

## **Exkurzia do sveta hybridnej elektroniky**

ŠTEFAN LUBY

### **Excursion into the realm of hybrid electronics**

In this contribution the sputtering deposition and trimming of resistors of hybrid integrated circuits from the tantalum family are described. The research and development were performed at the Institute of Electrical Engineering (IEE) of SAS in Bratislava. Industrial partners in the former Federative Republic of Czechoslovakia were TESLA Elektroakustika, Bratislava, TESLA Lanškroun and Research Institute of the Electrotechnical Ceramics in Hradec Králové. A prerequisite of accurate and reproducible trimming of tantalum-based resistors were the hydrophylic gels developed by O. Wichterle at the Institute of Macromolecular Chemistry of CSAS in Prague for the artificial eye lenses. Trimming equipment and procedure were patented and eight pieces of trimming machines were fabricated at the IEE SAS; they were exhibited and sold to industrial partners.

### **Úvod**

Polovodičové monolitické integrované obvody (MIO) na kremíku, eventuálne na arzenide gália, sú hlavnými stavebnými prvkami súčasnej elektroniky a tým aj výpočtovej techniky, vnímanej laickou verejnosťou najlepšie. Paralelne s nimi sa vyvíjali hybridné integrované obvody (HIO), ktoré sú významným artiklom elektronických zariadení, aj keď trhovým objemom s monolitickými obvodmi nemôžu súťažiť. Uplatňujú sa v letectve a kozmickej technike, automobilizme, telekomunikáciách, v meracej a regulačnej technike a i.

Na rozdiel od MIO, kde sú všetky komponenty zhotovené v objeme alebo na povrchu polovodiča, v HIO sa na vhodnom substráte kombinujú aktívne prvky, ako tranzistory, prípadne jednoduchšie monolitické obvody s pasívnymi prvkami – diódami, rezistormi, kondenzátormi, príp. induktormi. Osobitne väčšie kondenzátory sa monolitickou technikou nedajú zhotoviť. Ako substráty sa používajú keramiky  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – obľúbený korund, BeO, AlN a i. Uvedené tri keramiky sa uplatňujú v produkcii ekvipartične [1].

Vývoj hybridnej elektroniky sa opieral o dve technológie – tenkovrstvovú a hrubovrstvovú. V prvom prípade sa na substrát fyzikálnymi metódami – napaľovaním, naprašovaním, deponovala prepojovacia vodivá sieť a odporové a dielektrické vrstvy pre rezistory, izolácie a iné použitia. Na tvarovanie sa použila fotolitografia. Druhý prístup používal hrubé vrstvy na báze pást nanosených metódami sieťotlače. Tato technika vzhľadom na jednoduchosť a nízku cenu prevažuje. Významní výrobcovia hybridných obvodov sú dnes AUREL, Midas, Sevenstar, GE, Globec, Beijing Feiyu a i.

V Elektrotechnickom ústave SAV sme v 70. rokoch spolupracovali s TESLA Rožnov a TESLA Piešťany v MIO v témach ako molybdénové hradlo FET-ov a elektromigrácia v spojoch IO, ale vzhľadom na finančnú atraktivnosť spolupráce formou hospodárskych zmlúv sme na podnet TESLA Elektroakustika, TESLA Lanškroun a Výskumného ústavu elektrotechnickej keramiky (VÚEK) v Hradci Králové expandovali v našom výskume do oblasti HIO.

Vedúci výskumu a vývoja TESLA Elektroakustika Ing. Jozef Felix, CSc. (okienko 1) umiestnil v našom oddelení dvoch pracovníkov TESLA Elektroakustika – Ing. E. Sumbalovú a Ing. V. Szobiho na pobyty ktoré financovala TESLA. Spolupráca vykryštalizovala do výskumu tenkovrstvových rezistorov na báze tantalu a ich justovania.

### **Technológia pasívnych prvkov HIO na báze tantalu**

V porovnaní s hrubovrstvovou je tenkovrstvová technológia vytvárania pasívnych prvkov HIO presnejšia, prvky sú stabilnejšie a dosahuje sa väčšia hustota integrácie. Dve základné rodiny tenkovrstvových prvkov etablované v praxi sú

a/ chrómniklová rodina – odporové zliatiny Ni-Cr a SiO<sub>2</sub> ako dielektrikum,

b/ tantalová rodina – odporové vrstvy z β-Ta, prípadne nitridu tantalu Ta<sub>x</sub>N alebo zliatiny Ta-Al a vlastný oxid Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ako dielektrická a pasivačná vrstva. β tantal s tetragonálnou štruktúrou ma väčší merný odpor, okolo 200 μΩcm, a nižší teplotný koeficient odporu ako α-Ta, preto sa používala táto fáza.

V Elektrotechnickom ústave sme laborovali s tantalovou technológiou [2]. Skúmali sme vrstvy Ta-Al naprašované na Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [3] a vyvinuli sme metódu stanovenia ich prvkového zloženia pomocou elektrónovej mikrosondy, ktorá bola k dispozícii na Chemicko-technologickú fakultu SVŠT u prof. J. Garaja. Preskúmali sme aj oxidové vrstvy na tejto zliatine zhotovené anodickou oxidáciou v 1 % roztoku kyseliny citrónovej [4]. Obsah Al sme držali pod 25 at %, vtedy sa zachová β štruktúra tantalu a vlastnosti oxidov – prierazné elektrické pole a stratový činiteľ tg δ vyhovujú. Výsledky sa poskytli zmluvným partnerom – VÚEK Hradec Králové a podnikom TESLA.

### **Justovanie rezistorov**

V HIO sa vyžadujú rezistory s toleranciami ± 0,01 – 0,1 %, ktoré nemožno dosiahnuť v procese výroby naparovaním, naprašovaním alebo inými metódami. Hodnoty sa upravujú dodatočným justovaním. Môžu sa použiť metódy chemického alebo iónového leptania, mikrobrúsenia, laserovej ablácie a i. Vo všetkých prípadoch sa materiál rezistora odoberá a jeho odpor rastie.

V prípade tantalovej rodiny je k dispozícii pohodlná metóda anodickej oxidácie. Využíva fakt, že oxid Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> rastie smerom nahor ale aj nadol od pôvodného rozhrania rezistor – vzduch resp. elektrolyt. Oxidovať možno na veľkej i malej ploche. Voči odoberaniu materiálu inými metódami prednosťou oxidácie je to, že zásah do materiálu je šetrný z nezhoršuje stabilitu súčiastky a v menšej miere vytvára zúžené miesta s vysokou prúdovou hustotou, čo zlepšuje stabilitu. Metódy justovania sme zhrnuli v [5].

### **Prvé pokusy justovanie rezistorov tantalovej rodiny lokálnou anodickou oxidáciou**

Justovali sme rezistory z Ta – Al pripravené v domácom laboratóriu a rezistory z Ta<sub>x</sub>N pripravené vo VÚEK Hradec Králové, ktorý technológiu tantalu rozvíjal. V oboch prípadoch substrátom bola korundová keramika. Uprednostnili sme lokálne justovanie odporovej dráhy, anodizačnou elektródou, preto rezistor nebolo potrebné ponoriť do elektrolytu. Volili sme veľmi šetrný a ekologický elektrolyt – 1 % roztok kyseliny citrónovej.

a/ Prvé riešenie anodizačnej elektródy vzniklo v spolupráci s E. Kuniakom z Chemického ústavu SAV. Použili sme pórovitú sklenenú filtračnú fritu vybrúsenú do tvaru ihlanu a napustenú amylozovým škrobovým sieťovaným gélom. Riešenie bolo patentované [6]. Elektróda bola rozmerovo stála, ale dochádzalo k poškrabaniu odporovej dráhy.

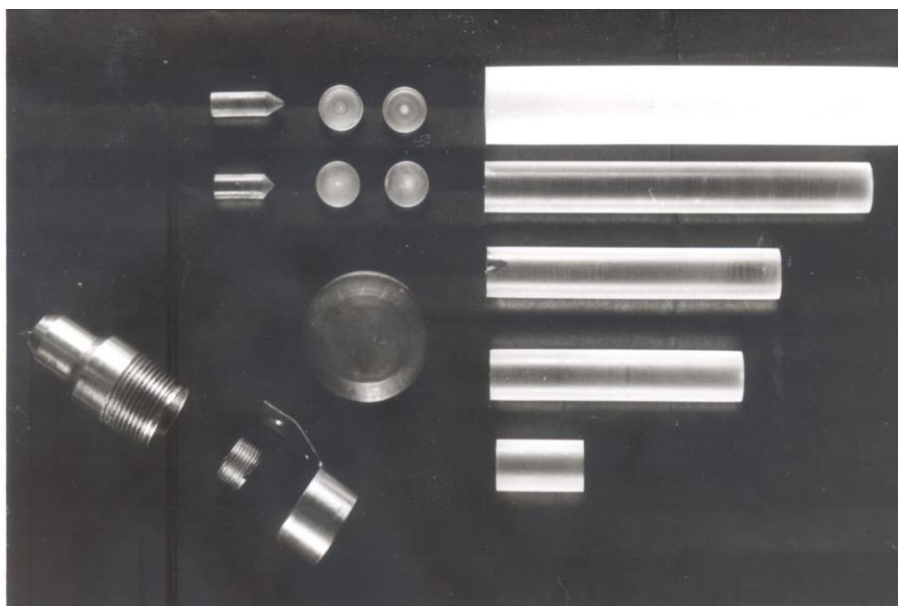
a/ V hľadaní lepších riešení sme začali skúmať možnosť použiť hydrofilné gély, ktorými sa v celom svete preslávil O. Wichterle ako materiálom na mäkké kontaktné očné

šošovky. Prof. Otto Wichterle, geniálny český chemik, prežil život plný protivenstiev a stal sa obeťou každej politickej diskontinuity, napriek tomu dosiahol prelomové výsledky (okienko 2). Uvediem niekoľko spomienok na tento výskum i na osobnosť Wichterleho podľa state [7].

Roku 1972 som napísal prof. Wichterlemu do Prahy list, v ktorom som ho požiadal o spoluprácu a vzorky hydrofilných gélov na náš účel. Bolo to v čase normalizácie, kópiu listu som podľa vtedajších predpisov odovzdal do protokolu ústavnej pošty. Čoskoro vznikol rozruch. “Je rozumné nadväzovať spoluprácu so signatárom 2 000 slov, ktorý bol zbavený funkcie riaditeľa Ústavu makromolekulárnej chémie ČSAV? To sa v SAV nenájde chemik, ktorý potrebné gély zhotoví?” Po niekoľkých dňoch prišiel však z Prahy balíček, do ktorého “majster”<sup>1</sup> zabalil prvé vzorky gélov a zároveň poveril Ing. J. Kopečka, CSc. aby s nami spolupracoval.

### Wichterleho gély „šité na mieru“ a justovacie zariadenie

Gély s rozmermi potrebnými pre našu aplikáciu zhotovil potom Ing. Kopeček polymerizáciou 2-hydroxyetylmetakrylátu s etylendimetakrylátom v rozličných pomeroch. Vznikli valčeky o priemere okolo 1 cm. Vysústružili sme z nich hroty, ktoré sa vložili do puzdra (obr. 1). Hrot puzdro utesnil. Nad hrotom bol roztok kyseliny citrónovej. Hrot v kyseline *nabobtnal*, primerane zmäkcol a získal potrebnú elektrickú vodivosť. Výrobok pripomínal plniace pero *alias* anodizačné pero. Potom sme skonštruovali systém vzájomného posúvania rezistora a hrotu s tromi translačnými stupňami voľnosti (obr. 2), pripojili sme zdroj prúdových impulzov a merací prístroj. Presnosť justovania bola limitovaná presnosťou merania a voľbou krátkych impulzov sa chyba dala stlačiť hlboko pod 0,1 %.

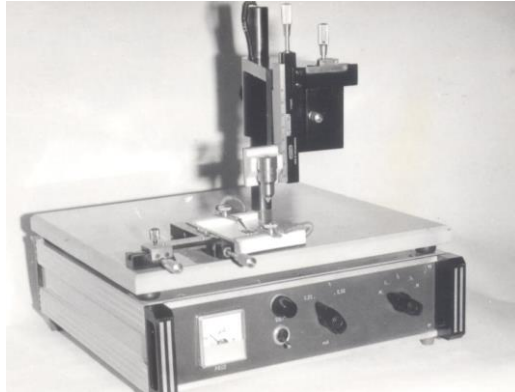


Obr. 1 Tyčinky hydrofilných gélov O. Wichterleho. Vľavo dole je justovacie puzdro s elektrolytom, vľavo hore justovacie hroty vysústružené z gélu.

Zariadenie a metódu sme patentovali [8] a zhotovili sme pilotnú sériu ôsmich zariadení, ktoré sme predali obom vyššie uvedeným podnikom TESLA, do VÚEK Hradec Králové i do zahraničia a prezentovali sme ich na výstavách. Posledný problém, ktorý bolo treba vyriešiť, bol jazykový. V slovenčine nemáme slovo *nabobtnať* ale *napučať*, ktoré sa mi

<sup>1</sup>Takto Wichterleho ako svojho učiteľa oslovovali českí chemici, napr. aj neskorší predseda ČSAV R. Zahradník.

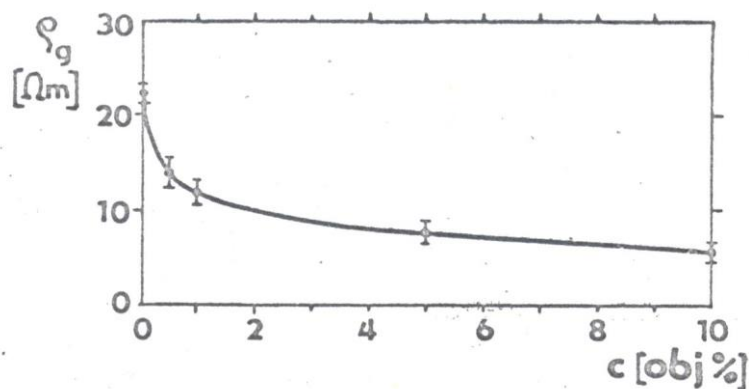
nepáčilo. Jazykovo zdatní členovia komisie pre obhajobe našej záverečnej správy však uznali, že s gélmi českého pôvodu dosiahneme lepšie výsledky, keď ich necháme *nabobtnávať* a nebudeme im vnucovať novoty. Ideu plniaceho pera sme neskôr tiež „zhmotnili“, skúsili sme s ním písať na kovy, pričom oxidy podľa hrúbky hrali rozličnými farbami.



Obr. 2 Justovacie zariadenie ZJ-2.

### Zopár poznatkov o justovaní tantalových rezistorov

Zvládnutie technológie justovania na slušnej úrovni vyústilo aj do výskumu vlastného justovacieho procesu [9, 10]. Merný odpor gélu preparovaného v elektrolyte je na obr. 3. Zvyšovanie koncentrácie elektrolytu nad 1 obj. % nemalo už význam. Plochu styku gélovej elektródy s rezistorovou dráhou bolo možno zmenšiť pod  $0,2 \text{ mm}^2$ . Gélové hroty ani po vysušení nemenili svoje rozmery, o čom svedčí obr. 1, kde ich vidno. Pre istotu boli po prvom použití ďalej skladované v elektrolyte. Zo štúdia justovacieho procesu uvediem aspoň maximálne prípustné anodizačné napätie tantalu  $U_{A \text{ max}} = 1462 \varepsilon h$ , kde  $h$  je počiatočná hrúbka odporovej dráhy a  $\varepsilon$  je pomerná hĺbka justovania. Ak pripustíme justovanie do hĺbky 20 %, dostaneme pri hrúbke  $h = 0,15 \mu\text{m}$  max. napätie 43,9 V. Pre každého člena tantalovej rodiny sa tento vzťah modifikuje. Stabilita rezistorov sa testovala počas 100 h pri zatažení jednosmerným výkonom  $0,15 \text{ W/mm}^2$ . Z toho vyplynula uvedená hodnota  $\varepsilon < 0,2$ . Ak chceme dosiahnuť väčšiu zmenu odporu treba justovať na väčšej ploche s inak formovaným justovacím hrotom.



Obr. 3 Závislosť merného odporu gélu po 24 h namočení v roztoku kyseliny citrónovej vo vode s rozličnou koncentráciou  $c$ .

## Posledné stretnutia s Ottom Wichterlem

S prof. Wichterlem som sa stretal po roku 1989 v období pred rozdelením republiky. Bolo to na zhromaždeniach, na ktorých vystupoval ako predseda ČSAV i pri rokovaní o rozdelení spoločného majetku ČSAV a SAV pri rozpade federácie. Akadémia však nevyužila dostatočne jeho charizmu a pozícia predsedu bola dosť formálna. Na Slovensku mal O. Wichterle veľa aktivít. Preto sme vo vedení SAV privítali podnet Ústavu polymérov SAV udeliť mu Zlatú medailu SAV. Roku 1995 sme mu ju odovzdali v jeho ústave v Prahe za prítomnosti jeho kolegov a našich popredných chemikov – Milana Lazara, Pavla Hrdloviča a Eberharda Borsiga. Bolo to moje posledné stretnutie s Ottom Wichterlem. Rozhovoril sa, spomínal na Slovensko, kritizoval „nedočakavosť a nedostatok orientálnej trepezlivosti“ vo vtedajšej politike našich krajín, pobavil nás svojimi slávnymi testami inteligencie študentov, ktoré mu priniesli nepríjemnosti, napr. či je basketbal národný šport Baskov. Vonku sa stmievalo, atmosféra bola príjemná a mne sa tlačilo na jazyk, že prof. Wichterle je nielen výborný chemik, ale aj odvážny a o fair play usilujúci *homo politicus*, český Andrej Sacharov. Možno jeho racionálnosť a asketický výzor ma odradili od takejto metaforizácie. Preto to uvádzam aspoň teraz.

## Záver

V období 70. a 80. rokov bola v SAV tendencia vyvažovať základný výskum aplikačnými aktivitami. Po roku 1990 sa tento trend nepremyslene opustil. Technológia tantalových rezistorov a ich justovanie patrili do aplikačnej sféry a rezonovali s potrebami vtedajšieho čs. elektronického priemyslu. Nášmu ústavu priniesla aj príjmy, z ktorých sa niečo dalo previesť do mzdového fondu. V neposlednom rade prítlačivá bola možnosť spolupracovať s Ústavom makromolekulárnej chémie ČSAV a s takou osobnosťou, ako bol prof. Otto Wichterle, akademik ČSAV. Za zmienku stojí svedectvo R. Zahradníka, ktorému nejaký chemik z farmaceutického priemyslu povedal: „neverili by ste, aké úsilie musí v našej firme mnoho ľudí venovať obchádzaniu Wichterleho patentov. Musí to byť geniálny človek.“

Jeho žiak a dnes už prof. Ing. Jindřich Kopeček, DrSc., Dr. h. c. Helsinkej univerzity sa vypracoval na svetoznámeho chemika a po roku 1986 pôsobil na Univerzite v Utahu, USA. Poďakovanie za spoluprácu však patrí aj Ing. J. Felixovi, CSc. z TESLA Elektroakustika, Ing. V. Heřmanskému, CSc. a Ing. J. Potočkovi z VÚEK Hradec Králové, našemu technikovi a konštruktérovi justovacích zariadení J. Dérerovi a spoluriešiteľom projektov a hospodárskych zmlúv uvedených v citovaných publikáciách.

**1) Jozef Felix, Ing., CSc.** (1920 - ?) vyštudoval na Elektrotechnickej fakulte SVŠT v Bratislave r. 1952. Už predtým pôsobil v TESLA Elektroakustika v Bratislave, kde vybudoval oddelenia projekcie, výskumu a vývoja štúdiových elektroakustických zariadení. Externe vyučoval na katedrách elektrotechnických fakúlt SVŠT a VŠT v Košiciach. Roku 1967 obhájil kandidátsku dizertačnú prácu. Ako vedúci podnikového výskumu zameral jeho činnosť na novú generáciu štúdiových elektroakustických zariadení. Riešil 14 významných projektov, medzi nimi projektu ozvučenia spartakiádneho štadióna v Prahe na Strihove. 1955. Bol vyznamenaný Radom práce.

**TESLA Ekektroakustika** bola založená r. 1939 v gescii Rádiotechnika-Telefunken. Po znárodnení bola súčasťou TESLA Pardubice, od r. 1969 bola samostatným podnikom, ktorý si vybudoval pobočný závod v Trebišove. K významným počinom patrilo ozvučenie Pražského a Bratislavského hradu, Paláca kultúry v Prahe, Strahovského štadióna i olympijských objektov v Moskve. Mala okolo 1 000 zamestnancov. Dnes neexistuje.



**2) Otto Wichterle**, prof., Ing. Dr., DrSc., Dr. h. c. (1913 – 1998) pochádzal z rodiny prostejovských podnikateľov. Študoval na Vysokej škole chemicko-technologickej (VŠChT) v Prahe pod vedením profesora Emila Votočka, významného chemika tej doby. V roku 1936 promoval na doktora technických vied. Na škole ďalej pôsobil až do zavretia českých vysokých škôl nemeckou okupačnou mocou. Potom mu ponúkli miesto vo Výskumných chemických dielňach firmy Baťa v Zlíne. Tu sa stal známym polyamidovým vláknom – silonom, ktorého výroba začala po vojne. Počas protektorátneho režimu sa zapojil do odboja. Bol štyri mesiace väznený, podarilo sa mu našťastie uniknúť koncentračnému táboru. Po vojne sa vrátil do Prahy na svoju *alma mater* a pôsobil tu do roku 1958, kedy bol pri politických čistkách z vysokých škôl prepustený. Vedecký azyl získal v Československej akadémii vied, kde bolo liberálnejšie prostredie. Postupne tu vybudoval Ústav makromolekulárnej chémie (ÚMCh). Jeho riaditeľom bol až do normalizácie a zaslúžil sa o väčšinu jeho úspechov.

Najznámejším vynálezom Otta Wichterleho sú gélové kontaktné šošovky. Ich výskum po prepustení z VŠChT pokračoval v ÚMCh ČSAV. Prvé šošovky boli už aplikované pacientom, ale Ministerstvo zdravotníctva výskum roku 1961 zrušilo kvôli malým výnosom. Wichterle vo výskume pokračoval doma. Ukázal, že kvalitné kontaktné šošovky možno vyrobiť s minimálnymi nákladmi metódou monoméneho odstredivého odlievania v rotujúcich formách. Prvý prístroj na výrobu šošoviek zostavil z detskej stavebnice Merkur (obr. A). Potom mu na tento program prideliť štyridsať pracovníkov. V roku 1963 bola už metóda vo vysokom stupni dokonalosti. Záujem prejavili v USA a v roku 1965 bola v Prahe podpísaná licenčná zmluva s R. Morrisonom a National Patent Development Corporation.

V roku 1968 sa Wichterle zapojil do politického diania a stal jedným z iniciátorov manifestu 2 000 slov. V januári 1969 sa stal členom Snemovne národov Federálneho zhromaždenia ako nestranicky poslanec. Z politiky odišiel koncom roku 1969. Čoskoro bol ako signatár 2 000 slov zbavený funkcie riaditeľa ÚMCH ČSAV a ďalej tam pracoval ako radový vedec. Hoci Wichterleho vynálezy boli zaistené patentmi, mnoho firiem ich vedome porušovalo. Československé hospodárstvo tak prišlo o milióny dolárov. Až koncom 70. rokov mohol Wichterle opäť cestovať do zahraničia a mohol sa zúčastniť patentových súdnych sporov i chemických konferencií. Plne bol rehabilitovaný po roku 1989. Karlova univerzita ho poctila titulom Dr. h. c. Roku 1990 bol zvolený za predsedu ČSAV a bol ním do roku 1993. Bol po ňom pomenovaný asteroid Wichterle. Zomrel vo veku nedožitých 85 rokov.



Obr. A Aparatúra O. Wichterleho zo stavebnice Merkur na odstredivé odlievanie kontaktných šošoviek.

## Literatúra

- [1] <https://www.marketwatch.com/press-release/thick-film-hybrid-integrated-circuits-market-2020-top-countries-data-market-size-defination-business-opportunity-trend-segmenation-and-forecats-to-2024>
- [2] W. D. Westwood, N. Waterhaus, P. S. Wilcox, Tantalum thin films, Academic Press, London 1975.
- [3] Š. Luby, J. Schilder, Electron microprobe compositional analysis of sputtered tantalum – aluminum films, Czech. J. Phys. B 25, 1975, 91 – 100.
- [4] Š. Luby, Dielectric properties of anodic oxides formed on sputtered Ta-Al alloy films, Thin Solid Films 32, 1976, 61 – 64.
- [5] Š. Luby, Justovanie vrstvových odporňikov a kondenzátorov. Sdĕlovací technika, 1972, 305 – 306.
- [6] Autorské osvedčenie ČSSR č. 161 322. Slovenská akadémia vied. Š. Luby, E. Kuniak, E. Sumbalová, Anodizačná sonda na justovanie odporňikov anodickým okysličovaním. 5. 6. 1972.
- [7] Š. Luby, Roma locuta, causa finita, Otto Wichterle, in: Š. Luby, Legendy a inšpirácie, VEDA, vydavateľstvo SAV, Bratislava 2011, s. 45 – 49, ISBN 978-80-224-1200-1.
- [8] Autorské osvedčenie ČSSR č. 167 713 Slovenská akadémia vied. Š. Luby, E. Sumbalová, J. Kopeček, Zariadenie na justovanie tenkovrstvových odporňikov lokálnym anodickým okysličovaním s gelovou elektródou. 9. 1. 1974.
- [9] Š. Luby, E. Sumbalová, J. Kopeček, Justovanie tenkovrstvových odporňikov anodizačnou elektródou, Elektrotechnický čas., 26, 1975, s. 297 – 304.
- [10] Š. Luby, Š. Chromik, Justovanie tenkovrstvových odporňikov z nitridu tantalu anodickým okysličovaním, Elektrotech. čas. 28, 1977, 140 – 143.

*Prof. Ing. Štefan Luby, DrSc., Dr. h. c.*

*Fyzikálny ústav SAV*

[stefan.luby@savba.sk](mailto: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.*