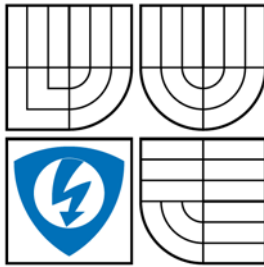


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELEKTRONICS

VLASTNOSTI 3D PRVKŮ REALIZOVANÝCH TLUSTOVRSTVOU TECHNOLOGIÍ

PROPERTIES OF THICK FILM MULTILAYER COMPONENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

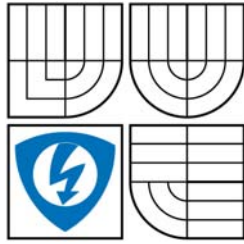
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ALEXEY SHISHKIN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. IVAN SZENDIUCH, CSC.

BRNO 2008



VYSOKÉ UCENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní bor

Mikroelektronika a technologie

Student: Shishkin Alexey ID: 112283
Ročník: 3 Akademicky rok:
2007/2008

NAZEV TEMATU:

Vlastnosti 3D prvku realizovaných tlustvrstvou technologií

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Ověřte chování vícevrstevných struktur a prvku realizovaných tlustvrstvou technologií. Navrhnete a realizujete testovací 3D strukturu tlustvrstvou technologií. Změřte vlastnosti vybraných parametru této struktury a prvku na ni realizovaných, a výsledky vyhodnot'te. Doporučte optimalizaci významných technologických parametrů.

DOPORUCENA LITERATURA:

Szendiuch, I.: Základy technologie elektronických obvodu a systémů, VUT IUM Brno, 2007

Termín zadání: 5.10.2007

Termín odevzdání: 30.5.2008

Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.

předseda oborové rady

UPOZORNENÍ:

Autor bakalářské práce nesmi při vytváření bakalářské práce porušit autorské práva třetích osob, zejména nesmi zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských prav osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Licenční smlouva poskytovaná k výkonu práva užit školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/pani

Jméno a příjmení: Alexey Shishkin
Bytem:
Narozen/a (datum a místo): 28.7.1987, Uva (dale jen "autor")
a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních
technologií se sídlem Udolní 244/53, 60200
Brno 2

jejímž jménem jedna na zaklade písemného pověření děkanem fakulty: Ing.
Zdenka Rozsivalova (dále jen "nabyvatel")

Článek 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

disertační práce

diplomová

práce

bakalářská práce

jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Vlastnosti 3D prvků realizovaných tlustovrstvovou technologií

Vedoucí/školitel VŠKP: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

Ustav: Ustav mikroelektroniky

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

tištěné formě - počet exemplářů 1

elektronické formě - počet exemplářů 1

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracování díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2
Udělení licenčního oprávnění
Článek 2
Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsazených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3
Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Obsah

Obsah.....	5
Seznam obrázků.....	6
Seznam tabulek.....	6
Seznam zkracování	7
Úvod.....	9
1. Teoretická část.....	10
1.1 Základní pojmy.....	10
1.2 Konstruktivní základy realizace RC-RP.....	12
1.2.1 Počet vrstev.....	13
1.2.2. Elektrické kontakty.....	14
1.2.3 Výřezy a řezy ve vrstvách	15
1.3 Výběr technologických parametrů výroby.....	15
1.3.1 Elektrofyzické vlastnosti materiálů vrstev RC-RP.....	15
1.4 Obvodové zapojení RC-RP.....	16
2. Praktická část.....	18
2.1 Cíl experimentu.....	18
2.2 Úlohy k navrhování.....	19
2.3 Návrh topologií.. ..	20
2.4 Materiály.....	22
2.5 Příprava experimentu.....	22
2.6 Experiment.....	24
2.7 Měření.....	29
2.7.1 Kmitočtové charakteristiky.....	29
2.7.2 Metodika nastavení na kmitočet rejekce.....	31
Závěr.....	32
Seznam použitých zdrojů	33

Seznam použitých obrázků

Obr. 1: Konstrukce trojvrstvého RC-RP.....	10
Obr. 2 :ekvivalentní schéma základní buňky.....	10
Obr. 3 :Třídění příznaků, určujících varianty konstrukci vícevrstvových RC-RP	13
Obr. 4 :Třídění konstrukci RC-RP podle počtu vrstev.....	13
Obr. 5: Konstrukce (a) a normalizované grafické znázornění (b) vrstvého RC-RP ze strukturou vrstev R1-C-R2	14
Obr. 6: Varianty konstrukci RC-RP, odlišující se kontakty [2].....	15
Obr. 7: Varianty konstrukci RC-RP, odlišující se druhem výřezů [2]	15
Obr. 8: Konstrukce a schema zapojení regulovatelného vrstvého RC-RP.....	16
Obr. 9: Klasifikační diagram obvodových faktorů určujících elektrické vlastnosti RC-RP	17
Obr. 10: Topologii.....	21
Obr. 11: Doporučení teplotní profil pro výpal tlustých vrstev na základě past sérií ESL 3900 a ESL 4917.....	23
Obr. 12: závislost relativního odporu	23
Obr. 13: Údaje měření odporu dolní odporové vrstvy pro prvek č.1.....	26
Obr. 14: Údaje měření odporu dolní odporové vrstvy pro prvek č.2.....	26
Obr. 15: Údaje měření odporu dolní odporové vrstvy pro prvek č.7.....	27
Obr. 16: Vliv teploty výpalu na mikrogeometrii vrstev prvku č.2	28
Obr. 17: Teplotní profil vypalování past.....	29
Obr. 18: Schéma zapojení pro měření vstupní impedance různých struktur.....	30
Obr. 19: Schémata měření.....	32

Seznam Tabulek .

Tabulka 1 – varianty zapojení R-C-0 struktury jako dvojpóle.....	18
Tabulka 2- charakteristiky materiálů vrstev.....	22
Tabulka 3- ovlivňující faktory	24
Tabulka 4- matice plandání.....	24
Tab. 5- Režimy teplotního zpracování substrátů.....	27

Seznam zkracování

TSO – teplotní součinitel odporu;

TSK – teplotní součinitel kapacity;

RC-RP – RC struktury s rozloženými parametry;

min. – minuta;

db – decibel;

odpor. – odporové;

Úvod.

Vrstvové RC-RP struktury lze pojmenovat prvkem sjednocující vlastnosti jak rezistoru tak i kondenzátoru. Konstruktivně RC-RP se liší od kondenzátoru tím, že jedna z jeho elektrod je odporová vrstva. Elektrické parametry a charakteristiky vrstevových RC-struktur záleží na geometrickou konfiguraci a rozměrů prvků, jejich elektrofyzických parametrech, rozmístění kontaktů a způsobu komutace kontaktů mezi sebou.

Základními parametry RC-RP jsou jejich celková kapacita a celkový odpor, a také parametry charakterizující vlastnosti vrstev (například teplotní součinitel odporu nebo kapacity).

RC-RP našli využití ve mnohých elektronických zařízeních. Například ve filtrech. Zejména jimi můžeme nahradit pasivní prvky se soustředěnými parametry, kdy poslední trati své vlastnosti. Většinou je to oblast vysokých kmitočtů. Tyto filtry mohou být jak čistě pasivní, nejčastěji RC, tak i aktivní ARC. Vyrábějí se v tenko i v tlustovrstvé technologii obvodů s vysokou integrací. Také RC-struktury umožňují větší posun fáze v oblasti mezního kmitočtu [2]. Ten fakt dělá perspektivním použití prvků s rozloženými parametry jako fázovací články.

Vlastnosti RC-RP lze popsat pomocí lineárních diferenciálních rovnic. Toto dovoluje použít RC-RP k naplnění operací integrace a derivování [2]. Také existují možnosti aplikace jako snímače pro magnetické, elektrické a teplotní pole, jako zpožďovací články pro elektrické signály nebo pro modelování fyzických procesů opsaných diferenciálními rovnicemi [2].

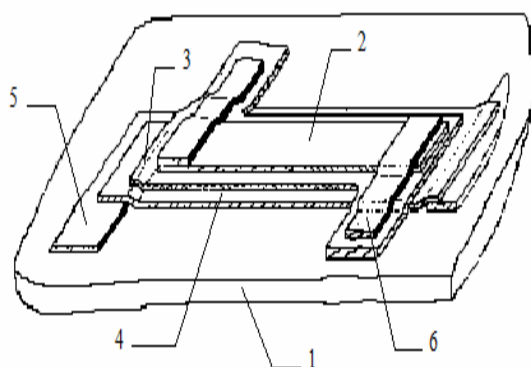
Nehledě na shora uvedené údaje RC-RP zůstávají málo prostudovanými strukturami. Aby prozkoumat potíže s realizací prvků s rozloženými parametry my uskutečneme jeden experiment, který má dát odpověď o teplotní stabilitě RC-RP.

1 Teoretická část.

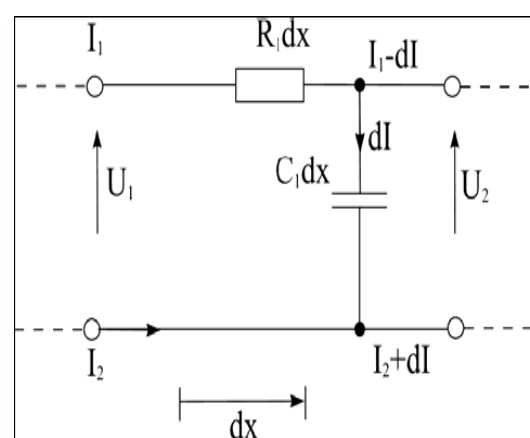
1.1 Základní pojmy.

Odporově kapacitní struktura z rozloženými parametry je to systém střídavých vodivých, odporových a dielektrických vrstev , ve kterých rozložení proudů a napětí závisí nejen od času , ale také od prostorových souřadnic. Proto v těchto prvků se rozložení potenciálu v odporových vrstvách popisuje diferenciálními rovnicemi v částečných derivacích .

Skutečné obvodový prvky , vyrobené na bázi RC-struktur , s zadaným systémem vnějších vývodů a geometrií střídavých vrstev budeme nazývat RC-prvky s rozloženými parametry (RC-PRP).



Obr.1 Konstrukce trojvrstvého RC-RP
1 - dielektrická podložka , 2 – odporová vrstva,
3 – dielektrická vrstva, 4 – metalická vrstva ,
5 – dotyková ploška , 6 – vývody [2].



Obr.2:ekvivalentní schéma základní buňky RC-RP. R_1 a C_1 jsou rozložené na jednotku délky kapacita a odpor [2].

Poprvé možnost nahrazení mnohočlánekového RC-obvodu z soustředěných prvků RC-linkou byla uviděná posle analýzy dlouhé LC-linky , kterou možno bylo představit v podobě kaskádního zapojení velkého množství LC-řetězců s velmi malými nominálními hodnotami . Proto kdy začali plnit prvky čipů v podobě vrstevových a polovodičových struktur z tloušťkou v několik mikronů na dielektrickém substrátu , za podmínky , že jejich délka mnohem více jejich šířky, to v nich hned uviděli RC-linku z rozloženými parametry . Posle některé analýzy začalo byt jasné , že vrstevovou RC-strukturu , v které signály rozšiřují z velmi malou rychlosti, nemožné představit s nutnou přesností obvodem ze několika komponentů s soustředěnými parametry ani na nízkých kmitočtů nebo při pomalých přechodných procesů . V polovině 80-ch posle vývoje efektivních číselných algoritmů řešení dvourozměrných diferenciálních rovnic v částečných derivacích se objevili analyzující práce a práce pro praktickému použití RC-prvků z povrchovým rozložením parametrů . V současné době RC-SRP mohou byt použity pro zlepšení charakteristik široké třídy analogových zařízení pro zpracování informací v rozmezí od desetin Hz do stovek MHz , byt základem pro vytvoření

rozložených měřicích prostředích , se používá pro modelování fyzických procesů , popsaných diferencními a integrálními rovnicemi z lomenými exponenty .

Podle předepsaných konstruktivních omezení RC-RP mohou mít nekonečnou množinu variant (realizací) , každé ze kterých bude odpovídat definovaná charakteristika (frekvenční nebo časová) . A tak pomocí RC-RP lze realizovat nekonečnou množinu charakteristik . Ale z toho ještě nevytéká , že s pomocí jednoho RC-RP lze realizovat libovolnou předem určenou funkci frekvenci nebo času .

Zkoumání touto otázkou pro obvody ze soustředěnými parametry jsou věnovány tak zvané mezní aproximativní teorémy. Tyto teorémy jsou získané jako důsledek zobecněného teorému Stone-Weierstrasse . Přitom pro aktivní RC-obvody teorémy vypadají následovně:

Teorém 1 [2]. Nezáporná a spojitá v omezené a uzavřené množině funkce $\xi(x)$ může být s určenou přesností reprodukována ve druhu čtverce modulu přenosové funkce pasivního RC obvodu . Přitom do pasivního obvodu je přípustné kaskádní zapojení zesilovače s kmitočtově nezávislým zesílením , který hra úlohu pevného činitele .

Teorém 2 [2]. Spojitá v omezené uzavřené množině funkce $\xi(x)$ může být reprodukována s definovanou přesností ve druhu přenosové charakteristiky RC- obvodu , ve kterém se povoluje použití oddělovacího zesilovače s kmitočtově nezávislým zesílením .

Teorém 3 [2]. Komplexní funkce frekvence $\xi(j\omega)$, která definovaná na intervale $[0, \omega_0]$, kde $0 < \omega_0 < \infty$ a vyhovují podmínce $\int_0^{\omega} |\xi(j\omega)|^2 d\omega < \infty$, může být reprodukována s cokoliv

malou střední kvadratickou chybou ve druhu komplexní přenosové funkce pasivních RCL-obvodu, snad obsahujících jeden kaskádní zapojení zesilovač s kmitočtové nezávislým činitelem zesílení .

Teorém 4 [2]. Pro minimální-fázově funkce $\xi(j\omega)$ v omezené uzavřené množině ,popisující předepsané charakteristiky amplitudového úniku a fáze , může být nalezená fyzicky realizovatelná přenosová funkce $T(j\omega)$ pasivního RC-obvodu s kaskádní zapojením kmitočtové nezávislým zesilovačem , pro kterou se provádí vztahy :

$$\left\{ \int_{E_\omega} \left| A_0 + \operatorname{Re}\{\xi(j\omega)\} - \ln \frac{1}{|T(j\omega)|} \right|^s d\omega \right\}^{1/s} \leq \delta_0, \quad (1)$$

$$\left\{ \int_{E_\omega} \left| I_m \{\xi(j\omega)\} - \arg \frac{1}{|T(j\omega)|} \right|^s d\omega \right\}^{1/s} \leq \delta_0,$$

Citované teorémy dovoluji odhalit možnosti pasivních a aktivních RC-obvodu plnit definované frekvenční a časové charakteristiky . Pokud pasivní obvody jsou podřídou aktivních RC-obvodu tak komentovat teorémy pohodlnější v návaznosti na pasivní obvody .

Teorémy 1 a 2 stanoví, že pomocí pasivních RC-obvodu lze navrhnout zařízení prakticky s libovolnými v omezeném rozsahu frekvenci (času) amplitudovými frekvenčními charakteristiky.

Velmi důležitě podotknout, že praktické využití pasivních obvodu ne vždy je účelné, pokud oni mohou být přespříliš objemné kvůli zvětšení počtu prvku. Ale jejich potenciální možností se shodují s možností aktivních RC-obvodu, RLC-obvodu (teorémy 3 a 4) a teoreticky jsou skoro.

Bohužel, pro RC-obvody z rozloženými parametry nejsou mezních aproximativních teorémů. Ale, na základě toho faktu, že RC-obvody se soustředěnými parametry lze posoudit jako částečný případ RC-RP, získané rozhodnutí je možné s ještě větším přesvědčením rozšířit a na nich. A co víc, využití možností mikroelektroniky pro utváření vlastností a struktury vrstev může vyřídit problému účelnosti použití pasivních obvodu. Množinová složitost, která je charakteristická vlastnost obvodu se soustředěnými parametry, se nahrazuje na fyzikálně topologickou a strukturní složitost, která se zajišťuje bez zvětšení plochy obsazenou obvodem.

Takovým způsobem, funkční možností RC-RP se ve větší míře definují konstruktivně technologickými možností jejich vytvoření.

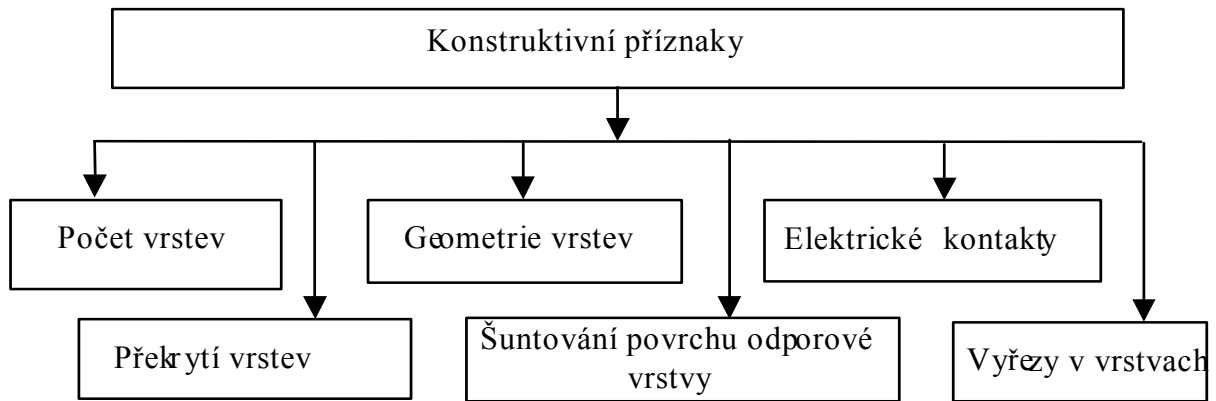
Projednáme podrobněji každý ze faktorů, určujících elektrické vlastností RC-RP.

1.2 Konstruktivní základy realizace RC-RP.

Je zřejmé, že matematické modely RC-RP se především definují konstrukcí prvku a že možností konstrukci závisí na technologie výroby i zkoumání všech možných konstruktivně technologických variantu .

V rámci této práce se omezujeme prozkoumáním konstruktivních variantů realizace vůči vrstevné technologie, která je v současné době nejrozšířenější pro výrobu RC-RP.

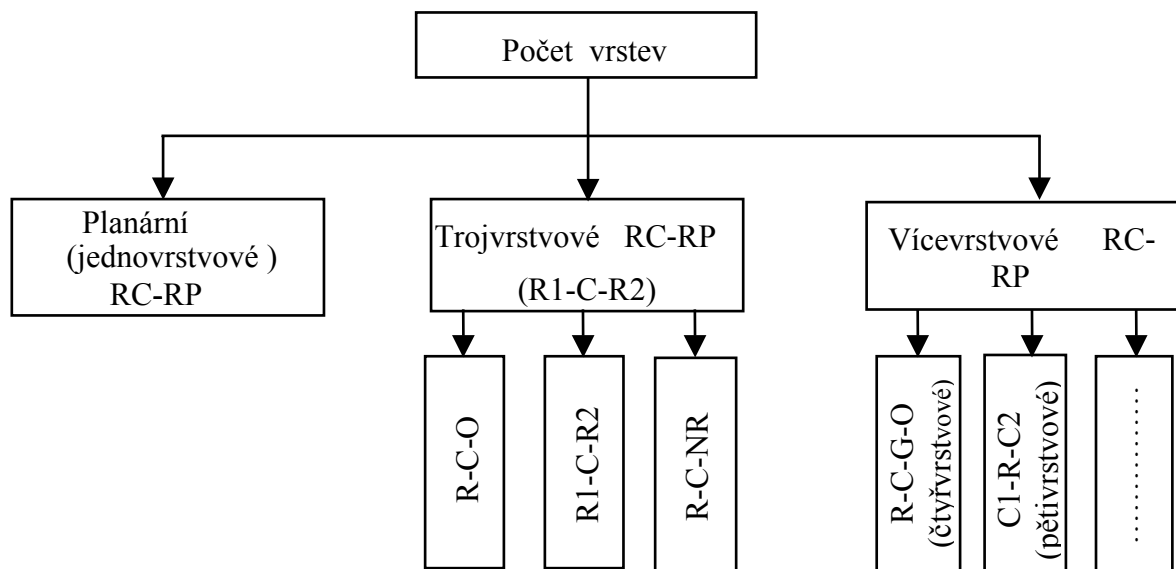
Všechna mnohotvárnost konstrukci RC-RP může být formálně popsána, jestli zavést konstruktivní příznaky, charakterizující onu nebo jinou svéráznost konstrukci. Takové konstruktivní příznaky vůči vrstevné technologie jsou představený ve kvalifikačním diagramu, který je zobrazen na **obr.3** .



Obr.3 Třídění příznaků, určujících varianty konstrukce vícevrstevových RC-RP [2].

1.2.1 Počet vrstev.

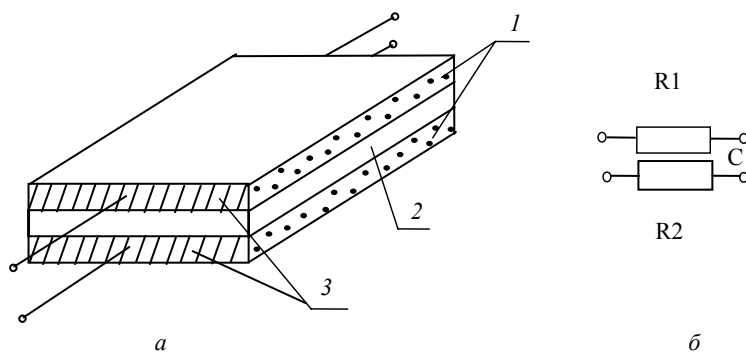
Třídění konstrukcí RC-RP, odlišujících se podle počtu vrstev, je zobrazeno na **obr. 4**



Obr.4 Třídění konstrukcí RC-RP podle počtu vrstev [2].

Trojvrstevové konstrukce RC-RP ze strukturou vrstev ve druhu R1-C-R2 je zobrazena na **obr.5**. Je to nejprozkoumanější třída RC-RP, která se odlišná jednoduchostí výroby a rozsáhlým pásmem kapacity struktury.

Ne vždy odporové a vodivé vrstvy jsou rozdělené dielektrickou vrstvou. Občas dolní odporová vrstva se nanáší přímo na vodivou vrstvu, která současně hra úlohu celkového vývodu struktury.

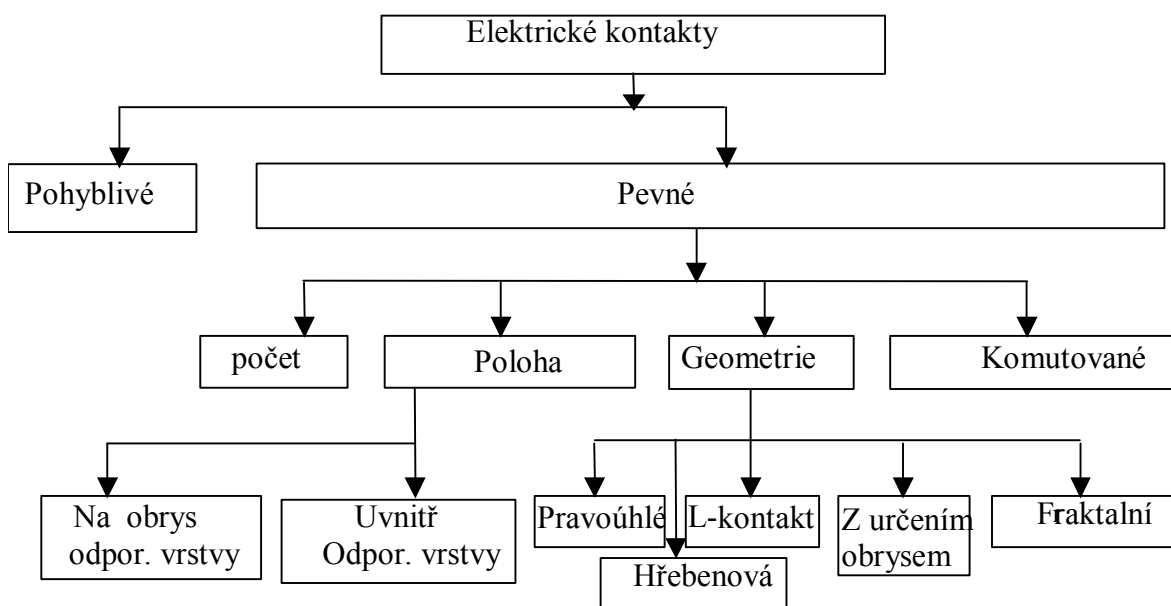


Obr.5. Konstrukce (a) a normalizované grafické znázornění (b) vrstvého RC-RP ze strukturou vrstev R1-C-R2 [2]

1- odporová vrstva; 2-dielektrická vrstva ; 3-kontaktní plochy

1.2.2. Elektrické kontakty.

Ještě jedním efektivním faktorem pro dodržení předepsaných elektrických charakteristik je systém elektrických kontaktů, pomocí kterých se uskutečňuje jak vnitřní komutace mezi vrstvami, tak i zapojení RC-RP do obvodu. Poloha a tvar kontaktů způsobují rozložení potenciálů v odporové vrstvě, počet kontaktů podmiňuje počet vazeb, které lze uskutečnit jak uvnitř RC-RP, tak i přes RC-RP v obvodu. Varianty konstrukci RC-RP, odlišující se kontakty, jsou znázorněny na **obr. 6**.

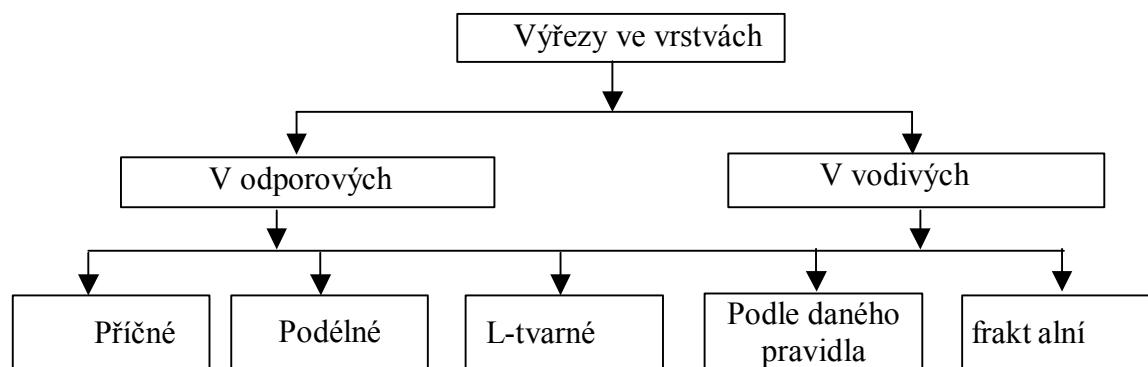


Obr.6. Varianty konstrukci RC-RP, odlišující se kontakty [2].

1.2.3 Výřezy a řezy ve vrstvách .

Silným faktorem rozšíření funkčních možností RC-RP a také zajištění požadovaných charakteristik je vytvoření řezů a výřezů jak v odporových, tak i v vodivých vrstvách (**obr.7**).

Je zřejmé, že kombinace nejrůznějších konstruktivních faktorů ještě více zvyšuje funkční možnosti RC-RP a oblast jeho možného použití.



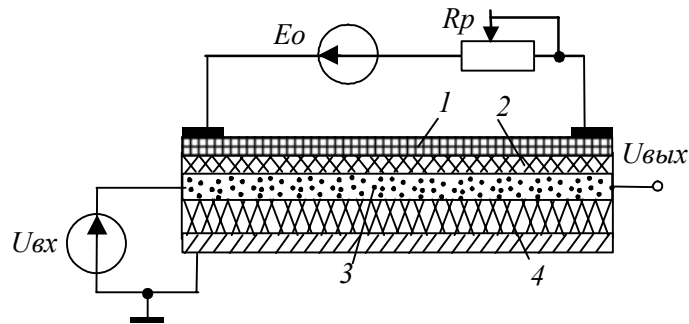
Obr.7. Varianty konstrukci RC-RP, odlišující se druhem výřezů [2] .

1.3 Výběr technologických parametrů výroby.

1.3.1 Elektrofyziké vlastnosti materiálů vrstev RC-RP.

Elektrofyziké vlastnosti materiálu, použitých pro výrobu RC-RP, do značné míry ovlivňují na charakteristiky prvku. Nejvíce typickým případem je výběr materiálů, parametry kterých zůstávají nezměnitelnými v průběhu fungování prvku v obvodu a nezávisí na vnějších vlivů. Přitom k materiálům odporových a dielektrických vrstev uplatňují požadavky na zjištění předepsaných specifického odporu a specifické kapacity. Zajištění vysoké teplotní a časové stability RC-RP možné dosáhnout pomoci využití vysokostabilních odporových a dielektrických materiálů nebo pomoci vzájemné kompenzace teplotních a časových odchylek tak, aby byla splněna podmínka $rC_0=const$. Často tyto podmínky dosahují výběrem příslušných technologických zřízení výroby vrstev.

Na **obr.8** je znázorněn princip práce jednorozměrného rozváděcího snímače na odporové kapacitně vrstevové struktuře pro měření teplotního pole. Tento snímač má citlivou odporovou vrstvu. Tuto ideu, například, lze používat pro regulování parametrů struktury, jestli teplotu odporové vrstvy měnit pomoci ohříváče, umístěného navrchu odporové vrstvy.



Obr.8. Konstrukce a schema zapojení
regulovatelného vrstvého RC-RP

- 1 – ohřivač; 2 – ochranný dielektrikum;
3 – rezistor struktury citliví na teplo; 4 –
dielektrická vrstva; 5- vodivá vrstva struktury;

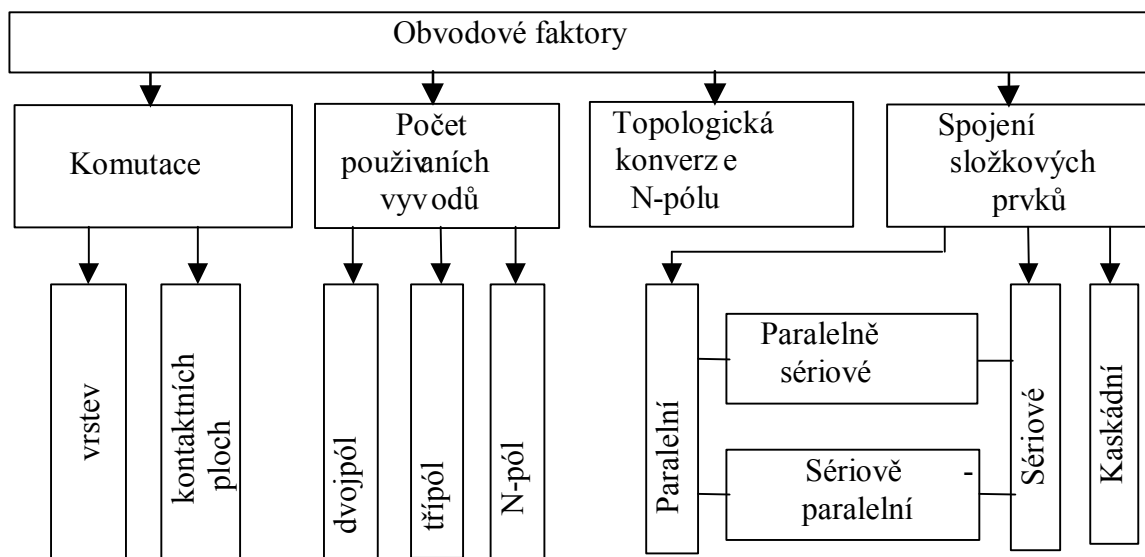
V touto struktuře přes ohřivač 1 probíhá proud určité hodnoty ode zdroje regulovatelného napětí. Podle velikosti proudu se v odporové vrstvě 3 zjišťuje definovaná teplota, která přivádí k odpovídající změně její odporu.

Je zřejmé, že podobného efektu lze dosáhnout, jestli odporová vrstva bude citlivá do magnetického pole. Tehdy řízení lze uskutečnit, jestli nahradit ohřivač dobře vodivým materiálem. Protékající v něm proud způsobí stálému magnetickému poli, které i bude působit na odpor rezistoru struktury. Navíc, jestli permitivita dielektrické vrstvy určující celkovou kapacitu rozloženého prvku bude mít citlivost na magnetické pole, pak může být docílena dost vysoká citlivost.

Proto změnu parametrů RC-RP struktury s foliovými nebo polovodičovými vrstvami citelnými na teplotu, na sílu magnetického pole, na intenzitu světelného záření lze požit pro vytvoření parametrických a adaptivních zařízení, které mění své chování při změně vnějších podmínek.

1.4 Obvodové zapojení RC-RP.

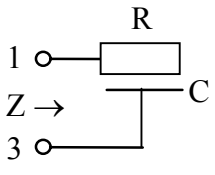
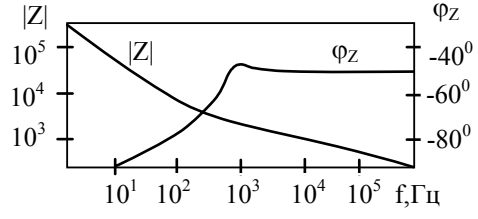
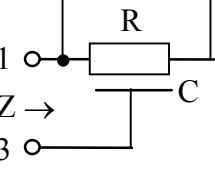
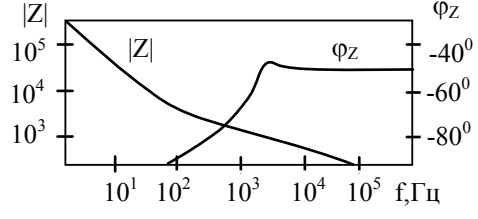
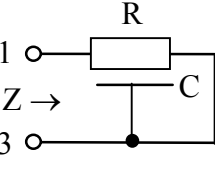
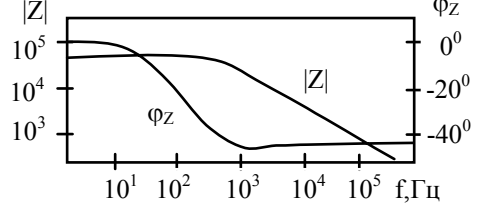
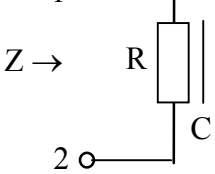
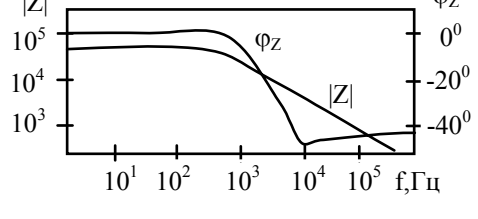
Výše uvedené příklady konstruktivních variantů RC-RP ukazují, že v celkovém případě RC-RP jsou více pólové prvky, u kterých počet pólů záleží na počtu odporových a vodivých vrstev a na počtu elektrických kontaktů v odporových vrstvách.



Obr.9. Klasifikační diagram obvodových faktorů určujících elektrické vlastnosti RC-RP [2]

Proto existuje možnost na bázi toutéž konstrukce měnit nejen elektrické charakteristiky RC-RP, ale také jeho funkční účely. Toto ukázáno na klasifikačním diagramu **obr.9**. Níže v Tabulce 1 uvedeny příklady jak na bázi jedné jednorozměrné homogenní R-C-0 struktury, která je využita jako dvoupólový prvek, lze měnit kmitočtové charakteristiky impedance prvku pomocí změny vnitřní komutace a čísel vnějších vývodů.

Tabulka 1 – varianty zapojení R-C-0 struktury jako dvojpóle.

№	Schéma zapojení		Kmitočtové charakteristiky
1		$Z = \frac{cth\Theta}{\Theta}$	
2		$Z = \frac{cth\Theta}{2\Theta}$	
3		$Z = \frac{th\Theta}{\Theta}$	
4		$Z = \frac{2}{\Theta} th \frac{\Theta}{2}$	

2 Praktická část.

2.1 Cíl experimentu

Plánování experimentu a vypracování testovacího substrátu mají za své cíl řešení následujících úloh:

- Provedení vylučovacího experimentu pro volbu definici oblasti technologických režimů, zajišťujících výrobu vhodných RC-RP ze strukturami vrstev R-C-0, R-C-G-0, R-C-NR.
- Získání údajů pro zpřesnění matematických modelu RC-RP s různými strukturami vrstev, které by uvažovali konstruktivních omezení a vliv neideálních elektrofyzičických parametrů vrstev.
- Výzkum závislosti matematických modelu RC-RP se strukturou vrstev druhu R-C-0 na měřicím faktoru.

Především nás zajímá časová konstanta každého druhu RC-RP. Jak je známo časová konstanta záleží na měrném povrchovém odporu vrstvy, čili odporu čtverce r , měrně kapacitě C_o a na délce struktury. Pro pravoúhlo tvar RC-RP časovou konstantu můžeme definovat výrazem:

$$\tau_{RC} = rC_o l^2. \quad (2)$$

Měrní odpor a kapacita jsou funkcí vnitřní struktury vrstvy (velikost zrnitosti, obsah jednotlivých látek atd.), která zároveň s tím je funkce režimů výroby. Proto v matematickém modelu jako výstupní parametr vezmeme teplotní součinitel časově konstanty prvku a jako ovlivňující faktory vybereme režimy vypalování: $\tau_{RC} = f(x_1; x_2; x_3)$, kde x_1 , x_2 , x_3 jsou technologické parametry, které určíme později.

2.2 Úlohy k navrhování.

1. Vytvořit topologii prvků, podle kterých pak budou vyrobeny masky pro síťotisk. Maximální rozměr substrátu je 50,4X50,4 milimetrů.
2. Vybrat vhodné materiály odporových vrstev, aby byla splněna podmínka $R_{\text{dolní vrstvy}} = NR_{\text{horní vrstvy}}$. Pasty mají mít měrní odpor ρ_{\square} v rozsahu od 10 až do 100 $k\Omega/mm^2$. Dielektrická vrstva má mít měrnou kapacitu C_{\square} zhruba 20 až 50 pF/mm^2 .
3. Připravit experiment: a) jako cílovou funkcí vzít teplotní součinitel časově konstanty struktur; b) definovat faktory, které působí na cílovou funkcí a taktéž které jsou kontrolované a regulované; c) definovat rozsah změny těchto faktorů; d) sepsat matici úplného faktorného experimentu.
4. Uspořádat experiment podle matrice plánování. V každém bodu matrice udělat zkušeností dvakrát, aby pak bylo možně udělat rozhodnutí o vlivu výrobních chyb na parametry RC-RP struktur.

5. Změřit rozklad odporů a kapacit na RC-RP strukturách a porovnat výsledky z výsledky měření na kontrolních rezistorů a kondenzátorů.

6. Udělat termickou zkoušku, aby určit TSO a TSK všech prvků.

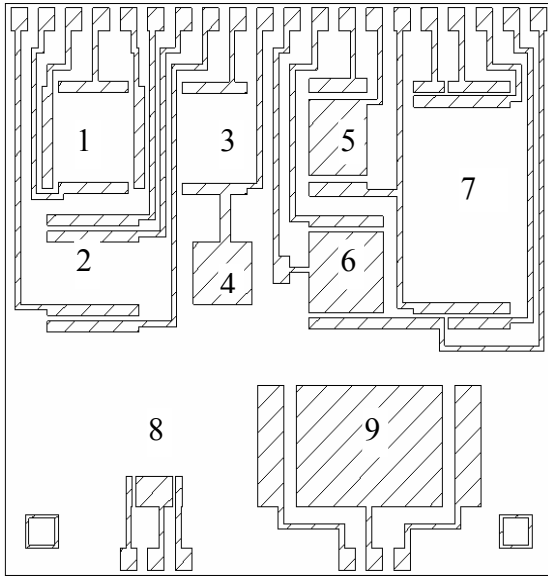
7. Zpracovat výsledky provedení experimentu a vytvořit matematický model $\tau_{RC} = f(x_1; x_2; x_3)$. Provéřit stejnorodost výsledků měření, definovat hodnotu výrobních chyb. Nalézt extrém cílové funkce a definovat parametry režimu, při kterém je tento extrém.

8. Zhodnotit adekvátnost matematického modelu.

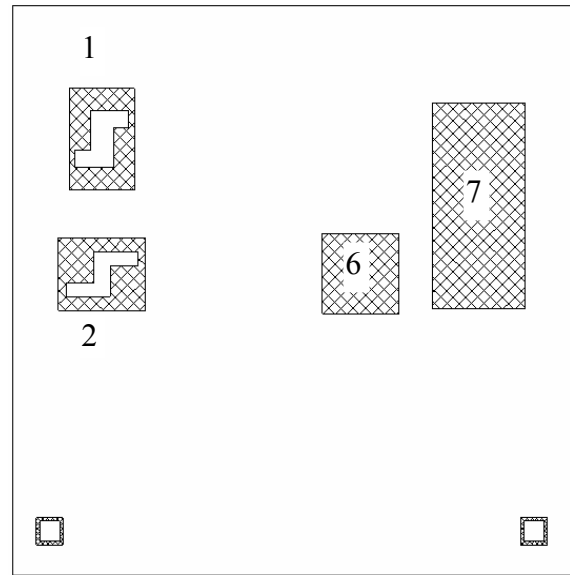
2.3 Návrh topologií.

Pro experiment byl navrhnout testový substrát a vyrobena zásilka ze 18 vzorků. Aby finanční náklady na experiment byli minimální, rozmístíme na jednom substrátu sedm druhů struktur a také kontrolní kondenzátor a rezistor. Vzhled topologii každé vrstvy j znázorněn na **obr.10**. Na každé topologie jsou uvedeny čísla prvku. RC-RP č. 1 a 2 mají stejnou strukturu vrstev ve druhu R-C-NR, ale se liší, za prve, tím, že u prvního prvku vývody horní i dolní vrstvy jsou umístěni rovnoběžně, ale u druhého jsou umístěni kolmo, a, za druhé tím, že dolní odporové vrstvy mají různé tvary výřezů. Prvek č. 3 je kontrolní rezistor a prvek č. 4 je kontrolní kondenzátor. Prvek č. 5 má strukturu R-C-0 a prvek s číslem 6 strukturu ve druhu R-C-G, ve které horní odporová vrstva nemá vývodů a je přemostěná vodivou vrstvou. RC-RP s č. 7 má stejnou strukturu vrstev R-C-NR jak i prvky s č. 1, 2, ale na rozdíl ode nich jeho horní odporová vrstva je splněna ve druhu dvou pásku různé šířky, každý ze kterých má dvojici kontaktních plošek. Takový šestipólý prvek lze posuzovat jako RC-RP ze strukturou vrstev ve druhu R1-C1-R-C2-R2. RC-RP s č. 8 a 9 mají stejnou s prvkem č. 5 strukturu vrstev, ale prvek č. 8 má rozměry dvakrát méně a č. 9 dvakrát více, než rozměry prvku č. 5.

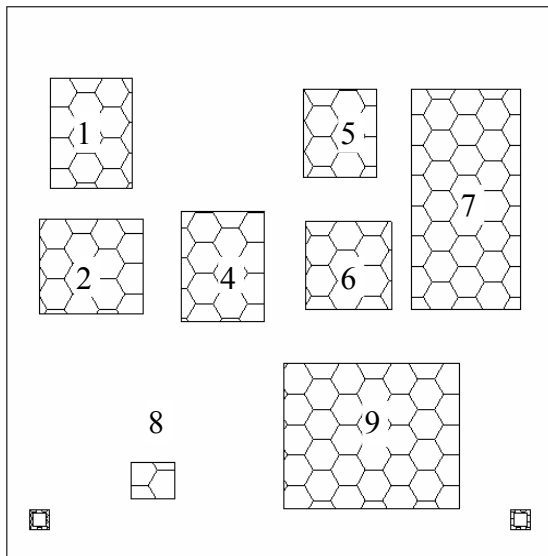
Obr.10: Topologii:



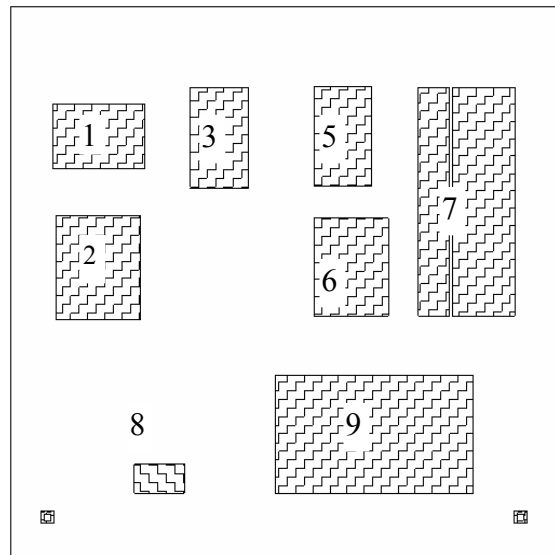
a) dolní vodivá vrstva.



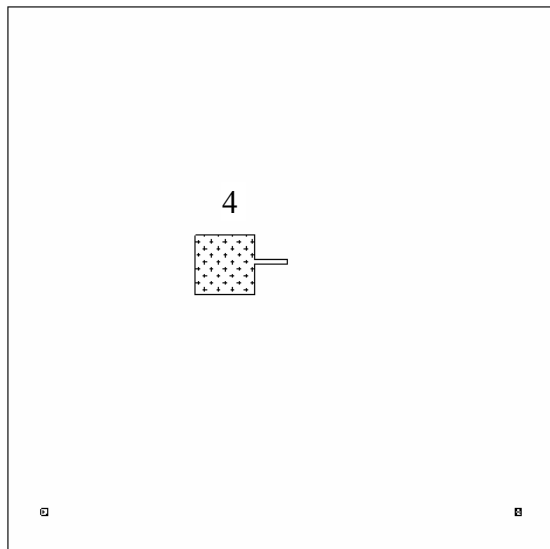
b) dolní odporová vrstva.



c) dielektrická vrstva.



d) horní odporová vrstva (mění odpor v N krát méně než u dolní odporové vrstvy).



e) horní vodivá vrstva (na ni je pouze vrchní elektroda kondenzátoru).

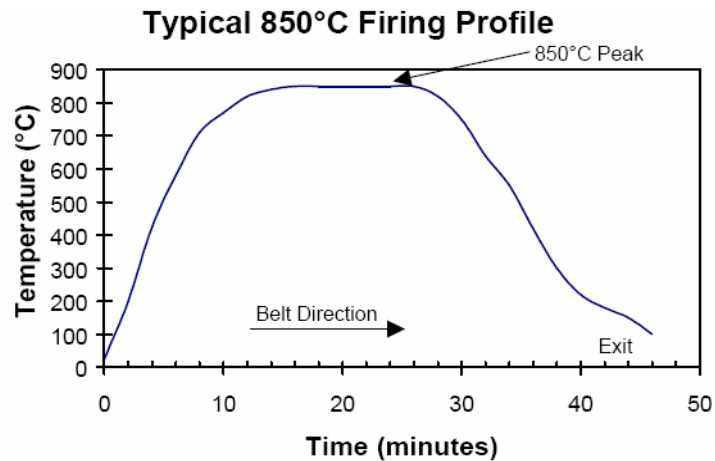
2.4 Materiály.

Tabulka 2- charakteristiky materiálů vrstev.

Název vrstvy	Značka pasty	$\rho_{\square}, \varepsilon$	Tloušťka, mkm	Teplota vypalování, °C
Dolní odporová vrstva	ESL 3915	100 $\kappa\Omega/\square$	22,5	850
Dielektrická vrstva	ESL 4917	8-11	45	850-930
Horní odporová vrstva	ESL 3914	10 $\kappa\Omega/\square$	22,5	850
Horní a dolní vodivá vrstva	ESL 9562	$6 \cdot 10^{-3} \Omega/\square$	22,5	850-930

Odporové pasty byly zvoleny z série ESL 3900. Je to Ag/Pd pasty. Jsou určeny pro hybridní mikroobvy. Rezistory na jejich základě mají dobrou stabilitu v širokých pásmech teplot a napětí. Doporučení teplotní režim vypalování past touto sérií je znázorněn na obr.11 .

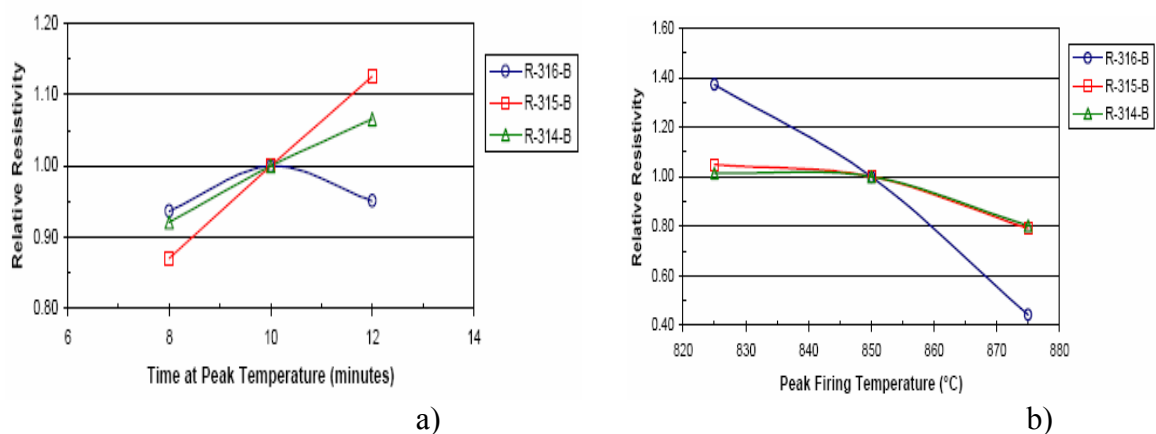
Dielektrická pasta je určena pro vícevrstvé aplikace s různými druhy vodivých a odporových past. Výrobce je zaručeně, že v případě použití různých typů past nebude vznikat "battery effect". TSR pasty se shodují s TSR 96% korundové keramiky. Doporučený teplotní profil vypalování pasty ESL 4917 je stejný jako i u odporových past.



Obr.11: Doporučení teplotního profilu pro výpal tlustých vrstev na základě past sérií ESL 3900 a ESL 4917. [5]

2.5 Příprava experimentu

Ve vědecké literatuře prakticky není prací věnovaných technologii výroby tlustovrstvových RC-prvků s rozloženými parametry. Proto chybí takové požadované pro projektování údaje, jako teplotní stabilita RC-RP, působení chyb technologického procesu na jejich elektrické vlastnosti, soulad mezi parametry matematických modelů RC-RP a parametry výroby prvků atd. V katalogu past jsou pouze údaje o relativním odporu jednovrstvových rezistorů s různou dobou a teplotou vypalování (obr.11). A proto v našem experimentu vybereme hodnoty výrobních parametrů v souladu s těmi údaji.



Obr.12: a) závislost relativního odporu tlustovrstvového rezistoru na době vypalování [3].

b) závislost relativního odporu tlustovrstvového rezistoru na teplotě vypalování [3].

Vybereme tři proměnných parametrů:

- 1) Teplota vypalování odporových vrstev.
- 2) Doba vypalování odporových vrstev.
- 3) Teplota vypalování dielektrické vrstvy.

Dali jsme přednost těmto parametrů, protože oni mají největší vliv na strukturu budoucích vrstev a tedy i na časovou konstantu celého prvku.

Tabulka 3- ovlivňující faktory

Faktory	Teplota vypalování odporových vrstev (C°), X1	Teplota vypalování dielektrické vrstvy (C°), X2	Doba vypalování odporových vrstev (min.), X3
Hlavní hladina	850	850	10
Interval změny	80	80	5
Horní hladina	890	890	12.5
Dolní hladina	810	810	7.5

Tabulka 4- matice plandání.

Číslo zkušenosti	X1		X2		X3	
	kód	C°	kód	C°	kód	min.
1	—	850	—	810	—	7
2	—	850	—	810	+	13
3	—	850	+	890	—	7
4	—	850	+	890	+	13
5	+	910	—	810	—	7
6	+	930	—	810	+	13
7	+	910	+	890	—	7
8	+	910	+	890	+	13
9	0	890	0	850	0	10

2.6 Experiment.

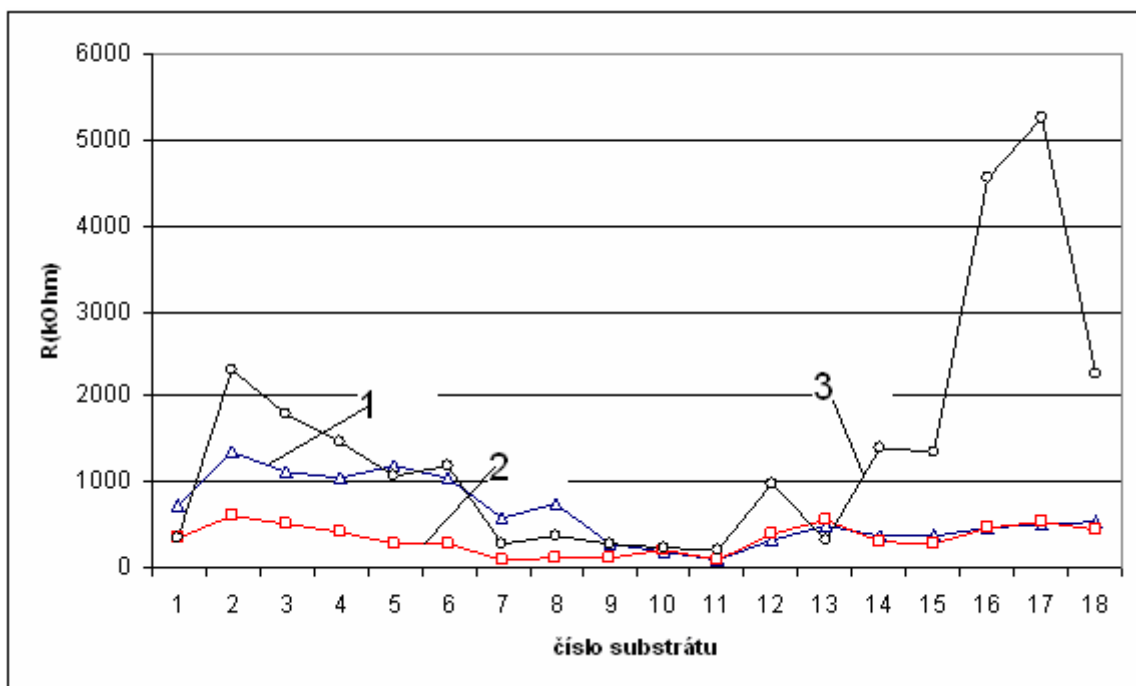
Nanášení past bylo splněno pomocí sítotisku na zařízení "Tesla Lanškroun-1506A". Pro vypalování jsme použili čtyřpáskovou tunelovou vypalovací pec značky „BTU“. Teplota výpalu obměňovala v intervalu od 810°C do 890°C a doba výpalu od 7 do 13 minut. Všechny substráty byli rozpůleny pro dublování pokusů. To pak nám umožní udělat závěr o hodnotě výrobní nepřesnosti. Dále jsou definovány podmínky pro vypalování každého substrátu. Uvedená teplota ukazuje maximální teplotu v průběhu celého cyklu a uvedená doba je doba, během které substráty se nacházeli při maximální teplotě.

1. Dolní odporová vrstva (100 $\kappa\Omega/\square$). Značka pasty je ESL 3915
První zásilka (substráty 1, 2, 5, 6) - T= 810°C , t= 7 minut .
Druhá zásilka (substráty 3, 4, 7, 8) - T=810°C, t=13 minut .
Třetí zásilka (substráty 10, 11, 14, 15) - T=890°C, t=7 minut .
Čtvrtá zásilka (substráty 12, 13, 16, 17) - T=890°C, t=13 minut .
Pátá zásilka (substráty 9, 18) - T=850°C, t=10 minut .
2. Dielektrická vrstva. Značka pasty je ESL 4917
První zásilka (substráty 1, 2, 3, 4,10,11,12,13) - T=810°C, t=10 minut.
Druhá zásilka (substráty 5, 6, 7, 8,14,15,16,17) - T=890°C, t=10 minut.
Třetí zásilka (substráty 9, 18) - T=850°C, t=10 minut.
3. Horní odporová vrstva(10 $\kappa\Omega/\square$). Značka pasty je ESL 2914
První zásilka (substráty 1, 2, 5, 6) - T= 810°C , t= 7 minut.
Druhá zásilka (substráty 3, 4, 7, 8) - T=810°C, t=13 minut.
Třetí zásilka (substráty 10, 11, 14, 15) - T=890°C, t=7 minut.
Čtvrtá zásilka (substráty 12, 13, 16, 17) - T=890°C, t=13 minut.
Pátá zásilka (substráty 9, 18) - T=850°C, t=10 minut.

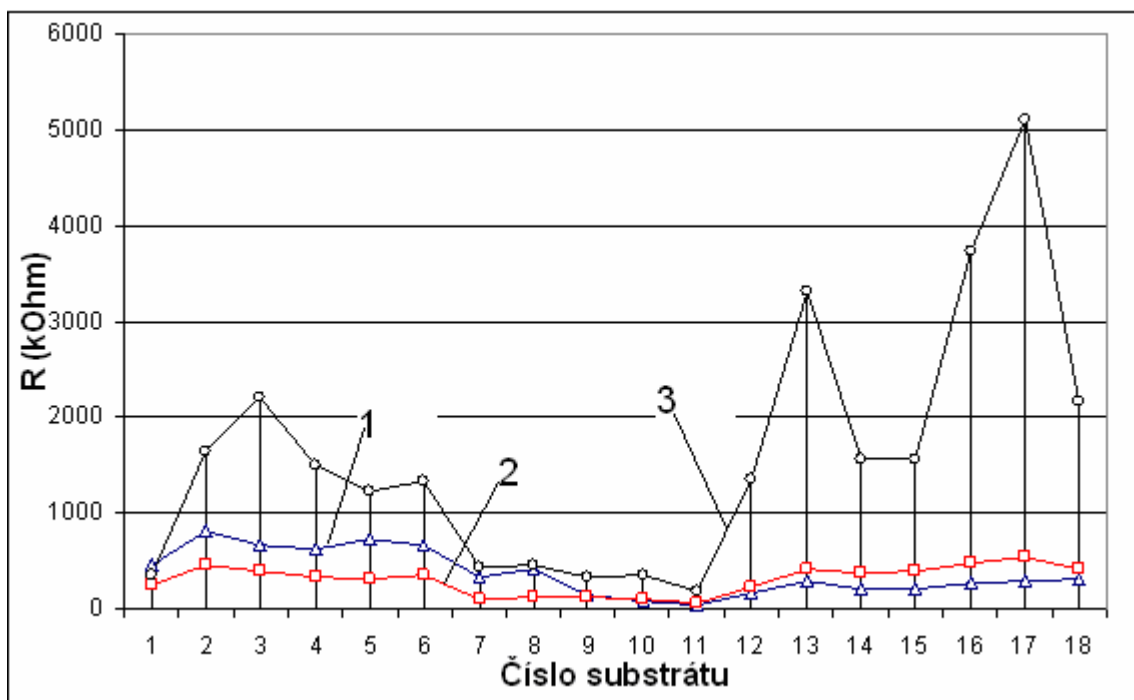
4. Horní a dolní odporová vrstva. Pasta je značky ESL 9562. Dolní vrstva na všech substrátech byla vypalována při podmínkách: T= 850°C , t= 10 minut. Horní vrstva na všech substrátech byla vypalována při podmínkách: T= 810°C , t= 7 minut.

Seznam párů prvku, které měli stejné podmínky výroby: (1;2), (3;4), (5,6), (7,8), (10,11), (12,13), (14,15), (16,17), (9,18).

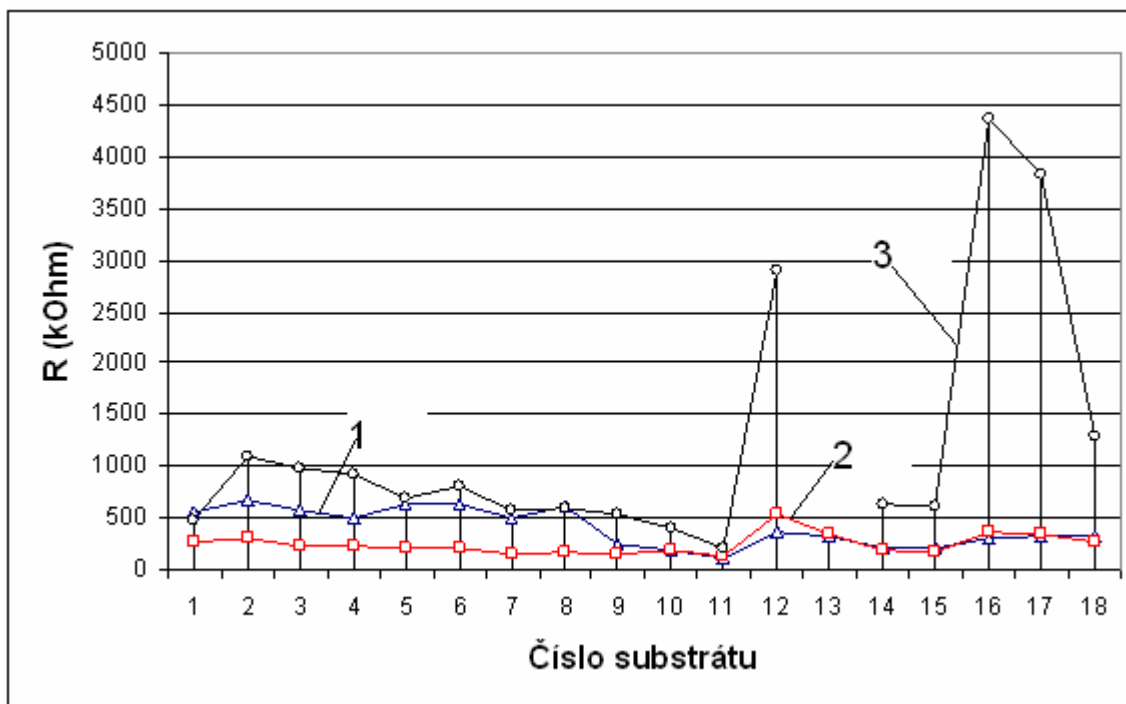
Během výroby jsme kontrolovali odpor rezistoru v dolní odporové vrstvě prvků se strukturou vrstev druhu R-C-NR, protože posle nanášení a vypalování jsou byli podrobí působení dodatečných vysokých teplot při vytvoření následujících vrstev.



Obr.13: Údaje měření odporu dolní odporové vrstvy pro prvek č.1. (čára č.1 – hodnoty odporu podle výpalu dolní vrstvy; čára č.2- hodnoty odporu podle výpalu dielektrické vrstvy; čára č.3- hodnoty odporu podle výpalu všech vrstev).



Obr.14: Údaje měření odporu dolní odporové vrstvy pro prvek č.2. (čára č.1 – hodnoty odporu podle výpalu dolní vrstvy; čára č.2- hodnoty odporu podle výpalu dielektrické vrstvy; čára č.3- hodnoty odporu podle výpalu všech vrstev).



Obr.15: Údaje měření odporu dolní odporové vrstvy pro prvek č.7.(čára č.1 – hodnoty odporu posle výpalu dolní vrstvy; čára č.2- hodnoty odporu posle výpalu dielektrické vrstvy; čára č.3- hodnoty odporu posle výpalu všech vrstev).

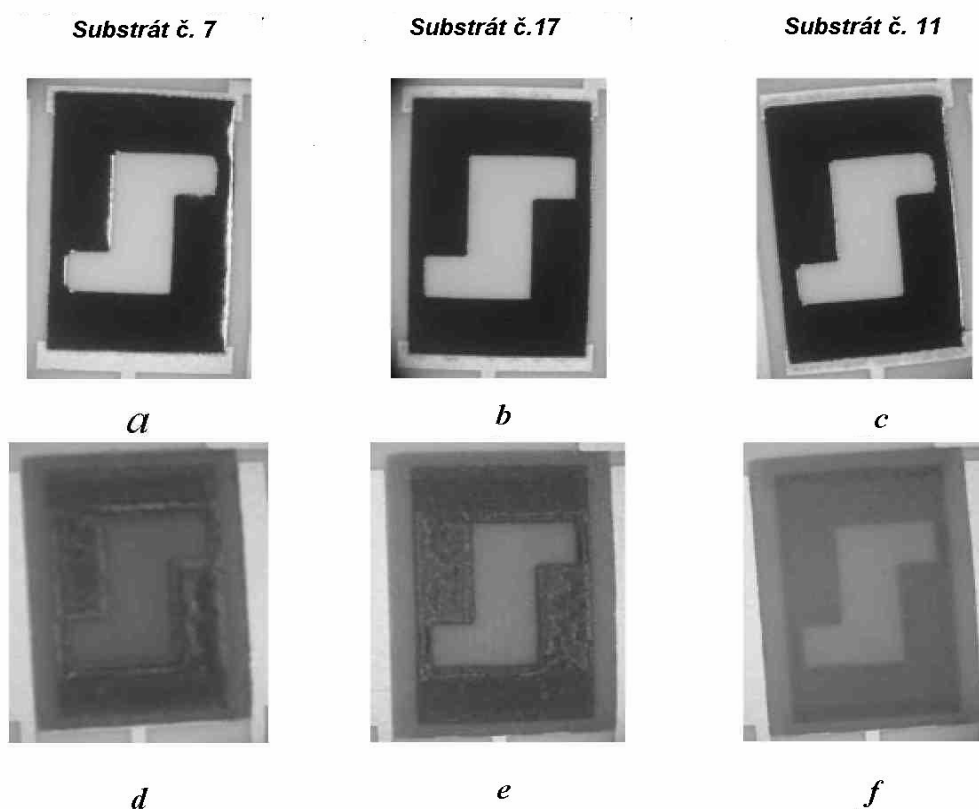
Vidíme, že změny odporu v průběhu výroby jsou nejrozdílnější. Dokonce v každém páru prvků občas jejich odpor se liší příliš značně, i když tyhle prvky jsou měli stejní podmínky výroby. Také je výrazně viditelně, že po výpalu dielektrické vrstvy hodnota odporu se snižuje a po výpalu druhy odporové vrstvy nerovnoměrně narůstá. Jen u některého řadu prvku odpor se zůstává zhruba stejný (prvky č. 7, 8, 10,11). A proto podmínky, při kterých oni byly vyrobeny, mohou byt doporučený na ten případ, kdy je hlavní roli hra předvídatelnost hodnoty odporu.

Pro určení příčin takové značné změny odporů dolní odporové vrstvy pro jedny vzorky (například č. 13 a č.1) a nepříliš velké změny pro jiné vzorky (například č.7-11). V tabulce 2 jsme přivedli režimy teplotního zpracování několika substrátů ze těchto skupin.

Tab. 5: Režimy teplotního zpracování substrátů.

Režim vypalování (T°C/t min.)	Číslo substrátu				
	7	9	11	13	17
Dolní odporová vrstva	810/13	850/10	890/7	890/13	890/13
Dielektrik	890/10	850/10	810/10	810/10	890/10
Horní odporová vrstva	810/13	850/10	890/7	890/13	890/13

Navíc na obrázku 15 jsou zobrazeny fotografie vrstev prvku č. 2 pro tři substráty na různých fázích výroby.



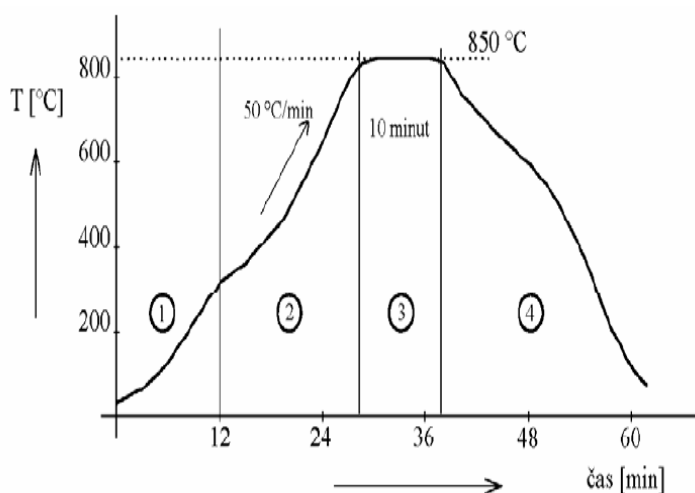
Obr. 16: Vliv teploty výpalu na mikrogeometrii vrstev prvku č.2 : a,b,c – fotografie do výpalu dielektrické vrstvy; d,e- fotografie po výpalu dielektrické vrstvy při teplotě 890 °C; f – fotografie po výpalu dielektrické vrstvy při teplotě 850 °C .

Hned vznikají otázky:“Proč probíhají takové změny odporu a proč tak se mění mikrorelief vrstev ?“ Zkusíme to vysvětlit pomocí chemických reakcí protékajících ve vrstvách během výpalu.

Teplotní profil pro výpal tlustých vrstev lze rozčlenit na čtyři části, viz. obr. 16. V průběhu první části (do teploty 300-400 °C) rychlost stoupaní teploty má být zhruba 20-25 °C/min. Tady probíhá vyhořívání technologického pojiva. Tento proces musí probíhat s mírnou rychlostí: nepříliš rychle a nepříliš pomalu. Při rychlém narůstání teploty vyhořívání je doprovázeno porušením vrstvy, vznikají bubliny a může dojít k odloupení vrstvy od substrátu. Při pomalém vyhořívání ve vrstvě se může zůstat uhlík, který je složkou organického pojiva. Jestli se vrstva s zůstatky uhlíku dostane do druhé teplotní části, kde se začíná tavit sklo, tak mohou vzniknout nekontrolovatelné reakce zhoršující kvalitu prvku . Jedna z těchto poruch technologického cyklu mohla stát příčinou vzniku nerovnosti povrchu vrstev, protože kdy jsme zvětšovali dobu a teplotu výpalu, totiž automaticky zvyšovali rychlost ohřívání a chlazení.

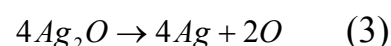
Během druhé části probíhá tání skelné složky a povlékání taveninou částic funkční složky. Doporučena rychlost stoupaní teploty je 50-60 °C/min. Během třetí části cyklu protékají složené fyzikálně chemické procesy určující hlavní vlastnosti prvku. Maximální

teplota má být dodržena přesně ± 1 °C. Čtvrtý interval teplotního profilu odpovídá chlazení substrátu do pokojové teploty. Rychlost klesání teploty musí být dost pomalé, aby eliminovat rozpraskání fólie v důsledku různých koeficientů teplotní roztažnosti fólie a substrátu.



Obr. 17: Teplotní profil vypalování past. [1]

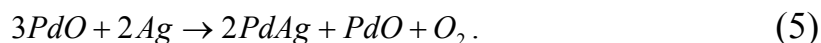
Zkusíme projednat chemické reakce protékající v odporové vrstvě Ag/Pd past, součástí kterých jsou kysličník stříbra Ag_2O , palladium Pd, skelná složka a organické pojivo. Během začátečního intervalu ($T < 330$ °C) probíhá vypařování organické složky a disociace Ag_2O podle reakci [6]:



S růstem teploty (zhruba od 330°C až 520 °C) probíhá proces oxidace Pd [6]:



Při dalším vzrůstání teploty (přibližně do 700 °C) probíhá vznik slitiny Pd-Ag podle reakce [6]:



Při teplotách převyšujících 700 °C se začíná štěpení kysličníku palladiu :



Takovým způsobem rezistor získané pomocí popsaných výše reakcí se skládá ze kompozice skla, Pd, PdO, a slitiny Pd-Ag. Procentový poměr těchto komponentů určují parametry rezistoru, konkrétně jeho odpor a TSO. Palladium a slitina palladia se stříbrem jsou vodivé látky s kladným TKO. Kysličník palladia je polovodič P typu a jeho TKO závisí na stupně legování. Zprava TKO PdO je záporný.

V našem případě můžeme předpokládat, že během vypalování dielektrické vrstvy dohází k celkové disociaci oxidu stříbra a přeměna celého stříbra a části palladia v slitinu PdO. To snižuje obsah oxidu palladia ve vrstvě. Dále při vypalování dochází k okysličování zbývajícího palladiu, což vyvolává zvětšení odporu vrstvy.

Mimo to jak je známo stříbro je silným katalyzátorem ovlivňujícím na proces obnovy palladiu ze PdO. Konkrétně existence stříbra snižuje teplotu obnovy do 600 °C. Pomocí toho faktu lze vysvětlit příčinu vzniku bublin ve vrstvách. Při podrobné analýze vyrobených

RC-RP prvku můžeme vidět, že defekty vrstev nevznikají okolí kontaktů nebo dolních elektrod. V těch místech vrstvy účinkem stříbra existuje mnohem méně složky PdO. Proto můžeme udělat rozhodnutí, že dielektrická pasta je neslučitelná s oxidem palladia, a sice PdO má špatnou snášivost vůči dielektrické pasty.

2.7 Měření.

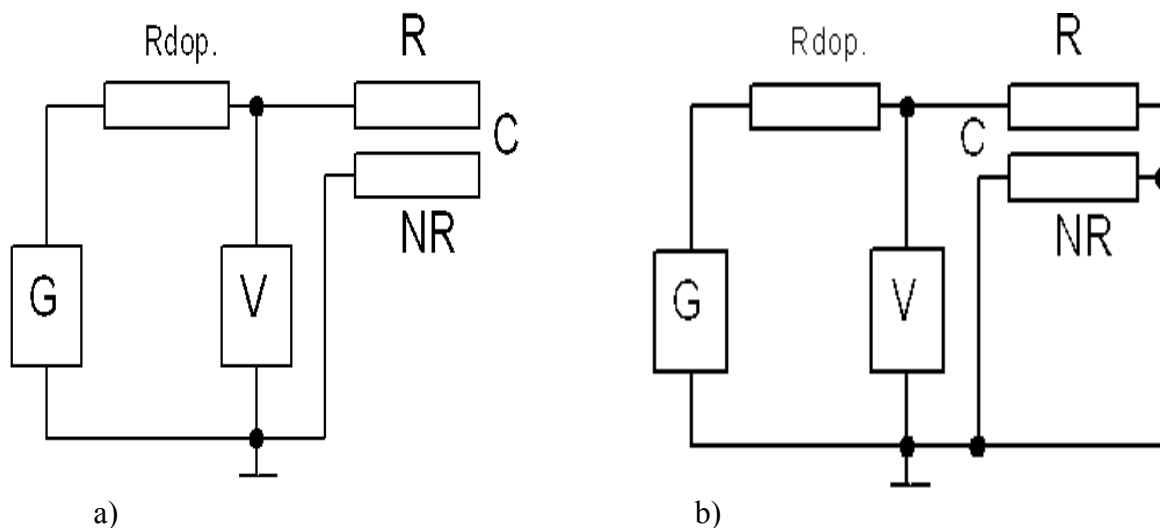
V tou části práce jsme budeme provádět čtyři nezávislých experimentů:

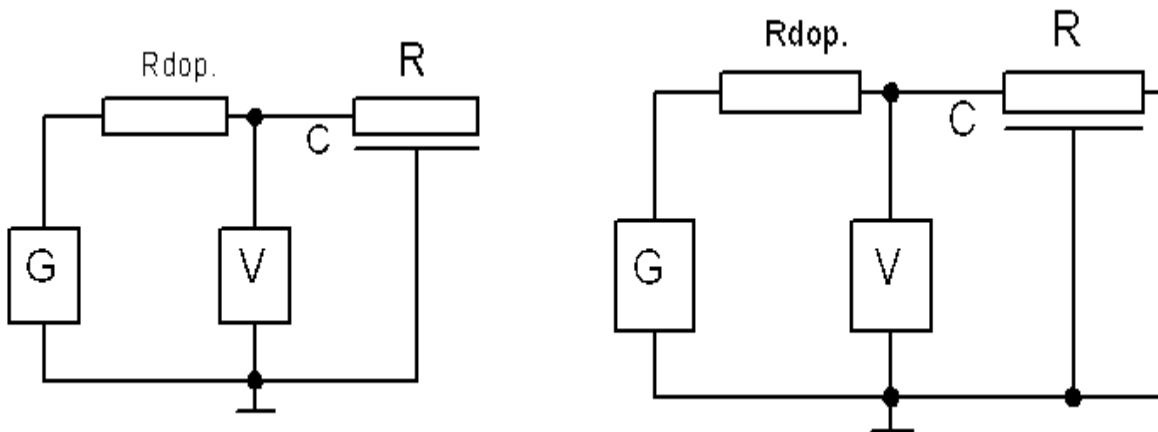
- Měření kmitočtových charakteristik RC-RP s různými strukturami vrstev pro zpřesnění matematických modelů.
- Výzkum závislosti kmitočtových charakteristik a $TK\tau$ od rozměru RC0.
- Vytvoření modelu závislosti stability časové konstanty RC-RP ($TK\tau$) na technologických režimech pro různé typy struktur (RC0, RCG0, R-C-NR).
- Vliv geometrie vrstev na TSO a TSK dielektrických a odporových vrstev patřičně.

2.7.1 Kmitočtové charakteristiky

Především musíme udělat měření kmitočtových charakteristik, aby pak porovnat tyhle odměřené charakteristiky porovnat s teoretickými výsledky a udělat rozhodnutí o tom zda li prvky je vhodné. Jestli odměřena charakteristika se příliš liší ode teoretické, tak není významu provádět měření dal.

Budeme měřit závislost vstupní impedance v režimu krátkého spojení a v režimu chodu naprázdno . S tím účelem budeme používat doplňkový rezistor, viz. obr. 17.





c)

d)

Obr. 18: Schéma zapojení pro měření vstupní impedance různých struktur: a) měření vstupní impedance v režimu chodu naprázdno struktury R-C-NR; b) měření vstupní impedance režimu spojení nakrátko struktury R-C-NR; c) měření vstupní impedance v režimu chodu naprázdno struktury R-C-0; d) měření vstupní impedance v režimu spojení nakrátko struktury R-C-0; tady G je generátor, V je voltmetr, Rdop je doplňkový rezistor.

Pomocí doplňkového rezistoru můžeme změřit vstupní odpor bez použití speciálních přístrojů. Princip se spočívá v tom, že Rdop a vstupní impedance tvoří kmitočtové závislý dělič kmitočtu. Přitom doplňkový rezistor žádným způsobem neovlivňuje na posun fáze. Dále ukážeme jak od měření napětí lze přejít k měření impedance. Spad napětí na vstupním odporu zjistíme pomocí vztahu:

$$U_{vst} = \frac{U_{gen} \cdot Z_{vst}}{Z_{vst} + R_{dop}}; \quad Z_{vst} = \frac{U_{vst} \cdot R_{dop}}{U_{gen} - U_{vst}}; \quad (7)$$

V případě použití spektrálního analyzátoru výstupním parametrem je koeficient

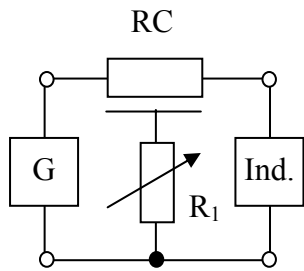
$$K(f) = 20 \cdot \log \frac{U_{vst}}{U_{gen}}; \quad (8)$$

Ze vztahů (6) a (7) dostaneme konečnou rovnici: $Z_{vst} = \frac{R_{dop}}{10^{(-K/20)} - 1}; \quad (9)$

Pomocí konečného vztahu vždy můžeme přejít od decibelů k Ohmům .

2.7.2 Metodika nastavení na kmitočet rejekce.

Volíme hodnotu proměnného rezistoru R1 zhruba několik desítek od odporu struktury a nastavujeme generátor na hodnotu, na které je minimum výstupního napětí. Potom zase korigujeme (velmi plynule) hodnotu odporu, aby dosáhnout ještě více potlačení signálu na kmitočtu rejekce. Takovým způsobem pokračujeme pokud nedosáhneme potlačení na kmitočtu rejekce na 60 db nebo pokud výstupní signál bude odlišný od rušení. Největší doba bude ztracena na hledání kapacity struktury při normálních podmínkách. Najít pak teplotní posun bude mnohem lehčeji.



Obr. 19: Schémata měření kapacity struktury RC0.

G je generátor (kmitočtové pásmo zaleží na nominálních hodnotách prvků);

Ind. je indikátor hladiny signálu (voltmetr nebo ampérmetr);

RC je zkoušená struktura typu RC0;

R1 je doplňkový proměnný rezistor s rozsahem odporu, ve kterém má být hodnota $0,178R$. Teoreticky kmitočet rejekce $\omega RC = 11,2$.

A tak když známe hodnoty R a C můžeme najít kmitočet rejekce a naopak : kdy známe hodnotu R a můžeme určit kmitočet rejekce tedy můžeme vypočítat hodnotu kapacity C.

Závěr.

V tou práci jsme provedli experiment podle plánovaného algoritmu. Během experimentu jsme zjistili jak se působí technologické režimy na statické parametry struktur. V práci není výsledků naměřených hodnot odporů z toho důvodu, že nás především zajímá charakter změny statických charakteristik během výroby, který je znázorněn na grafů. V konečném důsledku je důležité vědět jakou hodnotu my přesně máme, ale ne jaká má hodnota byt. Jinak experiment by byl velmi složitý.

Z toho důvodu, že jsme neměli dost informace o podobného druhu experimentů, během naše práce bylo uděláno mnoho technologických chyb. Některé z nich jsou nepříliš vhodný výbor ovlivňujících faktorů, výbor neslučitelných past a malá tloušťka dielektrické vrstvy (to bylo příčinou zkratu mezi vrstvami) . Poslední dvě uvedené chyby jsme zjistili jen pomocí výrobce past, jmenovitě výrobce doporučuje nanášet tři vrstvy dielektrické pasty zatímco v dokumentace napsáno jen dva. Také aby pochopit příčinu vzniku bublin ve vrstvách byl prozkoumán velký obsah chemické literatury a poté byl udělán předpoklad o neslučenosti daných past. Zůstala otázka o mechanismu prudkého snížení vodivosti dolní odporové vrstvy : nebo je to výsledek okysličování palladia nebo důsledek vzájemného proniknutí odporové a dielektrické pasty.

Celkem první zkušenost výroby tlustovrstvových RC-RP prvku ukázala, že není účelné vícevrstvé prvky s různými strukturami dělat na jedné podložce kvůli toho, že žádoucí režimy výroby jsou různé pro každou strukturu. Dokonce i měřítko prvků dává rozptyl odporu o 5-6 % pro prvky s jednou strukturou a stejnými dimenzovanými hodnotami kapacity a odporu.

Bohužel mně nestačilo času změřit kapacity prvku. Kvůli toho jsem nemohl udělat modely vyrobených prvků v programu Pspice . Byly změřeny kmitočtové charakteristiky a vstupní impedance prvků. Ale v mé práci nejsou jich, protože my máme zájem jen porovnání praktických a teoretických výsledků. Můžu jen říct, že snímání charakteristik všechny prvky byly zapojeni jako dolní propust, proto prvky které nefungovali jako dolní propust se automaticky vylučovali.

Chci projevit vděčnost za pomoc v mé práci panu doc. Szendiuchu, panu Ing. Prašku a profesoru Ušakovu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Szendiuch,I.: Základy technologie elektronických obvodu a systémů, VUTIUM Brno, 2007.
- [2] Klimov L.N.: Issledovanie elementov gibridných integralnych mikroschem, KGTU im. Tupolebá Kazan, 1999.
- [3] ESL Electro-Science, Product Catalogue. Dostupné z WWW: <http://www.electroscience.com> .
- [4] Adler U.P., Markov E.V.: Planirovanie experimenta pri pojiske optimalnych uslovij, NAUKA Moskva, 1976.
- [5] Smirnov V.I: Fyziko-chimiceskie osnovy elektronnych sredstv, UIGTU Uljanovsk, 2005.
- [6] Achmetov A.S.: Obshaja i neorganiceskaja chimija, Vysshaja Skola Moskva, 2001.