

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Radomír Kužel

Tištěné odporové vrstvy pro hybridní integrované obvody

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 23 (1978), No. 2, 76--81

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139653>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1978

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

+  $d(y) + d(z) = n$ , pak nastane jeden z těch dvou případů, o kterých jsi mluvila, a dostaneme trojici špatných čísel, pro něž je součet dnů menší než  $n$ . Z téhle trojice vznikne zase další, pro kterou je součet dnů ještě menší a tak dál a tak dál, ale tohle právě není možné, protože žádná tři čísla nemají součet dnů menší než 3.

- A. Přesně tak. Líbí se mi způsob, jak jsi vyjádřil důkaz pomocí součtů dnů stvoření. Jestliže neexistuje trojice špatných čísel, pro něž je součet dnů menší než  $n$ , pak je v obou případech vidět, že neexistuje ani žádná trojice, pro kterou je součet dnů roven  $n$ . Řekla bych, že tohle je důkaz indukci podle součtu dnů.
- B. Hlavně, žes to odborně pojmenovala. Myšlenka, to je to podstatné!
- A. Já to uznávám, ale když myšlenka dostane jméno, je její další použití jednodušší.
- B. Jo, ale jen když ti ještě někdy k něčemu bude... Ale co bych se rozčiloval kvůli novodobému matematickému slovníku, stejně oba dobře víme, že jsme právě dokázali tranzitivní zákon.
- A. (přikývne) Na takové dva amatéry jako jsme my, to není špatné.
- B. Byla to vlastně tvoje zásluha. Prohlašuju teda slavnostně, že ode dneška se bude tranzitivní zákon (T 1) nazývat Alicina věta.
- A. Ale jdi, Conway na něj určitě přišel už dávno.
- B. To přece vůbec nesnižuje tvoje tvůrčí úsilí. Vsadil bych se, že každý velký matematik začínal znovuobjevováním „dobře známých“ výsledků.
- A. Všechna sláva polní tráva, nech toho Bille, děláme to přeci pro zábavu.

*Pokračování překladu v dalším čísle.*

## Tištěné odporové vrstvy pro hybridní integrované obvody

(K 25. výročí MFF UK)

*Radomír Kužel, Praha*

V posledních 30 letech došlo ve slaboproudé elektrotechnice k nebyvalému rozvoji. Vzpomeňme jen objev tranzistoru a dalších složitějších struktur, které přinesly do této oblasti skutečnou technickou revoluci. V současné době jsou to zejména integrované obvody, které nabývají stále většího významu.

Rozvoj uvedených aktivních elektronických prvků si však vynucuje miniaturizaci a zvýšení výrobní produktivity rovněž elektronických prvků pasívních, jako jsou např. kondenzátory a odpory, jedny z důležitých a nejčastěji se vyskytujících součástí v elektronických zařízeních a přístrojích.

V elektronice se používá několik typů elektrických odporů. Běžně jsou známé uhlíkové odpory ve tvaru válečků a trubiček z našich radiopřijímačů a televizorů. Pro mnohé účely však tyto odpory jsou příliš velké a zapojení složitějších obvodů vyžaduje poměrně dosti času. Podstatné zjednodušení výroby přináší novější technologie, které umožňují zhotovení celého odporového systému jednoduše, rychle a najednou. Zmíníme se zde alespoň o jednom způsobu, při kterém se elektrické odpory nanášejí metodou sítotisku na keramické podložky, které se pak vypalují při vhodné teplotě.

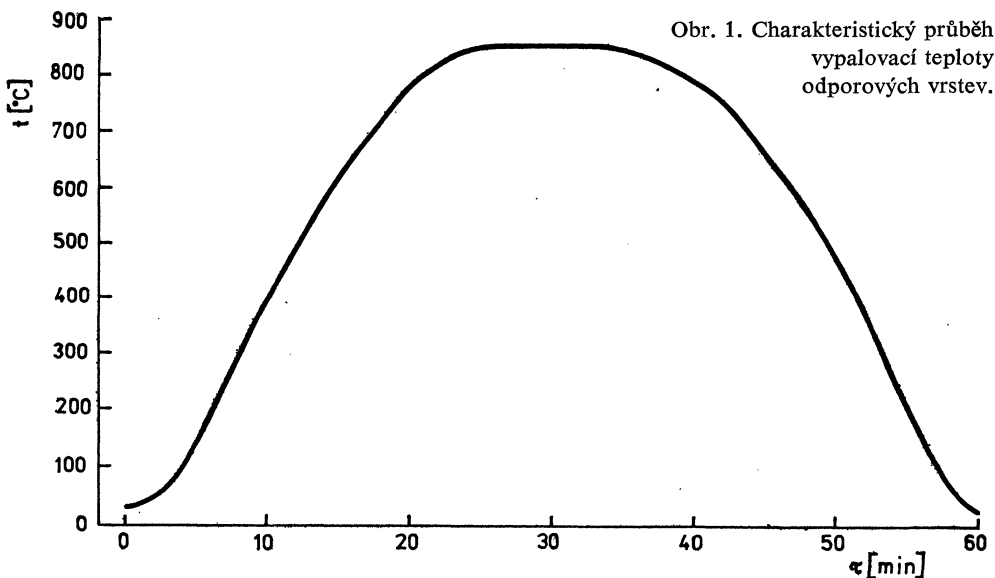
Hlavní součástí výroby je příprava vhodné pasty složené z kovového nebo polovodičového prášku, jemně rozemleté skleněné frity a z tekutého pojidla. Částice skla i kovu mají velikost kolem  $1\ \mu\text{m}$  a menší. Používané sklo se taví většinou při poměrně nízkých teplotách od  $450\ ^\circ\text{C}$  výše. Jsou to zejména skla olovnato-borito-křemičitá a další typy nízkotavitelných skel. Jako elektricky vodivé částice se výrobně používají drahé kovy, zejména stříbro, paladium, zlato, platina, iridium, ruthenium a další.

Tekuté pojidlo může mít různé složení. Hojně se používají organická rozpouštědla se zahušťující látkou, např. celulózu, některé druhy olejů a další tekutiny.

Vrstvy o stejné tloušťce se tisknou na izolační keramické destičky, na kterých jsou předem připraveny vhodné vodivé elektrody, přes masky zhotovené z kovových nebo umělých sít. Síto se volí podle požadavku na tloušťku vrstvy, která se většinou pohybuje asi od  $10\ \mu\text{m}$  do  $30\ \mu\text{m}$ . Vrstvy je však možno nanášet i jinými metodami, např. sprayem, namáčením, štětcem apod.

Nanesené vrstvy se pak vypálí na příslušné teplotě tak, že se vytvoří odporová vrstva, která pevně drží na keramické podložce. Celý vypalovací proces trvá od 15 do 60 minut s maximální teplotou výpalu od  $600\ ^\circ\text{C}$  do  $860\ ^\circ\text{C}$ , případně i vyšší. Typický průběh teploty při výpalu je znázorněn na obrázku 1.

Různých hodnot elektrických odporů se dosahuje jednak geometrickými rozměry



(od desetin milimetru výše), jednak vhodným poměrem skla a vodivé složky v pastě (od 10 % do 98 %).

Odporové vrstvy připravené touto technologií mají mnoho předností:

1. jednoduchá výroba — celý proces probíhá na vzduchu,
2. příprava celých odporových systémů při automatickém tištění,
3. zanedbatelný otěr, což je důležité zejména pro výrobu potenciometrů,
4. vysoká stabilita vyrobených vrstev (požadují se menší změny než 1 % při teplotě 150 °C za 1000 hodin).
5. nízký teplotní koeficient odporu, často menší než  $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ .

Všechny tyto vlastnosti plně vyhovují současným požadavkům slaboproudé elektrotechniky, zejména pak pro výrobu hybridních integrovaných obvodů. Pro zajištění dlouhé životnosti a vysoké stability se vyrobené odpory obvykle ještě pokrývají ochrannou skleněnou vrstvou, nanesenou opět sítotiskovou technikou. Vypalovací teplota skleněné ochranné pasty je nižší než vypalovací teplota odporové pasty. V posledních letech se na tyto ochranné vrstvy nanáší další odporový systém a tak se na jedné podložce může připravit i několik vrstev odporových a izolačních na sobě. Znamená to opět další využití jedné plochy pro více účelů.

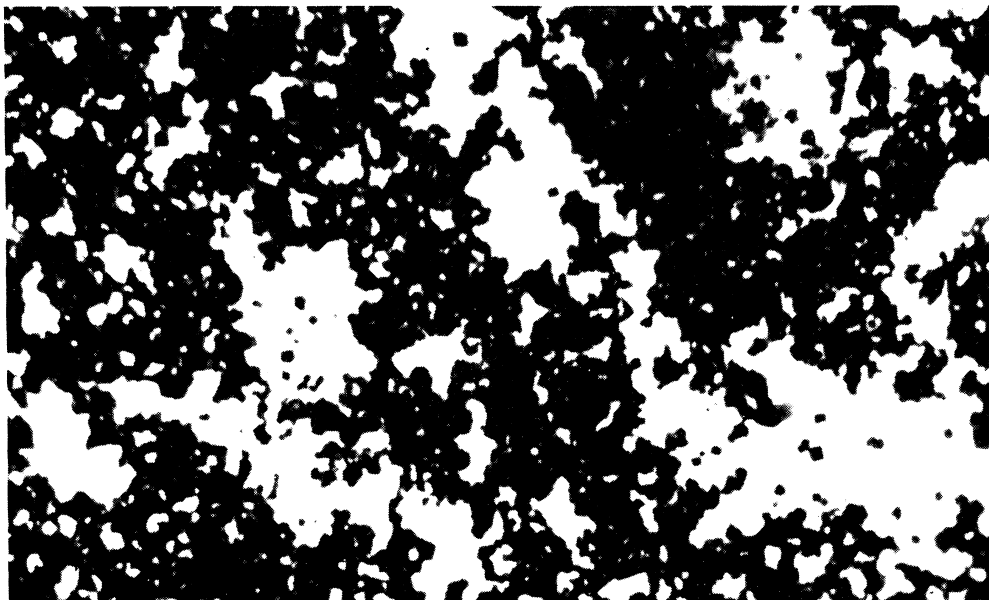
Některé firmy (např. fa Du Pont) takovéto odporové pasty vyrábějí již asi 15 let. V současné době se s velkým úspěchem používá k dosažení opravdu vynikajících vlastností ruthenia a jeho sloučenin. Avšak všechny dosud výrobně používané odporové pasty obsahují drahé kovy.

Rovněž v ČSSR se již několik let vyrábějí odporové vrstvy s využitím této moderní technologie především na bázi paladia. V poslední době se zvláštní zřetel věnuje též možnosti úspory deficitních drahých kovů. Tato tematika se výzkumně řeší na matematicko-fyzikální fakultě ve spolupráci s n. p. Tesla Lanškroun a Státním výzkumným ústavem sklářským v Hradci Králové. Snahou je připravit odporové vrstvy alespoň pro některé účely, z materiálů levnějších a jako vodivá složka byl navržen práškový kysličník kademnatý. Je to materiál levný a při vhodném zpracování dosahuje vysoké elektrické vodivosti se slabou teplotní závislostí.

Již první pokusy však ukázaly na jisté obtíže a rozdíly od přípravy vrstev na bázi drahých kovů. Předně bylo nutno použít u běžně používaných skel vyšších vypalovacích teplot, aby vrstvy byly vůbec elektricky vodivé, přičemž jejich stabilita byla zcela nedostatečná. Bylo proto nutné hledat nová vhodnější skla a zabývat se podrobněji studiem těchto materiálů.

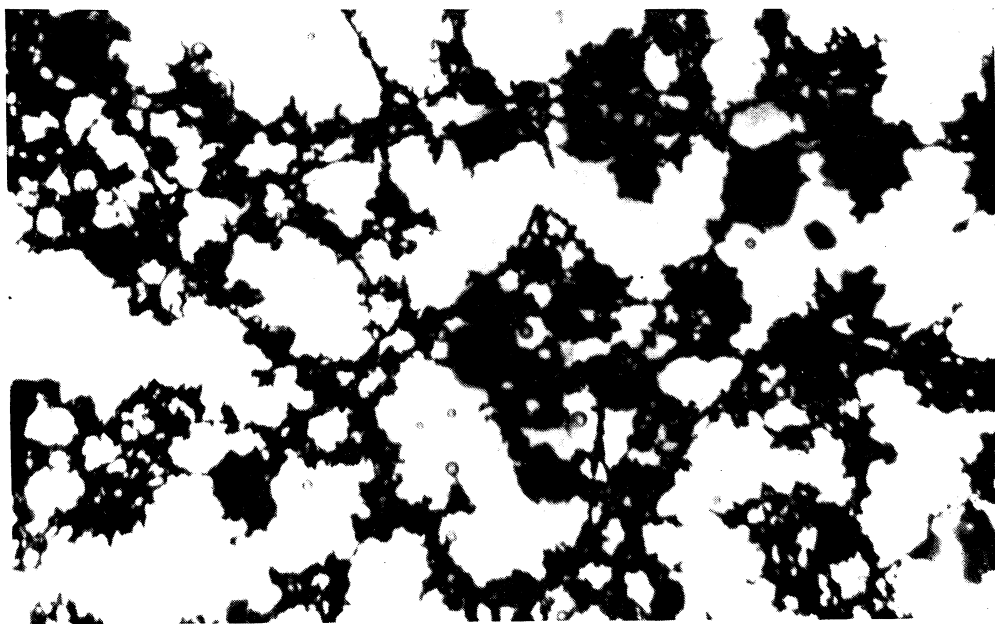
Poněkud lepších výsledků se dosáhlo použitím skla se složkami  $\text{PbO} - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{ZnO} - \text{Ag}_2\text{O}$ , připraveného podle patentu předloženého japonskými autory [1]. Avšak ani zde vlastnosti odporových vrstev zcela nevyhovovaly. V celé řadě zkoušených skel se zatím dosáhlo nejlepších výsledků se skly ze soustavy  $\text{PbO} - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{CdO} - \text{BaO} - \text{Na}_2\text{O}$ , tedy se skly, která již přímo obsahovala  $\text{CdO}$ . Vlastní odporová pasta připravená z tohoto rozemletého skla, jemně rozetřeného  $\text{CdO}$  a organického pojidla byla nanášena již zmíněnou sítotiskovou technikou na podložky ze slinovaného korundu. Zkušební vzorky byly pak vypalovány v elektrické pídce s teplotním průběhem znázorněným na obr. 1, jen s tím rozdílem, že maximální teplota byla volena od 600 °C do 760 °C.

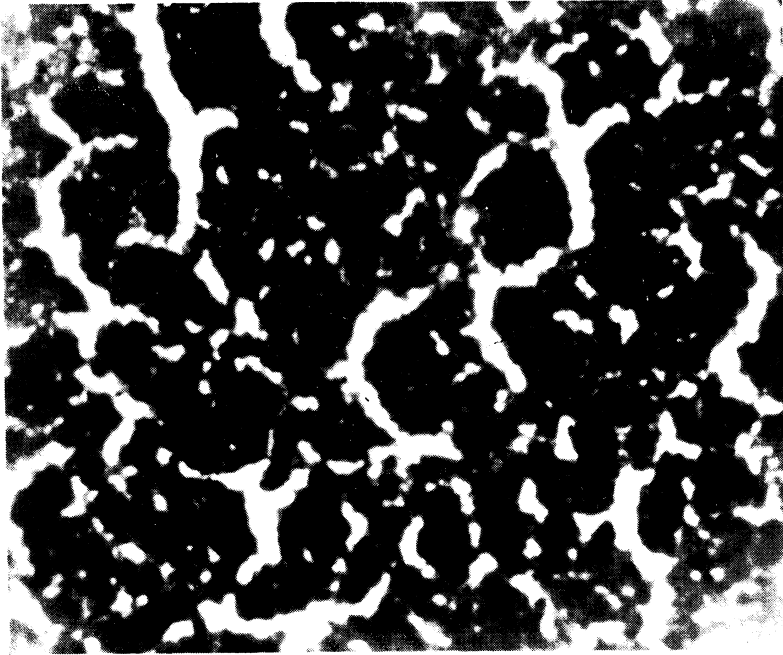
Obrázky k článku R. Kužela „Tištěné odporové vrstvy pro hybridní integrované obvody“.



Obr. 5. Mikroskopický snímek odporové vrstvy — CdO a sklo ( $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ) — na průřeh, zvětšení 150 $\times$ .

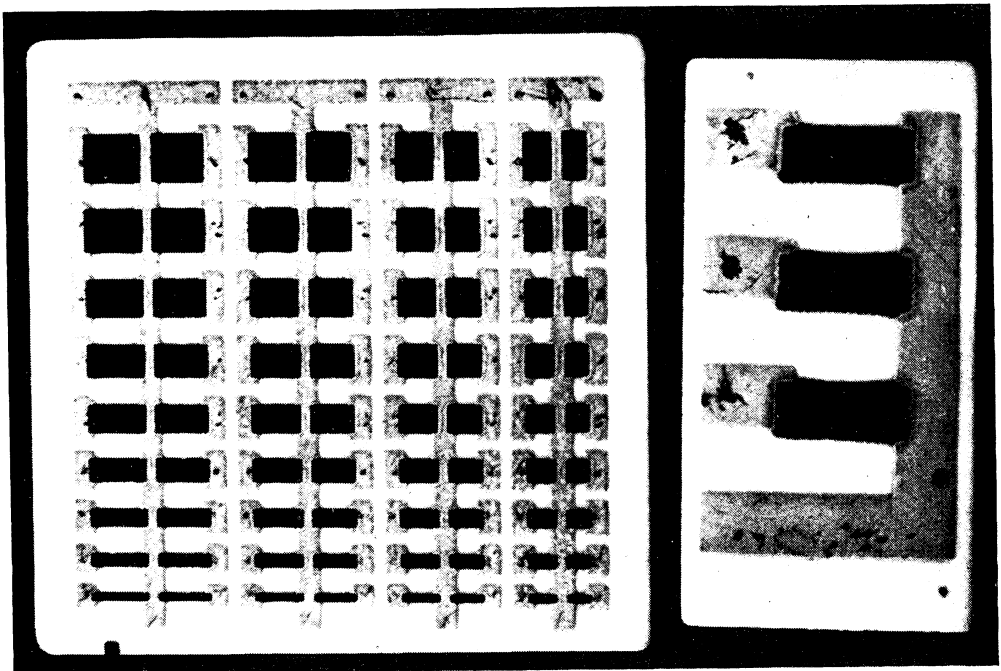
Obr. 6. Mikroskopický snímek odporové vrstvy — CdO a sklo ( $\text{PbO-B}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ ) — na průřeh, zvětšení 150 $\times$ .





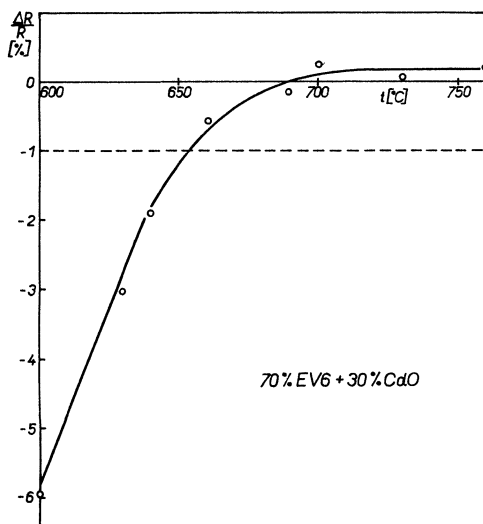
Obr. 7. Mikroskopický snímek odporové vrstvy — CdO a kadmiové sklo (30 : 70) — na průřez, zvětšení 150×.

Obr. 8. Zkušební destičky s natištěnými a vypálenými odporovými vrstvami.

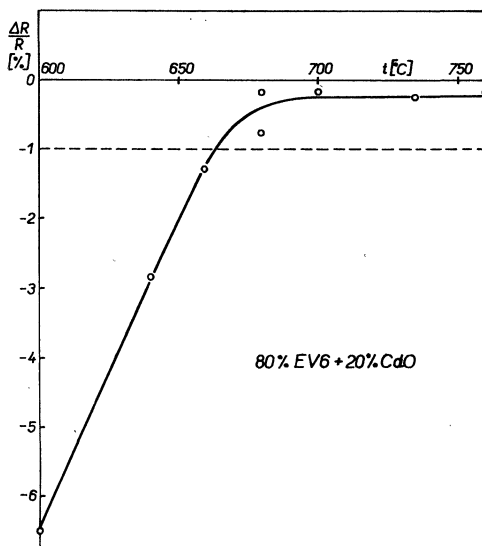


Měření základních elektrických vlastností vyrobených vrstev ukázala, že teplotní koeficient odporu je v oblasti teplot od  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  konstantní a pohybuje se kolem  $5 \cdot 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$  nezávisle na obsahu skla v pastě; jejich stabilita je dostatečná do teplot  $110\text{ }^{\circ}\text{C} - 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Na obrázcích 2 a 3 jsou uvedeny změny elektrického odporu vrstev při teplotě  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  za dobu 1000 hodin pro dvě směsné pasty s obsahem skla 70 % a 80 %, označeného EV6. Pro teploty výpalu nad  $660\text{ }^{\circ}\text{C}$  jsou uvedené změny odporu menší než  $\pm 1\text{ }%$ . Podrobnější studium ukázalo, že větší nestability vrstev vypálených při teplotách pod  $660\text{ }^{\circ}\text{C}$  budou s největší pravděpodobností souviset s přítomností dalších krystalických fází kromě CdO ve vrstvě [2].

Závislost elektrického odporu na obsahu skla v pastě je znázorněna na obr. 4. Při vypalovací teplotě  $680\text{ }^{\circ}\text{C}$  se elektrický odpor mění v poměrně značném rozsahu; v rozmezí obsahu skla 70 %–90 % až o 2,5 řádů.



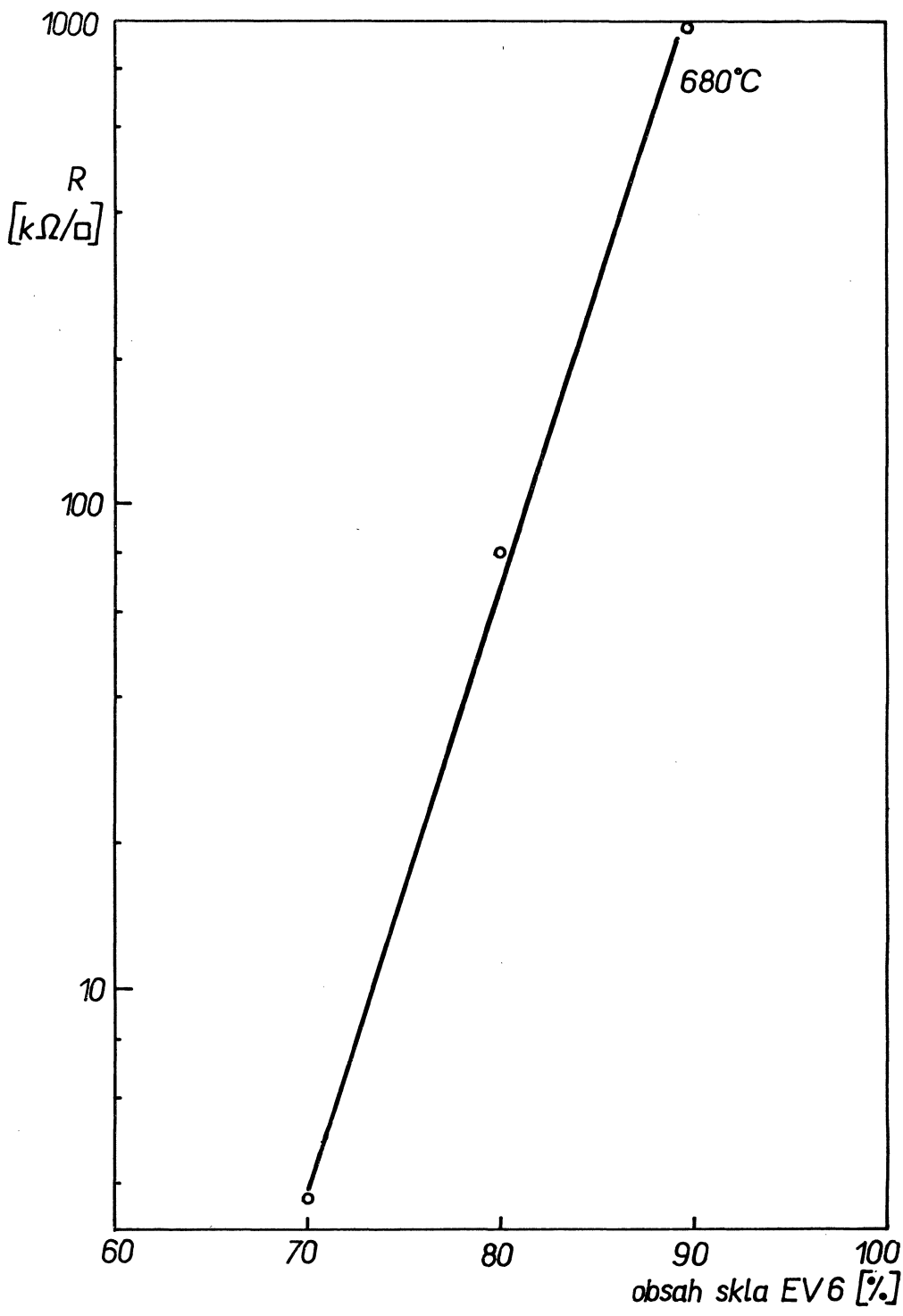
Obr. 2. Změna odporu vrstev připravených z pasty se 70 % skla EV 6 při teplotě  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  za dobu 1000 hod.



Obr. 3. Změna odporu vrstev připravených z pasty s 80 % skla EV 6 při teplotě  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  za dobu 1000 hod.

Další studium bylo zaměřeno na objasnění mechanismu vedení elektrického proudu v těchto vrstvách. K tomuto účelu bylo nejdříve provedeno mikroskopické vyšetřování připravených vrstev na bázi různých skel a práškového CdO. Mikroskopické snímky ukázaly různou strukturu vypálených vrstev podle druhu použitého skla, kterou můžeme rozdělit v podstatě do tří typů. Předně kysličník kademnatý během výpalu ve skle rekrystalizuje a vytváří poměrně pravidelné tmavočerveně zbarvené krystalky, které se navzájem dotýkají nebo jsou obaleny sklem (viz obr. 5\*). Takovéto vrstvy mají vysoký

\*) Obrázky 5–8 jsou na příloze za str. 78.



Obr. 4. Závislost elektrického odporu vrstev na obsahu skla.



elektrický odpor a pokud je vůbec měřitelný, mění se dosti silně s časem. Tento typ vrstev se vytváří při použití skla o složkách  $PbO - B_2O_3 - SiO_2$ .

Druhá struktura vrstev je představována elektricky vodivými řetězci, tvořenými kyslíčkem kademnatým černé barvy (viz obr. 6); řetězce jsou však místy velmi tenké, takže se při tepelných výkyvech přetrhávají, a tím se mění i odpor. Tyto vrstvy se vytvářejí při použití skla na bázi  $PbO - B_2O_3 - ZnO$ , vypálené při teplotách kolem  $900^\circ C$ . Jsou elektricky dobře vodivé, ale časově nestabilní.

Třetí struktura vrstev je znázorněna na obr. 7. Vrstva byla připravena z pasty obsahující 70 % kademnatého skla EV6 a 30 % práškového kyslíčnicku kademnatého. Struktura je opět tvořena jakýmsi řetězci, ovšem v tomto případě kyslíčnick kademnatý již nevytváří ostře ohraničené krystalky, ale ty se poněkud ve skle při výpalu rozpouštějí a vytvářejí kolem sebe elektricky vodivé neostře ohraničené žlutě zbarvené oblasti, které se na sebe dobře napojují. Bílá místa na obr. 7 jsou tvořena vytěsněným sklem, které neobsahuje krystalický kyslíčnick kademnatý. Takovéto vrstvy jsou časově stabilní.

Na základě uvedených výsledků byl navržen model mechanismu vedení elektrického proudu ve vrstvách obsahujících CdO, který předpokládá, že elektrický proud je veden vodivými řetězci, tvořenými ze vzájemně se dotýkajících krystalických zrn nebo celých oblastí bez vzniku nějakých bariér. Teplotní závislost elektrického odporu takovýchto vrstev bude dána pouze teplotní závislostí vodivé složky, tj. v našem případě CdO, a nebude záviset na poměru skla a CdO v pastě, jak bylo také experimentálně pozorováno. Zdá se tedy, že při použití levných materiálů bude důležité, aby jednotlivé krystalky použité vodivé složky v pastě se částečně ve skle rozpouštěly a nedocházelo k jejich rekrytalizaci, a tím ke zvětšování krystalických zrn, což vede k velkým časovým nestabilitám.

Z uvedeného je tedy zřejmé, že se podařilo připravit odporové pasty na bázi kyslíčnicku kademnatého, z kterých je možno vyrobit vrstvy s hodnotami odporu asi od  $3\text{ k}\Omega/\text{čtverec}$  do několika  $M\Omega/\text{čtverec}$  s vyhovující stabilitou do  $110^\circ C - 120^\circ C$ . Zkušební destičky s natištěnými odporovými vrstvami jsou pro ilustraci uvedeny na obr. 8. Vodivé spoje jsou tvořeny rovněž vrstvami natištěnými některou vodivou pastou, např. zlatou, stříbrnou apod.

## Literatura

- [1] MITŮSO, WADA et al.: Patent USA No. 3, 711, 328 (1973)
- [2] BROUKAL J., KUŽEL R.: In: *O keramice pro elektroniku. 1. díl. Sborník přednášek 6. konference o keramice pro elektroniku, Pardubice. Pardubice, ČVTS dům techniky 1977, 54.*

---

„Těž by se stala fyzika oblíbenější, kdyby učitelé podávali historické poznámky a i novějších výsledků fyziky (tj. mechanické teorie, teplo, světlo, nová akustika, atd.) si více všímali. Méně

důležité věci by se mohly vynechat, aby se času získalo pro experimenty, příklady a úlohy. I při malých prostředcích se dají mnohé pokusy provést...“