



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická**

**Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**

**Studium vrstev vytvořených tenkovrstvými technologiemi**

**Study of layers prepared by thin-film technologies**

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektrotechnika a management

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

**Marek Cerman**

**Praha 2021**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Cerman** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **483858**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Specializace: **Elektrotechnika a management**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Studium vrstev vytvořených tenkovrstvými technologiemi**

Název bakalářské práce anglicky:

**Study of layers prepared by thin-film technologies**

Pokyny pro vypracování:

1. Provedte rešerši o vlastnostech tenkých vrstev a o jejich užití.
2. Připravte vzorky vrstev metodou napařování a vakuového napařování.
3. Seznamte se s metodami měření (optickými - spektrometr atd.) a změřte požadované parametry.
4. Změřené výsledky vyhodnoťte.
5. Vyberte vhodnou metodu pro konkrétní výroby z ekonomického hlediska.

Seznam doporučené literatury:

1. Nalwa, Hari Singh: Handbook of thin film materials, Academic Press, 2001, ISBN: 0125129084, 9780125129084, e-ISBN: 9780080533247, 0080533248
2. Nováková, Monika: Napařování a měření tenkých vrstev v UV oblasti [Bakalářská práce], Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, 2010, dostupné z: <https://adoc.pub/napaovani-a-meni-tenkych-vrstev-v-uv-oblasti-deposition-and-.html>
3. Eckertová, Ludmila: Fyzika tenkých vrstev. SNTL, Praha, 1973

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **13.01.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21.05.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

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

# 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 \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Marek Cerman

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval Ing. Ivaně Beshajové Pelikánové, Ph.D. za odborné vedení, konstruktivní poznámky a také hlavně za trpělivost a ochotu během vytváření mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Horákovi za konzultaci a pomoc s ekonomickou částí. Nakonec bych chtěl také poděkovat Liborovi Konečnému z firmy KWS CZ s.r.o., který mi poskytl informace z praxe potřebné k vypracování ekonomické části.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku tenkých vrstev. Práce je rozdělena na čtyři části. První dvě části shrnují teorii tenkých vrstev, a to zejména jejich vlastnosti a metody tvorby. Třetí část je praktická a je v ní popsána příprava tenkovrstvých vzorků pomocí metod napařování a naprašování. Dále je v praktické části vyhodnoceno měření propustnosti a tloušťky vytvořených vzorků. V poslední části jsou metody napařování a naprašování popsány z ekonomického hlediska a je vybrána ekonomicky výhodnější varianta.

## **Klíčová slova**

Tenká vrstva, depoziční, napařování, naprašování, světelná propustnost, tloušťka, náklady na výrobu

## **Abstract**

This bachelor thesis is focused on the theme of thin films. The thesis is divided into four parts. The first two parts summarize the theory of thin film especially their properties and methods used for deposition. The third part is a practical part and it describes the preparation of thin film samples produced by evaporation and sputtering methods. There is also evaluated the measurement of the transmittance and the thickness of the formed samples in the practical part. The evaporation and sputtering are economically described and compared in the last part.

## **Key words**

Thin film, deposition, evaporation, sputtering, transmittance, thickness, manufacturing costs

# Obsah

|  |    |
|--|----|
| 1. Úvod.....                                   | 1  |
| 2. Struktura a vlastnosti tenkých vrstev ..... | 2  |
| 2.1 Základ.....                                | 2  |
| 2.1.1 Tenká vrstva.....                        | 2  |
| 2.1.2 Dělení tenkých vrstev .....              | 2  |
| 2.1.3 Substrát .....                           | 3  |
| 2.2 Vlastnosti.....                            | 3  |
| 2.2.1 Elektrické vlastnosti.....               | 3  |
| 2.2.2 Mechanické vlastnosti.....               | 5  |
| 2.2.3 Magnetické vlastnosti .....              | 6  |
| 2.2.4 Optické vlastnosti .....                 | 7  |
| 3. Metody vytváření tenkých vrstev .....       | 8  |
| 3.1 Depozice.....                              | 8  |
| 3.2 Růst tenkých vrstev .....                  | 8  |
| 3.3 Metody depozice tenkých vrstev.....        | 8  |
| 3.4 Fyzikální metoda depozice (PVD).....       | 9  |
| 3.4.1 Základní postup.....                     | 9  |
| 3.4.2 Dělení PVD.....                          | 10 |
| 3.4.3 Napařování.....                          | 10 |
| 3.4.4 Naprašování .....                        | 13 |
| 3.4.5 Srovnání napařování a naprašování .....  | 14 |
| 3.5 Chemická metoda depozice (CVD) .....       | 15 |
| 3.5.1 Dělení CVD .....                         | 16 |
| 3.5.2 PECVD (plasma-enhanced CVD) .....        | 16 |
| 3.5.3 Další metody CVD.....                    | 17 |
| 3.6 Porovnání PVD a CVD .....                  | 17 |
| 4. Praktická část .....                        | 18 |
| 4.1 Postup tvorby .....                        | 18 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.1.1 | Napařené vzorky .....   | 19 |
| 4.1.2 | Naprašené vzorky .....  | 20 |
| 4.2   | Měření propustnosti .....                                       | 21 |
| 4.2.1 | Napařené hliníkové vzorky .....                                 | 21 |
| 4.2.2 | Naprašené hliníkové vzorky .....                                | 23 |
| 4.2.3 | Další vzorky .....  | 25 |
| 4.3   | Měření tloušťky .....   | 27 |
| 5.    | Ekonomická část .....   | 30 |
| 5.1   | Úvod .....  | 30 |
| 5.2   | Náklady na jeden kus výrobku .....                              | 30 |
| 5.2.1 | Cena zařízení, doba životnosti a doba výroby jednoho kusu ..... | 30 |
| 5.2.2 | Odpisy .....  | 31 |
| 5.2.3 | Náklady na zaměstnance .....                                    | 32 |
| 5.2.4 | Náklady na elektřinu .....                                      | 32 |
| 5.2.5 | Náklady na materiál .....                                       | 33 |
| 5.2.6 | Výpočet nákladů na kus .....                                    | 34 |
| 5.3   | NPV .....   | 36 |
| 5.3.1 | Výpočet NPV .....   | 36 |
| 5.3.2 | NPV napařování .....  | 37 |
| 5.3.3 | NPV naprašování .....   | 38 |
| 5.4   | Ekonomické porovnání .....                                      | 39 |
| 6.    | Závěr .....   | 40 |
| 7.    | Seznam použité literatury .....                                 | 41 |
| 8.    | Seznam obrázků .....  | 43 |

# 1. Úvod

Jak již z názvu vyplývá, tak předností tenkých vrstev je jejich velmi malá tloušťka. Tato vlastnost předurčuje jejich používání v dnešní době neustálé miniaturizace. Při udržení tohoto trendu je také velmi pravděpodobné, že budou tenké vrstvy stále důležitější a že se také budou rozvíjet metody tvorby tenkých vrstev pro co nejefektivnější a ekonomicky nejvýhodnější výrobu. Dnes již existuje velké množství metod pro tvorbu tenkých vrstev, a ještě více modifikací těchto metod. Je tedy zřejmé, že obor tenkých vrstev je skutečně rozsáhlé téma a je nemožné v této práci probrat všechnu tuto problematiku.

Cílem této práce je stručné uvedení do teorie tenkých vrstev a jejich vlastností, dále přiblížení nejpoužívanějších metod pro výrobu tenkých vrstev a také zvolení vhodnější varianty tvorby z ekonomického hlediska. V první části této práce vysvětlím základní pojmy a dále se budu věnovat vlastnostem tenkých vrstev, a to zejména elektrickými a mechanickými vlastnostmi. V druhé části budou popsány nejpoužívanější metody tvorby. Věnovat se budu hlavně metodám napařování a naprašování, a to nejen kvůli tomu, že to jsou metody nejpoužívanější, ale také hlavně proto že se těmito metodami budu zabývat i v praktické části a ekonomické části. Ve třetí, praktické, části nejprve stručně popíšu postup konkrétní tvorby tenkých vrstev v laboratorních zařízeních a dále budu zkoumat propustnost a tloušťku vytvořených vzorků. Budu se snažit nalézt závislost propustnosti na tloušťce tenkých vrstev. Poslední, ekonomická, část bude věnována výpočtu nákladů na výrobu vrstev metodami napařování a naprašování, čisté současné hodnotě investic, následnému porovnání a zvolení vhodnější varianty z ekonomického hlediska.



## 2. Struktura a vlastnosti tenkých vrstev

### 2.1 Základ

#### 2.1.1 Tenká vrstva

Tenkou vrstvou rozumíme materiál tloušťky setin až jednotek mikrometrů, který je nanesen na základním materiálu tzv. substrátu. Kvůli tak malé tloušťce tyto vrstvy ovlivňují pohyb samotných elektronů, takže jejich tloušťka výrazně ovlivňuje jejich vlastnosti. Tenké vrstvy mohou být tvořeny monokrystalickou, polykrystalickou či amorfní strukturou a jsou nejčastěji tvořeny řízeným nanášením materiálu v uzavřeném vakuovém prostoru. Tenké vrstvy se používají k povrchovým úpravám nejrůznějších materiálů, nejčastěji se tak s těmito vrstvami setkáme v elektrotechnickém průmyslu, strojírenství, energetice atd. [1] [2]

#### 2.1.2 Dělení tenkých vrstev

Tenké vrstvy lze rozdělit podle typu materiálu, ze kterých jsou vyrobeny na vrstvy [3]:

1. Vodivé (nejčastěji jsou vyrobeny z kovových materiálů – Au, Al, Ni, Cu, Ag)
2. Supravodivé (moderní vrstvy tvořeny vysokoteplotními supravodiči typu YBaCuO)
3. Polovodivé (tvořeny z Si, Ge a dalších materiálů ze skupiny  $A^{III}B^V$ )
4. Odporové (nejčastěji tvořeny z NiCr, C, Ta)
5. Dielektrické (nejčastěji z ferroelektrik)
6. Magnetické (často z feromagnetik)
7. Ostatní (např. izolační či organické)

Tenké vrstvy se používají v mnoha aplikacích, pro ilustraci lze také vrstvy rozdělit podle jejich aplikace [1]:

1. Realizace vodivých drah a spojů
2. Realizace odporů
3. Realizace kondenzátorů
4. Realizace tenkovrstvých tranzistorů
5. Realizace vrstev chránících před oxidací
6. Realizace magneticky stínících vrstev
7. A mnoho dalších realizací

### 2.1.3 Substrát

Jak již bylo napsáno, k vytvoření tenké vrstvy je potřeba vhodný substrát neboli podložka. Na substráty jsou kladeny velké nároky, sledovanými faktory jsou čistota a kvalita povrchu, jelikož tenká vrstva kopíruje kvalitu povrchu, koeficient teplotní roztažnosti, kdyby tento teplotní součinitel substrátu nebyl podobný tenké vrstvě hrozilo by poškození vrstvy při teplotním namáháním a také schopnost dobrého přilnutí k vrstvě, podložka nesmí být chemicky agresivní, jinak by mohla poškodit vrstvu. Nejčastějšími materiály podložek jsou sklo, bezalkalické sklo, křemenné sklo, korundová keramika (broušená, leštěná i glazovaná), oxidovaný křemík a pro velmi náročné aplikace lze využít i safír. [1]

## 2.2 Vlastnosti

Vlastnosti tenkých vrstev jsou samozřejmě velmi ovlivňovány jejich tloušťkou, dále ale existují i jiné faktory, které je také v podstatné míře ovlivňují. Mezi tyto faktory patří materiál vrstvy, způsob depozice, materiál, kvalita a čistota substrátu, rozdíl koeficientů teplotních roztažností vrstvy a substrátu, technologické faktory výrobního zařízení (hloubka a čistota vakua, geometrie pracovního prostoru, možnost rotace či vyhřívání podložky pro případ vakuových technologií) a také kvalita nanášeného materiálu. Materiály tenkých vrstev jsou velmi čisté, často to jsou materiály čistoty 99,999 % i vyšší. Tenké vrstvy mají obecně jiné vlastnosti než „normální“ objemové vrstvy, to je způsobeno velmi malou tloušťkou tenkých vrstev. Jejich tloušťka se řádově pohybuje poblíž velikosti atomů a molekul, a tudíž pro ně neplatí všechny zákony stejně jako v našem „normálním“ světě. [3]

### 2.2.1 Elektrické vlastnosti

Jak je vidět z rozdělení tenkých vrstev podle typu materiálu, 5 ze 7 uvedených typů vrstev mají souvislost s elektrickým polem, proto jsou elektrické vlastnosti důležité pro správnou funkčnost vrstev. Ovšem jednou z nejdůležitějších elektrických vlastností pro správné použití vrstev je odpor zejména pak u vrstev odporových a vodivých. U vrstev dielektrických a polovodivých jsou důležité vlastnosti relativní permitivita, elektrická pevnost a dielektrické ztráty.

#### 2.2.1.1 *Odpor*

Elektrický odpor udává, jak moc je daný vodič schopen bránit průchodu elektrického proudu, proto má smysl uvažovat odpor pouze u vodivých tenkých vrstev. Tyto vrstvy jsou nejčastěji vyráběny z kovových materiálů. Velikost elektrického odporu je závislá

na materiálu, tvaru a teplotě vodiče. Tenké vrstvy mají díky velmi malé tloušťce jiné odporové vlastnosti, než by měl vodič ze stejného materiálu.

Odpor tenké vrstvy v podobě pásku se vypočítá ze vzorce:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{d \cdot b} \quad (2.1)$$

Kde  $R$  je odpor dané vrstvy,

$\rho$  je měrný odpor materiálu vrstvy,

$l$  je délka pásku,

$d$  je tloušťka pásku,

$b$  je šířka pásku.

Při vyhodnocování odporu tenké vrstvy se používá tzv. odpor na čtverec. Pokud se délka pásku rovná šířce pásku, tak mluvíme o odporu na čtverec. [4]

$$R_{sq} = \frac{\rho}{d} \quad (2.2)$$

K určení odporu je tedy ještě potřeba znát rezistivitu vrstvy. Ta se dá jednoduše vyjádřit podle Matthiessenova pravidla jako součet rezistivit způsobujících určité rozptýlení dráhy pohybu elektronů jako [5] [6]:

$$\rho = \rho_t + \rho_i + \rho_d \quad (2.3)$$

Kde  $\rho$  udává celkovou rezistivitu vrstvy,

$\rho_t$  je tepelná rezistivita,

$\rho_i$  je rezistivita nečistot,

$\rho_d$  je rezistivita poruch.

Tepelná rezistivita je způsobena rozptylem elektronových drah v důsledku srážek pohybujících se elektronů s kmitající mřížkou materiálu. Tepelný pohyb neboli kmitání mřížky je při vyšších teplotách silnější a elektrony se tedy častěji srážejí s mřížkou, s rostoucí teplotou roste tedy i teplotní rezistivita. Rezistivita nečistot je způsobena srážkami elektronů s nečistotami ve vytvořené vrstvě a podobně rezistivita poruch je způsobena poruchami v mřížce vrstvy jako např. intersticiální poloha částice či vakance. Tyto dvě rezistivity jsou teplotně nezávislé, tudíž při vysokých teplotách je hlavní složkou celkové rezistivity teplotní rezistivita, a naopak při velmi nízkých ( $T \rightarrow 0$  K),

kdy se teplotní rezistivita téměř neuplatní, jsou hlavní složkou celkové rezistivity tyto dvě rezistivity a představují tzv. zbytkový odpor. [5] [6]

Dalšími sledovanými elektrickými vlastnostmi zejména u dielektrických vrstev jsou relativní permitivita, elektrická pevnost a dielektrické ztráty. Tyto vlastnosti jsou závislé na materiálu vrstvy, způsobu depozice a také na následném tepelném zpracování. [7]

## **2.2.2 Mechanické vlastnosti**

Tenká vrstva a substrát spolu tvoří provázaný systém a jejich vlastnosti se tedy vzájemně ovlivňují. Mechanické vlastnosti daného systému mohou ukázat určitou kvalitu výrobku, který byl vytvořen depozicí. K důležitým mechanickým vlastnostem patří adheze a pnutí uvnitř systému.

### **2.2.2.1 Adheze**

Slovo adheze neboli přilnavost označuje schopnost materiálů, v tomto případě to jsou materiály tenké vrstvy a substrátu, spolu přilnout a neoddělit se od sebe. Adheze souvisí s počáteční fází nanášení vrstvy a je vhodné, aby se vytvořily chemické vazby mezi vrstvou a substrátem, protože adheze je větší, pokud jsou v systému i chemické vazby než jen fyzikální vazby. Adheze je tedy velmi důležitá pro správné vytvoření tenké vrstvy. Pro zlepšení adheze systému se provádí tzv. předdepoziciční přípravy substrátu. Těmito přípravami se ovlivňuje úprava, čistota a chemické složení povrchu. Adhezi lze také zlepšit vícevrstvou strukturou. V této struktuře první vrstva vytvoří chemické vazby a další vrstvy jsou přichyceny k první vrstvě. [7]

### **2.2.2.2 Pnutí**

Pnutí v nějakém systému může způsobovat značné problémy, v případě tenkých vrstev se jedná o systému vrstva-substrát. V tomto systému jsou vzájemně provázané dva materiály, a když tyto materiály nemají podobné vlastnosti, tak může nastat problém s pnutím v tomto systému. Pnutí se dá rozdělit na tři složky: vnitřní, tepelné a mechanické. Vnitřní pnutí vzniká při procesu depozice a je způsobena odlišnostmi v krystalových mřížkách materiálu vrstvy a substrátu, zejména pak rozdíly mřížkových parametrů obou materiálů. Pro správné přilnutí vrstvy k substrátu je zapotřebí aby na jejich rozhraní byly stejné mřížkové parametry. Při rozdílných mřížkových parametrech se musí jeden parametr prodloužit a druhý zkrátit, tím je způsobeno vnitřní pnutí a systém se začne ohýbat. Tepelné pnutí je způsobeno rozdílnými koeficienty tepelné roztažnosti. Při změně teploty se bude jeden materiál rozpínat více než ten druhý, proto je potřeba zvolit správné materiály s co nejpodobnějšími koeficienty, nebo se systém vrstva-substrát začne opět ohýbat. Tepelné pnutí je také ovlivněno způsobem depozice a

hlavně teplotou, při které je depozice prováděna. Depozice probíhá za vyšších teplot, než jsou běžné teploty okolí. Systém je tedy po tomto procesu ochlazen. Mechanické pnutí je dáno mechanickým namáháním systému. Celkové pnutí bude potom součtem těchto tří složek. Výsledné pnutí může být buď tahové nebo tlakové. [4] [8]



Obr. 1: Příklady pnutí [4]

Pro případ tahového pnutí má tenká vrstva menší mřížkový parametr než substrát. Jak již bylo napsáno, pro správné přilnutí je potřeba aby na rozhraní byly stejné parametry, tudíž je potřeba tenkou vrstvu „natáhnout“ a substrát „zkrátit“. Avšak materiály se této změně budou bránit a vytvoří tak sílu, která bude působit proti této změně, po sečtení sil od tenké vrstvy a substrátu se systém ohne podle obrázku. Tahové pnutí také nastává po depozici, když má tenká vrstva vyšší teplotní koeficient depozice a se systém ochladí.

Tlakové pnutí nastává analogicky v opačných případech než u tahového pnutí. Tento druhý případ tedy nastane, když má tenká vrstva větší mřížkový parametr než substrát a také nastane po depozici, když má tenká vrstva menší teplotní koeficient.

Ohýbání tohoto systému je nežádoucí efekt, kterého je potřeba se vyvarovat. Pnutí v tomto systému může poškodit tenkou vrstvu, která pak nedokáže uspokojit uživatele, a proto je dobré vybírat materiály pro tvorbu tenkých vrstev a pro substráty s co nejpodobnějšími parametry.

### 2.2.2.3 Tvrdość a drsnost

Dalšími vlastnostmi, které se zkoumají, jsou tvrdość a drsnost. Tyto vlastnosti závisí hlavně na způsobu depozice a na použitém materiálu. Tvrdość je potom důležitá vlastnost ochranných vrstev. [7]

## 2.2.3 Magnetické vlastnosti

Magnetické vlastnosti se pozorují u tenkých vrstev vytvořených z feromagnetických materiálů. Feromagnetika jsou materiály, které značně zesilují magnetické pole, to je dáno tím, že v těchto materiálech vznikají magnetické domény. Tyto magnetické domény jsou oblasti, ve kterých jsou shodně orientovány magnetické dipóly. Avšak tyto dipóly jsou bez přítomnosti vnějšího magnetického pole orientovány náhodně. Dipóly

se začnou shodně orientovat až po přiložení vnějšího magnetického pole. Při zvyšování intenzity magnetického pole se dipóly natačí tak, aby co nejlépe kopírovaly směr vnějšího magnetického pole. Feromagnetické materiály tedy zesilují magnetické pole v závislosti na jeho intenzitě. Feromagnetika jsou např.: železo, kobalt či nikl. [9]

Feromagnetické tenké vrstvy našli své uplatnění hlavně v oblasti výroby paměťových zařízení, kde nahradili starší feritové elementy. Feromagnetické tenké vrstvy jsou oproti starší technologii rychlejší, menší a levnější, což podnítilo k jejich využívání v tomto odvětví. [10]

## 2.2.4 Optické vlastnosti

Optické vlastnosti materiálu charakterizují, jak daný materiál reaguje na elektromagnetické vlnění. Toto vlnění je vždy z části odraženo, z části propuštěno a z části pohlceno. Důležitými a sledovanými optickými vlastnostmi tenkých vrstev jsou propustnost a index lomu. Propustnost se snižuje se zvyšujícím se rozptylem a absorpcí světla. Při rozptylu světla se dráha fotonu odchýlí od původní kvůli interakci s okolím, rozptyl tedy závisí na mikroskopické struktuře tenké vrstvy. Při absorpci světla pohltí atom energii fotonu, absorpce je tedy závislá na atomárním složení materiálu. Index lomu je závislý na druhu materiálu, krystalické struktuře vrstvy a složení vrstvy. Tato veličina popisuje šíření elektromagnetického vlnění v látkách, zejména pak na rozhraní látek.

Optické tenké vrstvy se často používají jako odrazivé vrstvy, které se používají v zrcadlech. Tyto vrstvy se vyrábí nejčastěji z kovů např.: hliník, měď, stříbro, zlato nebo platina a používají se v laserech. Dále se také používají antireflexní tenké vrstvy, které snižují odraznost substrátu pro určité vlnové délky. Optické tenké vrstvy můžeme nalézt v soustavách dielektrických vrstev s vysokou odrazností, které fungují na opačném principu než antireflexní vrstvy. Tyto dielektrické vrstvy totiž zvyšují odraznost určitých vlnových délek. Další využití je v děličích světla a šedých dielektrických filtrech, které mají téměř konstantní průběhy odrazností pro určité vlnové délky. Další využití je ve filtrech typu horní či dolní propusti a v pásmové zádrži, tyto soustavy se používají jako barevné filtry v televizní, filmové nebo fotografické technice. Dále také úzkopásmové filtry, tyto filtry propouští pouze úzkou část spektra. Tenké vrstvy se také používají v polarizujících dielektrických filtrech, které se používají jako polarizátory, které pracují na jedné vlnové délce a v blízkém okolí. [11]

## 3. Metody vytváření tenkých vrstev

### 3.1 Depozice

Proces, při kterém je nanášena tenká vrstva na substrát nebo na již dříve nanesenou vrstvu, se nazývá depozice tenké vrstvy. V průběhu let řešení problematiky depozice tenkých vrstev bylo vymyšleno mnoho způsobů deponování, nejpoužívanější způsoby deponování budou charakterizovány v následujících kapitolách. Průběh depozice stejně jako substrát ve značné míře ovlivňuje vlastnosti tenké vrstvy.

### 3.2 Růst tenkých vrstev

Existuje mnoho způsobů deponování, proto bych nejprve popsal obecný postup růstu vrstvy a v dalších kapitolách tento růst doplňoval o charakteristické vlastnosti daných depozičních metod.

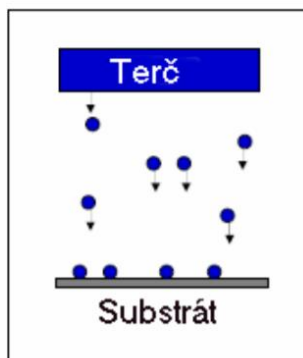
Obecná stádia růstu tenké vrstvy [1]:

1. Nukleace neboli tvoření zárodků, kdy atomy nanášeného materiálu vytvářejí nuklea (shluky) na povrchu podložky.
2. Jednotlivá nuklea narostou až do kritické velikosti, jejich vnitřní energie se rovná s povrchovou energií. Větších velikostí už nuklea nedosahují, avšak volná místa mezi nimi se postupně zaplňují.
3. Koalescence neboli postupné slučování jednotlivých nukleů.
4. Vznik síťové struktury díky koalescenci a postupnému slučování ostrůvků nanášeného materiálu.
5. V posledním stádiu vznikne souvislá vrstva v důsledku dalšího nanášení materiálu.

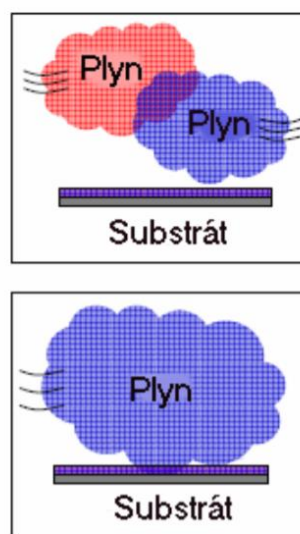
### 3.3 Metody depozice tenkých vrstev

Metody depozice lze rozdělit do dvou základních skupin: na fyzikální metodu neboli Physical vapour deposition (PVD) a na chemickou metodu neboli Chemical vapour deposition (CVD). Hlavní rozdíl mezi těmito dvěma metodami je ve způsobu přípravy vrstvy, u PVD se vrstva připravuje z pevného zdroje a u CVD se vrstva připravuje z plynu. [12]

### Physical Vapor Deposition (PVD)



### Chemical Vapor Deposition (CVD)



Obr. 2.: PVD a CVD [12]

## 3.4 Fyzikální metoda depozice (PVD)

Tato metoda je založena hlavně na fyzikálních principech. Chemické reakce se u této metody spíše nevyskytují, výjimkou jsou například reaktivní napařování a naprašování. PVD je založena na odpaření či odprašení materiálu a následnému nanesení materiálu na substrát, probíhá tedy kondenzace par pevného materiálu na substrát. [12] [13]

### 3.4.1 Základní postup

Nejprve je potřeba převést materiál do plynné fáze, následně transportovat tuto páru od zdroje k substrátu a na konec vytvořit vrstvu na substrátu. U tohoto postupu je ještě potřeba zajistit v pracovní komoře vysoké vakuum. Pokud by v pracovní komoře vakuum nebylo, tak by atomy transportující se páry mohli interagovat s ostatními částicemi v plynné fázi. [12] [13]



### 3.4.2 Dělení PVD

PVD se běžně dělí podle způsobu převedení materiálu do plynné fáze. Základní způsoby jsou 2 a jsou to napařování a naprašování. Při napařování se deponovaný materiál ohřívá (často se jedná o odporový ohřev), potřebné atomy nebo molekuly pro vytvoření tenké vrstvy se z něj odpařují a následně jsou transportovány na substrát. U naprašování je deponovaný materiál zapojen jako katoda, deponovaný materiál tedy bombardují ionty pracovního plynu a vyrážejí tak z jeho povrchu atomy či molekuly, které jsou následně transportovány na substrát. Dále se ještě můžeme setkat s dalšími dvěma způsoby: EBPVD a PLD. EBPVD (Electron Beam PVD) je způsob, při kterém je deponovaný materiál zapojen jako anoda, tudíž je bombardován svazkem elektronů, ty ho ohřívají a materiál se tak může odpařovat. PLD (Pulsed Laser Deposition) je způsob, při kterém na deponovaný materiál dopadají pulzy laserového svazku. Tyto pulzy dodají deponovanému materiálu tepelnou a mechanickou energii, díky které se materiál může převést do plynného či plazmatického stavu. [14]

Výhody PVD [12] [14] [15]

1. PVD je ekologicky šetrnější než ostatní metody depozice (procesu se neúčastní žádné nebezpečné materiály a nevznikají při něm žádné toxické látky)
2. Vrstvy mají vysokou odolnost a nízký koeficient tření (zejména naprašované vrstvy)
3. Možnost vytvoření velkého množství různých druhů či kombinací vrstev
4. Malá a snadno obnovitelná tloušťka vrstev
5. Možnost tvorby přesných tlouštěk vrstev
6. Nižší vnitřní pnutí

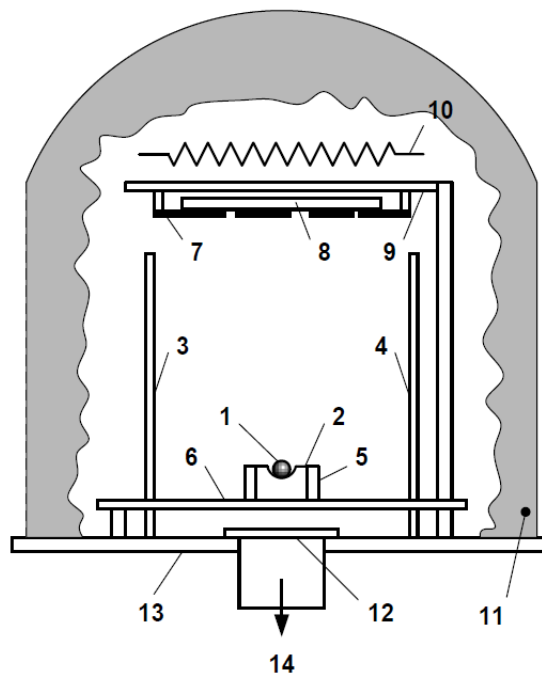
Nevýhody PVD [14] [15]

1. Potřeba vakua
2. Horší adheze vrstev (u napařených vrstev)
3. Horší teplotní stabilita

### 3.4.3 Napařování

Prvním PVD procesem je napařování. Jak již bylo napsáno dříve, tento způsob je založen na odpařování deponovaného materiálu a následné kondenzaci par na substrátu. Při vyšších teplotách se materiál odpařuje více, tudíž se u tohoto způsobu deponovaný materiál zahřívá. K odpaření materiálu a jeho přeměnění do stavu páry se využívá odporového ohřevu, indukčního ohřevu, obloukového výboje, elektronového děla nebo laserového paprsku. Jelikož je materiál ohříván na vysokou teplotu (elektronovým svazkem lze materiál odpařovat až při teplotách okolo 10000 °C), je tento materiál roztaven a musí být tudíž na spodní straně pracovní komory, aby se odpařil směrem nahoru, kde je substrát. [7] [16]

Uspořádání uvnitř recipientu pro vakuové napařování [3]:



Obr. 3: Uspořádání uvnitř recipientu [3]

1. Deponovaný materiál
2. Odpařovací zdroj (díky svému tvaru se často nazývá lodička)
3. Elektroda pro iontové čištění
4. Elektroda pro iontové čištění
5. Svorky na uchycení odpařovacího zdroje
6. Karusel s možností otáčení
7. Masky
8. Substrát
9. Držák masky
10. Ohřívač substrátu
11. Recipient
12. Deskový ventil
13. Základna
14. Čerpací potrubí

#### 3.4.3.1 Vakuové napařování

Ještě před napařováním se provádí tzv. iontové čištění pomocí elektrod na okraji recipientu. Iontové čištění se používá pro uvolnění povrchově vázaných molekul plynu z recipientu, tyto molekuly se zde navázaly před utvořením vakua. Poté je pomocí vývěv dosahováno vysokého vakua pro zvýšení střední volné dráhy přenášejících se částic. Uvnitř recipientu je tlak řádově od  $10^{-3}$  do  $10^{-8}$  Pa. Následně se vhodným způsobem začne odpařovat deponovaný materiál, který se v podobě páry transportuje do vrchní části recipientu k substrátu. Před substrát se umísťuje maska, díky které je

nanesen požadovaný motiv tenké vrstvy. Masky může být nepřímá i přímá. Přímá maska je v přímém kontaktu s podložkou. [3] [7]

Po dokončení procesu napařování nanesené tenké vrstvy obsahují ještě značné množství strukturních nehomogenit a defektů. Tento nedostatek se dá vylepšit preventivním vystárnutím vrstvy za zvýšené teploty. [2]

V případě potřeby vytvoření vrstvy z více materiálu je na karuselu více svorek pro uchycení odpařovacích zdrojů, které jsou potom zahřívány současně. Pokud je potřeba vytvořit vrstvu z nějaké sloučeniny zejména oxidů či nitridů, tak lze použít tzv. reaktivní napařování. Při této metodě je do vakuového systému připouštěn reaktivní plyn, který tvoří požadovanou sloučeninu s deponovaným materiálem a vytváří tenkou vrstvu. [3]

#### **3.4.3.2 Rotace a vyhřívání substrátu**

Je zřejmé, že při odpařování bude deponovaný materiál dopadat na různá místa substrátu, navíc ještě zařízení pro napařování umožňují odpařování z více odpařovacích zdrojů pro nanášení více materiálů najednou. Pak lze říct, že deponovaný materiál dopadá na substrát čistě náhodně, a tedy na různých místech substrátu bude různá tloušťka vrstvy. Tloušťka se může lišit i v jednotkách procent, tak velká chyba je v případě optických vrstev nepřijatelná. Kvůli této nepříjemnosti obvykle substráty při napařování rotují, tím se docílí lepšího rozprostření materiálu a také rovnoměrného rozložení tloušťky vrstvy. Rotaci substrátu je možné nalézt také u metody napařování. [3]

Dalším prvkem zařízení pro vakuové nanášení tenkých vrstev, kterým se dá zlepšit výroba je možnost vyhřívání substrátu. Díky vyhřívání se substrátu zvětšuje povrchová energie, to způsobí zvýšení rychlosti migrace atomů napařované vrstvy, které dopadají na substrát. Atomy s vyšší rychlostí migrace mají vyšší pravděpodobnost zachycení v místě s nejnižší energií, kde následně vytvoří základ budoucího nuklea. Avšak s vyšší teplotou také roste pravděpodobnost desorpce atomu z povrchu substrátu, takže vyhříváním substrátu lze urychlit ale také zpomalit růst vrstvy podle toho, který jev, zachycení nebo desorpce, nastane. V případech, kdy převládá zachytávání atomů, je vhodné vyhřívání substrátu pro urychlení růstu. Naopak je tomu v případě, kdy převládá desorpce atomů, v tomto případě se vyhříváním substrátu růst vrstvy zpomalí. Toto vyhřívání lze realizovat odporovými spirálami v blízkosti substrátu. [3]

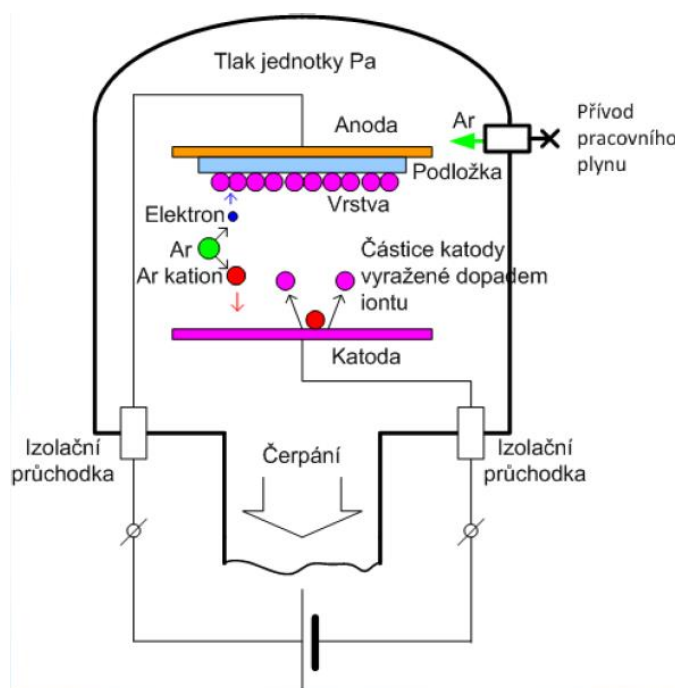
#### **3.4.3.3 Rychlost a teplota nanášení vrstev**

Rychlost a teplota při nanášení vrstev je také velmi důležitým parametrem, který ovlivňuje vlastnosti a kvalitu nanesené vrstvy. Při velmi vysoké teplotě mohou vznikat páry i v objemu roztaveného materiálu. S rostoucí teplotou roste také napařovací rychlost. Při velmi rychlé tvorbě par mohou být odpařovány mimo atomů a molekul i jejich shluky, které po dopadu na substrát vytvářejí ve vrstvě nehomogenity. Naopak při

nízké napařovací rychlosti může dojít k poškození vrstvy její dlouhou tepelnou expozicí. Toto je problém hlavně u organických vrstev. Proto je třeba správně nastavit rychlost a teplotu při tvorbě tenké vrstvy. [3]

### 3.4.4 Naprašování

Druhou základní PVD metodou je naprašování. Oproti napařování není při této metodě potřeba velmi vysokého vakua, tlak uvnitř recipientu se při naprašování pohybuje řádově až v jednotkách Pa. Uvnitř recipientu se také nachází inertní pracovní plyn, nejčastěji se používá argon. Princip fungování této metody je ve vzniku doutnavého výboje v recipientu. Substrát je připojen k anodě a deponovaný materiál ke katodě. V doutnavém výboji, který hoří mezi anodou a katodou, se pracovní plyn dělí na kladné ionty a elektrony a vzniká plazma. Katoda přitahuje kladné ionty, ty do ní narážejí a způsobují její rozprašování. Odprášené částice z deponovaného materiálu putují až k substrátu, kde vytvářejí tenkou vrstvu. U této metody už nemusí nutně být deponovaný materiál na spodní straně recipientu, substrát a deponovaný materiál mohou mít opačné pozice oproti uspořádání recipientu u napařování. [2] [7] [17]



Obr. 4: Uspořádání pro naprašování [17]

Pro naprašování se používá jak stejnosměrné napětí, tak i střídavé napětí. Pokud je pro vytvoření doutnavého výboje použito stejnosměrné napětí, kdy je na deponovaný materiál přivedeno záporné napětí, tak se jedná o stejnosměrném naprašování. Tento způsob je ale možný pouze pro elektricky vodivé materiály. Pro naprašování

nevodivých materiálů se používá střídavé napětí o vysoké frekvenci, jedná se tedy o vysokofrekvenčním naprašování. Mezinárodně standardizovaná a také nejčastěji používaná hodnota frekvence napětí je 13,56 MHz, obecně se ale dá použít frekvence od stovek kHz až do jednotek MHz. Napětí takto vysoké frekvence má jiný účinek na elektrony než na kladné ionty. Lehké elektrony stíhají mezi elektrodami kmitat, avšak oproti nim těžké kladné ionty nestíhají kmitat a zůstávají v klidu. Pokud je tedy přivedeno na elektrody vysokofrekvenční napětí, tak se na deponovaném materiálu vytvoří průměrný záporný potenciál. Tento materiál pak přitahuje kladné ionty, které do něj narážejí a odprašují ho, i když není vodivý. [17] [18]

#### **3.4.4.1 *Reaktivní naprašování***

Stejně jako tomu bylo u napařování, tak i u naprašování lze vytvářet vrstvy oxidů, nitridů či jiných sloučenin pomocí reaktivního naprašování. Pro tuto metodu je to dokonce vhodnější, protože u naprašování není potřeba tak vysokého vakua jako u napařování a je možné tedy použít více reaktivního plynu. [2]

#### **3.4.4.2 *Magnetronové naprašování***

Samotné naprašování pouze pomocí elektrického pole je však málo účinné. Pro zvýšení účinnosti lze k elektrickému poli přidat i magnetické pole pomocí magnetronu, tento způsob se depozice se nazývá magnetronové naprašování. Toto magnetické pole zakříví a tím i prodlouží dráhy letu nabitých částic, což zvýší celkovou ionizaci a s tím se zvýší i následné odprašování materiálu.

Uspořádání prvků u magnetronového naprašování je takové, že v blízkosti deponovaného materiálu jsou silné magnety. Tyto magnety vytváří magnetické pole, které je kolmé na elektrické pole a usměřňuje tok elektronů blíže k materiálu. Díky tomuto jevu se v oblasti blízké materiálu lokálně zvýší stupeň ionizace. Při vyšší ionizaci se rozpadne více částic pracovního plynu na elektrony a kladné ionty. Pak tedy do deponovaného materiálu naráží více kladných iontů a materiál se lépe a rychleji odprašuje. [2] [14]

### **3.4.5 Srovnání napařování a naprašování**

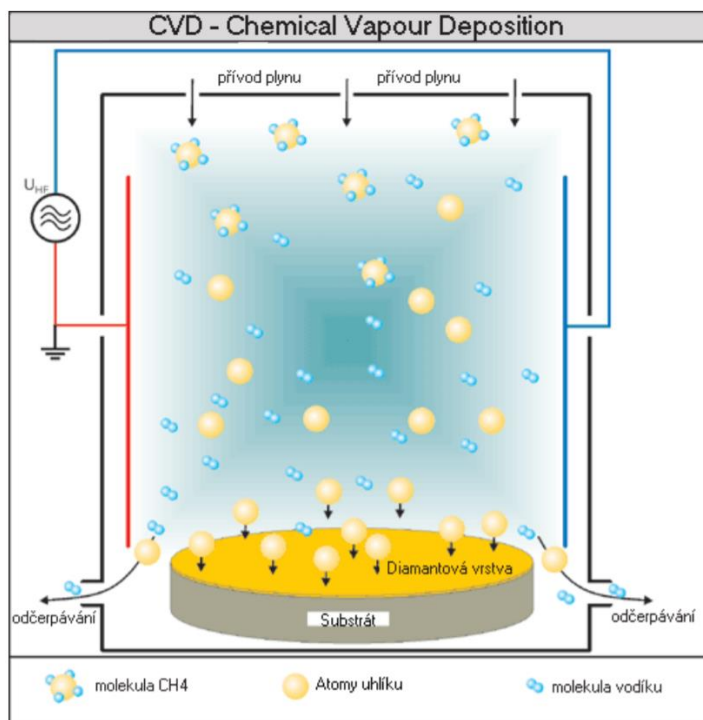
Obě metody mají své výhody a nevýhody, naprašování má však několik velkých předností před napařováním, a proto se obecně používá častěji. Naprašování probíhá za nižších teplot, ale i přes to je možné deponovat vrstvy ze žáruvzdorných materiálů jako je například wolfram. Depozice za nižších teplot umožňuje použití materiálů, které jsou teplotně citlivé. Snížená teplota deponování také snižuje vnitřní pnutí. Při bombardování deponovaného materiálu jsou částice materiálu odprašeny z jeho povrchu

a získávají tak i vysokou kinetickou energii. Díky této energii částic mají naprašované vrstvy vyšší adhezi, rovnoměrnější strukturu a menší pórovitost. [12] [18]

Naprašování má ale také i určité nevýhody např. při naprašování sloučenin. Pokud prvky tvořící sloučeninu mají výrazně rozdílnou hmotnost, tak bude ve výsledné vrstvě menší koncentrace lehčího prvku než těžšího prvku. Napařování tuto nevýhodu nemá, jelikož se během odpaření nerozbíjí molekuly. Avšak u napařování může také nastat problém při deponování vícesložkového materiálu. Tento problém nastane, když mají jednotlivé složky rozdílnou teplotu varu a spočívá v tom, že se složka s nižší teplotou varu začne odpařovat dříve a dojde tedy k nerovnoměrnému rozložení materiálu na substrátu.

### 3.5 Chemická metoda depozice (CVD)

Druhá metoda tvorby tenkých vrstev po fyzikální je metoda chemická. Jak již plyne z názvu tato metoda je založena na tvorbě vrstev pomocí chemických reakcí v plynné fázi. Látky, ze kterých se nová tenká vrstva vytváří se nazývají prekurzory. Během procesu depozice může mezi sebou reagovat více prekurzorů, nebo může být uvnitř pracovní komory pouze jedna látka, která se rozkládá a vytváří tak tenkou vrstvu na substrátu. Samotná depozice probíhá oproti PVD za vysokých teplot, obecně se teplota pohybuje od 950 °C až do 1050°C. Díky vysoké teplotě molekuly disociují a také se podpoří vzájemná reakce prekurzorů. [12] [13] [19]



Obr. 5: Princip CVD [12]

### 3.5.1 Dělení CVD

Při CVD probíhá spousta chemických reakcí (pyrolýza, redukce, oxidace, nitridace, hydrolyza disproportionace a další). Tyto reakce lze iniciovat různými způsoby a mohou probíhat za různých tlaků, proto má metoda CVD spoustu modifikací. Reakce se nejčastěji iniciují termickou aktivací, aktivací plazmatem nebo fotoaktivací. Termická aktivaci lze dosáhnout za velmi vysokých teplot (nad 900 °C). Pro některé materiály je však tato teplota až moc velká, proto se používá také aktivace plazmatem, tato aktivace probíhá za teplot od 300 °C do 500°C. Pro fotoaktivaci je používáno ultrafialové záření, které může způsobit aktivaci reaktantů. [14] [20] [21]

Podle tlaku během depozice lze CVD jednoduše rozdělit na tři typy [19]:

1. APCVD (Atmospheric pressure CVD) – probíhá za atmosférického tlaku
2. LPCVD (Low pressure CVD) – probíhá za sníženého tlaku
3. UHVCVD (Ultra high vacuum CVD) – probíhá za velmi vysokého vakua

CVD způsobů je mnoho, avšak nejpoužívanější metoda je PECVD.

### 3.5.2 PECVD (plasma-enhanced CVD)

Pro teplotně citlivé materiály je teplota během konvenční CVD metody až moc velká, proto se pro tyto materiály používá PECVD metoda. Při této metodě je uvnitř reakční komory udržováno plazma, které iniciuje chemické reakce. Plazmatu se dosahuje pomocí stejnosměrného nebo vysokofrekvenčního výboje. Díky vytvoření plazmatu uvnitř komory se zvýší ionizace prostředí. Zvýšená ionizace podporuje chemické reakce a ty tedy mohou probíhat za nižších teplot. PECVD tedy používá kombinaci fyzikálních a chemických procesů a stojí tedy na rozhraní mezi PVD a CVD. Tato metoda se používá v polovodičovém průmyslu, zejména pro nanášení vrstev nitridu křemíku. [14] [19] [21]

#### 3.5.2.1 Výhody PECVD

Hlavní výhodou tohoto procesu je, že depozice probíhá za nižší teploty než u konvenční CVD. Díky tomu můžeme používat i substráty s nízkou teplotou tání, jako je např. hliník či organické polymery. Nízká teplota při depozici také potlačuje vliv rozdílných tepelných koeficientů vrstvy a substrátu. [19]

### 3.5.2.2 Nevýhody PECVD

Přítomnost plazmy uvnitř reakční komory nám bohužel přináší také určité nevýhody. Pokud mají ionty v plazmatu velkou energii (větší než 20 eV), tak mohou při bombardování poškodit substráty, zejména ty z citlivějších materiálů. Stálost plazmatu je také důležitým faktorem pro rychlost nanášení a vlastnosti tenké vrstvy, jelikož plazma reaguje s povrchem substrátu. Výsledné vrstvy nemají vysokou čistotu. PECVD zařízení je navíc komplikované a také drahé. [19]

### 3.5.3 Další metody CVD

Podobnou metodou PEVDC je metoda MPCVD, rozdíl je v tom, že plazma je vytvořeno mikrovlnnými výboji. Dále pak existuje metoda využívající organokovové prekurzory (MOCVD). Jako poslední metodu uvedu LICVD, v této metodě je využíván laserový paprsek k zahřívání substrátu, na zahřátém místě se vytváří tenká vrstva. [19]

## 3.6 Porovnání PVD a CVD

Na první pohled je zřejmé, že tyto dvě metody se liší v teplotě během depozice. U PVD se teplota většinou pohybuje mezi 150–500 °C, zatímco u CVD okolo 1000 °C, avšak jistými modifikacemi lze tuto teplotu snížit. Nižší teplota u PVD vytváří menší vnitřní pnutí tenkých vrstev, avšak s nižší teplotou také klesá adheze vrstev a horší se teplotní stabilita vrstev. U CVD jsou díky vyšší teplotě tyto vlastnosti opačně. U CVD ještě vyniká vlastnost velké odolnosti vrstev proti opotřebení. CVD má ale také nevýhody a ty jsou energetická a časová náročnost a časté použití toxických prekurzorů.

Dalším rozdílem metod je tlak uvnitř pracovní komory. U PVD se obecně používají tlaky o několik řádů menší než u CVD. Tlak během napařování se pohybuje od  $10^{-3}$  do  $10^{-8}$  Pa a během naprašování od  $10^0$  do  $10^{-5}$  Pa, zatímco u CVD se tlak obvykle pohybuje v jednotkách Pa, ale všeobecně je rozpětí tlaků u CVD velké od  $10^{-6}$  až po atmosférický tlak.

U PVD je možnost deponovat velké množství materiálů (kovy, slitiny, směsi, polovodiče, supravodiče, polymery a další), u CVD je možno použít pouze materiály, které mají sloučeniny v plynném skupenství. Substrátů pro PVD je také velká spousta, ale pro CVD jsou omezeny vysokou teplotou procesu. [14]



## 4. Praktická část

V praktické části této práce bylo cílem změřit světelnou propustnost napařených a naprášených tenkých vrstev tvořených hliníkem a ověřit tak, že světelná propustnost je závislá na tloušťce vrstvy. Pro toto ověření bylo celkem vytvořeno 25 vzorků. Z toho počtu bylo 14 vzorků vytvořeno metodou napařování a 11 vzorků metodou naprašování.



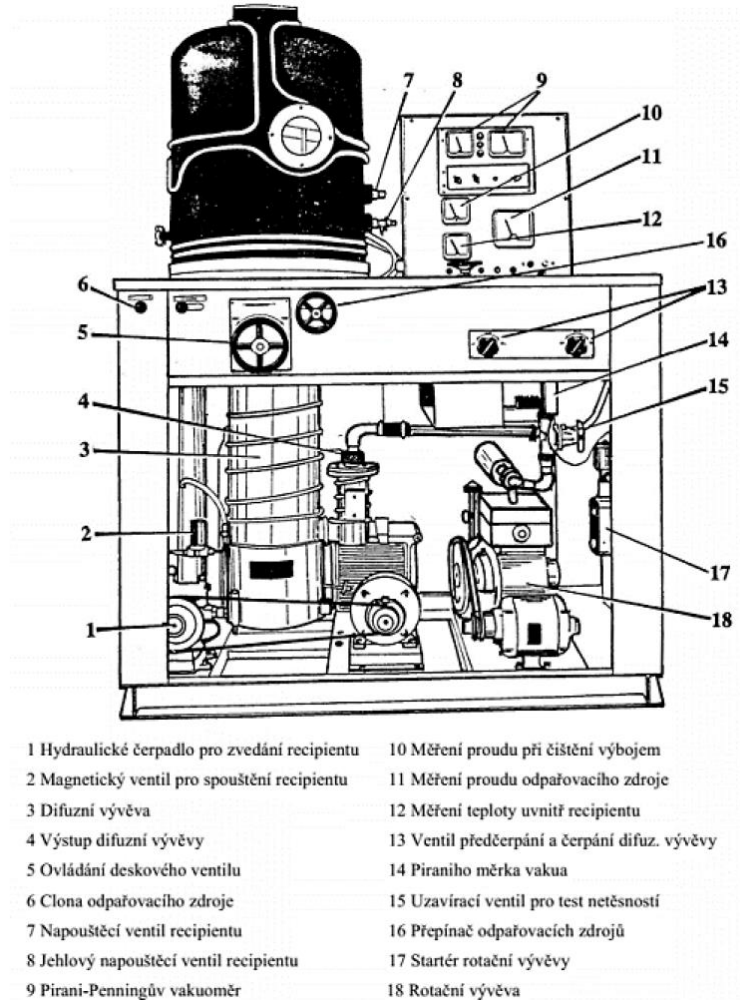
Obr. 6: Vlevo napařená vrstva, vpravo naprášená vrstva

### 4.1 Postup tvorby

Substrátem pro všechny vrstvy bylo podložní sklíčko obdélníkového tvaru s rozměry 75 x 25 mm a tloušťkou 1 mm. Toto sklíčko bylo použito i jako reference pro měření světelné propustnosti. Pro správné vytvoření vrstvy a také zejména pro správné změření propustnosti bylo potřeba sklíčko řádně umýt a vyčistit. Nejprve bylo tedy sklíčko očištěno izopropylalkoholem a následně bylo pomocí kompresoru zbaveno prachu. Tvar nanášených vrstev nebyl důležitým faktorem, důležité bylo vytvořit souvislou vrstvu.

### 4.1.1 Napařené vzorky

Napařené vzorky byly tvořeny v laboratoři na Katedře elektrotechnologie pomocí zařízení pro vakuové napařování od firmy Edwards z roku 1968.



Obr. 7: Napařovací zařízení v laboratoři na Katedře elektrotechnologie [3]

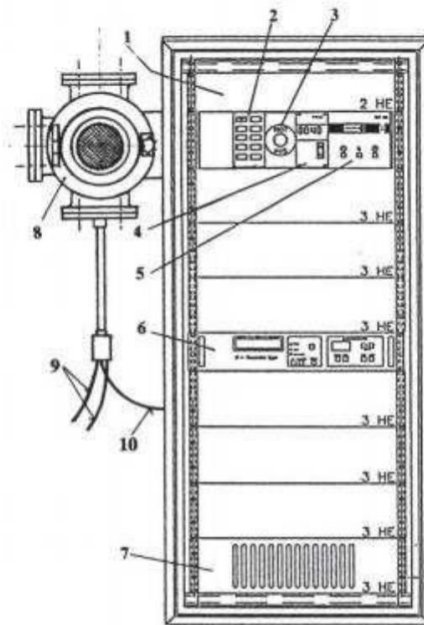
Jedná se o klasické napařovací zařízení využívající odporového ohřevu. Ve spodní části recipientu je z vodivého drátku vytvořená malá spirála, ve které se odpařuje požadovaný materiál a v horní části nad odpařovacím zdrojem je držák na substrát. Jelikož napařování potřebuje pro tvorbu vrstev vysoké vakuum, je nejprve potřeba toto vakuum vytvořit, toho je dosaženo pomocí dvou vývěv: rotační a difuzní vývěva. Pro předčerpání se používá vývěva rotační, k dosažení tlaku řádu jednotek mPa je již potřeba použít vývěvu difuzní. Po úspěšném vyčerpání se do spirály pustí proud a materiál se začne odpařovat, tento proces je velmi rychlý oproti době čerpání. Po napařování už je potřeba jen zavzdušnit recipient a vytáhnout vytvořený vzorek.

Jako deponovaný materiál byl použit hliníkový drátek o průměru 1 mm. Délku drátku bylo potřeba stanovit tak, aby tenká vrstva dokázala propouštět alespoň část světla.

První dva vzorky z drátků délek 2 cm a 1,5 cm světlo nepropouštěly, tudíž byly další vzorky tvořeny pouze z drátků s kratší délkou než 1,5 cm, a to konkrétně 1,2/1/0,8/0,6/0,5/0,4 cm. Tloušťka vrstvy je nepochybně závislá na množství odpařeného materiálu, z toho plyne, že vrstva vyrobená z kratšího drátku bude tenčí než vrstva z delšího drátku.

### 4.1.2 Naprášené vzorky

Pro naprašování jsem použil opět zařízení z laboratoře na Katedře elektrotechnologie, avšak v tomto případě se jedná novější zařízení pro magnetronové naprašování od firmy Balzers Pfeiffer.



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

Obr. 8: Naprašovací zařízení v laboratoři na Katedře elektrotechnologie [22]

Toto zařízení má recipient uspořádaný podobně jako naprašovací zařízení, jelikož držák na substrát je opět v horní části a materiál v podobně targetu je ve spodní části, pod targetem se ještě nachází magnetron. Ovládání tohoto zařízení je oproti předchozímu zařízení o mnoho jednodušší. Nejprve je potřeba vyčerpat recipient, u tohoto zařízení se využívá turbomolekulární vývěvy, po dosažení potřebného tlaku (v mém případě to byl 3,5 mPa) se uzavře škrtkový ventil a do recipientu se pustí pracovní plyn (v mém případě to byl argon). Po přivedení argonu se nastaví tlak v recipientu na hodnotu 2 Pa a může se začít naprašovat. Naprašování se reguluje pomocí vysokofrekvenčního generátoru, na

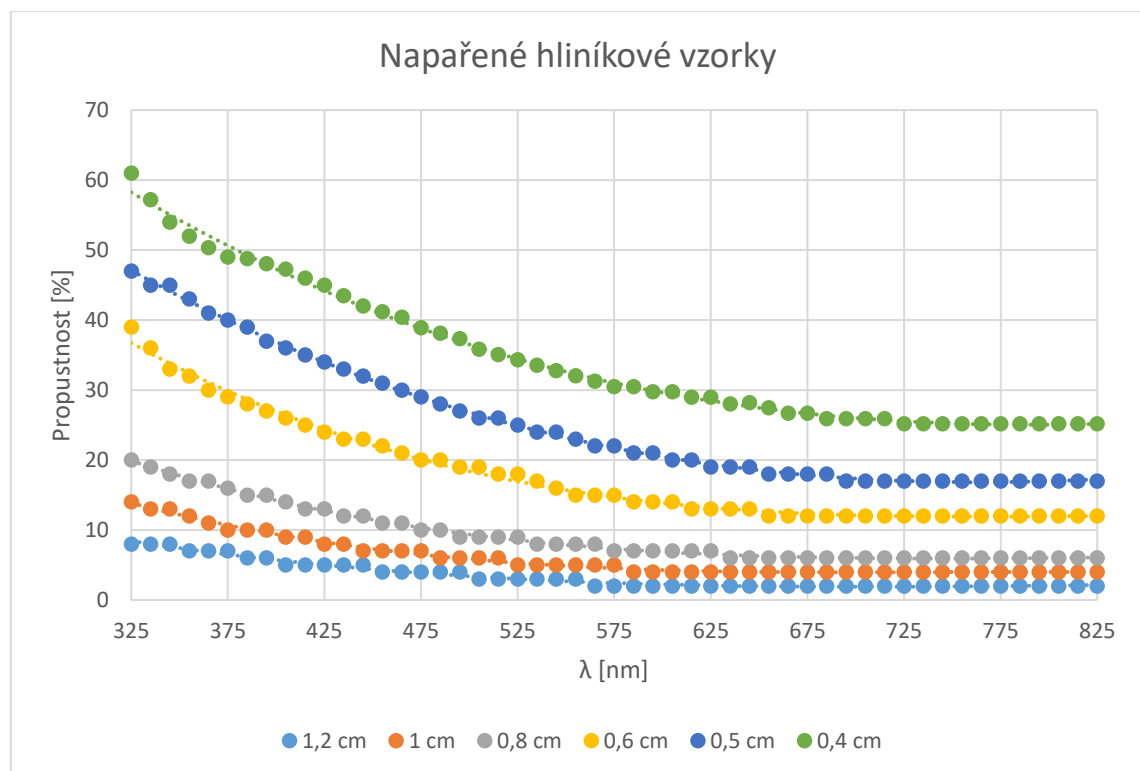
kterém se nastavuje požadovaný výkon. Tento výkon se na generátoru drží požadovanou dobu. Po skončení naprašování už stačí pouze opět zavzdušnit recipient.

V případě naprašování je deponovaný materiál použit ve formě hliníkového targetu. Tloušťka, a tedy i propustnost, je závislá na nastaveném výkonu na generátoru a také na délce naprašování. Pro co nejtenčí vrstvy byl zvolen výkon 30 W a doba naprašování 10/7/5 minut. Vrstvy naprašované delší dobu už světlo nepropouštěly.

## 4.2 Měření propustnosti

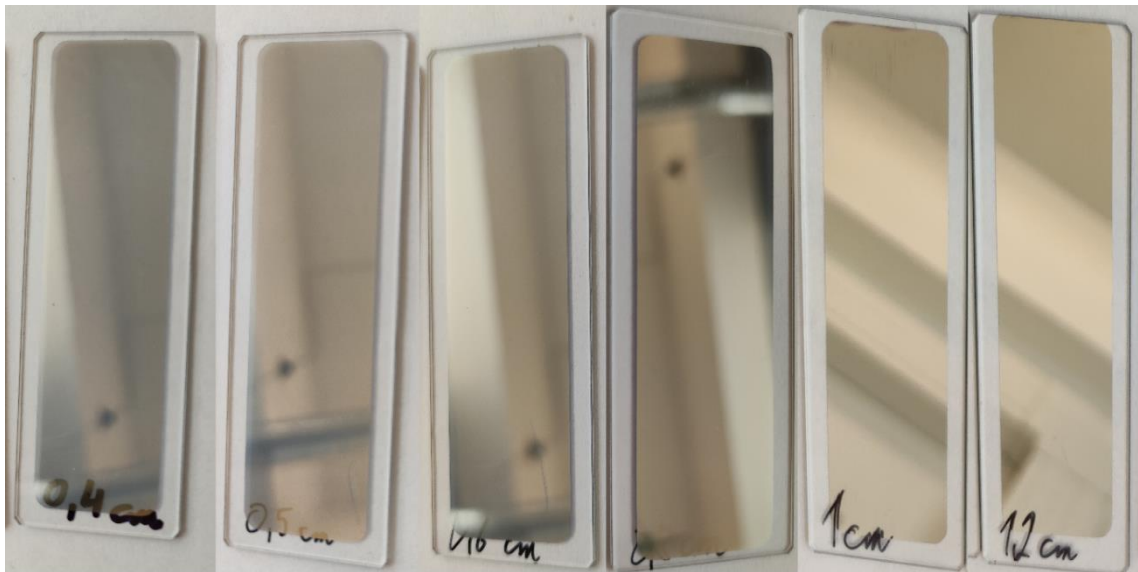
Světelná propustnost byla měřena v rozmezí vlnových délek ( $\lambda$ ) od 325 nm do 825 nm pomocí spektrometru. Toto rozmezí pokrývá celé viditelné spektrum. Spektrometr funguje tak, že nejprve změří světelnou propustnost zvolené reference, v tomto případě se jednalo o sklíčko používané jako substrát. Následně pak spektrometr měří propustnosti všech vzorků vůči referenci. Jako výsledek je tedy procentuální propustnost vůči referenci, která stanovuje 100% propustnost na všech vlnových délkách.

### 4.2.1 Napařené hliníkové vzorky

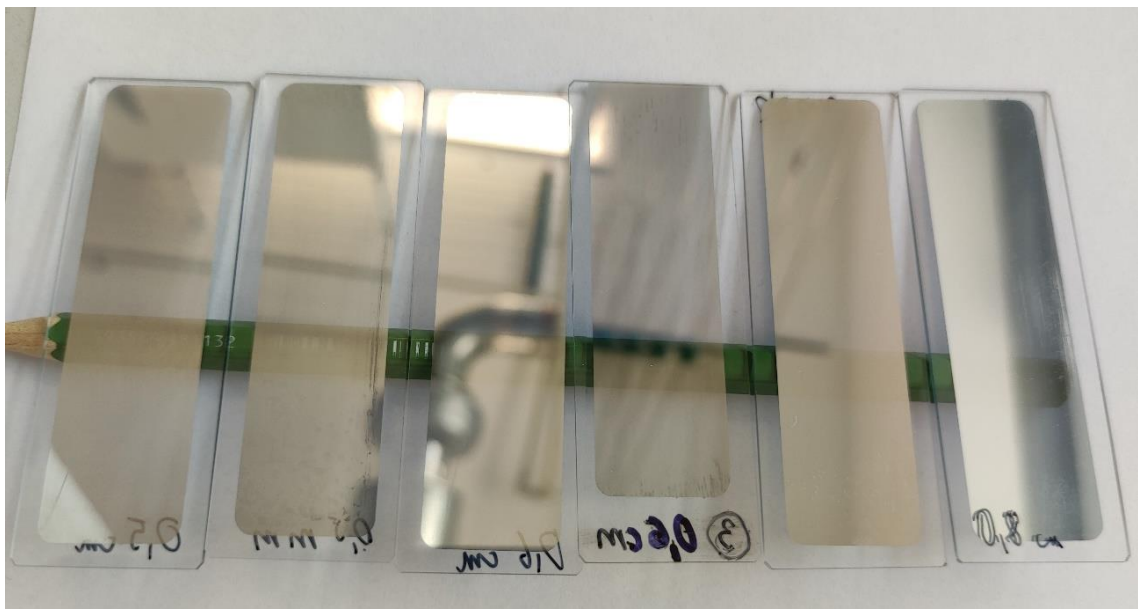


Graf 1: Propustnost napařených vzorků z hliníku

Graf 1 zobrazuje propustnost světla všech napařených vzorků. Na první pohled je patrné, že propustnost je skutečně závislá na tloušťce vrstvy. Vzorek vytvořený z hliníkového drátku délky 1,2 cm má největší tloušťku, a tedy nejmenší propustnost. U dalších vzorků byl napařovaný materiál postupně ubírán a tloušťka se tedy zmenšovala. Tento graf tedy potvrzuje závislost propustnosti na tloušťce. Vzorky, které byly vytvořeny z drátků délek 1,5 cm a 2 cm, podle spektrometru žádné světlo nepropouštěly.



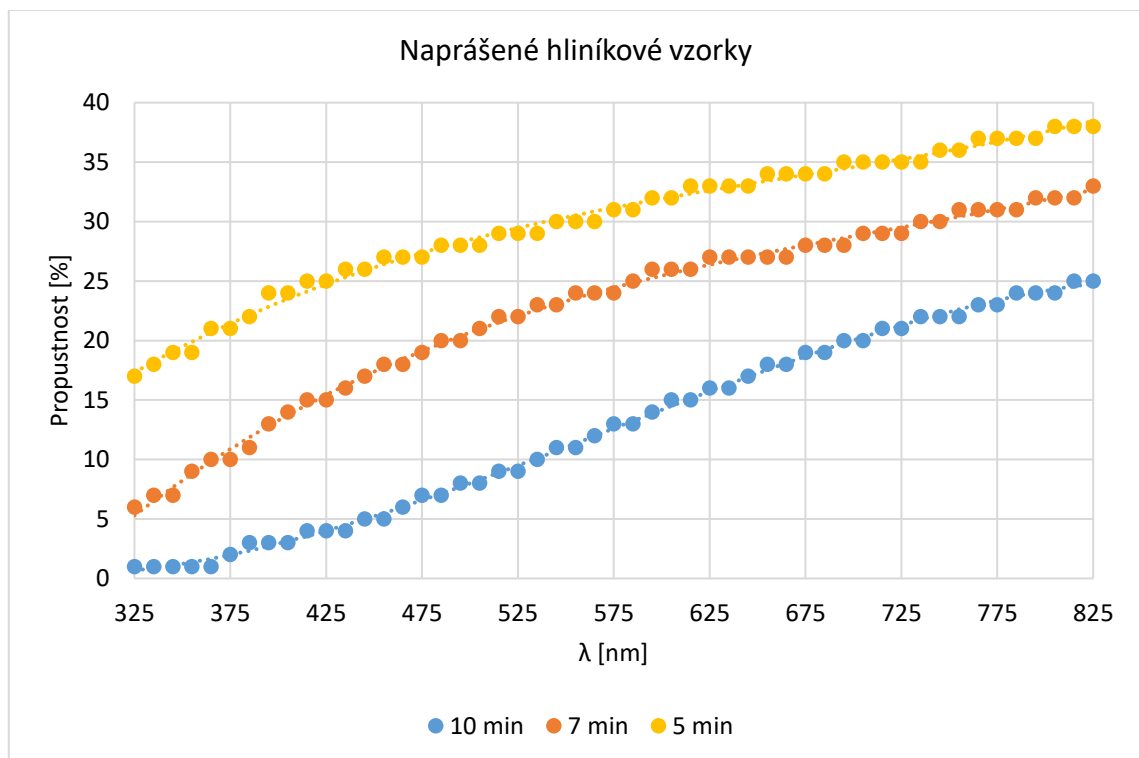
*Obr. 9: Napařené vzorky z grafu*



*Obr. 10: Názorné zobrazení propustnosti u nejtěnějších vzorků*

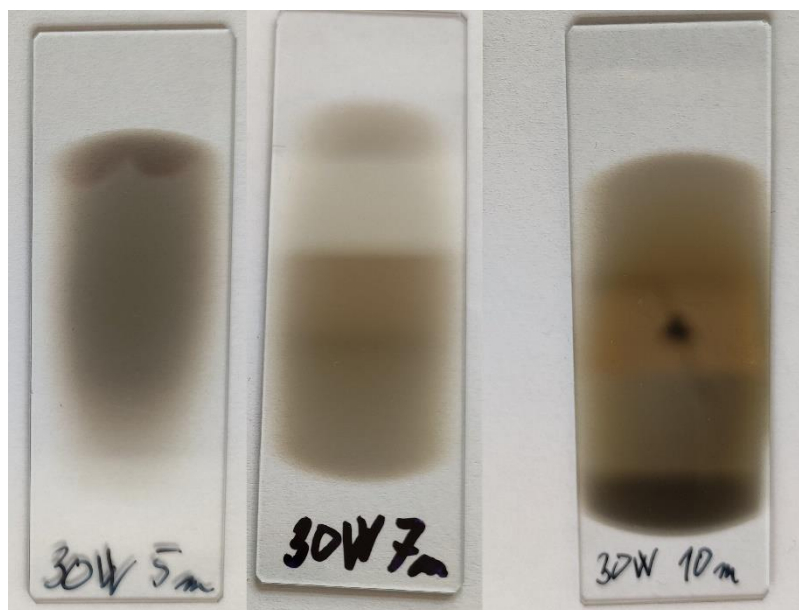
Na obr. 9 lze vidět jistou závislost propustnosti na tloušťce vrstvy. Vzorek vlevo je nejtenčí a je také vidět, že je nejvíce zbarvený do šeda. To je způsobeno bílou podložkou a také tím, že vrstva nedokáže odrazit všechno světlo, které na ní dopadá. Vzorky vpravo jsou naopak nejtlustší. Tyto vzorky odrážejí téměř všechno světlo a mají barvu spíše do žluta od světla, které na ně shora svítí. Na obr. 10 lze vidět pouhým okem, že zobrazené vrstvy skutečně propouštějí alespoň část světla.

## 4.2.2 Naprášené hliníkové vzorky

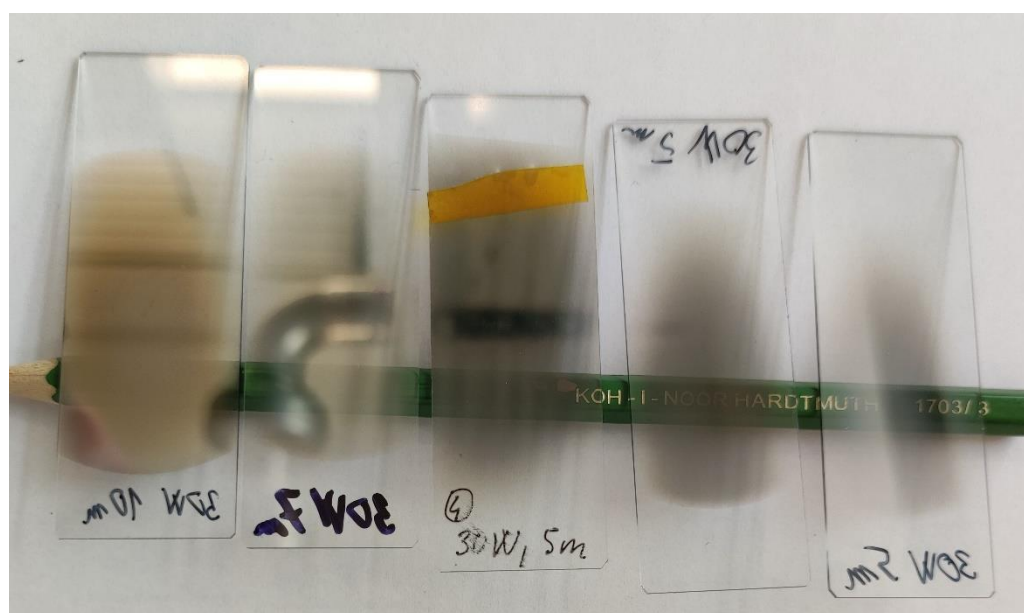


Graf 2: Propustnost naprášených vzorků z hliníku

Graf 2, zobrazující propustnost naprášených vzorků, stejně jako graf 1 potvrzuje závislost propustnosti na tloušťce. Avšak tvar křivek na grafu 2 je odlišný od křivek na grafu 1, to může být způsobeno tím, že naprášené vzorky jsou zbarvené do hněda. V tomto případě roste tloušťka společně dobou naprašování.



Obr. 11: Naprášené vzorky z grafu

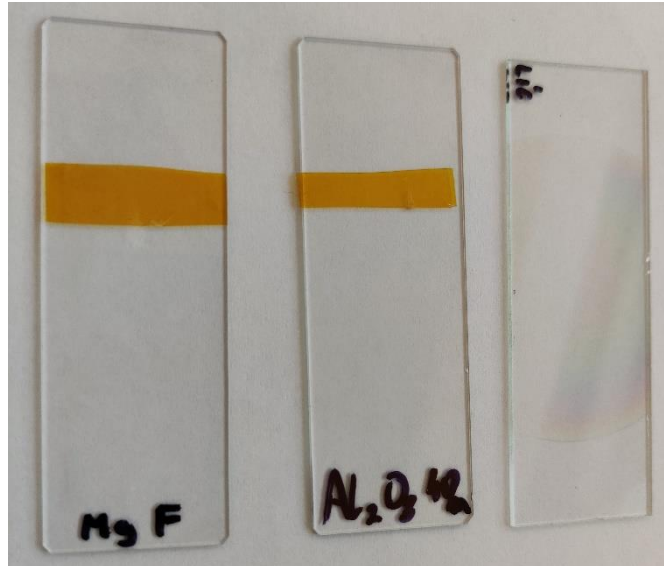


Obr. 12: Propustnost naprášených vzorků

Na obr. 11 a 12 jsou zobrazeny měřené naprášené vzorky, a i v tomto případě lze vidět pouhým okem jistou propustnost světla. Lze také vidět, že kvalita vrstev je oproti napařeným vzorkům horší. Při tak malém výkonu bylo obtížné naprášit materiál po celé možné ploše sklička a na vzorkách je tedy vidět, že při naprašování se materiál nenanáší rovnoměrně po celém povrchu substrátu.

### 4.2.3 Další vzorky

Jako porovnání k vzorkům z hliníku bylo vytvořeno a následně změřeno i dalších 6 vzorků z jiných materiálů. Mezi těmito šesti vzorky byly napařené vrstvy ze zlata, stříbra a mědi a naprášené vrstvy byly z korundu ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ),  $\text{ZnO}_2$  (oxid zinečnatý) a  $\text{MgF}_2$  (fluorid hořečnatý).



Obr. 13: Naprášené vzorky

Je patrné z obr. 13, že všechny ze tří dalších naprášených vrstev jsou velmi propustné, dokonce vrstvy z  $\text{MgF}_2$  a korundu měly shodné hodnoty propustnosti jako referenční sklíčko. Vzorek vytvořený z  $\text{MgF}_2$  zcela nepropouštěl krátké vlnové délky (zhruba do 375 nm), ostatní vlnové délky však velmi dobře propouštěl, jak je vidět v grafu 3.



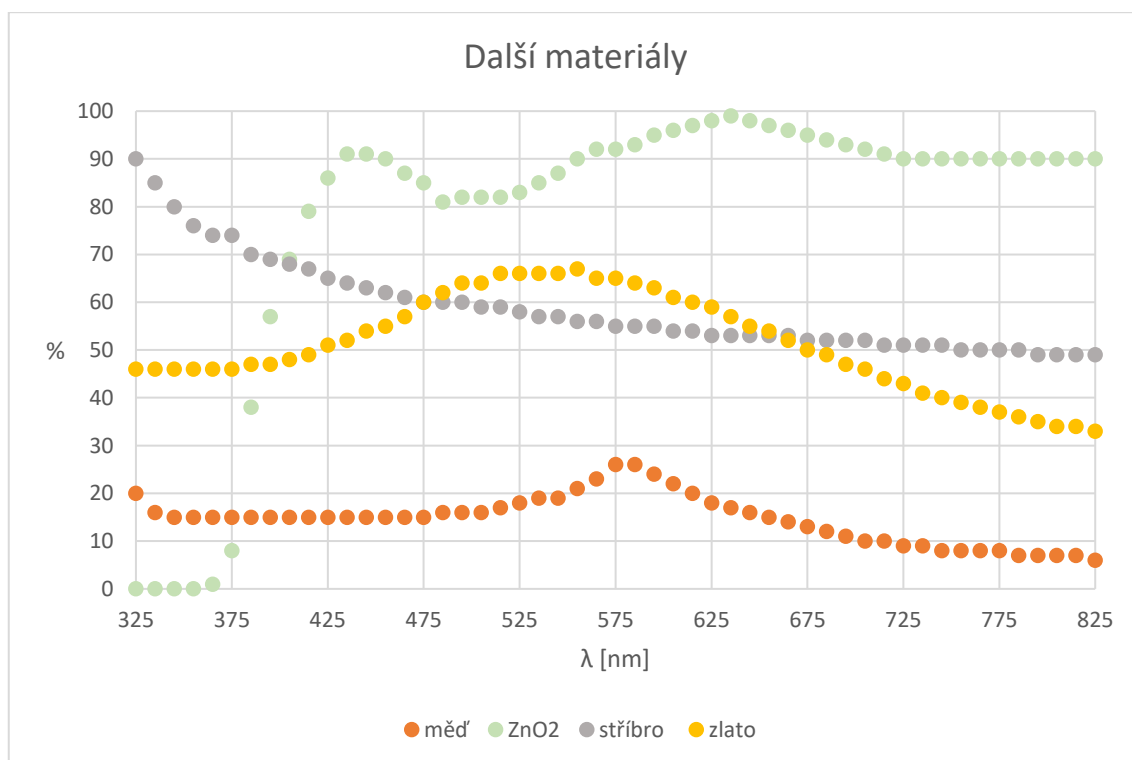
Obr. 14: Napařené vzorky z mědi a stříbra





Obr. 15: Napařené vzorky ze zlata

U napařených vzorků bylo potřeba vytvořit vrstvu, která by dokázala propouštět světlo, což se podařilo u vzorků z mědi a stříbra (obr. 14). Vzorky ze zlata byly potřeba vytvořit dva, protože první vzorek nepropouštěl žádné světlo (obr. 15).

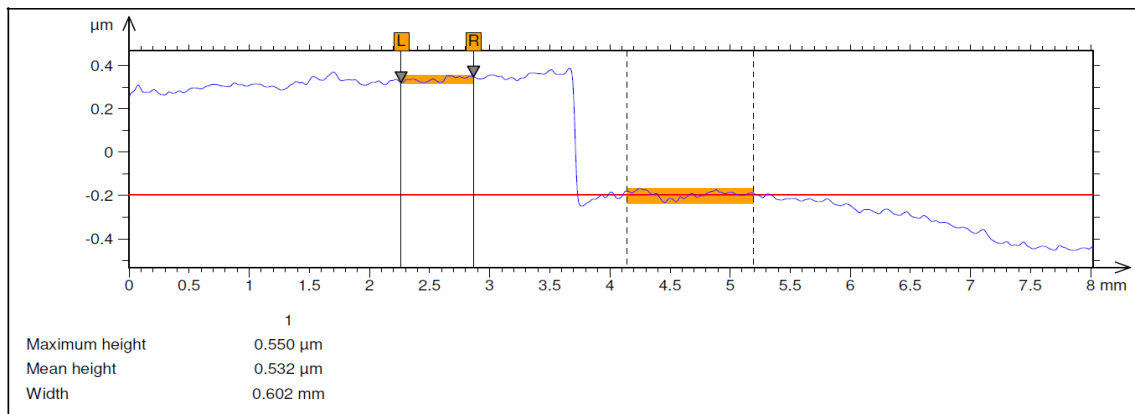


Graf 3: Propustnost dalších vzorků

V grafu 3 jsou zobrazeny propustnosti výše zmíněných vzorků. Vzorky z korundu a  $MgF_2$  nejsou zobrazeny, protože jejich propustnost byla na všech vlnových délkách 100 %. Díky této vlastnosti se vrstvy z  $MgF_2$  používají jako průhledné krycí vrstvy. Lze si také všimnout, že se průběh stříbrného vzorku podobá vzorkům napařeného hliníku, to může být způsobeno stejnou barvou obou vrstev. Dále se také podobají průběhy mědi a zlata, to může být také způsobeno podobnou barvou.

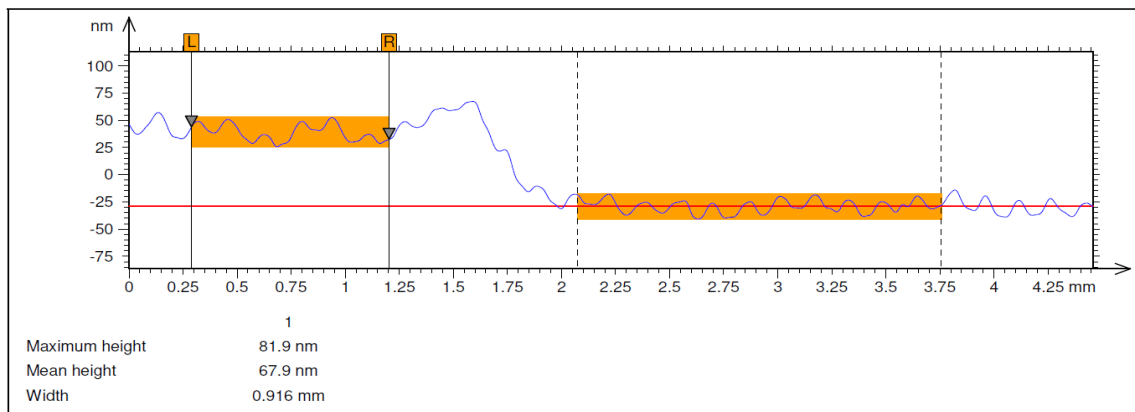
### 4.3 Měření tloušťky

Dalším úkolem praktické části bylo změřit tloušťku vybraných vzorků. To se u některých vzorků ukázalo být problémem, jelikož hlavním cílem všech vzorků bylo, aby dokázaly propouštět světlo, tudíž aby vzorky byly co nejtenčí.



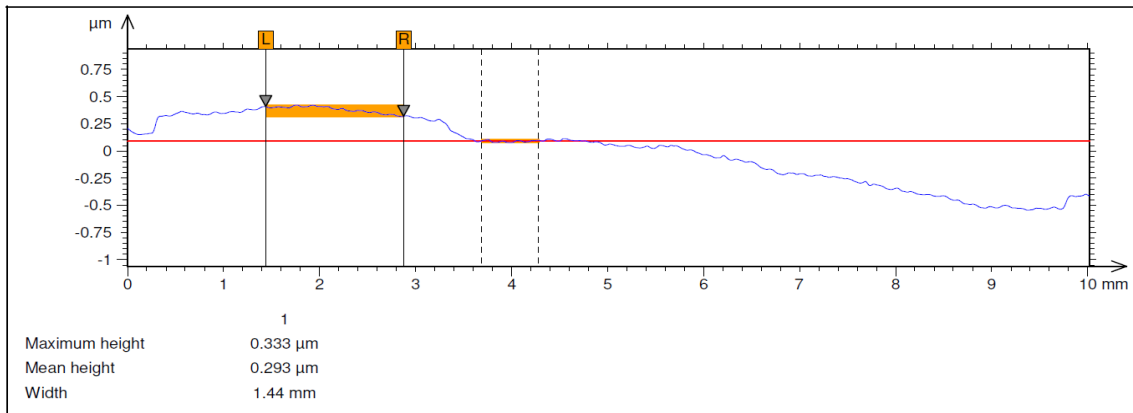
Obr. 16: Tloušťka napařeného vzorku z  $MgF_2$

Nejtlustším vzorkem byla vrstva z  $MgF_2$ . Na obr. 16 je zobrazen profil vzorku z místa přechodu vrstvy na substrát. Tloušťka 532 nm je způsobena hlavně vyšším výkonem (40 W) a delší dobou napašování (40 minut). U tohoto vzorku nebylo potřeba řešit tloušťku, protože materiál  $MgF_2$  je sám o sobě propustný (obr. 13).

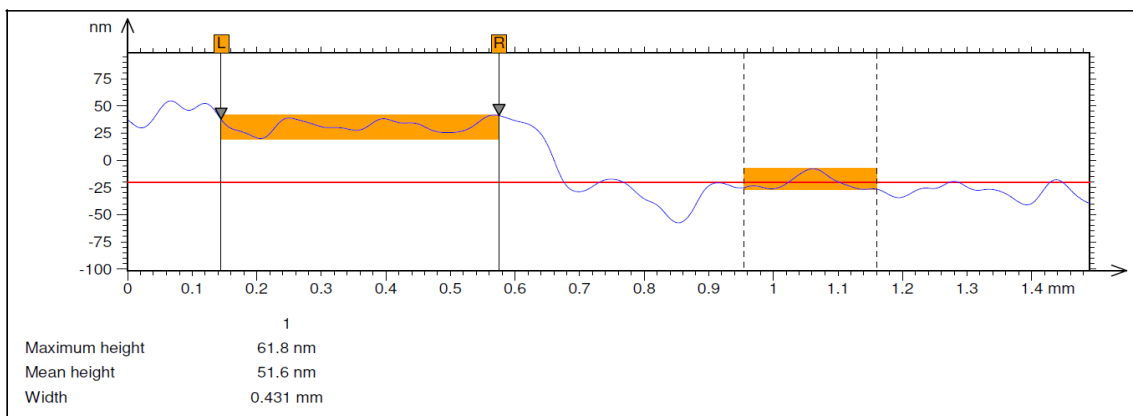


Obr. 17: Tloušťka napařeného vzorku z Cu

Vzorek z Cu už musel být tenčí, aby dokázal propouštět světlo. Z obr. 17 vyplývá, že tento vzorek má tloušťku 67,9 nm.

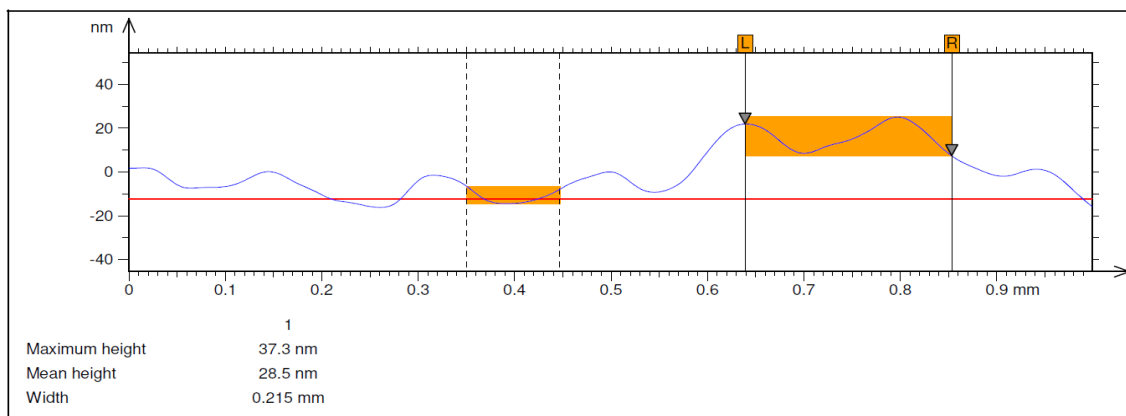


Obr. 18: Tloušťka naprášeného vzorku z Al

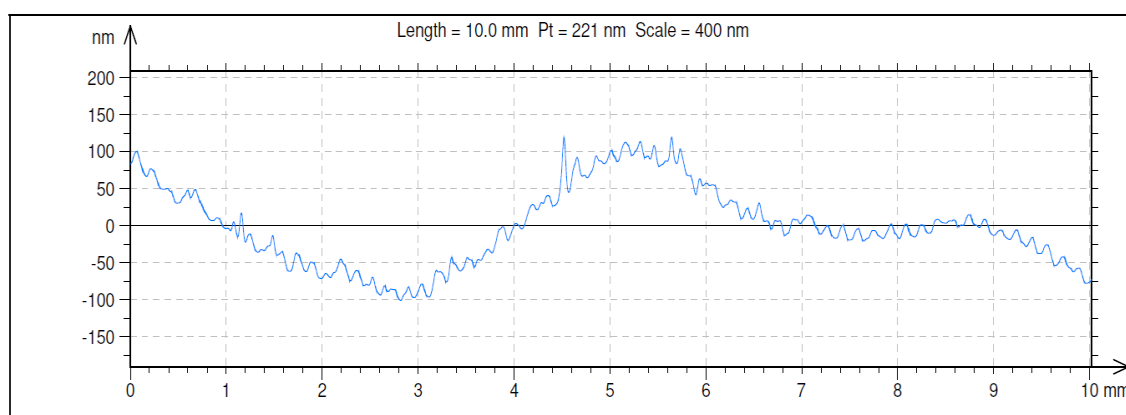


Obr. 19: Tloušťka napařeného vzorku z Al drátku délky 2 cm

Na obr. 18 a 19 jsou zobrazeny dva vzorky z Al, které však žádné světlo nepropouští. Obr. 18 zobrazuje naprášenou vrstvu hliníku při 35 W s dobou naprašování 10 min, tento vzorek má tloušťku 293 nm a podle spektrometru je zcela nepropustný. Obr. 19 zobrazuje vrstvu napařenou z hliníkového drátku délky 2 cm, tento vzorek má tloušťku 51,6 nm a je také zcela nepropustný. Na obou profilech lze vidět náznak nerovného substrátu.



Obr. 20: Tloušťka napařené vzorku z Al drátku délky 0,5 cm



Obr. 21: Tloušťka napařené vzorku z Al drátku délky 1 cm

Obr. 20 zobrazuje nejtenčí změřený vzorek, jedná se konkrétně o vzorek vytvořený z hliníkového drátku délky 0,5 cm, který podle grafu 1 světlo propouští. Na profilu tloušťky lze vidět velké zvlnění, jedná se o zvlnění substrátu. Ač se sklíčko může zdát rovné, tak při měření vrstev tlustých desítky nm, je vnesena velká chyba způsobena právě nerovností sklíčka. A tato nerovnost velmi komplikovala měření tloušťek vzorků. Na obr. 21 je zobrazená napařená vrstva z hliníkového drátku délky 1 cm a je zde vidět, že díky nerovnému substrátu je nemožné určit tloušťku. Avšak u vrstev tlustších se tato nerovnost neuplatní v takové míře jako zde, jako příklad poslouží obr. 16, kde je tato nerovnost zanedbatelná vůči tloušťce vrstvy.

## **5. Ekonomická část**

### **5.1 Úvod**

V této části je ekonomické zhodnocení dvou velmi používaných metod vytváření tenkých vrstev. Tyto metody jsou napařování a naprašování. Pro zjištění potřebných informací k této práci jsem kontaktoval firmu KWS CZ s.r.o., která se zabývá jak výrobou zařízení pro vytváření tenkých vrstev, tak i samotným provozováním a vývojem těchto zařízení. Tato firma se orientuje zejména na zařízení pro vakuové napařování a na zařízení pro magnetronové naprašování. O těchto dvou zařízeních mi poskytl informace o provozu, tudíž se v této práci budu zabývat porovnáním provozu vakuového napařování a magnetronového naprašování. Obě zařízením budu porovnávat nezávisle na sobě v jednosměrném provozu.

### **5.2 Náklady na jeden kus výrobku**

Nejprve je potřeba určit náklady na jeden kus, s tímto nákladem je možné počítat další ekonomické ukazatele pro porovnání obou metod. Tyto náklady se skládají ze čtyř složek, které budou spočítány:

- I. Odpisy
- II. Náklady na zaměstnance
- III. Náklady na elektřinu
- IV. Náklady na materiál

U prvních třech nejdříve určím roční náklady a až poté náklady na kus.

#### **5.2.1 Cena zařízení, doba životnosti a doba výroby jednoho kusu**

Na konzultaci s firmou KWS CZ s.r.o. byly navrženy obě zařízení s přibližně stejným výkonem. Jednalo se o výkonné laboratorní zařízení. Zařízení pro vakuové napařování s odporovým ohřevem mělo hodnotu 1 500 000 Kč. Zařízení pro magnetronové naprašování je složitější a obsahuje dražší součástky a celková cena tedy byla 2 260 000 Kč.

S cenou zařízení je ještě vhodné stanovit dobu životnosti. Pro porovnání je vhodné stanovit dobu životnosti obou zařízení stejnou. Ačkoliv tyto zařízení vydrží fungovat ve většině případů déle, dobu životnosti stanovím na 10 let. Po tuto by měly obě zařízení

fungovat bez větších oprav, po uplynutí doby je možné buď zařízení opravit (většinou se jedná o opravu či výměnu vývěvy), nebo pořídit zařízení nové.

Dobu výroby vzorků je obtížné přesně určit. Pro první vzorky je doba čerpání vakua znatelně delší než pro další vzorky, kdy jsou už vývěvy dostatečně „zahřáté“. Zatímco první vzorek dne trvalo vytvořit na obou zařízeních přibližně hodinu, tak u následujících vzorků se tato doba zkracovala. Přibližný čas tvorby vzorku se pak pohyboval okolo 45 minut. Jako dobu tvorby tedy zvolím 45 minut pro obě varianty.

## 5.2.2 Odpisy

Odpisy jsou náklad, který slouží k vyjádření snížení hodnoty zařízení. Hodnota tohoto nákladu by tedy měla odpovídat opotřebením zařízení. Pro výpočet výše odpisů slouží dva základní modely rovnoměrné odepisování a zrychlené odepisování. V této práci zvolím jednodušší model rovnoměrného odepisování, ve kterém se každý rok odepisuje stejná částka. Roční odepisovanou částku budu počítat pomocí poměrné annuity podle vzorce:

$$O = a \cdot H \quad (5.1)$$

$O$  je roční odepisovaná částka

$a$  je poměrná annuita

$H$  je cena zařízení

Jelikož jsem zvolil stejnou dobu životnosti, tak mají obě zařízení stejnou poměrnou annuitu, ta se vypočítá podle vzorce:

$$a = \frac{q^T \cdot (q - 1)}{q^T - 1} \quad (5.2)$$

$q = 1 + \text{diskontní míra}$

$T$  je doba životnosti

Diskontní míru jsem zvolil v kap. 5.3 na hodnotu 8 %.

Pro takto zvolené parametry vychází poměrná annuita:

$$a = 0,149$$

### 5.2.2.1 Napařovací zařízení

$$O_{\text{napař}} = 223\,544 \text{ Kč}$$

Ročně budu tedy u napařovacího zařízení odepisovat částku 223 544 Kč.

### 5.2.2.2 *Naprašovací zařízení*

$$O_{napraš} = 336\,807 \text{ Kč}$$

Ročně budu tedy u naprašovacího zařízení odepisovat částku 336 807 Kč.

### 5.2.3 Náklady na zaměstnance

Další důležitá část celkových nákladů jsou náklady na zaměstnance. U těchto nákladů vycházím z průměrné měsíční mzdy v ČR za rok 2020. Tato měsíční hrubá mzda je 35 611 Kč, avšak celkové náklady na zaměstnance je potřeba počítat ze superhrubé mzdy, která v sobě započítává zdravotní i sociální pojištění. Superhrubá mzda je o 33,8% větší než hrubá mzda, tudíž průměrná měsíční superhrubá mzda je 47 648 Kč.

Pokud mám pouze jeden stroj, tak mi stačí pouze jeden zaměstnanec, který ho obsluhuje. Jelikož zaměstnance platím od hodiny, tak budu platit v obou případech stejnou roční částku na zaměstnance a ta je:

$$N_{zam} = 571\,770 \text{ Kč}$$

### 5.2.4 Náklady na elektřinu

Jak již bylo napsáno v kap. 5.2.1, tak obě zařízení mají přibližně stejný výkon. Obě zařízení jsou poměrně výkonné a jejich spotřebu lze popsat jednoduchým vzorcem:

$$E = t_c \cdot 6 \text{ kW} + t_d \cdot 5 \text{ kW} \quad (5.3)$$

$E$  je spotřebovaná elektrická energie

$t_c$  je doba celého cyklu

$t_d$  je doba depozice

Doba celého cyklu je v podstatě doba od zapnutí po vypnutí zařízení, je to tedy 45 minut pro obě varianty. Doba depozice je pouze doba, kdy se tvoří tenká vrstva. U naprašovacího zařízení je to doba, kdy topnou spirálou teče proud, což bylo v mém případě 2 minuty. U naprašovacího zařízení to je doba, po kterou je vysokofrekvenčním generátorem dodáván požadovaný výkon, tato hodnota byla 10 minut pro vytvoření podobné vrstvy jako metodou napařování.

Cena elektřiny se dá rozdělit na stálou a proměnnou složku. Stálá složka bude činit 200 Kč/měsíc a proměnná složka bude 4,5 Kč/kWh podle ceníku ČEZ, a.s. pro rok 2020. Jedná se o sazbu se střední spotřebou pro podnikatele C02d.

#### 5.2.4.1 *Napařovací zařízení*

Podle vzorce (5.3) lze jednoduše stanovit spotřebu elektrické energie na jeden vzorek. Tato hodnota je tedy 4,67 kWh. Při výrobě 10 kusů denně a 252 pracovních dnech za rok jsou roční náklady na elektřinu:

$$N_{el-napař} = 55\,552 \text{ Kč}$$

#### 5.2.4.2 *Naprašovací zařízení*

Energie spotřebovaná během jednoho cyklu naprašování je podle vzorce (5.3) 5,33 kWh. Roční náklady se staví stejně jako v případě napařování:

$$N_{el-napraš} = 63\,145 \text{ Kč}$$

### 5.2.5 **Náklady na materiál**

Náklady na materiál se skládají ze 3 složek:

- I. Materiál pro tvorbu vrstvy
- II. Substrát
- III. Pracovní/Reaktivní plyn (pouze u naprašování)

#### 5.2.5.1 *Napařovací zařízení*

Materiál pro napařování lze sehnat ve formě drátku za přibližně 5 645 Kč (219 eur). Z drátku dlouhého 100 metrů se dá vytvořit zhruba 10 000 kusů. Náklad na materiál na jeden kus je tedy:

$$n_{mat-napař} = 0,56 \text{ Kč}$$

Jako substrát se dají použít například skleněné destičky, které stojí přibližně 6 Kč za kus.

$$n_{sub-napař} = 6 \text{ Kč}$$

#### 5.2.5.2 *Naprašovací zařízení*

Materiál pro naprašování lze sehnat ve formě targetu za přibližně 7 100 Kč (275 eur). Jeden target stačí na zhruba 5 000 kusů. Náklad na materiál na jeden kus je tedy:

$$n_{mat-napraš} = 1,42 \text{ Kč}$$

U naprašování lze použít stejný substrát jako u napařování

$$n_{sub-napraš} = 6 \text{ Kč}$$

Při procesu naprašování se ještě používá pracovní, případně reaktivní plyn, tento plyn byl v mém případě argon, který vychází zhruba na 2 Kč na kus.

$$n_{plyn-napraš} = 2 \text{ Kč}$$



## 5.2.6 Výpočet nákladů na kus

Pro výpočet nákladů na kus je potřeba znát počet vyrobených kusů za rok. Uvažuji jednosměnný provoz s pracovní dobou 8 hodin denně a 252 pracovních dní.

| Metoda                         | Napařování | Naprašování |
|--------------------------------|------------|-------------|
| Doba výroby jednoho kusu [min] | 45         | 45          |
| Vyrobene kusy za den [ks]      | 10         | 10          |
| Vyrobene kusy za rok [ks]      | 2 520      | 2 520       |

Tab. 1: Počet možných vyrobených kusů

Tabulka ročních nákladů všech složek:

| Metoda                          | Napařování     | Naprašování    |
|---------------------------------|----------------|----------------|
| Odpisy [Kč/rok]                 | 223 544        | 336 807        |
| Náklady na zaměstnance [Kč/rok] | 571 770        | 571 770        |
| Náklady na elektřinu [Kč/rok]   | 55 552         | 63 145         |
| Náklady na materiál [Kč/rok]    | Materiál       | 1 423          |
|                                 | Substrát       | 15 120         |
|                                 | Pracovní plyn  | -              |
| <b>Celkové náklady [Kč/rok]</b> | <b>867 409</b> | <b>995 460</b> |

Tab. 2: Roční náklady na provoz napařovacího a naprašovacího zařízení

Tabulka nákladů na jeden kus:

| Metoda                         |               | Napařování    | Naprašování   |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Odpisy [Kč/ks]                 |               | 88,71         | 133,65        |
| Náklady na zaměstnance [Kč/ks] |               | 226,89        | 226,89        |
| Náklady na elektřinu [Kč/ks]   |               | 22,04         | 25,06         |
| Náklady na materiál [Kč/ks]    | Materiál      | 0,56          | 1,42          |
|                                | Substrát      | 6             | 6             |
|                                | Pracovní plyn | -             | 2             |
| <b>Celkové náklady [Kč/ks]</b> |               | <b>344,21</b> | <b>395,02</b> |

Tab. 3: Náklady na kus napařovacího a naprašovacího zařízení

Jak je vidět, náklady na jeden kus jsou téměř celé tvořeny náklady na zaměstnance a odpisy.

Pro ilustraci složení nákladů uvádím tabulku procentuálních zastoupení složek v celkových nákladech na kus:

| Metoda                         |               | Napařování    | Naprašování   |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Odpisy [%]                     |               | 25,8          | 33,8          |
| Náklady na zaměstnance [%]     |               | 65,9          | 57,4          |
| Náklady na elektřinu [%]       |               | 6,4           | 6,3           |
| Náklady na materiál [%]        | Materiál      | 0,2           | 0,4           |
|                                | Substrát      | 1,7           | 1,5           |
|                                | Pracovní plyn | -             | 0,5           |
| <b>Celkové náklady [Kč/ks]</b> |               | <b>344,21</b> | <b>395,02</b> |

Tab. 4: Procentuální zastoupení nákladů napařovacího a naprašovacího zařízení

V této tabulce již je vidět, že v obou případech jsou náklady na kus tvořeny z více než 90 % odpisy a náklady na zaměstnance.

## 5.3 NPV

Dalším způsobem, jak je možné porovnat metodu napařování a naprašování je porovnání NPV investic do daných zařízení. NPV neboli čistá současná hodnota je ekonomické kritérium hodnocení investic.

Pro vypočítání čisté současně hodnoty investic je zapotřebí znát náklady z předchozí kapitoly a ideálně také roční nominální růst jejich hodnot. Dále je potřeba znát příjmy z jednotlivých investic a v poslední řadě je potřeba správně zvolit diskont.

Růst průměrné mzdy v České republice jsem zjišťoval z webu Českého statistického úřadu a podle hodnot z posledních pěti let jsem stanovil růst průměrné mzdy jako geometrický průměr růstu za každý rok. Růst průměrné mzdy za posledních let je tedy 5,85 %. Stejným způsobem jsem zjišťoval růst ceny elektrické energie podle ceníku ČEZ, a.s., tento růst je 4,8 %. Posledním nákladem jsou náklady na materiály, růst tohoto nákladu jsem stanovil pouze jako hodnotu inflace, kterou jsem stanovil na 2 %.

Při znalosti všech růstů cen je možné stanovit diskont, se kterým bude nadále počítáno. Jeho hodnota by měla být větší, než je nejvyšší hodnota růstu jednotlivých nákladů. Ideální je však k této hodnotě ještě přidat nějakou přírážku. Nominální diskont tedy zvolím 8 %.

Nakonec je ještě nutné vypočítat příjmy investic. Příjem obou investic je pouze z prodeje výrobků. Tento příjem stanovím tak, že vypočtené náklady zvýším o 20 % a tuto hodnotu zvolím jako prodejní cenu. Roční růst příjmů nechám také pouze na hodnotě inflace, tedy na 2 %.

### 5.3.1 Výpočet NPV

Čistá současná hodnota je suma diskontovaných hotovostních toků a vypočítá se podle vzorce:

$$NPV = \sum_{t=0}^T CF_t \cdot (1 + r)^{-t} \quad (5.4)$$

$CF_t$  vyjadřuje hotovostní tok v jednotlivých letech

$r$  je diskontní míra

Pro vypočítání konečné hodnoty NPV obou variant je tedy nutné zjistit roční hotovostní toky těchto investic.

### 5.3.2 NPV napařování

Přehled hotovostních toků varianty s napařováním je v tab. 5

| Rok                   | 0                       | 1                       | 2                     | 3                     |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Investice             | -1 500 000,00 Kč        |                         |                       |                       |
| Zaměstnanci           |                         | -604 932,89 Kč          | -640 019,00 Kč        | -677 140,10 Kč        |
| Elektrřina            |                         | -58 218,15 Kč           | -61 012,62 Kč         | -63 941,23 Kč         |
| Materiál              |                         | -16 873,39 Kč           | -17 210,86 Kč         | -17 555,08 Kč         |
| Přijmy                |                         | 1 061 708,20 Kč         | 1 082 942,37 Kč       | 1 104 601,21 Kč       |
| Odpisy                |                         | -223 544,23 Kč          | -223 544,23 Kč        | -223 544,23 Kč        |
| Daň                   |                         | -30 046,51 Kč           | -26 819,57 Kč         | -23 259,91 Kč         |
| CF                    | -1 500 000,00 Kč        | 351 637,26 Kč           | 337 880,31 Kč         | 322 704,90 Kč         |
| Kumulované CF         | -1 500 000,00 Kč        | -1 148 362,74 Kč        | -810 482,43 Kč        | -487 777,53 Kč        |
| DCF                   | -1 500 000,00 Kč        | 325 590,05 Kč           | 289 677,91 Kč         | 256 173,55 Kč         |
| <b>Kumulované DCF</b> | <b>-1 500 000,00 Kč</b> | <b>-1 174 409,95 Kč</b> | <b>-884 732,04 Kč</b> | <b>-628 558,48 Kč</b> |

| Rok                   | 4                     | 5                     | 6                    | 7                    |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| Investice             |                       |                       |                      |                      |
| Zaměstnanci           | -716 414,22 Kč        | -757 966,25 Kč        | -801 928,29 Kč       | -848 440,13 Kč       |
| Elektrřina            | -67 010,41 Kč         | -70 226,91 Kč         | -73 597,80 Kč        | -77 130,49 Kč        |
| Materiál              | -17 906,18 Kč         | -18 264,30 Kč         | -18 629,59 Kč        | -19 002,18 Kč        |
| Přijmy                | 1 126 693,24 Kč       | 1 149 227,10 Kč       | 1 172 211,64 Kč      | 1 195 655,88 Kč      |
| Odpisy                | -223 544,23 Kč        | -223 544,23 Kč        | -223 544,23 Kč       | -223 544,23 Kč       |
| Daň                   | -19 345,46 Kč         | -15 052,83 Kč         | -10 357,23 Kč        | -5 232,38 Kč         |
| CF                    | 306 016,97 Kč         | 287 716,82 Kč         | 267 698,74 Kč        | 245 850,69 Kč        |
| Kumulované CF         | -181 760,56 Kč        | 105 956,26 Kč         | 373 654,99 Kč        | 619 505,69 Kč        |
| DCF                   | 224 931,61 Kč         | 195 815,23 Kč         | 168 695,61 Kč        | 143 451,52 Kč        |
| <b>Kumulované DCF</b> | <b>-403 626,88 Kč</b> | <b>-207 811,65 Kč</b> | <b>-39 116,03 Kč</b> | <b>104 335,49 Kč</b> |

| Rok                   | 8                    | 9                    | 10                   |
|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Investice             |                      |                      |                      |
| Zaměstnanci           | -897 649,66 Kč       | -949 713,34 Kč       | -1 004 796,71 Kč     |
| Elektrřina            | -80 832,76 Kč        | -84 712,73 Kč        | -88 778,94 Kč        |
| Materiál              | -19 382,22 Kč        | -19 769,87 Kč        | -20 165,26 Kč        |
| Přijmy                | 1 219 568,99 Kč      | 1 243 960,37 Kč      | 1 268 839,58 Kč      |
| Odpisy                | -223 544,23 Kč       | -223 544,23 Kč       | -223 544,23 Kč       |
| Daň                   | 0,00 Kč              | 0,00 Kč              | 0,00 Kč              |
| CF                    | 221 704,35 Kč        | 189 764,44 Kč        | 155 098,66 Kč        |
| Kumulované CF         | 841 210,04 Kč        | 1 030 974,48 Kč      | 1 186 073,14 Kč      |
| DCF                   | 119 779,96 Kč        | 94 929,46 Kč         | 71 840,69 Kč         |
| <b>Kumulované DCF</b> | <b>224 115,45 Kč</b> | <b>319 044,91 Kč</b> | <b>390 885,60 Kč</b> |

Tab. 5: Hotovostní toky provozu napařovacího zařízení

Jak již bylo dříve napsáno, tak NPV je suma diskontovaných hotovostních toků a tato hodnota je vypsána v posledním řádku tabulky. Je snadné tedy určit, že čistá současná hodnota varianty s napařováním je po deseti letech 390 886 Kč.

Z tab. 5 lze také zjistit prostou dobu návratnosti investice, která je 5 let. Je to doba, za kterou se díky příjmům vrátí peníze z počáteční investice. Toto je však kritérium, které zanedbává časovou cenu peněz, proto také existuje diskontovaná doba návratnosti, ta je pro tuto variantu 7 let.

### 5.3.3 NPV naprašování

Přehled hotovostních toků varianty s naprašováním je v tab. 6

| Rok                   | 0                       | 1                       | 2                       | 3                       |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Investice             | -2 260 000,00 Kč        |                         |                         |                         |
| Zaměstnanci           |                         | -605 218,77 Kč          | -640 624,07 Kč          | -678 100,58 Kč          |
| Elektřina             |                         | -66 175,72 Kč           | -69 352,15 Kč           | -72 681,05 Kč           |
| Materiál              |                         | -24 213,17 Kč           | -24 697,43 Kč           | -25 191,38 Kč           |
| Příjmy                |                         | 1 218 443,07 Kč         | 1 242 811,94 Kč         | 1 267 668,18 Kč         |
| Odpisy                |                         | -336 806,64 Kč          | -336 806,64 Kč          | -336 806,64 Kč          |
| Daň                   |                         | -35 345,47 Kč           | -32 553,01 Kč           | -29 428,82 Kč           |
| CF                    | -2 260 000,00 Kč        | 487 489,95 Kč           | 475 585,27 Kč           | 462 266,34 Kč           |
| Kumulované CF         | -2 260 000,00 Kč        | -1 772 510,05 Kč        | -1 296 924,78 Kč        | -834 658,44 Kč          |
| DCF                   | -2 260 000,00 Kč        | 451 379,58 Kč           | 407 737,71 Kč           | 366 961,93 Kč           |
| <b>Kumulované DCF</b> | <b>-2 260 000,00 Kč</b> | <b>-1 808 620,42 Kč</b> | <b>-1 400 882,70 Kč</b> | <b>-1 033 920,78 Kč</b> |

| Rok                   | 4                     | 5                     | 6                     | 7                   |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| Investice             |                       |                       |                       |                     |
| Zaměstnanci           | -717 769,46 Kč        | -759 758,98 Kč        | -804 204,88 Kč        | -851 250,86 Kč      |
| Elektřina             | -76 169,75 Kč         | -79 825,89 Kč         | -83 657,54 Kč         | -87 673,10 Kč       |
| Materiál              | -25 695,21 Kč         | -26 209,11 Kč         | -26 733,29 Kč         | -27 267,96 Kč       |
| Příjmy                | 1 293 021,54 Kč       | 1 318 881,97 Kč       | 1 345 259,61 Kč       | 1 372 164,80 Kč     |
| Odpisy                | -336 806,64 Kč        | -336 806,64 Kč        | -336 806,64 Kč        | -336 806,64 Kč      |
| Daň                   | -25 950,29 Kč         | -22 093,46 Kč         | -17 832,88 Kč         | -13 141,58 Kč       |
| CF                    | 447 436,83 Kč         | 430 994,53 Kč         | 412 831,02 Kč         | 392 831,30 Kč       |
| Kumulované CF         | -387 221,61 Kč        | 43 772,93 Kč          | 456 603,95 Kč         | 849 435,24 Kč       |
| DCF                   | 328 879,43 Kč         | 293 327,64 Kč         | 260 153,57 Kč         | 229 213,29 Kč       |
| <b>Kumulované DCF</b> | <b>-705 041,35 Kč</b> | <b>-411 713,71 Kč</b> | <b>-151 560,14 Kč</b> | <b>77 653,15 Kč</b> |

| Rok                   | 8                    | 9                    | 10                   |
|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Investice             |                      |                      |                      |
| Zaměstnanci           | -901 049,04 Kč       | -953 760,41 Kč       | -1 009 555,39 Kč     |
| Elektřina             | -91 881,41 Kč        | -96 291,71 Kč        | -100 913,72 Kč       |
| Materiál              | -27 813,32 Kč        | -28 369,59 Kč        | -28 936,98 Kč        |
| Příjmy                | 1 399 608,10 Kč      | 1 427 600,26 Kč      | 1 456 152,26 Kč      |
| Odpisy                | -336 806,64 Kč       | -336 806,64 Kč       | -336 806,64 Kč       |
| Daň                   | -7 990,96 Kč         | -2 350,66 Kč         | 0,00 Kč              |
| CF                    | 370 873,37 Kč        | 346 827,89 Kč        | 316 746,18 Kč        |
| Kumulované CF         | 1 220 308,62 Kč      | 1 567 136,51 Kč      | 1 883 882,69 Kč      |
| DCF                   | 200 371,34 Kč        | 173 500,29 Kč        | 146 714,77 Kč        |
| <b>Kumulované DCF</b> | <b>278 024,49 Kč</b> | <b>451 524,78 Kč</b> | <b>598 239,55 Kč</b> |

Tab. 6: Hotovostní toky provozu naprašovacího zařízení

Z tab. 6 je vidět, že čistá současná hodnota varianty s napařováním je po deseti letech 598 240 Kč. Stejně jako tomu bylo u předchozí varianty, tak i tady lze určit prostou i diskontovanou dobu návratnosti. Prostá doba návratnosti je v tomto případě 5 let, diskontovaná doba návratnosti je 7 let.

## 5.4 Ekonomické porovnání

Ekonomicky porovnat zařízení pro napařování a napařování lze z mnoha pohledů. V této práci jsem pro porovnání zvolil dva způsoby. Prvním způsobem je porovnání nákladů na kus. Tyto náklady vyšly pro variantu napařování 344,21 Kč a pro variantu napařování náklady vyšly 395,02 Kč. Jako druhý způsob jsem zvolil kritérium čisté současné hodnoty investic. Čistá současná hodnota investice do napařovacího zařízení vyšla 390 886 Kč, u investice do napařovacího zařízení vyšla tato hodnota 598 240 Kč.

Při porovnání nákladů na kus je vidět, že obě varianty mají velmi podobné složky nákladů a ve větší míře se liší pouze odpisech. Varianta napařování má výrazně menší náklady na odpisy a v celkových nákladech na kus tedy vychází zhruba o 50 Kč lépe.

V případě výpočtu čisté současné hodnoty bylo potřeba zvolit spoustu proměnných, avšak ty byly zvoleny pro obě varianty stejně. Z tohoto porovnání vyšlo lépe napařování. Lepší bylo hlavně díky větším ziskům z prodeje vzorků, a tedy i větším hotovostním tokům během životnosti zařízení. Jako doplňkové porovnání se nabízí doba návratnosti investic, avšak ta v obou případech vyšla stejně, tudíž toto hledisko nepomůže vybrat lepší variantu.

Vybrat ekonomicky lepší variantu je za těchto podmínek složité. Obě varianty jsou velmi podobné a liší se jen v málo ohledech. Jako relevantnější hledisko porovnání zvolím náklady na kus. Toto hledisko v mém výpočtu neuvažuje o budoucnosti, ale pouze stanovuje náklady za současných podmínek. Čistá současná hodnota již o budoucnosti uvažuje a je tedy nutné volit různé parametry. Tyto parametry lze jednoduše zvolit podle jejich trendů v minulosti, avšak budoucnost je neznámá a lze jen těžce předpovídat, takže mohou nastat situace (např. ekonomická krize nebo náhlý pokles poptávky), kdy se určité parametry rychle a nepředvídatelně mění. Navíc během provozování uvažuji ideální scénář, kdy se prodají všechny vzorky, které se vyrobí. To taky není zaručeno každý rok během provozování zařízení. Z těchto důvodů přihlédnu spíše k nákladům na kus a zvolím jako lepší variantu napařovací zařízení.

## 6. Závěr

První dvě kapitoly této práce slouží ke shrnutí teoretických základů tenkých vrstev. V první části tohoto teoretického rozboru jsem nejprve definoval pojem tenká vrstva a představil základní rozdělení. Z vlastností tenkých vrstev jsem se zaměřil hlavně na ty elektrické a mechanické, jsou to základní vlastnosti díky, kterým byly a stále jsou tenké vrstvy hojně využívány. Dále jsem přiblížil magnetické a optické vlastnosti, díky těmto vlastnostem jsou tenké vrstvy využívány stále více a více s rozvojem nových technik výroby vrstev (například jako průhledné ochranné vrstvy či v paměťových zařízeních). Ve druhé teoretické kapitole jsem popsal metody tvorby, a to od obecného postupu přes fyzikální metody až po chemické metody. Nejvíce prostoru jsem věnoval fyzikálním metodám napařování a naprašování, jelikož to jsou nejpoužívanější metody. Na konci této kapitoly jsem stručně přiblížil chemické metody a také srovnal s metodami fyzikálními.

V praktické části jsem vytvořil 25 vzorků, abych mohl potvrdit závislost světelné propustnosti na tloušťce. Jednalo se hlavně o tenké vrstvy z hliníku, které byly vytvořeny metodami napařování a naprašování. Výše zmiňovaná závislost lze velmi jednoduše ověřit, jelikož je pouhým okem vidět, že tenčí vrstvy propouštějí více světla. K těmto hliníkovým vzorkům jsem ještě vytvořil několik vzorků z jiných materiálů pro získání jiných průběhů propustnosti světla různých vlnových délek. Graf 3 ukazuje tyto průběhy, jak je vidět, tak každá vrstva z různého materiálu má svůj typický průběh. Při tvoření těchto vrstev z jiných materiálů se mi dokonce podařilo vytvořit dvě vrstvy, které zcela propouštěly všechny vlnové délky světla. Jednalo se o vrstvy z korundu a z  $MgF_2$ , vrstvy z  $MgF_2$  se díky této vlastnosti používají jako průhledné ochranné vrstvy. Dalším úkolem praktické části bylo změřit tloušťku vytvořených vrstev, to se však velmi rychle ukázalo jako problém, protože hlavním cílem bylo, aby tenké vrstvy propouštěly alespoň část světelného spektra. Naprostá většina vzorků z hliníku mělo tloušťku řádově desítky nm, což bylo těžké změřit. Na takto malých tloušťkách se může projevit nerovnost sklička, na kterém je samotná vrstva nanесena. Na obr. 21 je vidět vzorek, u kterého kvůli této nerovnosti tloušťka učít dokonce ani nešla.

V poslední části jsem porovnal metody vakuového napařování a magnetronového naprašování v provozu z ekonomického hlediska a na konci této části vybral vhodnější variantu. Pro toto rozhodnutí jsem spočítal náklady na kus a jako další kritérium jsem zvolil čistou současnou hodnotu. Z pohledu nákladů na kus vyšla lépe varianta napařování, avšak z pohledu čisté současné hodnoty vyšla lépe varianta naprašování. Nakonec jsem však přihlédl spíše k nákladům na kus, protože nemusí „předpovídat“ budoucnost a vybral tedy jako lepší variantu napařování.

## 7. Seznam použité literatury

- [1] MACH, Pavel. *Tenké vrstvy* [online]. Praha: FEL ČVUT, 2015 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/205785/mod\\_resource/content/1/Tenk%C3%A9%20vrstvy%20I.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/205785/mod_resource/content/1/Tenk%C3%A9%20vrstvy%20I.pdf)
- [2] MACH, Pavel. *Tenké vrstvy* [online]. FEL ČVUT [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/205786/mod\\_resource/content/2/Tenke\\_vrstvy.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/205786/mod_resource/content/2/Tenke_vrstvy.pdf)
- [3] KOBLÍŽEK, Vilém. *Vytváření tenkých vrstev* [online]. FEL ČVUT [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/243039/mod\\_resource/content/0/uloha\\_4%20Tenke%20vrstvy.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/243039/mod_resource/content/0/uloha_4%20Tenke%20vrstvy.pdf)
- [4] KORMUDA, Martin. *Vlastnosti tenkých vrstev a povrchů kovů* [online]. [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: [http://physics.ujep.cz/~mkormund/ufptv/5\\_Prednaska\\_UFPTV.pdf](http://physics.ujep.cz/~mkormund/ufptv/5_Prednaska_UFPTV.pdf)
- [5] HÁJEK, Michal. *Electrical resistivity* [online]. Praha: UK [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://www.mff.cuni.cz/en/kfm/experimental-facilities/electrical-resistivity>
- [6] *Fyzika kondenzovaného stavu* [online]. [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: [https://kdf.mff.cuni.cz/vyuka/kondenzovany\\_stav/materialy\\_2017/FKS\\_9.pptx](https://kdf.mff.cuni.cz/vyuka/kondenzovany_stav/materialy_2017/FKS_9.pptx)
- [7] MACH, Pavel, Jan URBÁNEK a Vlastimil SKOČIL. *Montáž v elektronice: pouzdření aktivních součástek, plošné spoje*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02392-3.
- [8] HUTCHINSON, John. *Stresses and failure modes in thin films and multilayers* [online]. Cambridge: Harvard University, 1996 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://www.seas.harvard.edu/hutchinson/papers/462-5.pdf>
- [9] KRÁLOVÁ, Magda. *Magnetické látky* [online]. [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/magnetismus/magneticke-latky>
- [10] KAMBERSKÝ, Vladimír a Pavel ŠUDA. *Feromagnetické tenké vrstvy* [online]. Praha, 1963 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: [https://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/138544/PokrokyMFA\\_08-1963-2\\_1.pdf](https://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/138544/PokrokyMFA_08-1963-2_1.pdf)



- [11] KŘEPELKA, Jaromír. *Přehled použití tenkých vrstev* [online]. 2014 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: [ftp://afnet.upol.cz/Public/AFNET/literatura/01-prehled\\_pouziti.pdf](ftp://afnet.upol.cz/Public/AFNET/literatura/01-prehled_pouziti.pdf)
- [12] *Tenké vrstvy* [online]. ZČU [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: [https://www.opi.zcu.cz/tenke\\_vrstvy\\_fel\\_1.pdf](https://www.opi.zcu.cz/tenke_vrstvy_fel_1.pdf)
- [13] *Tenké vrstvy* [online]. ZČU [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: [https://www.opi.zcu.cz/tenke\\_vrstvy\\_sma.pdf](https://www.opi.zcu.cz/tenke_vrstvy_sma.pdf)
- [14] EKRT, Ondřej. *Technologie a vlastnosti tenkých vrstev, tenkovrstvé senzory* [online]. Praha: VŠCHT, 2015 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/11814591-Technologie-a-vlastnosti-tenkych-vrstev-tenkovrstve-senzory.html>
- [15] KRAJOVIČ, Jan. *Vytváření tenkých vrstev pro aplikace pokročilých oxidačních procesů s využitím kovových dopantů*. České Budějovice, 2014. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích.
- [16] MACH, Pavel. *Napařování tenkých vrstev* [online]. FEL ČVUT [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/205787/mod\\_resource/content/1/Naparovani\\_tenkych\\_vrstev.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/205787/mod_resource/content/1/Naparovani_tenkych_vrstev.pdf)
- [17] MACH, Pavel. *Naprašování tenkých vrstev* [online]. FEL ČVUT [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: [https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/205789/mod\\_resource/content/1/Naprasovani.pdf](https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/205789/mod_resource/content/1/Naprasovani.pdf)
- [18] HORYNOVÁ, Eva. *Nevodivé tenké vrstvy vytvořené naprašováním*. Praha, 2017. Diplomová práce. FEL ČVUT.
- [19] *Princip CVD* [online]. [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <http://z-moravec.net/chemie/cvd/princip-cvd/>
- [20] CEYNOWA, Przemysław. *Plasma enhanced CVD* [online]. Koszalin: Koszalin University of Technology [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: [https://www.integrita.zcu.cz/download/skola1/kosalin\\_prez2.pdf](https://www.integrita.zcu.cz/download/skola1/kosalin_prez2.pdf)
- [21] *Metody depozice povlaků - CVD* [online]. [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: [http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT\\_7.pdf](http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_7.pdf)
- [22] VANĚK, Petr. *Tenkovrstvé technologie*. Praha, 2019. Bakalářská práce. FEL ČVUT.

## 8. Seznam obrázků

Obr. 1: Příklady pnutí [4]

Obr. 2: PVD a CVD [12]

Obr. 3: Uspořádání uvnitř recipientu [3]

Obr. 4: Uspořádání pro naprašování [17]

Obr. 5: Princip CVD [12]

Obr. 6: Vlevo napařená vrstva, vpravo naprášená vrstva

Obr. 7: Napařovací zařízení v laboratoři na Katedře elektrotechnologie [3]

Obr. 8: Napařovací zařízení v laboratoři na Katedře elektrotechnologie [22]

Obr. 9: Napařené vzorky z grafu

Obr. 10: Názorné zobrazení propustnosti u nejtenčích vzorků

Obr. 11: Naprášené vzorky z grafu

Obr. 12: Propustnost naprášených vzorků

Obr. 13: Naprášené vzorky

Obr. 14: Napařené vzorky z mědi a stříbra

Obr. 15: Napařené vzorky ze zlata

Obr. 16: Tloušťka naprášeného vzorku z  $MgF_2$

Obr. 17: Tloušťka napařené vzorku z Cu

Obr. 18: Tloušťka naprášeného vzorku z Al

Obr. 19: Tloušťka napařené vzorku z Al drátku délky 2 cm

Obr. 20: Tloušťka napařené vzorku z Al drátku délky 0,5 cm

Obr. 21: Tloušťka napařené vzorku z Al drátku délky 1 cm