

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ

Fakulta elektrotechnická

katedra elektrotechnologie

Vrstvové technologie v elektronice

The Layers Technology in Electronics

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D.

Pavel Kourek

Praha 2018

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kourek** Jméno: **Pavel** Osobní číslo: **420278**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vrstvové technologie v elektronice

Název bakalářské práce anglicky:

The Layers Technology in Electronics

Pokyny pro vypracování:

1. Stručně popište vrstevné technologie, jejich dělení a specifika.
2. Porovnejte tenkovrstvé a tlustovrstvé technologie z hlediska jejich možností a vlastností výsledných vrstev
3. Uveďte metody pro vytváření tenkých a tlustých vrstev. Podrobněji se zaměřte na technologii síťotisku
4. Připravte vzorky tlustovrstvých struktur nanesených síťotiskem a změřte jejich parametry.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Mach, P., Skočil, V., Urbánek, J.: Montáž v elektronice, ČVUT Praha 2001
- [2] Gupta, T.: Handbook of thick- and thin-film hybrid microelectronics. New Jersey, 2003
- [3] Haicl, M.: Vlastnosti polymerních tlustovrstvých odporů, bakalářská práce, FEL ČVUT Praha 2014

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D., katedra elektrotechnologie FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **19.02.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Pavel Kourek

Poděkování

Tímto děkuji vedoucí své bakalářské práce Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové, Ph.D. za odborné vedení, ochotu, cenné rady a připomínky. Dále za trpělivost a morální podporu při vytváření praktické části této práce.

Anotace

Tato práce se zabývá technologií tenkých a především tlustých vrstev. Popisuje materiály a postupy pro realizaci obou těchto vrstev. Rozebírá a porovnává základní vlastnosti těchto struktur. Druhá část této práce je věnována tvorbě tlustovrstvých vzorků z vodivých a odporových past na substráty z korundové keramiky za použití ručního sítotisku. U vytvořených vzorků je dále prozkoumán a zhodnocen vliv několika parametrů a to především šířky vrstvy na jejich odpor.

Klíčová slova

tenké vrstvy, tlusté vrstvy, vrstevové technologie, tlustovrstvé pasty, sítotisk, odpor na čtverec

Annotation

This thesis deals with the technology of thin and especially thick films. It describes the materials and procedures for implementing both of these films. It analyzes and compares the basic properties of these structures. The second part of this thesis is focused on the fabrication of thick-film samples from conductive and resistive inks on substrates of corundum ceramics using manual screen printing technology. The effects of several parameters of the fabricated samples are further investigated and evaluated, especially the effect of the width of the film on the resistance of the samples.

Key words

thin film, thick film, film technology, thick-film inks, screen printing, sheet resistance

Obsah

1	Úvod	8
2	Popis vrstevových technologií	9
2.1	Tenké vrstvy	9
2.1.1	Obecný průběh tvorby	9
2.1.2	Způsoby výroby	10
2.2	Tlusté vrstvy	13
2.2.1	Pasty pro tlusté vrstvy	14
2.2.2	Substrát	18
2.2.3	Technologie nanášení tlustých vrstev	19
3	Vlastnosti vrstev	26
3.1	Adheze	26
3.2	Odpor na čtverec	26
3.3	Vlastnosti tlustých vrstev	27
3.3.1	Elektrické vlastnosti	27
3.3.2	Tepelné vlastnosti	27
3.3.3	Mechanické vlastnosti	28
3.4	Porovnání možností a vlastností výsledných tenkých a tlustých vrstev	28
3.4.1	Tenké vrstvy	28
3.4.2	Tlusté vrstvy	29
4	Výroba vzorků tlustovrstvých struktur a jejich vyhodnocení	30
4.1	Použité pasty	30
4.2	Tvorba tlustých vrstev	30
4.2.1	Tisk	30
4.2.2	Vytvrzování	31
4.2.3	Motiv a jeho parametry	32
4.3	Vyhodnocení vzorků	33
4.3.1	Měření odporu	33
4.3.2	Prozkoumání vzorků po tisku	33
4.3.3	Vyhodnocení naměřených hodnot	38
5	Závěr	41
	Seznam použitých zdrojů	43
	Seznam obrázků	44
	Seznam grafů	45

Seznam tabulek	46
Seznam příloh	47
Přílohy	48

1 Úvod

Nacházíme se v době rychlého technologického rozvoje a silného ekonomického růstu, který má příznivý vliv na zvyšující se investice do vědy a výzkumu. Nejen že se vyvíjejí nové technologie, ale také je věnována pozornost inovaci stávajících technologií. Roste požadavek na co nejlevnější a nejsnadnější výrobu elektronických součástek, zároveň se požaduje maximální přesnost a spolehlivost.

Cílem této práce je popsat a prozkoumat vrstevné technologie. Teoretická část je zaměřena na stručný popis vrstevných technologií, jejich dělení a specifika. Dále je popsáno dělení těchto vrstev na tenkovrstvé a tlustovrstvé a to podle jejich výsledných vlastností a možností. Praktická část se skládá z výroby tlustovrstvých vzorků a následného zkoumání jejich vlastností.

Teoretická část se zabývá seznámením čtenáře s širokým množstvím technologií k vytváření tenkých a tlustých vrstev, jejich vzájemným porovnáním a zhodnocením jejich výhod a nevýhod. Dále se teoretická část zaměřuje spíše na tlustovrstvé technologie a to především na technologii sítotisku. Je zde vysvětleno, co to sítotisk je, jaký typ zařízení se při něm používá, jaké panují podmínky při vzniku těchto vrstev a jakých vlastností tyto vrstvy následně dosahují.

Náplní praktické části bylo vytvoření vodivých a odporových tlustovrstvých vzorků na podložky z korundové keramiky sítotiskem za pomoci přístroje Uniprintu-G. Následovalo prozkoumání těchto vzorků za pomoci měření a vizuálního prozkoumání mikroskopem. Zkoumané hodnoty byly teoretické a skutečné rozměry nanesených vrstev a rezistivity.

2 Popis vrstevných technologií

2.1 Tenké vrstvy

O tenké vrstvě můžeme hovořit, pokud se jedná o materiál o tloušťce od několika desítek nanometrů až po několik mikrometrů. Tento materiál se tvoří na základním materiálu (substrátu). Princip vzniku tenké vrstvy spočívá v usazování jednotlivých atomů či molekul a její vlastnosti jsou ovlivněny hlavně její tloušťkou.

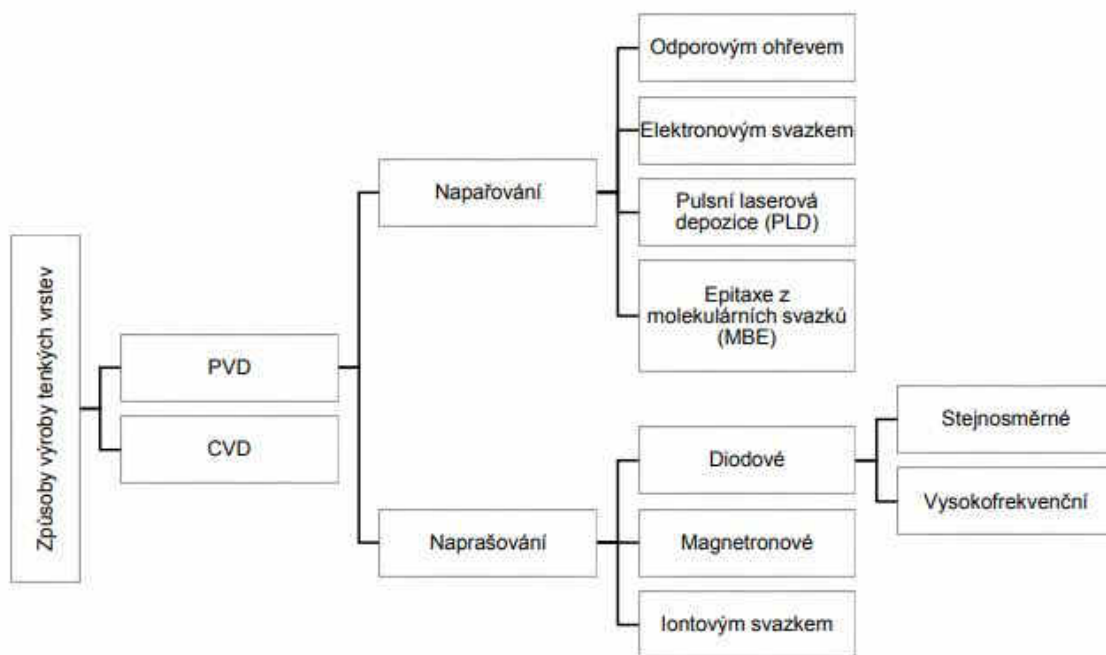
Tvorba každé tenké vrstvy začíná náhodným vytvořením zárodků vrstvy, které je následováno tvořením dalších zárodků či růstem zárodků vytvořených. Tento děj můžeme ovlivnit pomocí podmínek, za kterých je vrstva tvořena.

2.1.1 Obecný průběh tvorby

1. Vytvoření vhodných částic
2. Přenos těchto částic na substrát
3. Usazení na substrátu
 - a. Částice naráží do substrátu, ztrácí normální složku rychlosti a usazuje se na povrchu substrátu.
 - b. Částice a substrát nejsou v tepelné rovnováze a proto se částice může pohybovat po povrchu substrátu, setkávat se s dalšími částicemi a tvořit větší shluky (clusters).
 - c. Tyto clusters jsou termodynamicky nestabilní a mohou po čase desorbovat, pokud jsou tak nastaveny podmínky depozice. Pokud jsou podmínky depozice nastaveny tak, že clusters dosáhnou určité kritické velikosti (stanou se termodynamicky stabilní) dříve než desorbují, pak je překonána nukleační bariéra a začíná fáze nukleace.
 - d. Postupně se zvyšuje počet i velikost jednotlivých nukleí dokud hustota nukleace nedosáhne meze nasycení. Hustota nukleace a průměrná velikost nuklea je daná několika parametry (energie dopadajících částic, teplota, složení substrátu atd.). Nuklea mohou růst jak rovnoběžně s povrchem substrátu, tak kolmo k němu. Vyrostlá nuklea se nazývají „ostrovy“.
 - e. Další fází je aglomerace, kdy jednotlivé ostrovy srůstají dohromady. Jak ostrovy srůstají, nechávají mezi sebou mezery a materiál se mění z „ostrovního typu“ na porézní. Vyplněním mezer je dosaženo souvislého povrchu. [7]

2.1.2 Způsoby výroby

Chemická depozice (CVD) a fyzikální depozice (PVD) jsou dva nejčastější způsoby výroby tenkých vrstev. Fyzikální depozici dělíme na napařování a napařování. Podrobnější rozdělení znázorňuje Obr.č.1, který zahrnuje některé ze způsobů výroby tenkých vrstev.



Obrázek 1: Schéma možností výroby tenkých vrstev [7]

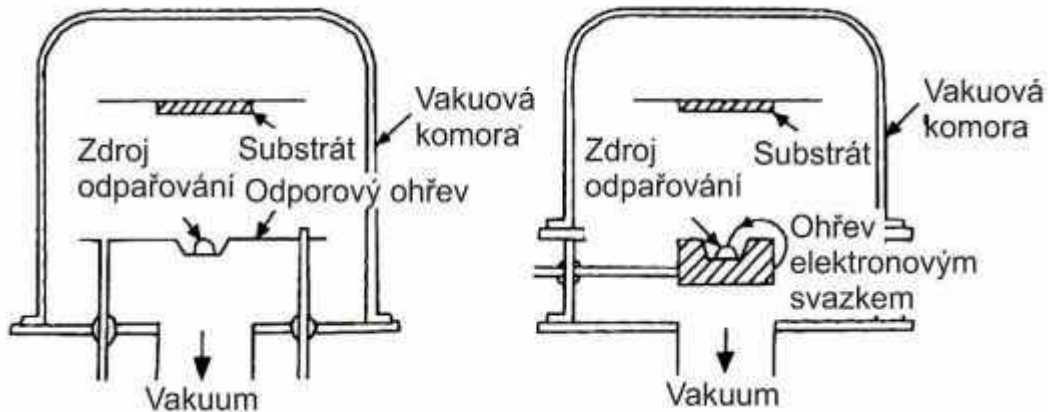
2.1.2.1 CVD

Chemická depozice je proces, probíhající při vysoké teplotě (cca 1000°C). Při takovémto procesu je plyn přiveden k povrchu substrátu, zde se díky vysoké teplotě rozkládá a reaguje s částicemi povrchu. Výhodou této metody je příznivá cena vytvořených vrstev, které jsou velmi odolné. Hlavní nevýhoda této metody je vysoká teplota procesu, které je energeticky náročná a znemožňuje použití některých druhů substrátů (substráty, které mají nižší bod tání než je teplota depozice daného materiálu).

2.1.2.2 Napařování

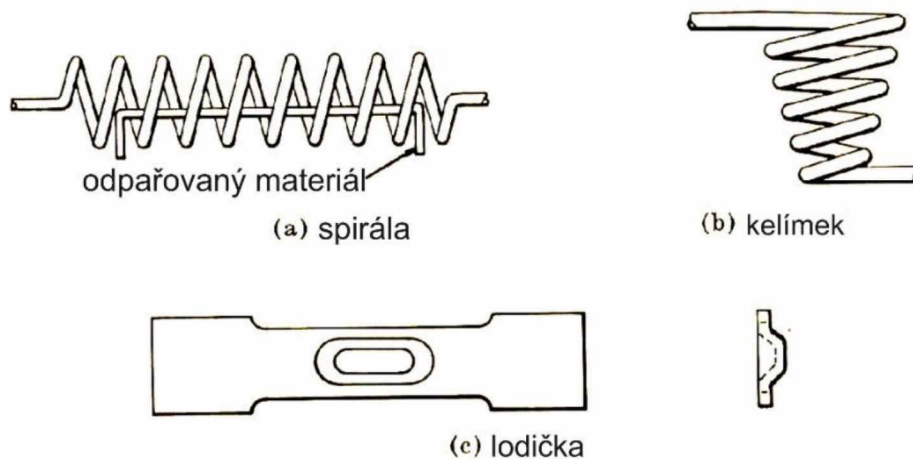
Princip napařování je ohřátí materiálu tak, aby přešel do formy par a tím se z něj uvolnily částice. Následně uvolněný materiál ve formě par z kondenzuje na podložce. Tento proces napařování probíhá po celou dobu ve vakuu při tlaku 10^{-4} - 10^{-6} Pa z důvodu zvětšení střední volné dráhy molekul nanášeného materiálu, která musí být mnohonásobně větší, než je

vzdálenost odpařovaného materiálu a substrátu. Přibližný vztah mezi tlakem a střední volnou dráhou vypadá takto: $l = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{p}$ kde l je střední volná dráha (m) a p je tlak (Pa). Na Obr. 2 je náčrt zařízení, ve kterém napařování probíhá. Z tohoto náčrtu je dobře patrné, že základ každé soustavy je stejný (vakuová komora, odpařovaný materiál a substrát). Technologie se liší tedy pouze v tom, jakým způsobem je materiál odpařován. [9]



Obrázek 2: Sestavy pro napařování [8]

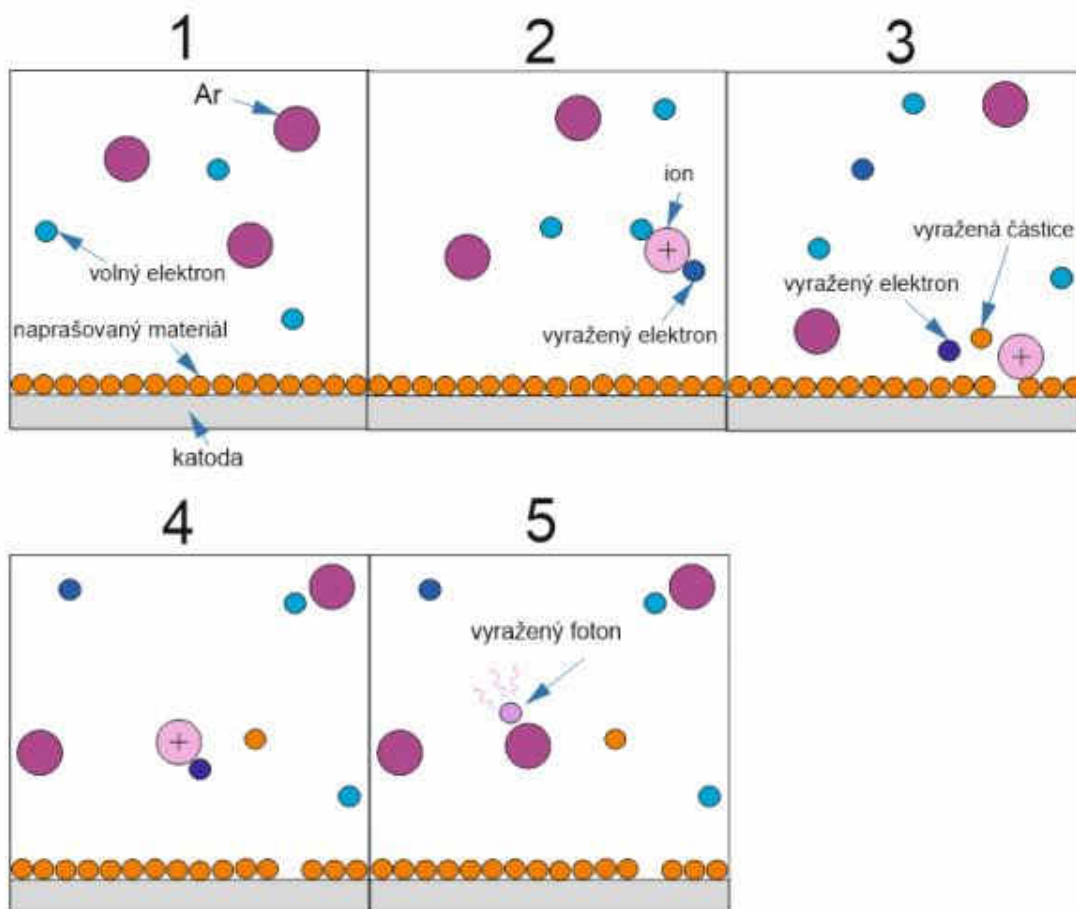
Nejčastěji používaným způsobem zahřátí nanášeného materiálu je odporový ohřev. Princip tohoto procesu spočívá v odpařování materiálu, jež je umístěn ve zdroji. Odpaření materiálu je způsobeno průchodem elektrického proudu zdrojem. Zdroj se průchodem elektrického proudu rozžhává a část získané teploty předá materiálu, který se následně odpaří. Zdroje jsou vyrobeny z elektricky vodivých kovů s vysokou teplotou tavení. Nejčastěji to jsou Wolfram, Molybden, Tantal. Zdroj musí mít vyšší bod tání než je bod tání konkrétního materiálu, nesmí být chemicky reaktivní s tímto materiálem. Používané materiály jsou žáruvzdorné kovy jako (wolfram, molybden, tantal), z nich je. Teplota tání těchto materiálů se pohybuje okolo 3000°C. [9]



Obrázek 3: Tvary odpařovacího zdroje [9]

2.1.2.3 Naprašování

Naprašování je stejně jako napařování zahájeno tím, že je komora vyčerpána na určitou úroveň vakua a poté je do komory napuštěn plyn, který se neúčastní chemických reakcí (nejčastěji argon). Částicím tohoto plynu je pak nutné dodat dostatečně velkou energii ionizací (vznikne plynná plazma). Základem operací naprašování je vznik kladně nabitého ionu. Ten vznikne ve chvíli, kdy volný elektron vyrazí z neutrálního atomu interního plynu elektron, tak se částice bez náboje stane iontem. Kladně nabitý ion je následně přitahován ke katodě, z té vyrazí částici naprašovaného materiálu a další elektron. Čerstvě vyražený elektron zvyšuje ionizaci plynu a zároveň se setkávají s již vytvořenými iony plynu a opět vzniká neutrální částice za současného vzniku fotonu – to je důvodem proč plazma vyzařuje světlo. Pokud je ionizace plynu dostatečně velká, zažehne se doutnavý výboj, který zajišťuje trvalou ionizaci. Vyražená částice se poté usazuje na substrátu. [8] [9]



Obrázek 4: Vyrazení částice z terče [7]

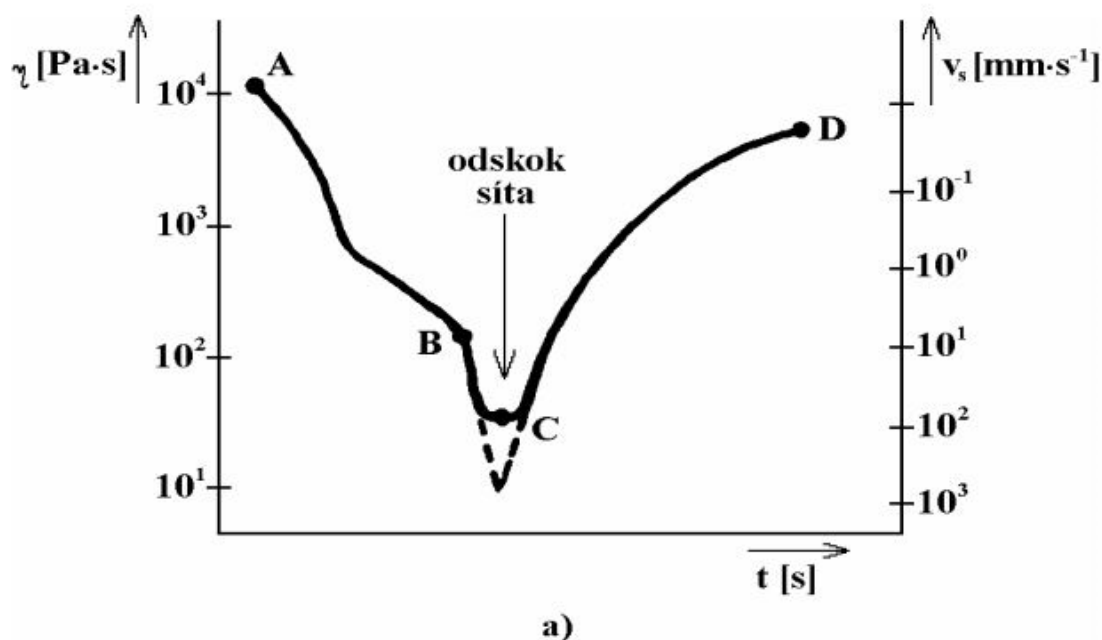
2.2 Tlusté vrstvy

Tlustá vrstva je pojem, jímž označujeme vrstvu materiálu o malé tloušťce, vytvořenou nanesením pasty nevakuovou depoziční metodou (nejčastěji sítotiskem) na podložku a následným výpalem, případně vytvrzením. Tloušťka této vrstvy je značně větší, než je střední volná dráha elektronu. Střední volná dráha je dráha, kterou urazí částice mezi dvěma srážkami. Ve většině případů se tloušťka tlustých vrstev pohybuje v desítkách μm . [2] [3]

Integrované obvody tvořené technologií tlustých vrstev dnes nahrazují obvody sestavené z klasických součástek a to hlavně kvůli svým značným technickým možnostem. Jde o velkou pružnost při realizaci obvodu, spolehlivost a také hospodárnost tohoto řešení.

2.2.1 Pasty pro tlusté vrstvy

Materiály pro vytvoření vodivých cest na substrátu jsou ve formě past. Ty obsahují několik složek, které jsou charakterizovány různými chemickými a fyzikálními vlastnostmi. Důležitá vlastnost každé pasty je její viskozita. S viskozitou past jsou spojeny jejich tixotropní vlastnosti. Tixotropní vlastnost znamená, že viskozita pasty se mění v závislosti na mechanickém tlaku. Tato závislost je zobrazena na obr. 5. [4]



Obrázek 5: Závislost viskozity na tlaku [4]

Z obrázku je patrné, že nejnižší viskozity je dosaženo v bodě C, což je okamžik, kdy dochází k přenosu pasty ze síta na substrát v důsledku působení tlaku těrky. Z obrázku dále vidíme, že viskozita pasty je nepřímo úměrná tlaku stěrky a díky tomu dochází k přesunu pasty v okamžiku, kdy je pasta protlačována volnými oky síta. Poté dochází k odskoku síta a vytvoření obrazce na substrátu. [4]

Pasty pro tlustovrstvou technologii se skládají ze tří složek:

- **Funkční složka:** určuje charakter pasty. Vodivé pasty jsou složeny z částic drahých kovů, izolační pasty ze skelných frit a dielektrických částic. Funkční složka u odporových past může tvořit směs drahých kovů (př. PdAg) nebo oxidy (př. Ru_2O). Velikost částic je řádově $1 \mu\text{m}$ a méně. Tato velikost musí být menší, než je velikost ok použitého síta.

- **Taviová složka:** obsahuje skelnou fritu z nízko tavného skla, jehož teplota tavení je od 600°C. Tato vlastnost zaručuje vytvoření vazby mezi funkční složkou a substrátem. Některé pasty obsahují oxidovou vazbu, která je vytvořena přidáním kovu (např. 4% Cu do Au). Dnes už se velmi často používají také pasty s obsahem pryskyřic, teplota vytvrzení se tím dostává na nižší teploty. Při výpalu pasty potom musí dojít k měknutí (nesmí dojít k roztavení), aby vznikla nosná matrice pro funkční složku.
- **Pojivá složka:** je tvořena z organických látek (př. Terpeneol) a pastě zajišťuje její viskozitu a tím i její tiskové vlastnosti. Tato složka nemá vliv na konečné vlastnosti vrstevného obvodu, protože se v průběhu výpalu odpaří. [1]

Neustálý rozvoj složitosti motivů a používaných procesů dochází k vzniku nových past, které nahrazují pasty dříve používané. Tyto pasty lze dělit dle způsobu jejich tvrzení anebo dle vlastností výsledné vrstvy. (2)

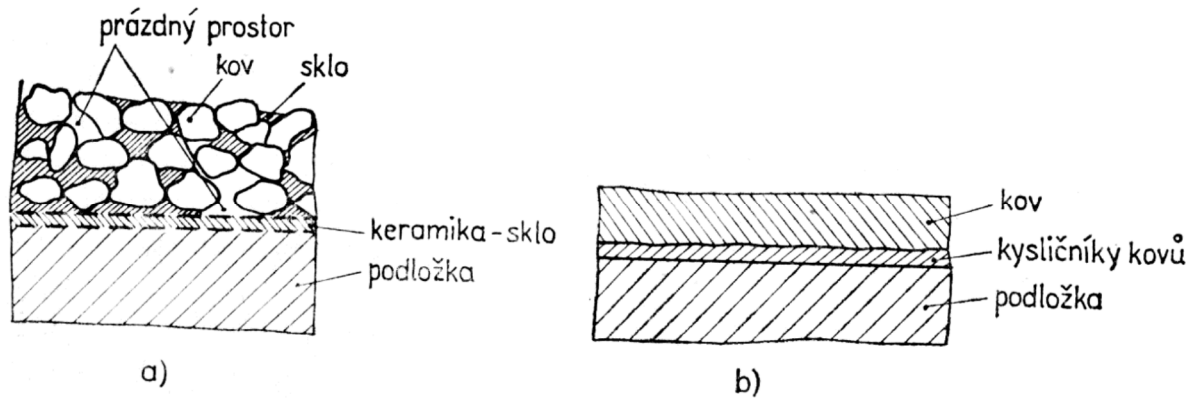
Pasty lze dělit dle způsobu výpalu případně vytvrzení. První skupinou jsou pasty s širokým spektrem sekundárních složek, zejména na bázi pryskyřice případně s oxidovou vazbou. Tyto pasty jsou tvrzené teplem. Druhou skupinu tvoří UV tvrditelné pryskyřice. Jde především o kyseliny akrylové a metakrylové s různými polyglykoly, polyestery, epoxidy a uretany. [1]

2.2.1.1 Vodivé pasty

Vodivé pasty se v tlustovrstvých obvodech používají pro vytvoření vzájemných propojení částí obvodu, na kontakty rezistorů, elektrody kondenzátorů a pro vodivé plochy k připojení diskrétních součástek a vývodních vodičů. Vrstva se stává vodivou až po jejím vypálení. Od vodivých vrstev je požadována především dobrá vodivost, adheze k podložce, chemická a mechanická stabilita, pájitelnost a nízká cena. U typického tlustovrstvého obvodu tvoří vodivé pasty největší podíl materiálu otisknutého na substrát. Tyto pasty musí mít velký rozsah vypalovacích teplot, aby mohli být použity spolu s ostatními pastami, a přitom si musí stále udržet své dobré elektrické vlastnosti a pájitelnost. [2]

Tlusté vodivé vrstvy se vytváří z pasty složené z funkční složky ve formě miniaturních částic drahých kovů: stříbro, zlato, paládium nebo jejich sloučenin. U vrstev na principu skelné vazby výpalem dochází k vyhoření organické složky a slinování kovových částic se sklem.

Průchod proudu se poté uskutečňuje přes kontaktní body mezi miniaturními částicemi kovu, viz obr. 6 a), výsledná vodivost takové vrstvy je díky tomu řádově menší než vodivost samotného kovu. Druhou možností jsou vrstvy chemicky spojené s podložkou pomocí kysličníků mědi a jiných. Tento druh pasty mívá vysokou teplotu výpalu za to vytvořená vrstva má velmi stabilní spojení, viz obr. 6 b). [2]



Obrázek 6: Struktura vodivé vrstvy a)skelná vazba b)chemická vazba [2]

2.2.1.2 Odporové pasty

Pomocí odporových past vytváříme tlustovrstvé odpory. Odporová pasta obsahuje práškový vodivý pigment a skelnou fritu, změnou koncentrace vodivých částic v pastě můžeme poměrně snadno a přesně nastavit požadovanou hodnotu odporu. [1]

Požadavkem na výsledné tlustovrstvé odpory je především stabilita, dobré elektrické vlastnosti, malé rozměry a hospodárnost. Odporové pasty je možné vyrobit ve značném rozsahu odporů na čtverec řádově mezi hodnotami 10^1 až $10^9 \Omega$. [2][3]

Výsledné vlastnosti odporových vrstev závisí na dodržení technologického postupu, především dodržení teploty a doby výpalu. Teplota výpalu odporových vrstev se pohybuje kolem 850°C a celková doba výpalu se nejčastěji pohybuje v rozmezí 30 až 60 minut.

Mezi základní požadavky na odporové pasty patří:

- široký rozsah rezistivity
- stabilní hodnoty i při vysokých teplotách
- nízká hodnota teplotního součinitele odporu
- nízká hodnota napěťového koeficientu odporu

- nízký šum
- kompatibilita s vodivými pastami

2.2.1.3 Dielektrické pasty

Dielektrické pasty jsou určeny zejména k vytváření tlustovrstvých kondenzátorů. Nejdůležitějšími vlastnostmi jsou relativní permitivita, ztrátový činitel, izolační odpor, teplotní a kmitočtová charakteristika a stabilita. Běžná pasta je tvořena dielektrickým práškem, dnes většinou oxidem barnato titaničitým (BaTiO_3) v kombinaci se sklovinou nebo polymerem. [2]

Po aplikaci pasty na substrát je pasta zahřívána, aby došlo k vypálení organického pojiva. Zahřívání dále způsobí změkčení a roztavení skla a dochází ke spojení skelných frit s dielektrickým práškem. Takto vytvořená skleněná vrstva se chemicky spojí se substrátem [1]. Změknutí skla může způsobit deformaci kryté vrstvy, a proto se do pasty zavádí jemné plniva (př. Al_2O_3 , ZrO_2). To má za následek vzrůst viskozity a omezení plastického toku pasty při výpalu.

Použití dielektrických past:

- ochranná vrstva vytvořeného obvodu
- izolace vodivých vrstev
- kondenzátory
- pouzdrění

Ochranná dielektrická vrstva se vyznačuje vysokou hodnotou měrného odporu, nízkou hodnotou permitivity a malým ztrátovým činitelem. Aby nedocházelo k ovlivnění kryté vrstvy, hodnota výpalu musí být malá (okolo 500°C). Proto je tato vrstva aplikována jako poslední.

2.2.1.4 Izolační a ochranné pasty

Izolační a ochranné pasty neobsahují funkční složku. Izolační vrstvy se používají pro izolované křížení vodivých drah vícevrstevných struktur. Ochranné vrstvy chrání součástky před působením vnějších vlivů.

2.2.1.5 Speciální pasty

Existuje mnoho dalších druhů past, jejichž použití není tak masové, jako u předcházejících případů, avšak své použití si naleznou ve speciálních aplikacích.

Příklady dalších druhů past a jejich použití:

- Termorezistivní (PTC a NTC rezistory, nízkoteplotní termistory)
- Citlivé na vlhkost (polymerní sloučeniny, cermetové pasty)
- Chemicky citlivé (pevné elektrolyty, kovové oxidy SnO₂)
- Biocitlivé (polymerní lože s receptorovými částicemi)
- Magnetorezistivní na bázi Ni
- Feromagnetické
- Pyroelektrické (PVDF)
- Piezoelektrické (cermetové piezoelektrické pasty, PFT)
- Mnoho dalších např. vysokoteplotní supravodiče atd. [8]

2.2.2 Substrát

Substrát nazýváme podložku, na které je vytvořen elektronický obvod. Pro tlustovrstvé obvody se nejčastěji používají keramické substráty. Keramické substráty s porovnáním se substráty z organických materiálů, mají lepší mechanické, chemické, elektrické a tepelné vlastnosti. Nevýhodou je náročnější opracování a cena. Cena se ale začne vyrovnávat s rostoucí integrací elektronického obvodu.

Podložka musí být z kvalitního izolantu s dostatečnou elektrickou pevností, zajišťující vzájemnou izolaci vrstev. Teplotní roztažnost musí být shodná, nebo velmi podobná teplotní roztažnosti tlusté vrstvy aby nedošlo k popraskání, nebo oddělení vrstvy od podložky. Musí být také dostatečně hladká a rovná a nesmí měnit vlastnosti a rozměry během, či po výpalu. [1]

Nejčastěji používaným materiálem u podložek se používá korundová keramika s obsahem 85 až 99,9% Al₂O₃. Takováto podložka má vysokou elektrickou pevnost, je velmi tvrdá, ovšem také relativně křehká. Její teplotní roztažnost se dá pomocí příměsí vhodně upravit koeficientu teplotní roztažnosti veškerých používaných vodivých, odporových a dielektrických vrstev. Je také chemicky stálá a odolná proti klimatickým podmínkám. [2]

2.2.3 Technologie nanášení tlustých vrstev

Způsoby nanášení pasty a tedy vytváření tlusté vrstvy stále prochází stejně jako složení past neustálým vývojem. Důraz na kvalitu přenosu výsledného obrazce a také finanční náklady na výrobu tlustých vrstev nechaly vzniknout mnoha technologiím a některé z nich budou popsány v následující kapitole.

Od vzniku původních technik tisku se sice množství možností značně rozrostlo, avšak stále se ve značné míře používá základní technologie, sítotisku, který je díky své jednoduchosti a cenové nenáročnosti stále vhodnou volbou pro velkou část aplikací.

Následující hojně používanou metodou a logickým pokračovatelem sítotisku je tisk šablonový, kde úlohu síta přebrala fólie z různých materiálů. Tato technologie převyšuje sítotisk zejména větší přizpůsobitelností a snadnější obměnou různých motivů folie. Mezi další technologie patří například dispensing a jetting, které jsou sice cenově náročnější, ale dále rozšiřují možnosti využití tlustých vrstev v různých výrobních procesech. [1]

2.2.3.1 Sítotisk

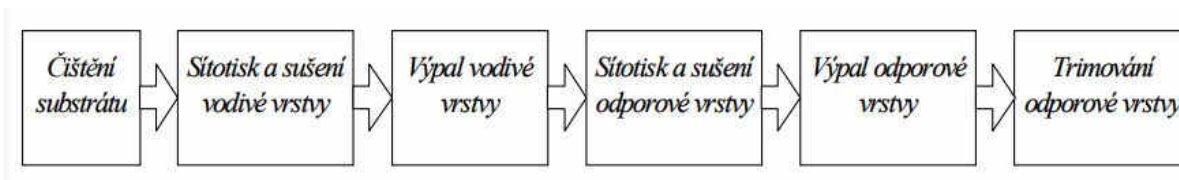
Sítotisk, jako jedna z prvních technologií nanášení tlustých vrstev, je stále hojně rozšířeným způsobem výroby vyhovujícím z hlediska výkonosti a hospodárnosti. Technologie původně užívaná k nanášení leptuvzdorných rezistů se dnes používá pro mnohá další media, jako jsou pájecí pasty, lepidla, apod. [1]

Principem této technologie je protlačování pasty volnými otvory obrazce vytvořeného na sítotiskové šabloně umístěné ve vzdálenosti několika desetin milimetru od podložky. Pasta je protlačována sítem pomocí těrky. Po nanesení pasty na sítotiskovou šablonu dojde k zaplnění ok síťky a tlakem těrky dojde k jejímu protlačení na podložku. Jakmile těrka mine tiskové otvory, síťka se od podložky vlivem pružných sil oddálí a vrátí se do původní polohy. Viskozita, povrchové napětí pasty, smáčivost podložky a síta, tvar, sklon a poddajnost těrky určuje množství pasty nanesené na podložku.

Základní části systému pro sítotisk jsou sítotisková šablona, těrka s pohyblivým mechanismem a vlastní potiskovací stroj s držákem podložky, který umožňuje vzájemné nastavení polohy podložky vzhledem k šabloně ve všech třech osách. [2]

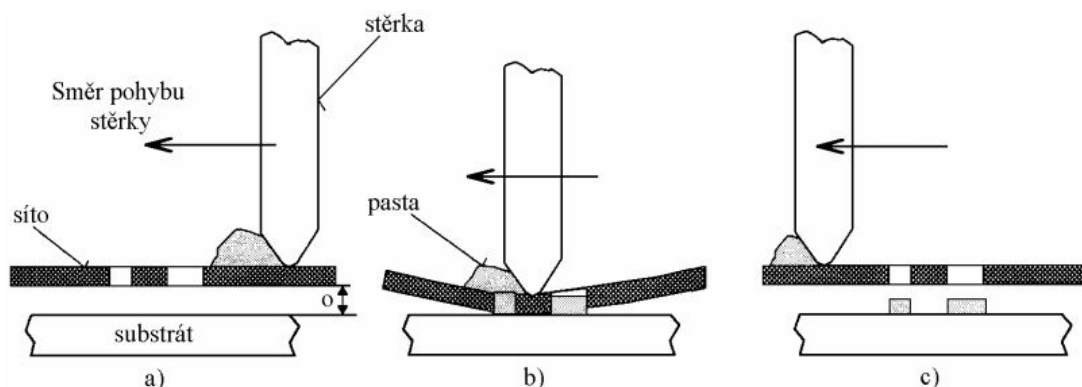
2.2.3.1.1 Technologický postup

Typický sled operací v procesu vytváření tlustovrstvé struktury je znázorněn na obr. 7. Operace sítotisku a následného zasušení se může v případě nanášení různých typů odporových past, nebo také při vytváření vícevrstevných struktur několikrát opakovat.



Obrázek 7: Základní sled operací při realizaci tlustovrstvé struktury [4]

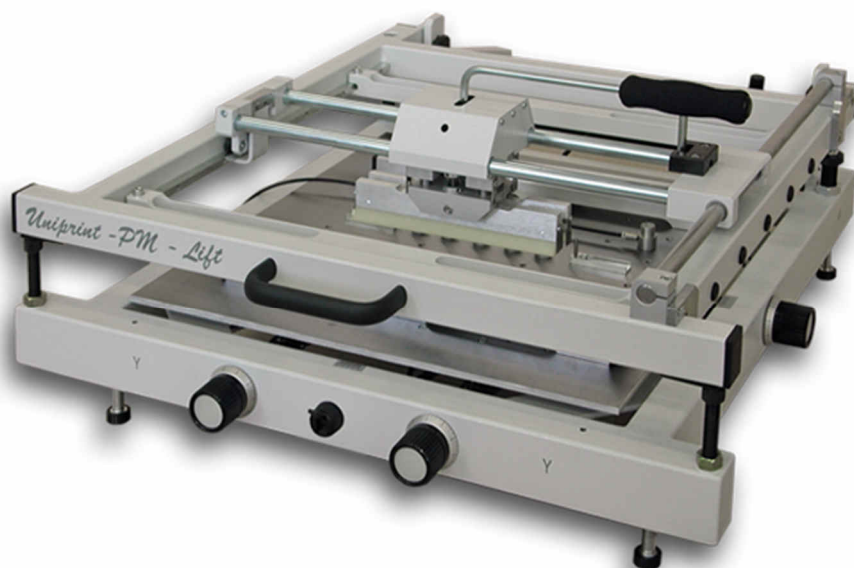
2.2.3.1.2 Zařízení pro sítotisk



Obrázek 8: Princip sítotisku [4]

Zařízení pro sítotisk lze rozdělit podle způsobu obsluhy systému. Zařízení pro ruční tisk, jehož příklad je vidět na obr. 9, je technologicky jednodušší, zde je těrka posouvána po sítu člověkem. Konstrukce tohoto zařízení umožňuje uložení podložky a nastavení její polohy vzhledem k sítu, a to jak vodorovně, tak i do výšky od síta. Jednou z nejdůležitějších funkcí je možnost fixace podložky proti samovolnému pohybu například tlakem těrky. Toho se dosáhne zářázkami, ke kterým bude podložka dosedat a také pomocí vytvoření podtlaku a přísátím podložky pomocí externího sacího zařízení. Další část bude tvořit systém posuvu těrky, která bývá většinou upevněná na ližinách nebo tyčích a úchyt pro ruční obsluhu.

Ruční zařízení pro sítotisk samozřejmě nikdy vlivem lidského faktoru nedosáhne tak vysoké reprodukovatelnosti výsledků a nízké chybovosti, jakou bude mít přístroj automatický. Využívá se zejména pro výrobu při menších sériích, nebo pokud jsou hlavním kritériem pořizovací náklady na zařízení.



Obrázek 9: Ruční zařízení pro sítotisk Uniprint [4]

Poloautomatická a automatická zařízení jsou již značně komplikovanější, a tím i podstatně dražší, protože musí také zajistit pohyb těrky a nastavení její rychlosti a přítlaku dle požadavků obsluhy. Takové systémy ovšem dosáhnou vyšší kvality a jednotnosti výsledných motivů. [1]



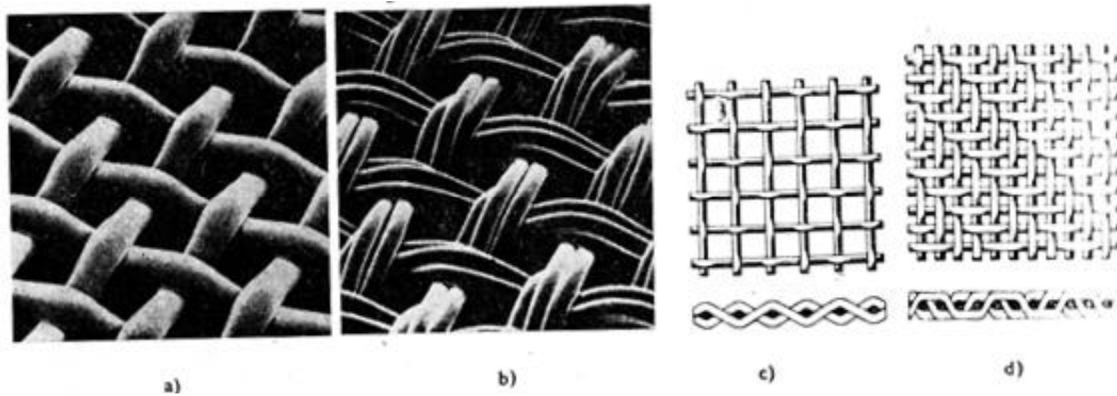
Obrázek 10: Poloautomatické zařízení pro sítotisk Uniprint [4]

2.2.3.1.3 Síta

Kvalita, stáří a provedení síta značnou měrou ovlivňuje kvalitu výsledné tlusté vrstvy. Síťové šablony jsou vytvořeny z rámu, na který je napínáním uchycena síťovina z polyesterových vláken anebo nerezové oceli. Rámy byly dříve vyrobeny ze dřeva a síťovina se na nich napnula nalepením a někdy dokonce pouze sponami na stranu rámu. Dnes se rámy vyrábějí zejména z hliníku a oceli, které lépe odolávají tahu síťoviny. Ta se dnes na rámy napíná například pomocí pneumatického napínacího zařízení nebo jiných mechanických systémů.

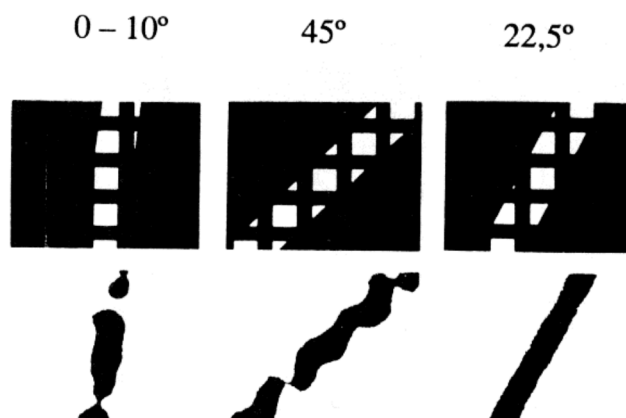
Materiál tkaniny pro vytvoření síťoviny je vybírán podle druhu pasty, která bude nanášena a podle požadavků na rozměr a přesnost požadovaného motivu. Aby byl zajištěn dobrý průchod pasty síťovinou, musí být velikost jednotlivých ok motivu 2,5 až 3 krát větší než velikost částic použité pasty.

Síťovina tvořená z polyesterových vláken má dobré vlastnosti pevnosti v tahu a po protažení v mezních možnostech materiálu se bez problémů vrátí do původní podoby. Tkaniny z ocelových vláken mají téměř nulovou pružnost, to samozřejmě ztěžuje dosažení správného přítlaku těrky, a pokud se nepovede nastavit ideální podmínky, může dojít k poškození těrky anebo i samotného síta. Možné je i provedení v kombinaci kovového jádra potaženého vrstvou polyesteru. Vlastnosti takového síta jsou kompromisem mezi vlastnostmi jednotlivých řešení. [1]



Obrázek 11: Struktura síťovin a) polyester monofilní, b) polyester multifilní, c) ocel s hladkou vazbou, d) ocel s keprovou vazbou [2]

Přesnost tisku výsledného motivu závisí především na správné velikosti ok, poměru formátu rámu a obrazce, šíře a délky dráhy těrky a vzdálenosti síta od podložky. Důležité je i zachování elasticity použitého síta, elasticita může být narušena příliš velkým tlakem těrky, nebo nevhodným napnutím tkaniny do rámu. Další parametr, který značně ovlivňuje tvar okrajů motivu je úhel směru jednotlivých vláken síťoviny a tištěného motivu, to je zobrazeno na obr. 12. Z nanesených motivů na obrázku je patrné, že ideálním úhlem natočení je $22,5^\circ$. [1]



Obrázek 12: Vliv úhlu natočení síta na obrazce [2]

Dalším důležitým parametrem ovlivňujícím kvalitu výsledku je vzdálenost síta od povrchu podložky, na kterou se obrazec tiskne. Odtrh spolu s mírou napnutí síta a velikostí tlaku vynaloženého na těrku do značné míry určuje věrnost zobrazení daného motivu. Při malém odtrhu může dojít při pomalém pohybu těrky k protečení mimo motiv a naopak při velkém odtrhu a nedostatečném tlaku na těrku může být množství nanesené pasty příliš malé a výsledný motiv má příliš velkou rezistivitu nebo nemusí být vůbec spojitý. [1]

2.2.3.1.4 Tvorba vrstvy

Tvorbu nanášené vrstvy lze rozdělit do tří jednotlivých fází. Jsou to tisk, uzavírání plochy a sušení.

V první fázi jsou na povrchu podložky vytvořeny protlačením pasty přes oka síta kvádry pasty o rozměrech daných velikostí ok a tloušťkou jednotlivých vláken tkaniny, z které je síto tvořeno.

Uzavírání povrchu nanesené plochy je slévání vytištěných kvádrů materiálu do jednolitého obrazce. Sníží se tedy výška kvádrů a dojde k vyplnění otvorů způsobených vlákny síta. Při správně nastavených parametrech zařízení a dobrém provedení samotného tisku se díky viskozitě pasty vytvoří jednolitá vrstva materiálu bez mezer a bublin. Výsledná tloušťka vrstvy je tedy závislá na tloušťce vláken, velikosti ok, tekutosti pasty a na struktuře povrchu podložky.

Sušením se z takto natištěné vrstvy vypaří těkavé složky pasty. Správnou dobu sušení lze odhadnout, pokud známe podíl a druh těkavých látek obsažených v pastě. [1]

2.2.3.1.5 Tepelné zpracování

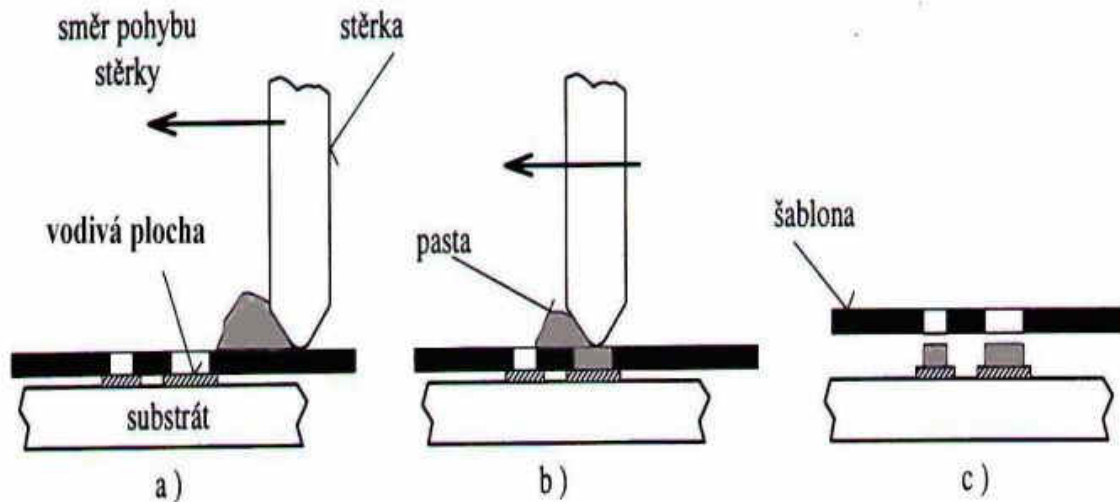
Natištěnou a vysušenou pastu je pro funkčnost vrstvy třeba vypálit. Způsob výpalu včetně teploty a jeho doby je dán typem pasty. Při výpalu dochází k chemické reakci jednotlivých komponent a k pevnému spojení s podložkou. Výška teploty vypalování anorganických past se pohybuje okolo 800°C. V případě past polymerových se většinou doporučené teploty pohybují v rozmezí 150 až 200°C.

2.2.3.2 Šablonový tisk

V případě šablonového tisku se k průchodu pasty a vytvoření požadovaného vzoru použije folie s otvory. Princip tisku je shodný se sítotiskem, ale výsledná vrstva bude mít pozměněny některé vlastnosti. Například tloušťka vrstvy je v tomto případě přímo daná tloušťkou použité folie a dá se tedy celkem snadno a přesně nastavit. Výsledný motiv je také jednolitější a přesnější než v případě sítotisku. Tato technologie je vhodná především pro tisk drobných motivů, které by sítotisk nedovoloval z důvodu tloušťky vláken síta.

Folie může být vyrobena z kovu (ocel, mosaz, měď ajn.) a také z plastových materiálů. Druh kovu je třeba zvolit vzhledem k nárokům na životnost, chemickou stálost vzhledem k typu

použité pasty. Plastové materiály jsou zajímavé zejména z hlediska své ceny, která je nesrovnatelně nižší než u varianty z kovů. [2]



Obrázek 13: Princip šablonového tisku [4]

2.2.3.3 Dispensing

Dispensing je metoda nanesení pasty dotykem, nebo vytlačněním ze zásobníku. Lze ji použít na vytváření klasických struktur a také pro tvorbu jednotlivých bodů. Existuje mnoho variant této technologie. Základní dělení je na tzv. writing a jetting tedy česky psaní a tryskání. České názvy jsou nepraktické a většinou se tedy v literatuře používá převážně anglického označení. [1]

2.2.3.3.1 Writing

Existuje více způsobů realizace této technologie. Základním je přenos past plnými jehlami různých tvarů. Hlava s jehlami se vnoří do pasty a poté se hlava přesune nad podložku. Dotykem pasta skápne a vytvoří ovrstvenou plochu jejíž rozměry jsou závislé na viskozitě, tvaru jehly a množství nabrané pasty. Tento způsob je sice velmi jednoduchý avšak pomalý a relativně nepřesný.

Druhou možností je nanášení vytlačováním pasty dutou jehlou. Tento způsob je díky vynechání fáze namáčení mnohem rychlejší a množství nanesené pasty se také lépe řídí. [1]

3 Vlastnosti vrstev

3.1 Adheze

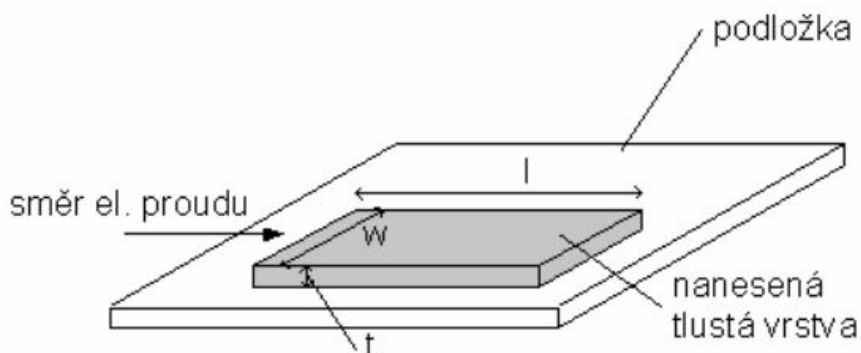
Tento parametr je jedním z těch nejdůležitějších, podle kterého lze posuzovat kvalitu výsledné vrstvy. Jedná se o přilnavost vrstvy k substrátu. Bývá způsobena několika různými vazbami (elektrostatickou silou, chemickou reakcí mezi vrstvou a substrátem nebo van der Waalsovými silami). Velikost přilnavosti vrstvy závisí především na materiálu vrstvy, materiálu substrátu povrchu substrátu a způsobu vytvoření vrstvy. Nejvyšší adheze dosahují vrstvy vyrobené pomocí CVD. Dále to jsou vrstvy vytvořené pomocí PVD, z nichž metoda napařování je lepší než metoda napařování (částice dopadají na povrch s větší energií). [7]

3.2 Odpor na čtverec

Typickým elektrickým parametrem je vodivost nebo rezistivita (převrácená hodnota vodivosti). U tlustých vrstev se setkáváme s parametrem zvaným odpor na čtverec. Vyjadřuje velikost odporu vrstvy čtvercového tvaru (šířka vrstvy w je rovna její délce l). Tato hodnota je stanovena pro danou tloušťku t , kterou bude mít tlustá vrstva při dodržení předepsaného technologického postupu jejího zhotovení (zvláště tloušťka síta). Pokud známe rozměry obdélníkového odporu (viz obr.1), můžeme stanovit teoretickou velikost odporu R :

$$R = R_{\square} * \frac{l}{w}$$

kde R je odpor na čtverec, l je délka tlustovrstvého odporu, w je jeho šířka.



Obrázek 14: Rozměry tlusté vrstvy [3]

3.3 Vlastnosti tlustých vrstev

3.3.1 Elektrické vlastnosti

Nároky na elektrické vlastnosti lze dělit z hlediska substrátu a také vlastností samotné tlusté vrstvy. Nejdůležitější elektrickou vlastností substrátu je vnitřní a elektrická rezistivita. V dnešní době na ni kladou elektronické součástky stále větší požadavky a tak se lze často setkat s hodnotami v řádu $10^{15} \Omega$. Mezi další důležité vlastnosti substrátu patří například relativní permitivita a ztrátový činitel. Ty jsou zásadní zejména při použití pro vyšší frekvence.

V případě samotné funkční vrstvy je samozřejmě nejdůležitější ta vlastnost, kvůli které je vrstva aplikována, může jít například o vysokou vodivost, odpor, proudovou zatížitelnost apod. Pokud budeme vrstvu používat na vyšších frekvencích, začne poté záležet i na tvaru a rozmístění motivů což návrh dále zkomplikuje.

Stejně důležitá je však i stabilita těchto elektrických vlastností a to jak v závislosti na teplotě, tak i na vlivech prostředí jako je vlhkost a znečištění prachem. Často je tedy vhodné před těmito vlivy tlusté vrstvy alespoň částečně chránit například jejich opouzdřením. [2]

3.3.2 Tepelné vlastnosti

Mnoho součástek vyrobených technologií tlustých vrstev je velmi citlivých na jejich provozní teplotu. Parametry takto tvořených celků se s teplotou více či méně liší. To může ovlivnit nejen jejich správnou funkčnost, ale i jejich spolehlivost a je tedy nutné je správně chladit. Zvláště u celků tvořených povrchovou montáží (STM – surface mount technology) jsou z důvodu husté montáže součástek na relativně malé ploše a vyššího odporu vodivých cest z důvodu jejich menších rozměrů kladeny na chlazení velké nároky.

Odvod tepla se různou měrou dělí mezi vedení, proudění a sálání. Vedením se teplo šíří mezi místy s různou teplotou a tyto teploty se postupně vyrovnávají. To má největší význam hlavně u jednodušších obvodů a často spolu s přirozeným prouděním vzduchu pro uchlazení stačí. Pro zlepšení odvodu tepla vedením je vhodné použít například větších rozměrů materiálu a podložek nebo různých pasivních chladičů. Proudění je další významný způsob chlazení, kdy se může využít buď přirozeného proudění vzduchu anebo nuceného oběhu. Nuceného proudění se docílí díky externímu ventilátoru, který bude ofukovat podložku s nanesenou vrstvou. Je třeba si také uvědomit, že se tímto způsobem může na určitých částech rychleji

usazovat prach, který sníží účinnost chlazení a také může způsobit různé poruchy. Vzduch je tedy třeba filtrovat, nebo přinejmenším chlazení a funkční celek od prachu v určitých intervalech vhodně čistit. Posledním způsobem je sálání, které pro svou nízkou účinnost v elektronice nemá velkou využitelnost. [2]

3.3.3 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti použitých materiálů jsou pro správnou funkčnost a také životnost dalším velmi důležitým faktorem. Prvním požadavkem budou mechanické vlastnosti podložky jako je rovinnost povrchu, které do značné míry určují výslednou kvalitu nanesení a přilnutí tlusté vrstvy. Další vlastnosti jako tepelná roztažnost podložky a nanesené vrstvy se projeví zejména při provozu.

Poměr tepelných roztažností použitých materiálů hraje značnou roli a špatná volba materiálů tedy může vést k poruchám. Pokud se materiály budou s ohřevem rozpínat různou rychlostí, dojde k pnutí a vrstva naneseného materiálu se může od podložky oddělit, nebo popraskat. Stejně tak součástky vytvořené technologií tlustých vrstev se v případě různé tepelné roztažnosti od podložky mohou oddělit od pájky, která je spojuje.

3.4 Porovnání možností a vlastností výsledných tenkých a tlustých vrstev

3.4.1 Tenké vrstvy

Vrstvové technologie jsou založeny na nanášení vrstev materiálů s definovanou tloušťkou na nosný substrát. U technologie tenkých vrstev se tloušťka běžně pohybuje od 1nm po 1 μ m. Z tohoto důvodu neplatí tytéž fyzikální vlastnosti a konstanty jako u běžných objemů materiálů.

Takovéto chování tenkovrstvých struktur je využíváno v celé oblasti elektroniky. Technologie tenkých vrstev zajišťuje sensorům vysokou přesnost, stabilitu, malou časovou konstantu, spolehlivost, malé rozměry, malou hmotnost a možnost integrace s polovodičovými obvody.

Mezi hlavní nevýhody tenkovrstvých technologií jsou vysoké nároky na výrobní technologie. S tím souvisí jeden ze základních parametrů a tím je cena. Vysoká pořizovací cena zařízení, které je schopno provádět složité operace jako je napařování nebo napařování

je ve srovnání se zařízením na sítotisk značně vyšší. Díky nutnosti výroby tenkých vrstev ve vakuu je omezen výkon zařízení a tím stoupá i cena provozu. Velkou výhodou je nejmenší teplotní závislost odporu oproti ostatním běžným technologiím.

Tenkovrstvé technologie jsou využívány především v realizaci vodivých, odporových a dielektrických vrstev.

3.4.2 Tlusté vrstvy

Pojmem tlustá vrstva označujeme vrstvu, jejíž tloušťka se po výpalu (nebo vytvrzení) pohybuje řádově v desítkách mikrometrů, to je přibližně o dva řády více, než je tomu u tenkých vrstev. Tlusté vrstvy jsou nehomogenní směsi několika různých materiálových složek a jejich struktura má amorfní charakter, to znamená, že vrstva nemá pravidelnou krystalickou strukturu. Při tvorbě těchto vrstev dochází výpalem organické složky a slinování kovových částic se sklem. Průchod proudu se poté uskutečňuje přes kontaktní body mezi částicemi kovu, jak bylo již dříve zmíněno. Výsledná vodivost takové vrstvy je tedy výrazně menší než vodivost samotného kovu. Tím, že proud prochází přes kontaktní body mezi částicemi kovu, dochází k nepravidelnému průchodu proud přes tyto kontaktní body (po jakých si cestách). Tento jev se může problematicky projevit při průchodu proudu při vyšších frekvencích ve formě rušení.

Tlusté vrstvy velice dobře splňují nároky, jakými jsou vysoká vodivost, proudová zatížitelnost a široký rozsah elektrické rezistivity. Mnoho součástek vyrobených touto technologií je velmi citlivých na jejich provozní teplotu. Jedna z nejdůležitějších vlastností je shodná tepelná roztažnost podložky a nanesené vrstvy, ta se projeví zejména při provozu.

Charakteristickým znakem tlustovrstvé technologie je výroba nevakuovými depozičními metodami (nejčastěji sítotiskem) a následným výpalem nebo vytvrzením, což je v porovnání s technologiemi tenkovrstvých metod cenově příznivější.

4 Výroba vzorků tlustovrstvých struktur a jejich vyhodnocení

4.1 Použité pasty

Pro realizaci vzorků byly použity dvě pasty - jedna vodivá stříbrná, druhá odporová uhlíková. Obě tyto pasty byly nanесeny přes síto na celkem 72 keramických destiček.

Použité pasty:

CSP-3110D

- Stříbrná vodivá pasta
- Obsah stříbra 75 ± 2.0 %
- Odpor na čtverec = $25,4 \mu\Omega/\text{mm}$
- Viskozita 15 ± 5 Pa·s (Brookfield #14 50rpm @25°C)
- Vytvrzování 130 °C po dobu 20 min

CSP-3225

- Uhlíková odporová pasta
- Obsah uhlíku 42 ± 2.0 %
- Odpor na čtverec = $12,7 \text{ m}\Omega/\text{mm}$
- Viskozita 20 ± 5 Pa·s (RION VT-04 #2 Spindle)
- Vytvrzování 130 °C po dobu 30 min

4.2 Tvorba tlustých vrstev

4.2.1 Tisk

Vybraná pasta byla nanесena přes zařízení pro sítotisk Uniprint, které je vidět na obr. 9. U tohoto zařízení se posuv těrky provádí ručně, těrka se pohybuje po ližinách. Podložky se pokládají na děrovanou pracovní plochu, která je posuvná ve všech třech osách. Fixace destiček je řešena pomocí zarážky a podtlaku, který vytváří vysavač připojený pod pracovní plochou.

Jako substrát byly použity destičky z korundové keramiky o rozměrech 25 x 25 mm a o tloušťce 0,4 mm. Z těchto destiček byly vytvořeny pomocí lepicí pásky tři plata po dvaceti čtyřech destičkách (formátu 6x4).

Použité síto bylo uchyceno v hliníkovém rámu a vyrobeno z polyesterových vláken. Toto síto bylo již dříve častokrát používáno při výuce a jiných závěrečných pracích. Síto tedy nebylo v příliš vhodném stavu pro přesnou aplikaci pasty na podložky. Při vizuální kontrole se zdálo síto prověšené a některé otvory v motivech byly z důvodu předchozího používání síta ucpané. Ani za značného úsilí se ucpané otvory nepodařilo zcela vyčistit. Stáří a kvalita síta se tedy projeví do kvality výsledných vrstev především neprotečením pasty do všech míst, nebo naopak protečením mimo motiv což znehodnotilo mnoho vodivých cest.

Samotný průběh tisku lze rozdělit do následujících kroků:

- Vložíme sadu podložek na pracovní plochu, zapneme sání pomocným čerpadlem a seřídíme polohu posuvem pracovní plochy tak, aby se síto s podložkami ideálně krylo.
- Naneseme malé množství pasty na síto vedle motivu a rozprostřeme na čáru délkou přibližně odpovídající délce motivu.
- Rozetřeme pastu přes motiv pohybem třerkou tam a zpět.
- Odklopíme síto a vyjmeme destičku s nanesenou vrstvou.
- V případě že je třeba vytvořit další vrstvy, se postup opakuje s další sadou podložek.
- Pokud další vrstvy nepotřebujeme, síto vyjmeme a zbylou pastu důkladně očistíme.

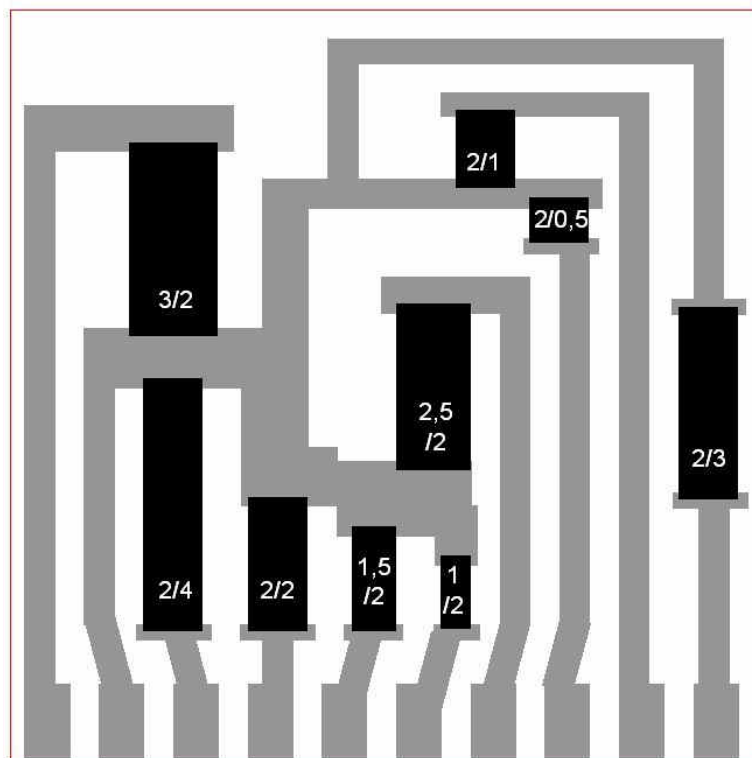
4.2.2 Vytvrzování

Natištěné vrstvy byly následně vytvrzeny. K tomu účelu byla použita laboratorní pec s odporovým ohřevem SPT 200, která je vidět na obr. 15. Destičky byly vloženy do laboratorní pece na kovové podložce, kde byly vytvrzeny dle zadaných požadavků od výrobce pasty.



Obrázek 15: Pec s odporovým ohřevem [10]

4.2.3 Motiv a jeho parametry



Obrázek 16: Motivy síta (šedá – vodivá cesta, černá – odpory)

Označení odporu	Šířka (mm)	Délka (mm)	Poměr délka/šířka
3/2	3	6	2
2/4	2	8	4
2/2	2	4	2
1,5/2	1,5	3	2
1/2	1	2	2
2,5/2	2,5	5	2
2/0,5	2	1	0,5
2/1	2	2	1
2/3	2	6	3

Tabulka 1: Označení a teoretické rozměry odporů

Odporová pasta: CSP 3225

(na obrázku černě)

Vodivá pasta: CSP-3110D

(na obrázku šedivě)

4.3 Vyhodnocení vzorků

4.3.1 Měření odporu

Odpor tlustých vrstev byl měřen multimetrem HP 34401A. Vodivé vrstvy měly odpory menší než 1 Ω . U odporových vrstev vytvořených uhlíkovou pastou se odpory pohybovaly v řádu stovek ohmů a multimetrem HP 34401A byl tedy pro jejich měření dostačující.

Multimetr HP 34401A byl vybaven jehlovými sondami s odporem 300 m Ω a tuto hodnotu tedy bylo nutné naměřené hodnoty kompenzovat. V případě měření odporových vrstev v řádu stovek ohmů se nejedná o velkou chybu, ale z důvodu zachování co možná nejvyšší přesnosti výsledků byly naměřené hodnoty kompenzovány u každého měření multimetrem. Udávaná nepřesnost tohoto přístroje byla pro hodnoty $>100 \Omega \pm 0.01 \%$.

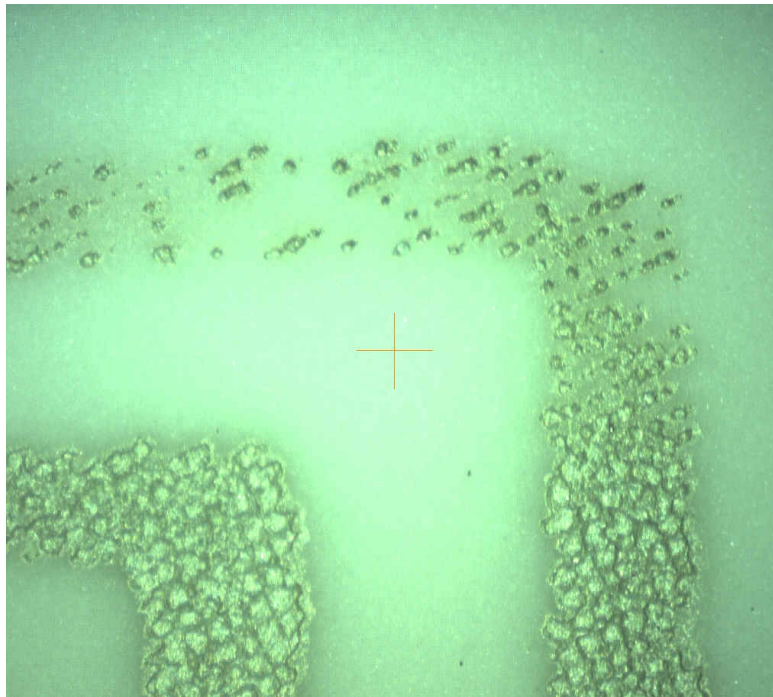
4.3.2 Prozkoumání vzorků po tisku

Po vytvrzení vzorků bylo k měření připraveno celkem 48 substátů z korundové keramiky. Některé z vodivých cest však měly vady jako je např. přerušená cesta, nebo na určitých

místech nechtěné zúžení, nebo rozšíření vrstvy. Tyto vady vznikly z velké části už při tisku a některé při vypékání vrstvy. Součástí samotného měření tak byla vizuální kontrola všech 48 destiček, z nichž byly vybrány je ty neporušené.

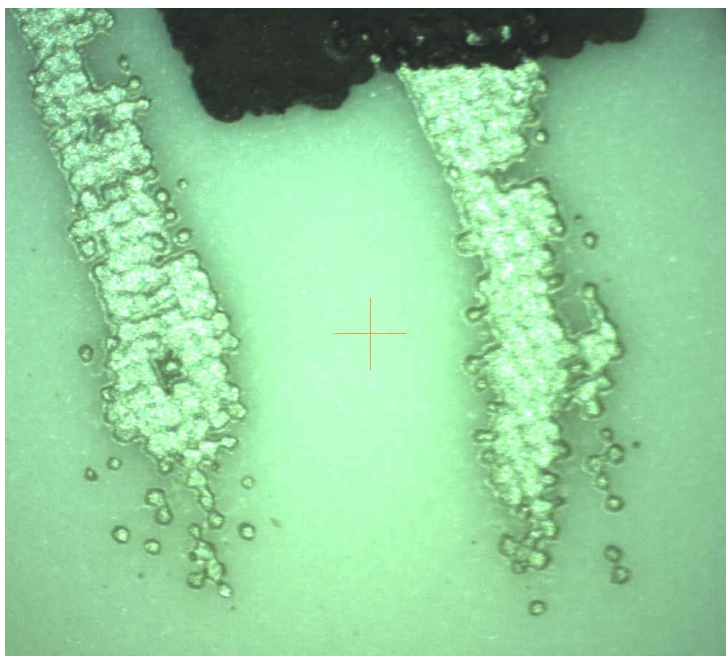
Po této kontrole bylo mnoho vodivých cest vyřazeno. Mezi nejčastější vady patřilo nerovnoměrné rozlití pasty mimo motiv, neslití pasty z důvodu ucpaných otvorů v sítu, nebo nedostatečného množství pasty. Následující obrázky zobrazují nejčastější druhy takovýchto vad.

Na obr. 17 je vidět přerušení cesty způsobené příliš velkou vzdáleností síta od substrátu, to způsobilo, že sítem neproteklo na substrát dostatečné množství pasty a tedy nemohla vzniknout souvislá vodivá vrstva.



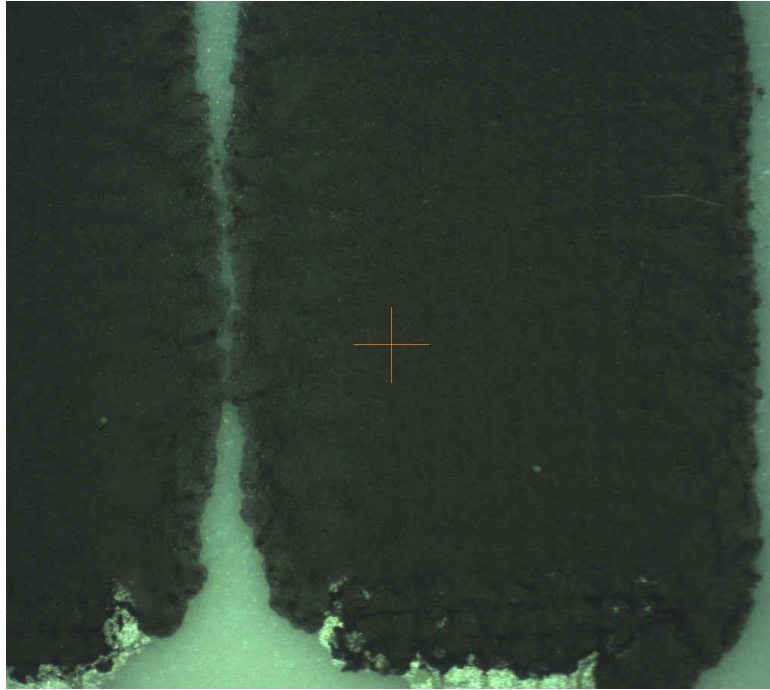
Obrázek 17: Cesta přerušená vlivem nesprávné vzdálenosti síta od substrátu

Na obr. 18 je vidět přerušení cesty způsobené ucpáním některých ok v sítu, oka byla pravděpodobně ucpaná již před nanášením vrstvy z důvodu špatného očištění síta před použitím.

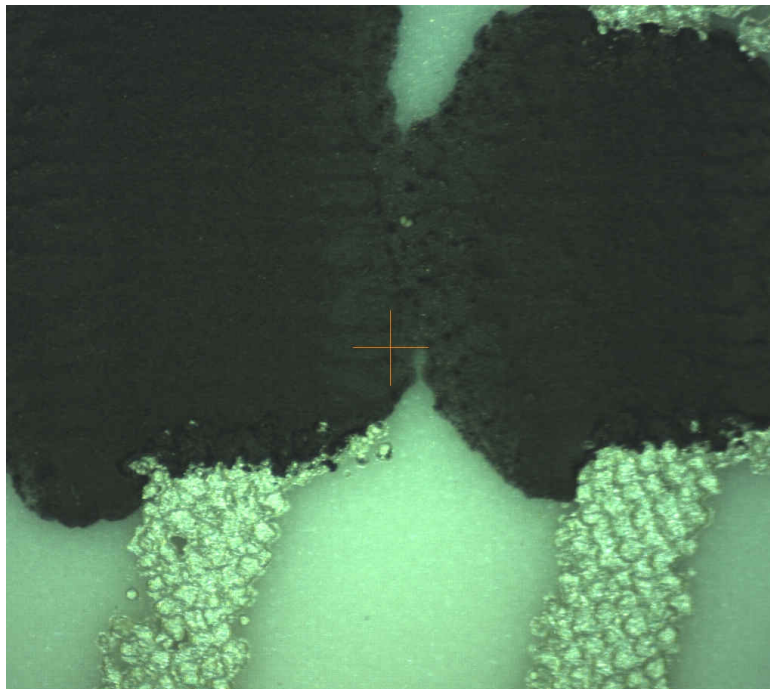


Obrázek 18: Cesta přerušená vlivem ucpaných ok

Na obr. 19 je vidět pasta která se vylila z tištěného vzoru. Taková cesta je sice měřitelná, ale muselo být provedeno měření reálné šířky tohoto odporu. V extrémním případě může dokonce dojít i ke slití a tím vodivému spojení dvou sousedících cest viz obr. 20.

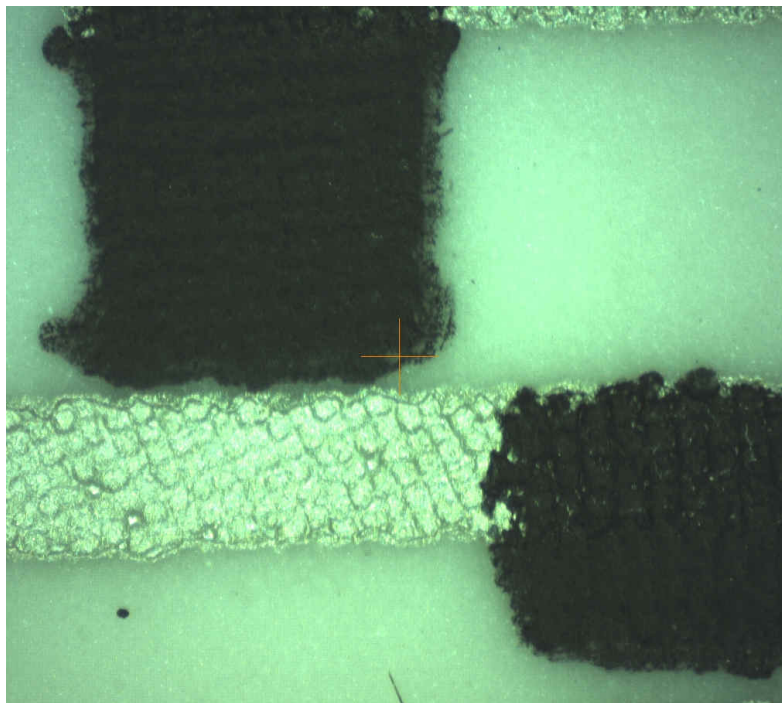


Obrázek 19: Pasta rozlitá mimo požadovaný vzor



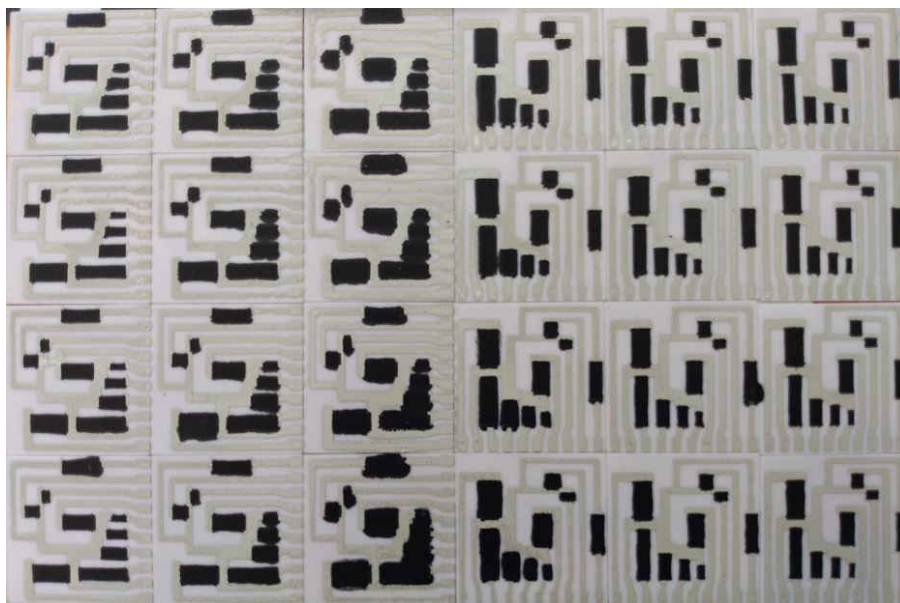
Obrázek 20: Slití vodivých cest (tzn. spojení dvou vodivých cest)

Na obr. 21 je vidět nepřesné umístění odporové vrstvy. Tato vada se stala mou vlastní chybou, při manipulaci s podložkou, na které byly umístěny destičky připravené před samotným sítotiskem. Tyto vzorky musely být následně z experimentu vyřazeny.



Obrázek 21: Nepřesné umístění odporové vrstvy

Na obr. 22 je vidět sada 24 destiček, na které byl proveden sítotisk. V rámci této práce byly vyrobeny celkem tři takovéto sady. Pro následné měření a vyhodnocení vlastností jejich vrstev byly použity dvě. První sada byla zhotovena pouze za účelem mého zaškolení při práci s přístrojem Uniprint – G. Z obrázku je jasně patrné, že síta nebyla již v ideálním stavu. Vlivem stárí se střed sít mírně prověsil. Díky tomuto prověšení nebyla zachována správná vzdálenost mezi sítem a podložkou na prostředku sady a došlo ke slití odporových i vodivých cest. Nejvíce je tato chyba vidět na třetím sloupci zleva a projevila se při každém nanášení pasty, na všech třech sadách a to ve stejném místě. Tato vada by mohla být způsobena rovněž mou chybou (nesprávným nastavením vzdálenosti síta od destiček). To ale vyvrací obr.č. 17, kde došlo k přerušení vodivé cesty vlivem nadměrné vzdálenosti síta od destičky. K tomuto jevu docházelo rovněž opakovaně a to v prvním sloupci zprava.



Obrázek 22: Sada 24 destiček, na kterých byl proveden sítotisk

4.3.3 Vyhodnocení naměřených hodnot

Postupy použité při tvorbě vzorků a měření byly zpracovány v předcházejících kapitolách. Tato část se bude zabývat samotným vyhodnocením naměřených hodnot. Z důvodu velkého množství dat se budou některé hodnoty ve formě tabulek nacházet v příloze a v této kapitole budou pouze z nich vycházející grafy.

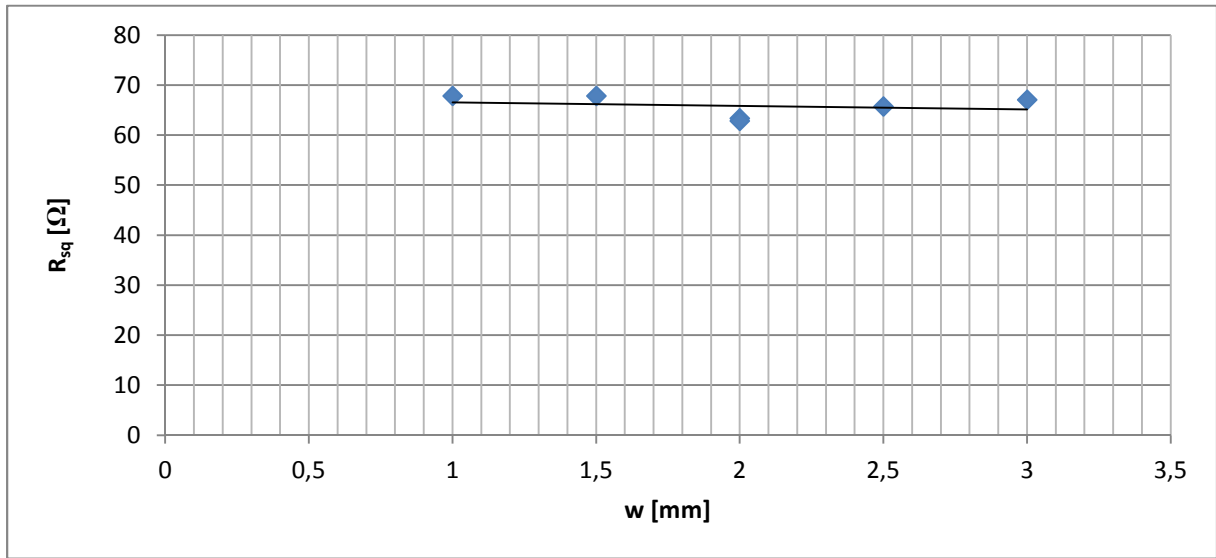
Většinu této kapitoly tvoří porovnání závislosti naměřených odporů s jednotlivými rozměry vytvořených vrstev. Před vyhodnocením položíme několik obecných předpokladů:

$$R_{\square} = R * \frac{w}{l} \text{ kde } R_{\square} \text{ je odpor na čtverec.}$$

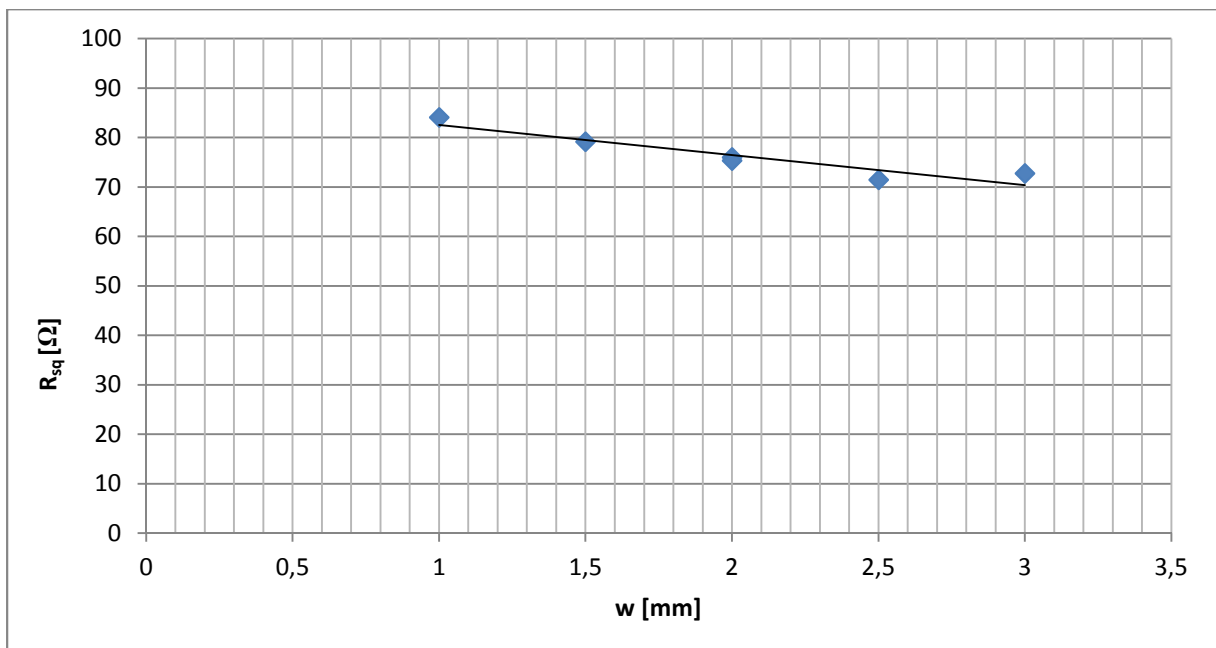
Odpor na čtverec by tedy neměl být závislý na délce ani šířce vrstvy, ale pouze na její tloušťce a rezistivitě.

Tlustá vrstva má nehomogenní strukturu, a to může do jisté míry ovlivnit všechny výše zmíněné parametry včetně rezistivity. Měření šířky vytvořených vrstev ukázalo, že pokud budeme počítat s teoretickou šířkou dle parametrů použitého síta, vnese to do výsledků značnou chybu. Nanesené vrstvy byly totiž průměrně kolem cca 16 % širší než teoretické hodnoty.

Následující grafy sledují závislost odporu na čtverec na šířce vrstvy. Na grafech je vidět, že odpor na čtverec s rostoucí šířkou vrstvy klesá. To je pravděpodobně způsobeno tím, že v širší vrstvě se místa s nižší vodivostí projeví méně často než u vrstev užších. Z prvního grafu je vidět, že pokud bychom počítali s teoretickou šířkou vrstvy, zanechal by to do výsledku značnou chybu, pouze s touto hodnotou bychom očekávali odpor vrstvy znatelně menší, než ve skutečnosti je. Zejména pak u užších vrstev ($w = 1$ [mm] a $w = 1,5$ [mm]), kde se odchylka pohybuje okolo patnácti ohmů.



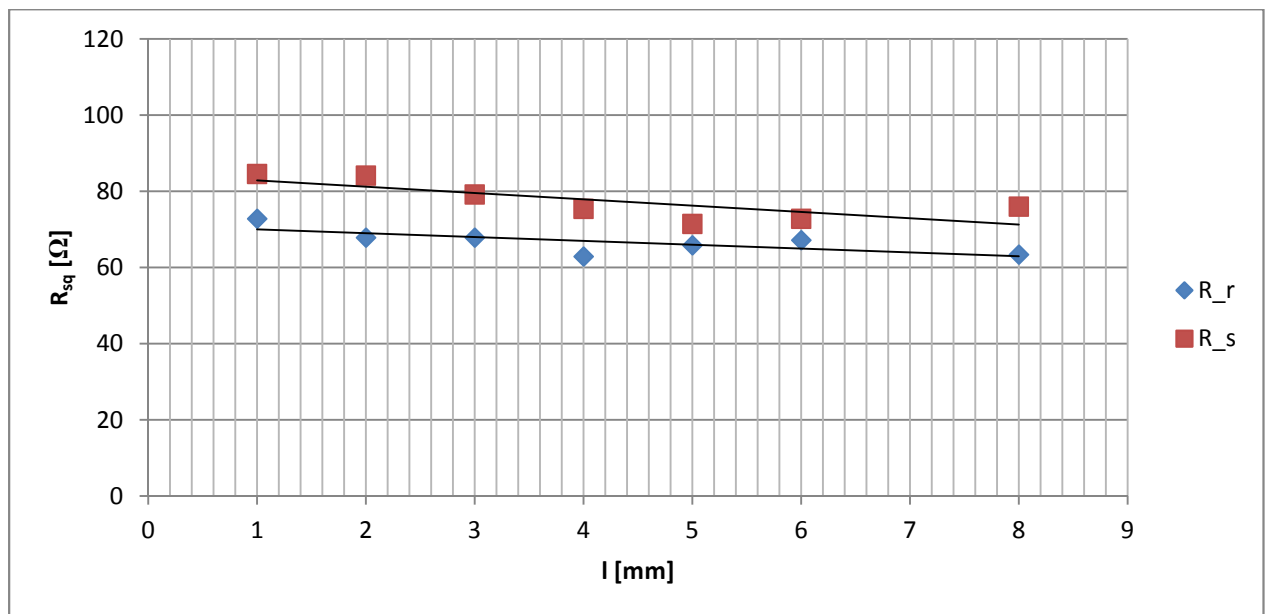
Graf 1: Teoretická závislost R_{sq} na šířce tlusté vrstvy



Graf 2: Skutečná závislost R_{sq} na šířce tlusté vrstvy

Další porovnání znázorňuje vliv délky tlusté vrstvy na její odpor na čtverec. Graf zobrazuje průběh odporů vypočtených z teoretických a změřených šířek tlustých vrstev.

První zřejmá věc z grafu je, že hodnoty odporů na čtverec vypočtené z naměřené šířky vrstvy R_s mají vyšší hodnotu než odpory R_r vypočtené z teoretických rozměrů. To je dáno právě naměřenou šířkou vrstvy, která je, jak už bylo zmíněno, v průměru vyšší než hodnota teoretická. Hodnoty odporů na čtverec s délkou vrstvy klesají, což je pravděpodobně zapříčiněno nižším množstvím hůře vedoucích míst v nehomogenní struktuře.



Graf 3: Závislost R_{sq} na délce tlusté vrstvy

5 Závěr

Cílem první části této práce bylo obecně rozebrat základní vlastnosti tenkých a tlustých vrstev, technologie jejich výroby, používané materiály. Dále jsem se blíže věnoval tlustým vrstvám a to především sítotisku.

V druhé polovině práce, zabývající se tvorbou měřitelných vzorků, byl popsán postup přípravy vodivých a odporových tlustých vrstev na podložky z korundové keramiky za pomoci sítotiskové technologie. Na těchto vzorcích bylo následně provedeno měření odporu a šířky jednotlivých vrstev a tato měření byla použita pro zkoumání vlivu rozměrů vrstev na jejich odpory.

Naměřené hodnoty byly dále pro lepší názornost zpracovány ve formě grafů. Tyto grafy charakterizují závislosti odporu na délce, na teoretické a skutečné šířce vytvořených tlustých vrstev. V průběhu měření se ukázalo, že v případě výpočtů s teoretickou šířkou se vytvoří nezanedbatelná odchylka od skutečných hodnot. Měření bylo dále s velkou pravděpodobností ovlivněno dalšími parametry. Jedním z nich je s velkou pravděpodobností hrubost povrchu vytvořených vrstev. Ta má s velkou pravděpodobností značný vliv na velikost výsledného odporu. Přesnou souvislost mezi hrubostí povrchu vrstvy a výsledným odporem této vrstvy se v této práci nepodařilo zhodnotit a zdokumentovat.

Jedna z hlavních otázek, která vznikla v průběhu měření natištěných tlustých vrstev, se týkala příliš velké chybovosti zařízení pro sítotisk Uniprintu-G. Při vytváření vrstev došlo k několika vadám, které znehodnotily značnou část motivů, což zde bylo podrobně zdokumentováno pomocí mikroskopu s fotoaparátem a můžete si je v této práci blíže prohlédnout a prozkoumat.

První chyba byla způsobena nesprávnou obsluhou a týkala se nepřesného umístění sady destiček před nanesením uhlíkové pasty, a tím nesprávného umístění odporové tlusté vrstvy. Tato chyba však měla vliv pouze na dva motivy. Ostatní chyby byly způsobeny převážně stářím síta, tedy přesněji prověšením síta na jeho středu vlivem stáří a ucpáním některých ok v motivech vlivem opětovného používání.

Těmto problémům by měla být v praxi věnována maximální pozornost. Správné zaškolení obsluhy, která bude zařízení obsluhovat. Maximální péče o síto jako je neprodlené a důkladné očištění síta od zbytků pasty ihned po ukončení tisku a v neposlední řadě pravidelná

obměna síta po určitém množství natištěných motivů by měla vést k zásadnímu snížení chybovosti této metody.

Seznam použitých zdrojů

- [1] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [2] SOUTOR, Zdeněk, Josef ŠAVEL a Jaroslav ŽŮREK. *Hybridní integrované obvody*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1982.
- [3] *Tlusté vrstvy – tisk, vytvrzení, měření* [online]. ČVUT FEL. Poslední změna: 8.2.2011. Dostupné z: <http://martin.feld.cvut.cz/~pelikano/vyuka/EMT/tlustvrsvy.pdf>
- [4] SZENDIUCH, Ivan. *Tlusté vrstva* [online]. [cit. 2012-11-28]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/05a_tluste_vrstvy.pdf
- [5] ADÁMEK, Martin, Radimír VRBA, Jan JAROŠ, Edita HEJÁTKOVÁ a Jan PRÁŠEK. *Mikrosenzory a mikromechanické systémy* [online]. [cit. 2.5.2017]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/menufram.htm>
- [6] KOBLÍŽEK, Vilém. Vytváření tenkých vrstev ve vakuu. *Laboratorní úlohy k předmětu A1B13VST*. [Online] [Citace: 27. 12 2014.] Dostupné z: http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/A1B13VST-lab_soubory/uloha_6.pdf
- [7] HORYNOVÁ, Eva. *Nevodivé tenké vrstvy vytvořené naprašováním*. Praha : ČVUT Fakulta elektrotechnická, 2017
- [8] WASA, Kiyotaka, KITABATAKE, Makoto, ADACHI, Hideaki. *Thin film materials technology - Sputtering of compound materials*. New York : William Andrew, Inc., 2004. 0-8155-1483-2.
- [9] BERRY, Robert W, HALL, Peter M a HARRIS, Murray T. *Thin film technology*. New Jersey: D. Van Nostrand Company, Inc., 1968.
- [10] MYŠKA, Pavel. *Tlustovrstvé struktury připravené z polymerních sítotiskových past*. Praha : ČVUT Fakulta elektrotechnická, 2017
- [11] GAJDOŠ, Jiří. *Elektrické vlastnosti tlustovrstvých odporových past*. Brno : VUT Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013
- [12] ADÁMEK, Martin, VRBA Radimír, JAROŠ Jan, HEJTÁKOVÁ Edita a PRÁŠEK Jan. *Mikrosenzory a mikromechanické systémy* [online]. [cit. 2012-11-28]. Dostupné z: <http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/menufram.htm>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma možností výroby tenkých vrstev [7].....	10
Obrázek 2: Sestavy pro napařování [8]	11
Obrázek 3: Tvary odpařovacího zdroje [9]	12
Obrázek 4: Vyražení částice z terče [7].....	13
Obrázek 5: Závislost viskozity na tlaku [4].....	14
Obrázek 6: Struktura vodivé vrstvy a)skelná vazba b)chemická vazba [2].....	16
Obrázek 7: Základní sled operací při realizaci tlustovrstvé struktury [4]	20
Obrázek 8: Princip sítotisku [4].....	20
Obrázek 9: Ruční zařízení pro sítotisk Uniprint [4]	21
Obrázek 10: Poloautomatické zařízení pro sítotisk Uniprint [4].....	22
Obrázek 11: Struktura síťovin a) polyester monofilní, b) polyester multifilní, c)ocel s hladkou vazbou, d)ocel s keprovou vazbou [2]	23
Obrázek 12: Vliv úhlu natočení síta na obrazce [2]	23
Obrázek 13: Princip šablonového tisku [4]	25
Obrázek 14: Rozměry tlusté vrstvy [3]	26
Obrázek 15: Pec s odporovým ohřevem [10]	32
Obrázek 16: Motivy síta (šedá – vodivá cesta, černá – odpory).....	32
Obrázek 17: Cesta přerušená vlivem nesprávné vzdálenosti síta od substrátu.....	34
Obrázek 18: Cesta přerušená vlivem ucpaných ok.....	35
Obrázek 19: Pasta rozlitá mimo požadovaný vzor	36
Obrázek 20: Slití vodivých cest (tzn. spojení dvou vodivých cest).....	36
Obrázek 21: Nepřesné umístění odporové vrstvy	37
Obrázek 22: Sada 24 destiček, na kterých byl proveden sítotisk	38

Seznam grafů

Graf 1: Teoretická závislost R_{\square} na šířce tlusté vrstvy	39
Graf 2: Skutečná závislost R_{\square} na šířce tlusté vrstvy.....	39
Graf 3: Závislost R_{\square} na délce tlusté vrstvy	40

Seznam tabulek

Tabulka 1: Označení a teoretické rozměry odporů	33
---	----

Seznam příloh

Příloha 1: Naměřené odpory na vzorcích 1	48
Příloha 2: Naměřené odpory na vzorcích 2	48
Příloha 3: Výpočet R_{\square} podle předpokládaných rozměrů tlustých vrstev 1	49
Příloha 4: Výpočet R_{\square} podle předpokládaných rozměrů tlustých vrstev 2	49
Příloha 5: Výpočet R_{\square} podle skutečných rozměrů tlustých vrstev 1	50
Příloha 6: Výpočet R_{\square} podle skutečných rozměrů tlustých vrstev 2	50
Příloha 7: Naměřené skutečné šířky tlustých odporových vrstev pomocí mikroskopu 1	51
Příloha 8: Naměřené skutečné šířky tlustých odporových vrstev pomocí mikroskopu 2	51

Přílohy

Příloha 1: Naměřené odpory na vzorcích 1

	Zkoumané vzorky				
	A	B	C	D	E
ozn. odporu	R [Ω]				
R3/2	130	128	125	126	139
R2/4	264	225	225	254	277
R2/2	139	115	105	134	133
R1,5/2	149	116	108	141	138
R1/2	136	113	131	142	129
R2,5/2	126	128	124	126	146
R2/0,5	33	38	30	38	35
R2/1	73	76	72	78	82
R2/3	220	232	231	217	224

Příloha 2: Naměřené odpory na vzorcích 2

	Zkoumané vzorky				
	F	G	H	I	J
ozn. odporu	R [Ω]				
R3/2	140	142	141	133	139
R2/4	261	256	262	268	243
R2/2	129	124	124	137	128
R1,5/2	149	146	130	149	130
R1/2	149	148	140	146	123
R2,5/2	148	146	123	134	115
R2/0,5	39	38,5	32	38	37
R2/1	80	78	83	83	81
R2/3	217	213	281	224	244

Příloha 3: Výpočet R_{sq} podle předpokládaných rozměrů tlustých vrstev 1

	Zkoumané vzorky				
	A	B	C	D	E
ozn. odporu	$R_{sq} [\Omega]$				
R3/2	65	64	62,5	63	69,5
R2/4	66	56,4	56,25	63,5	69,25
R2/2	69,5	52,5	52,5	67	66,5
R 1,5/2	74,5	58	54	70,5	69
R1/2	68	56,5	65,5	71	64,5
R2,5/2	63	64	62	63	73
R2/0,5	66	76	60	76	80
R2/1	73	76	72	78	82
R2/3	73	61	62,7	72,3	73,4

Příloha 4: Výpočet R_{sq} podle předpokládaných rozměrů tlustých vrstev 2

	Zkoumané vzorky				
	F	G	H	I	J
ozn. odporu	$R_{sq} [\Omega]$				
R3/2	70	71	70,5	66,5	69,5
R2/4	65,25	64	65,5	67	60,75
R2/2	64,5	62	62	68,5	64
R 1,5/2	74,5	73	65	74,5	65
R1/2	74,5	74	70	73	61,5
R2,5/2	74	73	61,5	67	57,5
R2/0,5	79	77	64	76	74
R2/1	80	78	83	83	81
R2/3	72,3	71,2	51	74,7	81,3

Příloha 5: Výpočet R_{sq} podle skutečných rozměrů tlustých vrstev 1

	Zkoumané vzorky				
	A	B	C	D	E
ozn. odporu	$R_{sq} [\Omega]$				
R3/2	79,5	81,7	72,92	69,3	71,35
R2/4	99	84,4	80,16	67,95	73,4
R2/2	96,25	84,81	72,98	76,38	70,15
R 1,5/2	99,3	85,45	76,32	84,6	72,22
R1/2	119	92,66	113,3	87,33	63,85
R2,5/2	83,16	74,24	71,42	69,3	71,54
R2/0,5	89,79	88,8	81,36	86,9	80,77
R2/1	84,48	87,3	87	88,54	78
R2/3	78,1	82,36	83,16	81,77	78

Příloha 6: Výpočet R_{sq} podle skutečných rozměrů tlustých vrstev 2

	Zkoumané vzorky				
	F	G	H	I	J
ozn. odporu	$R_{sq} [\Omega]$				
R3/2	71,03	72,1	69,3	71,2	69,5
R2/4	69,17	74,3	70,08	77,6	63,8
R2/2	68,69	68,82	69,75	80,14	65,65
R 1,5/2	76,98	76,89	70,2	85,92	64,13
R1/2	78,97	78,44	66,95	87,91	52,89
R2,5/2	76,66	75,63	62,73	74,5	55,66
R2/0,5	84	82	81,34	83,17	87,56
R2/1	80,73	79,04	65,6	84,1	83,6
R2/3	77,76	77,75	72,4	78,77	80,26

Příloha 7: Naměřené skutečné šířky tlustých odporových vrstev pomocí mikroskopu 1

	očekávaná šířka	Zkoumané vzorky				
		A	B	C	D	E
ozn. odporu	w [mm]					
R3/2	3	3,67	3,83	3,5	3,3	3,08
R2/4	2	3	3	2,85	2,14	2,12
R2/2	2	2,77	2,95	2,78	2,28	2,11
R1,5/2	1,5	2,06	2,21	2,12	1,8	1,57
R1/2	1	1,75	1,64	1,73	1,23	0,99
R2,5/2	2,5	3,3	2,9	2,88	2,75	2,45
R2/0,5	2	2,46	2,6	2,26	2,2	1,97
R2/1	2	2,56	2,68	2,24	2,33	2
R2/3	2	2,13	2,13	2,14	2,2	1,98

Příloha 8: Naměřené skutečné šířky tlustých odporových vrstev pomocí mikroskopu 2

	očekávaná šířka	Zkoumané vzorky				
		F	G	H	I	J
ozn. odporu	w [mm]					
R3/2	3	3,13	3,06	2,95	3,4	3
R2/4	2	2,12	2,22	2,14	2,38	2,1
R2/2	2	2,13	2,22	2,25	2,34	2,02
R1,5/2	1,5	1,55	1,58	1,62	1,73	1,48
R1/2	1	1,06	1,06	1,03	1,18	0,86
R2,5/2	2,5	2,59	2,58	2,55	2,78	2,42
R2/0,5	2	2,1	2,05	1,96	2,22	1,99
R2/1	2	2,07	2,08	2,05	2,34	1,9
R2/3	2	2,15	2,14	2,4	2,25	1,99