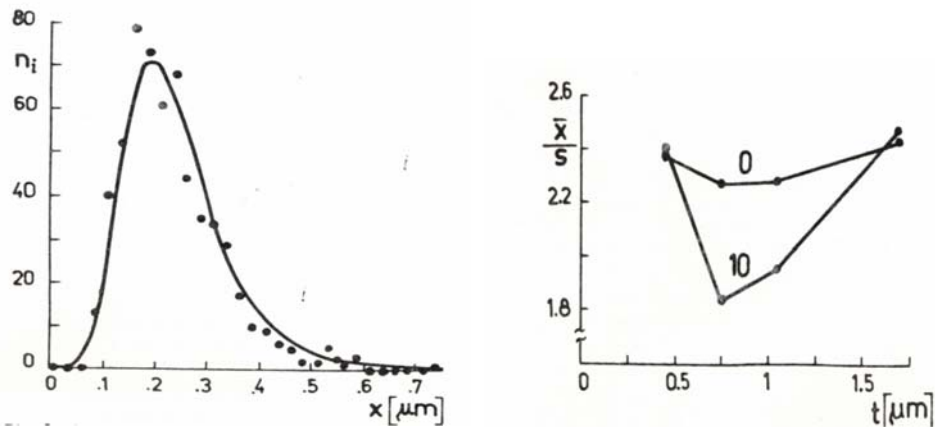
Obr. 4. Kremíkový čip na priame pozorovanie EM vo veľmi tenkom Al:Cu spoji hrúbky 120 nm (kap. 4.2) vytvarovanom na SiO₂ membráne 100 nm na Si ráme.

4. Metódy zvyšovania elektromigračnej odolnosti metalizácie

V rámci nášho výskumu sme riešili viacero tém aplikovaného alebo základného výskumu, výsledky ktorých zhrnieme v kap. 4, 5, 6. Okrem toho sme počítali rozloženie teploty v spojoch IO a jej vplyv na elektromigráciu [11], urobili sme základné merania životnosti vo viacvrstvových spojoch typu Al-Ti-Al [12] a preskúmali sme vplyv iónovej implantácie kyslíka do spojov na jav EM [13].

4.1. Vplyv štatistického rozdelenia veľkosti zŕn polykryštalických hliníkových vrstiev na elektromigračný transport [14]

Vplyv rozdelenia veľkosti zŕn je zrejmy z obr. 2c. Akýkoľvek rozptyl rozmerov dotýkajúcich sa zŕn je miestom úbytku alebo hromadenia sa migrujúceho materiálu. Experimentovali sme s Al vrstvami hrubými od 0,45 po 1,7 μm, naparenými na oxidovaný kremík, ktoré neboli tepelne spracované alebo sa žihali v dusíku pri 480 °C minimálne 10 min. Štruktúru polykryštalického spoja sme zviditeľnili pomocou elektrónového mikroskopu. Rozmery zŕn sa merali pomocou zariadenia Quantimet 720 IMANCO. V každej vzorke sme premerali 500 – 700 zŕn. Ich veľkosť sa charakterizovala veličinou x , ktorá sa stanovila ako odmocnina z ich plochy. Štatistické rozdelenie veľkosti zŕn bolo podľa očakávania log-normálne (obr. 5). Z každého rozdelenia sme vypočítali strednú hodnotu rozmerov a disperziu. Ich pomer v závislosti od hrúbky vrstiev t je v obr. 5 vpravo. Tento pomer sme nazvali faktorom kvality F_q spoja z hľadiska EM. Možno totiž očakávať, že s rastom rozmerov zŕn sa bude znižovať množstvo ich rozhraní, teda migračných dráh, a so znižovaním disperzie bude menej zárodočných miest tvorby defektov. O oprávnenosti tohto predpokladu svedčí to, že faktor má minimum korešpondujúce s minimom ktoré sa zistilo pri testoch životnosti analogických spojov. Existencia uvedeného minima zrejme súvisí s vplyvom štruktúry podložky na nukleáciu a rast vrstvy, pričom pri určitej hrúbke tento vplyv slabne.

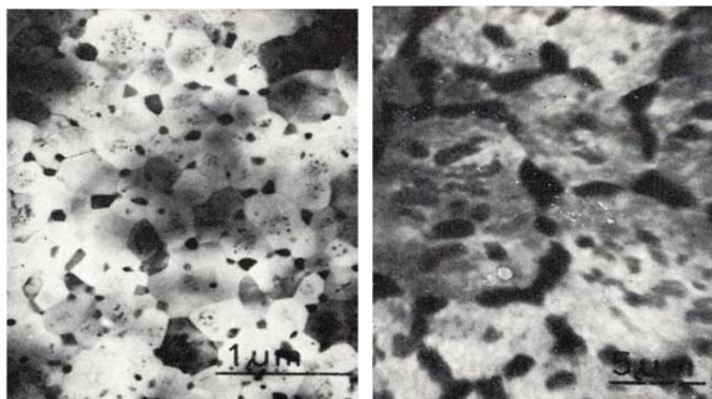


Obr. 5. Závislosť počtu zŕn n_i od ich rozmerov x v Al vrstve hrúbky $0,45 \mu\text{m}$. Log-normálna aproximácia rozdelenia je znázornená plnou čiarou (vľavo). Faktor kvality vs hrúbka Al vrstiev tepelne nespracovaných (0) resp. žíhaných v dusíku počas 10 minút (vpravo).

4.2. Elektromigrácia v hliníkových spojoch legovaných meďou a Si

V praxi najosvedčenejší spôsob zvyšovania odolnosti spojov voči EM je ich legovanie iným kovom. Významná v tomto smere bola práca [15], ktorá ukázala, že životnosť Al spojov možno zvýšiť legovaním meďou. Tento poznatok mal charakter šťastného objavu – *serendipity*, pretože vďaka rozostreniu elektrónového lúča pri naparovaní Al v elektrónovom kanóne došlo aj k odparovaniu Cu kelímka. Z rozličných prác potom vyplynulo, že pri legovaní Al meďou do 20 hm. % sa životnosť zvyšuje 10 – 200 násobne. Veľký rozptyl výsledkov súvisel s technológiou prípravy, čistotou prekursorov a p. Skúšalo sa aj legovanie pomocou Mg, Cr, Ni, Ta, ale postupne sa štandardizovala skladba spojov Al:4 – 6 hm. % Cu:1 hm. % Si. Si sa pridávalo, aby metalizácia nereagovala s kremíkovou podložkou.

Zvyšovanie životnosti legovaním iným kovom je účinné, ak je jeho rozpustnosť v základnej Al metalizácii nízka. Pri Cu je to splnené. Meď sa preto príliš nerozpúšťa v zrnách polykrystalickej Al vrstvy, ale ukladá sa v tvare Al_2Cu precipitátov v rozhraniach a trojných bodoch štruktúry (obr. 6). Za týchto okolností základný materiál – hliník nemigruje. Životnosť spojov sa potom predlžuje o čas potrebný na rozpustenie precipitátov a oddifundovania Cu z rozhraní.



Obr. 6. Precipitáty Al_2Cu v rozhraniach a v trojných bodoch tepelne nespracovanej Al vrstvy (vľavo), po spracovaní pri $350 \text{ }^\circ\text{C}$ sa precipitáty vyzrážajú na povrchu vrstvy (vpravo). (Foto EÚ SAV).

Experimenty sme robili v spolupráci s TESLOU Piešťany. Východisková zliatina mala obsah 5,4 hm. % Cu. Naparovali sme ju väčšou rýchlosťou z veľkého W roštu. Obsah Cu v spojoch bol 7,6 hm. %. Merný odpor spojov bol okolo 4,2 $\mu\Omega\text{cm}$ a aktivačná energia difúzie bola 0,65 – 0,85 eV. Životnosť Al:Cu spojov hrúbky 0,27 μm (t_{50})₀ bola takmer 2×10^6 h, v prípade porovnávacích Al spojov bola 10^4 h. Zvýšenie životnosti bolo cca 200 násobné, t.j. blížilo sa najlepším publikovaným hodnotám [A]. V prípade depozície Al:Cu:Si metalizácie magnetronovým naprašovaním sme dostali podobné výsledky [16].

4.3. Vplyv pasivačných vrstiev na vlastnosti tenkovrstvových spojov pre IO

Idea potlačenia elektromigrácie pasiváciou vychádza z vytvorenia vnútorného tlakového napätia v hermeticky uzavretom spoji. Napätie vzniká elektromigračným transportom. Ak sa v spoji vytvorí potrebný gradient tlaku, môže baromigračný efekt kompenzovať elektromigráciu. Musí pri tom byť splnená podmienka

$$Z^*_w \text{lel } E = \Omega (\Delta\sigma/\Delta x), \quad (4)$$

kde Ω je atomárny objem, σ tlakové napätie a výraz v zátvorke je gradientom tlaku pozdĺž spoja. Ostatné veličiny boli vysvetlené vyššie.

Prvé merania sme robili na naparovaných Al:Si spojoch pasivovaných SiO_2 , zhotovených pyrolitickým rozkladom silánu. Dosiahli sme iba trojnásobné zvýšenie životnosti spojov. Potom, ako sa všeobecne akceptovanou metódou zvyšovania elektromigračnej odolnosti Al metalizácie stalo dotovanie Al meďou, bolo možné vrátiť sa k téme pasivácie a preskúmať zlepšenie odolnosti spojov týmto postupom ako nadstavbu dotovania meďou [17]. O experimenty mali záujem v TESLE Rožnov. Zapojil sa aj Ústav technickej kybernetiky SAV, kde mali zvládnutú technológiu polyimidových vrstiev na planarizáciu WSI štruktúr (wafer scale integration).

Experimentálne spoje Al:4 hm. % Cu:1 hm. % Si s plochou 4 x 900 μm^2 sa zhotovili magnetronovým naprašovaním na Si/SiO₂ (1 μm). Pasivovali sa vrstvami podľa Tab. 1. Ich hrúbka bola 0,6 – 0,8 μm . Životnosti spojov sme na naše štandardné podmienky prepočítali s použitím aktivačnej energie 0,6 eV.

Tab. 1 Pasivácia spojov a ich životnosť

Druh pasivácie	Metóda depozície	Teplota depozície [°C]	t_{50} [10^6 h]
SiO ₂	v plazme PE CVD	400	7,5
Si ₃ N ₄	v plazme PE CVD	380	2,5
SiO ₂	pri at. tlaku AP CVD	400	4,9
SiO ₂	pri níz. tl. LP CVD	400	7,7
polyimid	v odstredivke	270 vytvrdenie	9,8
žiadna			2,5

Možno konštatovať, že zvýšenie životnosti spojov pasiváciou je max. 3 – 4 násobné. Malý rozptyl hodnôt súvisí s tým, že vyše opísaný mechanizmus je podobný u všetkých vrstiev

a rozptyl súvisí s mechanickými vlastnosťami, príp. poruchami pasivácie. Získané poznatky sú zaujímavé z hľadiska dnes sa rozvíjajúcich 3D IO.

5. Elektromigrácia v spojoch zaťažených superpozíciou jednosmerného a striedavého prúdu

Metalizácia môže byť v praxi vystavená jednosmernému, striedavému harmonickému alebo impulznému prúdovému zaťaženiu, resp. ich superpozíciám. Pri striedavom harmonickom alebo symetrickom impulznom zaťažení sa EM nepozoruje, lebo transport materiálu je reverzibilný. Zaujímavé sú však kombinácie rozličných zaťažení, z ktorých v ďalšom uvedieme dva príklady.

5.1. Zaťaženie spojov superpozíciou jednosmerného a harmonického striedavého prúdu

Hliníkové spoje sme zaťažili superpozíciou jednosmerného a striedavého prúdu s frekvenciou od 120 Hz do 500 kHz. Amplitúda striedavého signálu bola limitovaná požiadavkou aby sa výsledný smer prúdu nemenil. Testy sa robili pri 190 °C [18].

Zistili sme, že pri frekvencii do 10 kHz sa životnosť v porovnaní so životnosťou spojov zaťažených iba jednosmernou zložkou prúdu znížila až na polovicu. Pri frekvenciách nad 100 kHz sa pokles životnosti už nepozoroval. Kvalitatívna interpretácia je zrejmá zo vzťahu (3) a jeho nelineárneho charakteru daného najmä exponenciálnym členom. Pri kladnej polvlne striedavého priebehu rastú Jouleove straty v spoji a tým aj teplota, v dôsledku čoho rastie aj EM tok materiálu spoja. Pri zápornej polvlne striedavého priebehu síce tok klesá, ale vzhľadom na uvedenú nelinearitu pokles nie je vstave kompenzovať rast počas kladnej polvlny.

Tento model platí, pokiaľ stačí teplota spoja sledovať zmeny striedavej zložky. Dynamiku procesu opisuje rovnica

$$dT/dt + \alpha (T - T_0) = \beta, \quad (5)$$

kde veličiny α a β vyjadríme ako

$$\alpha = \lambda_{ox} / h h_{ox} c \gamma \quad \text{a} \quad \beta = \rho j_o^2 / c \gamma. \quad (6)$$

Tu T_0 je teplota povrchu kremíkovej podložky, ktorý vzhľadom na tepelnú vodivosť kremíka pokladáme za izotermickú plochu, λ_{ox} je tepelná vodivosť SiO_2 , h , h_{ox} sú hrúbky Al spoja a oxidu, c , γ sú merné teplo a merná hmotnosť spoja, ρ je merný odpor spoja a j_o je hustota jednosmerného prúdu (v porovnávacom experimente).

Obrátená hodnota α je časovou konštantou τ , ktorá charakterizuje rýchlosť ustálenia teploty spoja. V našom prípade sme mali oxidy hrubé 0,5 a 1,5 μm a spoje 1 a 1,8 μm . Potom hodnoty časovej konštanty vychádzajú 1 až 10 μs . Stred intervalu korešponduje frekvencii striedavej zložky 200 kHz. Pri takejto frekvencii teplota spoja nestačí už sledovať zmeny prúdu a efekt znižovania životnosti sa neprejaví, ako to bolo doložené experimentom.

5.2. Zaťaženie spojov superpozíciou jednosmerného prúdu a prúdu so šumovým priebehom

Bezák [19] teoreticky odvodil, že známy Einsteinov vzťah

$$\mu = D/kT, \quad (7)$$

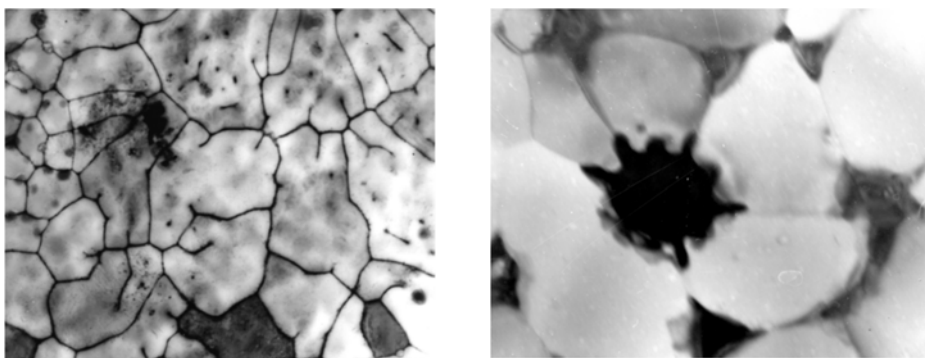
kde μ je pohyblivosť, treba modifikovať, pokiaľ hnacia sila EM má charakter náhodných fluktuácií v čase. Túto teóriu sme experimentálne overili v prácach [20, 21]. V prvom prípade sme merali životnosť rovnakých Al spojov ako v predošlej podkapitole. Šumový signál s Gausovým rozdelením amplitúd mal frekvenčný rozsah 5 Hz až 20 kHz. Zaznamenali sme veľmi výrazný 22 – 38 násobný pokles životnosti spojov. Z toho malú časť – 2 – 3 násobný pokles možno pripísať rovnakému mechanizmu ako sme diskutovali vyššie, pretože frekvenčný rozsah šumu stačí teplota spoja sledovať. Rozhodujúcu časť poklesu životnosti musíme však pripísať urýchleniu difúzie vplyvom šumovej hnacej sily.

V práci [21] sme merali migráciu Cu v Al pod vplyvom šumovej hnacej sily. Frekvenčný rozsah šumu bol ako vyššie a prerozdelenie koncentrácie Cu pozdĺž spoja sa vyhodnocovalo pomocou elektrónového mikroanalyzátora. Z toho sa stanovili difúzne koeficienty medi. V prípade zaťaženia iba jednosmerným prúdom sme zo šiestich meraní dostali hodnoty $(8 - 25) \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$. Po superpozícii šumového signálu hodnoty vzrástli na $(20 - 83) \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{s}$.

Záverom možno konštatovať, že aj keď cieľené zaťažovanie spojov šumovým signálom sa v praxi neuplatňuje, uvedený efekt sa v niektorých režimoch prevádzky súčiastok môže prejavovať.

6. Sledovanie elektromigrácie v elektrónovom mikroskope v reálnom čase

Priame pozorovanie elektromigračných procesov v transmisnom elektrónovom mikroskope uvedené v kap. 3 vnieslo do skúmaných procesov mnoho nových poznatkov. Nakoniec bolo korunované záznamom dynamiky procesu na 16 mm film. Náš kolektív tím získal prioritu uznanú aj v zahraničí. Výsledky boli publikované vo viacerých prácach, napr. [22, 23]. Bol to vzrušujúci výskum a osoby ktoré chodili po chodbe okolo miestnosti kde bol umiestnený TEM, mohli počuť výkriky prekvapenia až úžasu nad divadlom, ktoré sa odohrávalo na tienidle mikroskopu. Uvediem aspoň dve fotografie štruktúr pozorovaných v Al:Cu spojoch.



Obr. 7. Rovnomerná dekorácia hraníc zŕn Al:Cu vrstvy dosiahnutá vhodným impulzným zaťažením (vľavo); medené hviezdičky precipitujúce pri impulznom zaťažení Al:Cu vrstvy v trojných bodoch štruktúry (vpravo). (Foto EÚ SAV).

7. Elektromigrácia nám poodhrnula železnú oponu

Bolo by omylom myslieť si, že sme si železnú oponu otvorili tým, že sme do ostatných drôtených plotov pod Devínskym hradom zaviedli prúd hustoty $10^6/\text{cm}^2$ a rozložili sme ho

tvorbou elektromigračných trhlín. Klasické drôty sa totiž tavia už pri hustote prúdu $10^4/\text{cm}^2$ a vyššie prúdové hustoty vydržia iba tenké vrstvy, ktoré sú na kremíkovej podložke dobre chladené, pretože tepelná vodivosť Si sa blíži vodivosti kovov.

Oponu nám otvorili naše v medzinárodnom meradle konkurencie schopné výsledky, ktoré boli akceptované na svetových kongresoch a konferenciách. Prvým z nich bol 7. IVC – Medzinárodný vákuový kongres vo Viedni roku 1977, kde sme prezentovali tému [13]. Konal sa na „cisárskej pôde“ v Hofburgu. Zoznámil som sa tam s F. M. de’Heurlem, v tej dobe pracovníkom firmy IBM. Nadviazať s ním pracovný kontakt bolo preto iluzórne, daroval nám však za hrst’ separátov. Do Viedne som cestoval so zoznamom vyvázaných písomností a predmetov, ktoré som bol povinný priniesť späť. Nečakal som preto, že niektorí účastníci zo Západu hodia svoje použité postery alebo fólie zo spätného projektora do koša na odpad.

Na 8. IVC v Cannes sme sa nedostali, ale vďaka španielskemu štipendiu sa mi pošťastilo vycestovať na 9. IVC v Madride. Kúpil som si vlakový lístok cez Miláno a po francúzskej riviére do Barcelony, kam som pricestoval ráno. Naplánoval som si deň na prehliadku mesta a pokračovanie do Madridu nočným rýchlikom. Môj plán takmer stroskotal na protiteroristických opatreniach vlády, kvôli ktorým uzavreli boxy na odkladanie batožiny na barcelonskej stanici. Ani poslať kufor vopred do Madridu sa mi nepodarili, podmienka bola, že by som musel cestovať tým istým vlakom. A čo teraz? Vraj si mám objednať taxík a jazdiť s ním a s kufrom po meste alebo si prenajať hotelovú izbu a kufor tam nechať. Na to však moje vreckové pár dolárov nestačilo, španielske peniaze som mal dostať až v Madride. Čo by spravil Kolumbus známy svojim riešením Kolumbovho vajíčka, zamyslel som sa pod jeho vysokým barcelonským monumentom a s kufrom v ruke som vykročil na obhliadku katalánskej metropoly. Taxikárom, ktorí pri mne zastavovali, som vysvetlil, že idem iba „tuto za roh“. V Gaudiho Famílii Sagrada, ktorá bola vtedy ešte len nádvorím obohnávaným múrom veží, som si kufor postavil na dobre viditeľné miesto a kostol som si dôkladne pozrel. Na kongrese som prezentoval prácu [16].

Elektromigrácia mi pomohla prekonať aj Atlantik a vycestovať roku 1990 po prvý raz v živote do USA. Dvojmesačný pobyt na Univerzite v Syrakúzach mi hradilo pozvanie americkej Národnej vedeckej nadácie. V Syrakúzach vtedy pôsobil vo výskume spoľahlivosti a degradačných javov svetovo známy Richard Vook. V strede kampusu bol pamätník obetí teroristického aktu nad Lockerbie v Škótsku, kde len dva roky predtým havarovalo lietadlo Pan Am. Na palube bolo mnoho študentov zo Syrakúz. Okrem Syrakúz som strávil pár dní na slávnej Cornellovej univerzite v Ithake a zúčastnil som sa konferencie v Bostone. R. Vookovi som pomohol vo výskume elektromigrácie výpočtami rozloženia teploty v testovaných spojoch.

V Syrakúzach som sa zoznámil aj s prof. Georgom Lexmannom, ktorý ma pozval na obed do reštaurácie pri vodopáde za mestom. „Na ktorej univerzite pôsobíte?“ začal rozhovor v presvedčení, že inde ako na univerzite pôsobiť nemôžem. Keďže sa mi nechcelo vysvetľovať čo je to Slovenská akadémia vied, povedal som, že na Komenského univerzite v Bratislave. Vtedy som tam prednášal. „Takže slávna *Comenius University* je v Bratislave“, začudoval sa môj hosť. „Ste teda Poliak.“ Dvíhajúca sa hrud’ mi zase poklesla. Nasledovalo vysvetľovanie, že som Slováčok, ale v Poľsku majú mesto Vroclav – Vratislav, ktorá sa pletie niekedy s Bratislavou. Rozhovor by sa bol dal ďalej rozvíjať v štýle slávneho Atra Buchwalda, pretože Komenský sa

narodil na Morave, ale nič netreba prehádzať, ani získavanie nových poznatkov. Lexmanov prarodák z Nemecka Georg Lichtenberg to priklincoval výrokom „Ten človek má toľko vedomostí, že sa už na nič na tomto svete nedá použiť“.

Moji kolegovia tiež s elektromigráciou putovali po svete, zaviedla ich do krajín východnej Európy aj na Západ.

8. Elektromigrácia po tridsiatich rokoch

K elektromigrácii sa dnes vraciam po niekoľkých desaťročiach, tak ako sa vracal A. Dumas ku svojim trom mušketerom. Keď sme tento výskum v SAV uzavreli, boli problémy EM už známe a návrhári IO ich zohľadňovali. Výskum a vývoj však pokračuje ďalej.

O revíziu fenomenologickej teórie EM sa pokúsili autori [24]. Identifikovali expanziu kryštalickej mriežky spoja indukovanú tokom elektrónov, čím sa v spoji vytvoril gradient tlaku. Kým je prúdová hustota nízka, deformácia je elastická a mriežka relaxuje. Ak je však hustota dostatočne vysoká, deformácia presiahne medzu sklzu a vyvolá difúzne tečenie spôsobujúce tvorbu výstupkov a trhlín. EM sa tým vlastne transformuje do polohy baromigrácie. Ďalším zovšeobecnením tohto prístupu je práca [25], ktorá navyše zhrnula 60 významných publicácií o EM po roku 2000. Veľký pokrok v odolnosti metalizácie sa dosiahol zavedením hliníka dotovaného meďou. Tento vývoj tým neskončil a po roku 2000 prevzala úlohu materiálu spojov meď [26]. Má merný odpor $1,75 \mu\Omega\text{cm}$, teda menší ako hliník, vrstvy majú hladký povrch, vytvára sa na ňom stabilný oxid a meď je relatívne lacný materiál. Priekopníkom sa tu stala firma IBM, Intel o niečo zaostala. Ale aj meď má svoje limity. Významným nástrojom kontroly elektromigrácie v elektronických štruktúrach sa stalo modelovanie [27], ktoré využíva nové algoritmy. Z predikcií vyplýva, že meď ako materiál spojov by mohla byť nahradená kobaltom a ruteniom.

EM je veľkou výzvou aj vo výkonovej elektronike, kde sa počíta s hustotou prúdu na úrovni $10^7/\text{cm}^2$ [28]. Ale osobitná pozornosť sa jej musí venovať v súvislosti s nástupom trojdimenzionálnych – 3D IO, ktoré ohlasujú éru post-Mooreovej elektroniky a umelej inteligencie [29]. Nakoniec, kuriozitou je, že EM sa stáva nástrojom tvarovania štruktúr. Využila sa napr. v otváraní slabých väzieb v štruktúrach nano-SQUIDov [30].

9. Záver

Náš výskum EM sa opieral o riešenie úloh Štátneho plánu základného výskumu i Štátneho plánu technického rozvoja. Získané výsledky sa poskytovali TESLE Piešťany i TESLE Rožnov, kde pomohli vyhnúť sa potenciálnym problémom vo vývoji i vo výrobe. Dlhodobé rozvíjanie spolupráce s TESLOU Piešťany vytvorilo aj pôdu na to, že v Piešťanoch sa založilo Oddelenie fyzikálnej elektroniky Elektrotechnického ústavu SAV, Fyzikálneho ústavu SAV a TESLY Piešťany, ktoré najmä počas 80. rokov 20. stor. riešilo na pôde TESLY Piešťany viaceré partikulárne úloh polovodičových IO. Ku koncu tohto obdobia bolo povýšené na samostatný ústav. Po roku 1990 prešli všetky inštitúcie spomínané v tomto článku rozličnými

formami transformácie, v niektorých prípadoch zanikli, to je však už téma nad rámec tohto príspevku.

Apendix

Vedecká škola reprezentovaná obhájením doktorskej, kandidátskych a diplomových prác

[A] Š. Luby, Metódy prípravy a vlastnosti kovových a polovodičových vrstiev pre elektronické súčiastky a obvody, Doktorská dizertačná práca, Elektrotechnický ústav SAV, Bratislava 1980.

[B] I. Vavra, Štrukturálne vlastnosti tenkých kovových vrstiev pre elektronické súčiastky a obvody, Kandidátska dizertačná práca, Elektrotechnický ústav SAV, Bratislava 1978.

[C] P. Lobotka. Elektromigrácia v tenkých vrstvách hliníka a hliníka legovaného meďou, Kandidátska dizertačná práca, Elektrotechnický ústav SAV, Bratislava 1980.

[D] P. Roman, Vplyv vybraných technologických postupov na elektromigračnú odolnosť naprašovanej zliatinovej metalizácie Al – Cu – Si, Kandidátska dizertačná práca, Elektrotechnický ústav SAV, Bratislava 1987.

Diplomové práce vypracovali v EÚ SAV poslucháči z Katedry mikroelektroniky EF SVŠT v Bratislave.

Literatúra

[1] V. Áč, Príspevok k histórii mikroelektroniky na Slovensku, in: Š. Luby a kol., Od tranzistora k integrovanému obvodu, VEDA, vydavateľstvo SAV, Bratislava 2018, 49 – 99.

[2] A. Guldán, Š. Luby, L. Hrubčín, I. Vavra, Molybdenum films in the MIS integrated circuit technology, in: Proc. XX. Internat. Wissenschaft. Kolloquim, Technische Hochschule Ilmenau, 1975, Heft 5, 45 – 48.

[3] Š. Luby, P. Lobotka, A. Guldán, Y. Kreislerová, A. Pastorek, Vplyv tvaru a rozmerov hliníkových spojov pre integrované obvody na ich životnosť a jav elektromigrácie, in: Zborník zo IV. celoštát. seminára o technológii a použití integrovaných obvodov MIS, Moravany, TESLA Piešťany, Piešťany 1976, 42 – 52.

[4] Š. Luby, Elektromigrácia v tenkých kovových vrstvách, Čs. čas. fyz. A, 32, 1982, 452 – 469.

[5] J. R. Black, Electromigration – a brief survey and some recent results, IEEE Trans. on Reliability, 43, 1969, 338 – 347.

[6] F. M. d'Heurle, R. Rosenberg, Electromigration in thin films, in: Physics of Thin Films, eds. G. Hass, M. H. Francombe, R. W. Hoffman, Acad. Press, New York 1973, 257 – 310.

[7] F. M. H'Heurle, P. S. Ho, Electromigration in thin films, in: Thin Films – Interdiffusion and Reactions, J. Wiley & Sons, New York 1978, 243 – 303.

[8] P. S. Ho, T. Kwok, Electromigration in metals, Reports on Progress in Physics, 52, 1989, 301 – 316.

- [9] Š. Luby, P. Lobotka, Metóda a zariadenie na meranie životnosti spojov elektronických súčiastok z hľadiska výskumu elektromigrácie, *Elektrotech. čas.* 31, 1980, 154 – 162.
- [10] I. Vávra, P. Lobotka, Spôľahlivosť metalizácie integrovaných obvodov, in: Š. Luby et al., *Od tranzistora k integrovanému obvodu*, VEDA, vydavateľstvo SAV, Bratislava 2018, 115 – 121.
- [11] Š. Luby, M. Kedro, P. Lobotka, J. Schilder, Rozloženie teploty v tenkovrstvových spojoch integrovaných obvodov a jeho súvislosť so vznikom elektromigračných porúch, *Slaboproudý obzor*, 40, 1979, 201 – 208.
- [12] Š. Luby, I. Vávra, Electromigration in Al-Ti-Al thin film conductors for integrated circuits, in: *Proc. 3rd Microelectronic Conf. of the Socialist Countries*, KFKI, Budapest, 1982, 57 – 58.
- [13] Š. Luby, J. Král, M. Setvák, Vplyv iónovej implantácie kyslíka na životnosť hliníkových spojov elektronických súčiastok, *Elektrotechn. čas.* 31, 1980, 317 – 324.
- [14] Š. Luby, I. Vávra, Statistical distribution of grain sizes and the electromigration transport in aluminum thin films, *Proc. 7th International Vacuum Congress*, (eds. R. Dobrozemsky et al.), F. Berger, Vienna 1977, 2107 – 2110.
- [15] J. Ames, F. M. d'Heurle, R. E. Horstman, Reduction of electromigration in aluminum films by copper doping, *IBM J. Res. Develop.*, 14, 1970, 461 – 463.
- [16] Š. Luby, P. Roman, P. B. Barna, Electromigration resistance of magnetron sputtered Al-Cu-Si conductors, in: *Proc. of IX. Internat. Vacuum Congress*, Madrid 1983, 172,
- [17] P. Roman, Š. Luby, J. Valíček, M. Prejda, Vplyv rôznych druhov pasivácie na elektromigračnú odolnosť Al-Cu-Si spojov, *Elektrotech. čas.*, 38, 1987, 61 – 69.
- [18] Š. Luby, P. Lobotka, Vplyv zaťaženia spojov pre integrované obvody superpozíciou jednosmerného a striedavého prúdu na ich životnosť a jav elektromigrácie, *Elektrotechn. čas.*, 30, 1979, 409 – 419.
- [19] V. Bezák, Path integrals for inertialess classical particles undergoing rapid stochastic trembling (I. Examples), *Acta Physica Slovaca*, 28, 1978, 12 – 20.
- [20] Š. Luby, P. Lobotka, V. Bezák, Electromigration behaviour and the lifetime of aluminum thin filmconductors under superimposed d.c. and noise powering, *Phys. Stat. Sol. (a)*, 60, 1980, 539 – 548.
- [21] P. Lobotka, Š. Luby, Influence of the noise driving force on the diffusion of copper in aluminum thin films, *Czech. J. Phys. B*, 31, 1981, 1099 – 1107.
- [22] I. Vávra, P. Lobotka, F. Zachar et al., TEM in situ observation of electromigration damage in Al-Cu stripe, *Phys. Stat. Sol. A*, 63, 1981, 363 – 370.
- [23] P. Lobotka, I. Vávra, TEM in situ observation of electromigration damage in Al-Cu strips. II. Superimposed AC and DC stressing, *Phys. Stat. Sol. A*, 63, 1981, 655 – 661.
- [24] S.-K. Lin, Y.-C. Liu, S.-J. Chiu, Y.-T. Liu, H.-Y. Lee, The electromigration effect revisited: non-uniform local tensile stress/driven diffusion, *Sci. Reports*, 7, 2017, 3082 – 3091.

[25] Y.-C. Liu, S.-K. Lin, A critical review on the electromigration effect, the electroplastic effect, and perspectives on the effects of electric current upon alloy phase stability, *JOM – Journal of Minerals, Metals & Materials Society*, 21, 2019, 3094 – 3106.

[26] University Cambridge teaching learning packages,
<https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/electromigration/printall.php> Alternatives to aluminium metallization

[27] W.-S. Zhao, R. Zhang, D.-W. Wang, Recent progress in physics-based modelling of electromigration in integrated circuit interconnects, *Micromachines*, 13, 2022. No. 883, 31 pp.

[28] K. Rahman, A. M. M. Musa, B. Neher et al., A review of the study on the electromigration and power electronics, *J. Electronics Cooling and Thermal Control*, 6, 2016, 19 – 31.

[29] Z. Shen, S. Jing, Y. Heng, Y. Yao, K. N. Tu, Y. Liu, Electromigration in three-dimensional integrated circuits, *Appl. Phys. Rev.*, 10, 2023, 021309.

[30] W. Keijers, X. D. A. Baumans, R. Panghotra et al., Nano-SQUIDs with controllable weak links created via current-induced atom migration, *Nanoscale*, 10, 2018, 21475.

Prof. Ing. Štefan Luby, DrSc., Dr. h. c. Fyzikálny ústav SAV stefan.luby@savba.sk Štefan Luby (1941) vyštudoval fyziku tuhých látok a jadrovú fyziku na Slovenskej technickej univerzite v Bratislave u prof. J. Krempaského. Zahraničné pobyty absolvoval na Univerzite Salento, Univerzite Syrakúzy (USA), Univerzite v Čibe-Tokio a na Univerzitách v Bielefelde a v Štuttgarte (ako hosťujúci profesor Nadácie Alexandra von Humboldta). Pôsobil na Univerzite P. J. Šafárika v Košiciach a v Elektrotechnickom a Fyzikálnom ústave SAV. Oblasť výskumu: amorfné polovodiče, monolitické a hybridné integrované obvody – spoľahlivosť a efekt elektromigrácie, kovové multivrstvy pre rtg zrkadlá a štruktúry s efektom obrovskej magnetorezistencie, nanočasticové senzory plynov. Získal 9 patentov. Absolventi doktorandského štúdia a vedenie domácich a zahraničných študijných pobytov: 12.