ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd

Vrstvové technologie v elektronice

The Layers Technologies for Electronics

Bakalářská práce

Studijní program:	Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor:	Elektrotechnika a management
Vedoucí práce:	Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D.

Jakub Novák

Praha, 2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Novák** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **457039**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**

Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**

Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vrstvové technologie v elektronice

Název bakalářské práce anglicky:

The Layers Technologies for Electronics

Pokyny pro vypracování:

1. Popište vlastnosti a strukturu tenkých a tlustých vrstev. Uveďte jejich specifika.
2. Seznamte se s technologiemi používanými v elektronice pro nanášení tenkých a tlustých vrstev.
3. Připravte vzorky tenkovrstvých a tlustovrstvých struktur. Změřte a vyhodnoťte jejich parametry.
4. Proveďte ekonomické zhodnocení zvolených tenkovrstvých technologií z hlediska výrobních nákladů.

Seznam doporučené literatury:

[1] Gupta, T.: Handbook of thick- and thin-film hybrid microelectronics. New Jersey, 2003
[2] Mach, P., Skočil, V., Urbánek, J.: Montáž v elektronice, ČVUT Praha 2001
[3] Horynová, E: Nevodivé tenké vrstvy vytvořené naprašováním, diplomová práce, FEL ČVUT Praha 2017
[4] 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:

Ing. Bc. Blanka Kučerková, katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd FEL

Datum zadání bakalářské práce: **25.09.2019** Termín odevzdání bakalářské práce: **14.08.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

Ing. Ivana Beshajová Pelikánová, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D. 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

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

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 _____ _____

Jakub Novák

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucí bakalářské práce Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové, Ph.D. za odborné vedení a také za trpělivost, pomoc při praktické části práce a poskytnutí informací pro ekonomickou část práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá technologiemi tenkých a tlustých vrstev. Teoretická část práce je zaměřena na popis elektrických a mechanických vlastností a dalších specifik tenkých a tlustých vrstev. Dále jsou probrány metody používané pro jejich nanášení. V praktické části práce je popsána příprava vzorků tenkovrstvých struktur pomocí napařování a naprašování a tlustovrstvých struktur pomocí sítotisku. Poté jsou změřeny a vyhodnoceny vlastnosti těchto vzorků. Poslední část práce je věnována stanovení nákladů na výrobu vzorků pomocí technologií napařování a naprašování.

Klíčová slova

vrstvové technologie, tenká vrstva, tlustá vrstva, napařování, naprašování, sítotisk, měření profilu, měření elektrického odporu, náklady na výrobu

Abstract

This bachelor thesis deals with thin-film and thick-film technologies. The theoretical part of the thesis is focused on the description of the electrical and mechanical properties and other specifics of thin and thick films. Then the methods used for their deposition are covered. The practical part of the thesis describes the preparation of samples of thin-film structures by evaporation and sputtering and thick-film structures by screen printing. Then the properties of these samples are measured and evaluated. The last part of the thesis covers the determination of manufacturing costs of the samples produced by evaporation and sputtering technologies.

Keywords

film technologies, thin film, thick film, evaporation, sputtering, screen printing, profile measurement, electrical resistance measurement, manufacturing costs

Obsah

1 Úvod ... 3
2 Technologie tlustých vrstev ... 4
2.1 Tlustá vrstva ... 4
2.1.1 Vlastnosti tlustých vrstev ... 4
2.2 Pasty v tlustovrstvé technologii ... 6
2.2.1 Rozdělení tlustovrstvých past podle složení ... 6
2.2.2 Rozdělení tlustovrstvých past podle funkce ... 8
2.3 Substráty v tlustovrstvé technologii ... 9
2.3.1 Anorganické substráty ... 9
2.3.2 Organické substráty ... 10
2.4 Metody nanášení tlustých vrstev ... 10
2.4.1 Sítotisk ... 10
2.4.2 Šablonový tisk ... 11
2.4.3 Micro-screen ... 12
2.4.4 Dispensing ... 12
2.5 Tepelné zpracování nanesených tlustých vrstev ... 13
2.5.1 Výpal ... 13
2.5.2 Vytvrzování ... 14
3 Technologie tenkých vrstev ... 15
3.1 Tenká vrstva ... 15
3.1.1 Rozdíly mezi tenkými vrstvami a objemovými materiály ... 15
3.1.2 Vlastnosti tenkých vrstev ... 16
3.2 Obecný průběh vzniku tenké vrstvy ... 18
3.3 Metody nanášení tenkých vrstev ... 19
3.3.1 Napařování ... 20
3.3.2 Naprašování ... 23
3.3.3 Chemická depozice ... 26
4 Vzorky testovacích struktur tlustovrstvé technologie ... 27
4.1 Průběh tisku vzorků tlustých vrstev ... 27
4.2 Měření odporu vzorků tlustých vrstev ... 28
4.2.1 Závislost odporu na rozměrech vodivé dráhy ... 29
4.2.2 Výpočet odporu na čtverec ... 33
4.3 Měření profilu vzorků tlustých vrstev ... 34

4.4 Kontrola vzorků tlustých vrstev pomocí mikroskopu 35
5 Vzorky testovacích struktur tenkovrstvých technologií 38
5.1 Příprava vzorků tenkých vrstev 38
5.1.1 Průběh napařování 38
5.1.2 Průběh naprašování 40
5.2 Měření vlastností vzorků tenkých vrstev 42
5.2.1 Vlastnosti vzorků napařování 43
5.2.2 Vlastnosti vzorků naprašování 46
5.3 Kontrola vzorků tenkých vrstev pomocí mikroskopu 49
6 Porovnání výrobních nákladů technologií tenkých vrstev 52
6.1 Kalkulace nákladů 52
6.1.1 Odpisy 53
6.1.2 Diskontní sazba 53
6.1.3 Anuita 54
6.1.4 Inflace 54
6.2 Stanovení výrobních nákladů technologie napařování 54
6.2.1 Náklady na zaměstnance pro napařování 55
6.2.2 Odpisy zařízení pro napařování 56
6.2.3 Náklady na materiál pro napařování 56
6.2.4 Náklady na elektrickou energii pro napařování 56
6.3 Stanovení výrobních nákladů technologie naprašování 57
6.3.1 Náklady na zaměstnance pro naprašování 57
6.3.2 Odpisy zařízení pro naprašování 58
6.3.3 Náklady na materiál pro naprašování 58
6.3.4 Náklady na elektrickou energii pro naprašování 59
6.3.5 Náklady na pracovní plyn pro naprašování 59
6.4 Struktura nákladů 60
7 Závěr 62
Seznam použité literatury 65
Seznam tabulek 67
Seznam obrázků 67
Seznam příloh 68

1 Úvod

Vrstvové technologie představují v současné době klíčový prvek ve výrobě elektronických zařízení i v dalších odvětvích průmyslu, které se staly nedílnou součástí moderní civilizace. Je navíc pravděpodobné, že se využití těchto technologií bude nadále rozšiřovat. Při stále pokračujícím vývoji a trendu miniaturizace jsou vrstvové technologie jedním z důležitých faktorů umožňujících pokrok ve výrobě elektronických zařízení a splnění stoupajících technologických nároků při snížení nebo zachování současných ekonomických nákladů na výrobu. Proto jsou současné vrstvové technologie nadále vyvíjeny a vlastnosti vrstev zlepšovány. Během depozice je totiž třeba kontrolovat rozsáhlé množství faktorů, které zásadně ovlivňují výslednou kvalitu vrstvy. Vzhledem k tomu, o jak obsáhlé téma se jedná, není v práci tohoto rozsahu možné provést detailní rozbor všech technologií. Cílem této práce je spíše stručný úvod do vybraných vrstvových technologií, experimentální prověření vlivu určitých faktorů na vlastnosti vrstev a shrnutí základních teoretických i praktických poznatků.

V první teoretické části této práce se budu zabývat technologií tlustých vrstev. Uvedu přehled past, které lze použít pro tvorbu motivu a jejich vlastnosti. Dále provedu seznámení s jednotlivými metodami nanášení pasty na substrát a s procesem výpalu a vytvrzování naneseného motivu.

Druhá teoretická část práce bude věnována technologii tenkých vrstev. Zaměřím se na rozdíly mezi tenkými vrstvami a objemovými materiály a provedu popis obecného průběhu vzniku tenké vrstvy. Uvedu také důležité vlastnosti tenkých vrstev. Dále se budu věnovat jednotlivým způsobům nanášení pomocí tenkovrstvých technologií.

Ve třetí části práce budu zkoumat vlastnosti vzorků tlustých vrstev připravených pomocí sítotisku. Budu se snažit ověřit vliv rozměrů nanesené tlusté vrstvy na její parametry (především elektrický odpor a odpor na čtverec). Měřené vzorky budou také podrobeny zkoumání pomocí optického přístroje za účelem podrobnějšího prozkoumání vad, které jsou pouhým okem špatně viditelné.

Čtvrtá část práce bude věnována přípravě vzorků tenkých vrstev při definovaných podmínkách. Následně vzorky podrobím měření elektrického odporu a tloušťky. Výsledky měření využiji k vyhodnocení vlivu rozdílných podmínek při tvorbě tenké vrstvy na její vlastnosti.

V poslední části práce se budu zabývat porovnáním použitých tenkovrstvých technologií z hlediska nákladů na výrobu jednoho vzorku.

2 Technologie tlustých vrstev

Pro technologii tlustých vrstev stejně jako pro ostatní vrstvové technologie platí, že tloušťka nanášené vrstvy je podstatně menší než ostatní rozměry vrstvy. Tvorba tlusté vrstvy je nevakuový depoziční proces, přičemž typickým způsobem depozice je nanášení pasty na podložku přes síto, šablonu nebo pomocí dispenseru. Nejčastěji používanými způsoby pro nanášení tlustých vrstev jsou sítotisk a šablonový tisk. Významnou oblast uplatnění technologie tlustých vrstev představuje výroba desek plošných spojů. Další využití této technologie najdeme např. při vytváření odporů v hybridních integrovaných obvodech, senzorů, solárních článků, topných těles a dalších prvků.

2.1 Tlustá vrstva

Vrstva vzniklá tlustovrstvou technologií je amorfní struktury. Je tedy tvořena částicemi, které nemají pravidelnou krystalickou strukturu. Tloušťka vrstvy je výrazně větší než střední volná dráha elektronu daného materiálu, ze kterého je vrstva vytvořena, což je dráha, kterou urazí tato částice mezi dvěma srážkami. Vypálená (nebo vytvrzená) vrstva má zpravidla tloušťku zhruba od jednotek μm do desítek μm.

2.1.1 Vlastnosti tlustých vrstev

Vlastnosti tlusté vrstvy jsou závislé především na chemickém složení materiálu pasty a na použitém substrátu. Na rozdíl od tenkovrstvé technologie jsou tyto vlastnosti méně závislé na tloušťce vrstvy, ovšem vliv tloušťky na vlastnosti tlusté vrstvy také není zanedbatelný.

2.1.1.1 Odpor na čtverec

Z elektrických vlastností tlustých vrstev se nejčastěji setkáme s odporem na čtverec. Odpor na čtverec vyjadřuje velikost odporu vrstvy čtvercového tvaru. Uvažujeme tedy část vrstvy, jejíž šířka w je rovna její délce l. Hodnota vrstvového odporu je stanovena pro určitou tloušťku vrstvy h, kterou bude vrstva mít při dodržení předepsaného technologického postupu při její výrobě. Mezi odporem vodivé dráhy R a odporem na čtverec $R_{\square}$ můžeme zavést vztah:

$$R = R_{\square} \frac{l}{w} \ [\Omega] \tag{1}$$

kde l je délka vrstvy a w je její šířka. Teoretickou hodnotu odporu R také můžeme stanovit podle vztahu:

$$R = \rho \frac{l}{wh} \tag{2}$$

kde ρ je rezistivita materiálu a h je tloušťka vrstvy.

2.1.1.2 Elektrická vodivost

Dalším typickým elektrickým parametrem je elektrická vodivost G, která je převrácenou hodnotou elektrického odporu R. Elektrická vodivost vyjadřuje schopnost látky vést elektrický proud. Čím je tedy elektrická vodivost vyšší, tím větší elektrický proud látkou prochází při stejném napětí. Vodivost určíme podle vztahu:

$$G = \frac{I}{U}\ [S] \tag{3}$$

kde I je elektrický proud procházející látkou a U je velikost napětí na jejích koncích.

2.1.1.3 Rezistivita

Rezistivita ρ je materiálová konstanta, vyjadřující elektrický odpor vodiče jednotkové délky a jednotkového průřezu. Rezistivitu určíme ze vztahu:

$$\rho = \frac{RS}{l}\ [\Omega\mathrm{m}] \tag{4}$$

Kde R je elektrický odpor vodiče, S je jeho obsah kolmého průřezu a l je jeho délka.

2.1.1.4 Vrstvová kapacita

Tato vlastnost vrstvy se udává v případě dielektrických vrstev. Vrstvová kapacita je definována jako měrná hodnota vztažená ke konstantní tloušťce dielektrika. Vzorec pro výpočet vrstvové kapacity vychází ze vztahu pro deskový kondenzátor:

$$C = 0{,}0885\varepsilon_d \frac{ab}{t_d} = C_0 ab = C_0 S_c \tag{5}$$

kde ε_d je permitivita dielektrika, t_d je tloušťka dielektrika, a, b jsou rozměry stran kondenzátoru, C_0 je měrná vrstvová kapacita a S_c je plocha kondenzátoru.

2.1.1.5 Teplotní koeficient odporu

Velikost elektrického odporu se s rostoucí teplotou daného materiálu zvětšuje. Teplotní koeficient odporu α udává největší relativní změnu odporu materiálu odpovídající nárůstu teploty o 1 °C v rozsahu teplot, ve kterých je tato změna vratná. Teplotní koeficient odporu je dán vztahem:

$$\alpha = \frac{\Delta\mathrm{R}}{R_0 \Delta\mathrm{t}}\ [K^{-1}] \tag{6}$$

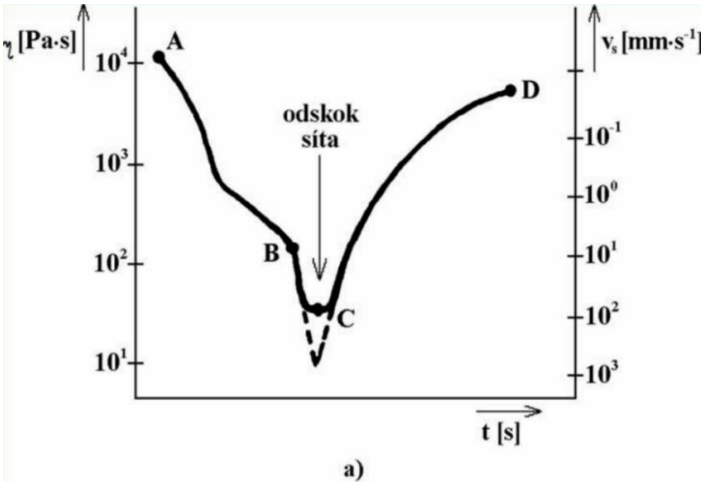
kde $\Delta\mathrm{R}$ je změna elektrického odporu při změně teplot $\Delta\mathrm{t}$ a R_0 je počáteční velikost odporu.

2.1.1.6 Proudová zatížitelnost

Proudová zatížitelnost vyjadřuje maximální velikost proudu, který může protékat vodičem, aniž by byla ovlivněna funkce obvodu nebo byla překročena provozní teplota vlivem tepelných účinků elektrického proudu. Důsledkem překročení provozní teploty může být přerušení vodivé cesty, roztavení pájky nebo poškození součástky na desce plošných spojů.

2.2 Pasty v tlustovrstvé technologii

Vrstvy jsou na substrátu tvořeny z materiálu ve formě past. Používají se pasty tixotropní kompozice, jejichž viskozita se mění v závislosti na mechanickém tlaku, aby vykazovaly dobrou adhezi k substrátu nebo k jiné již dříve vypálené tlusté vrstvě v případě vícevrstvých struktur.



Obr. 1: Průběh viskozity pasty v procesu nanášení [4]

2.2.1 Rozdělení tlustovrstvých past podle složení

Podle jejich složení můžeme pasty pro tlustovrstvou technologii rozdělit na anorganické a organické.

2.2.1.1 Anorganické pasty

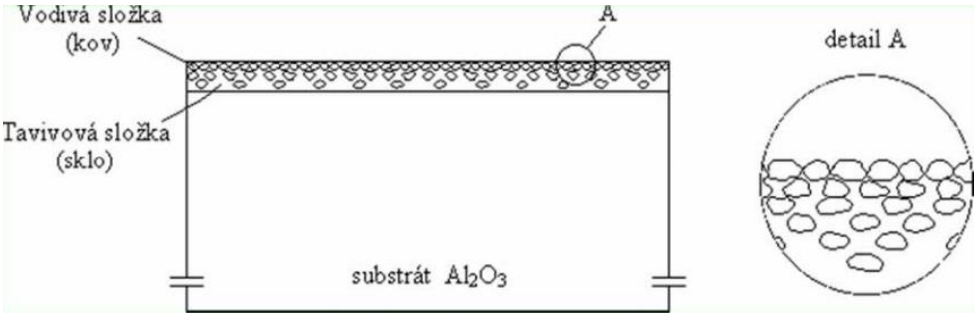
Anorganická pasta je nehomogenní směsí čtyř základních složek o různých chemických a fyzikálních vlastnostech. Jedná se o funkční, pojivovou, organickou a modifikující složku.

Funkční složka zajišťuje hlavní vlastnosti pasty. Liší se tedy podle funkce dané pasty. Ve vodivých pastách jsou to částice drahých kovů (např. Ag, Au, Pt, Pd atd.). V odporových pastách se jedná o kovy nebo oxidy kovů (např. Ag, RuO_2). V dielektrických pastách tuto složku představuje keramika a sklo (Al_2O_3, olovnatoboritokřemičité sklo aj.).

Pojivová (adhezní) složka anorganické pasty, zajišťuje pevné spojení pasty s podložkou. Tato složka se také označuje jako matrice. Pro tento účel se většinou používá skleněná frita ve formě velmi jemného prášku z olovnatoboritokřemičitého, vizmutokřemičitého nebo hlinitokřemičitého skla. Z celkového hmotnosti pasty zaujímá tato složka zhruba 2 % až 3 %. Ke spojení pasty s podložkou dochází výpalem tlusté vrstvy při teplotě nad 800 °C. Proto i použitý substrát musí být vhodně zvolen s ohledem na tuto vysokou vypalovací teplotu. Pro anorganické pasty se používají substráty z keramiky a skla.

Organická složka anorganické pasty se skládá z polymerní a rozpustidlové části a zajišťuje funkci nosiče funkční a pojivové složky. Polymerní část je obvykle tvořena polyvinylacetátem, polyvinylalkoholem, etylcelulózou apod. Rozpustidlovou část tvoří např. xylén nebo terpentýn.

Modifikující složka anorganické pasty umožňuje upravit vlastnosti pasty při tisku, a to především její viskozitu. Je tvořena nejčastěji borovicovým olejem, terpineolem a jeho izomery nebo butylkarbizolacetátem. Tato složka je přítomná jen do fáze vypalování vrstvy. Následně během sušení a počátku výpalu organická i modifikující složka v oxidační atmosféře vyhoří.



Obr. 2: Struktura vypálené tlusté vrstvy [4]

2.2.1.2 Organické pasty

V případě organických (polymerních) past přebírá funkci složky pojivové a modifikující materiálově odlišná organická složka, která je tvořena na základě polymerních jednosložkových pryskyřičných soustav. Funkční složka organických past má také odlišnou skladbu a její funkci může zcela nahradit samotná pryskyřice.

Výhodou organických past je, že nejsou vypalovány, ale pouze vytvrzovány. Vytvrzovací teplota nepřesahuje 200 °C, což znamená, že na rozdíl od anorganických past mohou být organické pasty použity i pro tisk na desky plošných spojů nebo plastové fólie, pro které je nevhodná vysoká vypalovací teplota. Nevýhodou takto vytvořených vrstev je ale horší odolnost vůči vlhkosti a nižší elektrická i tepelná vodivost. To souvisí také s nižší maximální pracovní teplotou a tím i omezeným výkonovým zatížením.

2.2.2 Rozdělení tlustovrstvých past podle funkce

O tomto kritériu rozdělení rozhoduje funkční složka dané pasty. Podle funkce můžeme tlustovrstvé pasty rozdělit na vodivé, odporové, dielektrické (izolační) a speciální.

2.2.2.1 Vodivé pasty

Jedná se o pasty s vysokou elektrickou vodivostí, které jsou používány např. k propojení částí obvodu, na kontakty rezistorů nebo elektrody kondenzátorů.

Funkční složkou anorganických i polymerních vodivých past jsou drahé a ušlechtilé kovy s nízkou rezistivitou, jako je stříbro, zlato, platina, paládium, ale i jejich slitiny Au-Pt, Au-Pd, Ag-Pd, jejichž výhodou je také stálost a odolnost vůči vlivům prostředí. Vodivá vrstva získává očekávanou elektrickou vodivost až teprve po jejím vypálení. V případě vrstev na principu skelné vazby dojde vypálením k vyhoření organické složky a sintrování (slinutí) částic drahých kovů se sklem. Jako funkční složka vodivé pasty může být použita také měď, jejíž výhodou je dobrá hodnota povrchové rezistivity zhruba 1,5 až 2 mΩ na čtverec. Dalšími výhodami jsou její dobrá pájitelnost, nízká migrace iontů, a především nízká cena. Nevýhodou je potřeba vypalování takové vodivé pasty s měděnou funkční složkou v dusíkové atmosféře nebo ve vakuu, aby se zabránilo tvorbě oxidů.

2.2.2.2 Odporové pasty

Pro funkční složku odporové pasty jsou používány opět různé směsi drahých kovů a jejich oxidy (např. RuO_2, IrO_2). Požadovanou hodnotu odporu můžeme ovlivnit poměrem vodivé (kovové) části a skelné složky. Takto je možné nastavit hodnot odporu na čtverec ve velkém rozsahu řádově 10^1 Ω/□ až 10^9 Ω/□. V případě polymerních odporových past nejčastěji představuje funkční složku uhlík. Použitím odporových past se technologií tlustých vrstev vyrábí např. jedny z nejrozšířenějších rezistorů označované jako SMD (surface mount device) rezistory. Skládají se z oxidů kovů nanesených na keramický substrát a jsou oblíbené zejména pro svou nízkou výrobní cenu.

2.2.2.3 Dielektrické a izolační pasty

Funkční složku izolační pasty představuje obvykle Al_2O_3 nebo jiná keramika ve formě jemného prášku. V dielektrických pastách se jedná materiály používané zejména pro keramické kondenzátory na bázi TiO_2 (typ I) nebo na bázi $BaTiO_3$ (typ II). V případě polymerových izolačních vrstev pak funkční složka zcela chybí, protože samotný polymer přebírá její úlohu. Dielektrické pasty se používají obvykle pro výrobu kondenzátorů. Jejich důležitou vlastností je tedy permitivita.

2.2.2.4 Speciální pasty

Do této kategorie můžeme zařadit další typy past, jejichž využití je ve speciálních aplikacích. Patří sem např. pasty termorezistivní (termistorové), piezoelektrické, magnetické, luminiscenční, stínící, pasty citlivé na vlhkost, pasty pro chemické senzory aj.

2.3 Substráty v tlustovrstvé technologii

Elektroizolační podložku, na kterou je nanášena tlustovrstvá pasta, nazýváme substrátem. Úkolem substrátu je nést vrstvy a případně namontované součástky, zprostředkovat propojení jejich vývodů a také odvést jejich ztrátové teplo.

Při výběru materiálu substrátu jsou důležitými vlastnostmi jeho dostatečná elektrická pevnost a pevnost v ohybu. Významným parametrem je také teplotní koeficient roztažnosti. Hodnota tohoto koeficientu pro substrát by měla být co nejblíže hodnotě koeficientu pro vrstvy nanesené na tento substrát, aby nedošlo k mechanickému poškození (např. popraskání, oddělení vrstvy od substrátu) při zahřátí desky. Další důležitou vlastností substrátu je jeho tepelná vodivost, která je zpravidla požadována co nejvyšší, aby byl zajištěn dostatečný odvod tepla a deska se nepřehřívala. Substrát také musí mít co nejnižší smrštitelnost, protože jsou požadovány neměnné rozměry a vlastnosti během a po výpalu.

2.3.1 Anorganické substráty

Anorganické substráty jsou nejčastěji tvořeny keramikou nebo sklem. Skleněné substráty se používají spíše pro obvody, kde je očekáván nižší výkon, a typické jsou spíše pro technologii tenkých vrstev. Výhodou keramiky je vysoká elektrická pevnost, mechanická tvrdost, dobrá tepelná vodivost a odolnost vůči klimatickým podmínkám. Mezi nevýhody tohoto materiálu patří relativně velká křehkost. Keramické substráty se vyrábějí z jemných prášků v kombinaci s malým množstvím oxidů kovů a skla litím nebo válcováním. Pomocí příměsí je možné upravit teplotního koeficient roztažnosti substrátu na požadovanou hodnotu, aby se co nejvíce přiblížil teplotnímu koeficientu roztažnosti na něm použitých tlustovrstvých past.

Nejčastěji používaná je korundová keramika s obsahem zhruba 90 % až 99,9 % oxidu hlinitého. Vyznačuje se vysokou tepelnou vodivostí (zhruba 25 W/mK) a dobrou mechanickou odolností. Mezi další používané anorganické materiály zejména pro speciální aplikace patří berylnatá keramika s extrémně vysokou tepelnou vodivostí (až 250 W/mK). Její nevýhoda je ale vysoká cena a také toxicita při výrobě. Dále sem můžeme zařadit např. aluminium-nitridovou keramiku (tepelná vodivost zhruba 175 W/mK), substráty na bázi steatitu a forsteritu, nebo vápenatá a borosilikátová skla.

2.3.2 Organické substráty

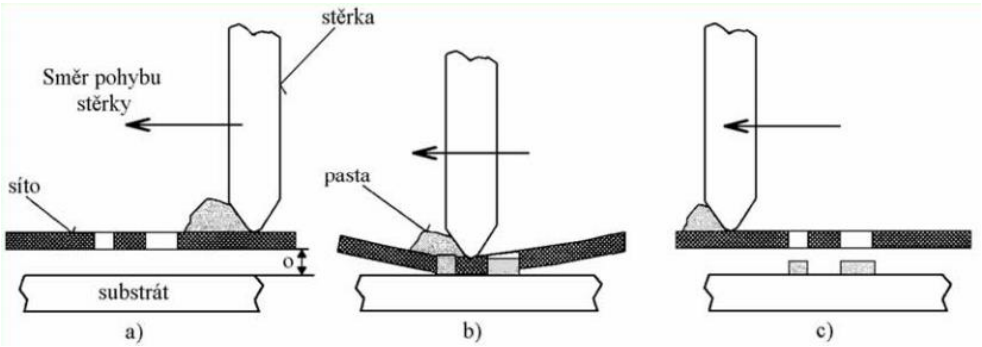
Pro polymerní tlusté vrstvy mohou být použity substráty založené na izolantu z organické pryskyřice, nejčastěji epoxidové nebo fenolické. Epoxidové substráty jsou tvořeny epoxidovou pryskyřicí, která je vyztužena pomocí listů papíru nebo skelné tkaniny. Významným epoxidovým substrátem je FR-4 (skloepoxid), který je vyztužen skelnou tkaninou. Fenolické substráty se skládají z fenolformaldehydové pryskyřice vyztužené listy papíru nebo bavlněnou či skelnou tkaninou. Velkou nevýhodou těchto materiálů je vyšší navlhavost.

2.4 Metody nanášení tlustých vrstev

V současné době existuje mnoho způsobů, jak tlustovrstvou pastu na substrát nanést. Základní technologií a stále nejčastěji používaným způsobem nanášení vrstvy je sítotisk vzhledem ke své jednoduchosti a cenové nenáročnosti. Mezi další metody patří např. šablonový tisk, micro-screening nebo metody přímého nanášení jako dispensing a jetting.

2.4.1 Sítotisk

Principem sítotisku je vytvoření motivu protlačením pasty za pomocí těrky přes volné otvory (oka) síta na substrát. Oka jsou zamaskována podle požadovaného motivu. Síto se vyrábí z nerezové oceli nebo polyesterových vláken a je napnuto v rámu z hliníku nebo oceli v určité vzdálenosti od substrátu, která se nazývá odtrh. Tato vzdálenost je typicky několik desetin milimetru. Při pohybu těrka zároveň působí silou na síto, které je touto silou přitisknuto k substrátu. Při nanášení se využívá výrazného snížení viskozity nanášeného materiálu a následného zvýšení viskozity po odskoku síta od podložky. Jakmile těrka mine tiskové otvory, síto se od podložky vlivem pružných sil oddálí a vrátí se do původní polohy.



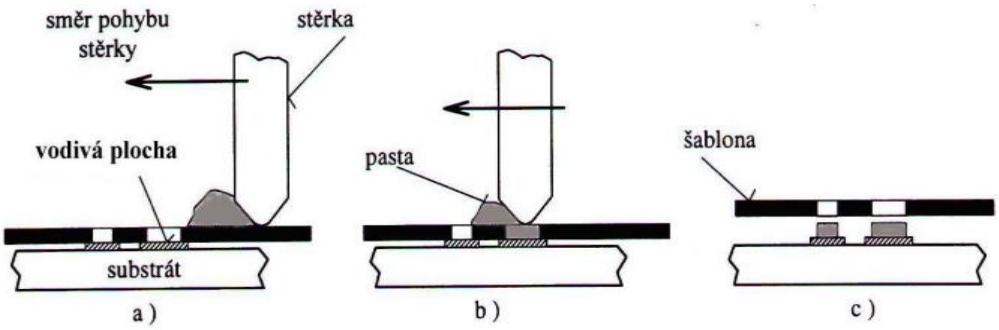
Obr. 3: Princip sítotisku [4]

Zařízení pro sítotisk můžeme rozdělit podle způsobu obsluhy systému. Zařízení pro ruční tisk, kde obsluha pohybuje těrkou vlastní silou, se využívá zejména pro výrobu v menších sériích a výhodou jsou nižší pořizovací náklady. Poloautomatická a automatická zařízení jsou již značně komplikovanější, a tedy i dražší, protože musí zajistit pohyb těrky a nastavení její rychlosti a přítlaku dle požadavků obsluhy. Takové systémy však dosáhnou nižší chybovosti, vyšší kvality, reprodukovatelnosti a jednotnosti výsledných motivů.

Množství pasty nanesené na substrát a tím i tloušťka výsledné nanesené vrstvy je určena především viskozitou a povrchovým napětím pasty, smáčivostí podložky a síta, velikostí ok, tloušťkou tkaniny, tlakem na těrku, rychlostí, tvarem, sklonem a poddajností těrky. Mezi nejčastější chyby při sítotisku patří nepřesně nanesený motiv, nerovnoměrná tloušťka vrstvy a nerovné obrysy kontur. Tyto vlastnosti mohou způsobit nehomogenitu proudové hustoty při průchodu elektrického proudu, což může vést k lokálnímu přehřívání pasty v místě s větší proudovou hustotou, a kratší životnosti vrstvy.

2.4.2 Šablonový tisk

Šablonový tisk je technologií velmi podobnou sítotisku. Místo síta je při šablonovém tisku použita šablona s otvory pro průchod pasty. Šablona je tvořena pevnou kovovou (např. ocelovou nebo bronzovou) planžetou, ve které jsou proleptáním nebo laserem vytvořeny otvory, kterými je stejně jako v případě sítotisku těrkou protlačena pasta na substrát. Šablona se přikládá přímo na podložku a odtrh je proveden až po dokončení pohybu těrky. Aby se nanesená pasta správně oddělila od šablony a zůstal tak na podložce správně zachován nanesený motiv, je nutné odtrh realizovat dostatečně rychle (zhruba 10 mm/s). Tloušťka nanesené vrstvy je zde dána tloušťkou použité šablony a lze jí tedy mnohem jednodušeji nastavit než v případě sítotisku.



Obr. 4: Princip šablonového tisku [4]

S použitím šablony přicházejí oproti sítu odlišné vlastnosti. Šablona má lepší přesnost a rozměrovou stabilitu, výsledný motiv je tedy jednolitější a přesnější než v případě sítotisku. Na druhou stranu má šablona nižší pružnost než síto. Nevýhodou šablonového tisku je také nutnost přizpůsobení návrhu tištěného motivu, aby nebyla narušena tuhost šablony, což by mohlo způsobit problémy při odskoku šablony po nanesení

pasty, proto je nutné tisknout pouze plné motivy. Není např. možné nanést motiv, který má tvar mezikruží. Zejména vhodné je použití šablonového tisku v případě drobných motivů, které by sítotisk nedovoloval z důvodu tloušťky vláken síta.

2.4.3 Micro-screen

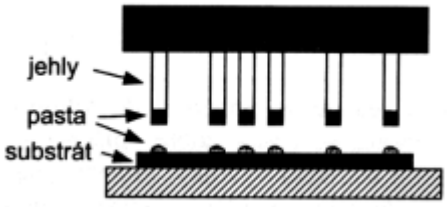
Speciální metodou šablonového tisku je tzv. micro-screen. Pro tuto technologii se používá šablona z nerezové oceli, do které jsou leptány mikrootvory. Šablona ještě navíc obsahuje těsnící vrstvu z organického materiálu, která zajišťuje, že pasta teče po přesně daných plochách a zatéká do správných otvorů. Výhodou této metody je vyšší přesnost a rozlišení výsledného obrazce (až na 50 µm). Tato metoda umožňuje realizovat daný motiv na menší ploše. V některých případech se díky tomu lze vyhnout nutnosti provedení vícevrstvého plošného spoje a využívá se toho zejména v hybridních integrovaných obvodech.

2.4.4 Dispensing

Dispensing spočívá v nanesení pasty na substrát dotykem nebo vytlačením ze zásobníku. Rozlišujeme dvě základní technologie, které se nazývají writing a jetting.

2.4.4.1 Writing

Při writingu jsou k nanesení pasty používány duté nebo plné jehly. Nejjednodušším způsob představuje ponoření plné jehly do zásobníku pasty a následné přenesení této pasty na substrát dotykem jehly v požadovaných místech. Dotykem pasta steče z jehly na substrát a vytvoří ovrstvenou plochu. Rozměry této plochy jsou závislé na viskozitě pasty, tvaru jehly a hloubce ponoru jehly do zásobníku s pastou. Nevýhodou tohoto procesu je pomalý průběh a nepřesnost. Rychlost této technologie můžeme zvýšit použitím tzv. vícejehlového pole, které umožňuje nanášet pastu na více místech zároveň.



Obr. 5: Dispensing vícejehlovým polem [2]

Častějším způsobem provedení writingu je nanášení pasty vytlačováním pomocí duté jehly. Důležitým parametrem je zde viskozita pasty a také vzdálenost konce duté jehly od substrátu. Pasta může být přes jehlu vytlačována tlakem vzduchu pístové pumpy nebo např. pomocí šroubového systému. Tímto způsobem se objem nanesené pasty mnohem lépe řídí, protože se jehlou vytlačuje pouze předem dané množství. Další výhodou je vyšší rychlost této technologie díky vynechání fáze namáčení. Rychlost procesu je dále možné

zvýšit přidáním počtu současně pracujících hlav. Výrazného (až desetinásobného) zrychlení nanášení pasty můžeme dosáhnout použitím bezkontaktního dispensingu, při kterém odpadá používání jehly.

2.4.4.2 Jetting

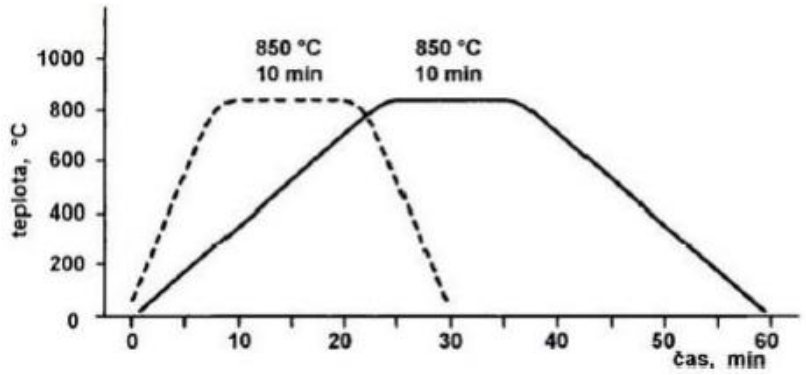
Zdokonalenou a technologicky mnohem složitější metodou je jetting. Tato technologie spočívá v ovládání dráhy letu kapky pasty vypuštěné ze zásobníku pomocí elektromagnetického pole. Dosáhneme tak vyšší rychlosti nanášení a také lepší přesnosti. Tato technologie tedy může být použita k nanášení motivů s menším průměrem a ovrstvování velmi malých plošek.

2.5 Tepelné zpracování nanesených tlustých vrstev

Tlustovrstvá pasta musí být po nanesení aktivována tepelným zpracováním, aby získala požadované mechanické a elektrické vlastnosti nebo odolnost proti chemickým vlivům. Anorganické pasty jsou vypalovány, zatímco polymerní pasty jsou pouze vytvrzovány. Tepelnou úpravou dochází chemické reakci jednotlivých složek a k pevnému spojení tlusté vrstvy se substrátem. Ke změnám dochází i ve vlastní struktuře vrstvy. Funkční složka amorfního charakteru vytvoří souvislou vrstvu na povrchu a pojivová složka vytvoří vazbu mezi substrátem a funkční složkou.

2.5.1 Výpal

Výpal anorganické pasty probíhá v oxidační nebo redukční atmosféře. Ve většině případů se pro výpal používají tunelové pece. Ve speciálních případech může být použita muflová pec, která se však většinou používá pouze v laboratorních podmínkách.



Obr. 6: Teplotní profil výpalu anorganických past [2]

Celý proces můžeme rozdělit na čtyři úseky. Nejprve jsou natisknuté pasty sušeny. Přitom dojde k odpaření těkavých složek a pasty získají vyšší mechanickou odolnost. Sušení probíhá při teplotě 70-150 °C po dobu 15-30 minut.

Další zónu můžeme označit jako předehřívací, kde dochází k postupnému nárůstu teploty na požadovanou teplotu výpalu. Účelem je zajistit, aby nárůst teploty byl pozvolný

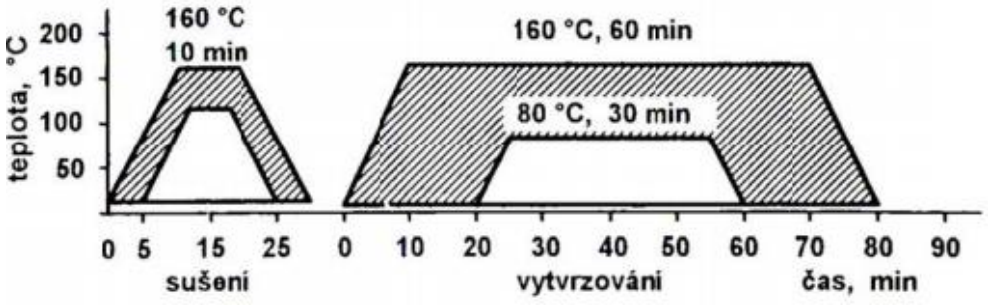
(max. 50 °C/min) a aby docházelo k rovnoměrnému ohřevu. Vlivem rozdílné rychlosti ohřevu vrstvy a substrátu by mohlo dojít k mechanickému poškození vrstvy.

Následuje vypalovací zóna, kde je udržována konstantní teplota, která je zvolena tak, aby nedocházelo k tavení složek, ale jen k jejich uvedení do plastického stavu. Teplota v této fázi dosahuje okolo 800 °C. Skleněná frita měkne a vytváří se konečná struktura vrstvy a vazba s podložkou. Funkční složka zůstává v pevném stavu a jednotlivé částice tvořící funkční složku jsou sintrovány. V této části je spálena organická složka pasty. Pokud je vypalována vícevrstvá struktura, je nutné tisknout a vypalovat jednotlivé vrstvy s postupně klesající teplotou, aby při tepelném zpracování následujících vrstev nedocházelo k měknutí a tím i degradaci předešlých vrstev.

V poslední fázi je vrstva se substrátem postupně ochlazována. Je zde stejně jako u předehřevu důležité, aby ochlazování nebylo příliš prudké.

2.5.2 Vytvrzování

Na rozdíl od anorganických past jsou polymerní pasty pouze vytvrzovány. Vytvrzování past probíhá za výrazně nižší teploty (zhruba 150 až 200 °C). Účelem vytvrzování polymerní pasty je přeměna její organické složky.



Obr. 7: Teplotní profil vytvrzování polymerních past [2]

3 Technologie tenkých vrstev

3.1 Tenká vrstva

Obecně jako tenké vrstvy označujeme amorfní, monokrystalické nebo polykrystalické struktury, které mají tloušťku jednotky μm nebo méně. Od tlustých vrstev se liší nejen svou tloušťkou, ale především způsobem depozice materiálu. Jedná se zpravidla o vrstvu materiálu o tloušťce v rozmezí desítek nm po jednotky μm. Tloušťka extrémně tenkých vrstev je srovnatelná se střední volnou dráhou elektronu.

Tenká vrstva je vytvořena usazováním jednotlivých atomů či molekul, zatímco tlustá vrstva se vytváří shromažďováním velkých clusterů, zrn apod. nebo odebíráním materiálu. Tvorba každé tenké vrstvy začíná náhodným vytvořením zárodků vrstvy (jednotlivé atomy), které je následováno tvořením dalších zárodků či růstem již vytvořených. Tyto fáze můžeme ovlivnit pomocí podmínek, za kterých je vrstva tvořena. Technologie tenkých vrstev nachází uplatnění např. na kontaktech polovodičů, dále v případě Schottkyho bariér nebo při výrobě fotovoltaických panelů. Využití existuje ale i mimo elektrotechniku např. pro povrchy vrtáků nebo k tvorbě reflexní vrstvy na zrcadlech.

3.1.1 Rozdíly mezi tenkými vrstvami a objemovými materiály

Jelikož rozměry tenkých vrstev jsou relativně blízké velikosti atomů a molekul materiálu, z nějž jsou tvořeny (oproti běžně se vyskytujícím objemům materiálů), neplatí pro ně stejné fyzikální vlastnosti a konstanty jako pro běžná tělesa. To jim na jednu stranu dává specifické vlastnosti, které jsou s výhodou využívány v množství aplikací, na druhou stranu je proto nezbytné k nim přistupovat odlišně od makroskopických těles. Mnohé znalosti elektrického chování materiálů o makroskopických objemech je možno aplikovat i na tenké vrstvy. Existuje však několik ohledů, v nichž se tyto dva světy rozcházejí. Jedná se například o následující.

Mezi jevy vznikající v důsledku tloušťky tenké vrstvy patří například kvantově-mechanický tunelový jev či povrchový rozptyl elektronů, ke kterému dochází ve chvíli, kdy je elektron na cestě po své střední volné dráze „přerušen“ kolizí s rozhraním mezi povrchem tenké vrstvy a vnějším okolím (případně další vrstvou, jež je na ni nanesena). Přestože ke stejnému efektu může docházet i u objemových materiálů, klíčovou roli zde sehrává tloušťka tenkých vrstev, která je srovnatelná se střední volnou dráhou elektronu v kovu. Povrchový rozptyl proto nabývá u tenkých vrstev mnohem většího významu. Dojde-li ke zmíněné kolizi elektronu s povrchem vrstvy, mohou nastat dva druhy rozptylu, a sice elastický (zrcadlový) nebo neelastický (nezrcadlový). Elastický rozptyl lze přirovnat k odrazu světelného paprsku v zrcadle. Elektron se od povrchu elasticky odrazí pod stejným úhlem, pod jakým na něj dopadl, a pokračuje v pohybu dále, jako by jeho střední volná dráha nebyla vůbec narušena. Tento druh rozptylu nijak nezvyšuje rezistivitu tenké vrstvy oproti objemovému kovu. Při neelastickém rozptylu ovšem dochází k tomu, že dopad elektronu

na povrch vrstvy přeruší jeho střední volnou dráhu a elektron se následně odrazí do náhodného směru, zcela nezávislého na úhlu dopadu. Kvůli tomu dochází k nárůstu měrného odporu, protože ubude jeden z elektronů, který původně zprostředkovával tok elektrického proudu vrstvou.

Dalším specifikem je vysoká chemická reaktivita tenkých vrstev. Vzhledem ke svým rozměrům jsou tenké vrstvy náchylné k narušení svých elektrických schopností v důsledku koroze, oxidace, sulfidace či absorpce vodních par.

Velmi často vykazují vodivé (kovové) tenké vrstvy větší rezistivitu a izolační tenké vrstvy vyšší měrnou vodivost než jejich protějšky v makrosvětě, přičemž tento rozdíl je především patrný právě u izolačních vrstev.

3.1.2 Vlastnosti tenkých vrstev

Vlastnosti výsledné tenké vrstvy jsou ovlivňovány zejména její tloušťkou. Dále se na vlastnostech projeví materiál, z nějž je vrstva tvořena, a jeho kvalita (čistota). Dalšími významnými faktory pro vlastnosti výsledné vrstvy jsou způsob depozice, rozdíl teplotních koeficientů vrstvy a substrátu a technologická specifika zařízení použitého k vytvoření vrstvy.

Vzhledem k jejím rozměrům jsou vlastnosti tenké vrstvy silně ovlivňovány také materiálem a vlastnostmi podložky. U substrátů je proto zapotřebí pečlivě sledovat a zajišťovat množství faktorů, mezi nimi například kvalitu a čistotu povrchu, teplotní roztažnost či schopnost vrstvy k substrátu dobře přilnout. Obvyklými materiály na výrobu substrátů pro tenké vrstvy jsou sklo, křemenné sklo, oxidovaný křemík či korund. V závislosti na povaze a náročnosti aplikace je však možno užít i řady dalších materiálů.

3.1.2.1 Vnitřní pnutí

Vnitřní pnutí patří mezi mechanické vlastnosti tenké vrstvy. K jeho vzniku je zapotřebí nerovnoměrné plastické deformace, k níž často dochází během mechanického či tepelného zpracovávání materiálu. Typickým příkladem je depozice vrstvy pomocí napařování či naprašování, při nichž se substrát i s nanesenou vrstvou poměrně značně zahřívají. Pakliže jsou jejich koeficienty teplotní roztažnosti navzájem příliš odlišné, dochází po vychladnutí k tomu, že se substrát i vrstva smršťí v nestejném poměru, čímž do systému vniká vnitřní pnutí, jež se jej snaží ohnout. Jinou z mnoha možných příčin vzniku zbytkového pnutí je rozdílnost krystalických mřížek vrstvy a substrátu. Mřížkové konstanty (vzdálenosti dvou sousedních atomů krystalové mřížky) vrstvy a substrátu bývají odlišné, avšak na rozhraní mezi vrstvou a podložkou musejí mít obě stejné rozměry, aby k sobě dokázaly přilnout.

Zbytkové pnutí je v oboru tenkých vrstev jevem velice nežádoucím, protože může vést k přetržení vrstvy či jejímu lokálnímu odtržení od substrátu. Proto je třeba vzniku vnitřního pnutí buď předcházet, nebo jej po deponování vrstvy odstranit. Toho lze docílit

například za pomoci dlouhodobého působení pozvolně se měnící zvýšené teploty. Tepelné deformace a pohyby částic materiálu mohou přispět ke snížení vnitřního pnutí.

3.1.2.2 Adheze

Vzájemná adheze neboli přilnavost substrátu a na něj deponované vrstvy je klíčovou vlastností pro funkci systému. Adheze tenkých vrstev je závislá zejména na průběhu počátečního stadia růstu vrstvy. Vazba vrstvy se substrátem může být vytvořena i pouze na fyzikální bázi. Adheze je však mnohem silnější, pokud vznikne chemická vazba vrstvy se substrátem. Nabízí se tedy, že stěžejní roli bude pro schopnost adheze hrát kvalita povrchu podložky. Základem je definovaný povrch a tvar substrátu a samozřejmě i jeho dostatečná čistota. Substrát proto podléhá předdepozičním přípravám, během nichž je upravován jeho tvar, čistota či chemické složení povrchu tak, aby byla umožněna co nejlepší adheze s deponovanou vrstvou. Důležité je opět dbát i na to, aby si byly koeficienty teplotní roztažnosti substrátu a deponované vrstvy dostatečně blízké. V opačném případě může v důsledku zahřátí systému dojít k jeho deformaci, která vyvolá obdobný efekt jako v případě zbytkového pnutí, tedy i možnou místní ztrátu adheze a odtržení vrstvy od substrátu. Adhezi můžeme zlepšit vícevrstvovou strukturou, ve které první vrstva vytváří chemické vazby a další vrstvy jsou pak kotveny na tento základ.

3.1.2.3 Vodivost kovových tenkých vrstev

Elektrická vodivost tenké vrstvy opět silně závisí na její tloušťce. To se týká zejména vrstev, jejichž tloušťka dosahuje pouze hodnot v řádu nanometrů. V případě takto extrémně tenkých vrstev jsou totiž mechanismy elektrické vodivosti zcela odlišné od mechanismů vedení proudu v kompaktních materiálech. Čím tlustší vrstvu zkoumáme, tím více se vliv tloušťky vrstvy zeslabuje a vodivost se blíží hodnotám běžným u objemových materiálů. Vodivost, respektive rezistivita, kovových objemových materiálů může být popsána pomocí závislosti známé jako Matthiessenovo pravidlo. Tohoto pravidla lze však užít i při popisu vodivosti či rezistivity tenkých kovových vrstev. Jedním z jeho možných vyjádření je následující vztah:

$$\rho_T = \rho_{th} + \rho_I + \rho_D \tag{7}$$

Tato podoba Matthiessenova pravidla říká, že celková rezistivita kovové tenké vrstvy ρ_T je vypočtena prostým součtem tepelné rezistivity ρ_{th}, rezistivity vzniklé v důsledku nečistot ve vytvořené vrstvě ρ_I a rezistivity vyvolané strukturními poruchami materiálu ρ_D. Tepelná rezistivita vzniká jako následek srážek elektronů pohybujících se materiálem s fonony neboli kvazičásticemi vyjadřujícími kmitání a vibrace krystalové mřížky kovu. S rostoucí teplotou kovu se kmitání mřížky zesiluje, což vede k nárůstu tepelné rezistivity, která tak získává dominantní vliv na celkovou rezistivitu vrstvy. Rezistivity nečistot a strukturních poruch jsou teplotně nezávislé a principiálně vznikají ze stejného důvodu, bývají proto mnohdy uváděny pod jednou společnou hodnotou. Příčinou jejich

vzniku je rozptyl elektronů na nečistotách materiálu nebo na poruchách krystalové mřížky jako jsou vakance (chybějící částice v mřížce) či hranice zrn krystalu.

3.1.2.4 Magnetické vlastnosti

Magnetické tenké vrstvy nacházejí své uplatnění například ve výpočetní technice, kde jsou využívány k výrobě paměťových čipů a obecně paměťových zařízení, jejichž vlastnosti je mohou v některých aplikacích činit výhodnějšími než klasické pevné disky či flash paměti. Základem jsou v tomto případě feromagnetické vlastnosti takovýchto tenkých vrstev. Magnetické vlastnosti materiálů obecně vycházejí z jevů kvantové mechaniky. Pro tento účel si lze elektron představit jako nabitou částici obíhající kolem atomového jádra. Jeho moment hybnosti je dán jak samotným obíháním okolo jádra, tak především jeho spinem. Takto obíhající elektron pak vytváří pomyslnou elementární proudovou smyčku, která zase vyvolává magnetický dipólový moment. Tyto dipólové momenty pak mohou, v závislosti na spinu, obrazně směřovat jen do jednoho ze dvou vzájemně obrácených směrů. Pakliže se v nějakém materiálu vektory sousedních dipólových momentů přirozeně srovnají paralelně (a tedy i souhlasně orientují), vzniknou tak malé oblasti látky se shodnou orientací dipólů, tzv. magnetické domény. Mluví se pak o feromagnetickém materiálu.

Výše uvedený popis se týká principu vzniku magnetických vlastností látek obecně, bez ohledu na jejich objem. I magnetické vlastnosti tenkých vrstev jsou však vzhledem k jejich rozměrům v některých ohledech odlišné od objemových materiálů, jako tomu bylo u vlastností popisovaných dříve. V rovnoměrně zmagnetovaném feromagnetiku jsou magnetické domény natočeny shodně se směrem vnějšího pole, které tento efekt vyvolalo, a jednotlivé sousedící magnetické dipóly, resp. elektrony, na sebe působí vzájemnými vazbami. Lze snadno nahlédnout, že elektrony na povrchu feromagnetika jsou ovlivňovány menším počtem vazeb, neboť „z jedné strany“ již nemají další sousedy. Tento efekt pak snižuje nasycenou hodnotu magnetizace dosažitelnou u povrchu oproti vnitřku objemu. Zatímco u těles o velkých objemech lze tuto skutečnost zanedbat, v tenkých vrstvách je poměr počtu elektronů na povrchu k jejich celkovému počtu mnohem větší, a proto je třeba s tímto jevem počítat.

Významnou roli pro magnetické vlastnosti tenké vrstvy sehrává magnetická anizotropie, tedy snaha vektoru magnetizace upřednostnit jeden konkrétní směr z více možných. Samotný tvar tenké vrstvy je jedním z faktorů ovlivňujících vznik anizotropie. Vektor magnetizace tak mívá tendenci ležet podél vrstvy, jsou však i případy, kdy leží naopak kolmo k rovině vrstvy. Obecně lze říct, že na anizotropii má vliv řada okolností, mezi nimi třeba použitý způsob depozice vrstvy, případné magnetické pole působící na vrstvu během depozice nebo úhel dopadu deponovaných částic na substrát.

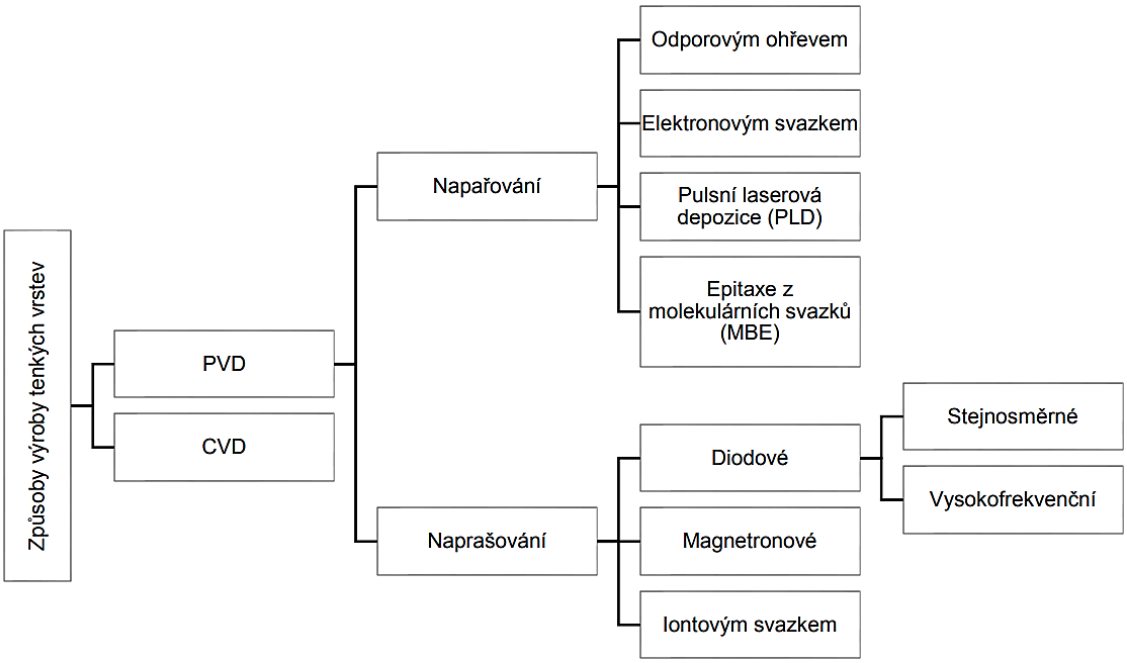
3.2 Obecný průběh vzniku tenké vrstvy

V počáteční fázi musí dojít k vytvoření vhodných částic, které jsou následně přenášeny na substrát. Když částice naráží do substrátu, ztrácí normální složku rychlosti a

usazují se na povrchu substrátu. Protože částice a substrát nejsou v tepelné rovnováze, mohou se částice pohybovat po povrchu substrátu. Částice se navzájem setkávají a tvoří větší clustery. Tyto clustery jsou termodynamicky nestabilní a mohou po čase desorbovat, pokud jsou tak nastaveny podmínky depozice. Pokud jsou podmínky depozice nastaveny tak, že clustery dosáhnou určité kritické velikosti (stanou se termodynamicky stabilní) dříve než desorbují, pak je překonána nukleační bariéra a začíná fáze nukleace. 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 také nazývají ostrovy. 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 a dále může docházet ke zvětšování tloušťky vrstvy.

3.3 Metody nanášení tenkých vrstev

Existuje široké množství metod užívaných pro vytváření tenkých vrstev. Používané depoziční postupy můžeme v zásadě rozdělit na metody fyzikální (PVD), metody chemické (CVD) a metody kombinující fyzikální a chemické principy. Nejedná se však o jediný způsob klasifikace. V následujícím přehledu (na obr. 8) je uveden přehled různých (nikoli však všech) metod užívaných k výrobě tenkých vrstev.



Obr. 8: Způsoby výroby tenkých vrstev [3]

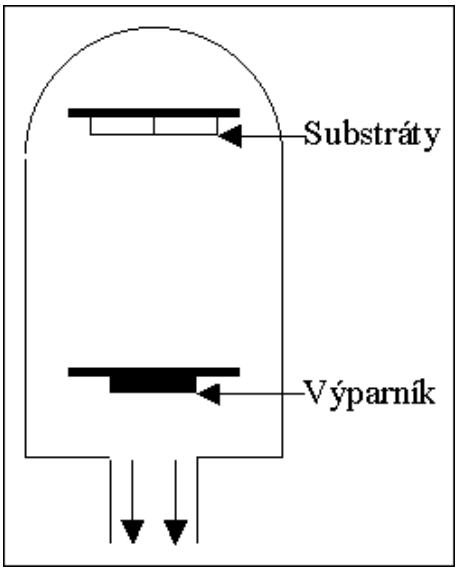
Protože se praktická část této práce zabývá napařováním a naprašováním, budou těmto způsobům výroby věnovány následující samostatné kapitoly.

3.3.1 Napařování

Napařování je jednou ze základních fyzikálních depozičních metod užívaných pro vytváření tenkých vrstev, jejíž podstata spočívá ve vytvoření par nanášeného materiálu a jejich transportu a následném ulpění na substrátu.

3.3.1.1 Princip vakuového napařování

Depoziční proces se odehrává v uzavřeném recipientu, v němž je vytvořeno vysoké vakuum o zbytkovém tlaku v rozmezí 10^{-4} až 10^{-6} Pa. Díky tomu dojde ke zvětšení střední volné dráhy částic deponovaného materiálu, jimž by za normálního tlaku „překážely" částice vzduchu a bránily jim v dosažení substrátu, což by kromě jiného mělo za následek i velmi nerovnoměrně napařenou vrstvu. Vakuum je v recipientu vytvořeno pomocí výměv, obvykle v několika krocích, kdy je z prostoru nejprve odčerpán vzduch na tlak v řádu jednotek Pa pomocí jedné výměvy (tzv. předčerpání) a následně je další výměvou dosaženo požadované úrovně vakua. Po předčerpání (avšak za stálého chodu výměvy) je někdy prováděno tzv. iontové čistění – přivedením napětí na speciální elektrody se vytvoří doutnavý výboj. Tento výboj ionizuje molekuly zbylého vzduchu v recipientu, které následně bombardují vnitřní povrch recipientu a uvolňují tak povrchově vázané molekuly plynů, které jsou pozůstatkem atmosférického tlaku, který v recipientu původně byl. Po ukončení čerpání na vysoké vakuum se v recipientu ustálí rovnovážný tlak jako výchozí stav pro průběh samotného napařování.



Obr. 9: Vakuové napařování [8]

Páry deponovaného materiálu se šíří z odpařovacího zdroje (výparníku), dle svého typického tvaru nazývaného též lodička. Výparníků může být v recipientu umístěno i více, to pro případ, že by bylo požadováno vytvoření vrstvy složené z několika různých materiálů. Výparníky jsou pak zahřívány současně. Deponovaný materiál a s ním i výparník musejí být

zahřáty na takovou teplotu, aby došlo k odpaření nanášeného materiálu. Teplota odpařovaných částic dosahuje hodnoty až 2500 °C a energie asi 0,3 eV. Tímto lokálním zvýšením teploty je narušen rovnovážný stav v recipientu a z výparníku o vyšší teplotě proudí částice na podložku o teplotě nižší. Při styku napařovaného materiálu s podložkou dochází k jeho kondenzaci, a tím k vytváření vrstvy. Po ukončení napařování je možné recipient opět zavzdušnit a substrát s napařenou tenkou vrstvou vyjmout.

Před substrátem je zpravidla umístěna maska přesně definující tvar a rozměry nanášené vrstvy. Dříve nejčastěji užívaným typem byla nepřímá maska vyrobená z tenké kovové fólie, do které je vyleptán fotolitografickou technikou požadovaný motiv. Maska je vzdálena od substrátu několik desetin milimetru. Dnes mnohem používanějším typem je přímá maska, která umožňuje vyšší přesnost přenosu obrazce a dovoluje přenos jakéhokoli motivu včetně uzavřených tvarů (např. mezikruží). Přímá maska je vytvořena tak, že je na podložku nanesena vrstva světlocitlivé látky, která je přes matrici s požadovaným motivem exponována.

3.3.1.2 Metody zahřívání odpařovaného materiálu

Nanášený materiál může být zahříván (a odpařován) různými způsoby. Účelem ohřívacího mechanismu je zahřát nanášený materiál na teplotu dostatečnou pro jeho odpaření, přičemž však nesmí odpařovaný materiál jakkoli kontaminovat ani s ním reagovat. Neměl by během celého procesu ani narušovat vakuum v recipientu uvolňováním kyslíku, vodíku, dusíku či jiných plynů.

Nejčastěji používaným způsobem je odporový ohřev. Odpařovaný materiál je zde umístěn ve zdroji, který musí mít vyšší bod tání, než je bod tání odpařovaného materiálu. Velmi často používané materiály jsou žáruvzdorné kovy jako wolfram (teplota tání 3422 °C), molybden (teplota tání 2623 °C), a tantal (teplota tání 3020 °C). Z těchto materiálů jsou vytvořeny drátky stočené do spirály nebo kuželu. Také se může jednat o kovový pásek vytvarovaný např. do výše zmíněného tvaru lodičky. Dále se používají tzv. sublimační pece vzniklé určitým poskládáním, zohýbáním a bodovým svářením pásků. Každé ze zmíněných uspořádání má své specifické vlastnosti, jichž je s výhodou využíváno při odpařování látek, pro něž by se jiná konfigurace nemusela hodit. Odporový ohřev má jisté nevýhody, mezi něž lze zařadit možnost znečištění ohřívače či materiálu nebo omezení dané maximálním elektrickým proudem a napětím, jež lze k ohřevu použít.

Další z používaných metod ohřevu je odpařování elektronovým paprskem. Princip této metody spočívá v tom, že terč je zapojen jako anoda a je bombardován elektrony, které jsou tvořeny v katodě (často wolframové vlákno), a poté urychlovány a směřovány na anodu. Celý tento děj je o něco náročnější než odporový ohřev, nicméně dovoluje například i napaření různých slitin. Mimo to také odstraňuje výše uvedené nevýhody odporového ohřevu a umožňuje napaření takřka libovolného materiálu a v libovolném množství.

PLD (pulsed laser deposition) neboli pulsní laserová depozice se na první pohled nijak zvlášť neliší od předchozích způsobů napařování. Opět celý proces probíhá ve vakuu. Je zde nějaký zdroj částic, v tomto případě laser a terč, na který tyto částice dopadají. Rozdíl nastává při vypařování částic. Ty, místo aby se vypařovaly jako v předchozím případě, tak se vypařují v podobě plazmového obláčku (anglicky plume). Výhodou je, že takto lze nanášet velké spektrum materiálu, ale nevýhodou je, že jen na poměrně malý povrch.

3.3.1.3 Další vlastnosti a specifika napařování

Jedním z velmi důležitých parametrů, jež je třeba při napařování brát v potaz, je rovnoměrnost vytvořené vrstvy, která nemusí být samozřejmá. Substráty pro depozici vrstvy bývají obvykle rovinnými destičkami, ale zdroj odpařovaného materiálu rovinným být rozhodně nemusí. Dobrým příkladem je dříve uvedená lodička. Z ní se materiál odpařuje nejintenzivněji kolmo vzhůru a s odklonem směru od této kolmice intenzita postupně klesá. Lodička navíc není umístěna kolmo pod destičkou. Aby se tato nerovnoměrnost minimalizovala, je možnost podložkou během napařování rotovat

V některých případech je vhodné substrát vyhřívat. Zvětšuje se tím jeho povrchová energie, což vede ke dvěma důsledkům. Jednak k nárůstu pravděpodobnosti, že se napařovaná částice na povrchu substrátu zachytí, a zároveň ke zvýšení šance, že bude částice z povrchu desorbována. V závislosti na tom, který z důsledků je dominantní, pak je či není výhodné substrát vyhřívat. Zvýšené teploty lze rovněž využít po skončení samotné depozice. Deponovaná vrstva nebývá dokonalá, obsahuje různé defekty, nehomogenity ve struktuře a vnitřní pnutí, což může zapříčinit dlouhotrvající pozvolné změny vlastností vrstvy, které se snaží dostat celý systém do termodynamické rovnováhy. Tento proces je možno urychlit (a tím stabilizovat parametry) právě vystavením systému zvýšené teplotě.

Pro kvalitu deponované vrstvy je v neposlední řadě klíčová i rychlost napařovacího procesu. Vyšší rychlost napařování vyžaduje rovněž vyšší teplotu výparníku, což však může zapříčinit, že se z odpařovaného materiálu budou namísto jednotlivých molekul uvolňovat naráz celé shluky částic, které pak při dopadu na podložku výrazně přispívají k nerovnoměrnosti vytvářené vrstvy.

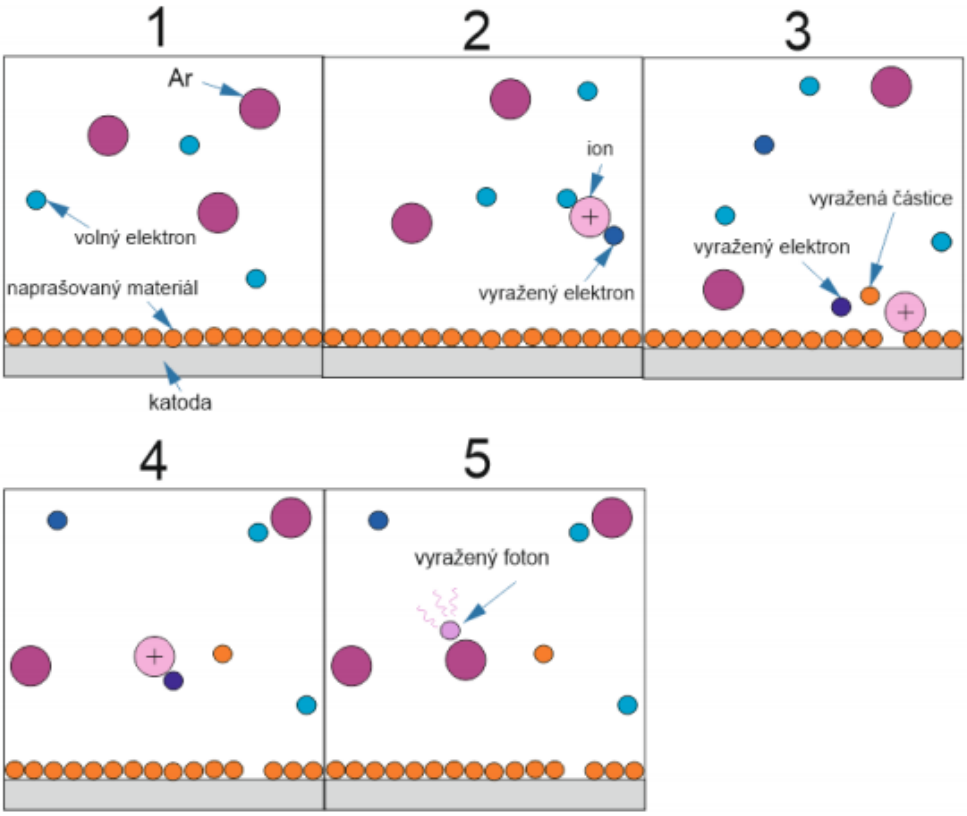
Zkratka MBE (molecular-beam epitaxy) značí epitaxi z molekulárních svazků, tedy další způsob, jak nanášet napařenou vrstvu. To, v čem se liší od ostatních, prozrazuje už „epitaxe“ v názvu. Epitaxe je proces, při němž na povrchu substrátu vzniká tenká vrstva materiálu, která se usadí v návaznosti na krystalickou mřížku substrátu. Na rozdíl od předchozích případů, kde byla výsledkem amorfní vrstva, tedy vzniká vrstva krystalická. Proces je výrazně pomalejší, nicméně lze s ním vytvořit naprosto jedinečné struktury.

Dalším speciálním typem napařovacích technik je tzv. reaktivní napařování, kdy recipient obsahuje specifický prvek (kyslík, dusík) ve formě zředěného plynu (stále je však třeba, aby bylo uvnitř vakuum s tlakem v desetinách milipascalu). Odpařovaný materiál pak cestou reaguje s tímto plynem a vytváří příslušnou sloučeninu (oxid, nitrid), která je teprve

deponována na substrát. Z podstaty věci je však zřejmé, že má tato metoda jeden značný nedostatek. Na jednu stranu je třeba mít v recipientu dostatečně vysoké vakuum, na stranu druhou příliš nízká koncentrace pracovního plynu může mít negativní vliv na kvalitu vytvářené vrstvy, neboť všechny odpařované částice nemusejí mít „příležitost“ cestou reagovat s pracovním plynem. Proto je tohoto principu častěji využíváno u naprašování, které nevyžaduje vakuum.

3.3.2 Naprašování

Naprašování je další široce využívanou fyzikální depoziční metodou pro výrobu tenkých vrstev, která spočívá v narušování povrchu terče tvořeného nanášeným materiálem, jehož částice se tak uvolňují a dopadají na substrát. K uvolňování materiálu je využíváno nárazů částic o dostatečně velké energii. Možnosti použití naprašovacích technik se netýkají pouze vytváření tenkých vrstev. Obecně se metody využívající naprašování (resp. rozprašování) užívají při výrobě polovodivých destiček, čištění povrchů, mikroobrábění nebo například vytváření hloubkových profilů na určeném povrchu.



Obr. 10: Vyražení částice z terče [3]

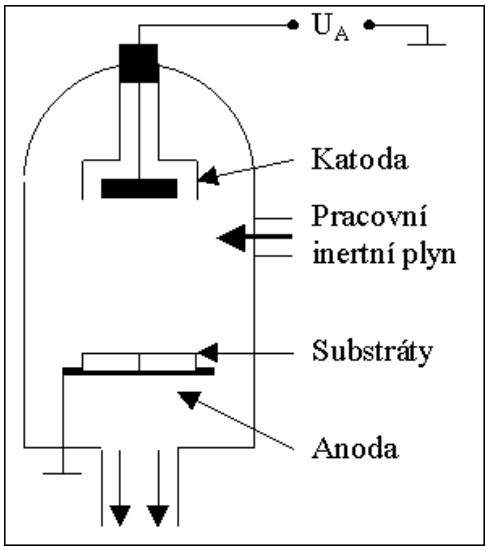
Naprašování začíná (stejně jako napařování) tím, že je komora vyčerpána na určitou úroveň vakua a poté je do komory napuštěn inertní (netečný) plyn, který se neúčastní chemických reakcí. Nejčastěji se používá argon, který je nejlevnější, protože se v atmosféře vyskytuje ve velkém množství. Částicím tohoto plynu je pak nutné dodat dostatečně velkou energii a to tak, že se ionizují. Vznikne tedy plynná plazma. Způsob, jakým jsou částice

ionizovány, je hlavním rozdílem mezi jednotlivými druhy naprašování. Ty nejvýznamnější z nich budou popsány v následujících kapitolách. Základem je, že volný elektron vyrazí z neutrálního atomu inertního plynu elektron a tím se z částice bez náboje stane ion. Tento kladně nabitý ion je poté přitahován ke katodě, ze které vyrazí částici materiálu a zároveň další elektron. Tyto elektrony jednak zvyšují ionizaci plynu, ale také se setkávají s již vytvořenými ionty 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.

3.3.2.1 Katodové naprašování

Princip katodového naprašování (také známé jako diodové naprašování) spočívá v přenášení materiálu z terče (katody) na substrát (anodu) při doutnavém výboji v plynech. Dělí se na stejnosměrné a vysokofrekvenční podle toho, jaké napětí je přivedeno na anodu.

V případě stejnosměrného naprašování je na katodu přivedeno stejnosměrné napětí. Přitom je udržován tlak v komoře desítky Pa, přivedené napětí je v řádu kV a sériový odpor mezi elektrodami je 1-10 kΩ. Pokud je dosaženo těchto podmínek, mezi elektrodami může vzniknout doutnavý výboj. Navíc vznikne katodový spád, což znamená, že potenciál mezi elektrodami není rozložen rovnoměrně, ale u katody je vyšší a umožňuje to, aby částice plynu dopadla s velkou energií na katodu a vyrazila z ní částici, která se poté usadí na anodu. Tento způsob je vhodný jen k naprašování vodivých materiálů, protože aby proces probíhal, je nutné, aby katoda byla z vodivého materiálu. Pokud by nebyla, chovala by se jako kondenzátor vložený do obvodu se stejnosměrným proudem, na povrchu terče by se vytvořila vrstva nabitých částic a doutnavý výboj by zanikl.



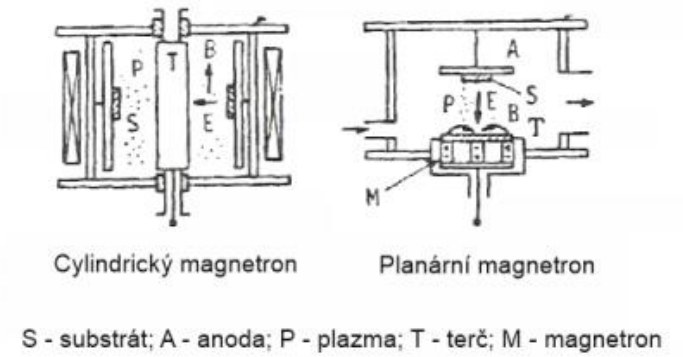
Obr. 11: Katodové naprašování [8]

Jelikož při diodovém naprašování tvoří nanášený materiál katodu, je zjevné, že při depozici vrstev z nevodivých materiálů začne tato metoda rychle selhávat. Na povrchu terče se kvůli bombardování kationty začne hromadit kladný náboj a postupně vytvoří bariéru,

jež bude další kationty odpuzovat. Pro tento účel byla vyvinuta modifikace diodové metody, nazývaná vysokofrekvenční naprašování (také známé jako střídavé naprašování), která místo stejnosměrného využívá střídavé napětí o vysoké frekvenci v řádu stovek kHz až menších desítek MHz. Typicky používanou hodnotou frekvence je 13,56 MHz, což znamená, že napětí mění polaritu každých 74 ns. Obě elektrody si tak periodicky vyměňují role katoda – anoda. Použití vysoké frekvence umožňuje střídavému napětí fakticky ignorovat rezistivitu deponovaného materiálu, a tedy je možné takto vytvářet jak vodivé, tak i izolační vrstvy. Navíc tak přirozenou cestou dojde k tomu, že náboj nahromaděný během jedné půlperiody je během druhé půlperiody neutralizován díky opačné polaritě elektrod. Druhou z velkých výhod vysokofrekvenčního naprašování je oscilace elektronů emitovaných plasmatickým výbojem. V důsledku nepřetržité rychlé výměny polarit obou elektrod se elektrony pouze nepřemístí k anodě a neukončí tím svou cestu, ale oscilují mezi oběma elektrodami, a mnohem více se tak pohybují v rámci vzniklého plasmatu. Tím výrazně přispívají k ionizaci částic pracovního plynu, zvyšují tak hustotu plasmatu a v konečném důsledku tedy urychlují celý depoziční proces. Rovněž zároveň snižují nutnost se v tomto ohledu spoléhat na sekundární elektrony. Aby se zabránilo opětovnému odprášení vrstvy nanesené v předešlé půlperiodě, je vhodné střídavé napětí navíc „podložit“ stejnosměrným předpětím. Toho je možné dosáhnout například použitím střídavého napájení s přidaným nastavitelným stejnosměrným předpětím nebo zařazením kondenzátoru do série se střídavým zdrojem.

3.3.2.2 Magnetronové naprašování

Magnetronové naprašování představuje v podstatě vylepšení katodové technologie. Magnetron bývá realizován silnými permanentními magnety, případně elektromagnetem. Takto je před katodou vytvořeno statické magnetické pole definovaného tvaru, paralelně s povrchem katody. Principem je, že magnetické pole působí na katodu a s ní paralelní doutnavý výboj. Toto magnetické pole má takový tvar, že elektrony se v něm pohybují po spirále, což má za efekt, že elektron déle setrvává v okolí terče a zvyšuje se počet srážek mezi elektrony a částicemi plynu, čímž se zvyšuje hustota plazmy, následně hustota proudu na katodě, a tudíž je vyraženo více částic. Velkou výhodou je, že pro tento proces stačí tlak argonu v jednotkách Pa a použití nižšího napětí (stovky voltů).



Obr. 12: Sestavy pro naprašování s cylindrickým a planárním magnetronem [3]

Mezi dva nejpoužívanější typy magnetronu patří cylindrický a planární. Jak oba vypadají lze vidět na obr. 12. Sestava s cylindrickým magnetronem má terč umístěn uprostřed komory, na jejíchž stěnách jsou umístěny magnety, čímž je mezi terčem a stěnami komory vytvořeno magnetické pole. Sestava pro naprašování s planárním magnetronem je podobná jako u obyčejného katodového naprašování, jediným rozdílem je právě přítomnost magnetronu.

Magnetronové naprašování je v současné době nejrozšířenější naprašovací technologií pro depozici tenkých vrstev, protože přidáním magnetronu se významně zvyšuje efektivita celého procesu. Už z pouhého pohledu na terč z nanášeného materiálu lze poznat, jestli byl používán při magnetronovém naprašování. Plasmatický prstenec se totiž projeví vyhloubením specifického reliéfu do terče (v okolí prstence je v důsledku jeho hustoty nejvyšší pravděpodobnost srážky iontu s katodou).

3.3.2.3 Reaktivní naprašování

V případě, že je prováděno reaktivní naprašování, je spolu s inertním plynem napuštěn ještě plyn, který má reagovat s materiálem terče za vzniku sloučeniny. Nejčastěji používanými plyny jsou kyslík, dusík, síra, metan, acetylen nebo propan, které reagují s vyraženými částicemi a tím mohou vzniknout různé oxidy, nitridy, sulfidy nebo karbidy. Pokud je vrstva tvořena tímto způsobem, tak se dají velice dobře ovlivňovat její vlastnosti pomocí nastavování různých tlaků inertního a reaktivního plynu.

Z výrobního hlediska je jednodušší vytvořit kovový terč o vysoké čistotě a následně využít reaktivního naprašování než stejně čistý terč tvořený přímo požadovanou sloučeninou, protože ta obvykle podléhá existenci některých nežádoucích jevů (je porézní, obsahuje částice plynů a další nečistoty). Ve výsledku je však třeba u každé aplikace zvážit zvlášť, jestli se více vyplatí naprašovat sloučeninu přímo nebo raději reaktivně. Do toho vstupuje řada faktorů včetně požadované rychlosti procesu, čistoty a kvality vrstvy a samozřejmě i ceny.

3.3.3 Chemická depozice

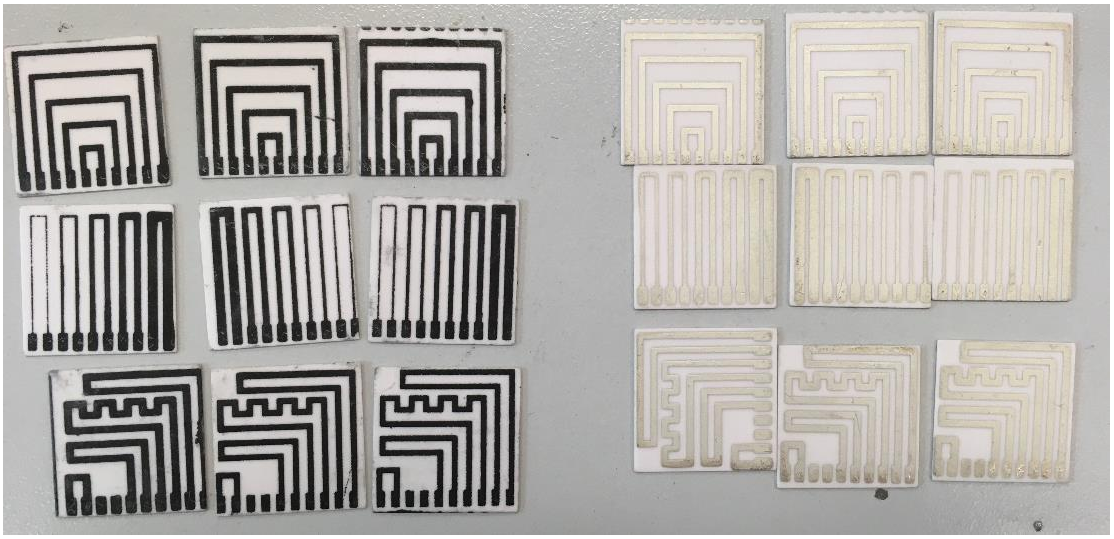
CVD neboli chemická depozice je proces, probíhající při vysoké teplotě (okolo 1000 °C), při kterém je plyn přiveden k povrchu substrátu. Zde se díky vysoké teplotě rozkládá a reaguje s částicemi povrchu.

Výhodou této technologie je její cenová dostupnost. Vrstvy pomocí ní vytvořené vykazují lepší adhezi než v případě technologie PVD a jsou velice odolné. Také je možné vytvořit poměrně široké spektrum vrstev. Další výhodou je, že takto vytvořená vrstva může vzniknout i na běžně poměrně nedostupných místech. Hlavní nevýhodou této metody je vysoká teplota celého procesu, které je jednak energeticky náročná a také nedovoluje použít některé druhy substrátů, které mají bod tání nižší, než je teplota depozice daného materiálu.

4 Vzorky testovacích struktur tlustovrstvé technologie

V této praktické části práce je popsána příprava a vyhodnoceno měření vlastností vzorků testovacích struktur tlustovrstvé technologie.

Celkem jsem zkoumal 18 vzorků tlustovrstvých struktur. Jedná se o tři vzorky od každého ze tří motivů pro dvě různé pasty. Zkoumané vrstvy jsou realizovány z organických tlustovrstvých past nanesených a vypálených na korundové substráty s obsahem 96 % Al_20_3 o rozměrech 25 x 25 mm. Pro tisk motivů byla použita stříbrná polymerová pasta CSP 3110D (stříbrošedé zabarvení – na obr. 13 vpravo). Tato pasta je vhodná pro vytváření vodivých cest vzhledem ke své nízké hodnotě rezistivity. Druhou použitou pastou je uhlíková polymerová pasta CSP 3225 (černá – na obr. 13 vlevo). Tato pasta se vyznačuje vyšší hodnotou rezistivity a je vhodná pro vytváření odporů.



Obr. 13: Zkoumané vzorky tlustovrstvých struktur

4.1 Průběh tisku vzorků tlustých vrstev

Testovací motivy jsou vytvořeny pomocí ručního sítotiskového stroje Uniprint od společnosti PBT Works. Před tiskem je nutné vložit substrát ve formě plata na duralovou desku sítotiskového stroje. Pevné uchycení substrátu při tisku je zajištěno podtlakem. Ten je vytvořen pomocí vysavače, který je umístěn pod pracovní plochou sítotiskového zařízení a zamezuje tak pohybu destiček.

Pasta je nanesena přes polyesterové síto s hustotou asi 70 ok na cm^2 a s úhlem natočení síťoviny 30°. Na síto se nanese pasta zhruba 2 cm před tištěný motiv v tenkém pruhu o tloušťce zhruba 5–10 mm. Nanesená pasta by měla lehce přesahovat délku tištěného motivu. Pohybem těrky přes síto se protlačí pasta skrz oka síta na substrát. Tištěný motiv by se měl přejet těrkou asi dvakrát. Pro zajištění správného soutisku (správné vyrovnání motivu na destičce) je vhodné nejdříve provést kontrolní tisk na plastovou fólii napnutou v kovovém rámu stroje. Cílem je, aby se natištěný motiv na plastové fólii překryl

s destičkami umístěnými pod fólií. Toho můžeme dosáhnout posuvem pracovní plochy stroje, na které jsou umístěny destičky, pomocí tří šroubů. Po tomto testu je možné odstranit plastovou fólii a zahájit tisk na substrát. Po nanesení motivu následuje odklopení síta a vypnutí podtlaku. Pokud je poté přes síto nanášena jiná pasta, je nutné důkladně vyčistit síto od předchozí pasty. K vyčištění se používá speciální ředidlo, které je šetrné vůči emulzi na sítu. V některých případech může být velmi obtížné odstranit všechny zbytky předchozí pasty a náročnost vyčištění stoupá s hustotou síta.

Obr. 14: Ruční zařízení pro sítotisk Uniprint [10]

Substráty s nanesenou vrstvou pasty můžeme vyjmout a umístit je do pece vyhřáté na teplotu potřebnou pro vytvrzení pasty. Zkoumané vzorky byly vytvrzeny použitím laboratorní dávkovací pece s odporovým ohřevem. Pasta CSP 3110D se vytvrzuje při teplotě 130 °C po dobu 60 minut. Pasta CSP 3225 se vytvrzuje při teplotě 130 °C po dobu 30 minut. Příprava vzorků je dokončena vyjmutím vzorků z pece a jejich vychladnutím.

4.2 Měření odporu vzorků tlustých vrstev

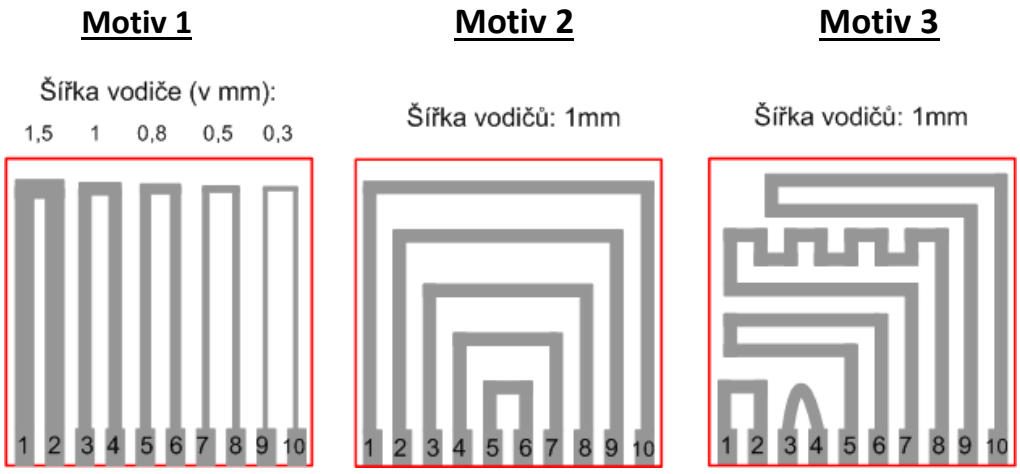
Odpor nanesených vodivých drah jsem měřil dvoubodovou metodou pomocí multimetru Hewlett Packard 34401A. Měřící sondy jsem přikládal na kontaktní plošky jednotlivých vodivých drah. Přechodový odpor mezi měřící sondou a kontaktní ploškou vrstvy a také odpor přívodních kabelů multimetru může při použití této metody způsobovat značnou chybu měření, která se projeví zejména při měření nízkých hodnot odporu. To je případ měření vrstev z pasty na bázi stříbra, u které se pohybuje odpor drah v řádu jednotek Ω. Tuto chybu měření jsem korigoval odečtením odporu přívodních kabelů multimetru v hodnotě 0,5 Ω. V případě měření odporu pasty na bázi uhlíku dosahovaly hodnoty řádově jednotek kΩ, proto je pro tuto pastu možné chybu měření zanedbat. Použitou metodu měření elektrického odporu lze označit spíše za orientační z důvodu použití pouze dvou hrotů přiložených na konce měřené vodivé dráhy, čímž dochází ke vzniku jisté chyby metody. I přes svou spíše orientační povahu lze však toto měření po korekci odporu přívodních kabelů pro tento účel považovat za dostatečné. Naměřené hodnoty odporu jsou dostatečně velké, aby se přechodové odpory a další parazitní jevy daly zanedbat.

Z důvodu velkého množství dat jsou všechny naměřené hodnoty odporu uvedeny ve formě tabulek v příloze. Pokud je v tabulce místo hodnoty odporu uvedena značka „x“, znamená to, že pro tuto dráhu nebylo možné naměřit odpor. K tomu docházelo z důvodu přerušení nebo slití dráhy vlivem nedokonalého natisknutí pasty nebo mechanického opotřebení vzorku. Např. odpor nejužší dráhy mezi kontakty 9-10 motivu 1 naneseného pastou CSP 3225 nebylo možné naměřit ani u jednoho ze tří měřených vzorků. Pomocí mikroskopu jsem později (v kapitole 4.4) ověřil, že tyto dráhy byly u všech tří vzorků přerušené.

4.2.1 Závislost odporu na rozměrech vodivé dráhy

Ze vztahu (2) v kapitole 2.1.1.1 pro výpočet odporu vodivé dráhy $R = \rho \frac{l}{wh}$ můžeme zavést teoretický předpoklad, že odpor vodivé dráhy je nepřímo úměrný její šířce a přímo úměrný její délce. Při zvětšování šířky dráhy a při zachování její délky by tedy měl změřený odpor klesat. Při zvětšování délky dráhy a při zachování její šířky by se měl změřený odpor naopak zvětšovat.

Na základě údajů o šířce a délce drah jednotlivých motivů (v obr. 15 a tab. 1) jsem sestrojil grafy závislosti naměřeného odporu na teoretické i reálné šířce nebo délce dráhy.

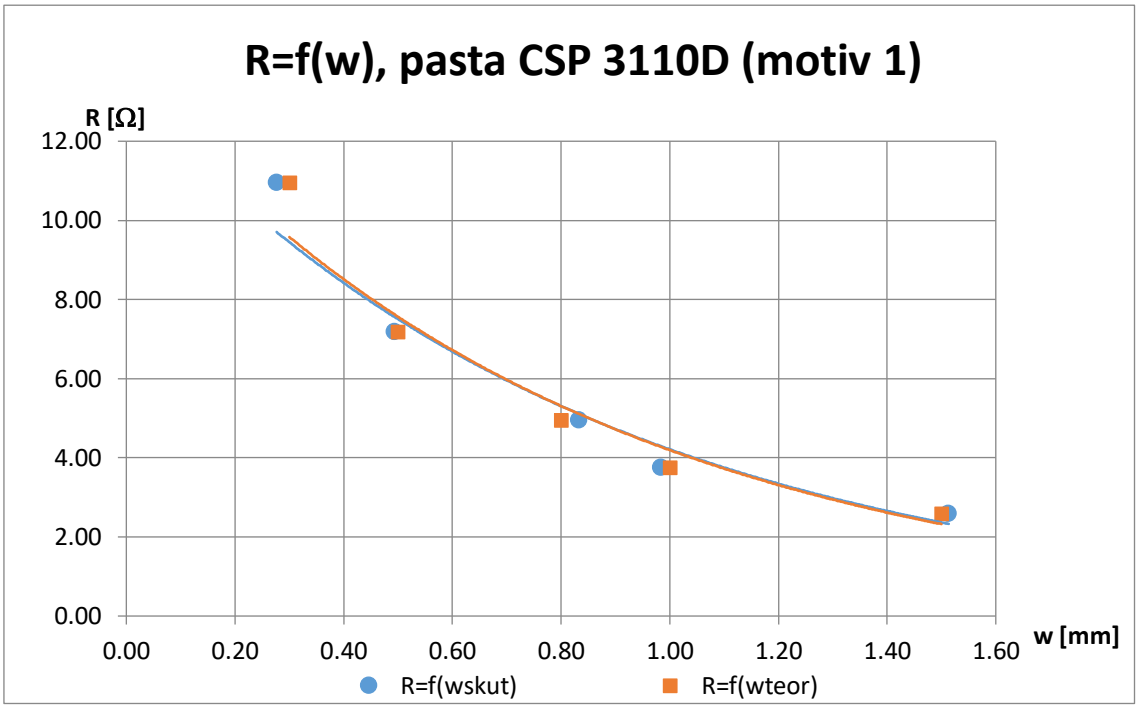


Obr. 15: Šířka dráhy zkoumaných motivů [9]

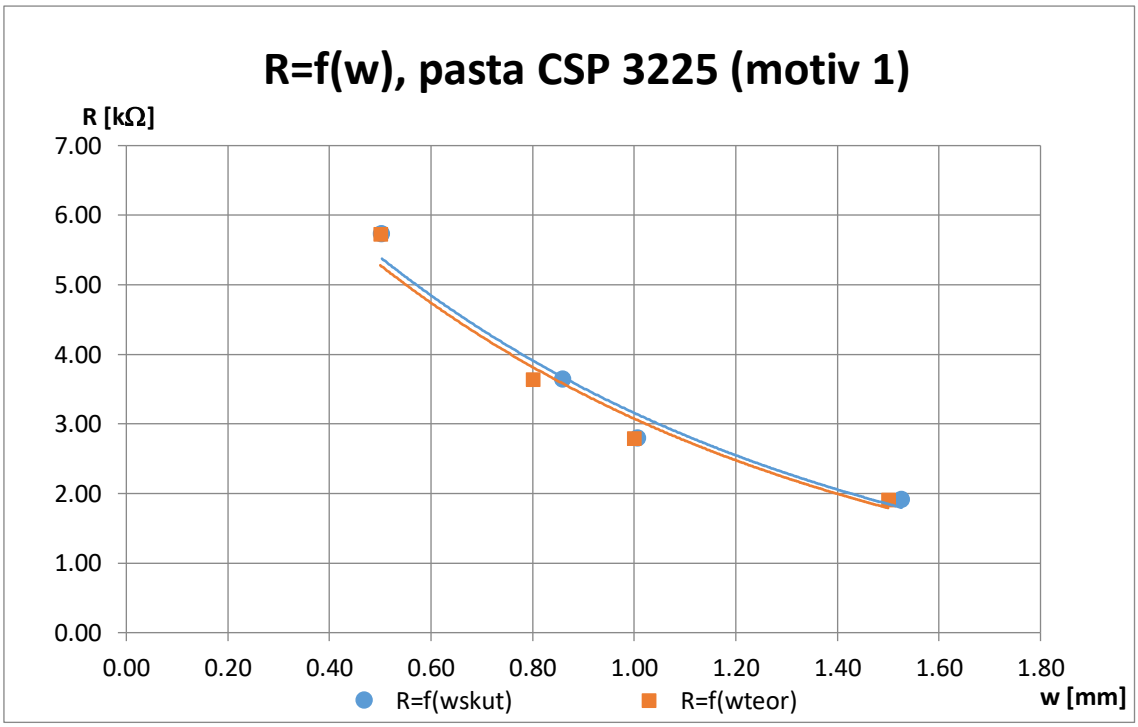
Motiv 1		Motiv 2		Motiv 3	
Dráha mezi kontakty	**Délka dráhy [mm]**	**Dráha mezi kontakty**	**Délka dráhy [mm]**	**Dráha mezi kontakty**	**Délka dráhy [mm]**
1-2	41	1-10	63	1-2	10
3-4	41	2-9	50	3-4	8,5
5-6	41	3-8	36	5-6	40,5
7-8	41	4-7	23	7-8	61,5
9-10	41	5-6	11	9-10	76,5

Tab. 1: Délka dráhy zkoumaných motivů [9]

Pro ověření předpokladu, že naměřený odpor se vzrůstající šířkou dráhy bude klesat, jsem využil motiv č. 1, jehož dráhy se liší v šířce, ale jsou všechny stejné délky. Do grafů č. 1-2 jsem vynesl závislost průměrné hodnoty odporu jednotlivých drah na skutečné a teoretické šířce drah pro obě měřené pasty. Z grafů je patrné, že byl tento teoretický předpoklad splněn.

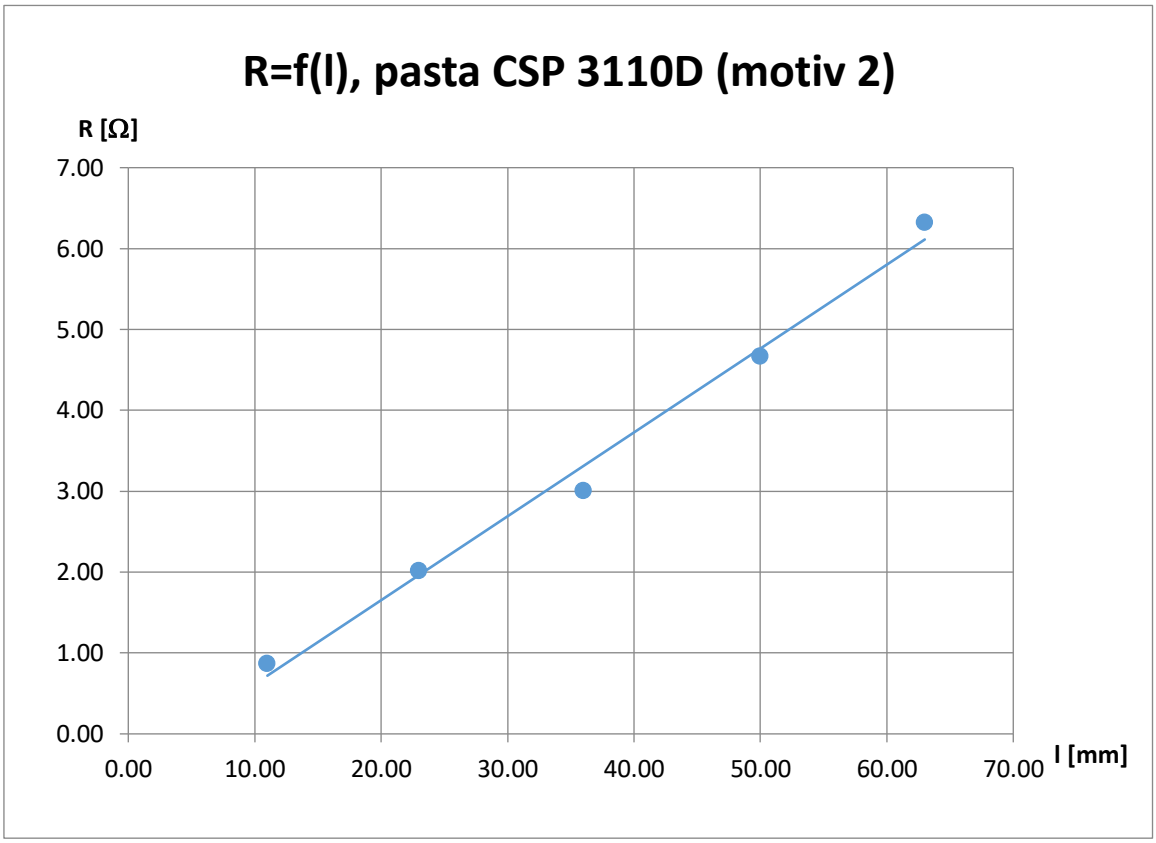


Graf 1: Závislost odporu na šířce dráhy (pasta CSP 3110D, motiv 1)

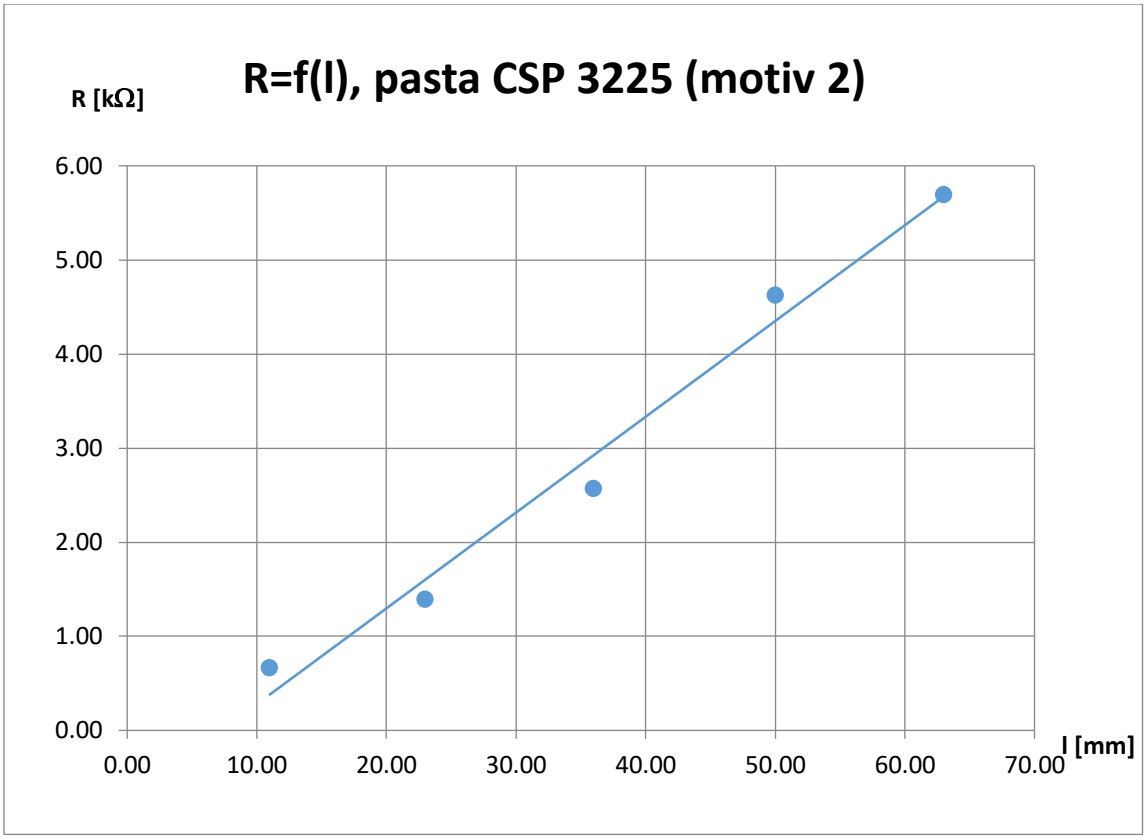


Graf 2: Závislost odporu na šířce dráhy (pasta CSP 3225, motiv 1)

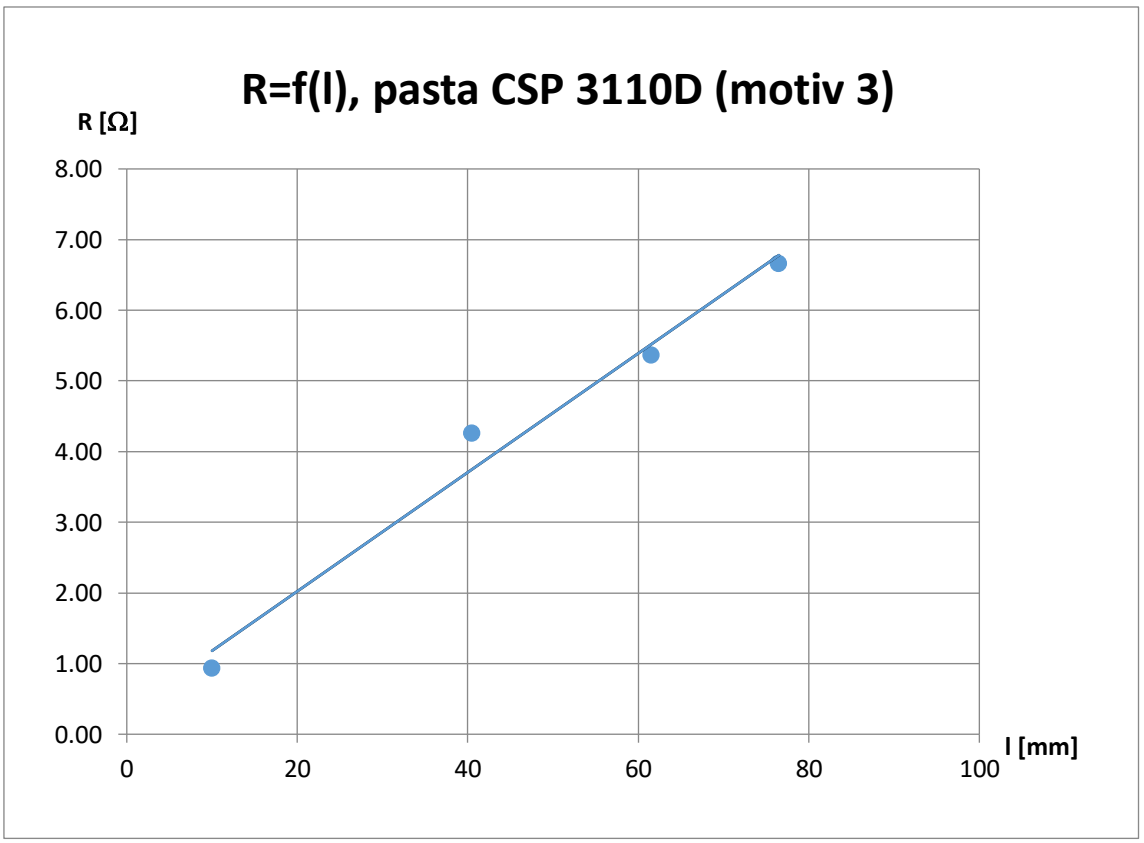
K ověření předpokladu, že s rostoucí délkou dráhy se bude naměřená hodnota odporu zvyšovat, jsem využil motivy č. 2 a č. 3. Všechny dráhy v těchto motivech mají stejnou šířku a jednotlivé dráhy se liší pouze svou délkou. Do grafů č. 3-6 jsem vynesl závislost průměrných hodnot odporu jednotlivých drah na jejich délce. Z grafů je patrné, že také tento předpoklad byl splněn. Dále si v grafech můžeme všimnout, že sklon závislosti odporu na délce dráhy se pro různé motivy liší. To může být způsobeno kombinací nepřesnosti měřící metody, nerovnoměrností tloušťky vrstvy a nehomogenitou vrstvy.



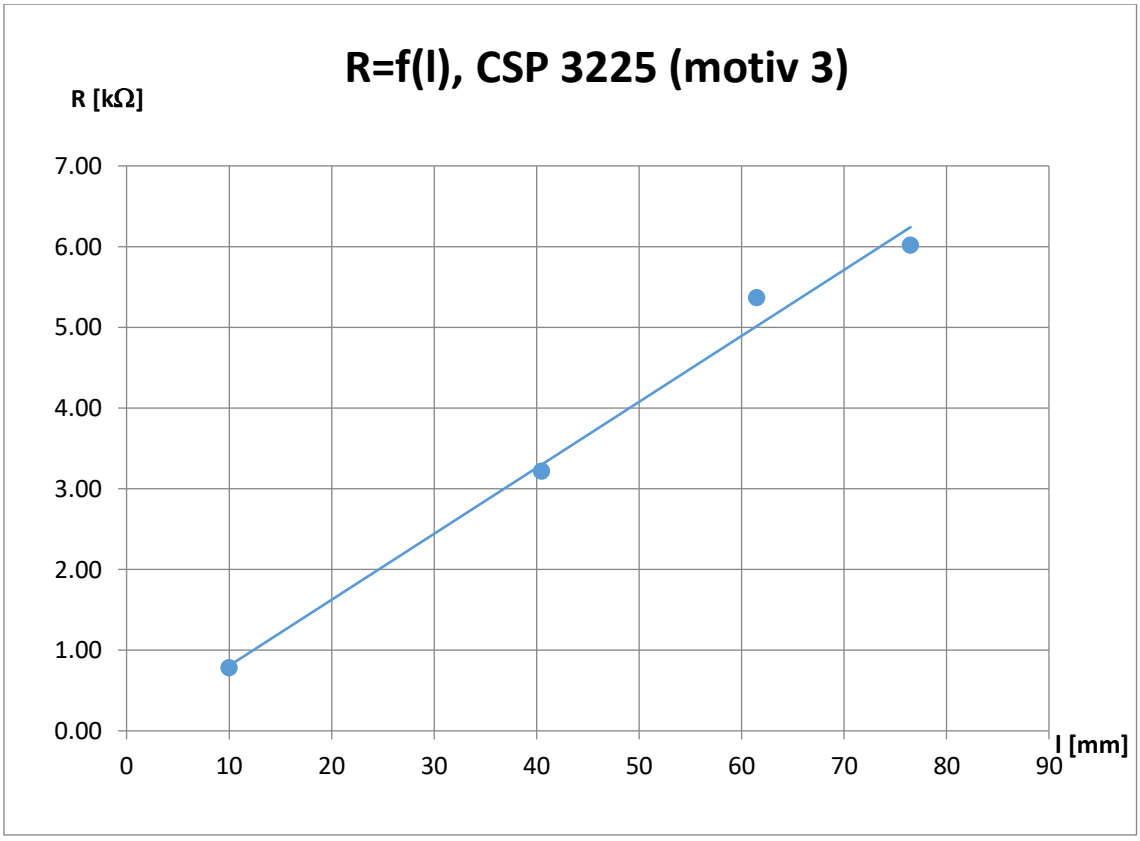
Graf 3: Závislost odporu na délce dráhy (pasta CSP 3110D, motiv 2)



Graf 4: Závislost odporu na délce dráhy (pasta CSP 3225, motiv 2)



Graf 5: Závislost odporu na délce dráhy (pasta CSP 3110D, motiv 3)



Graf 6: Závislost odporu na délce dráhy (pasta CSP 3225, motiv 3)

4.2.2 Výpočet odporu na čtverec

Odpor na čtverec byl již podrobněji popsán v kapitole 2.1.1. Když ze vztahu (1) v kapitole 2.1.1.1 pro výpočet odporu vodivé dráhy $R = R_{\square}\frac{l}{w}$ vyjádříme odpor na čtverec $R_{\square}$, získáváme vztah:

$$R_{\square} = R\frac{w}{l} \tag{8}$$

Dále dosadíme do vztahu (8) podle vztahu (2) v kapitole 2.1.1.1 za odpor vodivé dráhy $R = \rho\frac{l}{wh}$ a upravíme, čímž získáme vztah:

$$R_{\square} = \frac{\rho}{h} \tag{9}$$

Odpor na čtverec je tedy závislý přímo úměrně na rezistivitě pasty a nepřímo úměrně na tloušťce vrstvy. Na délce ani šířce dráhy by odpor na čtverec neměl záviset, a proto by ideálně hodnota odporu na čtverec pro všechny dráhy měla vycházet přibližně stejná.

Z naměřeného odporu vodivé dráhy a její délky a šířky jsem pro každý vzorek vypočítal odpor na čtverec. Tyto vypočtené hodnoty se nachází opět v příloze. Předpokládaná teoretická hodnota odporu na čtverec pro pastu CSP 3110D informací

výrobce je asi 100 mΩ/□. Pro druhou měřenou pastu CSP 3225 se předpokládaná hodnota odporu na čtverec podle informací výrobce pohybuje kolem 70 Ω/□.

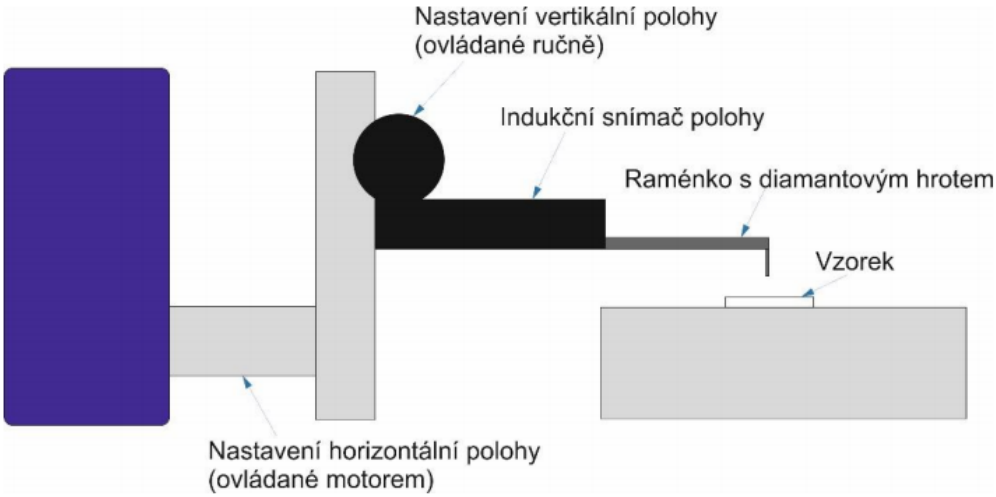
Vypočtené hodnoty odporu na čtverec pro všechny vzorky jsou uvedeny v příloze. Průměrná hodnota vypočteného odporu na čtverec na základě naměřených hodnot pro pastu CSP 3110D je 90 mΩ/□. Tato hodnota je tedy oproti předpokládané teoretické hodnotě o 10 % nižší. Pro pastu CSP 3225 vychází průměrná hodnota vypočteného odporu na čtverec 75 Ω/□. Tato hodnota je tedy oproti předpokládané teoretické hodnotě přibližně o 7 % vyšší.

Vypočtené hodnoty odporu na čtverec pro různé vzorky se liší i o několik procent a od předpokládané teoretické hodnoty jsou vypočtené hodnoty rozdílné zejména u nejužších drah. Tato odchylka je způsobena především nerovnoměrnou tloušťkou a šířkou vrstvy v důsledku nedokonalého nanesení pasty a její nehomogenitou, která se projeví nejvíce právě u nejužších drah. Dále k nepřesnosti vypočteného odporu na čtverec přispívá odchylka měření odporu použitou metodou.

4.3 Měření profilu vzorků tlustých vrstev

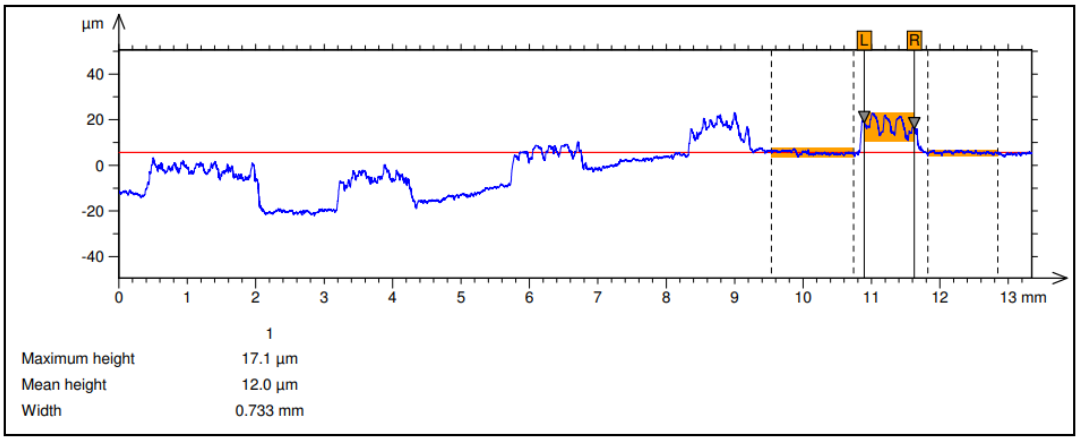
Pro analýzu profilu a měření šířky a tloušťky vrstev bylo použito zařízení Form Talysurf Intra 2 od výrobce Taylor Hobson nacházející se v laboratoři Katedry elektrotechnologie. Toto zařízení využívá k měření takzvanou hrotovou metodu.

K podložce s nanesenou vrstvou se vhodnou silou přitlačí jemný hrot. Sílu přitlačení vzhledem k rozsahu přístroje kontroluje software příslušící k zařízení (Taylor Hobson Ultra) a zobrazuje tuto informaci uživateli. Tento hrot následně pomalu přejíždí přes podložku a přes vrstvu na ní, přičemž zařízení detekuje výkyvy hrotu a převádí je pomocí elektromagnetické indukce na elektrický signál. Software tento signál zpracuje a vyhodnotí z něj profil změřeného úseku.



Obr. 16: Zařízení pro měření profilu [3]

Data získaná z měřiče profilu jsem zpracovával pomocí programu Taly Profile Gold, který umožňuje narovnání naměřeného profilu a potlačení šumu Gaussovým filtrem. Následně je možné pomocí dvou referenčních úseků okolo vrstvy změřit její šířku a průměrnou tloušťku. Tímto způsobem jsem změřil skutečnou šířku vodivých drah u vzorků s motivem č. 1 (motiv s proměnnou šířkou drah). Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v příloze a využil jsem je i při výpočtu odporu na čtverec pro tyto vzorky. Šířka drah se od teoretické hodnoty liší ve většině případů zhruba o 0,01 mm až maximálně o 0,1 mm.

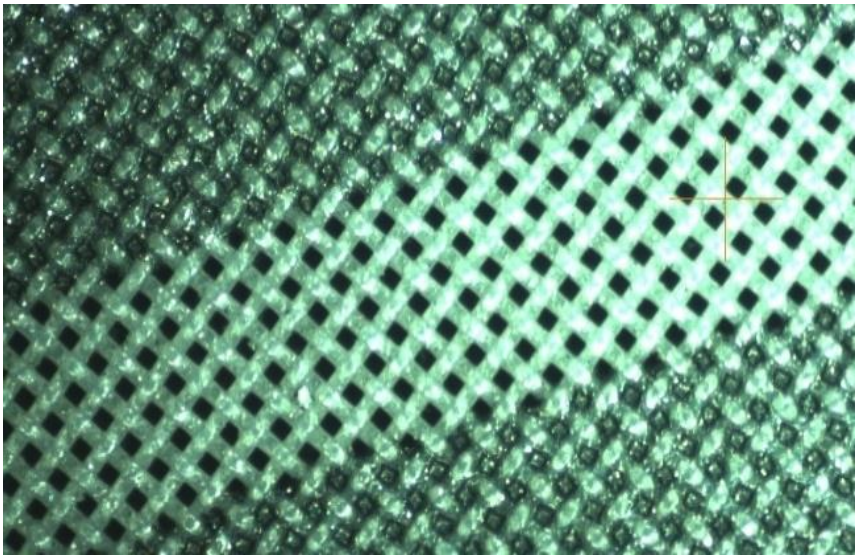


Obr. 17: Analýza profilu vrstvy ze stříbrné pasty

Z obr. 17 je zřejmé, že vrstva má nerovnoměrnou tloušťku a velmi členitý povrch. Korundová destička, na které je vrstva nanesena, vykazuje také značné nerovnosti a v některých oblastech je výrazně prohnutá. Z tohoto důvodu je vhodná metoda měření pomocí dvou referenčních úseků, která vliv prohnutí substrátu částečně eliminuje.

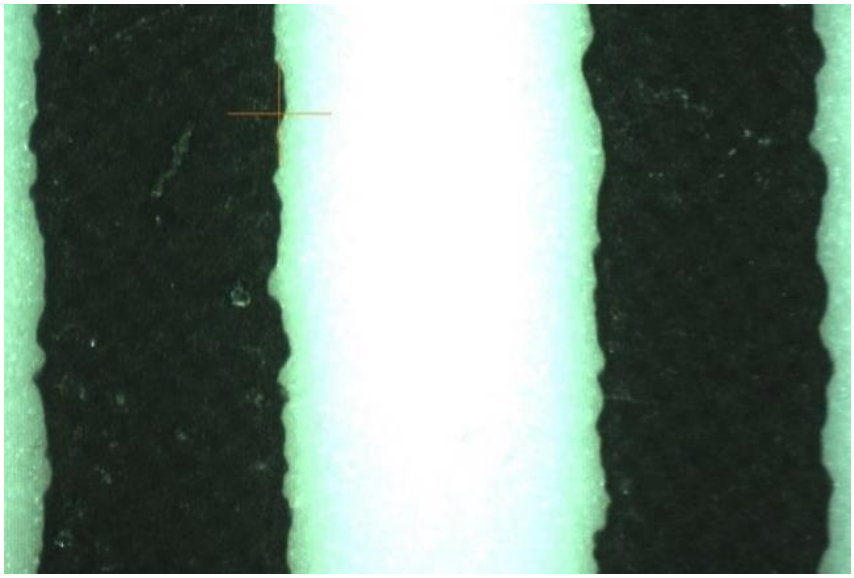
4.4 Kontrola vzorků tlustých vrstev pomocí mikroskopu

Vzorky tlustovrstvých struktur jsem zkoumal pod optickým mikroskopem umožňujícím stonásobné zvětšení. Přístroj jsem využil k ověření změřených šířek drah a ke zkoumání detailů a defektů nanesených tlustých vrstev i použitého síta, které by pouhým okem nebyly patrné. Některé z detailů jsem zaznamenal na následujících obrázcích.



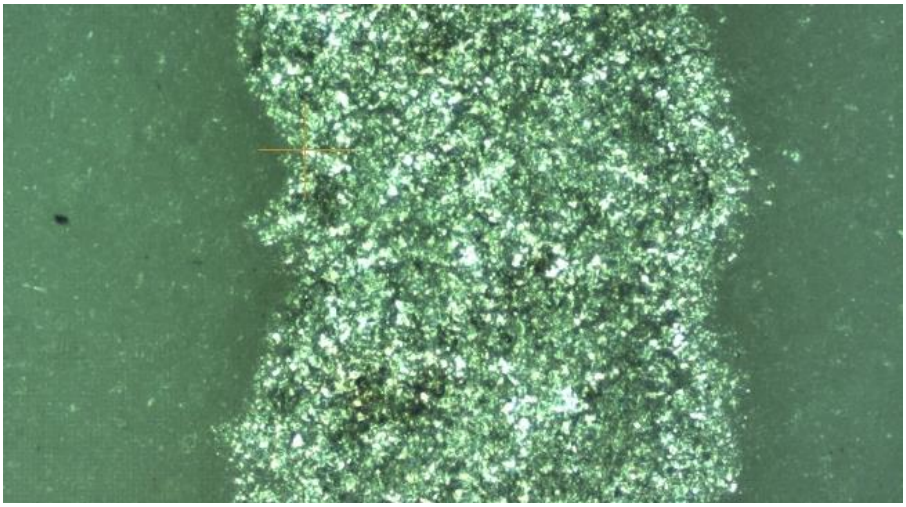
Obr. 18: Struktura síta

Na obr. 18 lze vidět detail síta. Na horním a dolním okraji lze vidět zamaskování síta emulzí a v prostřední části propustná oblast, která tvoří motiv. Na obrázku můžeme také pozorovat ucpání jednoho z ok síta zbytkem stříbrné pasty.

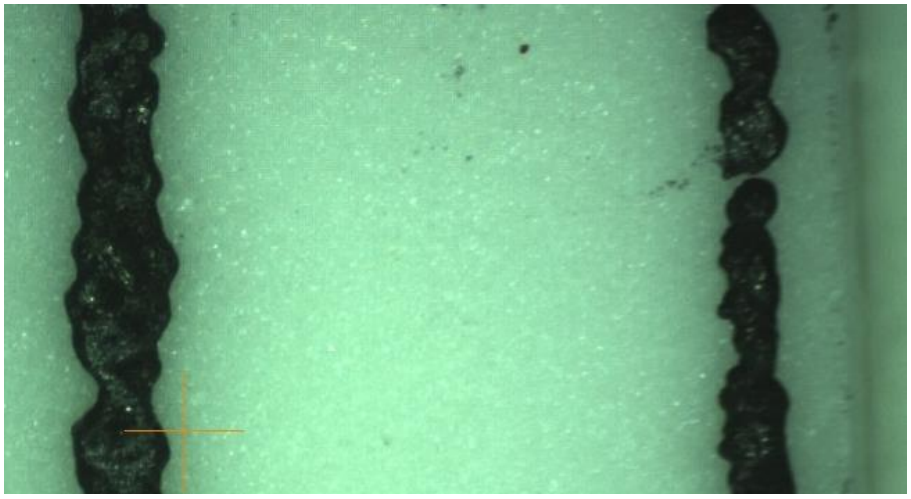


Obr. 19: Detail nanesené pasty CSP 3225

Na obr. 19 vidíme detail nanesené uhlíkové pasty CSP 3225 na substrátu. Je zde vidět struktura síta „obtisklá“ na nanesené vrstvě. Můžeme také pozorovat nerovné okraje vrstvy opět vycházející ze struktury síta. Nerovnost je s největší pravděpodobností způsobena použitím síta s příliš nízkou hustotou ok, příliš vysokým tlakem na těrku nebo vysokou viskozitou pasty.



Obr. 20: Detail nanesené pasty CSP 3110D

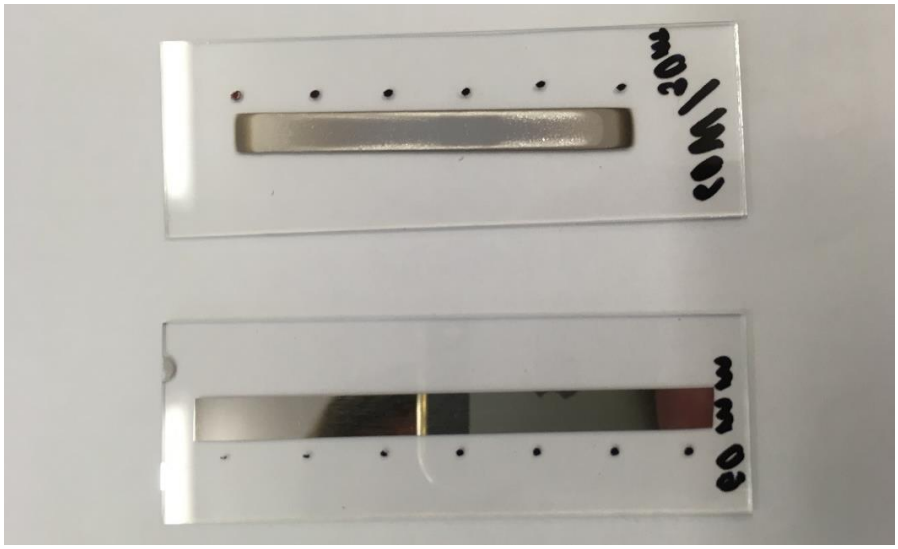


Obr. 21: Detail nejužší dráhy nanesené pastou CSP 3225

Na obr. 21 je nejužší dráha (teoretická šířka 0,3 mm) nanesená uhlíkovou pastou CSP 3225. Je zde patrná vada, která spočívá v přerušení vodivé dráhy. To bylo důvodem, proč nebylo možné změřit odpor dráhy pro tuto šířku u žádného vzorku vytvořeného touto pastou.

5 Vzorky testovacích struktur tenkovrstvých technologií

V této praktické části práce je popsána příprava a vyhodnoceno měření vlastností vzorků vodivých tenkých vrstev. Celkem bylo vytvořeno 38 vzorků, z nichž 24 bylo naneseno technologií napařování a 14 technologií naprašování. 4 vzorky byly z měření vyřazeny, protože se u nich naměřené hodnoty výrazně liší od očekávaných hodnot z důvodů, které budou specifikovány v následujících kapitolách.



Obr. 22: Tenké vrstvy nanesené technologií naprašování (nahoře) a napařování (dole)

5.1 Příprava vzorků tenkých vrstev

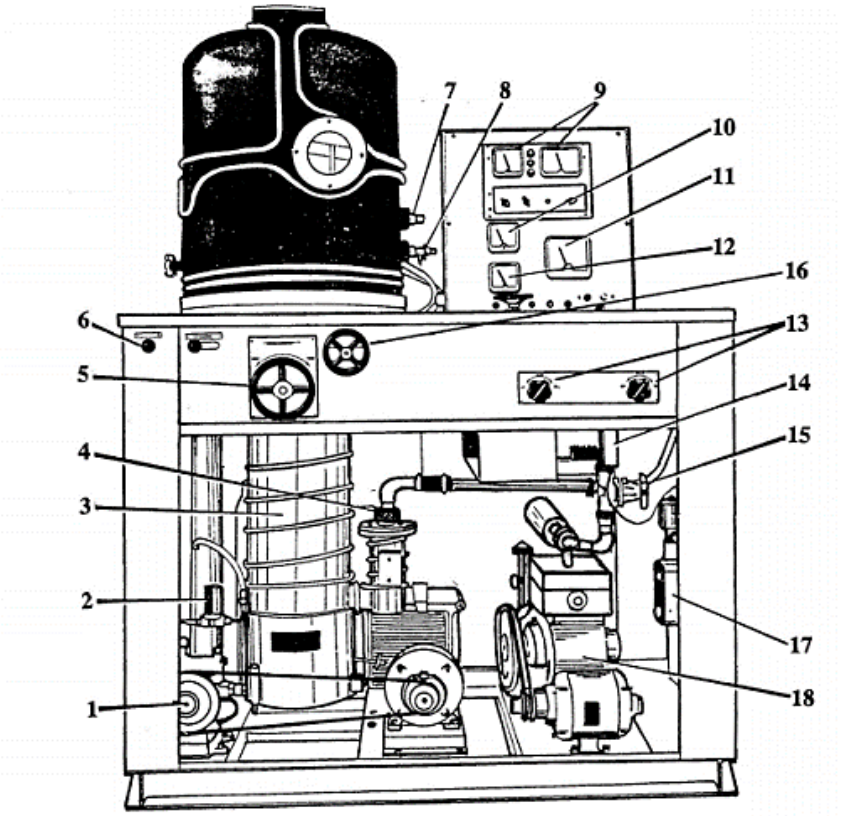
Substrátem použitým pro obě depoziční metody byly skleněné obdélníkové destičky o rozměrech 75 x 25 mm a tloušťce přibližně 1 mm. Sklo je často používaným substrátem, mezi jehož výhody patří velice dobrá hladkost a nízká cena. Jeho nevýhodou je obvykle značně prohnutý profil, což se odhalilo při zkoumání profilu vrstev a bylo to jedním z důvodů vyřazení některých vzorků z měření. Povrch skleněných destiček byl před nanesením vrstvy očištěn isopropylalkoholem a následně zbaven prachu a dalších nečistot proudem stlačeného vzduchu.

Na tyto podložky byly v obou případech nanášeny tenké vrstvy v podobě hliníkového proužku. Mezi výhody hliníku patří jeho snadná dostupnost a nízká cena. Pro náročnější aplikace by bylo vhodnější použít materiály, které mají např. silnější adhezi k substrátu nebo větší elektrickou pevnost. V tomto případě však hliník postačil.

5.1.1 Průběh napařování

Napařování proběhlo pomocí zařízení od výrobce Edwards typu 19E6 v laboratoři Katedry elektrotechnologie. Toto zařízení využívá principu odporového ohřevu deponovaného materiálu.

Očištěný substrát byl nejprve upevněn do držáku s maskou, která vytváří požadovaný vzor, a následně zavěšen do recipientu. Zavěšený držák se substrátem bylo třeba umístit do takové polohy, aby se nacházel pokud možno přímo nad odpařovacím zdrojem. V ideálním případě by samozřejmě měl být rovnoběžně se dnem recipientu. Jako odpařovací zdroj byl využit spirálovitě stočený wolframový drátek, do jehož středu se vkládal napařovaný materiál v podobě několikrát přehnutého hliníkového drátku. Délka vloženého drátku předurčovala předpokládanou tloušťku vytvořené vrstvy. Použity byly délky drátku 30, 40, 50, 60 a 90 mm, přičemž pro každou délku drátku bylo vytvořeno několik vzorků (alespoň 3). Všechny drátky přitom měly průměr 1 mm. Je také vhodné umístit materiál ještě do vedlejšího odpařovacího zdroje, aby v případě, že je odpařovací spirála poškozena (což se stává přibližně každé 10. napařování), bylo možné jen otočit karusel s odpařovacími zdroji bez nutnosti otevírání komory a opětovného čerpání.



1 Hydraulické čerpadlo pro zvedání recipientu
2 Magnetický ventil pro spouštění recipientu
3 Difuzní vývěva
4 Výstup difuzní vývěvy
5 Ovládání deskového ventilu
6 Clona odpařovacího zdroje
7 Napouštěcí ventil recipientu
8 Jehlový napouštěcí ventil recipientu
9 Pirani-Penningův vakuoměr
10 Měření proudu při čištění výbojem
11 Měření proudu odpařovacího zdroje
12 Měření teploty uvnitř recipientu
13 Ventil předčerpání a čerpání difuz. vývěvy
14 Piraniho měrka vakua
15 Uzavírací ventil pro test netěsností
16 Přepínač odpařovacích zdrojů
17 Startér rotační vývěvy
18 Rotační vývěva

Obr. 23: Použité napařovací zařízení [14]

Následně je recipient uzavřen a začíná odčerpávání. K čerpání vzduchu disponuje napařovací zařízení rotační vývěvou pro předčerpání a difúzní vývěvou pro dosažení

vysokého vakua (v této fázi čerpání pracují obě vývěvy současně). Po určité době předčerpávání (přibližně 10 minut) a dosažení tlaku v jednotkách Pa je nutné manuálně přidat difúzní vývěvu. S tou je možné dosáhnout tlaku až v řádech jednotek mPa. Za dostatečnou hladinu vakua byl považován tlak 2-3 mPa. Po dosažení této hodnoty, což trvalo přibližně 30 minut, již bylo možné zapnout napájení odpařovací spirály a přivést na ni napětí. V závislosti na přiloženém napětí začal odpařovací spirálou protékat proud řádově 10-100 A, zahřívat ji a spolu s ní i odpařovaný drátek. Ohřev bylo třeba provádět pozvolna tak, aby se odpařovaný drátek nejdříve natavil. V tu chvíli došlo k obalení odpařovací spirály hliníkem z roztaveného drátku. Příliš prudký ohřev by mohl způsobit utavení konce drátku, který by neměl čas se dostatečně ohřát. Následně bylo zvýšením napětí dosaženo odpaření roztaveného hliníku. Při atmosférickém tlaku má hliník bod varu zhruba 2500 °C. Při tlaku, kterého jsme v komoře dosáhli, se bod varu dostal lehce pod 1000 °C. Odpaření hliníku bylo po dosažení teploty varu otázkou vteřin, což bylo možné zkontrolovat pomocí průzoru pro vizuální posouzení stavu odpařovacího zdroje. Poté již bylo možné napětí snížit na nulu, vypnout napájení, zavřít ventil pro čerpání vzduchu, otevřít zavzdušňovací ventil recipientu a po zavzdušnění prostoru vzorek vyjmout.

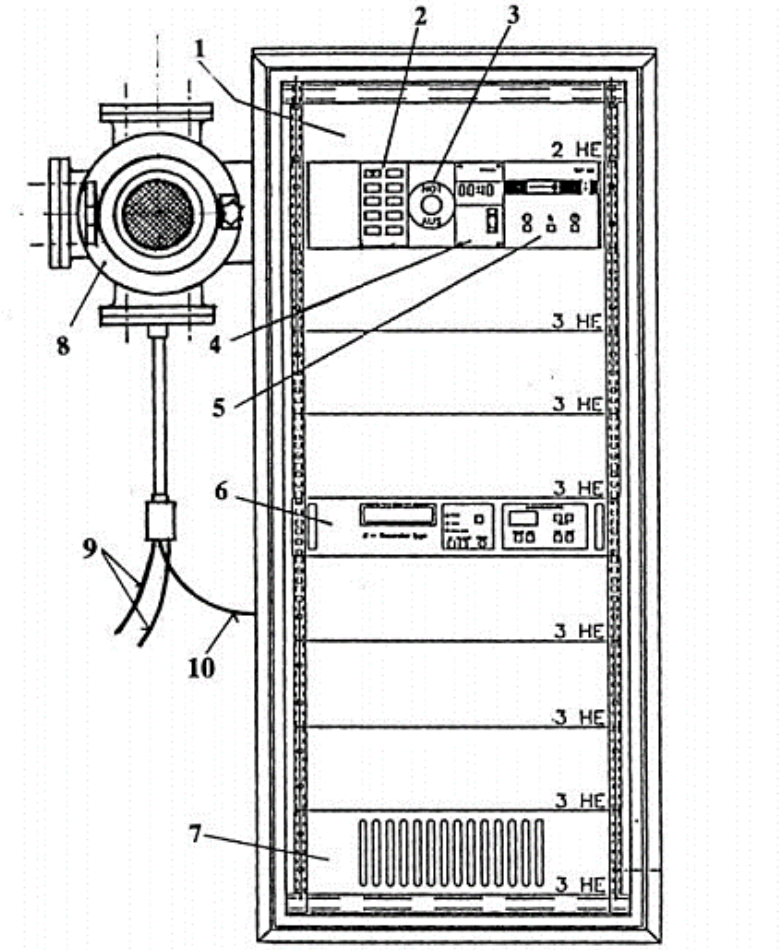
U několika vzorků jsem po zavzdušnění a otevření komory zjistil, že v odpařovací spirále zůstal zbytek hliníku, který se sice natavil, ale úplně neodpařil nebo došlo k utavení konce drátku. To se stávalo zejména u drátků délky 90 mm. Důvodem je zřejmě, že materiálu už v těchto případech bylo na danou velikost odpařovací spirály příliš mnoho. Nedokonale odpařené vzorky jsem z následného měření taktéž vyřadil, protože jejich tloušťka byla výrazně menší, než by odpovídalo délce použitého drátku, což by narušilo výsledky měření a jejich analýzu pomocí grafů.

5.1.2 Průběh naprašování

K tvorbě naprašovaných vzorků bylo použito zařízení od výrobce Balzers Pfeiffer typu PLS 160 nacházející se rovněž v laboratoři Katedry elektrotechnologie. Toto zařízení umožňuje magnetronové vysokofrekvenční naprašování. Využívá magnetů umístěných pod terčem v takovém uspořádání, že uprostřed se nachází jeden pól a kolem něj u okrajů terče opačný pól. To způsobuje vytvoření silného kruhového magnetického pole nad povrchem terče. Díky tomu elektrony obíhají po šroubovici na kruhové dráze nad povrchem terče, což má za následek zvýšení rychlosti ionizace pracovního plynu. Výboj tedy lze zapálit i při nižších tlacích plynu.

Očištěný substrát byl umístěn do držáku zakrytý maskou v požadovaném tvaru a následně vložen do recipientu nad hliníkový terč z materiálu, který byl naprašován. Po uzavření recipientu bylo možné spustit odčerpávání vzduchu. To zajišťují opět dvě vývěvy, kterými je naprašovací sestava vybavena. Nejprve byl recipient předčerpán membránovou vývěvou, a poté dočerpán turbomolekulární vývěvou, která umožňuje dosáhnout tlaku až 10^{-9} Pa. Za dostatečnou hladinu vakua byl však považován opět tlak 2-3 mPa. Odčerpávání vzduchu tvořilo z celého naprašovacího procesu tu zdaleka nejdéle trvající část, protože

v průměru trvalo přibližně 40 minut. Větší časová náročnost na výrobu jednoho vzorku je také důvodem, proč naprášených vzorků bylo vyrobeno výrazně méně než vzorků napařených. Po dosažení požadované hladiny vakua byl uzavřen škrticí ventil, přes který se čerpání provádělo, a komora byla napuštěna pracovním plynem, v tomto případě argonem, na tlak 2 Pa. Ten je vhodné udržovat ideálně konstantní po celou dobu naprašování.



1 Odvětrávací prostor
2 Indikace průtoku chladicí vody, tlačítko ovládání škrticího ventilu
3 Hlavní vypínač
4 Měření vakua v širokém rozsahu
5 Ovládání turbomolekulární výměny
6 Vysokofrekvenční generátor
7 Zesilovač vysokofrekvenční energie
8 Recipient
9 Přívod a odvod chladicí vody
10 Přívod vf výkonu

Obr. 24: Použité naprašovací zařízení [14]

Následně již bylo možno zahájit samotný depoziční proces, tedy zapnout generátor a nastavit požadovaný naprašovací výkon. Se zvyšováním celkového výkonu vzrůstá i výkon odražený, který je vhodné co nejvíce minimalizovat. Toho lze dosáhnout pomocí ovládacích prvků generátoru. Tento proces však v některých případech trval i několik minut, a je tedy pravděpodobné, že mohl mít nepříznivé účinky na kvalitu vytvářené vrstvy. Ve většině

případů se ukázalo, že minimální dosažitelná hodnota odraženého výkonu je přibližně 10 % celkového výkonu. Po uplynutí požadované doby depozice byl výkon generátoru snížen na nulu, vývěva vypnuta a škrticí ventil otevřen, aby došlo k opětovnému zavzdušnění komory a vzorek mohl být vyjmut.

Sledované parametry, které ovlivňovaly tloušťku vytvořených vzorků naprašování, byly výkon a doba depozice. Zvolené výkony pro naprášené vrstvy byly 50, 70 nebo 90 W po dobu 12 nebo 22 minut. Zkusil jsem naprašovat i při nižším výkonu 30 W (po dobu 12 min), ale za těchto podmínek již nevznikla spojitá vrstva, a proto jsem tento vzorek z následného měření vyřadil.

5.2 Měření vlastností vzorků tenkých vrstev

Měřenými vlastnostmi u vzorků technologie tenkých vrstev byly odpor a profil (tloušťka) vrstev. V tab. 2-3 jsou přehledně pro jednotlivé parametry depozice uvedeny počty vzorků, jejichž vlastnosti jsem měřil.

Délka drátku [mm]	Počet měřených vzorků
30	5
40	5
50	4
60	5
90	3

Tab. 2: Zkoumané vzorky napařování

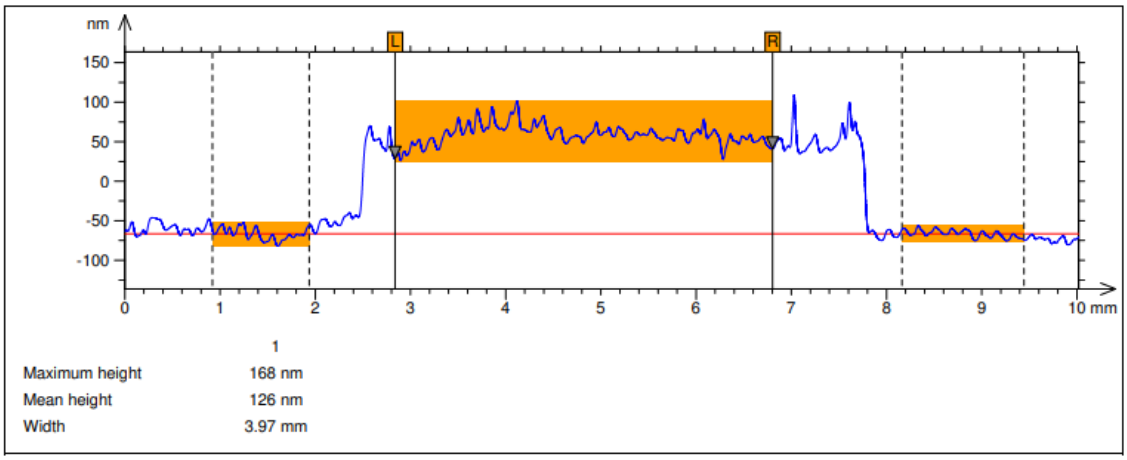
Doba depozice [min]	Výkon [W]	Počet měřených vzorků
12	50	3
12	70	3
12	90	3
22	50	3

Tab 3: Zkoumané vzorky naprašování

U všech vzorků tenkých vrstev jsem měřil odpor stejnou metodou, která již byla popsána při měření odporu tlustých vrstev v kapitole 4.2. Profil vrstev jsem také zkoumal stejnou metodou, která již byla popsána při měření profilu tlustých vrstev v kapitole 4.3.

Na obr. 25 je zachycen příklad měření profilu vrstvy. Skleněné destičky, na kterých byly vrstvy naneseny, nevykazovaly na první pohled při prohlédnutí pouhým okem žádné nerovnosti ani jiné defekty. Při měření tloušťky vrstvy v řádu stovek nm se ale ukázalo, že použité skleněné destičky jsou již v tomto měřítku značně prohnuté, což výrazně komplikovalo měření tloušťky vrstev. Byla zde opět využita metoda měření tloušťky pomocí dvou referenčních úseků, která vliv prohnutí substrátu částečně eliminuje. Vzhledem

k vysoké citlivosti měřícího zařízení bylo měření profilu narušeno otřesy i v případě, že někdo pouze procházel kolem měřícího pracoviště. Značnou komplikací proto byly stavební práce, které v době měření v budově probíhaly. Způsobené otřesy při pohybu hrotu měřícího zařízení v podstatě znemožňovaly použitelné změření profilu vrstvy. Proto bylo měření některých vzorků nutné i několikrát opakovat a z časových důvodů jsem přeskočil měření tloušťky vzorků napařených z drátku délky 90 mm.

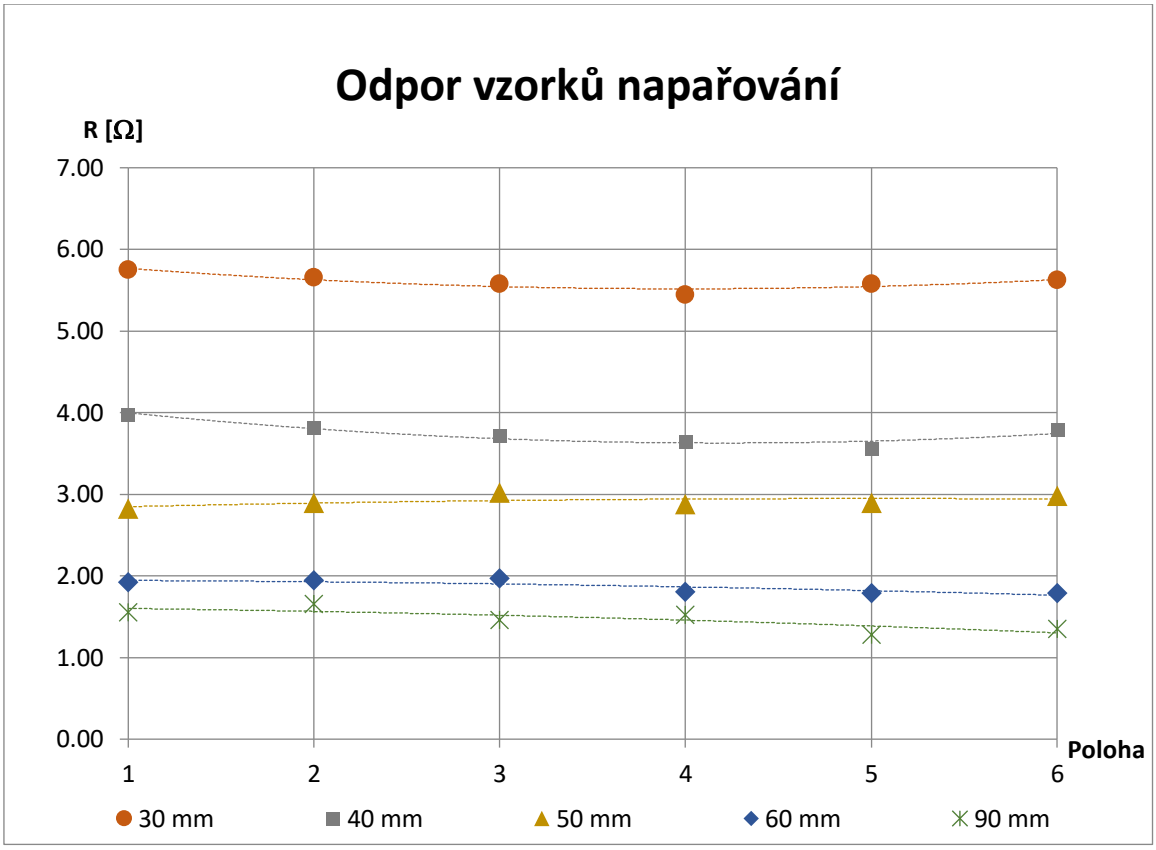


Obr. 25: Měření profilu napařené vrstvy

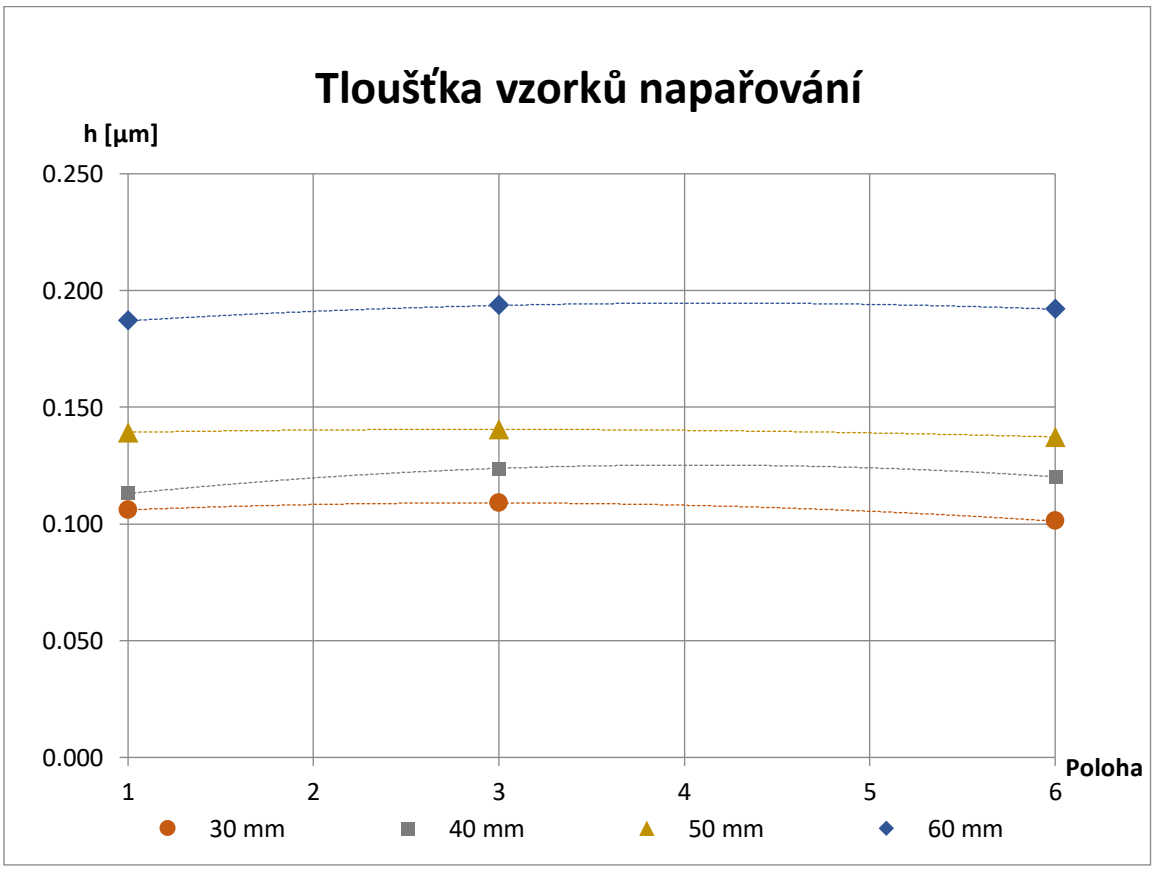
5.2.1 Vlastnosti vzorků napařování

Nejdříve jsem zkoumal průběh odporu a tloušťky po délce napařené vrstvy. Odpor vzorků jsem proměřil po celé délce vrstvy mezi jednotlivými body naznačenými černými tečkami na obr. 22. (vzdálenost mezi tečkami je 1 cm). Z naměřených hodnot odporu v různých polohách jsem pro každý typ vzorku vypočetl průměr odporu v každé poloze a vynesl ho do grafu č. 7. Obdobně do grafu č. 8 jsem vynesl průměrnou tloušťku pro každý typ vzorku naměřenou v různých polohách. Tloušťku jsem měřil pouze ve třech polohách z časových důvodů, které již byly vysvětleny v minulé kapitole.

Jak je zřejmé z grafů č. 7-8, odpor ani tloušťka vzorků napařování se po celé jejich délce příliš nemění (zejména v porovnání se vzorky naprašování, jak bude patrné v další kapitole). U některých vzorků můžeme pozorovat, že odpor nebo tloušťka jedním směrem po celé délce vrstvy mírně stoupá nebo naopak klesá a hodnoty na obou koncích se již nezanedbatelně liší. To je způsobeno konkrétním umístněním substrátu v recipientu vzhledem k odpařovacímu zdroji nebo ne zcela rovnoběžným umístěním substrátu vzhledem ke dnu recipientu. Následkem toho se směrem k jedné straně vrstvy usazuje více materiálu, což způsobí větší tloušťku vrstvy a nižší odpor na této straně.



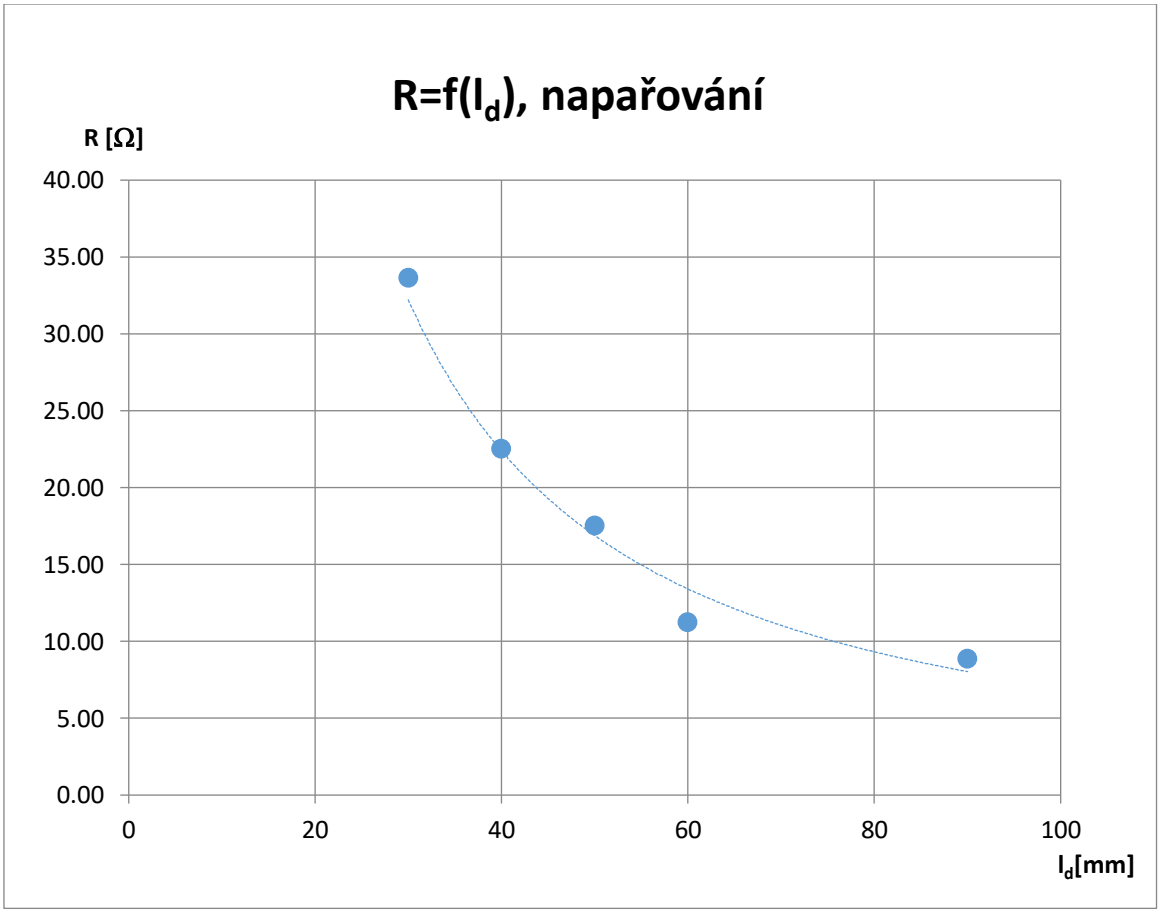
Graf 7: Odpor vzorků napařování mezi body po 1 cm jejich délky



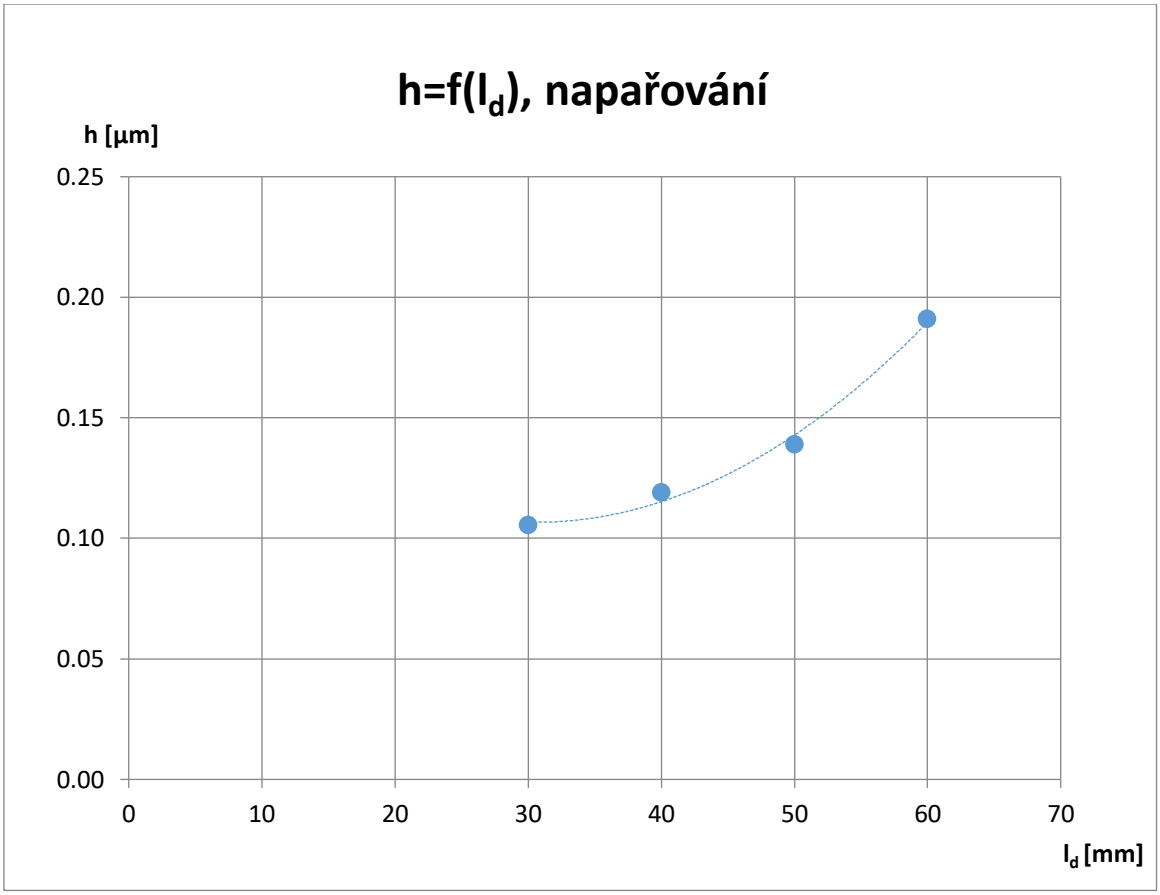
Graf 8: Tloušťka vzorků napařování na okrajích a uprostřed vrstvy

Dále jsem zjišťoval, jak závisí odpor vrstvy na parametrech její depozice. Nejdříve jsem ověřil předpoklady, že odpor napařených vrstev bude klesat a tloušťka bude stoupat se vzrůstající délkou použitého hliníkového drátku. Do grafu č. 9 jsem vynesl závislost průměrného odporu vrstev na délce odpařeného drátku. Do grafu č. 10 jsem vynesl závislost průměrné tloušťky vrstev na délce odpařeného drátku.

Z grafů č. 9-10 je patrné, že tyto teoretické předpoklady byly splněny a naměřený odpor napařených vrstev skutečně klesá s délkou použitého drátku, zatímco jejich tloušťka stoupá. Zároveň jsem tím také ověřil, že platí nepřímá úměrnost mezi tloušťkou tenké vrstvy a jejím odporem. Můžeme si zde ještě všimnout, že se u zkoumaných vrstev se stoupající délkou drátku zpomaluje rychlost poklesu odporu.



Graf 9: Závislost průměrného odporu vzorků napařování na délce použitého drátku

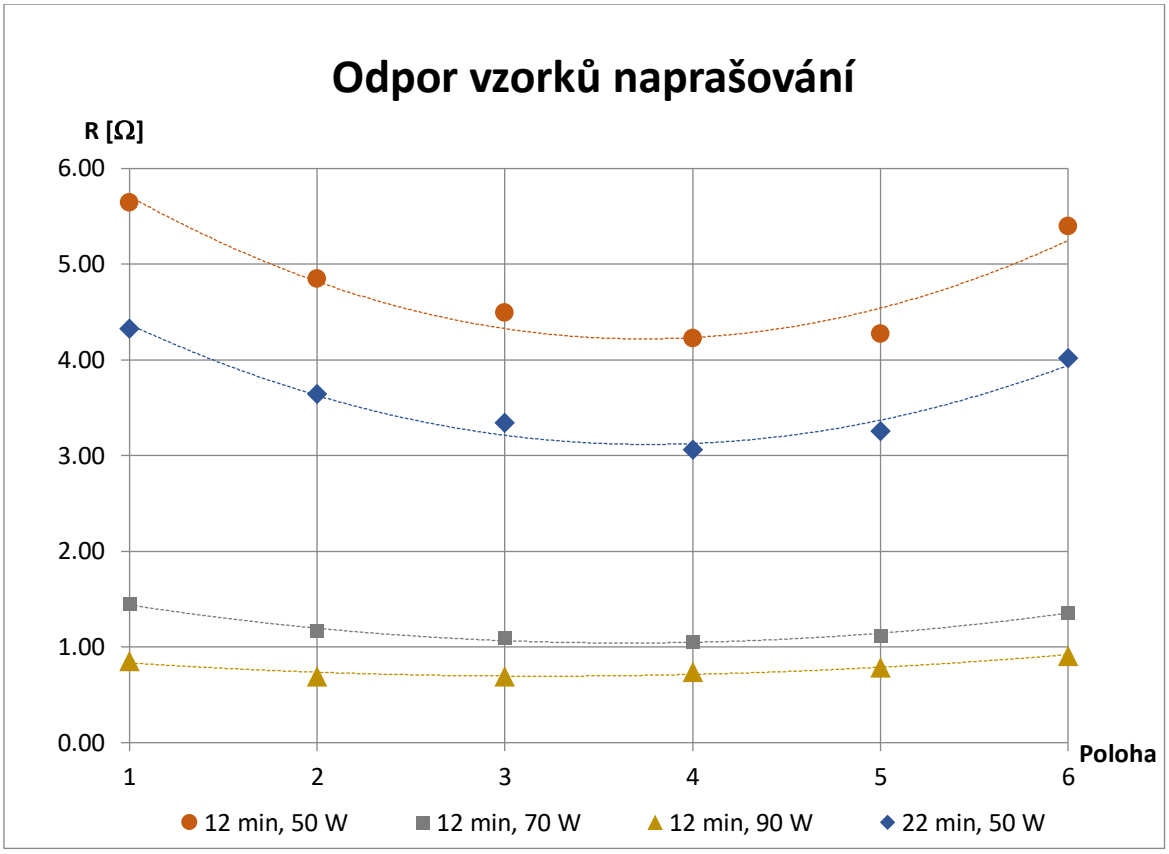


Graf 10: Závislost průměrné tloušťky vzorků napařování na délce použitého drátku

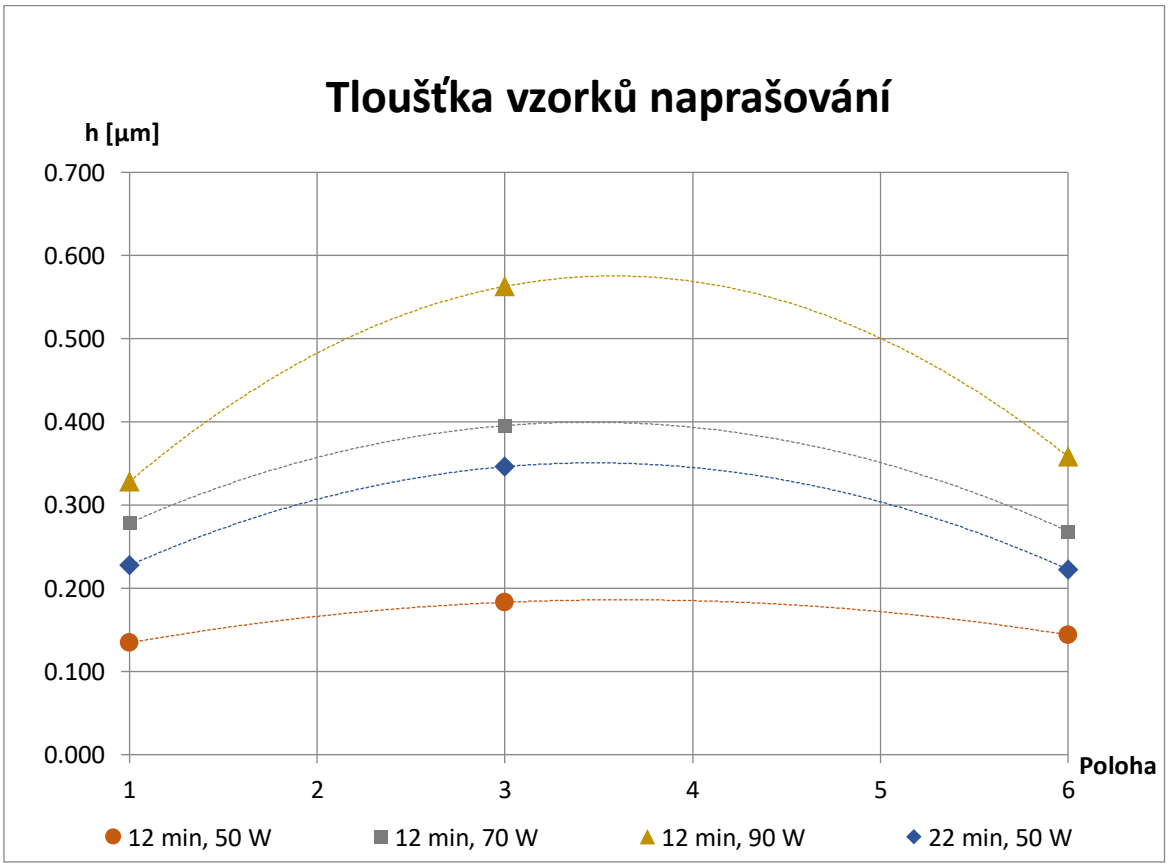
5.2.2 Vlastnosti vzorků naprašování

Obdobně jako u napařených vzorků jsem také u naprášených vzorků zkoumal průběh odporu a tloušťky po délce vrstvy. Odpor naprášených vzorků jsem proměřil po délce naprášených vrstev mezi body po vzdálenosti 0,5 cm a tloušťku jsem měřil opět ve třech polohách. Z těchto hodnot jsem sestrojil grafy č. 11-12.

Zde je situace výrazně odlišná oproti vzorkům napařování. Z grafů č. 11-12 je zřejmé, že v případě naprašování jsou odpor a tloušťka po celé délce vrstev mnohem více proměnlivé. Na okrajích je naměřená hodnota odporu vyšší než v prostřední části vrstev. Naopak tloušťka vrstev je v prostřední části největší a ve směru k oběma okrajům slábne. U některých vzorků rozdíl tloušťky v různých polohách dosahuje až kolem 40 %.



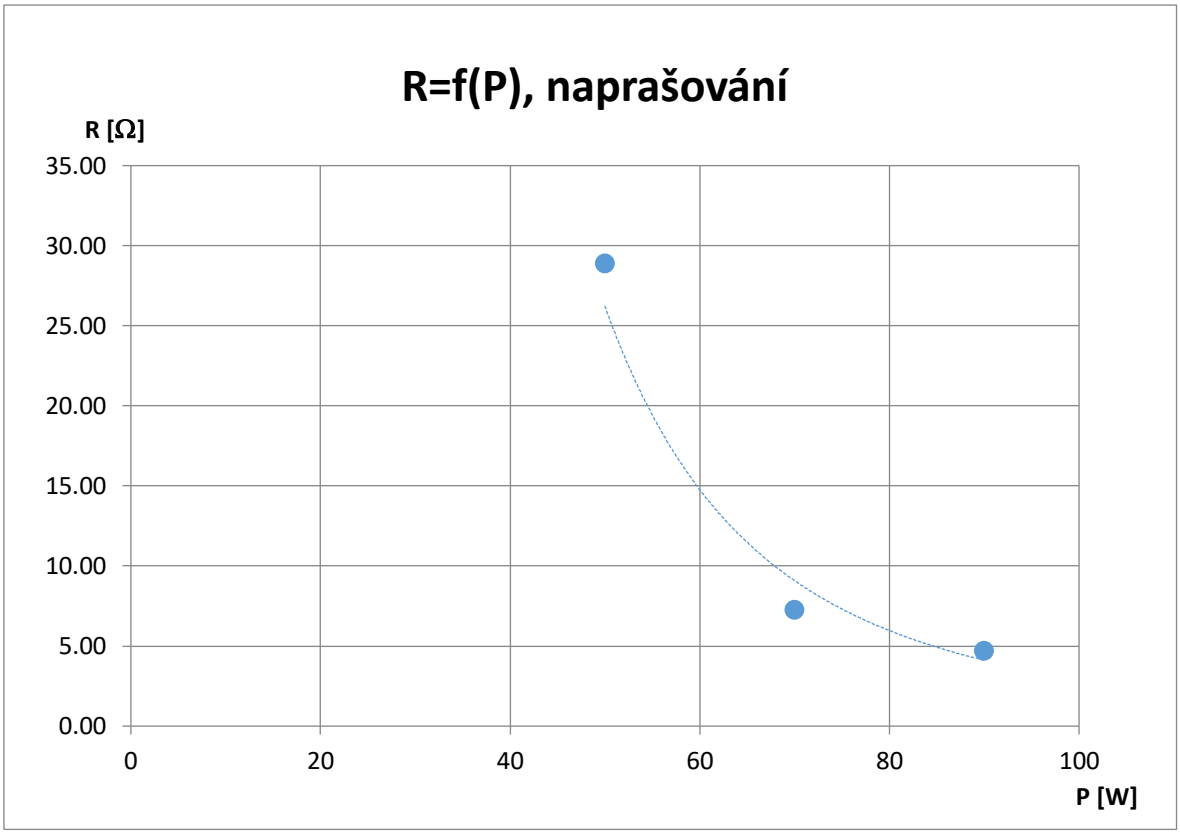
Graf 11: Odpor vzorků naprašování mezi body po 0,5 cm jejich délky



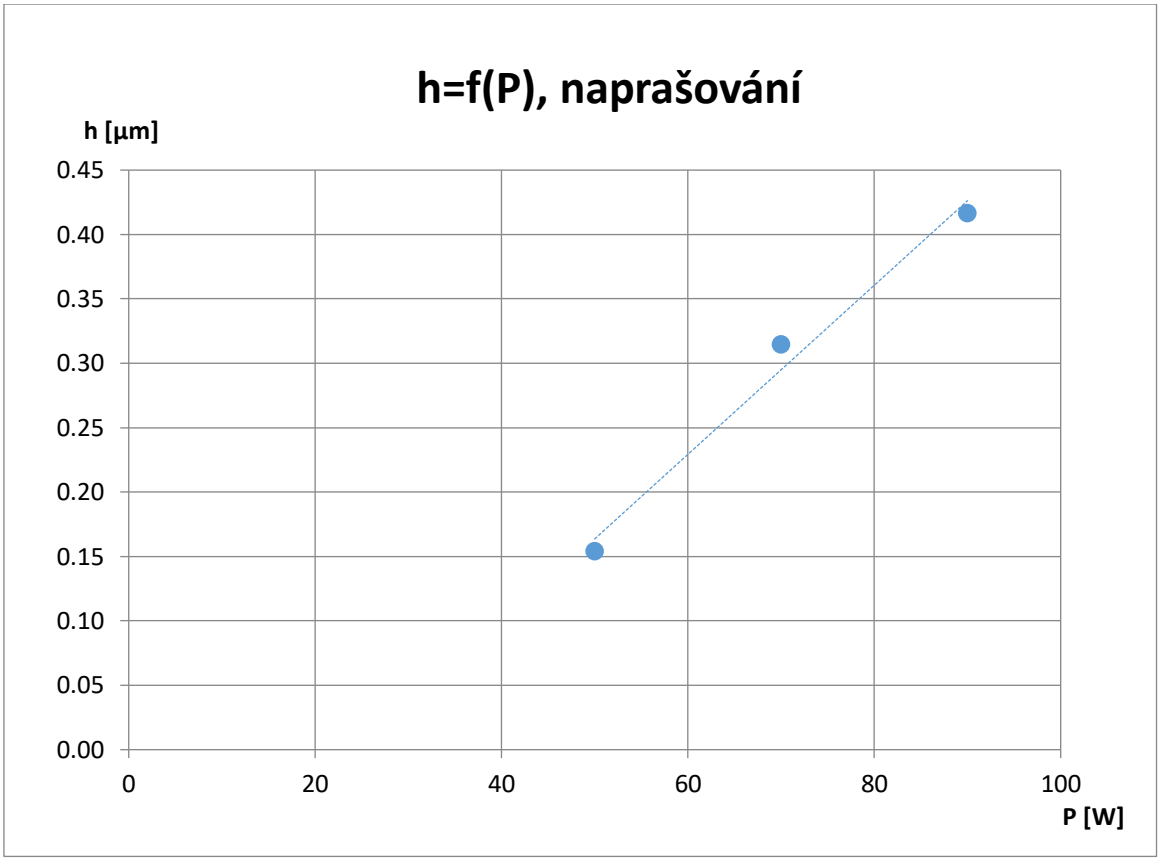
Graf 12: Tloušťka vzorků naprašování na okrajích a uprostřed vrstvy

Tyto tmavé, málo deponované oblasti na okrajích naprášené vrstvy jsou patrné i na fotografii na obr. 22. Vznikají především v důsledku toho, že na substrát v případě naprašování dopadají částice terče pod různými úhly. Při depozici se prostředek substrátu nachází přímo nad zdrojem atomů, které na něj tedy dopadají kolmo a statisticky vzato v největším množství. Na okraje vrstvy dopadá částic naopak nejméně. Pokud je mezi substrátem a maskou i malá mezera, může do ní občas nějaká z odprášených částic proniknout, pokud dopadne pod vhodným úhlem. Tím dochází k depozici i mimo vytyčený motiv, který tak v našem případě nanášených proužků může být o něco delší či širší než předpokládané rozměry. Pokud je navíc maska dostatečně silná (což byla i v tomto případě, přestože se jednalo pouze o 1 mm tenká sklíčka), může na okrajích odstínit část dopadajících částic. Navíc tento efekt je ještě zesilován vlivem magnetického pole magnetronu. Jak lze na obr. 22 vidět, přechody mezi defektními okraji a dobře naprášenou vrstvou jsou pozvolné a jednoznačnou hranici, odkud již lze vrstvu považovat za normální, v podstatě nelze stanovit.

Dále jsem zjišťoval, jak závisí odpor a tloušťka naprášené vrstvy na nastaveném výkonu při stejné době depozice (12 min). Tuto závislost jsem vynesl do grafů č. 13-14. Z těchto grafů je zřejmé, že podle očekávání průměrný naměřený odpor naprášených vrstev klesá s použitým výkonem, zatímco jejich průměrná tloušťka stoupá.



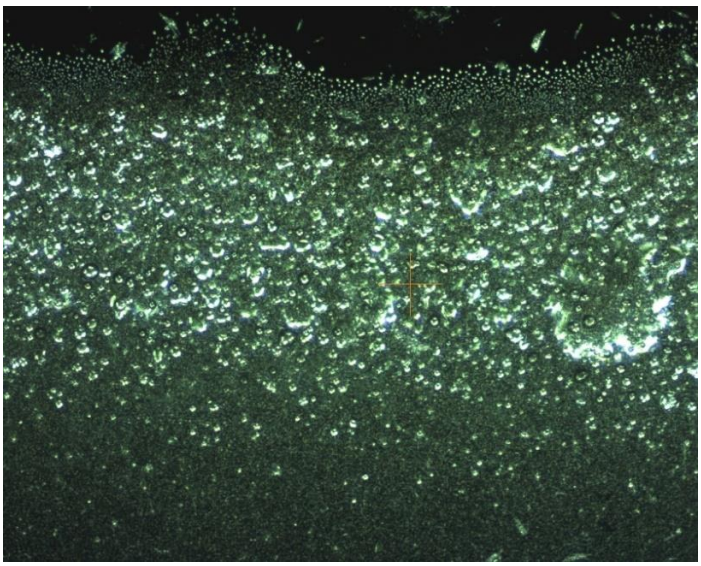
Graf 13: Závislost průměrného odporu vzorků naprašování na nastaveném výkonu při době depozice 12 min



Graf 14: Závislost průměrné tloušťky vzorků naprašování na nastaveném výkonu při době depozice 12 min

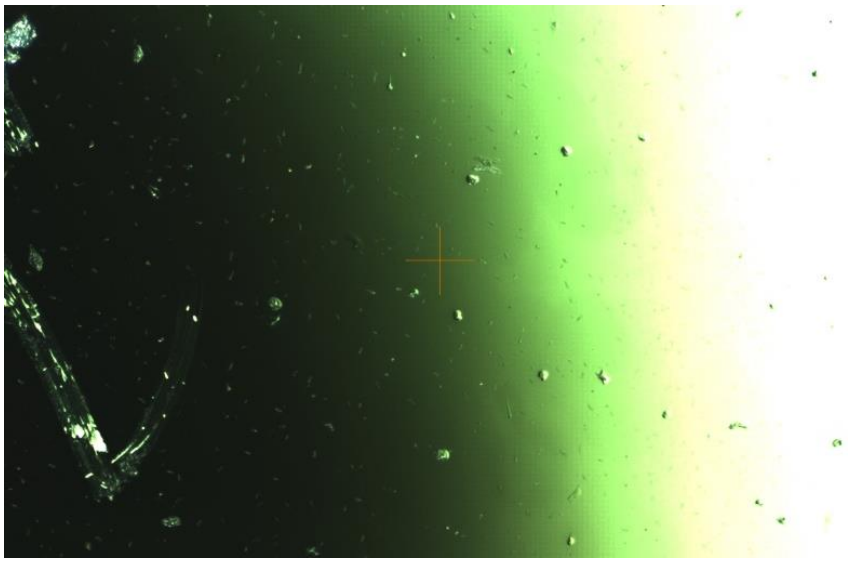
5.3 Kontrola vzorků tenkých vrstev pomocí mikroskopu

Vzorky tenkých vrstev jsem stejně jako vzorky tlustých vrstev zkoumal pod optickým mikroskopem se stonásobným zvětšením. Na následujících obrázcích jsem zaznamenal některé detaily vrstev.



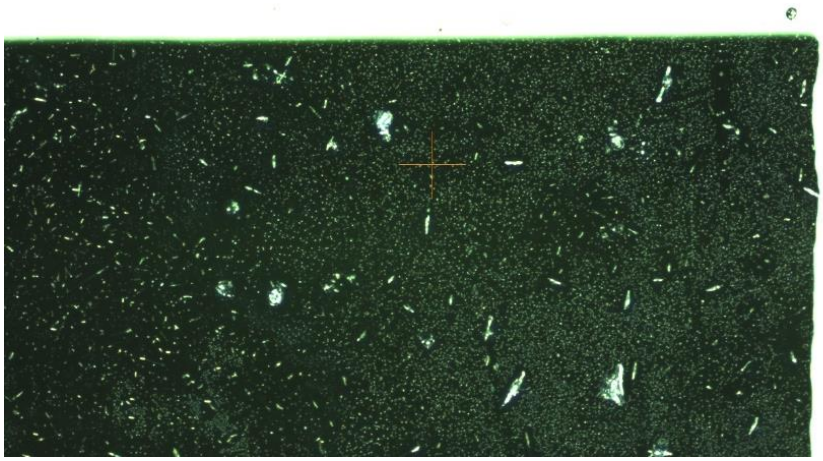
Obr. 26: Okraj naprášené vrstvy

Na obr. 26 jsem zaznamenal okraj naprášené vrstvy. V dolní části obrázku je vrstva spojitá a poměrně hladká. V prostřední části obrázku pak můžeme vidět nerovnosti způsobené nerovnoměrnou depozicí částic. V horní části obrázku, kam dopadalo menší množství částic deponovaného materiálu, můžeme pozorovat nespojité „ostrůvky“ tvořené těmito částicemi.



Obr. 27 Konec naprášené vrstvy

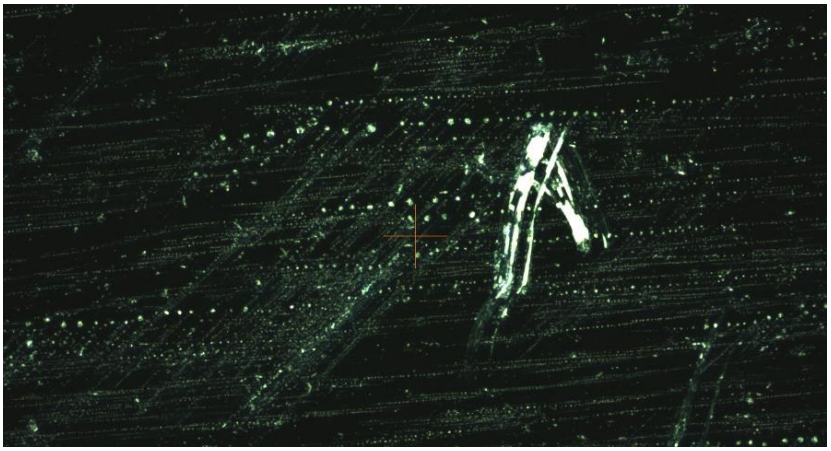
Na obr. 27 lze vidět jeden z konců naprášené vrstvy. Tloušťka vrstvy se v pravé části obrázku postupně zmenšuje „do ztracena“ z důvodů, které byly popsány v kapitole 5.2.2. V levé části obrázku pak můžeme pozorovat škrábanec na povrchu vrstvy způsobený přiložením měřící sondy při měření odporu. Narušení je ale pouze povrchové, protože naprášená vrstva vykazovala poměrně dobrou adhezi k substrátu.



Obr. 28: Roh napařené vrstvy

Na obr. 28 jsem zaznamenal roh napařené vrstvy. Zde lze vidět velmi ostrý přechod mezi napařenou vrstvou a částí substrátu, která byla zakrytá maskou. Okraj napařené vrstvy je mnohem ostřejší než v případě naprášené vrstvy a také povrch napařené vrstvy je hladší.

I pohledem pouhým okem na vzorky bylo patrné, že napařená vrstva má lesklý, až dalo by se říct „zrcadlový“ povrch, zatímco povrch naprášené vrstvy je spíše matný.



Obr. 29: Narušení struktury napařené vrstvy

Na obr. 29 můžeme pozorovat škrábanec v prostřední části napařené vrstvy způsobený opět přiložením měřící sondy při měření odporu. V tomto případě byly ale měřící hroty multimetru dostatečně ostré na to, aby pouhým jejich přiložením k napařeným vzorkům za účelem změření odporu došlo k úplnému odškrábnutí celé tloušťky vrstvy (v podstatě až na úroveň substrátu). V aplikacích, kde je vyžadována silnější adheze k substrátu, je tedy vhodnější použít technologii naprašování než technologii napařování. Toto narušení vrstvy mohlo mít vliv na samotné měření odporu. Vzhledem k opakovanému měření vzorků a velmi podobným hodnotám jednotlivých měření lze však tento případný vliv považovat za zcela zanedbatelný.

6 Porovnání výrobních nákladů technologií tenkých vrstev

V této části práce budou vypočteny náklady na výrobu tenkých vrstev technologií napařování a naprašování v laboratoři Katedry elektrotechnologie. Původně bylo plánováno zahrnout do tohoto porovnání i průmyslové provozy ve společnostech, které se zabývají výrobou elektroniky pomocí těchto technologií. Od žádné ze společností, které jsem kontaktoval, se mi ale nepodařilo získat potřebné informace o výrobních zařízeních. Firmy si nejspíš tyto informace střeží jako obchodní tajemství. Z tohoto důvodu se zde budu věnovat pouze kalkulaci nákladů na výrobu tenkých vrstev v laboratorních podmínkách FEL ČVUT.

6.1 Kalkulace nákladů

Cílem kalkulace nákladů je zjištění nákladů na tzv. kalkulační jednici, což představuje výsledný výrobek nebo službu. Kalkulační jednice je vždy vymezena měrnou jednotkou, na kterou se náklady vztahují. Ve zde zkoumaném případě představuje kalkulační jednicí jeden vzorek tenké vrstvy, který byl vyroben napařováním nebo naprašováním v laboratoři Katedry elektrotechnologie.

V kalkulaci budou uvažovány přímé náklady na výrobu, tedy přímý materiál (substrát a materiál, z kterého vzniká tenká vrstva), přímé mzdy pracovníků, kteří obsluhují zařízení a ostatní přímé náklady (spotřeba elektrické energie, pracovního plynu a také sociální a zdravotní pojištění pracovníků). Kromě těchto přímých nákladů budou ještě do celkových nákladů zahrnuty pořizovací investice zařízení přepočítané s ohledem na časovou hodnotu peněz. Ceny těchto zařízení se mohou výrazně lišit, a tedy významně ovlivnit celkové náklady obou technologií na jeden výrobek.

Nepřímé náklady jako výrobní, správní, zásobovací a odbytová režie nebudou ve výpočtech zahrnuty. Dále nebudou uvažovány ani náklady na opravy zařízení, ztráty ze zmetků a vadných výrobků nebo daň z příjmu. Zanedbány budou také položky, které jsou tak malé, že by se v celkových nákladech projevily jen nepatrně jako např. náklady na chladící vodu, ochranné rukavice nebo jiné pomůcky a nástroje.

Zkoumaný výrobní postup spadá do kusové výroby. Tento druh výrobního postupu se vyznačuje malou mírou automatizace a malým počtem zaměstnanců. Konkrétně v tomto případě je pro výrobu jedné tenké vrstvy vždy využito jedno zařízení, které obsluhuje pouze jeden člověk. Výhodou kusové výroby je menší investice do zařízení, která nejsou zpravidla tak složitá a tudíž drahá, jako komplikovanější zařízení a linky pro automatizovanou výrobu. Nevýhodou je, že vzhledem k malé míře automatizace je třeba dbát na vyšší kvalifikaci pracovníků, protože tito pracovníci zodpovídají za celý průběh výrobního procesu. S vyšší kvalifikací je spojené také vyšší platové ohodnocení těchto lidí. Další nevýhodou je např. skutečnost, že vzhledem k malým objemům výroby není možné využívat množstevní slevy

při nákupu materiálů. Opakem kusové výroby je plně automatizovaná sériová výroba. V tomto případě většinu zodpovědnosti za výrobní proces přebírají programovatelné stroje a linky, jejich obsluze tedy postačí nižší kvalifikace. Automatizovaná sériová výroba je typická spíše pro velké podniky, které zaměstnávají větší množství pracovníků a disponují velkými skladovacími prostory.

6.1.1 Odpisy

Odpisy se používají k vyjádření míry opotřebení odepisovaného zařízení. Výše odpisu představuje postupného snižování hodnoty zařízení. Odpisy můžeme rozdělit na účetní a daňové. Daňové odpisy se od účetních odpisů odlišují tím, že doba a průběh odepisování je stanoven podle zákona, zatímco účetní odpisy si společnost volí sama podle skutečnosti. Metody odpisování můžeme dělit na lineární a nelineární. Pro výpočet nákladů na jednotlivé technologie jsem použil účetní odpisy odepisované lineárně. Každý rok bude tedy odepsáno stejné procento z pořizovací ceny zařízení. Dlouhodobý majetek je možné odepisovat rovnoměrně či zrychleně, pro účely této práce jsem zvolil rovnoměrné odepisování. Odpisy figurují v kalkulaci jako náklad, o který je možné snížit základ pro výpočet daně z příjmu. Aby bylo možné stanovit hodnotu daňového základu, je potřeba správně zařadit dlouhodobý hmotný a nehmotný majetek do odpisových skupin dle přílohy č. 1 k zákonu č. 586/1992 Sb.

Při výpočtech částky, která se bude odepisovat, může nastat několik problémů. Prvním z nich je volba doby životnosti zařízení, které se bude odepisovat. Aby bylo možné porovnat zařízení pro naprašování a napařování, je také třeba vzhledem k jejich různým datům pořízení přepočítat pořizovací ceny na ceny současné. Zařízení pro napařování i naprašování jsou dlouhodobým hmotným majetkem s použitelností více jak 1 rok a pořizovací cenou vyšší než 40 000 Kč. Volba doby životnosti je závislá na hospodářské situaci. V době konjunktury se užívá doba životnosti 6 let, v době deprese 10 let a v době krize i 12 let. S horší ekonomickou situací se tedy volí delší doba životnosti. Pro účely této práce zvolím jako dobu životnosti T = 6 let.

6.1.2 Diskontní sazba

Dále je také potřeba vzít v úvahu skutečnost, že hodnota peněz se časem mění a je tedy potřeba zvolit určitou diskontní sazbu. Diskont lze chápat jako roční míru vyjadřující činitele času, kterou jsou diskontovány budoucí peněžní toky na současnou hodnotu.

Pro účely této práce jsem zvolil diskontní sazbu 10 %. Obecně lze diskont volit podle výnosnosti podniku, ale zde žádný podnik neuvažuji. Diskont se při zhoršující se ekonomické situaci volí (na rozdíl od doby životnosti zařízení) menší. Tedy při konjunktuře je diskontní sazba 10 %, při depresi 6 % a při krizi 4 %. Při určení diskontní sazby také záleží, zda počáteční kapitálový výdaj na investici pochází z vlastního kapitálu, z cizího kapitálu nebo z kombinace vlastního a cizího kapitálu. Při financování investice z vlastního kapitálu se pro určení diskontní sazby vychází z úrokové míry bezrizikových investic (například státních

dluhopisů) a rizikové přirážky. Naopak při financování investice z cizího kapitálu je diskontní sazba rovna finančním nákladům cizího kapitálu (úrokové míře). V případě kombinace vlastního a cizího kapitálu je určení diskontní sazby nejobtížnější a vychází z průměrných vážených nákladů na kapitál a je případně upraven o míru rizika investice, míru inflace atp.

6.1.3 Anuita

Anuita představuje obecně stálou částku hrazenou v pravidelných časových intervalech po dané období, při jejímž hodnocení se uplatňuje koncept časové hodnoty peněz. Doba životnosti a diskontní míra bude použita pro výpočet anuity podle následujícího vztahu:

$$A = \frac{(1+r)^T r}{(1+r)^T - 1} \tag{10}$$

kde A je anuita, T je doba životnosti zařízení a r je diskontní sazba.

Dosazením hodnot vybraných v předchozích kapitolách pro dobu životnosti zařízení a diskont do vzorce (10) získáme výslednou anuitu A = 0,229. Tato hodnota anuity bude použita k určení ceny používání výrobního zařízení za 1 rok. Vzhledem k tomu, že pro zařízení na napařování i naprašování byl stanoven stejný diskont i doba životnosti, bude pro obě zařízení použita také stejná anuita.

6.1.4 Inflace

Inflace se uvádí v procentech a vyjadřuje všeobecný vzestup cenové hladiny. Opak inflace se nazývá deflace a vyjadřuje pokles celkové cenové hladiny.

Vzhledem k tomu, že zařízení pro napařování a naprašování byla zakoupena v rozmezí i několika desítek let, není možné porovnávat jejich původní ceny, protože inflace českou korunu během tohoto období výrazně znehodnotila. Je proto potřeba přepočítat pořizovací cenu zařízení na dnešní hodnotu peněz a zjistit tak, jaká by při dnešní hodnotě peněz byla cena těchto zařízení.

Míru inflace pro jednotlivé roky jsem zjistil z webu Českého statistického úřadu. Ten ale neposkytuje informace o inflaci před rokem 1989. Vzhledem k tomu, že některé součásti použitých výrobních zařízení byly pořízeny již v roce 1968, bude potřeba pracovat s odhadovanou mírou inflace před rokem 1989, která činí 3,3 % p.a. Míra inflace spolu s přepočtenou pořizovací cenou použitých zařízení pro jednotlivé roky mezi 1968 a 2019 je z důvodu velkého množství dat uvedena pouze v příloze (MS Excel dokument).

6.2 Stanovení výrobních nákladů technologie napařování

V této kapitole bude určena výše jednotlivých nákladových položek pro jeden napařený vzorek. Ceny použitých materiálů, pracovního plynu a údaje o příkonech zařízení pro napařování a naprašování jsem zjistil s pomocí vedoucí práce. Pořizovací ceny a rok

nákupu použitých zařízení jsem zjistil z inventurního seznamu katedry také s pomocí vedoucí práce.

6.2.1 Náklady na zaměstnance pro napařování

Během používání zařízení pro napařování i naprašování je časově nejnáročnější částí čekání na odčerpání recipientu a dosažení dostatečné úrovně vakua, proto mohou být obě zařízení v provozu současně a obsluhovány pouze jedním pracovníkem. Vzhledem laboratorní povaze obou zařízení je v každém z nich vyráběn v jednu chvíli pouze 1 vzorek.

Průběh napařování i naprašování můžeme rozdělit na několik fází, které jsem uvedl v tab. 4 spolu s jejich odhadovanou časovou náročností.

Fáze	Příprava substrátu (a materiálu)	Předčerpání vakua	Čerpání vakua	Depozice tenké vrstvy	Zavzdušnění recipientu	Celková doba
Napařování [min]	5	10	15	3	5	38
Naprašování [min]	5	15	20	17	7	64

Tab. 4: Doba trvání fází napařování a naprašování

Pokud uvažujeme pracovní dobu, která má 8 hodin, dokáže pracovník podle dat v tab. 4 stihnout za den vyrobit 12 vzorků napařováním a 7 vzorků naprašováním. Je ovšem nutné dodat, že uvedené doby v tabulce jsou průměrné hodnoty. Např. doba čerpání vakua v recipientu napařovacího zařízení je při prvním čerpání delší a s opakovaným čerpáním za sebou se zkracuje. Stejně tak doba depozice při naprašování se liší v závislosti na požadovaných parametrech výsledné tenké vrstvy.

Na webu Českého statistického úřadu jsem zjistil, že průměrná hrubá měsíční mzda dosáhla v Praze ve 4. čtvrtletí roku 2019 na částku 44 237 Kč. Do nákladů na zaměstnance je třeba započítat také odvody sociálního pojištění (24,8 % hrubé mzdy) a zdravotního pojištění (9 % hrubé mzdy). Tím vznikne tzv. superhrubá mzda, která bude celkovým nákladem na zaměstnance. Superhrubá mzda je oproti hrubé mzdě o 33,8 % vyšší a vychází tedy na 59 190 Kč měsíčně.

S těmito informacemi již mohu určit mzdové náklady na jeden vyrobený vzorek technologií napařování. Pro tyto výpočty budu uvažovat rok, který má 252 pracovních dnů. Každý měsíc má tedy průměrně 21 pracovních dnů. Za rok provozu se tedy vyrobí 3024 napařených vrstev a 1764 naprášených vrstev. Denní superhrubá mzda zaměstnance bude po zaokrouhlení 2 819 Kč. Výrobou 12 napařených vzorků pracovník stráví stejný čas jako výrobou 7 vzorků naprášených. Polovina superhrubé mzdy zaměstnance bude tedy rozdělena mezi napařené vzorky. Náklad na mzdu, sociální a zdravotní pojištění je 1 410 Kč pro napařené vzorky, tedy 117,5 Kč pro jeden napařený vzorek.

6.2.2 Odpisy zařízení pro napařování

Pořizovací cena napařovacího zařízení Edwards je 199 183 Kč. Zařízení bylo zakoupeno v roce 1968. Nejdříve je nutné přepočítat pořizovací cenu zařízení na aktuální cenu k 1. 1. 2020, jak bylo uvedeno v souvislosti s inflací v kapitole 6.1.4. Výpočet aktuální ceny bude proveden pomocí následujícího vztahu:

$$K_a = K_t * (1 + i_{t+1}) * (1 + i_{t+2}) * \ldots * (1 + i_{2019}) \quad (11)$$

kde K_a je aktuální cena k 1. 1. 2020, K_t je původní pořizovací cena a i_x je míra inflace v daném roce.

Aktuální cena napařovacího zařízení Edwards k 1. 1. 2020 vychází na 2 216 123 Kč. Nyní už je možné určit anuitně rozpočítané částky, které budou z celkové ceny zařízení odepisovány každý rok. Ty budou konstantní, protože je uvažováno lineární odepisování. Pro výpočet bude použit následující vztah:

$$O = A * K_a \quad (12)$$

kde O je částka odepisovaná každý rok, A je anuita a K_a je aktuální cena zařízení.

Roční odepisovaná částka pro napařovací zařízení tedy činí 507 429 Kč. Za rok je podle kapitoly 6.2.1 napařeno 3024 vzorků. Odpisy zařízení pro jeden napařený vzorek jsou tedy 167,8 Kč.

6.2.3 Náklady na materiál pro napařování

Použitým materiálem pro napařování tenké vrstvy byl hliník, který je dodáván ve formě drátku o průměru 1 mm a délce 50 mm s čistotou až 99,999 %. Na webu prodejce Kurt J. Lesker Company je uvedena cena za 100 m drátku 233 €, což odpovídá 5 921 Kč při kurzu 25,41 ze dne 31. 12. 2019. Drátek délky 100 m vystačí zhruba na výrobu 2000 vzorků. Náklady na nanášený materiál pro jeden napařený vzorek činí 2,9 Kč.

Dále je třeba do této kategorie započítat náklady na substrát. Tím byly skleněné obdélníkové destičky o rozměrech 75 x 25 mm a tloušťce přibližně 1 mm. Cena za 50 ks těchto destiček je 13 €, což odpovídá 330 Kč. Náklady na substrát pro jeden vzorek činí 6,6 Kč. Celkové náklady na materiál pro jeden napařený vzorek jsou tedy 9,5 Kč.

6.2.4 Náklady na elektrickou energii pro napařování

V této kapitole bude pro výpočet nákladů na elektrickou energii uvažována pouze spotřeba přímo samotného zařízení pro napařování. Do nákladů tedy nebude započítána např. spotřeba elektrické energie na osvětlení, klimatizaci, topení a další položky, které patří spíše do režie, protože se věnuji pouze přímým nákladům.

Zařízení pro napařování má vzhledem k jeho stáří poměrně vysokou spotřebu elektrické energie. V tab. 5 jsem určil roční spotřebu pro jednotlivé části napařovací

soustavy. Z tabulky je zřejmé, že celková spotřeba elektrické energie za rok pro napařovací zařízení vychází 1918,2 kWh.

Zařízení	**Difúzní vývěva**	**Rotační vývěva**
Příkon [W]	2250	1100
Doba využití [hod/rok]	655	404
Spotřeba elektrické energie za rok [kWh]	1473,8	444,4

Tab. 5: Spotřeba elektrické energie zařízení pro napařování

Ke zjištění ceny za silovou elektřinu jsem na webu Energetického regulačního úřadu využil cenový kalkulátor. V dalších krocích budu počítat s cenou samotné elektrické energie (variabilní složkou) 4 791 Kč/MWh. V platbě za silovou elektřinu však figurují ještě fixní poplatky, mezi které patří stálá platba za jistič, podpora elektřiny z podporovaných zdrojů energie a platba za činnosti operátora na trhu. Celkové fixní náklady činí 1 120 Kč/rok. Tato částka bude rozpočítána mezi zařízení pro napařování a naprašování podle poměru spotřebované energie.

Cena elektrické energie využívané zařízením pro napařování (variabilní náklady) vychází na 9 190,1 Kč/rok. Po rozpočítání fixní platby podle poměru spotřebované energie s pomocí tab. 5 a tab. 6 v kapitole 6.3.4 činí fixní náklady na zařízení pro napařování 804 Kč/rok. Celkové náklady na elektřinu v případě napařování tedy vycházejí na 9 994,1 Kč/rok. Po vydělení této částky počtem vyrobených kusů za rok (3024 napařených výrobků) získáme náklady spojené s elektrickou energií na 1 výrobek. Celkové náklady na elektrickou energii pro jeden napařený vzorek jsou tedy 3,3 Kč.

6.3 Stanovení výrobních nákladů technologie naprašování

V této kapitole bude určena výše jednotlivých nákladových položek pro jeden naprášený vzorek.

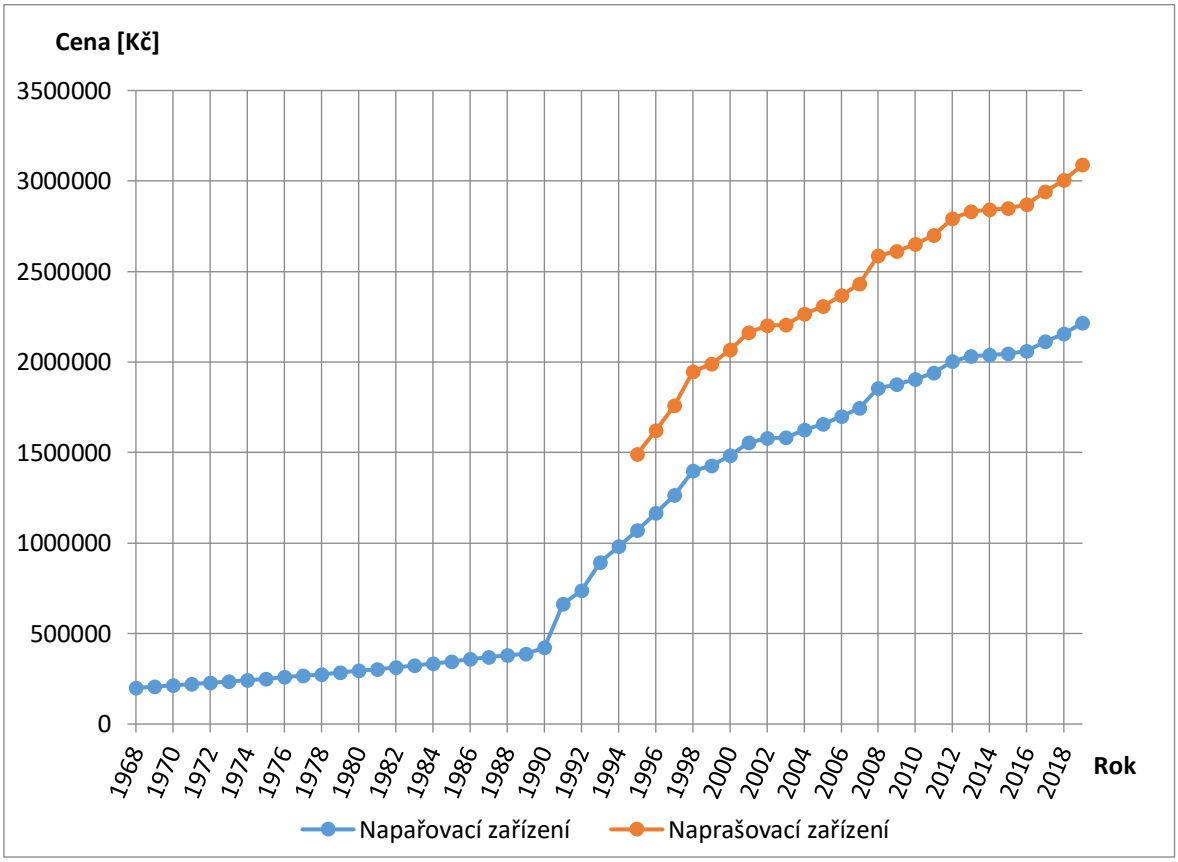
6.3.1 Náklady na zaměstnance pro naprašování

V kapitole 6.2.1 bylo vypočteno, že v uvažovaném provozu se za rok vyrobí 1 764 naprášených tenkých vrstev a že denní superhrubá mzda zaměstnance vychází na 2 819 Kč. Vzhledem k tomu, že zaměstnanec za stejnou dobu vyrobí 12 napařených vzorků a 7 naprášených vzorků, připadá právě polovina jeho denní superhrubé mzdy, tedy 1410 Kč, na 7 naprášených vzorků. S těmito informacemi již mohu určit, že náklady na mzdu, sociální a zdravotní pojištění pro jeden naprášený vzorek jsou 201,4 Kč.

6.3.2 Odpisy zařízení pro naprašování

Pořizovací cena naprašovacího zařízení Balzers Pfeiffer je 1 490 495 Kč. Zařízení bylo zakoupeno v roce 1995. Naprašovací souprava je doplněna kompresorem, jehož pořizovací cena je 10 612 Kč v roce 2006, dávkovacím vakuovým systémem, jehož pořizovací cena je 51 700 Kč v roce 2004 a redukčním ventilem, jehož pořizovací cena je 12 483 Kč v roce 2018.

Nyní opět přepočtu pořizovací ceny zařízení na aktuální ceny k 1. 1. 2020 podle vzorce (11) v kapitole 6.2.2. Aktuální cena naprašovacího zařízení Balzers Pfeiffer vychází na 3 087 670 Kč. Aktuální cena kompresoru je 13 843 Kč, aktuální cena dávkovacího vakuového systému dosahuje 70 440 Kč a aktuální cena redukčního ventilu dosahuje 12 833 Kč. Celková aktuální cena soupravy pro naprašování k 1. 1. 2020 je tedy 3 184 786 Kč. Vývoj aktuální ceny naprašovacího i napařovacího zařízení v průběhu let jsem vynesl do grafu 15.



Graf 15: Vývoj aktuální ceny zařízení

Dále již mohu určit roční odepisovanou částku pro naprašovací soupravu pomocí anuity podle vzorce (12). Tato částka činí 729 316 Kč. Za rok je naprášeno 1 764 vzorků. Odpisy zařízení pro jeden naprášený vzorek jsou tedy 413,4 Kč.

6.3.3 Náklady na materiál pro naprašování

V případě naprašování je deponovaný materiál umístěn do recipientu ve formě speciálního terče z naprašovaného materiálu. Na webu prodejce Kurt J. Lesker Company je

uvedena cena terče 294 €, což odpovídá 7471 Kč při výše uvedeném kurzu. Terč vystačí zhruba na výrobu 1000 vzorků. Náklady na nanášený materiál pro jeden naprášený vzorek jsou tedy 7,5 Kč.

Naprašované vrstvy byly nanášeny stejně jako vrstvy napařované na skleněné destičky v ceně 6,1 Kč pro jeden vzorek. Celkové náklady na materiál pro jeden naprášený vzorek jsou tedy 13,6 Kč.

6.3.4 Náklady na elektrickou energii pro naprašování

Souprava pro napařování je o několik desítek let novější, proto jsou příkony jejích součástí podstatně nižší.

V tab. 6 jsem určil roční spotřebu pro jednotlivé části naprašovací soustavy. Celková spotřeba elektrické energie za rok pro naprašovací zařízení vychází 752,6 kWh.

Zařízení	**Vysokofrekvenční generátor**	**Magnetron**	**Turbovývěva**	**Membránová vývěva**
Příkon [W]	300	500	500	140
Doba využití [hod/rok]	588	588	441	441
Spotřeba elektrické energie za rok [kWh]	176.4	294.0	220.5	61.7

Tab. 6: Spotřeba elektrické energie zařízení pro naprašování

Cena elektrické energie využívané zařízením pro naprašování (variabilní náklady) vychází na 3 605,7 Kč/rok. Po rozpočítání fixní platby podle poměru spotřebované energie činí fixní náklady na zařízení pro naprašování 316 Kč/rok. Celkové náklady na elektřinu v případě napařování tedy vycházejí na 3 921,7 Kč/rok. Za rok se vyrobí 1764 naprášených vzorků. Celkové náklady na elektrickou energii pro jeden naprášený vzorek jsou tedy 2,2 Kč.

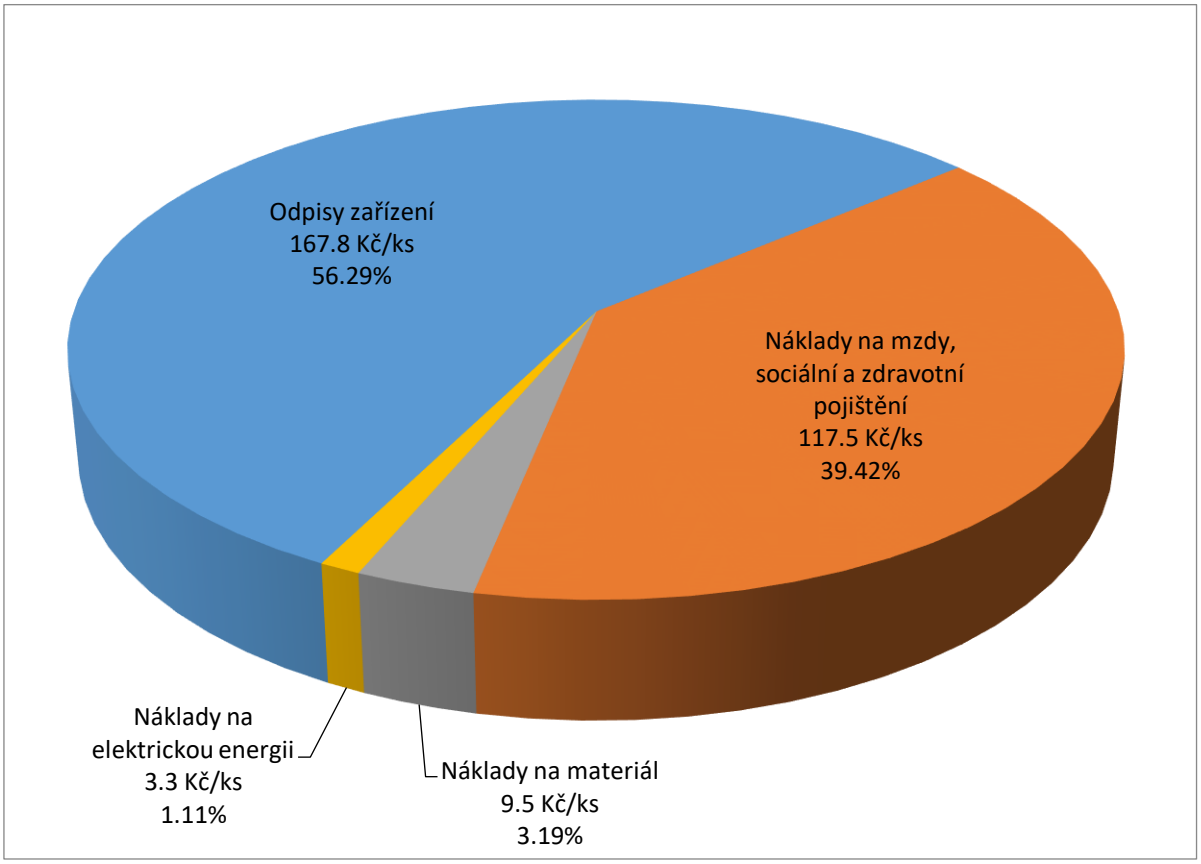
6.3.5 Náklady na pracovní plyn pro naprašování

V případě naprašování je ještě třeba vzít v úvahu náklady na pracovní plyn, kterým byl v tomto případě argon. Pořizuje se v tlakové lahvi za cenu 5 000 Kč. Při depozici vrstvy dosahuje tlak v recipientu hodnoty 2 Pa. V ideálním případě by tedy byla spotřeba pracovního plynu na výrobu jednoho vzorku minimální. Největší spotřeba argonu ale vzniká vlivem netěsností při jeho přivádění do recipientu. Jedna lahev tak vystačí zhruba na tvorbu 6000 vzorků. Náklady na argon pro jeden naprášený vzorek vycházejí tedy na 0,8 Kč. Pronájem tlakové lahve činí zhruba 2000 Kč za rok. Při počtu vyrobených vzorků 1764 za rok vycházejí náklady spojené s pronájmem lahve pro jeden vzorek na 1,1 Kč. Celkové náklady na pracovní plyn pro jeden naprášený vzorek jsou tedy 1,9 Kč.

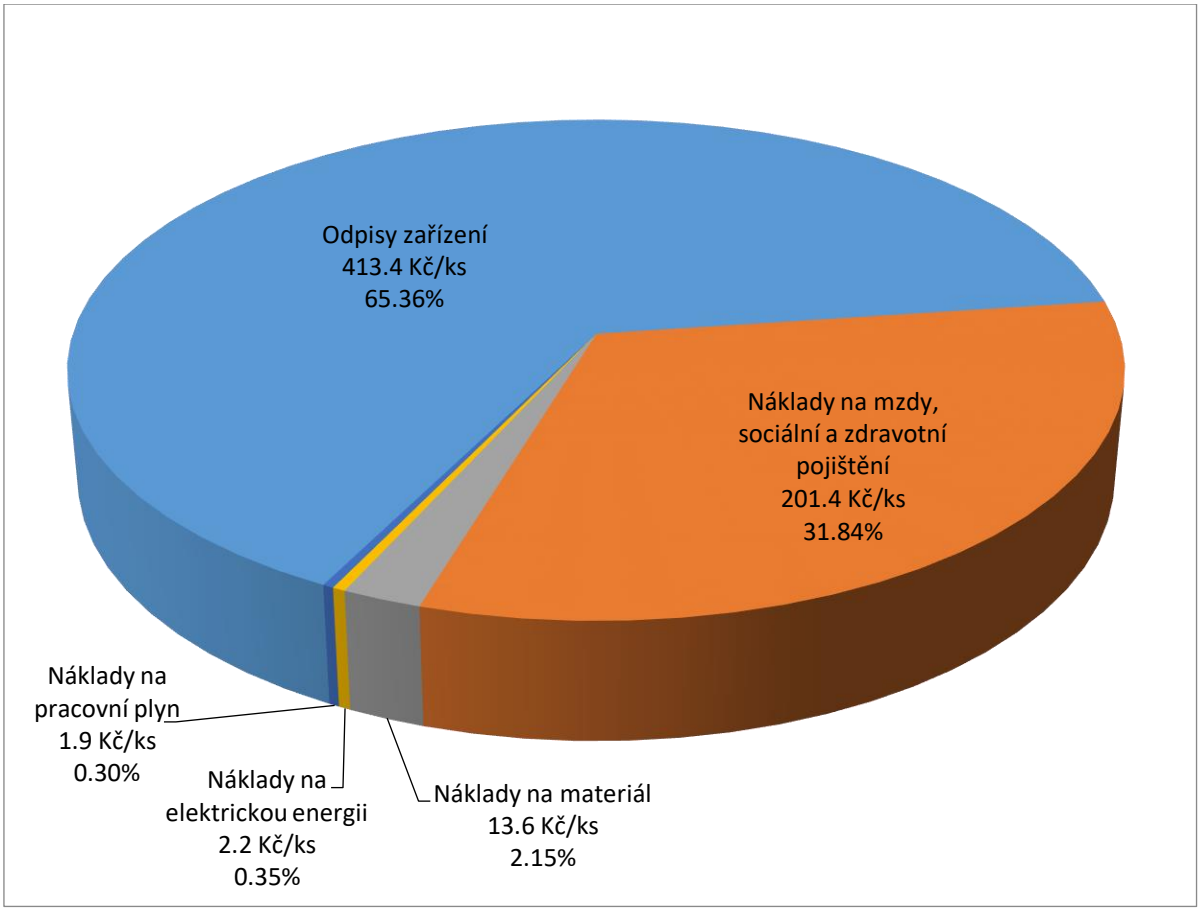
6.4 Struktura nákladů

V kruhových grafech č. 16-17 jsem zobrazil výši jednotlivých nákladových položek pro napařované a naprašované vzorky a procentuální podíl těchto položek na celkových nákladech jednotlivých technologií. Z grafů je zřejmé, že odpisy zařízení představují pro obě technologie zdaleka největší část celkových nákladů. Další položku s významným procentuálním podílem tvoří náklady na zaměstnance. Na výsledné částce se nezanedbatelně projeví také náklady na materiál. Z grafů je ale patrné, že ostatní stanovené nákladové položky už jsou spíše okrajové. Ještě nižší (až zanedbatelný) by byl procentuální podíl dalších položek, jako např. náklady na chladící vodu, ochranné rukavice a další pomůcky, jejichž hodnotu jsem zde proto ani nestanovil.

Vysoký procentuální podíl odpisů na celkových nákladech je způsoben jednak poměrně vysokou pořizovací cenou zařízení, což je pochopitelné vzhledem ke komplikovanosti obou aparatur. Dále má vliv také ten fakt, že jsem zvolil poměrně krátkou dobu životnosti odepisovaných zařízení a vysokou diskontní sazbu, což se projevilo na vyšší hodnotě anuity, která byla následně použita pro výpočet odpisů.



Graf 16: Struktura nákladů na napařování



Graf 17: Struktura nákladů na naprašování

Sečtením jednotlivých nákladových položek určíme celkové náklady na jeden vyrobený vzorek, které pro technologii napařování činí 298,1 Kč/ks a pro technologii naprašování činí 632,5 Kč/ks. Náklady jsou pro obě technologie velmi vysoké, což je způsobeno zejména tím, že se jedná o laboratorní zařízení, která nejsou uzpůsobená pro hromadnou výrobu a v každém zařízení lze v jednom okamžiku vyrábět pouze jeden vzorek. Vypočtené náklady na jeden vzorek jsou však pro většinu položek závislé právě na množství vyrobených vzorků za rok. Tato nabídka by proto nebyla konkurenceschopná.

Náklady na jeden vzorek technologie naprašování jsou výrazně vyšší než náklady na jeden vzorek technologie napařování. V některých aplikacích ale může být i přes tuto vyšší cenu výhodnější zvolit technologii naprašování, protože má výsledná tenká vrstva v určitých ohledech lepší vlastnosti, mezi které patří např. silnější adheze k substrátu, jak jsem ověřil v praktické části této práce v kapitole 5.

7 Závěr

V úvodních teoretických částech této práce jsem se věnoval vytvoření uceleného přehledu o vrstvových technologiích. První teoretická část práce se zabývala tlustovrstvou technologií. Nejprve jsem uvedl rozdělení past a substrátů používaných pro tlusté vrstvy a popsal jsem jejich specifika a vlastnosti včetně odporu na čtverec, který jsem následně zkoumal u vzorků v praktické části. Dále jsem se věnoval jednotlivým technologiím, které jsou používány pro depozici tlustých vrstev a podrobnostem k jejich vytvrzování či výpalu. V druhé teoretické části práce jsem se zabýval technologii tenkých vrstev. Definoval jsem termín tenká vrstva a popsal jsem rozdíly mezi tenkými vrstvami a objemovými materiály. Dále jsem se věnoval principu obecného průběhu vzniku tenké vrstvy. Uvedl jsem také některé důležité vlastnosti tenkých vrstev. Zabýval jsem se rozdělením metod nanášení tenkých vrstev a velký prostor jsem věnoval zejména metodám vakuového napařování a magnetronového vysokofrekvenčního naprašování, protože tyto metody byly následně použity pro tvorbu vzorků v praktické části.

Třetí část práce byla věnována vzorkům testovacích struktur tlustých vrstev, přičemž jsem se soustředil na vliv tvaru tlustovrstvé struktury na její vlastnosti. Vzorky tlustovrstvých struktur byly vytvořeny ze stříbrných a uhlíkových organických past ručním sítotiskem. Měřil jsem zde odpor nanesených vodivých drah a zkoumal jsem jeho závislost na šířce a délce drah. Naměřené hodnoty jsem využil k úspěšnému ověření teoretického předpokladu, že odpor je nepřímo úměrný šířce vodivé dráhy a přímo úměrný její délce. Pro názornost jsem závislost naměřeného odporu na rozměrech dráhy vynesl do grafů.

Rovněž jsem vypočítal odpor na čtverec každé vodivé dráhy. Průměrný vypočtený odpor na čtverec pro dráhy nanesené stříbrnou pastou CSP3110D je oproti hodnotě udávané výrobcem o 10 % nižší. Pro uhlíkovou pastu CSP 3225 vychází průměrná hodnota vypočteného odporu na čtverec oproti předpokládané teoretické hodnotě o 7 % vyšší. Dle mého názoru je tato odchylka způsobena jednak použitím ručního sítotiskového stroje, čímž byla ovlivněna kvalita vytvořených vzorků, a tím mohly být ovlivněny naměřené hodnoty. Dalším možným vlivem je stáří tlustovrstvých past použitých k nanesení motivů a nehomogenní struktura tlusté vrstvy. Zdrojem nepřesností byla také použitá metoda měření odporu.

Vzorky tlustých vrstev jsem zkoumal pomocí mikroskopu a zaznamenal jsem některé defekty špatně viditelné pouhým okem jako např. přerušení vodivé dráhy, pro kterou nebylo možné naměřit odpor. K tomu docházelo z důvodu nedokonalého nanesení pasty nebo mechanického opotřebení vzorku. Dále jsem měřil profil tlustých vrstev pomocí měřiče profilu Talystep. Při zkoumání profilu jsem zjistil, že povrch uhlíkových past je méně členitý než v případě stříbrných past, což je pravděpodobně způsobeno vyšší viskozitou stříbrných past.

Ve čtvrté části práce jsem se zabýval výrobou vzorků tenkovrstvých technologií a zkoumáním jejich vlastností. Celkem jsou zkoumal 34 vzorků tenkých vrstev vyrobených technologií napařování nebo technologií naprašování. Podstatně více bylo vzorků napařených než naprášených, protože výroba jednoho vzorku technologie naprašování je časově náročnější. Proměřil jsem tloušťku vzorků na okrajích a uprostřed vrstvy pomocí měřiče profilu. Dále jsem měřil odpor vzorků v několika místech po délce vrstvy. Po vynesení naměřených hodnot do grafů bylo zřejmé, že zatímco vlastnosti napařených vzorků jsou po celé délce vrstvy málo proměnlivé, u naprášených vzorků je vrstva v prostředí části výrazně tlustší než v okrajích. To je dáno zejména tím, že při depozici se prostředek substrátu nachází přímo nad zdrojem atomů, které na něj tedy dopadají kolmo a v největším množství. Na okraje vrstvy dopadá částic naopak nejméně.

Dále jsem úspěšně ověřil, že pro napařování se stoupající délkou odpařeného drátku a stejně tak pro naprašování se stoupajícím výkonem (případně dobou depozice) klesá odpor vrstvy. Z naměřených hodnot tenkých vrstev mohu usoudit, že za stejných podmínek depozice vzorku vznikne vrstva s velmi podobnými vlastnostmi (s určitou tolerancí). Je však nutné dodat, že na vlastnosti výsledné vrstvy mají vliv i další parametry depozice, které zde nebyly podrobně sledovány, jako např. úroveň vakua v recipientu při napařování nebo tlak argonu při naprašování. Tyto parametry jsem se snažil udržet pro všechny vzorky konstantní, ale nepochybně došlo k výkyvům, které měly vliv na vlastnosti vrstev. S tím souvisí fakt, že preciznost je zde naprosto klíčová a v průmyslu by vrstvové technologie mohly být jen těžko využívány, pokud by jejich příprava byla zatížena takovými nepřesnostmi jako vzorky vyráběné v rámci této práce.

Vzorky tenkých vrstev jsem také zkoumal pomocí mikroskopu a několik zajímavých detailů jsem zaznamenal. Zjistil jsem, že při měření odporu byla napařená vrstva v mnoha případech odškrábnuta měřícími hroty v podstatě až na úroveň substrátu, zatímco naprášené vrstvy byly měřícími hroty pouze povrchově poškrábané. Z toho mohu usoudit, že adheze naprášené vrstvy k substrátu je silnější než adheze napařené vrstvy.

Poslední část této práce byla věnována stanovení jednotlivých nákladových položek na výrobu jednoho vzorku technologií naprašování a technologií napařování v laboratoři Katedry elektrotechnologie a jejich porovnání. Nejdříve jsem definoval důležité pojmy použité při kalkulaci nákladů. Následně jsem pro jeden vzorek vyrobený každou z technologií stanovil náklady na mzdu, zdravotní a sociální pojištění, náklady na materiál, elektrickou energii a pro naprašování i náklady na pracovní plyn. Dále jsem určil odpisy použitých zařízení pomocí jejich anuitně rozpočítaných pořizovacích investic. Celkové náklady činí 298,1 Kč na jednu napařenou vrstvu a 632,5 Kč na jednu vrstvu naprášenou, což je cena velmi vysoká a je to dáno laboratorní povahou použitých zařízení, kvůli které nelze vyrábět více vzorků současně.

Na závěr je nutné podotknout, že výrobky nanesené pomocí technologie napařování a naprašování nelze navzájem zaměňovat, protože se od sebe v mnohých

vlastnostech odlišují. Vzhledem k tomu, že naprášené vrstvy mají silnější adhezi k substrátu, v některých aplikacích může být i přes vyšší náklady výhodnější zvolit technologii naprašování. Dalším rozdílem je rovnoměrnost tloušťky vrstvy po celé délce, která je lepší u napařených vrstev. V neposlední řadě je tloušťka napařené vrstvy omezena shora množstvím materiálu, který může být umístěn do odpařovacího zdroje. Naopak naprašování je omezeno zdola tím, že pod určitou hranici výkonu se již nenanese spojitá vrstva, což jsem ověřil nastavením výkonu na 30 W s dobou depozice 12 min, přičemž nevznikla měřitelná vrstva.

Seznam použité literatury

[1] GUPTA, T. *Handbook of thick- and thin-film hybrid microelectronics*. New Jersey, 2003. ISBN 978-0471272298.

[2] MACH, P., SKOČIL, V. a URBÁNEK, J. *Montáž v elektronice*. ČVUT Praha, 2001. ISBN 80-01-02392-3.

[3] HORYNOVÁ, E. *Nevodivé tenké vrstvy vytvořené naprašováním*. Diplomová práce. FEL ČVUT, Praha, 2017

[4] SZENDIUCH, I. *Tlusté vrstvy* [online]. Dostupné z: http://docplayer.cz/41173783-Tluste-vrstvy-thick-films-2.html [cit. 7. 4. 2019]

[5] IŠTVÁNEK, J. *Dispenzní tisk tlustovrstvých past*. Diplomová práce. FEKT VUT, Brno, 2010

[6] *Thin and thick film* [online]. Dostupné z: http://www.resistorguide.com/thin-and-thick-film/ [cit. 9. 4. 2019]

[7] EICHLER, P. *Vliv okolního prostředí na tlustovrstvé struktury*. Diplomová práce. FEL ČVUT, Praha, 2016

[8] ADÁMEK, M. *Technologie výroby a používané materiály* [Online]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s_2_3_2.htm [cit. 29. 4. 2019]

[9] BESHAJOVÁ PELIKÁNOVÁ, I. *Tlusté vrstvy – tisk, vytvrzení, měření*. FEL ČVUT, Praha

[10] *Sítotisk – Uniprint (parametry a specifikace)* [online]. Dostupné z: https://www.pbt.cz/cz/produkty/sitotisk-a-dispendovani/sitotisky/uniprint [cit. 21. 7. 2020]

[11] MACH, P. *Tenké vrstvy* [online]. FEL ČVUT, Praha. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/34504/mod_resource/content/1/Tenke_vrstvy.pdf https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/34506/mod_resource/content/1/Naprasovani.pdf [cit. 25. 7. 2020]

[12] *Tenké vrstvy* [online]. ZČU, Plzeň Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf [cit. 25. 7. 2020]

[13] OHRING, M. *Materials science of thin films: deposition and structure*. San Diego, 2002. ISBN 9780080491783.

[14] VANĚK, P. *Tenkovrstvé technologie*. Bakalářská práce. FEL ČVUT, Praha, 2019

[15] KOBLÍŽEK, V. *Vytváření tenkých vrstev ve vakuu* [online]. FEL ČVUT, Praha. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/course/view.php?id=4779 [cit. 26. 7. 2020]

[16] FIALOVÁ, H a FIALA, J. *Ekonomický výkladový slovník*. Praha, 2014. ISBN 978-80-87681-02-2.

[17] *Kalkulace nákladů* [online]. Mendelova univerzita, Brno. Dostupné z: https://is.mendelu.cz/eknihovna/opory/zobraz_cast.pl?cast=54548 [cit. 28. 7. 2020]

[18] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. *Míra inflace, vývoj spotřebitelských cen vybraných výrobků v České republice* [online]. Dostupné z: https://www.czso.cz/documents/10180/46173161/32018117_0304.pdf/0b0b0519-2d89-498b-b7e4-a7b362618ecd?version=1.0 [cit. 29. 7. 2020]

[19] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. *Inflace – druhy, definice, tabulky* [online]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/czso/mira_inflace [cit. 29. 7. 2020]

[20] DYBA, K. *Měříme správně inflaci?* [online]. Dostupné z: http://www.cepin.cz/cze/prednaska.php?ID=189 [cit. 31. 7. 2020]

[21] ČESKÝ STATISTICKÝ ÚŘAD. *Průměrné hrubé měsíční mzdy v Praze ve 4. čtvrtletí 2019* [online]. Dostupné z: https://www.czso.cz/csu/xa/prumerne-hrube-mesicni-mzdy-v-praze-ve-4-ctvrtleti-2019 [cit. 4. 8. 2020]

[22] ENERGETICKÝ REGULAČNÍ ÚŘAD. *Cenový kalkulátor*. [online]. Dostupné z: http://kalkulator.eru.cz/ [cit. 4. 8. 2020]

[23] *Graf kurzu EUR / CZK* [online]. Dostupné z: https://www.kurzy.cz/kurzy-men/grafy/CZK-EUR/ [cit. 12. 8. 2020]

[24] KURT J. LESKER COMPANY. *Aluminum Wire Evaporation Materials* [online]. Dostupné z: https://www.lesker.com/newweb/deposition_materials/depositionmaterials_evaporationmaterials_1.cfm?pgid=al2 [cit. 12. 8. 2020]

[25] KURT J. LESKER COMPANY. *Aluminum Sputtering Targets* [online]. Dostupné z: https://www.lesker.com/newweb/deposition_materials/depositionmaterials_sputtertargets_1.cfm?pgid=al1 [cit. 12. 8. 2020]

Seznam tabulek

Tab. 1: Délka dráhy zkoumaných motivů

Tab. 2: Zkoumané vzorky napařování

Tab. 3: Zkoumané vzorky naprašování

Tab. 4: Doba trvání fází napařování a naprašování

Tab. 5: Spotřeba elektrické energie zařízení pro napařování

Tab. 6: Spotřeba elektrické energie zařízení pro naprašování

Seznam obrázků

Obr. 1: Průběh viskozity pasty v procesu nanášení [4]

Obr. 2: Struktura vypálené tlusté vrstvy [4]

Obr. 3: Princip sítotisku [4]

Obr. 4: Princip šablonového tisku [4]

Obr. 5: Dispensing vícejehlovým polem [2]

Obr. 6: Teplotní profil výpalu anorganických past [2]

Obr. 7: Teplotní profil vytvrzování polymerních past [2]

Obr. 8: Způsoby výroby tenkých vrstev [3]

Obr. 9: Vakuové napařování [8]

Obr. 10: Vyražení částice z terče [3]

Obr. 11: Katodové naprašování [8]

Obr. 12: Sestavy pro naprašování s cylindrickým a planárním magnetronem [3]

Obr. 13: Zkoumané vzorky tlustovrstvých struktur

Obr. 14: Ruční zařízení pro sítotisk Uniprint [10]

Obr. 15: Šířka dráhy zkoumaných motivů [9]

Obr. 16: Zařízení pro měření profilu [3]

Obr. 17: Analýza profilu vrstvy ze stříbrné pasty

Obr. 18: Struktura síta

Obr. 19: Detail nanesené pasty CSP 3225

Obr. 20: Detail nanesené pasty CSP 3110D

Obr. 21: Detail nejužší dráhy nanesené pastou CSP 3225

Obr. 22: Tenké vrstvy nanesené technologií naprašování a napařování

Obr. 23: Použité napařovací zařízení [14]

Obr. 24: Použité naprašovací zařízení [14]

Obr. 25: Měření profilu napařené vrstvy

Obr. 26: Okraj naprášené vrstvy

Obr. 27 Konec naprášené vrstvy

Obr. 28: Roh napařené vrstvy

Obr. 29: Narušení struktury napařené vrstvy

Seznam příloh

Příloha 1: Tabulka naměřených hodnot odporu stříbrné pasty CSP 3110D

Příloha 2: Tabulka naměřených hodnot odporu uhlíkové pasty CSP 3225

Příloha 3: Tabulka vypočtených hodnot odporu na čtverec stříbrné pasty CSP 3110D

Příloha 4: Tabulka vypočtených hodnot odporu na čtverec uhlíkové pasty CSP 3225

Příloha 5: Tabulka naměřených hodnot šířky stříbrné pasty CSP 3110D

Příloha 6: Tabulka naměřených hodnot šířky uhlíkové pasty CSP 3225

Příloha 7: Tabulka naměřených hodnot odporu vzorků technologie napařování

Příloha 8: Tabulka naměřených odporu vzorků technologie naprašování

Příloha 9: Tabulka naměřených hodnot šířky vzorků technologie napařování

Příloha 10: Tabulka naměřených hodnot šířky vzorků technologie naprašování

Příloha 1: Tabulka naměřených hodnot odporu stříbrné pasty CSP 3110D

Motiv 1	R [Ω]				
Číslo destičky	Dráha 1-2	Dráha 3-4	Dráha 5-6	Dráha 7-8	Dráha 9-10
1	2.63	4.14	4.83	7.60	10.93
2	2.56	3.49	5.09	6.80	11.04
3	2.55	3.61	4.91	7.13	10.87
Průměr	2.58	3.74	4.94	7.17	10.94
Motiv 2	R [Ω]				
Číslo destičky	Dráha 5-6	Dráha 4-7	Dráha 3-8	Dráha 2-9	Dráha 1-10
1	0.86	2.11	x	4.55	6.58
2	0.85	1.98	2.89	4.78	6.39
3	0.88	1.96	3.12	4.67	6.00
Průměr	0.86	2.02	3.00	4.67	6.32
Motiv 3	R [Ω]				
Číslo destičky	Dráha 1-2	Dráha 3-4	Dráha 5-6	Dráha 7-8	Dráha 9-10
1	0.83	x	4.34	5.46	6.56
2	1.02	x	4.30	5.58	6.68
3	0.97	x	4.15	5.05	6.75
Průměr	0.94	x	4.26	5.36	6.66

Příloha 2: Tabulka naměřených hodnot odporu uhlíkové pasty CSP 3225

Motiv 1	R [kΩ]				
Číslo destičky	Dráha 1-2	Dráha 3-4	Dráha 5-6	Dráha 7-8	Dráha 9-10
1	2.00	3.18	4.68	5.53	x
2	1.70	2.59	3.00	5.43	x
3	2.02	2.62	3.25	6.22	x
Průměr	1.91	2.80	3.64	5.73	x
Motiv 2	R [kΩ]				
Číslo destičky	Dráha 5-6	Dráha 4-7	Dráha 3-8	Dráha 2-9	Dráha 1-10
1	0.63	1.29	2.27	4.89	5.95
2	0.70	1.26	2.84	4.83	5.69
3	0.66	1.63	2.59	4.15	5.43
Průměr	0.66	1.39	2.57	4.62	5.69
Motiv 3	R [kΩ]				
Číslo destičky	Dráha 1-2	Dráha 3-4	Dráha 5-6	Dráha 7-8	Dráha 9-10
1	0.55	x	3.56	5.98	6.15
2	0.87	x	3.05	5.03	6.25
3	0.90	x	3.03	5.07	5.65
Průměr	0.78	x	3.21	5.36	6.01

Příloha 3: Tabulka vypočtených hodnot odporu na čtverec stříbrné pasty CSP 3110D

Motiv 1	$R_{\square}$ [mΩ/□]				
Číslo destičky	Dráha 1-2	Dráha 3-4	Dráha 5-6	Dráha 7-8	Dráha 9-10
1	95.69	105.95	101.29	87.13	79.97
2	98.81	79.92	95.50	92.82	72.68
3	91.25	84.55	104.15	78.22	68.91
Průměr	95.25	90.14	100.31	86.06	73.85
Motiv 2	$R_{\square}$ [mΩ/□]				
Číslo destičky	Dráha 5-6	Dráha 4-7	Dráha 3-8	Dráha 2-9	Dráha 1-10
1	78.55	91.57	x	85.91	104.38
2	77.09	86.26	80.31	90.09	101.41
3	80.09	85.04	86.58	88.15	95.21
Průměr	78.58	87.62	83.44	88.05	100.33
Motiv 3	$R_{\square}$ [mΩ/□]				
Číslo destičky	Dráha 1-2	Dráha 3-4	Dráha 5-6	Dráha 7-8	Dráha 9-10
1	82.70	x	107.26	88.76	85.71
2	101.60	x	106.07	90.65	87.36
3	96.80	x	102.42	82.18	88.22
Průměr	93.70	x	105.25	87.20	87.10

Příloha 4: Tabulka vypočtených hodnot odporu na čtverec uhlíkové pasty CSP 3225

Motiv 1	$R_{\square}$ [Ω/□]				
Číslo destičky	Dráha 1-2	Dráha 3-4	Dráha 5-6	Dráha 7-8	Dráha 9-10
1	72.20	83.63	100.41	66.08	x
2	62.57	61.88	57.75	71.45	x
3	78.22	61.37	72.09	72.87	x
Průměr	71.00	68.96	76.75	70.13	x
Motiv 2	$R_{\square}$ [Ω/□]				
Číslo destičky	Dráha 5-6	Dráha 4-7	Dráha 3-8	Dráha 2-9	Dráha 1-10
1	57.00	56.04	x	92.34	94.40
2	63.18	54.61	79.00	91.04	90.38
3	59.82	70.91	71.92	78.36	86.14
Průměr	60.00	60.52	75.46	87.25	90.31
Motiv 3	$R_{\square}$ [Ω/□]				
Číslo destičky	Dráha 1-2	Dráha 3-4	Dráha 5-6	Dráha 7-8	Dráha 9-10
1	55.20	x	88.00	97.25	80.37
2	87.00	x	75.23	81.84	81.69
3	90.30	x	74.77	82.41	73.79
Průměr	77.50	x	79.33	87.17	78.61

Příloha 5: Tabulka naměřených hodnot šířky stříbrné pasty CSP 3110D

Motiv 1	w [mm]				
číslo destičky	Dráha 1-2	Dráha 3-4	Dráha 5-6	Dráha 7-8	Dráha 9-10
1	1.49	1.05	0.86	0.47	0.30
2	1.58	0.94	0.77	0.56	0.27
3	1.47	0.96	0.87	0.45	0.26
Průměr	1.51	0.98	0.83	0.49	0.28

Příloha 6: Tabulka naměřených hodnot šířky uhlíkové pasty CSP 3225

Motiv 1	w [mm]				
číslo destičky	Dráha 1-2	Dráha 3-4	Dráha 5-6	Dráha 7-8	Dráha 9-10
1	1.48	1.08	0.88	0.49	0.28
2	1.51	0.98	0.79	0.54	0.26
3	1.59	0.96	0.91	0.48	0.29
Průměr	1.53	1.01	0.86	0.50	0.28

Příloha 7: Tabulka naměřených hodnot odporu vzorků technologie napařování

Poloha měření	1	2	3	4	5	6	**Drátek délky 30 mm**
Číslo vzorku	R [Ω]						R celkem [Ω]
1	5.78	5.72	5.80	5.21	5.91	5.51	33.93
2	5.43	5.29	5.43	5.01	5.18	5.49	31.83
3	5.10	5.12	5.42	4.75	5.21	5.29	30.89
4	5.98	5.78	5.12	5.45	5.26	5.79	33.38
5	6.45	6.38	6.10	6.81	6.33	6.06	38.13
Průměr	5.75	5.66	5.57	5.45	5.58	5.63	33.63
Poloha měření	1	2	3	4	5	6	**Drátek délky 40 mm**
Číslo vzorku	R [Ω]						R celkem [Ω]
1	3.29	3.54	3.43	3.82	3.93	4.42	22.43
2	4.11	4.17	3.21	2.79	2.63	2.90	19.81
3	4.09	4.25	4.14	4.01	3.96	4.30	24.75
4	3.91	3.12	3.98	3.93	3.12	3.73	21.79
5	4.47	4.04	3.83	3.66	4.14	3.62	23.76
Průměr	3.97	3.82	3.72	3.64	3.56	3.79	22.51
Poloha měření	1	2	3	4	5	6	**Drátek délky 50 mm**
Číslo vzorku	R [Ω]						R celkem [Ω]
1	3.96	3.62	3.82	3.63	3.44	3.72	22.19
2	2.53	2.25	2.71	2.19	2.27	2.48	14.43
3	2.41	2.53	2.57	2.68	2.89	2.97	16.05
4	2.39	3.19	2.97	3.01	2.98	2.76	17.30
Průměr	2.82	2.90	3.02	2.88	2.90	2.98	17.49
Poloha měření	1	2	3	4	5	6	**Drátek délky 60 mm**
Číslo vzorku	R [Ω]						R celkem [Ω]
1	1.55	1.71	1.92	1.75	1.77	1.81	10.51
2	2.19	2.31	2.35	2.07	1.98	1.97	12.87
3	1.41	1.33	1.34	1.26	1.38	1.42	8.14
4	2.16	2.22	2.26	2.01	1.93	2.03	12.61
5	2.29	2.15	1.99	1.93	1.89	1.73	11.98
Průměr	1.92	1.94	1.97	1.80	1.79	1.79	11.22
Poloha měření	1	2	3	4	5	6	**Drátek délky 90 mm**
Číslo vzorku	R [Ω]						R celkem [Ω]
1	1.31	1.42	1.40	1.41	1.26	1.48	8.28
2	1.56	1.60	1.44	1.45	1.36	1.52	8.93
3	1.80	1.95	1.54	1.71	1.23	1.05	9.28
Průměr	1.56	1.66	1.46	1.52	1.28	1.35	8.83

Příloha 8: Tabulka naměřených odporu vzorků technologie naprašování

Poloha měření	1	2	3	4	5	6	**Čas 12 min, výkon 50 W**
Číslo vzorku	R [Ω]						R celkem [Ω]
1	5.73	5.37	4.74	4.53	4.38	5.91	30.66
2	5.23	4.16	3.91	3.95	4.22	4.97	26.44
3	5.97	5.01	4.84	4.20	4.21	5.31	29.54
Průměr	5.64	4.85	4.50	4.23	4.27	5.40	28.88
Poloha měření	1	2	3	4	5	6	**Čas 12 min, výkon 70 W**
Číslo vzorku	R [Ω]						R celkem [Ω]
1	1.10	1.02	0.98	0.92	0.99	1.16	6.17
2	1.45	1.08	0.99	1.11	1.42	1.71	7.76
3	1.79	1.40	1.32	1.13	0.95	1.22	7.81
Průměr	1.45	1.17	1.10	1.05	1.12	1.36	7.25
Poloha měření	1	2	3	4	5	6	**Čas 12 min, výkon 90 W**
Číslo vzorku	R [Ω]						R celkem [Ω]
1	0.93	0.72	0.71	0.68	0.76	0.89	4.69
2	0.89	0.65	0.68	0.74	0.84	0.91	4.71
3	0.75	0.71	0.69	0.81	0.77	0.93	4.66
Průměr	0.86	0.69	0.69	0.74	0.79	0.91	4.69
Poloha měření	1	2	3	4	5	6	**Čas 22 min, výkon 50 W**
Číslo vzorku	R [Ω]						R celkem [Ω]
1	4.68	3.83	3.61	3.45	3.58	4.61	23.76
2	3.36	2.97	2.95	2.77	3.21	3.78	19.04
3	4.94	4.14	3.47	2.96	2.97	3.67	22.15
Průměr	4.33	3.65	3.34	3.06	3.25	4.02	21.65

Příloha 9: Tabulka naměřených hodnot šířky vzorků technologie napařování

Drátek délky 30 mm			
Poloha měření	1	3	6
Číslo vzorku	h [µm]		
1	0.104	0.107	0.103
2	0.106	0.109	0.096
3	0.108	0.111	0.105
4	0.105	0.110	0.102
5	0.107	0.108	0.100
Průměr	0.106	0.109	0.101
Drátek délky 40 mm			
Poloha měření	1	3	6
Číslo vzorku	h [µm]		
1	0.112	0.122	0.119
2	0.115	0.127	0.121
3	0.110	0.128	0.121
4	0.116	0.126	0.113
5	0.112	0.116	0.127
Průměr	0.113	0.124	0.120
Drátek délky 50 mm			
Poloha měření	1	3	6
Číslo vzorku	h [µm]		
1	0.141	0.140	0.140
2	0.139	0.140	0.131
3	0.137	0.139	0.140
4	0.140	0.143	0.138
Průměr	0.139	0.141	0.137
Drátek délky 60 mm			
Poloha měření	1	3	6
Číslo vzorku	h [µm]		
1	0.186	0.190	0.189
2	0.189	0.201	0.193
3	0.182	0.195	0.194
4	0.191	0.193	0.197
5	0.187	0.189	0.187
Průměr	0.187	0.194	0.192

Příloha 10: Tabulka naměřených hodnot šířky vzorků technologie naprašování

Doba 12 min, výkon 50 W			
Poloha měření	1	3	6
Číslo vzorku	h [µm]		
1	0.122	0.157	0.137
2	0.130	0.214	0.182
3	0.134	0.167	0.130
4	0.148	0.195	0.141
5	0.139	0.183	0.130
Průměr	0.135	0.183	0.144
Doba 12 min, výkon 70 W			
Poloha měření	1	3	6
Číslo vzorku	h [µm]		
1	0.265	0.371	0.249
2	0.294	0.404	0.274
3	0.272	0.387	0.269
4	0.287	0.395	0.264
5	0.276	0.421	0.287
Průměr	0.279	0.396	0.269
Doba 12 min, výkon 90 W			
Poloha měření	1	3	6
Číslo vzorku	h [µm]		
1	0.385	0.516	0.390
2	0.279	0.521	0.295
3	0.304	0.576	0.371
4	0.356	0.607	0.398
5	0.318	0.595	0.337
Průměr	0.328	0.563	0.358
Doba 22 min, výkon 50 W			
Poloha měření	1	3	6
Číslo vzorku	h [µm]		
1	0.244	0.369	0.256
2	0.232	0.301	0.192
3	0.207	0.312	0.198
4	0.231	0.342	0.204
5	0.224	0.407	0.263
Průměr	0.228	0.346	0.223